2018 국토교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종보고서【별첨】

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

연구개발의 상세 내용

2019. 02. 07.

▪ 주관연구기관 / 연세대학교
▪ 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
▪ 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

〈 목 차 〉

제1장. 구조재 및 비구조재의 최적지진취약도 평가 기법 개발 ····· 1

1절. 구조재 및 비구조재의 지진취약도 데이터베이스 구축 ····· 1

2절. 주요시설물의 프로토타입 모델 개발 ····· 47

3절. 스펙트럼기반 지진하중시나리오 작성 ····· 53

4절. 구조재 및 비구조재 통합 지진취약도평가 기법 개발 ····· 103

5절. 최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출 ····· 140

6절. 결론 ····· 153

제2장. 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발 ····· 154

1절. 구조재 및 비구조재의 목표성능수준 구축 ····· 154

2절. 구조재 및 비구조재의 손상도 평가 ····· 168

3절. 손상도를 고려한 보수보강 정책 수립 ····· 198

4절. 구조재 및 비구조재 통합 지진손실평가 기법 개발 ····· 234

5절. 결론 ····· 246

제3장. 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발 ····· 247

1절. 실제 지진피해사례 손상-손실 데이터베이스 구축 ····· 247

2절. 중요요인을 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발 ····· 260

3절. 건물 수리비용 업데이트 기법 개발 ····· 276

4절. 결론 ····· 281

[부록1] 요소정보 지진취약도 데이터베이스 ····· 282

[부록2] 경주지진 지진손실 데이터베이스 ····· 396

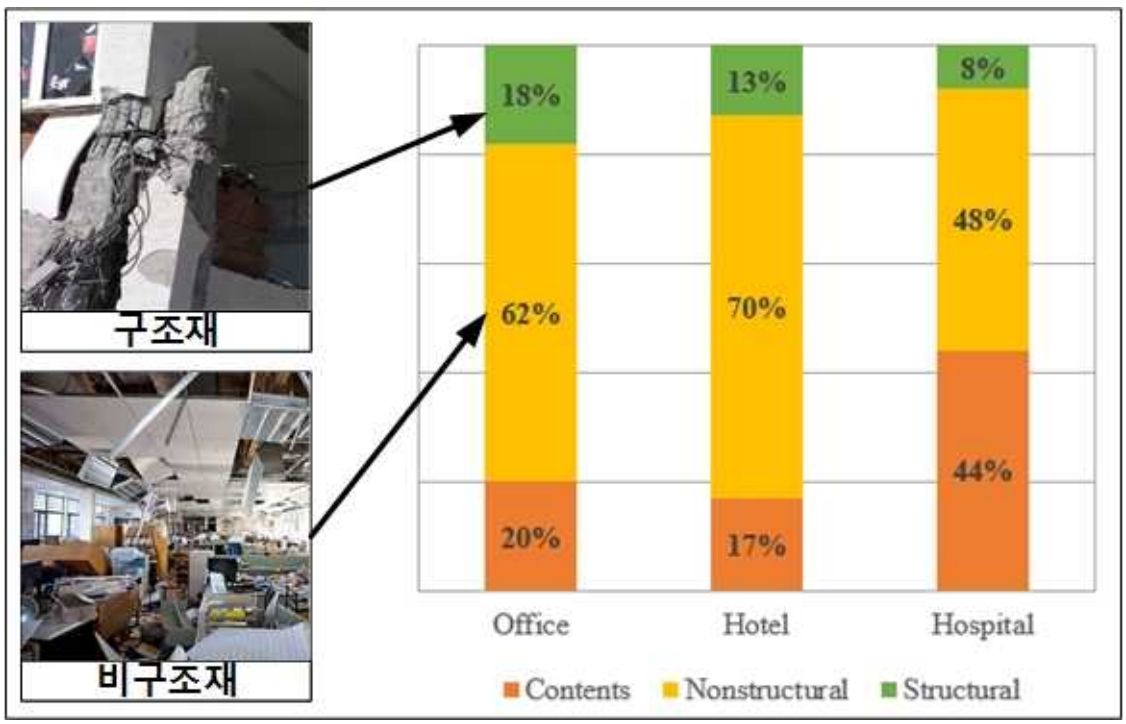
[부록3] 포항지진 지진손실 데이터베이스 ····· 399

제1장. 구조재 및 비구조재의 최적지진취약도 평가 기법 개발

1절. 구조재 및 비구조재의 지진취약도 데이터베이스 구축

건축구조물은 외력에 대해 저항하는 기둥, 보, 슬라브와 같은 구조재와 건축물의 용도에 따른 기계설비, 천정, 조명, 등과 같은 구조재 의외의 비구조재로 구성된다. 건축구조물의 손상과 손실과의 관계를 규명하기 위해선, 건축물에 손상이 발생할 수 있는 요소를 정리하고, 요소의 손상정보에 따른 수리비용 및 수리기간에 대한 데이터베이스를 구축해야 한다.

<그림 1.1>는 2003년 PEER Center에서 건축물의 용도별로 구조재 및 비구조재의 지진손실액을 조사한 자료로, 지진에 의한 피해액은 구조재보다 비구조재와 비구조재로 분류할 수 있는 contents에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이렇듯 구조재와 비구조재를 나누어 요소정보를 분류하는 이유는, 구조재의 손실과 관련된 손상을 발생시키는 지진강도 및 지진반응계수와 비구조재의 손상을 발생시키는 지진강도 및 지진반응계수에는 큰 차이가 있기 때문이다. 본 장에서는 기존 연구에서 사용하는 구조재와 비구조재의 분류들을 조사하고, 본 연구에 적합한 분류체계를 수립하여 건축구조물을 구성하는 요소정보에 대한 데이터베이스를 구축하고자 한다.



<그림 1.1> 건축물 용도별 구조재 및 비구조재의 지신손실액 (PEER Center, 2003)

1. 구조재 및 비구조재의 정의

건축물의 지진에 의한 손실평가는 1970년대에 시작되기 시작하였으며, 건축물의 손상이 적을 때는 건축물을 구성하는 각 요소의 수리비용을 합산하여 평가하거나, 건축물의 손상이 붕괴나 붕괴직전까지 받은 경우는 건축물 전체를 대체하는 비용으로 산정한다. 즉, 건축물의 손상에 의한 손실을 평가하기 위해선 우선적으로 건축물을 구성하는 각 요소에 대한 inventory data를 확보하는 것이 중요하고, 본 연구에서 정의하는 요소정보는 건축구조물을 구성하는 구조재(구조요소) 및 비구조재(비구조요소)를 의미한다. 예를 들면, 건축구조물의 외력을 저항하는 요소인 기둥, 보, 슬라브와 같은 요소를 구조요소라 할 수 있고, 파티션, 기계설비, 가구 등과 같이 건축물의 용도에 따른 구조재 의외의 요소를 비구조요소라 할 수 있다. 앞서 언급했다시피, 지진에 대한 손상을 손실로 연결시키기 위해선, 먼저 구조재와 비구조재에 대한 분류체계를 수립하여, 각 요소정보에 대한 손상을 지진강도와 지진반응계수로 표현하는 과정이 선행되어야 한다.

본 장에서는 먼저 기존 연구나 기준에서 구조요소와 비구조요소를 분류하는 체계에 대해 분석을 진행하였고, 각 분류체계에 대해서 아래의 관점에 대해 평가를 진행하였다.

1. 명확한 정의 (Clear definitions)
2. 공통된 취약함수 (Common fragility functions)
3. 내진성능의 차이 (Differences seismic performance)
4. 식별성 (Observable)
5. 단순성 (Simple)
6. 표준성 (Standard)
7. 사용성 (User-friendly)

구조요소와 비구조요소의 분류에 대한 명확한 정의는 건축물의 각 요소정보를 분류하는데 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 만약 어떠한 요소가 동일한 damage states를 공유하고 있으며, 또한 손상을 발생시키는 지진강도와 지진반응계수가 동일하다면, 공통된 취약함수를 가진다고 생각할 수 있다. 이러한 공통된 취약함수를 가지는 구조요소나 비구조요소를 동일한 요소로 분류하는 것은 손상평가나 손실평가의 관점에서 유리하다고 할 수 있다. 분류된 체계를 내진성능의 차이의 관점에서 평가를 진행하는 것은 공통된 취약함수의 관점에서 비슷하다고 할 수 있지만, 내진성능의 차이는 각 요소의 분류가 ductile요소와 non-ductile요소로 분류될 수 있는지 여부를 평가하는 기준이다. 그 외의 식별성, 단순성, 표준성, 사용성에 대해 각 분류체계에 대한 평가를 진행하였다.

가. 구조요소

국내의 건축설계기준인 KBC 2016이나, 국외의 기준인 IBC 2015, ASCE 7-16의 경우, 구조요소를 따로 나누는 기준은 없고, 기초구조, 콘크리트구조, 조적식구조, 강구조, 합성구조, 목구조, 기타 구조와 같이 건축구조물을 구성하는 재료에 따라 구조요소의 설계에 대해 규정하고 있다. 여기서 규정하고 있는 구조요소는 기둥, 보, 슬라브, 접합부, 전단벽 등과 같은 요소이며, 이러한 구조요소를 따로 분류하는 체계에 대한 내용은 없다.

구조요소에 대해 분류한 기존 연구들을 살펴보면, 대부분의 경우, 구조요소를 건축물의 재료 및 용도에 따라 건축물의 단위로 분류하고 있는 경우가 대다수이다. 하지만, FEMA P-58에서 사용하는 UNIFORMAT-Ⅱ와 NISTIR 6389의 경우에는 구조요소를 element level에서 분류하고 있다. 본장에서는 구조요소에 대해 분류된 아래의 연구와 기준에 대한 분석을 진행하였다.

- ATC-13 (Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC 1985)
- EMS-98 (European Macroseismic Scale, Grunthal 1998)
- HAZUS (FEMA 2003)
- RISK-UE (The European RISK-UE Project, 2001-2004)
- PAGER-STR (Jaiswal and Wald, 2008)
- FEMA P-58 (FEMA 2012)
- SYNER-G (2013)

(1) ATC-13

ATC-13은 캘리포니아의 건축물 및 시설물의 분류 체계를 수립하기 위해 처음 수행되었던 연구이다. 여기선 재료, 지반조건, 기초형태, 높이, 구조시스템 등에 따라 구주요소를 건축물의 단위로 분류를 하였다. 건축물을 포함한 시설물을 총 78개의 category로 분류하였으며, 이 중 건축물은 40개이며, 다리, 타워 등의 구조물은 38개로 분류를 하였다. ATC-13에서 분류하는 구조요소인 40개의 건축물에 대한 분류를 <표 1.1>에 정리하였다.

ATC-13에서는 건축물의 구조요소를 건축물의 단위로 분류하였고, 분류의 기준은 먼저 재료에 따라 분류하고, 이후 구조시스템으로 분류, 최종적으로 층수에 따라 분류한 것을 알 수 있다. 분류에 사용된 재료는 크게 목조, 강구조, 조적조, 콘크리트조, PC로 나눈 것을 알 수 있고, 구조시스템은 전단벽, 모멘트골조, 브레이스 등으로 나눈 것을 알 수 있다. 또한 높이에 따라 다르게 구조요소를 분류하였는데, 저층(Low Rise)은 1~3층, 중층(Medium Rise)은 4~7층, 고층(High Rise)는 8층 이상으로 분류하였다. ATC-13의 분류체계는 건축구조물이 지어진 연도를 고려하지 못해, 건축물의 내진설계의 정도에 따른 내진성능의 차이가 지진취

약도를 구별할 수 없다. 더욱이 캘리포니아 지역에 한정해 분류된 기준이기 때문에, 식별성과 표준성 관점에서 부적합 하다고 할 수 있다.

<표 1.1> ATC-13의 구조요소 분류

1. Wood Frame (Low Rise)
2. Light Metal (Low Rise)
3. Unreinforced Masonry (Bearing Wall)
Low Rise[1], Medium Rise[2]
4. Unreinforced Masonry (with Load Bearing Wall)
Low Rise, Medium Rise, High Rise[3]
5. Reinforced Concrete Shear Wall (with Moment-Resisting Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
6. Reinforced Concrete Shear Wall (without Moment-Resisting Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
7. Reinforced Masonry Shear Wall (with Moment-Resisting Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
8. Reinforced Masonry Shear Wall (without Moment-Resisting Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
9. Braced Steel Frame
Low Rise, Medium Rise, High Rise
10. Moment-Resisting Steel Frame (Perimeter Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
11. Moment-Resisting Steel Frame (Distributed Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
12. Moment-Resisting Ductile Concrete Frame (Distributed Frame)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
13. Precast Concrete (other than Tilt-up)
Low Rise, Medium Rise, High Rise
14. Long-Span (Low Rise)
15. Tilt-up (Low Rise)
16. Mobile Homes

1) Low Rise: 1-3 stories, 2) Medium Rise: 4-7 stories, 3) High Rise: 8+ stories

(2) EMS-98

EMS-98에서는 건축물의 구조요소를 총 15개로 분류하고 있고 그 내용을 <표 1.2>에 정리하였다. 분류하는 기준은 먼저 재료로 분류하고, 재료의 성질이나 구조시스템에 따라 분류한다. 재료는 총 4가지로 분류하는데, 조적조, 철근콘크리트조, 강구조, 목조로 분류한다. EMS-98은 조적조의 경우 사용된 재료의 성질에 따라 다양하게 분류하는 것을 알 수 있다. 또한 철근콘크리트조는 내진설계의 유무와 정도에 따라 분류함을 알 수 있다. 강구조와 목조의 경우 단순하게 하나로 분류한다. ATC-13과 비교하면, EMS-98의 분류체계는 굉장히 단순하고, 구조물의 층수에 상관없이 분류함을 알 수 있다. 이러한 분류체계는 본 연구에서 제시하는 7개의 관점에서 만족되는 항목이 거의 없다고 할 수 있다.

<표 1.2> EMS-98의 구조요소 분류

Masonry	Rubble stone, fieldstone
	Adobe (earth brick)
	Simple stone
	Massive Stone
	Unreinforced, with manufactured stone units
	Unreinforced, with RC floors
	Reinforced or confined
Reinforced Concrete (RC)	Frame without earthquake-resistant design (ERD)
	Frame with moderate level of ERD
	Frame with high level of ERD
	Walls without ERD
	Walls with moderate level of ERD
	Wall with high level of ERD
Steel	Steel Structures
Wood	Timber Structures

(3) HAZUS

HAZUS에서는 <표 1.3>과 같이 건축물의 구조요소를 총 36개로 분류하고 있다. 또한 HAZUS에서는 비구조요소에 대해, <표 1.3>에 따라 분류된 구조요소인 건축물의 type에 따라 비구조요소에 대한 지진취약도를 함께 제공하고 있다. HAZUS의 구조요소에 대한 분류체계는 ATC-13보다 더 세부화 된 방식은 맞지만, 실제 HAZUS를 사용하는데 있어서 정의가 되지 않은 구조요소에 대해선, 어떠한 가이드라인이나 기준이 없어 새로운 구조요소를 추가하는데 있어 한계가 있다.

<표 1.3> HAZUS의 구조요소 분류

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame (≦ 5,000 sq. ft.)		All	1	14
2	W2	Wood, Greater than 5,000 sq. ft.		All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2M		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame		All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4-7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-2	1	15
35	URM M		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

(4) RISK-UE

RISK-UE에 따른 구조요소의 분류체계는 <표 1.4>와 같다. RISK-UE의 분류체계는 EMS-98의 분류체계를 업그레이드한 것으로, 조적조에 대한 구조요소가 자세히 분류되어 있다. 또한 EMS-98과 달리, 구조물의 층수에 따라 세부적으로 구조요소를 분류한 것을 알 수 있다. 총 65개로 구조요소를 분류하고 있으며, 층수에 따른 분류를 제외하면 총 23개의 class로 구조요소를 분류하고 있다. 구조요소를 층수에 따라 분류하는 방식은 HAZUS와 비슷하며, 조적조에 대해 세분화하여 분류한 방식은 EMS-98과 비슷하다고 할 수 있다.

<표 1.4> RISK-UE의 구조요소 분류

No.	Label	Description	Rise	Average No. of Stories
1	M11L	Rubble Stone, fieldstone	Low-Rise	1-2
2	M11M		Mid-Rise	3-5
3	M12L	Simple Stone	Low-Rise	1-2
4	M12M		Mid-Rise	3-5
5	M12H		High-Rise	6+
6	M13L	Massive Stone	Low-Rise	1-2
7	M13M		Mid-Rise	3-5
8	M13H		High-Rise	6+
9	M2L	Adobe	Low-Rise	1-2
10	M31L	Wooden slabs unreinforced masonry (URM)	Low-Rise	1-2
11	M31M		Mid-Rise	3-5
12	M31H		High-Rise	6+
13	M32L	Masonry vaults URM	Low-Rise	1-2
14	M32M		Mid-Rise	3-5
15	M32H		High-Rise	6+
16	M33L	Composite slabs URM	Low-Rise	1-2
17	M33M		Mid-Rise	3-5
18	M33H		High-Rise	6+
19	M34L	RC slabs URM	Low-Rise	1-2
20	M34M		Mid-Rise	3-5
21	M34H		High-Rise	6+
22	M4L	Reinforced or confined masonry	Low-Rise	1-2
23	M4M		Mid-Rise	3-5
24	M4H		High-Rise	6+
25	M5L	Overall strengthened masonry	Low-Rise	1-2
26	M5M		Mid-Rise	3-5
27	M5H		High-Rise	6+
28	RC1L	RC moment frames	Low-Rise	1-2

No.	Label	Description	Rise	Average No. of Stories
29	RC1M		Mid-Rise	3-5
30	RC1H		High-Rise	6+
31	RC2L	RC shear walls	Low-Rise	1-2
32	RC2M		Mid-Rise	3-5
33	RC2H		High-Rise	6+
34	RC31L	Regularly infilled RC frames	Low-Rise	1-2
35	RC31M		Mid-Rise	3-5
36	RC31H		High-Rise	6+
37	RC32L	Irregular RC frames	Low-Rise	1-2
38	RC32M		Mid-Rise	3-5
39	RC32H		High-Rise	6+
40	RC4L	RC dual systems	Low-Rise	1-2
41	RC4M		Mid-Rise	3-5
42	RC4H		High-Rise	6+
43	RC5L	Precast concrete tilt-up walls	Low-Rise	1-2
44	RC5M		Mid-Rise	3-5
45	RC5H		High-Rise	6+
46	RC6L	Precast concrete frames with concrete shear walls	Low-Rise	1-2
47	RC6M		Mid-Rise	3-5
48	RC6H		High-Rise	6+
49	S1L	Steel moment frames	Low-Rise	1-2
50	S1M		Mid-Rise	3-5
51	S1H		High-Rise	6+
52	S2L	Steel braced frames	Low-Rise	1-2
53	S2M		Mid-Rise	3-5
54	S2H		High-Rise	6+
55	S3L	Steel frames with URM infill walls	Low-Rise	1-2
56	S3M		Mid-Rise	3-5
57	S3H		High-Rise	6+
58	S4L	Steel frames with cast-in-place concrete shear walls	Low-Rise	1-2
59	S4M		Mid-Rise	3-5
60	S4H		High-Rise	6+
61	S5L	Steel and RC composite systems	Low-Rise	1-2
62	S5M		Mid-Rise	3-5
63	S5H		High-Rise	6+
64	WL	Wooden structures	Low-Rise	1-2
65	WM		Mid-Rise	3-5

(5) PAGER-STR

PAGER-STR은 US Geological Survey's Prompt Assessment of Global Earthquake for Response (PAGER)의 프로그램으로 응급상황에서 지진손실에 대한 빠른 평가를 통해 의사결정을 도와주는 툴이다. PAGER에서 분류한 구조요소는 총 89개로 전 세계의 건축구조물에 대한 구조요소를 정리하여 분류를 진행한 결과물이다. 그 결과, HAZUS와 RISK-UE의 분류체계를 혼합하여 구조요소를 분류한 것으로 생각된다. 왜냐하면, 층수를 분류하는 기준과 목조, 강구조, 콘크리트조에 대한 분류는 HAZUS와 비슷하며, 조적조에 대한 분류는 RISK-UE와 비슷하기 때문이다.

<표 1.5> PAGER-STR의 구조요소 분류

No.	Label	Description	Average No. of stories	Typical No. of stories
1	**W**	**WOOD**	**1-3**	**2**
2	W1	Wood Frame, Wood Stud, Wood, Stucco, or Brick Veneer	1-2	1
3	W2	Wood Frame, Heavy Members, Diagonals or Bamboo Lattice, Mud Infill	All	1
4	W3	Wood Frame, Prefabricated Steel Stud Panels, Wood or Stucco Exterior Walls	2-3	2
5	W4	Log building	1-2	1
6	**S**	**STEEL**	**All**	**1**
7	S1	Steel Moment Frame	All	1
8	S1L	Low-Rise	1-3	2
9	S1M	Mid-Rise	4-7	5
10	S1H	High-Rise	8+	13
11	S2	Steel Braced Frame	All	1
12	S2L	Low-Rise	1-3	2
13	S2M	Mid-Rise	4-7	5
14	S2H	High-Rise	8+	13
15	S3	Steel Light Frame	All	1
16	S4	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	All	1
17	S4L	Low-Rise	1-3	2
18	S4M	Mid-Rise	4-7	5
19	S4H	High-Rise	8+	13
20	S5	Steel Frame with Un-reinforced Masonry Infill Walls	All	1
21	S5L	Low-Rise	1-3	2
22	S5M	Mid-Rise	4-7	5
23	S5H	High-Rise	8+	13
24	**C**	**REINFORCED CONCRETE**	**All**	**1**
25	C1	Ductile Reinforced Concrete Moment Frame	All	1
26	C1L	Low-Rise	1-3	2
27	C1M	Mid-Rise	4-7	5
28	C1H	High-Rise	8+	13

No.	Label	Description	Average No. of stories	Typical No. of stories
29	C2	Reinforced Concrete Shear Walls	All	1
30	C2L	Low-Rise	1-3	2
31	C2M	Mid-Rise	4-7	5
32	C2H	High-Rise	8+	13
33	C3	Non-ductile Reinforced Concrete Frame with Masonry Infill Walls	All	1
34	C3L	Low-Rise	1-3	2
35	C3M	Mid-Rise	4-7	5
36	C3H	High-Rise	8+	13
37	C4	Non-ductile Reinforced Concrete Frame without Masonry Infill Walls	All	1
38	C4L	Low-Rise	1-3	2
39	C4M	Mid-Rise	4-7	5
40	C4H	High-Rise	8+	13
41	C5	Steel Reinforced Concrete (Steel Members Encased in Reinforced Concrete)	All	1
42	C5L	Low-Rise	1-3	2
43	C5M	Mid-Rise	4-7	5
44	C5H	High-Rise	8+	13
45	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls	All	1
46	PC2	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	All	1
47	PC2L	Low-Rise	1-3	2
48	PC2M	Mid-Rise	4-7	5
49	PC2H	High-Rise	8+	13
50	**RM**	**REINFORCED MASONRY**	**All**	**1**
51	RM1	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	All	1
52	RM1L	Low-Rise	1-3	2
53	RM1M	Mid-Rise (4+ stories)	4-7	5
54	RM2	Reinforced Masonry Bearing Walls with Concrete Diaphragms	All	1
55	RM2L	Low-Rise	1-3	2
56	RM2M	Mid-Rise	4-7	5
57	RM2H	High-Rise	8+	13
58	**MH**	**MOBILE HOME**	**All**	**1**
59	M	MUD WALLS	1	1
60	M1	Mud walls without horizontal wood elements	1-2	1
61	M2	Mud walls with horizontal wood elements	1-3	2
62	**A**	**ADOBE BLOCK (UNBAKED DRIED MUD BLOCK) WALLS**	**1-2**	**1**
63	A1	Adobe block, mud mortar, wood roof and floors	1-2	1
64	A2	Same as A1, bamboo, straw, and thatch roof	1-2	1
65	A3	Same as A1, cement-sand mortar	1-3	2
66	A4	Same as A1, reinforced concrete bond beam, cane and mud	1-3	2

No.	Label	Description	Average No. of stories	Typical No. of stories
		roof		
67	A5	Same as A1, with bamboo or rope reinforcement	1-2	1
68	**RE**	**RAMMED EARTH/PNEUMATICALLY IMPACTED STABILIZED EARTH**	**1-2**	**1**
69	**RS**	**RUBBLE STONE (FIELD STONE) MASONRY**	**All**	**1**
70	RS1	Local field stones dry stacked (no mortar). Timber floors. Timber, earth, or metal roof.	1-2	1
71	RS2	Same as RS1 with mud mortar.	1-2	1
72	RS3	Same as RS1 with lime mortar.	1-3	2
73	RS4	Same as RS1 with cement mortar, vaulted brick roof and floors	1-3	2
74	RS5	Same as RS1 with cement mortar and reinforced concrete bond beam.	1-3	2
75	**DS**	**RECTANGULAR CUT STONE MASONRY BLOCK**	**All**	**1**
76	DS1	Rectangular cut stone masonry block with mud mortar, timber roof and floors	1-2	1
77	DS2	Same as DS1 with lime mortar	1-3	2
78	DS3	Same as DS1 with cement mortar	1-3	2
79	DS4	Same as DS2 with reinforced concrete floors and roof	1-3	2
80	**UFB**	**UNREINFORCED FIRED BRICK MASONRY**	**All**	**1**
81	UFB1	Unreinforced brick masonry in mud mortar without timber posts	1-2	1
82	UFB2	Unreinforced brick masonry in mud mortar with timber posts	1-2	1
83	UFB3	Unreinforced fired brick masonry, cement mortar, timber flooring, timber or steel beams and columns, tie courses (bricks aligned perpendicular to the plane of the wall)	1-3	2
84	UFB4	Same as UFB3, but with reinforced concrete floor and roof slabs	1-3	2
85	UCB	UNREINFORCED CONCRETE BLOCK MASONRY, LIME/CEMENT MORTAR	All	1
86	**MS**	**MASSIVE STONE MASONRY IN LIME/CEMENT MORTAR**	**All**	**1**
87	**TU**	**PRECAST CONCRETE TILT-UP WALLS** Precast Wall Panel Construction (Mid to high rise, Former Soviet Union style)	**All**	**1**
88	**INF**	**INFORMAL CONSTRUCTIONS (PARTS OF SLUMS/SQUATTERS)** Constructions made of wood/plastic sheets/GI Sheets/light metal or composite etc., not conforming to engineering standards.	**All**	**1**
89	UNK	Unknown Category (Not specified)	All	1

(6) FEMA P-58

FEMA P-58에서 구조요소를 분류하는 체계는 UNIFORMAT-Ⅱ의 revision인 NISTIR 6389의 분류체계를 따른다. NISTIR 6389의 분류체계는 구조요소를 건축물 레벨에서 분류하지 않고, 부재레벨에서 요소를 분류한다. NISTIR 6389의 분류체계는 총 4단계로 아래와 같이 분류하고 있다.

- Level 1: Major Group Elements (A부터 F까지 총 6개)
- Level 2: Group Elements (그룹마다 다름)
- Level 3: Individual Elements (그룹마다 다름)
- Level 4: Sub-Elements (그룹마다 다름)

NISTIR 6389의 큰 특징은 사용자가 분류체계를 쉽게 수정하고, 추가할 수 있다는 점이다. 또한 건축물 레벨이 아닌 부재레벨에서 요소를 추가하고 수정할 수 있기 때문에, 사용자에 따른 자유도가 높다고 할 수 있다. Level 1에 해당하는 분류체계는 A부터 F까지 총 6개로 분류하며, 이 중 A와 B가 구조요소에 해당한다. <표 1.6>은 NISTIR 6389에서 A와 B에 대한 구조요소를 level 3까지 정리한 것이다. Level 4의 경우는 부재의 크기, 접합상세 등에 따라 다양하게 추가 및 수정이 가능하기 때문에, 수정이 어려운 level 3까지 정리를 하였다. NISTIR 6389를 사용하는 FEMA P-58에서는 A부터 B까지 구조요소를 총 355개로 분류하고 있으며, 각 구조요소에 대해 damage state에 따른 지진취약도 함수를 제공하고 있다.

<표 1.6> FEMA-P58의 구조요소 분류체계인 NISTIR 6389의 구조요소 분류체계

Level 1 **Major Group Elements**	**Level 2** **Group Elements**	**Level 3** **Individual Elements**
A Substructure	A10 Foundation	A1010 Standard Foundation
		A1020 Special Foundation
		A1030 Slab on Grade
	A20 Basement Construction	A2010 Basement Excavation
		A2020 Basement Walls
B Shell	B10 Super Structure	B1010 Floor Construction
		B1020 Roof Construction
		B1030 Structural Steel Elements
		B1040 Reinforced Concrete Elements
		B1050 Masonry Vertical Elements
		B1060 Cold-formed Steel Structural Elements
		B1070 Wood Light Frame Structural Elements
	B20 Exterior Enclosure	B2010 Exterior Wall
		B2020 Exterior Windows
		B2030 Exterior Doors
	B30 Roof Elements	B3010 Roof Coverings
		B3020 Roof Openings

(7) SYNER-G

SYNER-G의 분류체계는 조적조와 철근콘크리트구조물을 대상으로 구조요소를 분류하며, 하중전달 메커니즘, 사용재료, 수평 및 수직 비정형성 등을 포함하여 총 10개의 category로 건축물 레벨에서 구조요소를 분류한다. <표 1.7>은 SYNER-G의 구조요소 분류체계를 정리한 것으로 어떠한 구조요소는 아래와 같은 형태로 분류된다.

- FRM1-FRM2/FRMM1-FRMM2/P/E/C-CM/D/FS-FSM/RS-RSM/HL-NS/CL
- 하나의 구조요소(건축물 레벨)의 예를 들면 다음과 같다.
- MRF/C-RC/X/X/RI-FB-H%/ND/R-RC/X/L-2/NS: moment resisting frame, in reinforced concrete with regular external infill panels in brick with a high percentages of voids, with non-ductile design details, with rigid reinforced concrete floor, low-rise, 2stories, not designed to a seismic code;

위의 예와 같이 SYNER-G의 분류체계를 이용하면 건축물레벨에서 구조요소에 대한 상세한 분류가 가능함을 알 수 있다. 특징이 되는 점은 건축물의 층수 분류를 다른 분류체계와 달리 low-rise, mid rise, high-rise, tall 4단계로 분류한다는 점이다. HAZUS와 RISK-UE, FEMA P-58에서는 구조요소의 분류에 code level을 직접적으로 적용하지 않고 각 요소의 지진취약도를 평가할 때, 지진취약도 함수를 결정하는 median과 dispersion값에 code level을 반영한다. 반면, SYNER-G는 code level에 따른 구조요소 직접적으로 분류한다. SYNER-G의 분류체계가 유럽지역의 분류체계인 EMS-98, RISK-UE보다 진보된 분류체계로 생각되지만, 철근콘크리트조와 조적조에 한정되어 있는 한계가 있다.

<표 1.7> SYNER-G의 구조요소 분류체계

CATEGORY	CLASSIFICATION
Force Resisting Mechanism (FRM1)	**Force Resisting Mechanism (FRM2)**
• Moment Resisting Frame (MRF)	• Embedded beams (EB)
• Structural Wall (W)	• Emergent beams (EGB)
• Flat Slab (FS)	
• Bearing Walls (BW)	
• Precast (P)	
• Confined Masonry (CM)	
FRM Material (FRMM1)	**FRM Material (FRMM2)**
• Concrete (C)	• Reinforced Concrete (RC)
• Masonry (M)	• Unreinforced Masonry (URM)
	• Reinforced Masonry (RM)
	• High strength concrete (>50MPa) (HSC)
	• Average strength concrete (20-50 MPa) (ASC)
	• Low strength concrete (<20 MPa) (LSC)
	• Adobe (A)
	• Fired brick (FB)
	• Hollow clay tile (HC)

CATEGORY	CLASSIFICATION
	• Stone (S)
	• High yield strength reinforcing bars (>300MPa) (HY)
	• Low yield strength reinforcing bars (<300MPa) (LY)
	• Classification of reinforcing bars based on EC2 (A,B,C)
	• Lime mortar (LM)
	• Cement mortar (CM)
	• Mud mortar (MM)
	• Smooth rebars (SB)
	• Non-smooth rebars (NSB)
	• Concrete Masonry Unit (CMU)
	• Autoclaved Aerated Concrete (AAC)
	• High % of voids (H%)
	• Low % of voids (L%)
	• Regular Cut (Rc)
	• Rubble (Ru)
Plan (P)	
• Regular (R)	
• Irregular (IR)	
Elevation (E)	
• Regular geometry (R)	
• Irregular geometry (IR)	
Cladding (C)	**Cladding Characteristics (CM)**
• Regular infill vertically (RI)	• Fired brick masonry (FB)
• Irregular infill vertically (IRI)	• High % voids (H%)
• Bare (B)	• Low % voids (L%)
	• Autoclaved Aerated Concrete (AAC)
	• Precast concrete (PC)
	• Glazing (G)
	• Single layer of cladding (SL)
	• Double layer of cladding (DL)
	• Open first floor (Pilotis) (P)
	• Open upper floor (U)
Detailing (D)	
• Ductile (D)	
• Non-ductile (ND)	
• With tie rods/beams (WTB)	
• Without tie rods/beams (WoTB)	
Floor System (FS)	**Floor System Material (FSM)**
• Rigid (R)	• Reinforced concrete (RC)
• Flexible (F)	• Steel (S)
	• Timber (T)
Roof System (RS)	**Roof System Material (RSM)**
• Peaked (P)	• Timber (Ti)
• Flat (F)	• Thatch (Th)
• Gable End Walls (G)	• Corrugated Metal Sheet (CMS)
Height Level (HL)	**Number of stories (NS)**
• Low-rise (1-3) (L)	[Here the number of stories is explicitly given, if known]
• Mid-rise (4-7) (M)	
• High-rise (8-19) (H)	
• Tall (20+)(Ta)	
Code Level (CL)	
• None (NC)	
• Low (<0.1g) (LC)	
• Moderate (0.1-0.3g) (MC)	
• High (>0.3g) (HC)	

나. 비구조 요소

비구조요소는 앞서 분류한 건축물의 구조요소 외의 요소를 의미하며, 국내 건축설계기준인 KBC 2016과 국외의 기준인 IBC 2015, ASCE 7-16의 경우, 비구조요소에 대한 내용을 따로 정의하고 있다. 비구조요소에 대해 분류한 기존 연구들을 살펴보면, 지진취약도에 따라 비구조요소를 분류하고, 비구조요소를 큰 단위로 분류하는 경우가 대다수이다. 하지만, 구조요소와 비슷하게 FEMA P-58에서 사용하는 UNIFORMAT-Ⅱ와 NISTIR 6389의 경우에는 비구조요소를 element level에서 분류하고 있다. 특히 SYNER-G의 비구조요소 분류체계는 건축구조물에 대한 비구조요소의 분류체계를 수립하고 있지 않지만, essential facility에 해당하는 병원과 소방서의 비구조요소에 대한 분류체계를 수립하고 있다. 연구에서는 본장에서는 비구조요소에 대해 분류된 아래의 연구와 기준에 대한 분석을 진행하였다.

- ❍ KBC 2016
- ❍ IBC 2015, ASCE 7-16
- ❍ HAZUS (FEMA 2003)
- ❍ FEMA P-58 (FEMA 2012)
- ❍ SYNER-G (2013)

(1) KBC 2016

KBC 2016에서는 구조요소 이외의 비구조요소에 대한 내용은 ‘0306 지진하중’부분에서 정의하고 있다. ‘0306.10 건축, 기계 및 전기 비구조요소’의 일반사항을 살펴보면, 구조물에 영구히 설치되는 건축, 기계 및 전기설비 등의 비구조요소는 등가정적하중과 변위에 견디도록 설계하여야 한다고 명시하고 있다. KBC 2016에서 분류하는 비구조요소는 건축비구조요소와 기계 및 전기 비구조요소이며, 이를 정리하면 <표 1.8>, <표 1.9>과 같다. KBC 2016에서는 건축물의 비구조요소를 크게 13가지로 분류하고 있으며, 주로 구조물에 정착 또는 부착되는 비보강 조적벽, 칸막이, 마감재, 천장, 광고판 등을 포함하는 것을 알 수 있다. 하지만, 건축물에 설치되는 비보강 조적벽이나, 캔틸레버 부재는 건축물에 지진하중이 작용하게 되면, 손상을 받기 쉬운 요소이고, 또한 기둥사이에 설치되는 비보강 조적벽으로 인한 기둥의 단주효과로 인해 구조요소의 지진에 대한 취약도가 높아진다. 즉, KBC 2016의 기준에 따라 요소정보를 분류하게 된다면, 구조요소의 특성과 비구조요소의 특성이 결합되어 각각에 대한 손상을 파악하기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존 지진손상과 손실평가에 대한 기존 연구인 HAZUS, FEMA P-58, SYNER-G와 같은 연구에서 분류하는 비구조요소정보 분류체계에 대한 분석을 추가적으로 수행하였다.

<표 1.8> KBC 2016의 건축비구조요소 분류체계

1. 내부 비구조벽체 및 칸막이벽
a. 비보강 조적벽
b. 기타 벽체 및 칸막이벽
2. 캔틸레버 부재(횡지지되어 있지 않거나 질량중심 아래에서 골조에 지지된 경우)
a. 파라펫 및 내부 캔틸레버 비구조벽체
b. 굴뚝 및 골조구조에 지지된 수직 배기구
3. 캔틸레버 부재(횡지지되거나 질량중심 위에서 골조구조에 지지된 경우)
a. 파라펫
b. 굴뚝 및 배기구
c. 외측 비구조벽체
4. 외측 비구조벽체 부재 및 접합부
a. 벽체 부재
b. 벽판 접합부의 몸체
c. 접합시스템의 조임구
5. 표면 마감재
a. 변형이 제한된 부재 및 부착물
b. 변형성능이 낮은 부재 및 부착물
6. 옥탑(건물골조가 연장된 골조의 경우 제외)
7. 천장
8. 캐비닛
a. 저장용 캐비닛 및 실험장비
9. 액세스 플로어(이중바닥)
a. 특수 액세스 플로어
b. 그 외
10. 부가물 및 장식물
11. 표지판 및 광고판
12. 1~11 이외의 기타 강성의 비구조요소
a. 대변형이 가능한 부재 및 부착물
b. 변형이 제한된 부재 및 부착물
c. 변형성능이 낮은 재료 및 부착물
13. 1~11 이외의 기타 연성의 비구조요소
a. 대변형이 가능한 부재 및 부착물
b. 변형이 제한된 부재 및 부착물
c. 변형성능이 낮은 재료 및 부착물

<표 1.9> KBC 2016의 기계 및 전기 비구조요소 분류체계

1. 일반 기계
a. 보일러 및 난방기계실
b. 덮개 있는 자립형 압력용기
c. 수직 배기구
d. 캔틸레버 굴뚝
e. 기타
2. 제조 및 처리 기계류
a. 일반
b. 운반기(승용 제외)
3. 배관시스템
a. 대변형이 가능한 부재 및 부착물
b. 변형이 제한된 부재 및 부착물
c. 변형성능이 낮은 재료 및 부착물
4. HVAC시스템 장비
a. 진동격리된 경우
b. 진동격리되지 않은 경우
c. 덕트와 함께 붙어서 설치된 경우
d. 기타
5. 승강기 비구조요소
6. 이동계단 비구조요소
7. 트러스로 지지된 탑(자립형 또는 케이블로 지지된 경우)
8. 일반 전기
a. 분산된 시스템(모선덕트, 배선, 케이블선반)
b. 장비
9. 전기조명기구

(2) IBC 2015, ASCE 7-16

IBC 2016와 ASCE 7-16은 구조요소 이외의 비구조요소에 대해 architectural component와 mechanical and electrical component로 크게 2가지로 분류하고 있다. 분류하고 있는 내용은 KBC 2016과 거의 동일하며, 그 내용을 정리하면 각각 <표 1.10>과 <표 1.11>과 같다.

<표 1.10> IBC 2015와 ASCE 7-16의 건축비구조요소 분류체계

1. Interior Nonstructural Walls and Partitions
Plain (unreinforced) masonry walls
All other walls and partitions
2. Cantilever Elements (Unbraced or braced to structural frame below its center of mass)
Parapets and cantilever interior nonstructural walls
Chimneys and stacks where laterally braced or supported by the structural frame
3. Cantilever Elements (Braced to structural frame above its center of mass)
Parapets
Chimneys and Stacks
Exterior Nonstructural Walls
4. Exterior Nonstructural Wall Elements and Connections
Wall Element
Body of wall panel connections
Fasteners of the connecting system
5. Veneer
Limited deformability elements and attachments
Low deformability elements and attachments
6. Penthouses (except where framed by an extension of the building frame)
7. Ceilings
All
8. Cabinets
Storage cabinets and laboratory equipment
9. Access Floors
Special access floors (designed in accordance with Section13.5.7.2)
All other
10. Appendages and Ornamentations
11. Signs and Billboards
12. Other Rigid Components
High deformability elements and attachments
Limited deformability elements and attachments
Low deformability materials and attachments
13. Other Flexible Components
High deformability elements and attachments
Limited deformability elements and attachments
Low deformability materials and attachments

<표 1.11> IBC 2015와 ASCE 7-16의 기계 및 전기 비구조요소 분류체계

Mechanical and Electrical Components
Air-side HVAC, fans, air handlers, air conditioning units, cabinet heaters, air distribution boxes, and other mechanical components constructed of sheet metal framing.
Wet-side HVAC, boilers, furnaces, atmospheric tanks and bins, chillers, water heaters, heat exchangers, evaporators, air separators, manufacturing or process equipment, and other mechanical components constructed of high deformability materials.
Engines, turbines, pumps, compressors, and pressure vessels not supported on skirts and not within the scope of Section 15.
Skirt-supported pressure vessels not within the scope of Section 15.
Elevator and escalator components.
Generators, batteries, inverters, motors, transformers, and other electrical components constructed of high deformability materials.
Motor control centers, panel boards, switch gear, instrumentation cabinets, and other components constructed of sheet metal framing.
Communication equipment, computers, instrumentation and controls.
Roof mounted chimneys, stacks, cooling and electrical towers laterally braced below their center of mass.
Roof mounted chimneys, stacks, cooling and electrical towers laterally braced above their center of mass.
Lighting fixtures.
Other mechanical or electrical components.
Vibration Isolated Components and Systems
Components and systems isolated using neoprene elements and neoprene isolated floors with built-in or separate elastomeric snubbing devices or resilient perimeter stops.
Spring isolated components and systems and vibration isolated floors closely restrained using built-in or separate elastomeric snubbing devices or resilient perimeter stops.
Internally isolated components and systems.
Suspended vibration isolated equipment including in-line duct devices and suspended internally isolated components.
Distribution Systems
Piping in accordance with ASME B31, including in-line components with joints made by welding or brazing.
Piping in accordance with ASME B31, including in-line components, constructed of high or limited deformability materials, with joints made by threading, bonding, compression couplings, or grooved couplings.
Piping and tubing not in accordance with ASME B31, including in-line components, constructed of high deformability materials, with joints made by welding or brazing.
Piping and tubing not in accordance with ASME B31, including in-line components, constructed of high or limited deformability materials, with joints made by threading, bonding, compression couplings, or grooved couplings.
Piping and tubing constructed of low deformability materials, such as cast iron, glass, and nonductile plastics.
Ductwork, including in-line components, constructed of high deformability materials, with joints made by welding or brazing.
Ductwork, including in-line components, constructed of high or limited deformability materials with joints made by means other than welding or brazing.
Ductwork, including in-line components, constructed of low deformability materials, such as cast iron, glass, and nonductile plastics.
Electrical conduit, bus ducts, rigidly mounted cable trays, and plumbing.
Manufacturing or process conveyors (nonpersonnel).
Suspended cable trays.

(3) HAZUS

HAZUS에서는 건축물의 비구조요소를 크게 3가지로 분류하는데, architectural, mechanical and electrical, contents로 분류한다. 설계기준에 해당하는 KBC 2016, IBC 2015, ASCE 7-16와 비교하면, 건축비구조요소와, 기계 및 전기 비구조요소를 분류하는 큰 범주는 비슷하나, 컴퓨터나 책상, 장비 등 과 같은 contents부분이 큰 범주에 추가된 것을 알 수 있다. <표 1.12>은 HAZUS에서 건축물의 비구조요소를 분류하는 체계를 정리한 것이다. 정리된 표를 살펴보면, 각 비구조요소에 대해 drift-sensitive, acceleration-sensitive로 추가적으로 분류한 것을 알 수 있다. 이는 각 비구조요소의 지진취약도를 분석할 때, 어떠한 지진반응계수로 사용해야 하는지에 대한 분류를 포함하는 것이다. HAZUS에서는 변형에 민감한 비구조요소와 가속도에 민감한 비구조요소에 대한 지진취약도 함수를 결정하는 parameter를 제공하고 있다. 제공되는 parameter는 앞서 건축물 레벨로 나눈 구조요소에 따라 제공된다.

<표 1.12> HAZUS의 비구조요소 분류체계

System Type	Component Description	Drift-Sensitive	Acceleration-Sensitive
Architectural	Nonbearing Walls/Partitions	•	
	Cantilever Elements and Parapets		•
	Exterior Wall Panels	•	
	Veneer and Finishes	•	
	Penthouses	•	
	Racks and Cabinets		•
	Access Floors		•
	Appendages and Ornaments		•
Mechanical and Electrical	General Mechanical (boilers, etc.)		•
	Manufacturing and Process Machinery		•
	Piping Systems		•
	Storage Tanks and Spheres		•
	HVAC Systems (chillers, ductwork, etc.)		•
	Elevators		•
	Trussed Towers		•
	General Electrical (switchgear, ducts, etc.)		•
	Lighting Fixtures		•
Contents	File Cabinets, Bookcases, etc.		•
	Office Equipment and Furnishings		•
	Computer/Communication Equipment		•
	Nonpermanent Manufacturing Equipment		•
	Manufacturing/Storage Inventory		•
	Art and Other Valuable Objects		•

(4) FEMA P-58

FEMA P-58에서 비구조요소를 분류하는 체계는 구조요소와 마찬가지로 UNIFORMAT-Ⅱ의 revision인 NISTIR 6389의 분류체계를 따른다. NISTIR 6389의 분류체계는 비구조요소를 건축물 레벨에서 분류하지 않고, 부재레벨에서 요소를 분류한다. NISTIR 6389의 분류체계는 총 4단계로 아래와 같이 분류하고 있다.

- ○ Level 1: Major Group Elements (A부터 F까지 총 6개)
- ○ Level 2: Group Elements (그룹마다 다름)
- ○ Level 3: Individual Elements (그룹마다 다름)
- ○ Level 4: Sub-Elements (그룹마다 다름)

NISTIR 6389의 큰 특징은 사용자가 분류체계를 쉽게 수정하고, 추가할 수 있다는 점이며, 건축물 레벨이 아닌 부재레벨에서 요소를 추가하고 수정할 수 있기 때문에, 사용자에 따른 자유도가 높다고 할 수 있다. Level 1에 해당하는 분류체계는 A부터 F까지 총 6개로 분류하며, 이 중 C부터 F까지가 비구조요소에 해당한다. <표 1.13>은 NISTIR 6389에서 C부터 F까지 비구조요소의 분류체계를 level 3까지 정리한 것이다. Level 4의 경우는 부재의 크기, 접합상세 등에 따라 다양하게 추가 및 수정이 가능하기 때문에, 수정이 어려운 level 3까지 정리를 하였다. NISTIR 6389를 사용하는 FEMA P-58에서는 C부터 F까지 비구조요소를 총 409개로 분류하고 있으며, 각 비구조요소에 대해 damage state에 따른 지진취약도 함수를 제공하고 있다.

<표 1.13> FEMA P-58의 비구조요소 분류체계인 NISTIR 6389의 비구조요소 분류체계

Level 1 Major Group Elements	Level 2 Group Elements	Level 3 Individual Elements
C Interiors	C10 Interior Construction	C1010 Partitions
		C1020 Interior Doors
	C20 Stairs	C2010 Stairs
	C30 Interior Finishes	C3010 Wall Finishes
		C3020 Floor Finishes
		C3030 Ceiling Finishes
D Services	D10 Conveying	D1010 Elevators & Lifts
		D1020 Escalators & Moving Walks
		D1090 Other Conveying Systems

Level 1 Major Group Elements	Level 2 Group Elements	Level 3 Individual Elements
	D20 Plumbing	D2010 Plumbing Fixtures
		D2020 Domestic Water Distribution
		D2030 Sanitary Waste
		D2040 Rain Water Drainage
		D2090 Other Plumbing Systems
	D30 HAVC	D3010 Energy Supply
		D3020 Heat Generating Systems
		D3030 Chiller, Cooling Tower and Compressors
		D3040 Distribution Systems
		D3050 Package Air Handling Units
		D3060 Control Panels & Instrumentation
		D3090 Other HVAC Systems & Equipments
	D40 Fire Protection	D4010 Sprinklers
		D4020 Standpipes
		D4030 Fire Protection Specialties
		D4090 Other Fire Protection Systems
	D50 Electical	D5010 Electrical Service & Distribution
		D5020 Lighting & Branch Wiring
		D5030 Communications & Security
		D5090 Other Electrical Systems
E Equipment & Furnishings	E10 Equipment	E1010 Commercial Equipment
		E1020 Institutional Equipment
		E1030 Vehicular Equipment
		E1090 Other Equipment
	E20 Furnishings	E2010 Fixed Furnishings
		E2020 Movable Furnishings
F Special Construction & Demolition	F10 Special Construction	F1010 Special Construction
		F1020 Integrated Construction
		F1030 Special Construction Systems
		F1040 Special Facilities
		F1050 Special Controls and Instrumentation

(5) SYNER-G

SYNER-G의 비구조요소에 대한 분류체계를 살펴보면, 건축구조물에 설치되는 비구조요소에 대한 분류체계에 대한 내용은 없다. 하지만, essential facility인 병원과 소방서에 설치되는 비구조요소에 대한 분류체계를 수립하고 있어, 비구조요소의 분류 측면에서 본 연구의 목적과 가장 부합한다고 할 수 있다. 병원과 소방서의 경우, 기능유지를 위해선 우선적으로 구조요소의 지진에 대한 안전성이 확보되어야 하지만, 기계장비와 의료기기, 소방장비와 같은 비구조요소의 기능이 유지되어야 재난시 essential facility의 기능을 수행할 수 있다. <표 1.14>은 SYNER-G에서 병원에 설치되는 비구조요소의 분류체계를 정리한 것이다. 병원건축물의 비구조요소를 크게 organization component, human component, physical component로 총 3개로 구분하고 있다. Organization component는 지진발생시 병원의 기능유지를 수행할 수 있도록 하는 비상전력시스템, 인적자원 등과 같은 비구조요소를 의미한다. Human component는 의사, 간호사와 같은 병원내의 staff의 요소를 의미하여, physical component는 병원의 기능수행을 위한 수술기구와 같은 장비들을 의미한다.

<표 1.14> SYNER-G에서 병원건축물의 비구조요소에 대한 분류체계

CATEGORY	SUB-COMPONENT
• Organizational Component (HCS01)	
• Human Component (HCS02)	
• Physical Component (HCS03)	
Non-structural Elements (HCS03-2)	Drift sensitive
	Acceleration sensitive
	Differential displacement sensitive
Architectural Elements (HCS03-3)	Walls (internal and external)
	Ceilings
	Windows, doors, glazing
Basic Installations (HCS03-4)	Generation (electrical generator, water tank, gas tank)
	Distribution (pipes for water, waste- water, gas, fuel and electrical conduits)
Basic Installation: Medical Gas (HCS03-5)	Oxygen (bottle, cylinders)
	Nitrogen (cylinders)
	Supply line
	Equipments
Basic Installation: Power System (HCS03-6)	Transformation station (medium voltage-MV and low voltage-LV)
	Emergency generator (UPS and EPG)
	Transmission lines
	Distribution stations
Basic Installation: Water System (HCS03-7)	Supply (city water and tanks)
	Equipments (electric power, electric pumps and boilers)
	Piping
Basic Installation: Conveying System (HCS03-8)	Motor (power and engine)
	Counter weights
	Doors
	Guide rails

CATEGORY	SUB-COMPONENT
Building Contents (HCS03-9)	Furnishings
	Medical, office and industrial equipments
	General supplies
	Shelves etc.

<표 1.15>은 소방서에 설치되는 비구조요소를 정리한 것이다. 소방서의 비구조요소는 크게 5가지로 분류하고 있다.

<표 1.15> SYNER-G에서 소방서의 비구조요소에 대한 분류체계

CATEGORY	CLASSIFICATION/SUB-COMPONENT
• **Fire-fighters Stations (FFS01)**	
• **Pumping Stations (FFS02)**	
Small	Electric power
Medium	Equipment
Large	Vertical/horizontal pump
(Anchored/Unanchored Sub-components)	Building
• **Storage Tanks (FFS03)**	Material type: wood, steel, concrete, masonry
Closed Tanks	Capacity: small, medium, large
Open Cut Reservoirs	Anchorage: yes/no
	Position: at grade, elevated by columns or frames)
	Type of roof: RC, steel, wood
	Seismic design: yes/no
	Construction type: elevated by columns, built “at- grade” to rest directly on the ground, build “at grade” to rest on a foundation, concrete pile foundation
	Presence of side-located inlet-outlet pipes
	Volume: height, diameter
	Thicknesses
	Operational function: full, nearly full, less than full
• **Fire-hydrant (FFS04)**	Pressure
	Demand
	Operational: yes/no
• **Pipelines (FFS05)**	Location: buried/elevated
	Type: continuous/segmented
	Material (type, strength): ductile iron, steel, PVC (acrylonitrile-butadienestyrene/ABS), polyethylene/PE, reinforced plastic mortar/RPM, resin transfer molding/RTM-asbestos-cement pipes, cast, iron, concrete, clay
	Type of joints: rigid/flexible
	Capacity: diameter
	Geometry: wall thickness o Type of coating and lining o Depth
	History of failure
	Appurtenance and branches
	Corrosiveness of soil conditions
	Age
	Pressure

2. 지진강도와 지진반응계수의 정의

지진에 대한 건축구조물의 영향력을 확인하기 위해서는 지진의 크기와 성격을 정의할 수 있는 지진 강도와 지진이 구조물에 미치는 손상을 정의할 수 있는 지진반응계수가 필요하다. 지진강도는 지진이 가지고 있는 특성을 나타내는 수치이고, 지진반응계수는 구조재나 비구조재의 지진강도에 대한 응답으로 정의할 수 있다. 여러 가지 지진강도와 지진반응계수를 고려하는 이유는 구조재와 비구조재 요소정보의 특성을 반영할 수 있는 지진강도와 지진반응계수가 다양하기 때문이다. 예를 들면, 부재레벨에서 구조재의 접합부 요소는 회전강성 또는 회전각을 지진반응계수를 이용하여 손상을 추정하기 용이하다. 반면, 시스템레벨에서는 건축물의 층간변위를 지진반응계수를 이용하는데, 이는 층간변위가 건축물의 손상을 정의하기 용이하기 때문이다. 내진설계기준에 따르면 비구조재의 경우, 건축구조물의 구조재와 일체화(강접)일 때, 최대층가속도 또는 최대 층속도를 지진반응계수로 이용하여 손상을 정의하는 반면, 구조재와 일체화되지 않은 경우는 층간변위비를 지진반응계수로 사용한다.

본 장에서는 기존 연구에서 사용되었던 지진강도와 지진반응계수를 정의하여, 구조재 및 비구조재의 요소정보에 대한 데이터베이스 구축에 기본자료로 사용될 것이다. 또한 건축구조물의 보유성능파악을 위한 취약도평가에 이용하고자 한다.

가. 지진강도 (Intensity Measure)

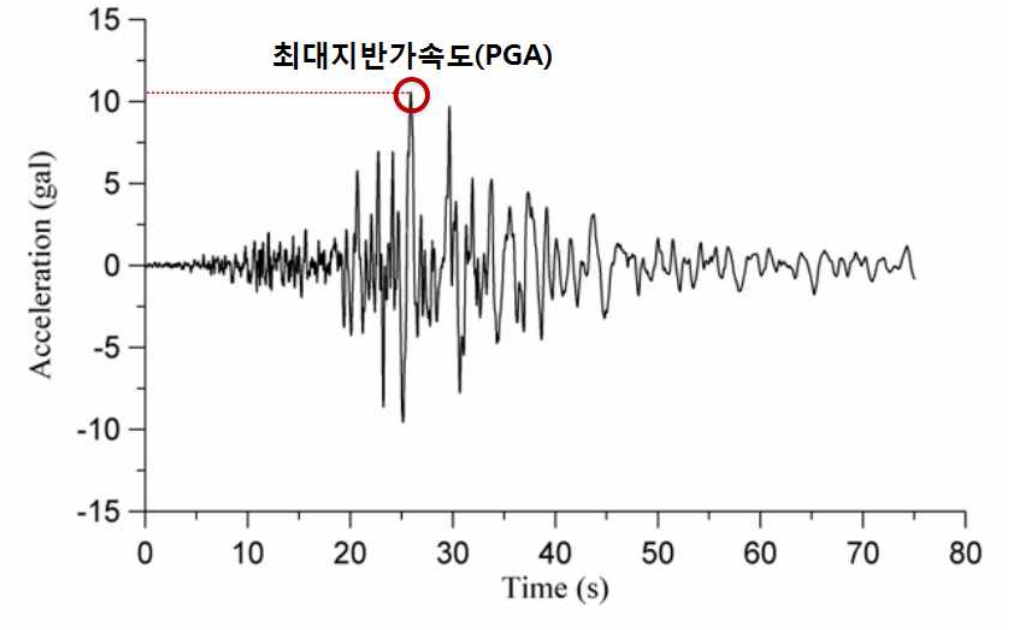
지진강도는 지진이 어느 한 지점에 미치는 영향의 척도를 의미한다. 지진강도는 지진의 특성을 대표할 수 있는 정보들로 여러 측면방향으로 정의될 수 있다. 지진강도는 지반운동 특성에 의존하는 지진의 크기와 진원과 진앙과의 거리가 고려되어 정의된다. 기존 연구에서 사용된 지진강도의 종류는 다음과 같다.

<표 1.16> 구조재와 비구조재에 사용되는 지진강도

지진강도	
구조재	**비구조재**
• PGA: Peak Ground Acceleration • Sa: Spectral Acceleration • Sd: Spectral Displacement • RMS: root mean square of acceleration • MCS: Mercalli-Cancani-Sieberg Intensity Scale • MMI: Modified Mercalli Intensity Scale • EMS98: European Macroseismic Scale	• PGA: Peak Ground Acceleration • PGV: Peak Ground Velocity • Sa: Spectral Acceleration • Sd: Spectral Displacement • PGD: Permanent Ground Deformation • MMI: Modified Mercalli Intensity Scale

(1) 최대지반가속도 (PGA, Peak Ground Acceleration)

최대지반가속도는 PGA(Peak Ground Acceleration)으로 계측된 지진가속도 시간이력에서 최대크기를 의미하며, 지표면 자유장운동에서 계측된 지진가속도 그래프에 기록된 최대 절대 가속도의 진폭과 같다.



<그림 1.2> 최대지반가속도

지진가속도 그래프는 지진에 대하여 가속도를 기록한 그래프로 x, y, z축으로 총 세 방향에서 발생한다. 따라서 최대지반가속도(PGA)는 수평방향요소인 x, y방향, 수직방향요소인 z방향으로 분리할 수 있다. 일반적으로 수평 최대지반가속도는 수직 방향에 비해 크지만, 지진에 따라 수직 최대지반가속도가 수평 최대지반가속도 보다 클 수 있다. 최대지반가속도는 지진의 강도와 규모에 관해서도 나타낼 수 있다. 먼저 지진의 강도와의 연관관계는 Kanai(1983), Trifunac and Brady(1975) 연구에 따르면 Modified-Mercalli 강도(I_{MM})와 최대지반가속도 사이의 관계를 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$PGA = 0.91 \cdot 10^{0.31 I_{MM}} \tag{1.1}$$

$$PGA = 1.02 \cdot 10^{0.30 I_{MM}} \tag{1.2}$$

또한 최대지반가속도와 지진의 규모의 관계도 유럽, 미국, 일본 등 전 세계에서 아래와 같은 수식으로 제시하고 있다.

$$\log(PGA)_h = 2.522 - 0.142M_w + (0.314M_w - 3.184)\log\sqrt{57.76 + d^2} + 0.137S_s + 0.050S_A - 0.084F_N + 0.062F_T - 0.044F_O \quad (1.3)$$

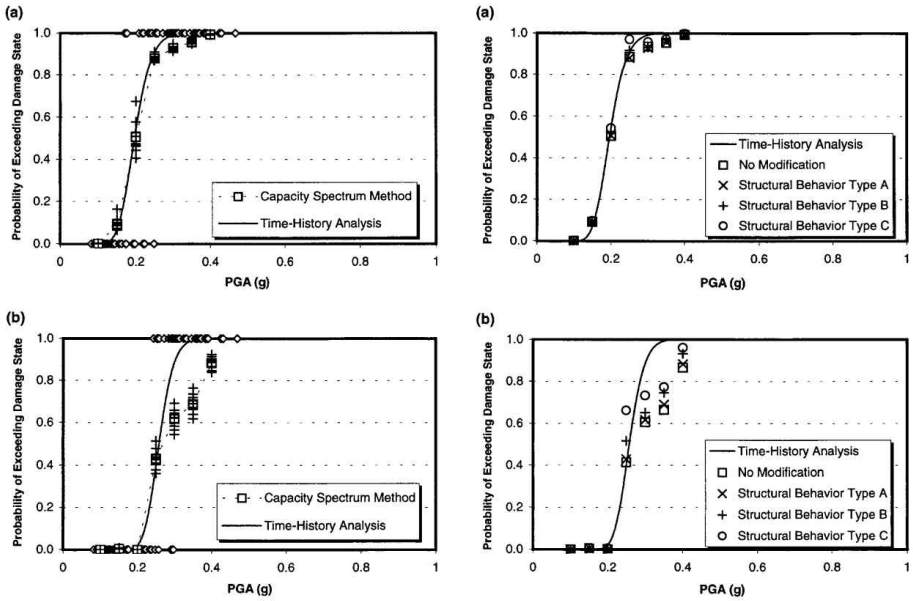
$$\log(PGA) = c_1 + c_2M_w + c_3(M_w - 6)^2 + c_4\ln(R_M) + c_5\max[\ln(\frac{R}{70}), 0] + c_6R_M \quad (1.4)$$

$$\log(PGA) = 0.446M_w - 0.00350d - \log(d + 0.012 \cdot 10_w^{0.446M}) + 0.00665(h - 20) + S \quad (1.5)$$

여기서,

M_w = *moment magnitude*
S_S, S_A S = *soil condition(coefficient)*
F_N, F_T, F_O = *focal mechanism(coefficient)*
$c_1 \sim c_6$ = *source model(coefficient)*
d, h = *focal distance, depth*

일반적으로 지진의 강도나 규모는 지진의 총 에너지를 가지고 측정하게 된다. 하지만 최대지반가속도는 측정된 위치에서의 최대가속도를 통해 얻어진다. 따라서 최대지반가속도는 동일한 지진에 대해서도 진앙과 관측소의 거리, 위치, 지반의 조건 등과 같은 요인에 영향을 받아 측정되는 값이 다를 수 있다. 또한 최대지반가속도는 지진에 의한 지반운동을 나타내는 값으로, 지반위에 건설된 건축물이나 구조물의 응답을 나타내진 않는다. 즉, 최대지반가속도는 지진에 의한 지반의 최대 가속도를 나타내므로, 지진파에 대한 응답스펙트럼에서 고유주기가 0인(무한강성을 갖는) 응답가속도가 최대지반가속도라고 할 수 있다. 따라서 PGA가 크다는 것은 수식의 연관관계처럼 지진의 규모 혹은 강도가 대체로 크다고 말할 수 있지만, PGA와 지진에 의한 구조물의 피해가 비례한다고 직접적으로 연관시키긴 어렵다.



<그림 1.3> 지진강도 PGA에 대한 지진취약도 곡선

(2) 스펙트럼 변위 (Spectral Displacement)

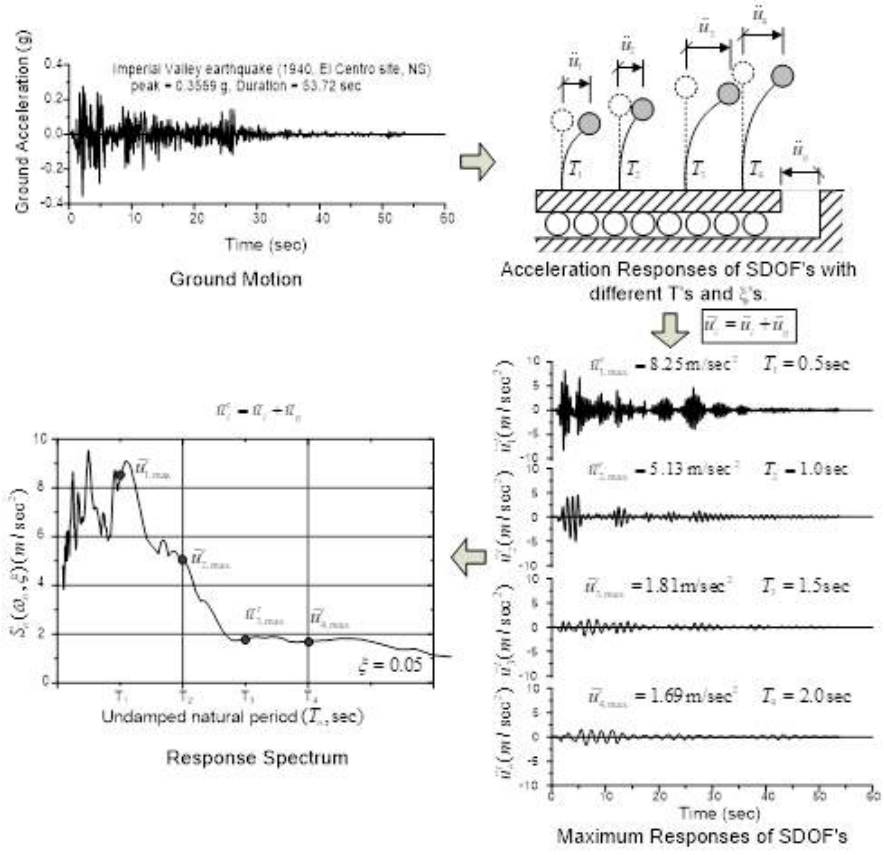
스펙트럼 변위(S_d)는 고정된 감쇠비와 고유주기를 가지는 선형 단자유도 시스템에 특정 지진의 지반운동에 대한 변위값의 최댓값을 의미한다. 스펙트럼 변위는 아래와 같은 단자유도 시스템에 대한 운동방정식의 해로부터 나타낼 수 있다.

$$\mu'' + cu' + ku = -\mu''_g \tag{1.6}$$

$$u(t) = e^{-\xi w_n t}[u(0)\cos w_D t + \frac{u'(0) + \xi w_n u(0)}{w_D} sin w_D t] \tag{1.7}$$

$$S_d = \max|u(t)| \tag{1.8}$$

단자유도 시스템의 지진에 대한 변위(u_t)에 대한 해는 sinusoidal함수로 나타낼 수 있으며, 단자유도 시스템의 고유주기(w_n)와 감쇠비(ξ)에 따라 변위응답이 달라진다. 또한 변위응답은 지반에 대한 시스템의 관성력($-mu''_g$)에 영향을 받기 때문에, 변위응답의 최댓값인 스펙트럼 변위(S_d)는 지진파의 특성이 반영된 값이라고 할 수 있다. 비감쇠 단자유도 시스템의 스펙트럼 변위를 산정하는 개념도는 아래의 <그림 1.4>과 같으며, 단자유도 시스템의 질량(m)과 강성(k)을 조정하여 단자유도 시스템의 고유주기에 따른 스펙트럼 변위를 구할 수 있다.

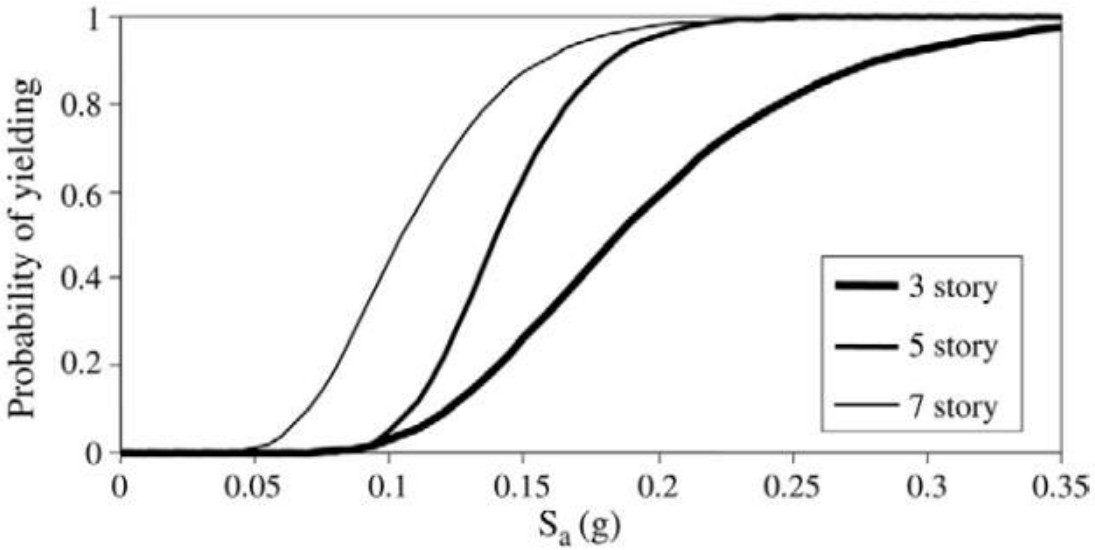


<그림 1.4> Process to develop the response spectrum

(3) 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration)

스펙트럼 가속도는 지진에 의한 단자유도 시스템에서 발생하는 최대가속도로 정의할 수 있다. 최대지반가속도는 지진에 대한 특성이 반영된 값이지만, 스펙트럼 가속도는 지진의 특성과 건축물의 특성(고유주기)가 동시에 반영된 지진강도로 말할 수 있다. 스펙트럼가속도는 선형 단진자의 가속도 값이 아닌 스펙트럼 변위값을 통하여 구해진 가상의 값이다. 유사가속도 응답스펙트럼(Pseudo-acceleration)이라고 불리며. 다음 식을 통하여 구해진다.

$$A = w_n^2 D = (\frac{2\pi}{T_n})D \qquad (1.9)$$
$$D : Spectral\ Displacement$$



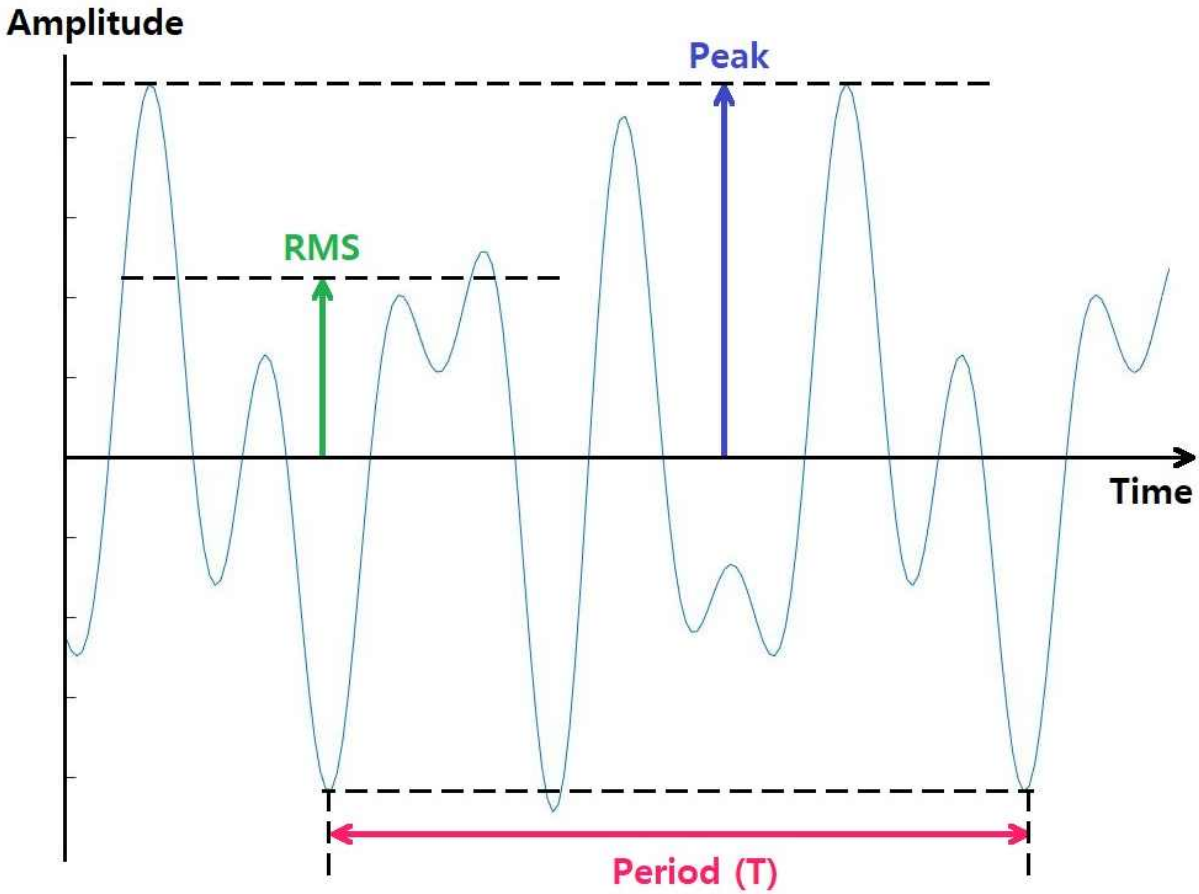
<그림 1.5> 지진강도 S_a에 대한 지진취약도 곡선

(4) RMS(Root mean square of acceleration)

RMS는 일정 지속시간동안 발생한 가속도의 실효값을 의미한다. 지진 발생 초기시간 T1에서 종료시간 T2까지의 RMS 가속도 값은 다음과 같이 계산된다.

$$a_S = \frac{1}{T}\int_{T_1}^{T_2}[a(t)]^2 dt^{1/2} \tag{1.10}$$

RMS 가속도는 지진의 지속시간을 포함하는 응답의 유효가속도를 측정하고, 응답시간내역의 가속도의 최대, 최소값을 효과적으로 나타내기 위해 개발되었다.



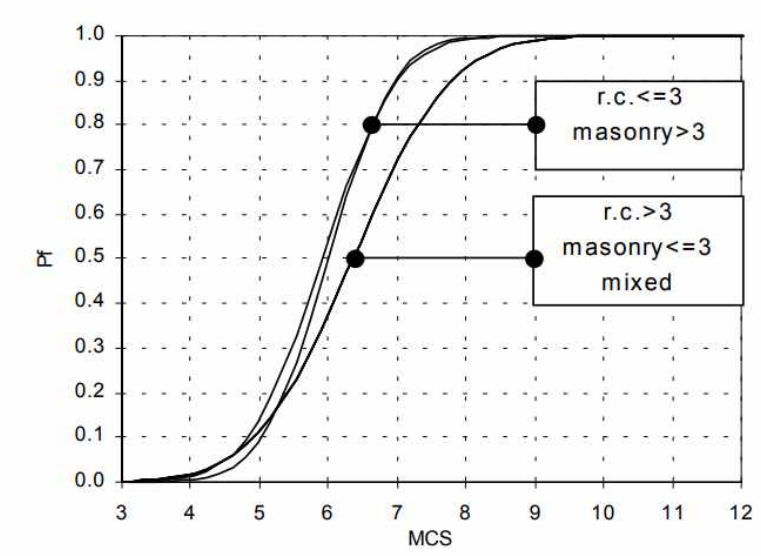
<그림 1.6> RMS의 정의

(5) MCS(Mercalli-Cancani-Sieberg Intensity Scale)

Mercalli 강도 스케일은 지진의 강도와 지진의 영향을 측정하는 지진 규모이다. 이는 지진에 대하여 보통 보고되는 리히터 크기와 지반에서 방출된 에너지를 측정하는 척도와 다른 개념이다. Mercalli 강도는 물리적인 원리에 기초한 것이 아니라 관찰된 효과에 경험적으로 기초를 두고 있다. Mercalli 척도는 1단계(느껴지지 않음)부터 12단계(완전 파괴)까지의 규모로 지구의 표면, 인간, 자연, 구조물에 대하여 지진의 영향을 정량화 한다. 이 값은 진원으로부터 거리에 의존하게 되며, 가장 높은 강도는 진원지 주변에서 발생한다. 1902년 이탈리아 물리학자 Cancani는 10도의 Mercalli 척도를 12도까지 확장하여, MCS라고 알려지게 되었다.

<표 1.17> Mercalli-Cancani-Sieberg MCS) intensity scale의 강도에 따른 설명

Intensity		Effect
Ⅰ	Imperceptible	
Ⅱ	Very light	
Ⅲ	Light	
Ⅳ	Moderate	
Ⅴ	Moderately strong	
Ⅵ	Strong.	Damping only to very bad construction
Ⅶ	Very Strong.	Cracking in Plaster. Very little damage to good construction. Some damage to bad construction
Ⅷ	Destructive	Damage to buildings around 50%
Ⅸ	Strongly Destructive.	Damage to buildings around 50%
Ⅹ	Ruinous	Damage to buildings around 75%
Ⅺ	Catastrophic.	General destruction, landslides
Ⅻ	Total Catastrophic.	Complete destruction. Large topographic effects, diversion of river and empty of lakes



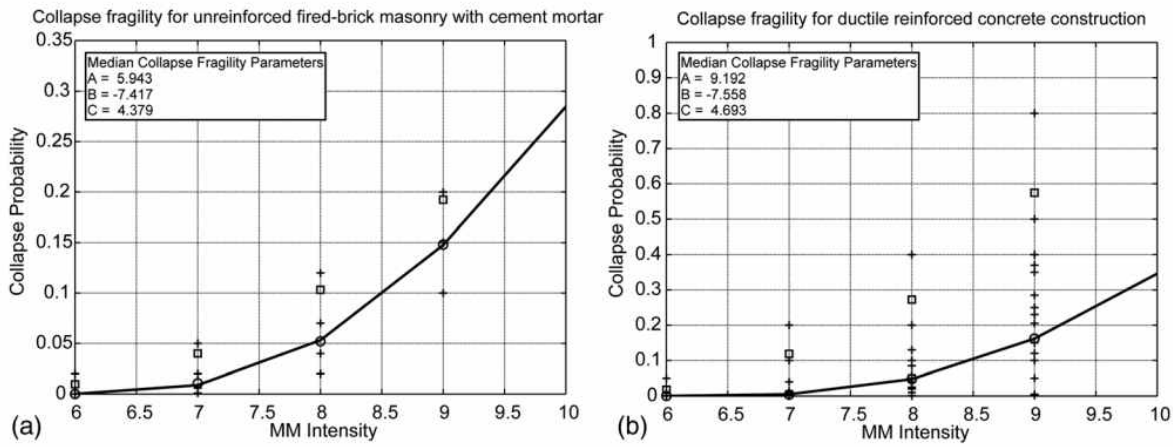
<그림 1.7> 지진강도 MCS에 대한 지진취약도 곡선

(6) MMI(Modified Mercalli Intensity Scale)

MCS 척도는 Harry O. Wood와 Frack Neumann에 의하여 수정되어, 1931년 MWN(Mercalli-Wood-Neumann)으로 출판되었다. 그 이후 리히터 규모의 아버지인 Charles Richter에 의해 개선되어 오늘날 MMI(Modified Mercalli Intensity Scale)으로 알려지게 되었다. MMI 척도의 낮은 정도는 사람들이 지진을 느끼는 방식을 다룬다. 스케일의 숫자가 높을수록 관찰된 구조적 손상 정도가 크게 나타난다.

<표 1.18> Modifies Mercalli Intensity (MMI) scale의 강도에 따른 설명

Intensity	Description/Damage
I. Not felt	Not felt except by very few under especially favorable conditions.
II. Weak	Felt only by a few people at rest, especially on upper floors of buildings.
III. Weak	Felt quite noticeably by people indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
IV. Light	Felt indoors by many. outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors distributed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building Standing motor cars rocked noticeably.
V. Moderate	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
VI. Strong	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
VII. Very Strong	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structuers; some chimneys broken.
VIII. Severe	Damage slight in specially designed structures. Fall of chimneys broken.
IX. Violent	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Building shifted off foundations. Liquefaction.
V. Extreme	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.



<그림 1.8> 지진강도 MMI에 대한 지진취약도 곡선

(7) EMS98(European Marcroseismic Scale)

EMS 98은 유럽국가의 내진 강도평가의 기초이며, 현재 유럽을 이외의 여러국가에서 사용되고 있다. EM98은 유럽지진학위원회(ESC)가 25년동안 유럽에서 사용된 MSK(Medvedev-Sponheuer-Karnik) 척도를 업데이트하여 개발한 유럽의 지진강도스케일이다. EMS 98은 지진의 강도뿐만 아니라 건축물의 손상정도를 스케일로 표현하고 사용자에게 안내하고 있다.

<표 1.19> EMS98 scale의 강도에 따른 설명

Intensity	Description/Damage
I. Not felt	Not felt by anyone.
II. Scarcely felt	Vibration is felt only by individual people at rest in houses, especially on upper floors of buildings.
III. Weak	The vibration is weak and is felt indoors by a few people. People at rest feel swaying or light trembling. Noticeable shaking of many objects.
IV. Largely observed	The earthquake is felt indoors by many people, outdoors by few. A few people are awakened. The level of vibration is possibly frightening. Windows, doors and dishes rattle. Hanging objects swing. No damage to buildings.
V. Strong	The earthquake is felt indoors by most, outdoors by many. Many sleeping people awake. A few run outdoors. Entire sections of all buildings tremble. Most objects swing considerably. China and glasses clatter together. The vibration is strong. Top-heavy objects topple over. Doors and windows swing open or shut.
VI. Slightly damaging	Felt by everyone indoors and by many to most outdoors. Many people in buildings are frightened and run outdoors. Objects on walls fall. Slight damage to buildings; for example, fine cracks in plaster and small pieces of plaster fall.
VII. Damaging	Most people are frightened and run outdoors. Furniture is shifted and many objects fall from shelves. Many buildings suffer slight to moderate damage. Cracks in walls; partial collapse of chimneys.
VIII. Heavily damaging	Furniture may be overturned. Many to most buildings suffer damage: chimneys fall; large cracks appear in walls and a few buildings may partially collapse. Can be noticed by people driving cars.
IX. Destructive	Monuments and columns fall or are twisted. Many ordinary buildings partially collapse and a few collapse completely. Windows shatter.
X. Very destructive	Many buildings collapse. Cracks and landslides can be seen.
XI. Devastating	Most buildings collapse.
XII. Completely devastating	Almost all structures are destroyed. The ground changes.

나. 지진반응계수 (Engineering Demand Parameter)

지진 반응계수는 지진하중이 건축구조물에 미치는 영향 및 손상을 정량화하기 위하여 정의되었다. 구조재와 비구조재의 손상 정도를 정의하기 위해 다양한 물리량이 사용된다. 기존연구에서 비구조재와 구조재에 사용되는 지진반응계수의 종류는 다음과 같다.

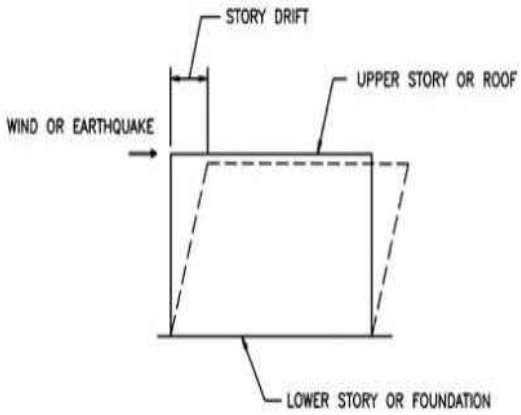
1. 층간 변위비
2. 지붕 변위비
3. 회전각
4. 최대 층가속도
5. 최대층가속도/최대지반가속도
6. CAV
7. 비탄성 회전
8. 부착요소의 축력, 전단력, 회전력

<표 1.20> 구조재와 비구조재에 사용되는 지진반응계수

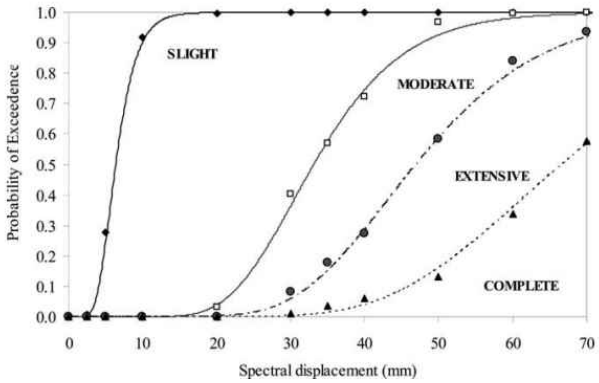
지진반응계수	
구조재	**비구조재**
• Interstory Drift Ratio • PFA: Peak Floor Acceleration • Roof Drift Ratio • Rotation Angle	• Interstory Drift Ratio • PFA: Peak Floor Acceleration • PFV: Peak Floor Velocity • PFA/PGA • Cumulative absolute velocity parameter • Inelastic rotation • Axial, flexural, and shear force in attachments

(1) 층간변위비 (Interstory Drift Ratio)

층간변위는 지진하중으로 인하여 발생하는 인접층 사이의 수평변형의 차이로 정위되며, 층간변위비를 층간변위를 층고로 나눈 값이다. 한국건축구조기준(Korean Building Code, KBC 2016) 3절 지진하중에 따르면, 층간변위는 주어진 층의 상단과 하단부 질량중심의 횡변위 차이로 산정한다. 만약 건축물이 수평비틀림비정형이거나 내진설계범주 C와 D로 분류된 경우에는 층간변위는 층의 상단부와 하단부 모서리 변위차이 중 최댓값으로 산정한다.



<그림 1.9> 층간변위비의 정의

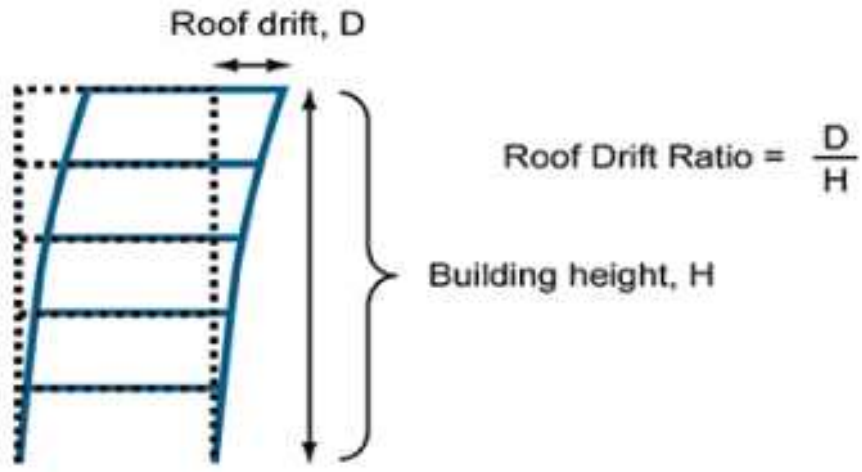


<그림 1.10> 층간변위비에 대한 지진취약도 곡선

(2) Roof Drift Ratio

지붕 변위비는 구조물 최상층 변위를 건물의 높이로 나눈 값으로 각 층의 수평변형량이 아닌 건물 전체 시스템의 변형량을 의미한다.

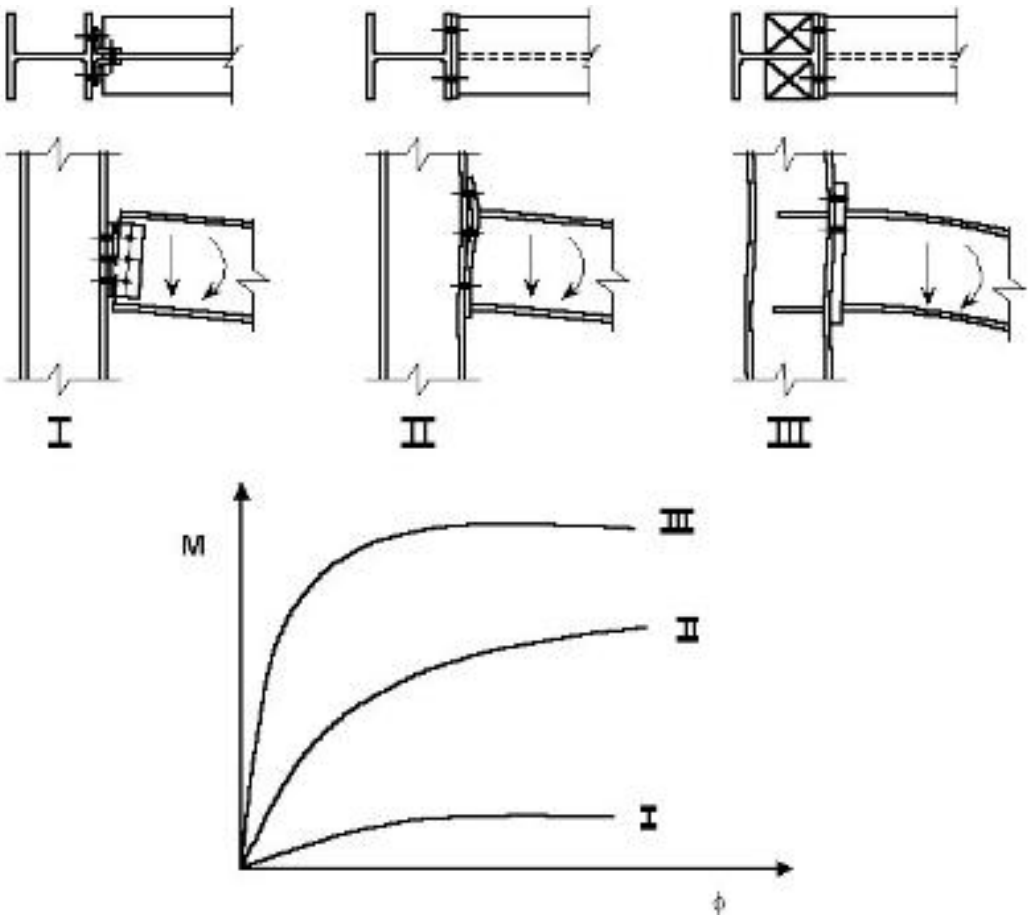
.



<그림 1.11> 최상층 변위의 정의

(3) Rotation Angle

회전각은 보-기둥 접합부에서 발생하는 회전각을 의미한다. 보-기둥 접합부를 강접합(rigid connection)으로 가정할 경우, 이론적으로 외력에 의한 접합부의 회전각은 발생하지 않아 처음 상태를 유지한다. 그러나 실제 건축물의 접합부는 강접합이 아닌 반강접합(semi-rigid connection)이므로 외력에 의해 접합부에 회전각이 발생한다. 접합부가 받는 외력인 모멘트와 외력에 의한 회전각은 접합부의 구조적 성능을 측정할 수 있는 지표이다. 접합부의 형태와 종류에 따라서 접합부의 회전성능은 차이가 발생하므로, 같은 하중에서 접합부의 회전각에 차이가 발생한다.



<그림 1.12> 접합부 회전각의 정의

(4) PFA (Peak Floor Acceleration)

최대층가속도는 건축물 각 층에서 지진에 의해 발생되는 가속도의 최댓값으로 정의된다. 최대층가속도는 건물바닥에 부착된 비구조재가 강체처럼 설계되었을 때, 중요한 설계변수로 사용된다. 구조재의 손상은 층간변위비나 변형각과 같은 변위기반 지진반응계수를 이용하여 손상을 정의한다. 반면, 구조재와 강접합 된 비구조재의 손상은 최대층가속도를 지진반응계수를 이용하여 손상을 정의한다.

(5) PFA/PGA

PFA/PGA는 층가속도와 최대지반가속도의 비를 의미한다. PFA/PGA는 비구조요소의 지진력을 산정 방법에서의 물리적인 의미가 존재한다. KBC 2016에서 제시하는 비구조요소의 지진력은 다음과 같다.

$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS} W_P}{(R_P / I_P)} (1 + 2\frac{z}{h}) \tag{1.11}$$

KBC 2016에 따르면, 비구조재의 고유주기가 0.06초 이상인 flexible component일 경우, 응답증폭계수 a_p의 값은 2.5이다. Flexible component에 대해 z=0 인 경우, 비구조재에 작용하는 층가속도는 최대지반가속도와 동일하며, z=h일 경우 층가속도는 최대지반 가속도의 3배인 값과 같다. 따라서 1+2z/h 항목은 비구조요소의 동적특성과 관계없이 비구조요소가 설치되는 층에 따른 증폭의 영향만을 나타낸다. 이는 결국 최대지반가속도(PGA)에 대한 최대층가속도(PFA)의 비인 PFA/PGA가 비구조요소의 지진응답에 큰 영향을 미치는 항목이므로, 비구조요소에 대한 지진반응계수로 사용될 수 있다.

(6) Cumulative absolute velocity parameter

누적절대속도(Cumulative Absolute Velocity, CAV)는 절대 지진가속도의 시간적분으로 정의된다. 잠재적으로 저진동수의 운동에 민감한 반면, 손상을 주지 않는 고진동수 운동에는 둔감한 특성을 지닌다.

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt \tag{1.12}$$

(7) Inelastic rotation

부재에 탄성 한도 이상의 변형이 일어날 때 그 부재는 탄성 범위를 벗어나 비탄력적인 변형을 하게 되고, 그 시점 이후의 회전을 Inelastic rotation 이라 한다.

(8) 축력, 전단력, 회전력(Axial, flexural, and shear force in attachments)

비구조재와 구조체에 연결된 부착요소에 작용하는 3가지 힘의 종류를 의미한다. 비구조재의 재축 방향으로 작용하는 외력을 Axial force, 비구조재의 모멘트를 발생시켜 부재의 휨을 만드는 외력을 flexural force, 재축의 수직 방향으로 작용하는 외력을 Shear force라고 한다.

3. HAZUS의 지진취약도 데이터베이스 구축

지진취약도 곡선을 정의하기 위해선 구조재와 비구조재의 지진반응계수(engineering demand parameter)로 damage state에 대한 정의가 필요하고, 각 damage state의 지진취약도를 로그정규분포로 표현하기 위해, 로그정규분포의 누적분포함수를 정의하기 위한 중앙값(median)과 표준편차(dispersion)가 필요하다. 요소정보의 지진취약도 곡선에 대한 데이터베이스 구축을 진행하기 위해, 본 연구에서는 HAZUS, SYNER-G, FEMA P-58의 요소정보 분류체계에 따른 지진취약도 곡선 데이터베이스를 구축하였다. 기존 지진취약도 곡선의 DB는 국내 주요시설물 프로토타입 모델에 대한 지진취약도 평가기법으로 얻어진 지진취약도 곡선과 비교를 수행할 것이다.

가. 요소정보의 damage state 정의

HAZUS에서는 36개의 건축물 레벨 구조요소에 대해 <표 1.21>과 같이 건축물이 설계된 시기와 지역에 따라, 내진설계의 level을 high-code, moderate-code, low-code, pre-code의 4가지로 구분하여 지진취약도 함수를 제공하고 있다. HAZUS에서 기본적으로 제공하는 지진취약도 함수는 지진강도는 spectral displacement를 사용하고, 지진반응계수는 story drift ratio를 사용한다.

<표 1.21> Recommended seismic design level for existing buildings

UBC Seismic Zone (NEHRP Map Area)	Design Vintage		
	Post-1975	1941 - 1975	Pre-1941
Zone 4 (MA 7)	High-Code	Moderate-Code	Pre-Code
Zone 3 (MA 6)	Moderate-Code	Moderate-Code	Pre-Code
Zone 2B (MA 5)	Moderate-Code	Low-Code	Pre-Code
Zone 2A (MA 4)	Low-Code	Low-Code	Pre-Code
Zone 1 (MA 2/3)	Low-Code	Pre-Code	Pre-Code
Zone 0 (MA 1)	Pre-Code	Pre-Code	Pre-Code

<표 1.22>은 HAZUS에서 구조요소에 적용된 code level에 따른 spectral displacement로 damage state를 정리한 내용이다. HAZUS에서는 각 구조요소의 damage state를 slight, moderate, extensive, complete의 4단계로 정의하고 있다.

<표 1.22> Typical Drift Ratios Used to Define Median Values of Structural Damage

Seismic Design Level	Building Type (Low-Rise)		Drift Ratio at the Threshold of Structural Damage			
			Slight	Moderate	Extensive	Complete
High-Code	W1/W2		0.004	0.012	0.04	0.1
	C1L, S2L		0.005	0.01	0.03	0.08
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L		0.004	0.008	0.024	0.07
Moderate-Code	W1/W2		0.004	0.01	0.031	0.075
	C1L, S2L		0.005	0.009	0.023	0.06
	RM1L/RM2L, PC1/PC2L		0.004	0.007	0.019	0.053
Low-Code	W1/W2		0.004	0.01	0.031	0.075
	C1L, S2L		0.005	0.008	0.02	0.05
	RM1L/RM2L,PC1/PC2L	URML,	0.004	0.006	0.016	0.044
	C3L, S5L		0.003	0.006	0.015	0.035
Pre-Code	W1/W2		0.003	0.008	0.025	0.06
	C1L, S2L		0.004	0.006	0.016	0.04
	RM1L/RM2L,PC1/PC2L	URML,	0.003	0.005	0.013	0.035
	C3L, S5L		0.002	0.005	0.012	0.028

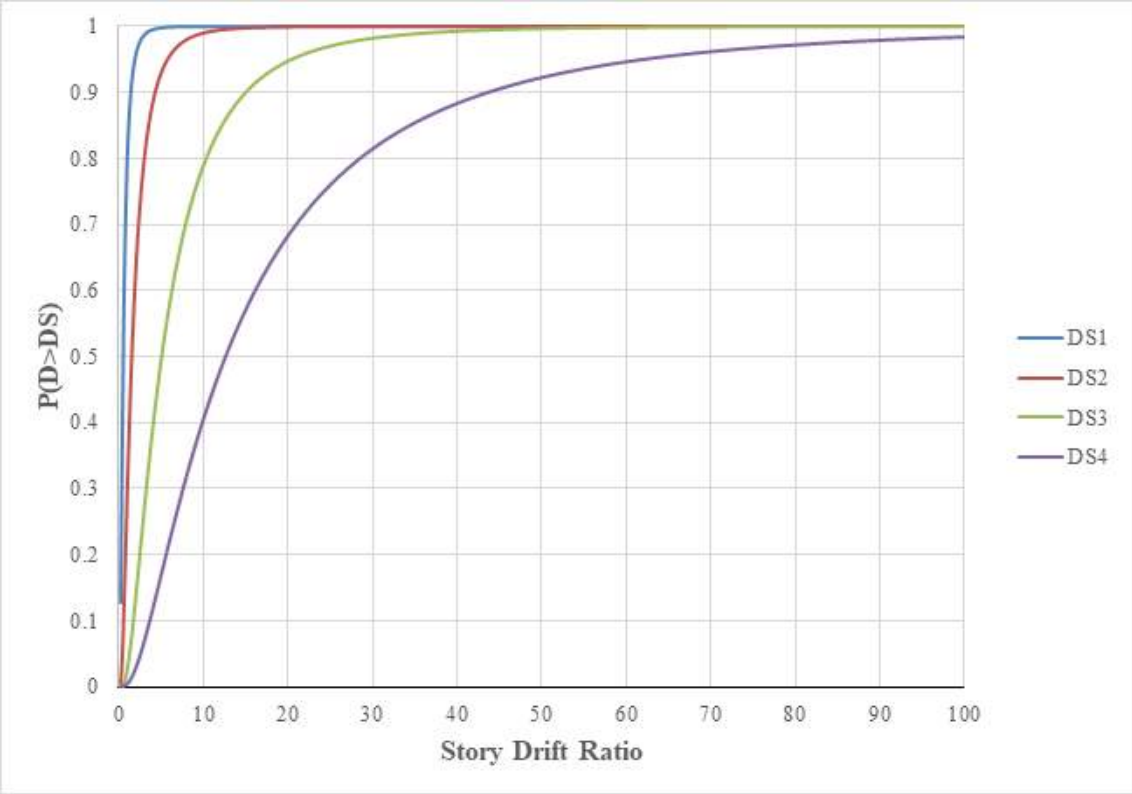
나. 요소정보에 대한 지진취약도 곡선 DB

HAZUS에서 제공하는 시스템레벨에서의 구조요소에 대한 지진취약도곡선은 총 288개 이며, 총 36개의 구조요소(건축물)에 대해 4개의 내진설계레벨, 2개의 지진강도로 지진취약도 곡선을 제공한다. FEMA P-58처럼 각 비구조요소에 대한 지진취약도 곡선을 제공하지는 않으며, 총 288개로 분류된 구조요소에 대하여 변위민감 비구조요소, 가속도민감 비구조요소에 대해 지진취약도 곡선을 총 576개 제공한다. HAZUS에서 구조재와 비구조재에 대해 제공하는 총 864개의 지진취약도곡선을 데이터베이스화 하였으며, <표 1.23>은 high code level에서 구조요소의 지진취약도 곡선을 정의하는 damage state에 따른 중앙값과 표준편차를 정리한 것이다. <그림 1.13>부터 <그림 1.15>은 구축된 지진취약도곡선 DB를 이용하여 얻어지는 지진취약도 곡선의 예이다.

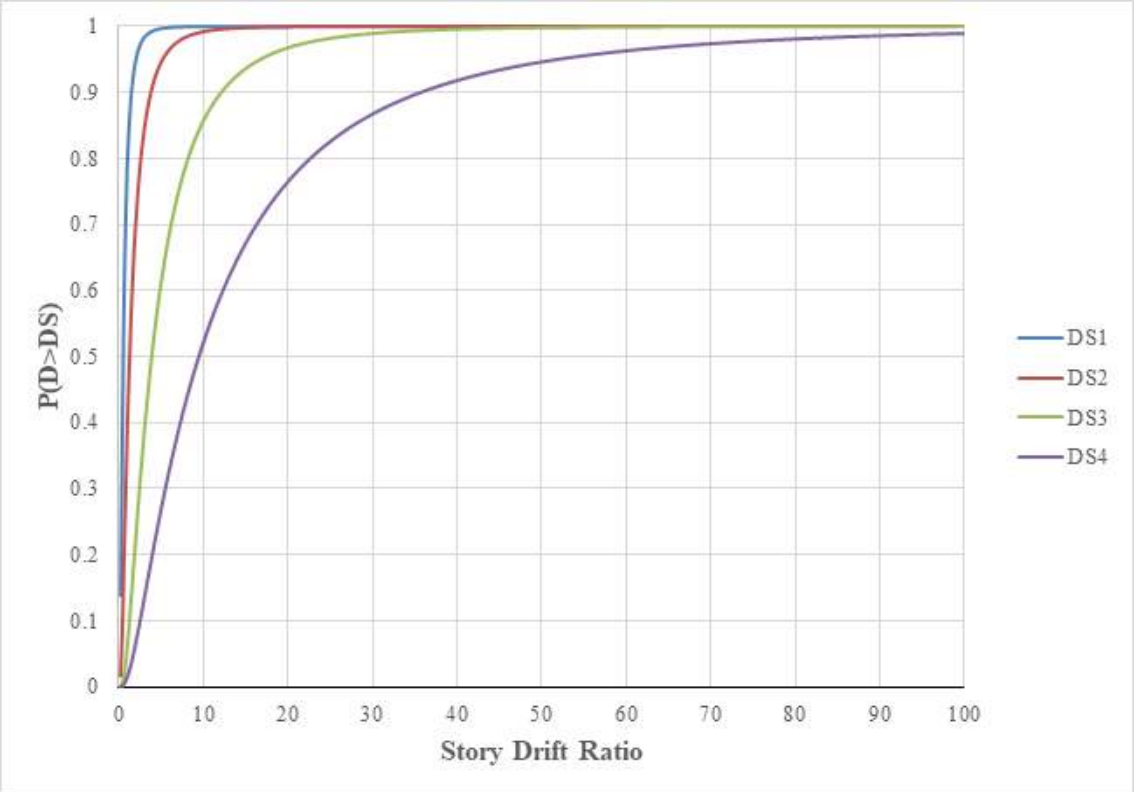
<표 1.23> Structural Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (inches)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.50	0.80	1.51	0.81	5.04	0.85	12.60	0.97
W2	288	216	0.86	0.81	2.59	0.88	8.64	0.90	21.60	0.83
S1L	288	216	1.30	0.80	2.59	0.76	6.48	0.69	17.28	0.72
S1M	720	540	2.16	0.65	4.32	0.66	10.80	0.67	28.80	0.74
S1H	1872	1123	3.37	0.64	6.74	0.64	16.85	0.65	44.93	0.67
S2L	288	216	1.08	0.81	2.16	0.89	6.48	0.94	17.28	0.83
S2M	720	540	1.80	0.67	3.60	0.67	10.80	0.68	28.80	0.79
S2H	1872	1123	2.81	0.63	5.62	0.63	16.85	0.64	44.93	0.71

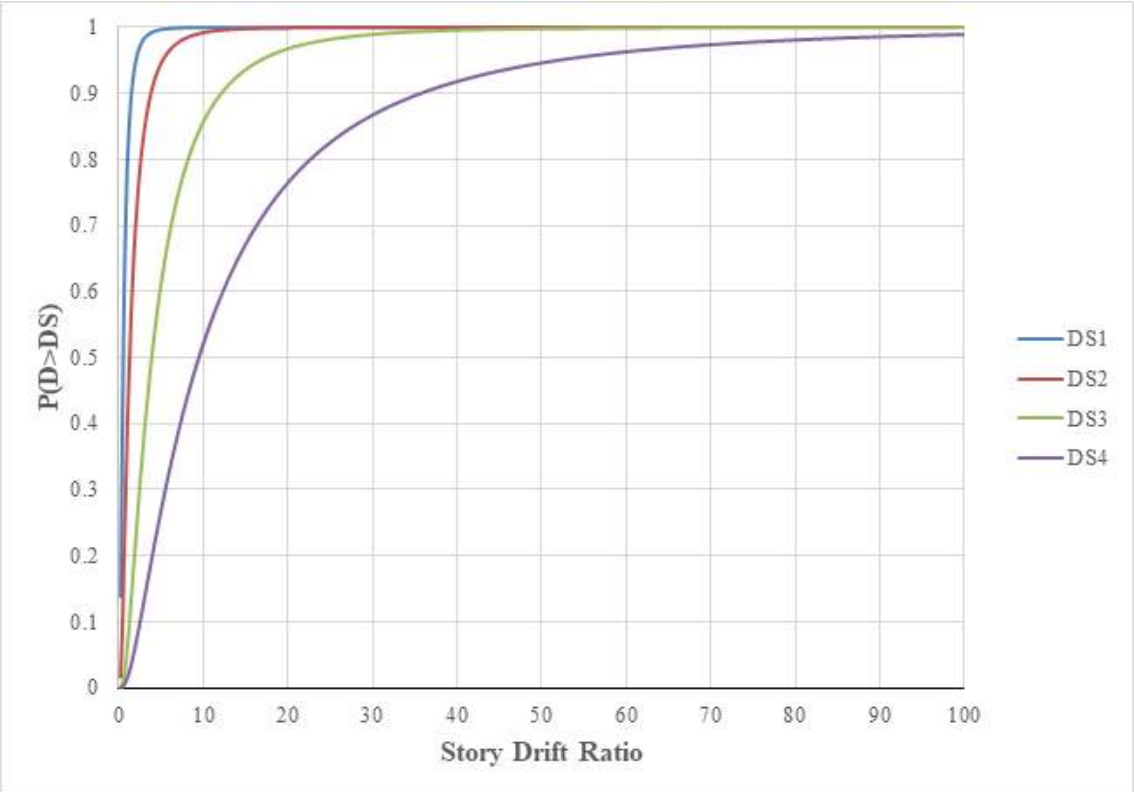
Building Properties			Spectral Displacement (inches)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
S3	180	135	0.54	0.81	1.08	0.82	3.24	0.91	9.45	0.90
S4L	288	216	0.86	0.89	1.73	0.89	5.18	0.98	15.12	0.87
S4M	720	540	1.44	0.77	2.88	0.72	8.64	0.70	25.20	0.89
S4H	1872	1123	2.25	0.64	4.49	0.66	13.48	0.69	39.31	0.77
C1L	240	180	0.90	0.81	1.80	0.84	5.40	0.86	14.40	0.81
C1M	600	450	1.50	0.68	3.00	0.67	9.00	0.68	24.00	0.81
C1H	1440	864	2.16	0.66	4.32	0.64	12.96	0.67	34.56	0.78
C2L	240	180	0.72	0.81	1.80	0.84	5.40	0.93	14.40	0.92
C2M	600	450	1.20	0.74	3.00	0.77	9.00	0.68	24.00	0.77
C2H	1440	864	1.73	0.68	4.32	0.65	12.96	0.66	34.56	0.75
PC1	180	135	0.54	0.76	1.08	0.86	3.24	0.88	9.45	0.99
PC2L	240	180	0.72	0.84	1.44	0.88	4.32	0.98	12.60	0.94
PC2M	600	450	1.20	0.77	2.40	0.81	7.20	0.70	21.00	0.82
PC2H	1440	864	1.73	0.64	3.46	0.66	10.37	0.68	30.24	0.81
RM1L	240	180	0.72	0.84	1.44	0.86	4.32	0.92	12.60	1.01
RM1M	600	450	1.20	0.71	2.40	0.81	7.20	0.76	21.00	0.75
RM2L	240	180	0.72	0.80	1.44	0.81	4.32	0.91	12.60	0.98
RM2M	600	450	1.20	0.71	2.40	0.79	7.20	0.70	21.00	0.73
RM2H	1440	864	1.73	0.66	3.46	0.65	10.37	0.66	30.24	0.72
MH	120	120	0.48	0.91	0.96	1.00	2.88	1.03	8.40	0.92



<그림 1.13> Fragility Curve for Structural component - High Code (W1-Low Rise)



<그림 1.14> Fragility Curve for Structural component - Moderate Code (W1-Low Rise)



<그림 1.15> Fragility Curve for Nonstructural component - High Code (W1-Low Rise)

4. SYNER-G의 지진취약도 데이터베이스 구축

가. 요소정보의 damage state 정의

SYNER-G에서는 총 415개의 구조요소에 대한 지진취약도 함수를 제공하고 있다. 구조요소는 시스템레벨로 분류되며, 조적조와 철근콘크리트조에 대해 한정적으로 지진취약도곡선을 제공하고 있다. SYNER-G에서 사용하는 지진강도는 S_d, S_a, PGA, PGV, MMI, EMS98, MSK81, MCS, RMS로 다양하게 정리되어 있으며, 지진반응계수 역시 Cumulative absolute velocity parameter, Inelastic rotation, Axial, flexural and shear force in attachments, Peak stress로 분류되어 있다. 이 중 PGA는 38%로 가장 많은 비율로 사용된 지진강도이다. 이처럼 다양한 지진강도와 지진반응계수를 사용하게 된 이유는, 지진취약도에 필요한 매개변수를 얻는 과정에서 경험적 방법과 전문가의 의견을 통해서 얻어진 경우가 많았기 때문으로 사료된다. <표 1.24>은 S_d로 정의되는 damage state를 정리한 것이다.

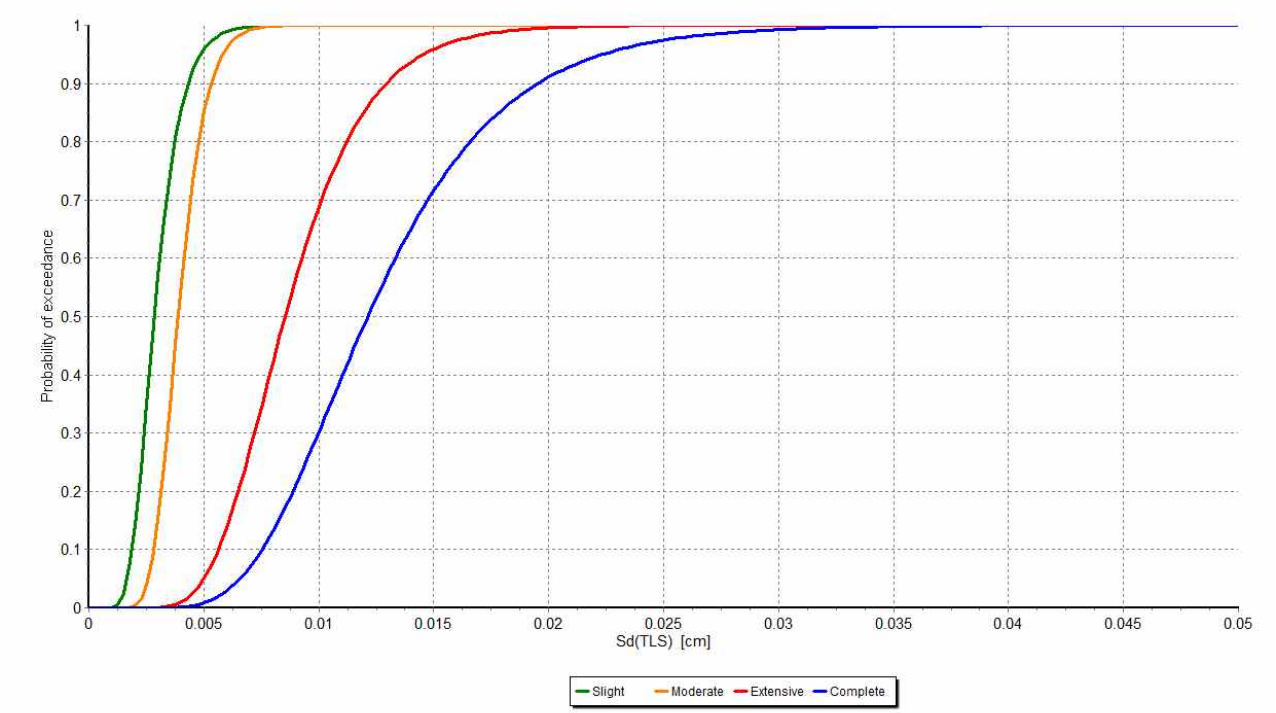
<표 1.24> Damage state definition in accordance with spectral displacement limit

Damage state		Drift limit	Spectral displacement limit
DS1	No damage	$\Delta < 0.7\Delta_y$	$D<0.7D_y$
DS2	Slight	$0.7\Delta < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.05\Delta_{vy}$	$0.7D_y<D<D_y$
DS3	Moderate	$0.7\Delta_y + 0.05\Delta_{vy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.5\Delta_{vy}$	$D_y<D<D_y+D_{vy}$
DS4	Extensive	$0.7\Delta_y + 0.2\Delta_{vy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.5\Delta_{vy}$	$D_y+D_{vy}<D<D_u$
DS5	Very heavy	$0.7\Delta_y + 0.5\Delta_{vy} < \Delta < 0.7\Delta_y + \Delta_{vy}$	$D_u<D$
with $\Delta_{vy}=0.9\Delta_v-0.7\Delta_y$ and $D_{vy}=0.25(D_v-D_y)$			

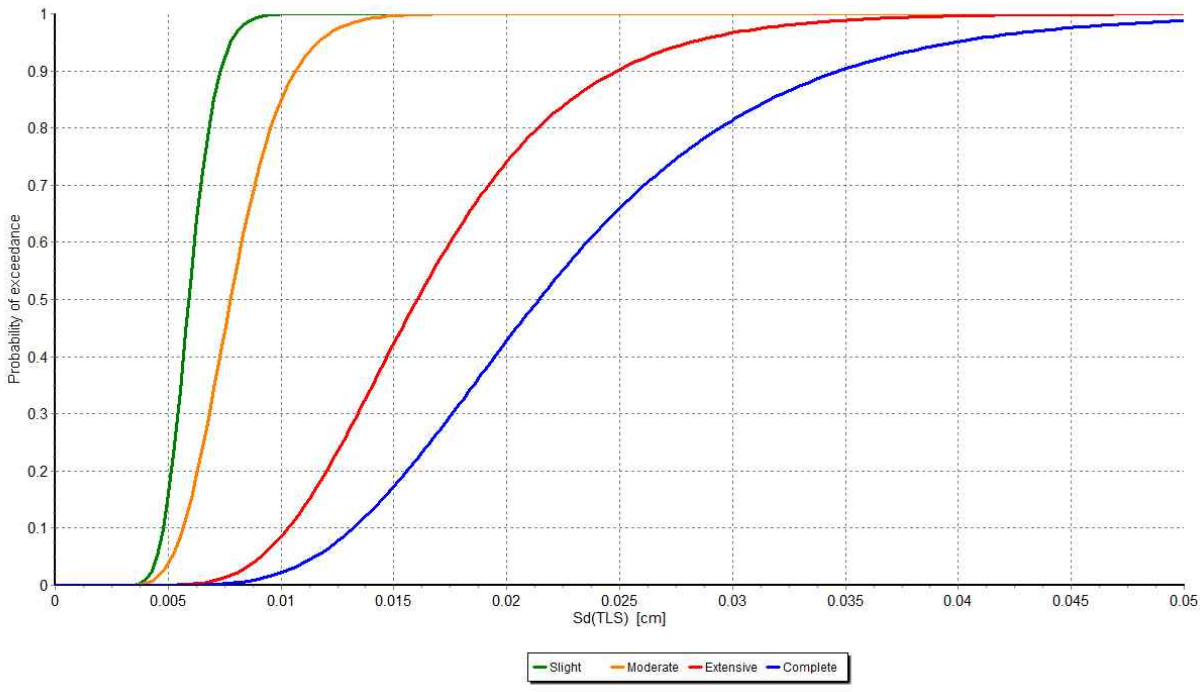
나. 요소정보에 대한 지진취약도 곡선 DB

SYNER-G에서는 HAZUS와 동일하게 건축물 레벨에서 구조요소에 대한 지진취약도 곡선을 제공한다. HAZUS는 36개의 건축물 타입에 대해 지진취약도 곡선을 제공하는 반면, SYNER-G에서는 SYNER-G에서 사용하는 분류체계에 따라 지진취약도 곡선을 제공하는 차이가 있다. SYNER-G에서는 하중전달 메커니즘, 사용재료, 수평 및 수직 비정형성 등을 포함해 총 10개의 category로 건축물 레벨에서 구조요소를 분류하기 때문에 각각 지진취약도 곡선의 세부적인 사항을 알 수 있는 장점이 있다. 아래는 SYNER-G에서의 구조요소 분류체계에 대한 예이다. <그림 1.16>부터 <그림 1.19>은 구축된 지진취약도 곡선 DB를 이용하여 얻어지는 지진취약도 곡선의 예이다.

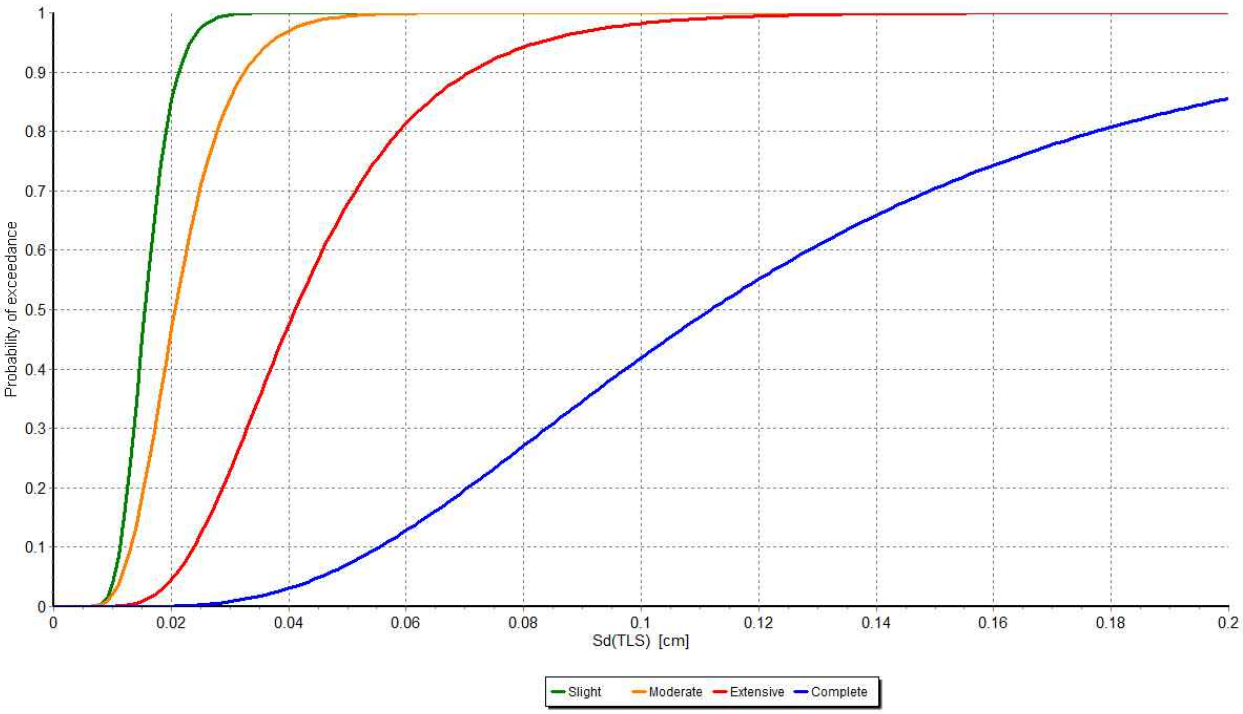
MRF/C-RC/X/X/RI-FB-H%/ND/R-RC/X/L-2/NS: moment resisting frame, in reinforced concrete with regular external infill panels in brick with a high percentages of voids, with non-ductile design details, with rigid reinforced concrete floor, low-rise, 2stories, not designed to a seismic code



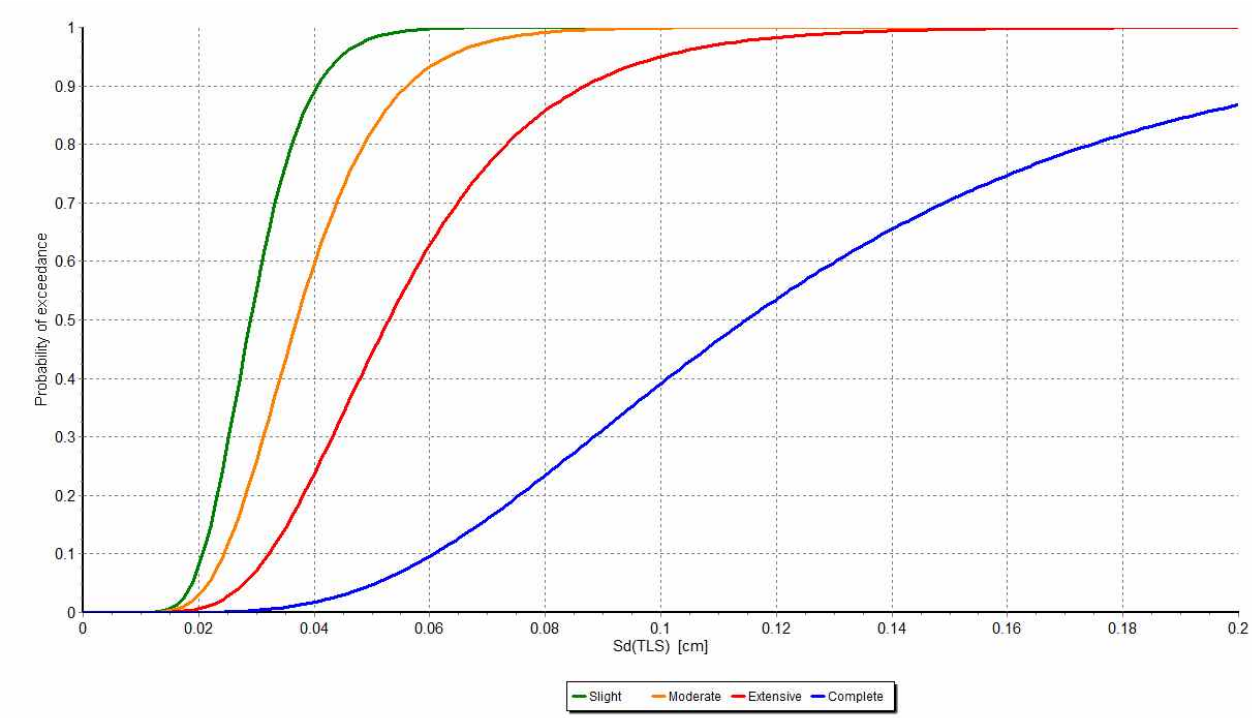
<그림 1.16> Fragility curve for MABrick(High)-2storeys according to the damage states



<그림 1.17> Fragility curve for MABrick(Low)-4storeys according to the damage states



<그림 1.18> Fragility curve for RC-Irregular-Ductile-2storeys according to the damage states



<그림 1.19> Fragility curve for RC-Regular-Ductile-5storeys according to the damage states

5. FEMA P-58의 지진취약도 데이터베이스 구축

가. 요소정보의 damage state 정의

FEMA P-58에서는 총 764개 요소에 대한 지진취약도 함수가 제공된다. 이 중 구조요소는 355개, 비구조요소는 409개로 파티션, 캐비넷, 냉각기, 파이프 등 비구조요소에 대한 다양한 지진취약도 함수를 제시한다. FEMA P-58에서 사용하는 지진강도는 PGA, S_a, S_d이며 지진반응계수는 effective drift, rotation angle, peal floor acceleration, peak floor velocity, story drift ratio를 적용하고 있다. FEMA P-58은 부재레벨에서 요소정보를 분류하기 때문에 구조요소와 비구조요소를 구분할 수 있으며, 실험을 통해 damage state를 정의하고 지진취약도에 필요한 매개변수를 도출하는 경우가 많아 다른 연구와 달리 통일된 damage state를 정의하기는 어렵다.

나. 요소정보에 대한 지진취약도 곡선 DB

총 764개의 요소정보에 대해 FEMA P-58에서 제시하는 지진취약도 곡선을 데이터베이스화 하였으며, HAZUS, SYNER-G와 함께 부록에 제공되어 있다. FEMA P-58의 요소정보 분류체계에서 정의하는 B1041.041a에 대한 데이터베이스의 상세내용은 아래의 그림과 같다.

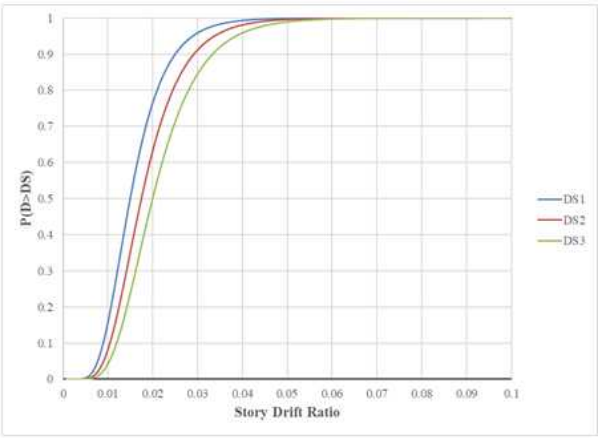
B1041.041a

Component Name : ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side

Component Description : ACI318 OMF, joint shear failure, beam flexural response. Meets the following requirements: (1) Sum M_{col} / Sum M_{beam} > 1.2, (2) Beam $V_n > V_{eq}$, (3) Column $V_n > V_{eq}$. Costing is on a per joint basis.

Demand Parameter : Story Drift Ratio

DS1		DS2		DS3	
Median Demand	Dispersion	Median Demand	Dispersion	Median Demand	Dispersion
0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4



<그림 1.20> B1041.041a의 지진취약도 곡선 데이터베이스 상세 목록

FEMA P-58은 부재레벨에서 요소정보의 지진취약도을 제공하고 있기 때문에, 실제 실험으로 얻어진 경우가 많아, 위의 그림과 같이 실험에 사용된 부재의 상세 내용이 함께 정리되어 있다.

6. 소결

본 장에서는 기존 연구자료에서 구조요소를 분류하는 체계에 대해 분석을 진행하였다. ATC-13, EMS-98, HAZUS, RISK-UE, PAGER-STR, FEMA P-58, SYNER-G의 총 7개의 구조요소에 대한 분류체계와 KBC 2016, IBC 2015, ASCE 7-14, HAZUS, FEMA P-58, SYNER-G의 총 6개의 비구조요소에 대한 분류체계에 대해 분석을 진행하였다.

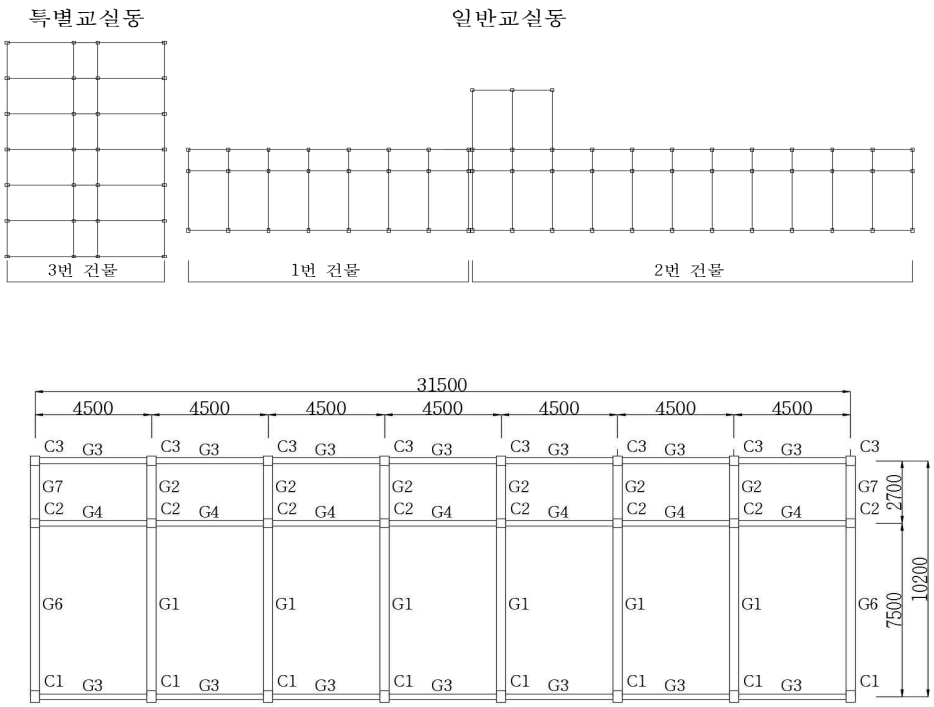
- ○ 건축물의 요소정보를 분류하는 기준은 크게 2가지의 형태로 나눌 수 있는데, FEMA-P58에서 사용하는 건축물을 구성하는 부재레벨에서의 요소정보 분류체계와 FEMA-P58외의 자료에서 사용하는 시스템 레벨에서의 요소정보 분류체계이다.
- ○ 본 연구에서는 건축물의 지역단위의 지진손실을 평가하는 것이 목적이 아닌 건축물 각각의 지진손실을 평가하는 것이 최종 목적이므로, FEMA P-58에서 사용하는 요소정보 분류체계를 사용하여 발전시키는 방향이 더 적합하다고 판단된다. 또한 건축물 레벨에서의 분류체계에 따른 구조요소의 지진손상을 대표하는 지진취약도를, 본 연구에서 제시하는 방식과 비교하여 분석하는데 사용될 수 있으므로, 건축물 요소정보에 대한 지진취약도 데이터베이스 구성시, 두 방식 모두 구성하는 것이 필요하다고 할 수 있다.
- ○ SYNER-G의 경우, 건축구조물에 설치되는 비구조요소에 대한 분류체계에 대한 내용은 없지만, essential facility인 병원과 소방서에 설치되는 비구조요소에 대한 분류체계를 수립하고 있다. FEMA P-58에서 비구조요소를 분류하는 체계는 구조요소와 비슷하게 지진에 의한 손상을 손실로 연결시키는데 있어서 자세한 분석이 가능한 장점이 있다.
- ○ FEMA P-58, HAZUS, SYNER-G의 요소정보 분류체계에 따른 구조재 1058건, 비구조재 985건에 대한 지진취약도 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 지진취약도에 대한 데이터베이스는 시스템레벨과 부재레벨에서의 요소정보에 따른 지진취약도를 포함하여, 향후 연구개발에 사용될 데이터기반을 마련하였다.

2절. 주요시설물의 프로토타입 모델 개발

1. 학교시설물의 프로토타입 모델 개발

학교시설물은 2005년 내진설계기준 개정 이후, 주요시설물로 분류되어 규모에 상관없이 내진설계 대상에 포함되었기 때문에, 현재 대다수의 학교시설물은 내진설계가 되어 있지 않다[1]. 1980년대에서 1990년대 까지 학생 수에 비해 부족한 학교 수를 보충하기 위해, 1980년도 건설부령으로 공고된 “학교교사 표준설계도”를 이용하여 효율적이고 신속하게 학교시설물을 양산하였다. 현재의 내진설계기준 관점에서 학교교사 표준설계도는 비내진상세를 가지므로, 학교교사 표준설계도는 현재 비내진상세를 가지는 대다수 학교시설물을 대표한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 학교시설물의 프로토타입 모델을 학교교사 표준설계도를 이용하여 선정하였다.

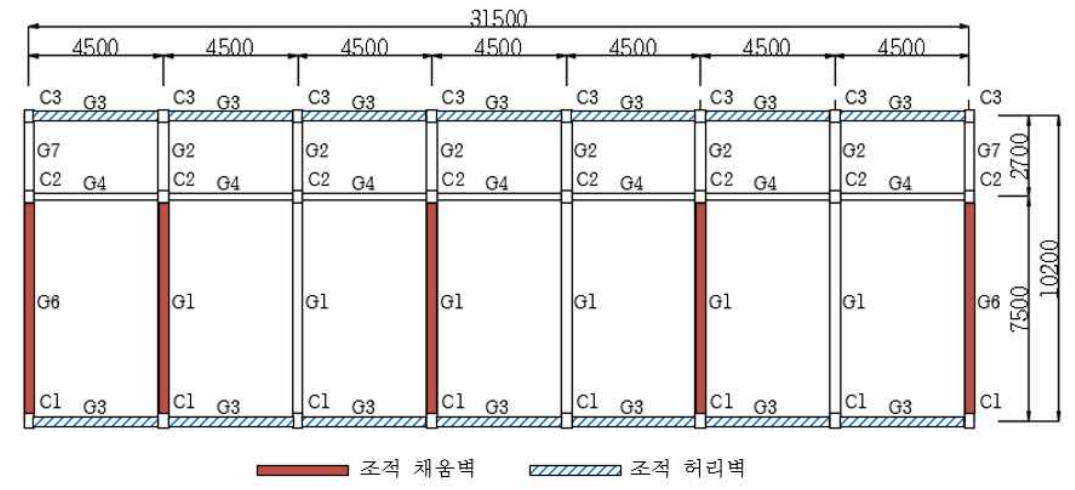
학교교사 표준설계도 중 (다)형은 일반교실동과 특별 교실 동으로 구분되어 있으며, 일반교실 동은 신축이음(expansion joint)에 의해 2동으로 분리되어 총 3동으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 연구의 용이성을 위해 장방형 평면을 가지는 1번 건물을 프로토타입 모델로 선정하였다. 단변방향의 조적채움벽은 계단실 및 교실을 구획하는 부분에 위치하고 있으며 조적허리벽의 경우 장변방향으로 1200mm높이를 갖는 것으로 가정하였다.



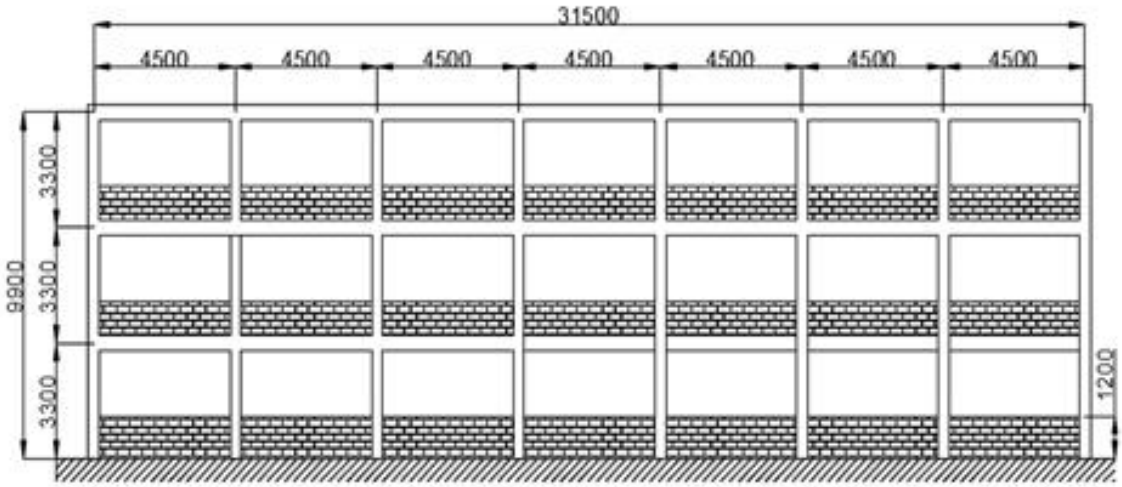
<그림 1.21> 학교교사 표준설계도 (다)형 평면도

1) 2016년 국민안전처의 “기존시설물 내진실태 현황조사”에 따르면, 전국 31,900동의 학교시설물 중 내진설계가 적용된 건축물은 6,975동로 전체의 23.7%에 불과함.

<그림 1.22>과 <그림 1.23>은 각각 학교시설물 프로토타입 모델의 평면도와 입면도에 대한 그림이다. 학교시설물의 구조적 특징은 장변방향이 단변방향에 비해 길고, 장변방향으로는 조적 허리벽, 단변방향으로는 조적 채움벽이 설치되는 점이다. 장변방향의 조적 허리벽은 포항지진의 피해사례에서 나타났듯이, 기둥의 단주효과에 의한 전단파괴가 다수 관측되었다. 즉, 학교건축물의 구조적 거동을 실제와 가깝게 모사하기 위해선, 기둥의 단주효과를 고려한 해석기법에 대한 고려가 필요하다고 할 수 있다. <표 1.25>, <표 1.26>은 각각 학교시설물 프로토타입 모델의 재료강도 및 지반특성과 중력하중조건을 정리한 것이다.



<그림 1.22> 학교시설물 프로토타입 모델 평면도



<그림 1.23> 학교시설물 프로토타입 모델 입면도

<표 1.25> 학교시설물 프로토타입 모델의 재료 강도 및 지반 특성

콘크리트 압축강도 (MPa)	철근 항복강도 (MPa)	지진구역	지반조건
21	340	I	SD

<표 1.26> 학교시설물 프로토타입 모델의 중력하중조건

층 위치	고정하중 (kN/m^2)	활하중 (kN/m^2)
기준층	4.8	1.0
지붕층	3.7	3.0

2. 소방시설물의 프로토타입 모델 개발

건축물의 프로토 타입을 선정하기 위해서는 먼저, 현재 가장 내진성능평가가 필요한 시설물을 선정해야만 한다. 소방서의 보유성능평가를 진행하기 위하여 소방서의 구조적특성 파악이 필수적이다. 서울시 23개 소방서에서 정보공개가 진행된 16개 소방서를 대상을 설립년도와 구조시스템에 대하여 조사하였다. 16개의 소방서 중 87.5% 14개의 소방서가 철근 콘크리트 구조형식이었다. 서울시 재난안전본부를 통하여 서울시 23개 소방서 중 5곳에 대하여 소방서 도면을 확보하여 건물의 높이 및 기둥간격을 조사하였다. 또한 경기도 소방건축물 표준설계 가이드라인을 통하여 프로토타입 선정을 위한 기준을 선정하였다.

<표 1.27> 서울 소방서 구조시스템

연번	구분	설립년도	구조시스템	내진보강 필요유무
1	강남 소방서	1976년	철근콘크리트구조	필요
2	강동 소방서	1985년	철근콘크리트구조	필요
3	강서 소방서	1982년	철근콘크리트구조	필요
4	관악 소방서	1994년	철근콘크리트구조	필요
5	구로 소방서	1992년	철근콘크리트구조	필요
6	노원 소방서	1993년	철근콘크리트구조	필요
7	도봉 소방서	1989년	철근콘크리트구조	필요
8	동대문 소방서	1986년	철근콘크리트구조	필요없음
9	동작 소방서	2000년	철골 + 철근콘크리트구조	필요없음
10	마포 소방서	1987년	철근콘크리트구조	필요없음
11	서대문 소방서	2006년	철근콘크리트구조	필요없음
12	서초 소방서	1979년	철근콘크리트구조	필요없음
13	양천 소방서	1998년	철근콘크리트구조	필요없음
14	영등포 소방서	1946년	철근콘크리트구조	필요없음
15	은평 소방서	1975년	철근콘크리트구조	필요
16	종로 소방서	1925년	철골 + 철근콘크리트구조	필요없음

○ 소방서프로토타입을 위한 기준

1. 5개 소방서의 1층 층고는 평균 5.6m이며, 나머지층 층고는 3.45m이다.

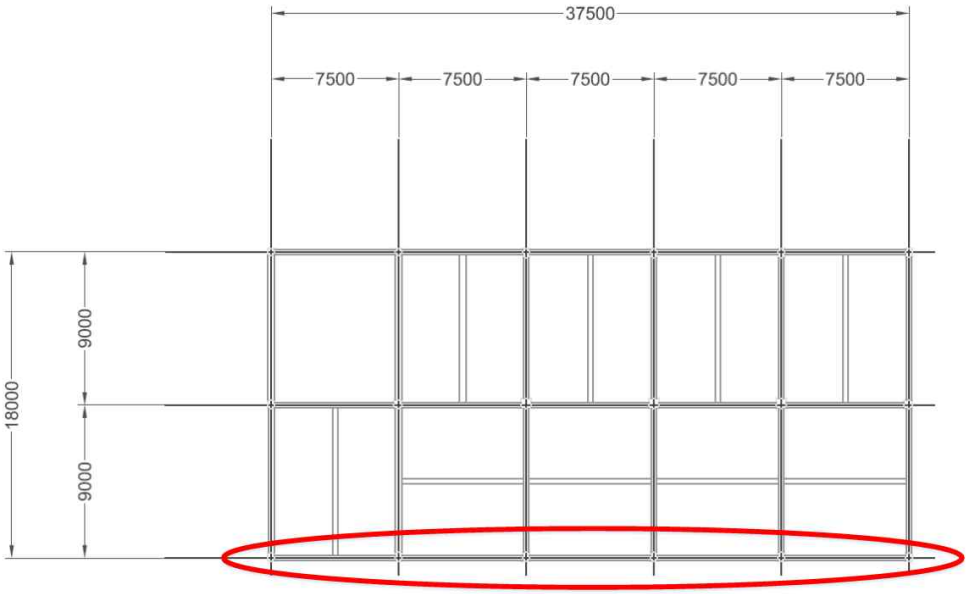
- 1층 층고와 2층이상 층고의 차이는 1층 주차시설에 소방차량이 들어가기위한 공간이 필요하기 때문이다. 소방펌프차의 평균 높이는 4.2m이며 폭은 6m이다. 따라서 1층의 층고는 소방차량의 원활한 출입을 위해 최소 5m 이상을 만족하여야 한다.

2. 소방서는 지상층에 장비창고가 위치해야만 하며, 그 외 사무실 및 부가시설이 2층이상에 존재한다.

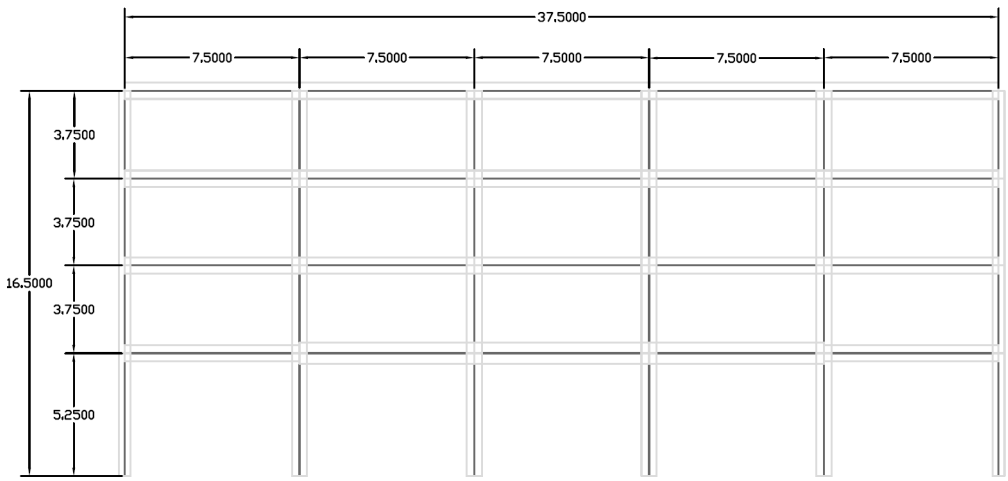
- 신속한 출동을 위하여, 화재진압시설 또는 응급상황에 필요한 장비는 주차시설이 존재하는 1층에 존재하여야만 한다.

3. 소방서의 1차 프로토타입 구조모델에서는 비구조재에 대한 영향을 고려하지 않았다. (수도관시설, 소방첨탑 등등)

본 연구에서는 프로토타입의 취약도곡선을 분석하기 위해 2차원 모델을 이용하였다. <그림 1.24>에 표시된 붉은 원이 선정된 2차원 모델이다. <그림 1.25>는 앞서 언급한 소방서 1차 프로토타입 구조모델의 입면도이다.



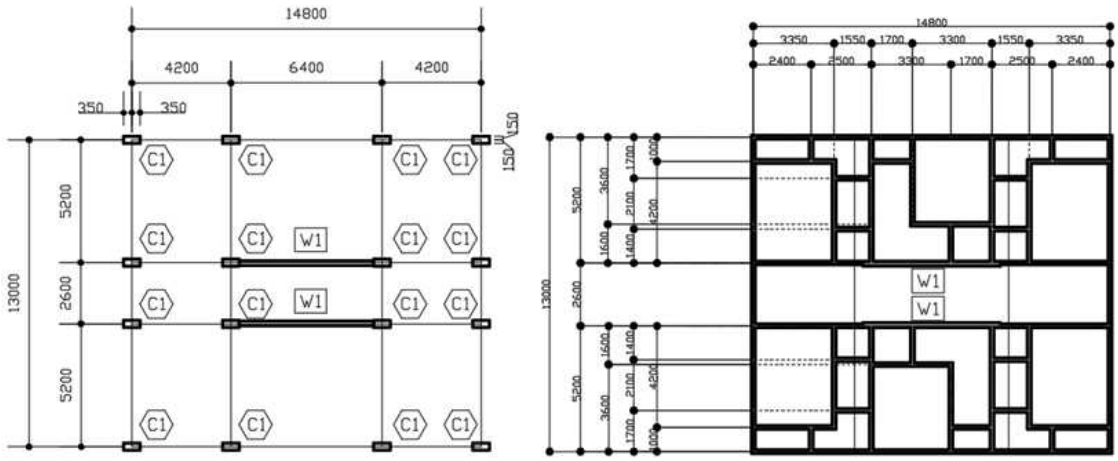
<그림 1.24> 소방서 프로토타입 모델 평면도



<그림 1.25> 소방서 프로토타입 모델 입면도

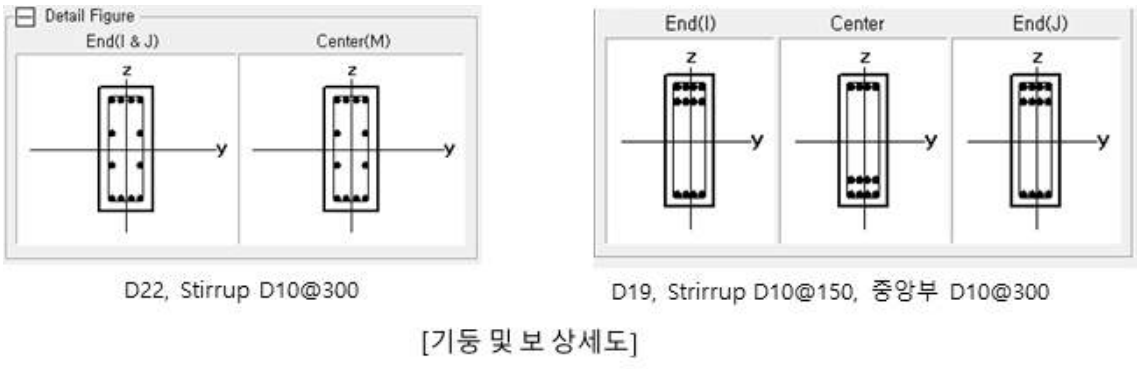
3. 필로티구조물의 프로토타입 모델 개발

2017년 11월 15일 발생한 포항지진으로 인해 100동 이상의 피해를 입은 국내 필로티 건물은 건축적인 이유로 저층부에 기둥을 둔 전단벽식 구조물로 이루어져 있다.



<그림 1.26> 필로티건축물 프로토타입 모델 평면도

프로토타입은 기존 건축물의 도면에서 각 층의 전단벽의 위치를 변화시켜줌으로써 수평비정형성을 감소시켜주었다. 기둥과 보에 사용된 콘크리트의 압축강도는 기존 도면을 따라 21*MPa*로 결정하였고, 철근의 항복강도는기존 건축물 내진성능 평가요령에 따라 2001년 이후 건축물의 평균값인 375*MPa*로 가정하였다. 기둥과 보의 배근은 각각 <그림 1.27>과 같이 배근하였다.



<그림 1.27> 필로티건축물 프로토타입 모델 부재 배근도

건물의 하중은 고정하중 100%와 활하중 25%를 조합하여 사용하였다. 고정하중은 골조하중 및 건축 마감을 고려하여 4.1kN/m^2, 활하중은 근린생활시설과 옥상에 대해 건축구조기준에 따라 기준층은 2kN/m^2, 지붕층은 1kN/m^2로 결정하였다. 또한 이 하중을 각 절점에 질량으로 치환하여 적용하였다.

4. 소결

본 장에서는 주요시설물인 학교시설물과 소방시설물의 프로토타입 모델 개발에 대한 연구를 수행하였다. 또한 추가적으로 지진에 대해 취약한 연층(soft story) 및 약층(weak story)를 갖는 필로티구조물의 프로토타입 모델을 개발하였다. 각 건축물의 프로토타입 모델을 개발한 결과는 다음과 같다.

- ❍ 학교시설물은 80년대 “학교교사 표준 설계도”를 기준으로 프로토타입 모델을 선정하였다. 학교시설물의 프로토타입 모델은 3층 7경간 철근콘크리트모멘트골조(RC모멘트골조)이며, 구조부재인 기둥과 보는 비내진상세를 가진다. 학교시설물 프로토타입 모델의 재료강도는 한국시설안전공단의 “기존 시설물 내진성능 평가요령”에 따라, 콘크리트의 압축강도는 21MPa, 철근의 항복강도는 340MPa로 설정하였다. 학교시설물의 구조적 특징은 장변방향 기둥사이에 조적허리벽이 설치되어 기둥부재에 단주효과가 발생할 가능성이 크다는 점이다. 조적허리벽은 비구조재로 분류되지만, 구조재인 기둥의 거동에 영향을 미치기 때문에, 학교시설물의 해석시 조적허리벽에 대한 영향을 고려하여 해석을 진행해야 된다고 판단된다.
- ❍ 소방시설물의 프로토타입 모델을 개발하기 위해, 서울에 위치한 소방서 16곳의 도면을 입수하여 분석을 수행하였다. 서울시 소방서 16개의 구조시스템 중 14개(87.5%)의 구조시스템이 철근콘크리트구조로 분석되어, 철근콘크리트를 재료로하는 구조시스템을 설정하였다. 소방서의 건축적 특징은 1층의 소방차의 입출입을 위해 5m이상의 층고가 확보되어야 한다는 점이며, 2층 이상은 사무실이나 휴식공간이 위치한다는 점이다. 이러한 건축적 특징을 반영하여 소방서 차고는 층고를 5m로 설정하였으며, 2층부터는 층고를 3.75m로 설정하였다. 따라서 소방시설물의 프로토타입 모델은 4층 5경간 RC모멘트골조로 설정하였다.
- ❍ 필로티구조물은 주요시설물로 분류되지 않지만, 대다수의 다가구 또는 다세대주택이 1층의 주차공간의 니즈로 인해 1층은 기둥, 2층이사은 벽식구조인 필로티구조를 사용한다. 필로티구조는 포항지진의 사례에서 드러났듯이, 1층 기둥의 전단파괴가 발생할 가능성이 높다. 따라서 학교시설물의 단주효과에 의한 기둥의 전단파괴거동과 비슷한 구조적 특징을 가지므로, 필로티구조물에 대한 프로토타입 모델을 개발하였다. 포항지진에 대해 피해를 입은 필로티구조물을 조사하여, 평면의 비정형성이 없고, 수직으로 비정형성이 있는 프로로타입 모델을 개발하였다.

3절. 스펙트럼기반 지진하중시나리오 작성

1. 국내 설계스펙트럼의 변화 분석

지진하중은 지진동에 의해 건축물에 작용하는 동적하중을 정적인 횡력으로 평가하는 등가정적해석에 사용되는 하중을 말하며, 정의되는 지진하중을 통해 건축물은 밑면전단력, 층지진하중, 층전단력, 수평비틀림모멘트, 전도모멘트 등에 저항할 수 있도록 설계되어야 한다. 등가정적해석에 사용되는 지진하중에 의한 밑면전단력(V)은 KBC 2016을 기준으로 식 (1.13)과 같이 지진응답계수(C_s)와 건축물의 유효 중량(W)으로 구할 수 있다.

$$V = C_s W \tag{1.13}$$

지진응답계수(C_s)는 KBC 2005부터 사용하기 시작한 계수로, 설계스펙트럼에 의해 결정되는 설계스펙트럼가속도(S_{D1} 또는 S_{DS}), 지진력저항시스템에 의해 결정되는 반응수정계수(R), 건축물의 용도 및 규모에 따라 결정되는 중요도계수(I_E), 그리고 건축물의 고유주기(T)를 이용하여 식 (1.14)과 같이 구할 수 있다.

$$C_S = \frac{S_{D1} \text{ or } S_{DS}}{\left[\frac{R}{I_E}\right] T} \tag{1.14}$$

식 (1.14)에서 알 수 있듯이, 밑면전단력을 결정하는 지진응답계수는 KBC 2016을 기준으로 설계스펙트럼가속도, 반응수정계수, 중요도계수, 고유주기로 계산할 수 있다. 내진기준의 변화에 따라 관련 용어가 바뀌었지만, KBC 2016의 용어를 기준으로 설계스펙트럼가속도는 지역계수와 지반증폭계수로 산정할 수 있다. 또한 내진설계기준이 변화함에 따라 지진력저항시스템에 따른 반응수정계수와 용도 및 규모에 따른 중요도계수 또한 변화하였다. 따라서 건축물에 작용하는 지진하중의 크기 또한 사용된 설계기준에 따라 변화하였다고 판단할 수 있다.

본 장에서는 지진하중을 결정하는 설계스펙트럼의 변화를 지역계수 및 지반증폭계수의 변화에 따라 비교하고자 한다. 내진설계기준별로 설계스펙트럼을 산정하는 용어와 식이 다르기 때문에 먼저 내진설계기준별로 설계스펙트럼을 산정하는 식을 비교한 후, 설계스펙트럼 계산에 필요한 계수들의 변화를 정리하였다. 설계스펙트럼의 변화로부터, 지반조건이나 지역계수에 따른 지진하중의 크기변화를 간접적으로 비교할 수 있을 것이다.

가. 설계스펙트럼가속도 계산식의 변화

(1) AIK 1988

지진하중이 처음 도입된 1988년도 '건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'(AIK 1988)에서는 설계스펙트럼을 산정하는 식이 따로 제시되어 있지 않고, 밑면전단력을 구하는 식만 식 (1.15)과 같이 제시되어 있다.

$$V = \left(\frac{AI_E CS}{R} \right) W \tag{1.15}$$

여기서, A는 지역계수, S는 지반계수, C는 동적계수로 식 (1.16) 와 같이 구할 수 있고, 지반계수와 동적계수를 곱한 값이 식 (1.17) 와 같이 1.75를 초과할 수 없다.

$$C = \frac{1}{1.2\sqrt{T}} \leq 1.5 \tag{1.16}$$

$$CS \leq 1.75 \tag{1.17}$$

식 (1.13)와 식 (1.14)에서 건축물의 유효 중량(W)를 제외한 부분을 비교하면, AIK 1988에서 설계스펙트럼가속도($S_{a,1988}$)에 해당하는 부분은 지역계수(A), 지반계수(S), 동적계수(C)의 곱으로 식 (1.18)와 같이 계산할 수 있다.

$$S_{a,1988} = ASC = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}} \tag{1.18}$$

(2) AIK 2000

2000년도 개정된 '건축물 하중기준' (AIK 2000)에서도 설계스펙트럼가속도를 산정하는 식이 따로 제시되어 있지 않고, 밑면 전단력을 구하는 식만 식 (1.19)과 같이 제시되어 있다.

$$V = \left(\frac{AI_E C}{R} \right) W \tag{1.19}$$

AIK 2000에서는 동적계수(C)는 AIK 1988의 동적계수(C)와 지반계수(S)의 곱으로 식 (1.20) 과 같이 계산된다.

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} \leq 1.75 \tag{1.20}$$

AIK 1988에서 설계스펙트럼가속도를 구한 방식과 유사하게, AIK 2000의 설계스펙트럼가속도($S_{a,2000}$)는 식 (1.21)과 같이 계산할 수 있다.

$$S_{a,2000} = AC = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}} \tag{1.21}$$

$S_{a,1988}$와 $S_{a,2000}$를 비교하면, 구하는 식은 동일한 것을 알 수 있으나, 설계기준에 따라 지반계수 및 지역계수가 변화하였고, 또한 동적계수의 제한조건이 다르므로, 두 기준에 의한 설계스펙트럼가속도는 차이가 있을 것으로 판단된다.

(3) KBC 2005

2005년도 개정된 '건축구조 설계기준'에서 설계스펙트럼가속도에 대해 산정하는 식이 처음 도입되었으며, 구조물의 고유주기에 따라 설계스펙트럼을 계산 할 수 있다.

- $T \leq T_o$일 때, 설계스펙트럼가속도($S_{a,2005}$)는 식 (1.22)에 의한다.
- $T_o \leq T \leq T_S$일 때, 설계스펙트럼가속도($S_{a,2005}$)는 S_{DS}와 같다.
- $T > T_o$일 때, 설계스펙트럼가속도($S_{a,2005}$)는 식 (1.23)에 의한다.

$$S_{a,2000} = 0.6\frac{S_{DS}}{T_o}T + 0.4S_{DS} \tag{1.22}$$

$$S_{a,2000} = \frac{S_{D1}}{T} \tag{1.23}$$

여기서, T는 구조물의 고유주기, S_{DS}는 단주기 설계스펙트럼가속도, S_{D1}은 1초주기 설계스펙트럼가속도이며, T_o와 T_S는 각각 식 (1.24)와 식 (1.25)으로 계산한다.

$$T_o = 0.2S_{D1}/S_{DS} \tag{1.24}$$

$$T_S = S_{D1}/S_{DS} \tag{1.25}$$

(4) KBC 2009, KBC 2016

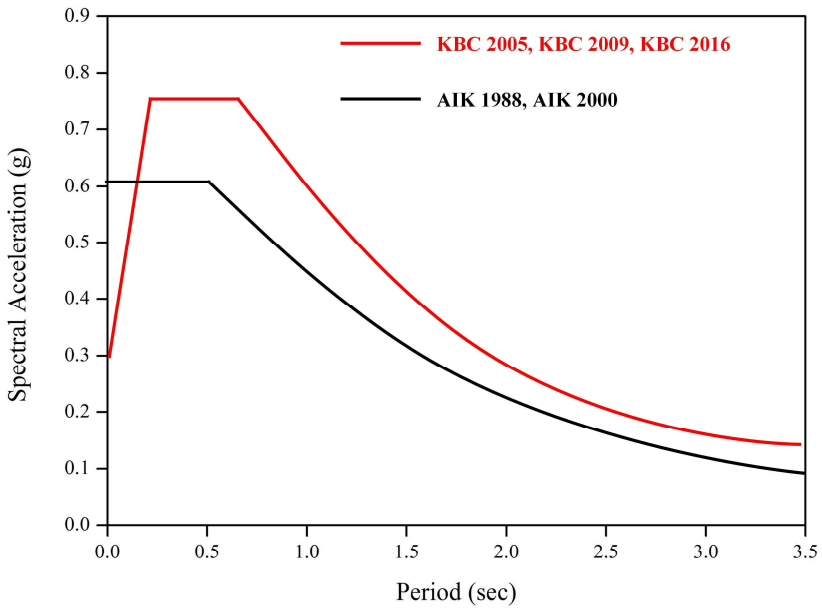
2009년도와 2016년도 개정된 '건축구조 설계기준'에서는 설계스펙트럼가속도를 산정하는 식이 KBC 2005와 동일하다. 하지만, 단주기 설계스펙트럼가속도와 1초주기 설계스펙트럼가속도를 산정하는 식에 차이가 있어 따로 분류를 하였고, 두 설계기준은 설계스펙트럼가속도를 산정하는 식과 관련 기준이 동일하여 이후에도 하나로 묶어서 분석하도록 하겠다.

(5) 소결

1988년부터 2016년까지 국내 내진설계기준의 지진하중을 결정하는 설계스펙트럼가속도 계산식을 <표 1.28>와 같이 비교 정리하였다. 설계스펙트럼가속도 계산식을 비교한 결과, AIK 2000까지는 주기에 따라 일정한 설계스펙트럼가속도 식을 사용하는 반면, KBC 2005부터 KBC 2016까지는 단주기, 1초주기로 나누어 설계스펙트럼가속도를 계산하는데 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 차이로부터, 건축구조물의 고유주기와 지반조건 및 지역에 따라 차이가 발생하여 정확할 순 없지만, <그림 1.28>과 같이 1초 주기보다 낮은 단주기 영역에서 건축구조물에 내진설계에 사용되는 설계스펙트럼가속도에 차이가 클 것으로 예상된다. 구조형식에 따라 주기에 차이가 있겠지만, 대다수의 건축물이 내진설계의 변화에 따라 적용된 설계스펙트럼가속도에 차이가 클 것으로 예상된다. 따라서 좀 더 자세히 분석하기 위해, 실제 지반조건과 지역에 따라 설계스펙트럼가속도의 차이를 비교 분석해 볼 필요가 있다.

<표 1.28> 설계기준별 설계스펙트럼가속도 계산식 비교

설계기준	설계스펙트럼가속도 계산식	
	단주기	1초주기
AIK 1988	$S_a = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}}$	
AIK 2000	$S_a = ASC = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}}$	
KBC 2005 KBC 2009 KBC 2016	$S_a = 0.6\frac{S_{DS}}{T_o}T + 0.4S_{DS}$	$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$



<그림 1.28> 설계스펙트럼가속도의 설계기준별 개념적 비교

나. 지역계수

우리나라의 지역계수는 지진구역에 따른 유효지반가속도(Effective Peak Acceleration, EPA)의 값을 사용한다. 지역계수의 단위는 g이며, 우리나라의 지진구역은 행정구역을 단위로 나눈다. 조사결과, AIK 2000이후 KBC 2016까지의 지진구역 구분에 따른 해당지역은 동일하지만, AIK 1988의 지진구역에 따른 해당지역과는 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, AIK 2000이후부터는 지역계수가 높은 곳이 지진구역 Ⅰ에 해당하지만, AIK 1988은 지역계수가 낮은 곳이 지진구역 Ⅰ에 해당하여, 지진구역에 따른 해당지역과 지역계수를 비교하기 위해, 편의상 AIK 1988의 지진구역 Ⅰ과 Ⅱ를 바꾸어 정리하였고, 해당지역의 명칭을 현재 지역명칭으로 수정하였다. 설계기준에 따른 지진구역과 해당지역, 지역계수를 <표 1.29>에 정리하였다.

<표 1.29> 설계기준별 지진구역에 따른 해당지역과 지역계수 비교

설계기준	구분	해당지역	지역계수 (A)
AIK 1988	지진구역 Ⅰ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.12
	지진구역 Ⅱ	광주광역시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도(곡성군, 구례군 광양군 제외), 경상북도 울진군, 제주도	0.08
AIK 2000	지진구역 Ⅰ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.11
	지진구역 Ⅱ	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07
KBC 2005	지진구역 Ⅰ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.11
	지진구역 Ⅱ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.07
KBC 2009 KBC 2016	지진구역 Ⅰ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.22
	지진구역 Ⅱ	지진구역 Ⅱ을 제외한 전지역	0.14

※ 강원도 북부(군, 시): 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시, 전라남도 남서부(군, 시): 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

지진구역에 따른 해당지역은 AIK 1988과 AIK2000부터 KBC 2016까지 일부 차이가 존재하지만, 대부분 비슷한 것으로 판별된다. 지진구역에 따른 지역계수는 AIK 1988에서 AIK 2000으로 개정되었을 때 0.01만큼 증가하였고, AIK 2000과 KBC 2005는 동일하지만, KBC 2009이후 지역계수가 2배로 증가한 것을 알 수 있다. 단순히 지역계수만을 비교하였을 때, KBC 2009와 KBC 2016의 설계스펙트럼가속도가 다른 기준들에 비해 월등히 높을 것으로 예상되지만, 설계스펙트럼가속도는 지역계수와 지반을 고려하여 계산되기 때문에, 지반에 의한 지반계수, 동적계수, 또는 지반증폭계수와 비교하여 분석이 이루어져야 한다.

다. 지반의 분류 및 관련 설계계수

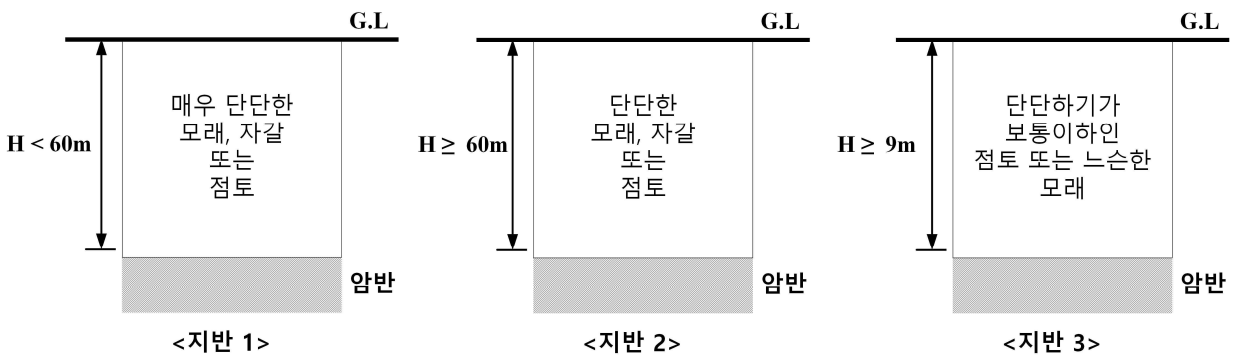
AIK 1988과 AIK 2000은 설계스펙트럼가속도의 계산에 필요한 지반의 분류에 따른 지반계수, S을 지반에 따라 정의하고 있다. 하지만 KBC 2005는 지반에 의한 지진동의 증폭을 고려하기 위해, 단주기 설계스펙트럼가속도, S_{DS}와 1초주기 설계스펙트럼가속도, S_{D1}을 지진지역과 지반에 따라 계산하도록 규정하고 있다. 반면, KBC 2009이후부터는 지반종류에 따른 단주기 및 1초주기 지반증폭계수를 도입하여, 지반증폭계수를 통해 설계스펙트럼가속도 계산에 필요한 S_{DS}와 S_{D1}을 계산하도록 규정하고 있다. 본 장에서는 각 기준별로 지반에 분류 기준 및 분류에 따른 설계스펙트럼가속도 계산에 필요한 설계계수를 비교하고자 한다.

(1) AIK 1988

AIK 1988에서는 지반을 지반 1, 2, 3으로 3가지로 구분하고 있으며, 지반을 분류하는 지반상태와 지반에 따른 지반계수, S을 <표 1.30>와 같이 정의하고 있고, <그림 1.29>은 지반상태에 따른 지반분류를 그림으로 나타낸 것이다.

<표 1.30> AIK 1988의 지반분류 기준 및 지반계수

지반종별	지반상태	지반계수(S)
지반 1	암반 또는 암반위의 매우 단단한 모래·자갈 또는 점토로서 암반까지의 전체깊이가 60m 미만인 지반	1.0
지반 2	지반 1과 같은 상태로서 암반까지의 전체깊이가 60m 이상인 경우와 깊이에 관계없이 단단한 모래·자갈 또는 점토인 지반	1.2
지반 3	단단하기가 보통이하인 점토 또는 느슨한 모래로 전체깊이가 9m 이상인 지반	1.5



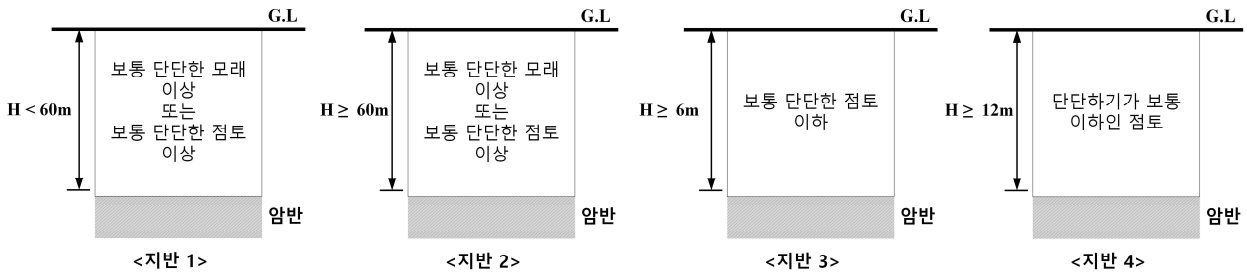
<그림 1.29> AIK 1988의 지반상태에 따른 지반분류

(2) AIK 2000

AIK 2000에서는 총 4가지의 지반으로 분류하고 있는데, 그 이유는 1985년 멕시코시티에서 발생한 지진과 1989년 샌프란시스코의 지진 이후, 매립된 지반에 지진동의 증폭효과가 고려되어야 할 필요성이 제기되었기 때문이다. 우리나라의 경우, 매립된 지반이 증가하고 있는 추세이므로, 향후 이러한 성질을 가진 지반이 더욱 증가될 것으로 판단되기 때문에 매립지에 대응하는 지반 4에 대한 내용이 AIK 2000에 추가되었다. 따라서 AIK 2000에서는 지반을 지반 1, 2, 3, 4로 총 4가지로 구분하고 있으며, 지반을 분류하는 지반상태와 지반에 따른 지반계수, S을 <표 1.31>와 같이 정의하고 있고, <그림 1.30>은 지반상태에 따른 지반분류를 그림으로 나타낸 것이다.

<표 1.31> AIK 2000의 지반분류 기준 및 지반계수

지반종별	지반상태	지반계수(S)
지반 1	○ 암반과 같은 재료로써 전단파의 속도가 700m/s 이상인 지반 ○ 암반의 상부에 분포된 보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 미만	1.0
지반 2	보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 이상	1.2
지반 3	보통 단단한 점토 이하의 지반이 6m 이상으로써 단단하기가 보통이하인 점토의 깊이가 12m 미만	1.5
지반 4	전단파의 속도가 150m/s 미만인 단단하기가 보통이하인 점토의 깊이가 12m 이상인 지반	2.0



<그림 1.30> AIK 2000의 지반상태에 따른 지반분류

AIK 2000에서는 표준관입시험을 통해 <표 1.32>와 같이 모래인 사질토의 상태를 정하도록 규정하고 있다. 또한 지반 1과 지반 2와 같은 경우, 암반까지의 깊이에 따라 분류되기 때문에 추가적으로, 지반 1은 전단파속도가 700m/s를 초과하는 경우, 전단파속도가 700m/s를 초과하지 않는 경우 지반 2로 분류한다.

<표 1.32> AIK 2000의 사질토의 분류 및 표준관입시험치와 상대밀도의 비교

Compactness condition		표준관입시험 $\overline{N}$ (타격횟수/300mm)	상대밀도 (%)
Very loose	단단하기가 보통이하인 모래	0 - 4	0 - 5
Loose		4 - 10	5 - 30
Compact	보통 단단한 모래	10 - 30	30 - 60
Dense	단단한 모래	30 - 50	60 - 95
Very Dense	매우 단단한 모래	50 이상	95 이상

점토질의 경우 일반적으로 6 단계로 분류하며, 미국과 캐나다에서는 일축압축강도(Undrained Shear Strength)를 근거로 하여 분류하나, 일본의 경우 사질토와 같이 표준관입시험을 통해 점토질을 분류한다. 우리나라는 일반적으로 대부분의 토질조사보고서가 표준관입시험에 의한 표준관입치로 기록되고 있으므로 AIK 2000에서는 표준관입치와 일축압축강도를 모두 표기하여 점토질을 <표 1.33>과 같이 분류하고 있다.

<표 1.33> AIK 2000의 점토질의 분류

Consistency		일축압축강도 (Undrained shear strength)		표준관입시험 $\overline{N}$ (타격횟수/300mm)
		kPa	kgf/㎠	
Very soft	딱딱하기가 보통이하의 점토	12 이하	0.13 이하	2 이하
Soft		12 - 25	0.13 - 0.28	2 - 4
Firm	보통 딱딱한 점토	25 - 50	0.28 - 0.56	4 - 8
Stiff	딱딱한 점토	50 - 100	0.56 - 1.12	5 - 15
Very stiff	매우 딱딱한 점토	100 - 200	1.12 - 2.25	15 - 30
Hard	굳은 점토	200 이상	2.25 이상	30 이상

만일 지반이 두 종류 이상으로 구성되어 지반의 상태를 판단하기 곤란한 경우에는 보다 큰 지반계수를 적용하도록 한다고 규정되어 있다. 두 종류 이상으로 구성된 지반의 경우 지진의 작용시 성질이 서로 다른 지반의 거동으로 인하여 증폭효과를 가져오는 경우가 많으므로 보다 불리한 쪽의 지반계수를 선택하는 것이 합당하기 때문이다.

(3) KBC 2005

KBC 2005에서는 지반의 종류를 총 5가지로 분류하고 있다. 이는 건설교통부에서 수행한 '내진설계기준연구 Ⅱ(1997)'의 내용을 반영한 것으로, IBC(International Building Code) 2000에 대한 내용과 흡사하다. KBC 2005에서는 상부 30m에 대한 평균지반특성을 조사하여 지반을 분류하고 있으며, 지반의 특성조사는 전단파속도, 표준관입시험, 비배수전단강도를 통

해 이루어진다. <표 1.34>은 KBC 2005에 따른 지반의 분류를 정리한 것이다. 참고로 KBC 2009와 KBC 2016에서도 <표 1.34>과 동일하게 지반을 분류한다.

<표 1.34> KBC 2005의 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}$ (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\overline{s_u}$ ($\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

AIK 1988과 AIK 2000에서는 지반종류 따른 지반계수를 통해 설계스펙트럼을 계산하였지만, KBC 2005에서는 지반종류와 지진구역에 따라 단주기 설계스펙트럼가속도, S_{DS}와 1초주기 설계스펙트럼 가속도, S_{D1}을 계산한다. 지반종류 및 지진구역에 따른 단주기 설계스펙트럼 가속도, S_{DS}와 1초주기 설계스펙트럼 가속도, S_{D1} <표 1.35>와 같이 계산된다.

<표 1.35> 지반종류 및 지진구역에 따른 단주기 및 1추조기 설계스펙트럼가속도

지반종류	지진구역 Ⅰ		지진구역 Ⅱ	
	S_{DS}	S_{D1}	S_{DS}	S_{D1}
S_A	$2.0MA$	$0.8MA$	$1.8MA$	$0.7MA$
S_B	$2.5MA$	$1.0MA$	$2.5MA$	$1.0MA$
S_C	$3.0MA$	$1.6MA$	$3.0MA$	$1.6MA$
S_D	$3.6MA$	$2.3MA$	$4.0MA$	$2.3MA$
S_E	$5.0MA$	$3.4MA$	$6.0MA$	$3.4MA$

여기서, M의 값은 1.33이며 이 경우 스펙트럼 가속도의 크기는 재현주기 2400년에 대한 2/3 수준의 극한하중을 나타낸다.

KBC 2005와 AIK 2000의 설계지진에서 가장 큰 차이는 재현주기에 따른 설계지진의 크기이다. AIK 2000의 경우 500년 재현주기에 대한 설계지진을 사용하지만, KBC 2005에 경우 2400년 재현주기의 설계지진으로 설계스펙트럼을 산정하기 때문에 설계지진의 크기를 변화하여 고려할 필요가 있다. 다른 재현주기를 고려한 설계지진을 고려하려면 지역계수부터 수정하여 고려해야 하지만, KBC 2005와 AIK 2000은 같은 지역계수를 사용하기 때문에 설계

지진의 차이를 고려하기 위해선 다른 계수가 필요한데, 그 계수가 설계스펙트럼가속도를 계산할 때 사용하는 M값이다. <표 1.36>은 '내진설계기준연구 Ⅱ(1997)'에서 분석한 우리나라의 재현주기별 지진위험도계수를 정리한 것이다.

<표 1.36> 재현주기에 따른 지진위험도 계수, 내진설계기준연구 Ⅱ(1997)

재현주기 (년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

KBC 2005의 설계지진은 2400년 재현주기 지진의 2/3로 정의되는데 AIK 2000의 500년 재현주기 지진의 지역계수를 사용하기 위해 아래와 같이 기존 지역계수에 1.33배를 곱하여 사용할 수 있다.

○ 2400년 재현주기 지진의 (2/3) = 500년 재현주기 지진 × 지진위험도(2.0) × (2/3)
= 500년 재현주기 지진의 (4/3 = 1.33)

따라서 KBC 2005에서는 AIK 2000의 지역계수를 사용하면서 2400년 재현주기 지진의 2/3수준을 설계지진으로 고려하기 위해, $M=1.33$을 설계스펙트럼가속도에 곱하여 계산한다. 즉, 엄밀히 말하면 KBC 2005의 지역계수는 변환계수, M을 지역계수, A에 곱한 MA라고 할 수 있다.

(4) KBC 2009, KBC 2016

KBC 2009부터는 KBC 2005와 동일하게 지반을 분류하지만 단주기 설계스펙트럼가속도, S_{DS}와 1초주기 설계스펙트럼 가속도, S_{D1}을 계산할 때, 단주기 지반증폭계수, F_a와 1초주기 지반증폭계수, F_v을 이용하여 각각 식 (1.26)과 식 (1.27)을 이용하여 계산한다.

$$S_{DS} = A \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \tag{1.26}$$

$$S_{D1} = A \times F_v \times 2/3 \tag{1.27}$$

식 (1.26)에서 2.5는 지반종류 S_B에 대하여 지반가속도를 단주기의 최대스펙트럼 가속도로 변환하기 위한 값이며, 2/3의 값은 최대예상지진에 대한 스펙트럼가속도를 설계스펙트럼 가속도로 변환하기 위한 계수이다. KBC 2009부터는 2400년 재현주기에 따른 지진위험도로 정의된 최대예상지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)의 유효지반가속도를 지역계수로 사용하고 있다. 설계스펙트럼 계산에 필요한 단주기 지반증폭계수, F_a와 1초주기 지반증폭

계수, F_v은 각각 <표 1.37>와 <표 1.38>을 이용하여 계산한다.

<표 1.37> 단주기 지반증폭계수

지반종류	지진지역		
	$A_S \leq 0.25$	$A_S = 0.50$	$A_S = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

※ A_S는 <표 4.4>의 A를 2.5배한 값이다. 위 표에서 A_S의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

<표 1.38> 1초주기 지반증폭계수

지반종류	지진지역		
	$A \leq 0.1$	$A = 0.2$	$A = 0.3$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.7	1.6	1.5
S_D	2.4	2.0	1.8
S_E	3.5	3.2	2.8

※ A는 <표 4.4>의 값이다. 위 표에서 A의 중간값에 대하여는 직선보간한다.

(5) 소결

내진설계기준에 따라 설계스펙트럼가속도를 비교하기 위해, 설계스펙트럼가속도 계산에 필요한 지역계수 및 관련 설계계수를 내진설계기준별로 정리 및 분석을 진행하였다. 내진설계 기준에 따라 지반의 종류를 구분하는 기준이 다르고, 설계스펙트럼가속도를 계산하는데 필요한 계수 및 계산방식에 차이가 있어서 직접적으로 비교하기 어렵다. 하지만, 지역 및 지반에 따라 설계스펙트럼가속도를 비교하기 위해선 지반종류를 내진설계기준에 따라 비교하여야 하며, 본 연구에서는 각 내진설계기준의 지반분류에 근거하여 <표 1.39>와 같이 현재 KBC 2016에서 사용하는 지반종류에 따라 각 내진설계기준별로 지반을 분류하였다.

<표 1.39> KBC 2016 지반종류에 근거한 각 내진설계 기준별 지반분류

KBC 2016 지반종류	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005 KBC 2009
S_A	1	1	S_A
S_B			S_B
S_C	2	2	S_C
S_D	3	3	S_D
S_E		4	S_E

라. 설계스펙트럼

본 장에서는 내진설계기준별로 설계스펙트럼가속도를 지역 및 지반에 따라 비교하기 위해, 설계스펙트럼가속도를 계산하였다. 설계스펙트럼가속도의 비교는 크게 지진구역 Ⅰ과 Ⅱ로 구분되어 정해지는 지역계수를 이용하여 큰 그룹으로 나누고 각 그룹에서 KBC 2016을 기준으로 총 5개의 S_A부터 S_E까지 지반으로 분류하여 각 지반에 대한 설계스펙트럼가속도를 비교할 것이다. 각 설계스펙트럼가속도를 비교 한 후, 설계스펙트럼 가속도의 최댓값, $S_{a,\max} = S_{DS}$과 최댓값이 유지되는 주기, $T_{\max} = T_S$을 비교할 것이며, 현행 기준과 비교하기 위해 1초주기 설계스펙트럼가속도 S_{D1}을 각각 비교할 것이다.

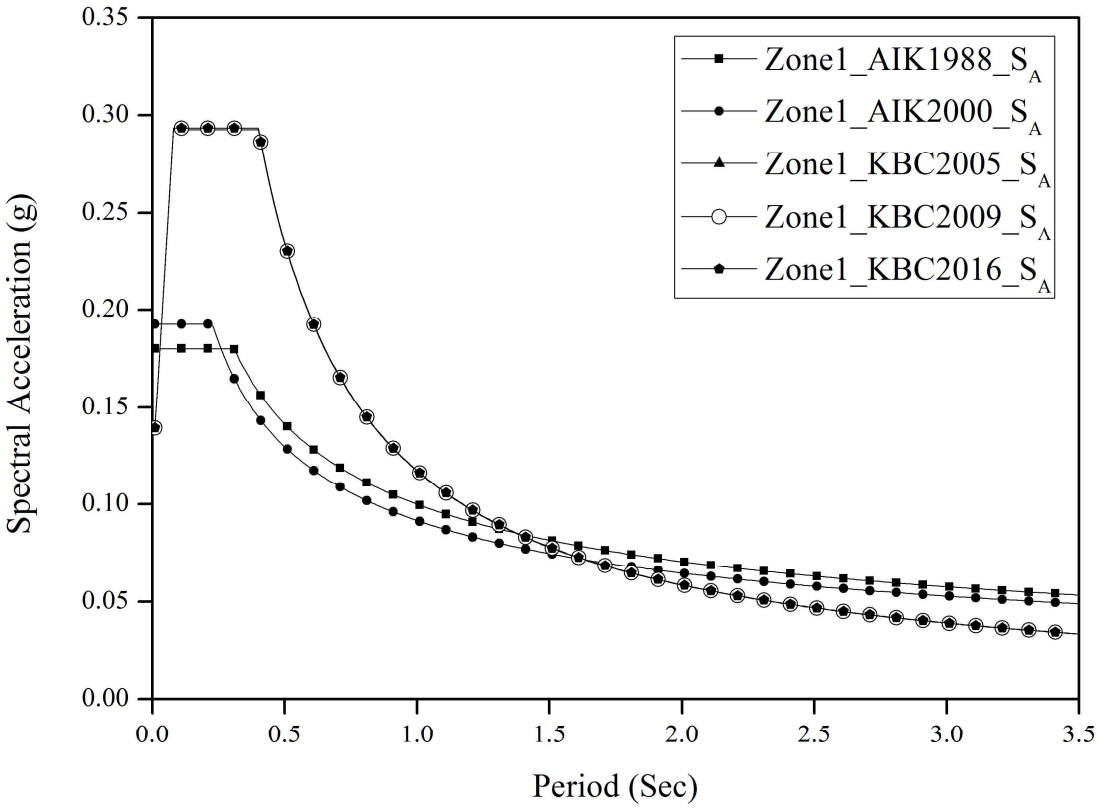
(1) 지진구역 Ⅰ

설계기준별로 지진구역 Ⅰ에서의 지역계수, A는 <표 1.40>와 같다. 앞서 서술하였듯이, 설계기준별로 지역계수의 차이가 존재하여, 설계스펙트럼가속도에 차이가 있을 것으로 예상되지만, 설계스펙트럼가속도는 지역계수와 지반조건에 따른 지반의 증폭을 고려하기 때문에, 지반에 대한 고려 또한 필요하다고 할 수 있다.

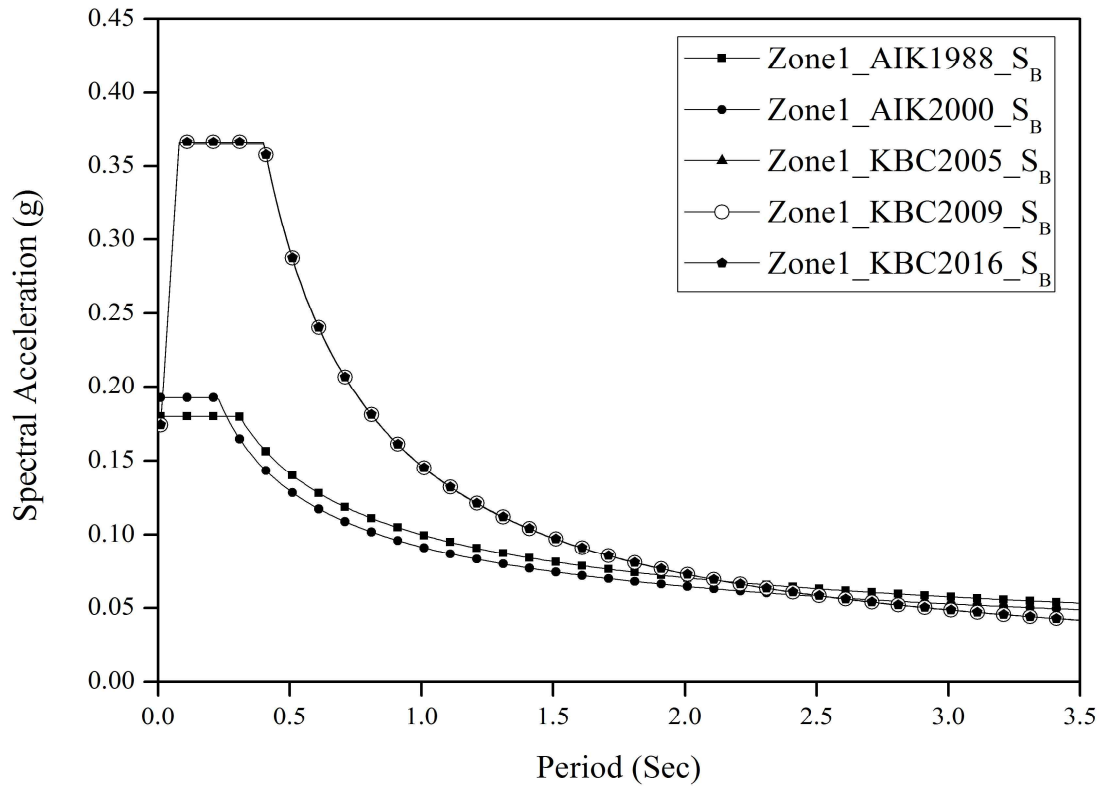
<표 1.40> 설계기준별 지진구역 Ⅰ에서의 지역계수(A)

	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005	KBC 2009	KBC 2016
지역계수	0.12	0.11	0.11	0.22	0.22

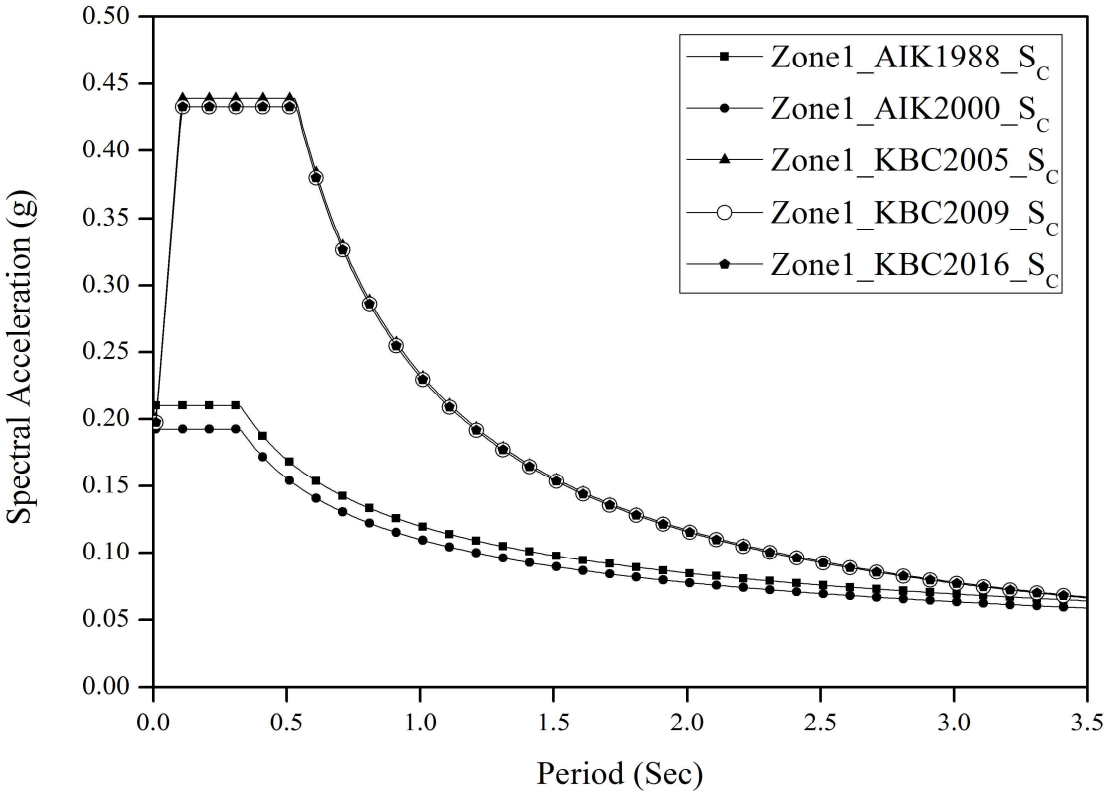
지진구역 Ⅰ에 대하여 <표 1.40>에서 나눈 지반분류를 토대로 하여, 현재 KBC 2016을 기준으로 총 5개의 지반에 대한 설계스펙트럼가속도를 비교하였고, 그 결과는 <그림 1.31>부터 <그림 1.35>과 같다. 각 내진기준별로 설계스펙트럼가속도를 비교하면, AIK 1988과 AIK 2000은 유사한 경향을 보이며, KBC 2005부터 KBC 2016까지 유사한 경향을 보여 크게 2그룹으로 나눌 수 있다. 또한 지반이 S_A에서 S_E로 갈수록 AIK 그룹과 KBC 그룹의 단주기 영역(0 ~ 0.5초)에서의 설계스펙트럼가속도의 차이가 점차 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이를 통해 과거보다 현재 매립지와 같은 연약지반에 지어진 건축물에 대한 지진하중의 demand가 증가하는 경향을 간접적으로 보인다고 할 수 있다. 물론 지진하중을 정량적으로 비교하기 위해서는, 건축물의 규모에 따른 중량, 용도에 따른 중요도계수, 구조시스템에 따른 반응수정계수를 모두 고려하여 지진하중을 비교해야 한다. 하지만, 다른 계수들이 일정하다고 가정하고 설계스펙트럼가속도만을 비교한다면, AIK 그룹에 비해 KBC 그룹의 지진하중에 대한 demand가 지반조건에 관계없이 높아졌으며, 특히 연약지반일수록 그 정도가 더 커지는 경향이 있다고 해석 할 수 있다.



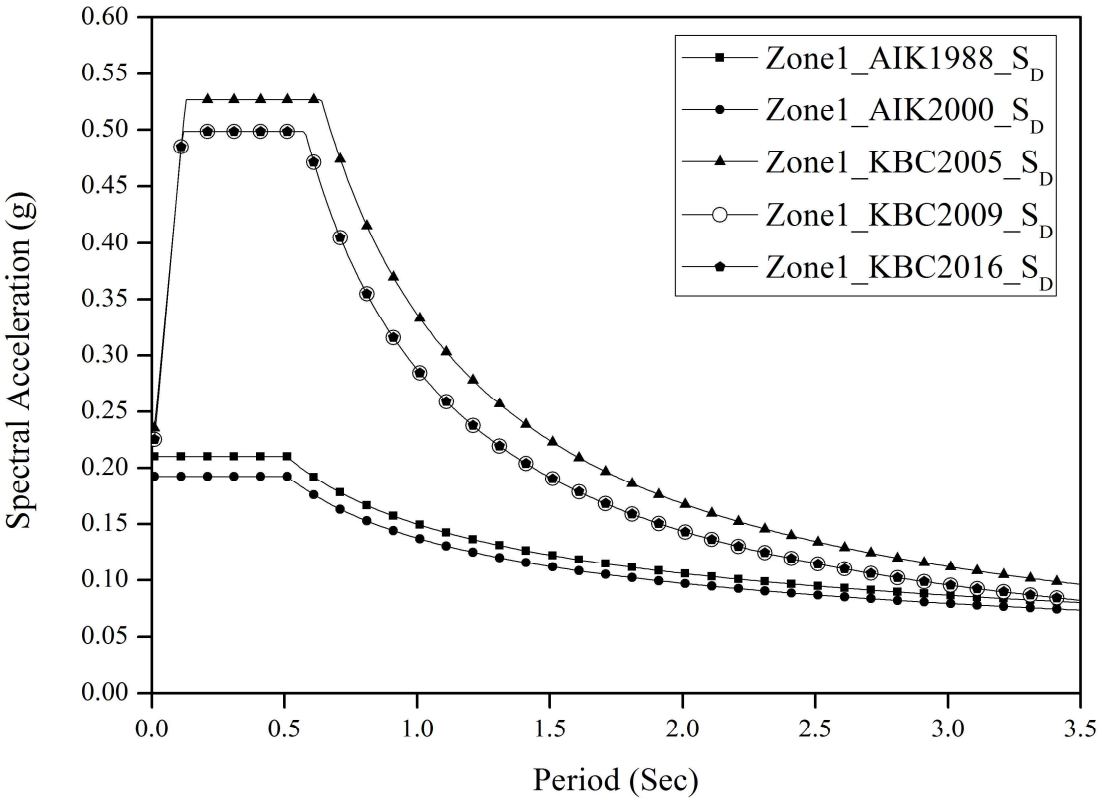
<그림 1.31> 지진구역 Ⅰ의 S_A지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



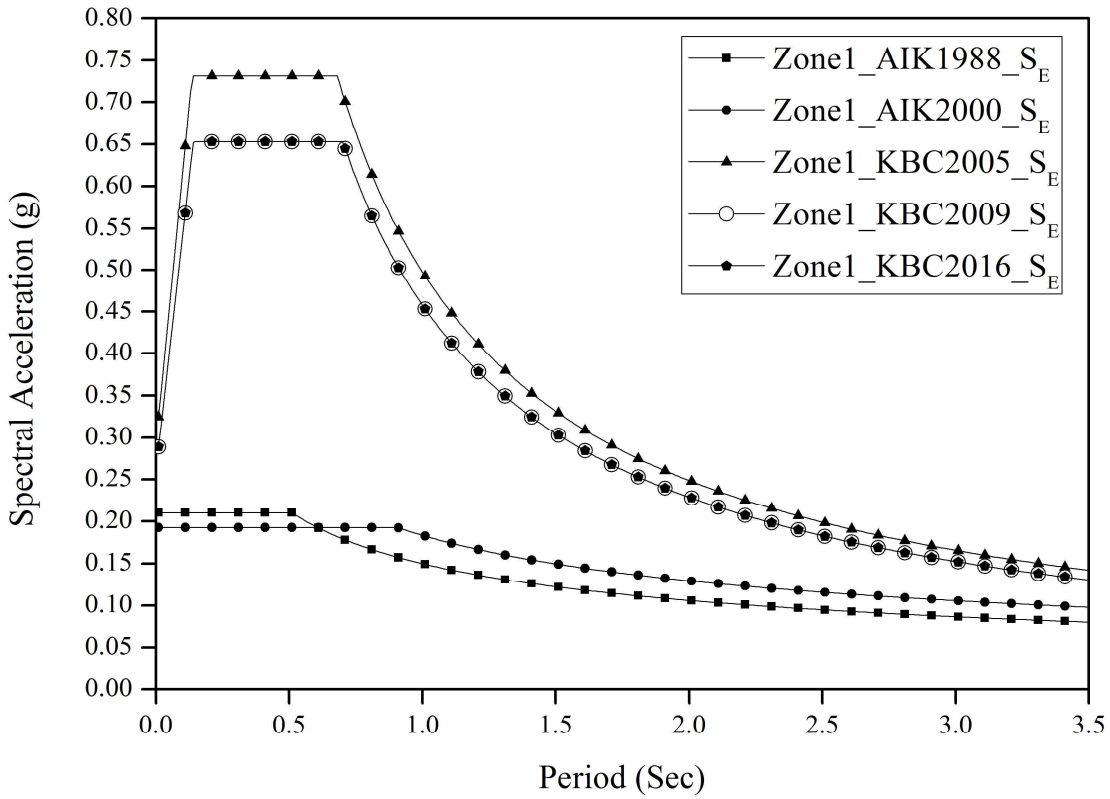
<그림 1.32> 지진구역 Ⅰ의 S_B지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



<그림 1.33> 지진구역 Ⅰ의 S_C지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



<그림 1.34> 지진구역 Ⅰ의 S_D지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



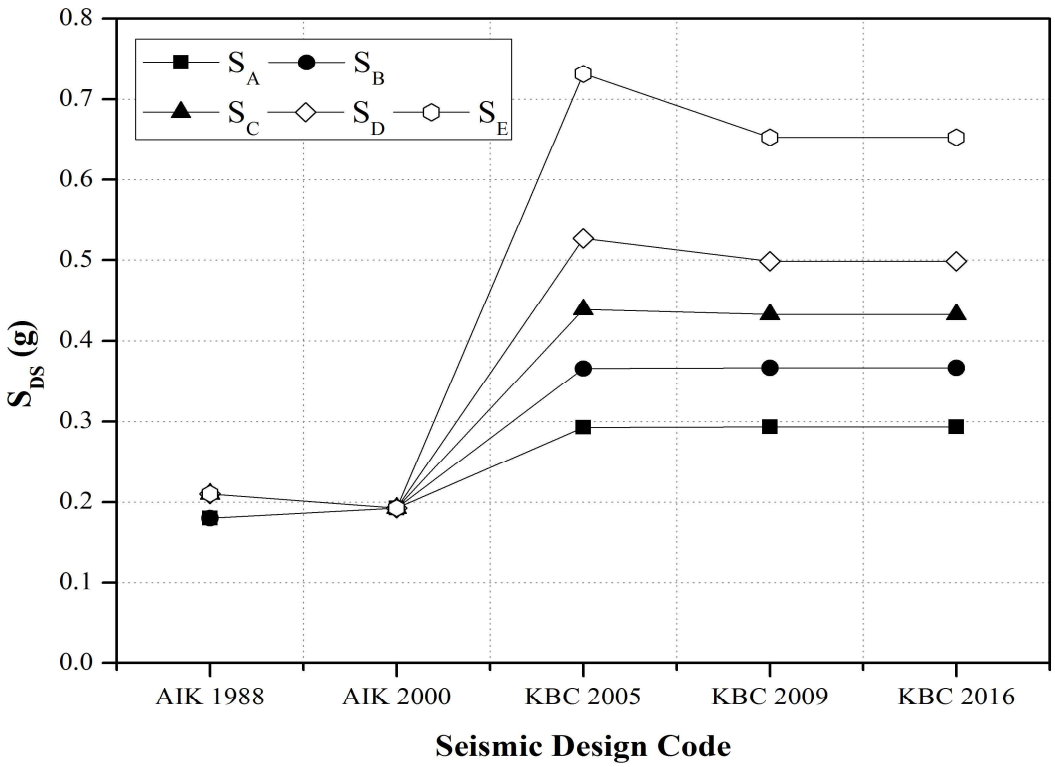
<그림 1.35> 지진구역 Ⅰ의 S_E지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교

설계스펙트럼가속도의 최댓값, $S_{a,\max} = S_{DS}$과 최댓값이 유지되는 주기, $T_{\max} = T_S$, 현행 기준과 비교하기 위해 1초주기 설계스펙트럼가속도 S_{D1}을 각각의 지반조건과 내진설계기준별로 비교 분석을 진행하였다. <표 1.41>와 <그림 1.36>, <그림 1.37>은 비교 분석한 내용을 표와 그림으로 나타낸 것이다. 각 내진설계기준 별로 지반조건에 따라 S_{DS}, S_{D1}, T_S의 값을 비교하면, AIK 1988의 경우, S_A와 S_B지반에서 모두 동일한 값을 가지며, S_C, S_D, S_E지반에서 S_{DS}값은 같지만, S_{D1}과 T_S값은 차이를 보였다. AIK 2000의 경우, 지반종류에 상관없이 S_{DS}값은 동일하였고, 연약지반으로 갈수록 S_{D1}과 T_S이 증가하는 경향을 나타내었다. KBC 2005, KBC 2009, KBC 2016은 연약지반으로 갈수록 모든 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 내진설계기준에 따라 설계스펙트럼가속도가 두드러지게 차이가 나는 지반은 연약지반에 속하는 S_C부터 S_E지반까지이며, KBC 2005이후 연약지반에 대한 설계스펙트럼가속도가 대폭 상승한 것을 알 수 있다. 이를 통해 과거 연약지반에 지어진 건축물의 지진하중이 현재의 기준과 비교한다면, 매우 낮은 지진하중에 대해 설계가 되었다고 판단된다. 또한 현재의 내진성능평가 기준에 따라 내진성능평가를 진행한다면 연약지반에 지어진 2005년 이전 건물의 내진성능이 낮게 평가될 수 있음을 암시하는 자료라고 생각된다, 물론, 단순히 설계스펙트럼가속도의 차이만을 가지고 단정하기 어려우나, 설계스펙트럼가속도의 기준이 현재까지 강화되어 왔기 때문에, 이러한 가정이 가능하다고 판단된다.

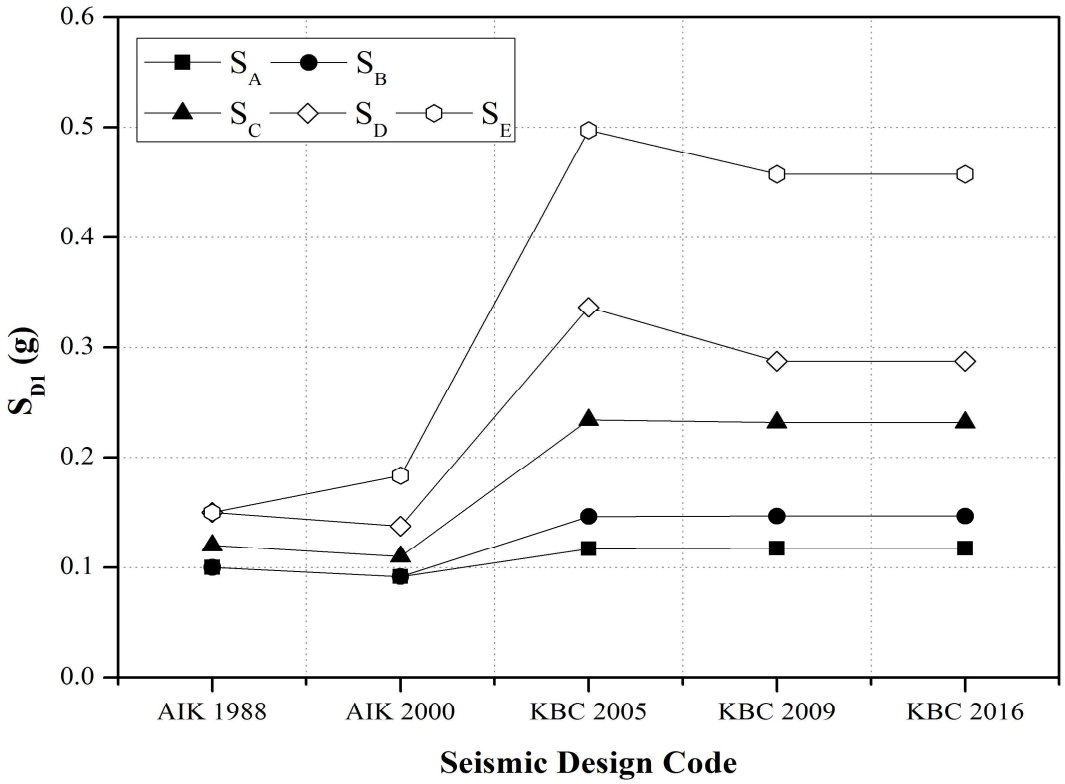
<표 1.41> 내진설계기준별 지반조건에 따른 설계스펙트럼가속도의 정량적 비교

지반조건	비교량	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005	KBC 2009	KBC 2016
S_A	S_{DS}	0.1800	0.1925 (6.9%)	0.2926 (62.6%)	0.2933 (63.0%)	0.2933 (63.0%)
	S_{D1}	0.1000	0.0917 (-8.3%)	0.1170 (17.0%)	0.1173 (17.3%)	0.1173 (17.3%)
	T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
S_B	S_{DS}	0.1800	0.1925 (6.9%)	0.3658 (103.2%)	0.3667 (103.7%)	0.3667 (103.7%)
	S_{D1}	0.1000	0.0917 (-8.3%)	0.1463 (46.3%)	0.1467 (46.7%)	0.1467 (46.7%)
	T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
S_C	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.4389 (109.0%)	0.4327 (106.0%)	0.4327 (106.0%)
	S_{D1}	0.1200	0.1100 (-8.3%)	0.2341 (95.1%)	0.2317 (93.1%)	0.2317 (93.1%)
	T_S	0.32	0.32	0.53	0.54	0.54
S_D	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.5267 (150.8%)	0.4987 (137.5%)	0.4987 (137.5%)
	S_{D1}	0.1500	0.1375 (-8.3%)	0.3365 (124.3%)	0.2875 (91.6%)	0.2875 (91.6%)
	T_S	0.51	0.51	0.64	0.58	0.58
S_E	S_{DS}	0.2100	0.1925 (-8.3%)	0.7315 (248.3%)	0.6527 (210.8%)	0.6527 (210.8%)
	S_{D1}	0.1500	0.1833 (22.2%)	0.4974 (231.6%)	0.4576 (205.1%)	0.4576 (205.1%)
	T_S	0.51	0.90	0.68	0.70	0.70

※ ( )안의 값은 AIK 1988을 기준으로 각 내진설계기준의 값의 증가율을 비교한 값임.



<그림 1.36> 지진구역 Ⅰ의 내진설계기준과 지반조건에 따른 S_{DS}값 비교



<그림 1.37> 지진구역 Ⅰ의 내진설계기준과 지반조건에 따른 S_{D1}값 비교

동일한 지반조건에서 내진설계기준에 따라 S_{DS}의 값을 비교하면, AIK 1988과 AIK 2000의 경우 암반지역인 S_A와 S_B지반에서 S_{DS}값이 증가하였지만, 토사지반에 속하는 S_C부터 S_E지반에서는 설계스펙트럼가속도 최댓값이 감소하는 경향을 보였다. 모든 지반조건에서 설계스펙트럼가속도의 최댓값이 가장 큰 내진설계기준은 KBC 2005였으며, KBC 2009와 KBC 2016과 비교하면, 암반지역인 S_A와 S_B, 그리고 연암지반인 S_C에서는 비슷한 값을 가지나, 연약지반인 S_D와 S_E에서는 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 같은 방법으로 S_{D1}값을 비교하면, AIK 1988에서 AIK 2000으로 개정되면서 모든 지반보건에서 S_{D1}값이 감소하는 경향을 보였지만, 연약지반인 S_E에서는 약 22.2%증가하였다. 또한 S_{DS}값과 마찬가지로, 모든 지반조건에서 S_{D1}값이 가장 큰 내진설계기준은 KBC 2005였으며, KBC 2009와 KBC 2016과는 암반지역에서 비슷하나, 연약지반에서는 감소하는 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 KBC 2005로 내진설계기준이 개정되면서 모든 지반조건에서 설계스펙트럼가속도가 대폭 증가한 것을 알 수 있으므로, 우리나라의 건축물의 내진성능을 평가할 시 건축물의 설계연도 및 준공연도를 통해 2005년 이전과 2005년 이후의 건축물을 나눌 수 있을 것이라 생각된다. 마지막으로 S_{DS}값이 유지되는 주기인 T_S값을 비교하면 내진설계기준이 개정되면서 T_S값이 증가하는 경향을 보여, 주기가 상대적으로 긴 건축물 또한 높은 설계스펙트럼가속도를 적용하는 사례가 증가되어 왔을 것으로 예상된다.

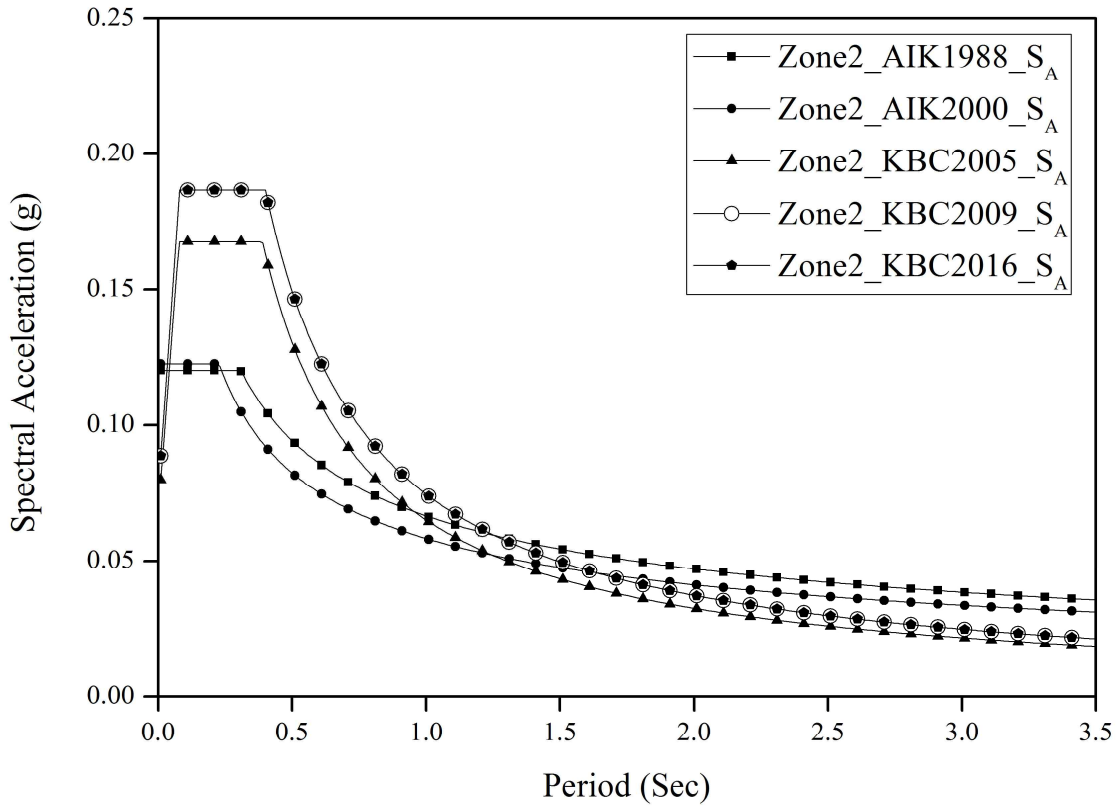
(2) 지진구역 Ⅱ

설계기준별로 지진구역 Ⅱ에서의 지역계수, A는 <표 1.42>와 같다. 지진구역 Ⅱ의 경우 KBC2009까지는 전라남도 남서부지역이 지진구역Ⅱ이었으나, KBC2016에서는 전라남도 남서부지역이 지진 Ⅰ구역으로 변경되면서 지진구역 Ⅱ은 강원북부와 제주도만 해당된다.

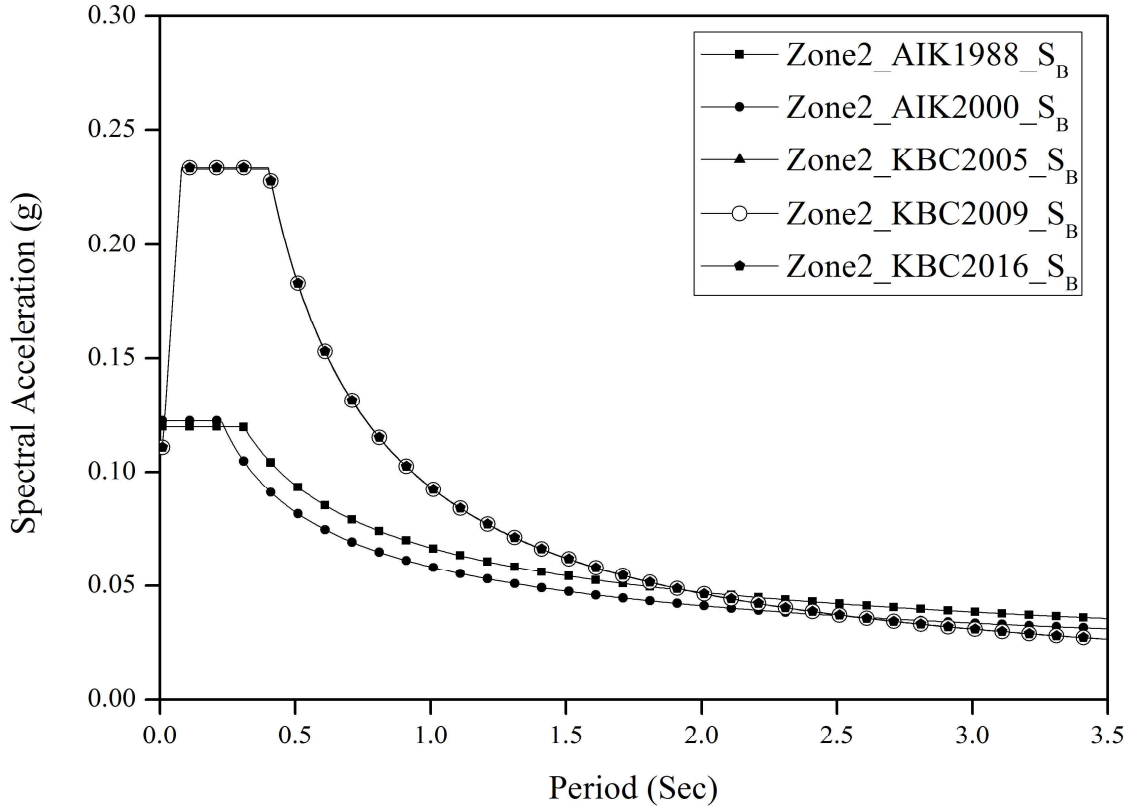
<표 1.42> 설계기준별 지진구역 Ⅱ에서의 지역계수(A)

	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005	KBC 2009	KBC 2016
지역계수	0.08	0.07	0.07	0.14	0.14

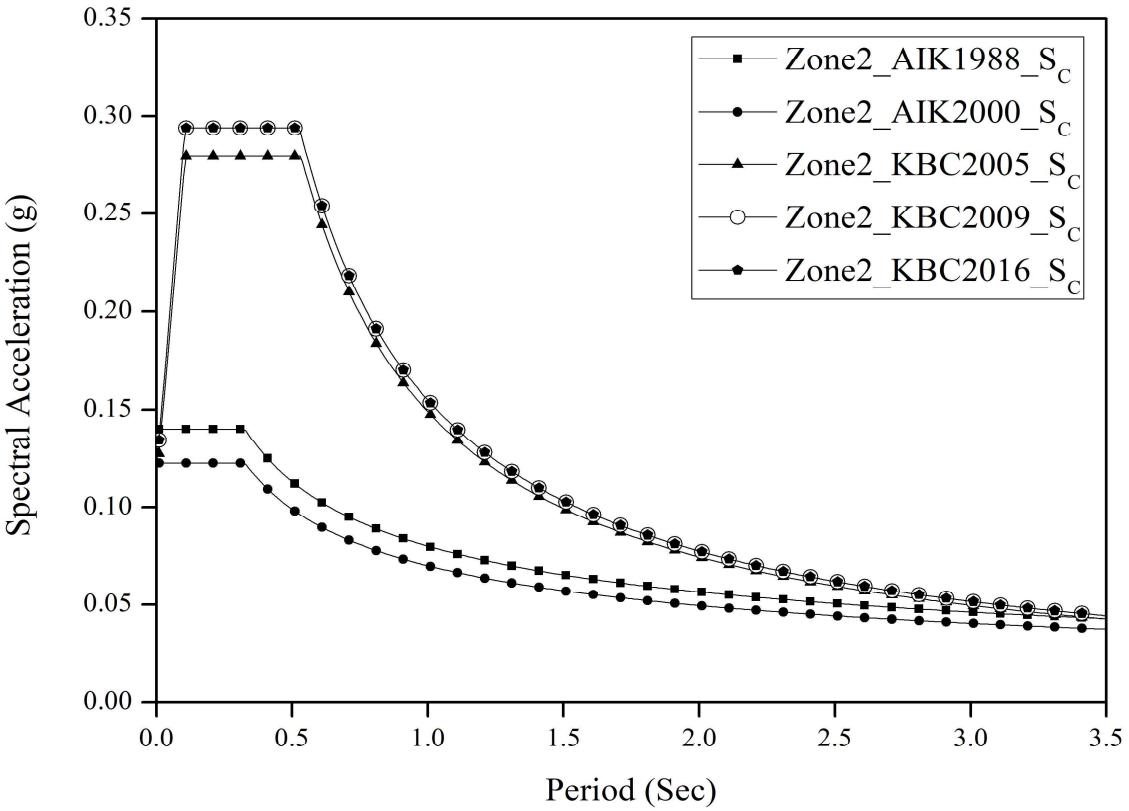
앞서 지진구역Ⅰ에 대한 설계스펙트럼가속도를 지반종류별로 분류하여 계산함과 같이 지진구역Ⅱ도 같은 방법으로 <표 1.42>지반분류에 따른 설계스펙트럼가속도를 도출하였다. 그 결과는 <그림 1.38>부터 <그림 1.42>과 같다. 각 내진기준별로 설계스펙트럼가속도를 비교하면, 지진구역Ⅰ과 같이 AIK 1988과 AIK 2000과 KBC 2005부터 KBC 2016으로 크게 2그룹으로 나눌 수 있다. 또한 지진구역Ⅱ 역시 지반이 S_A에서 S_E로 갈수록 AIK와 KBC의 단주기 영역(0 ~ 0.5초)에서의 설계스펙트럼가속도의 차이가 점점 증가하고 있음을 볼 수 있다.



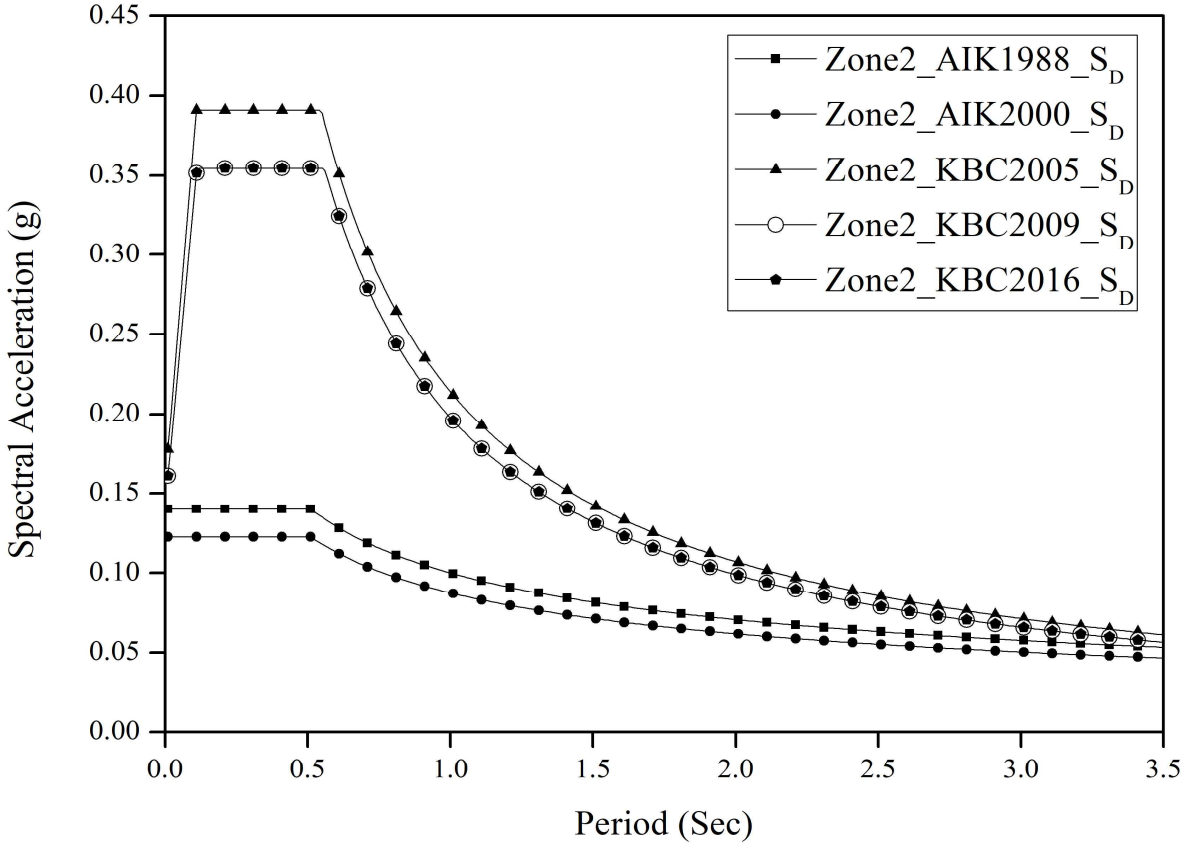
<그림 1.38> 지진구역 Ⅱ의 S_A지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



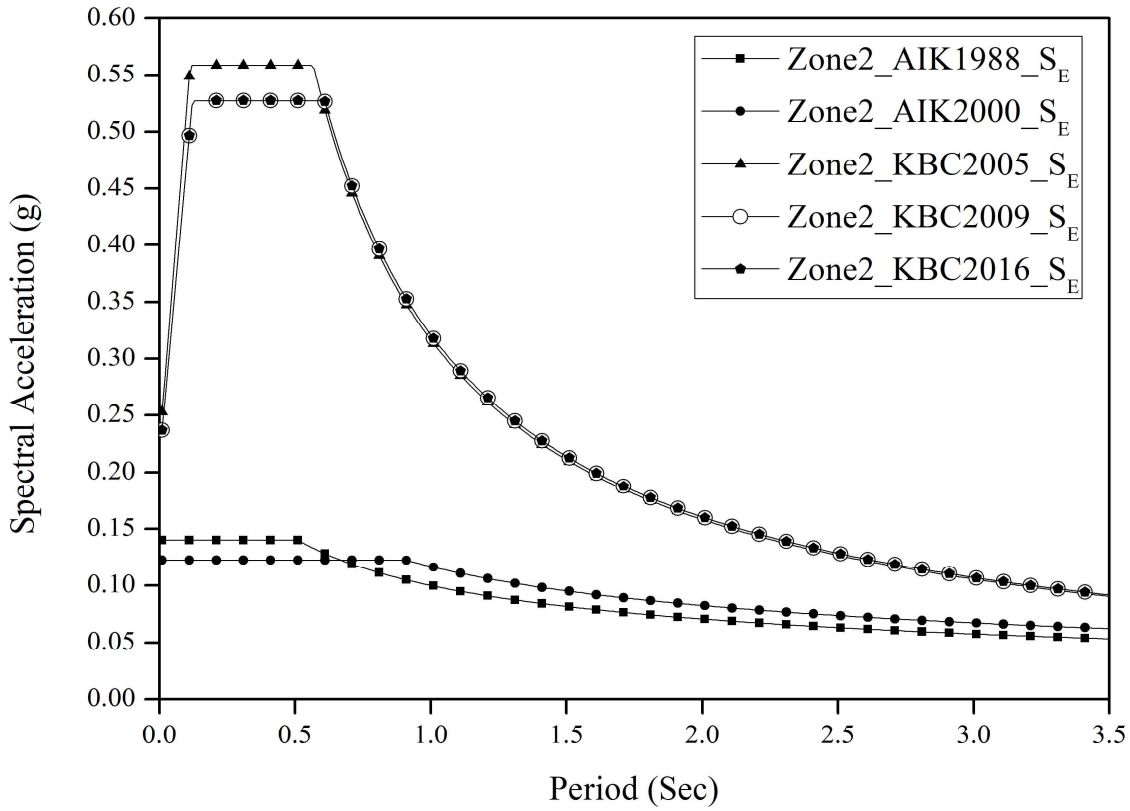
<그림 1.39> 지진구역 Ⅱ의 S_B지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



<그림 1.40> 지진구역 Ⅱ의 S_C지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



<그림 1.41> 지진구역 Ⅱ의 S_D지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교



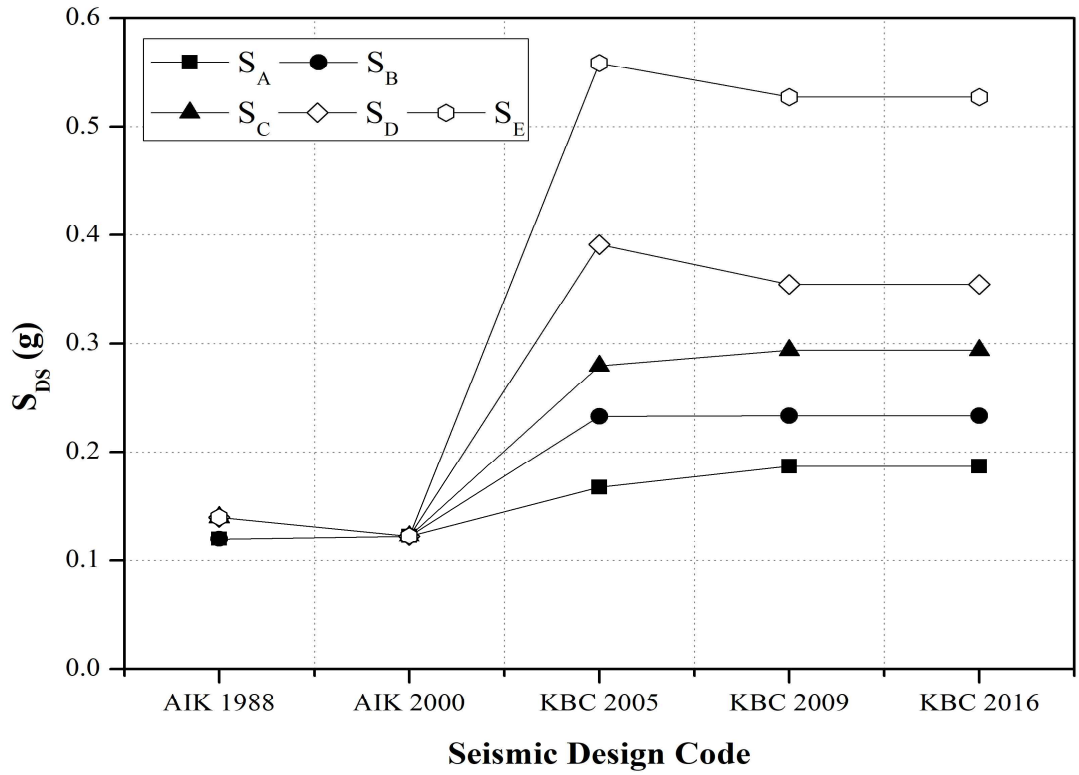
<그림 1.42> 지진구역 Ⅱ의 S_E지반에서의 내진설계기준에 따른 설계스펙트럼가속도 비교

지진구역 I 에서와 같이 설계스펙트럼 가속도를 정량적으로 분석하기 위해 S_{DS}, T_S, S_{D1}을 각각의 지반조건과 내진설계기준 별로 비교 분석을 진행하였다. <표 1.43>와 <그림 1.43>, <그림 1.44>은 비교 분석한 내용을 표와 그림으로 나타낸 것이다. 각 내진설계기준별로 지반조건에 따라 S_{DS}, S_{D1}, T_S의 값을 비교하면, AIK 1988의 경우, S_{DS}값은 S_A를 제외한 S_B, S_C, S_D, S_E지반에서 모두 동일한 값을 가진다. 그러나 S_{D1}과 T_S값에서는 S_A, S_B-S_C, S_D-S_E 별로 차이를 보였다. AIK 2000의 경우, 지진구역 I 과 같이 지반종류에 상관없이 S_{DS}값은 동일하였고, 연약지반으로 갈수록 S_{D1}과 T_S값이 증가하였다. KBC 2005, KBC 2009, KBC 2016은 지진구역 I 과는 다르게 S_A, S_B-S_C, S_D,S_E로 나누어지는 형태를 보여 S_B와S_C의 값을 같게 보았다. 또한 KBC 2005에는 연약지반에 해당하는 S_D,S_E값을 전체 구조기준 중 제일 크게 산정하여 연약지반에 대한 내진설계기준을 강화하였음을 보여준다. 내진설계기준에 따라 설계스펙트럼가속도가 큰 지반은 연약지반에 속하는 S_D, S_E지반이며, 지진구역 I 에서 보여준 바와 같이, KBC 2005이후 전체 지반에 대한 설계스펙트럼가속도 값이 증가하였고, 특히 연약지반에 해당하는 곳의 설계가속도 값이 더 많이 상승한 것을 알 수 있다. 따라서 현재 연약지반에 해당되는 해안 매립지 같은 시화, 화옹 새만금지구의 농업용지, 아산, 대불, 광양 등의 산업단지에 해당되는 지역의 2005년 이전 건축물을 현행기준에 적용하여 내진성능평가를 시행한다면 대부분의 건축물이 그 성능요건을 만족시키지 못할 것으로 판단된다.

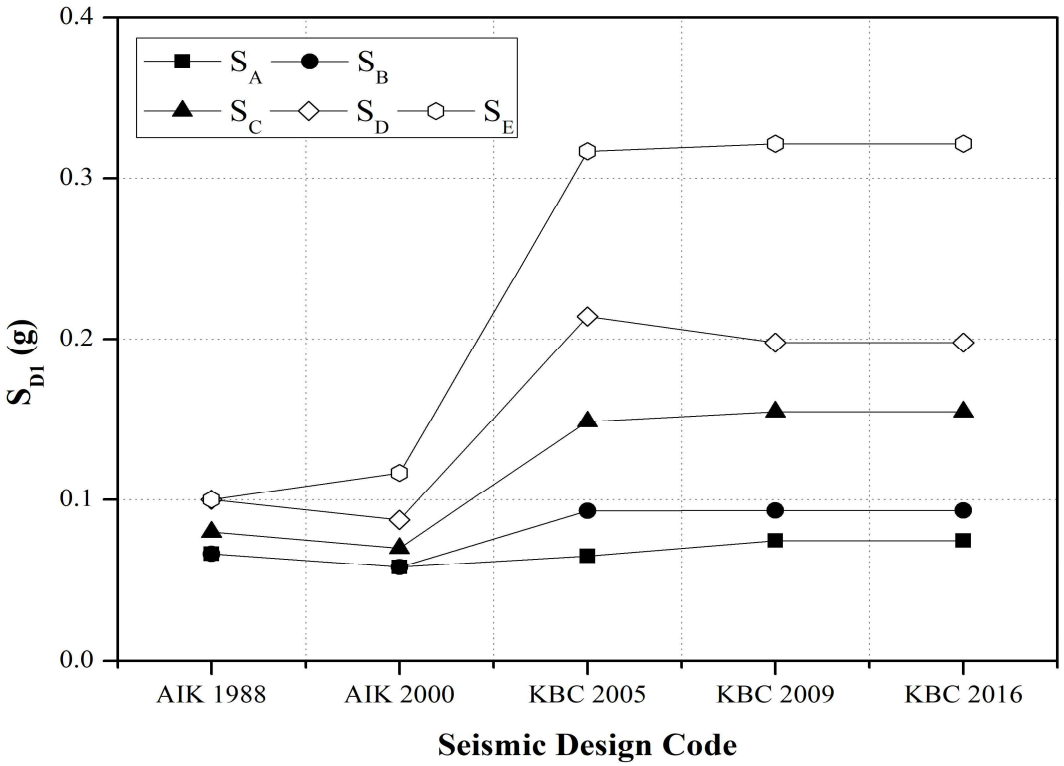
<표 1.43> 내진설계기준별 지반조건에 따른 설계스펙트럼가속도의 정량적 비교

지반조건	비교량	AIK 1988	AIK 2000	KBC 2005	KBC 2009	KBC 2016
S_A	S_{DS}	0.12	0.1225 (2.1%)	0.1676 (39.7%)	0.1867 (55.6%)	0.1867 (55.6%)
	S_{D1}	0.0667	0.0583 (-12.5%)	0.0931 (-2.2%)	0.0933 (12.0%)	0.0933 (12.0%)
	T_S	0.30	0.22	0.40	0.40	0.40
S_B	S_{DS}	0.1400	0.1225 (2.1%)	0.2793 (94.0%)	0.2940 (94.4%)	0.2940 (94.4%)
	S_{D1}	0.0800	0.0700 (-12.5%)	0.1490 (39.7%)	0.1549 (40.0%)	0.1549 (40.0%)
	T_S	0.32	0.32	0.53	0.53	0.53
S_C	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.2793 (99.5%)	0.2940 (110.0%)	0.2940 (110.0%)
	S_{D1}	0.0800	0.0700 (-12.5%)	0.1490 (86.2%)	0.1549 (93.7%)	0.1549 (93.7%)
	T_S	0.32	0.32	0.53	0.53	0.53
S_D	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.3910 (179.3%)	0.3547 (153.3%)	0.3547 (153.3%)
	S_{D1}	0.1000	0.0875 (-12.5%)	0.2141 (114.1%)	0.1979 (97.9%)	0.1979 (97.9%)
	T_S	0.51	0.51	0.55	0.56	0.56
S_E	S_{DS}	0.1400	0.1225 (-12.5%)	0.5586 (299.0%)	0.5273 (276.7%)	0.5273 (276.7%)
	S_{D1}	0.1000	0.1167 (16.7%)	0.3165 (216.5%)	0.3211 (221.1%)	0.3211 (221.1%)
	T_S	0.51	0.90	0.57	0.61	0.61

※ ( )안의 값은 AIK 1988을 기준으로 각 내진설계기준의 값의 증가율을 비교한 값임.



<그림 1.43> 지진구역 Ⅱ의 내진설계기준과 지반조건에 따른 S_{DS}값 비교



<그림 1.44> 지진구역 Ⅱ의 내진설계기준과 S_{D1}지반조건에 따른 값 비교

지반조건에 따른 각 기준별 S_{DS}의 값을 비교하면, KBC 2005 기준으로 변화하면서 S_D와 S_E에 해당하는 값이 급격하게 증가하였다. 이는 지진구역 I 과 비교하였을 때 S_A, S_B에 해당하는 경암 지반과 보통암 지반의 증가폭은 작고, 연암지반인 S_D와 S_E의 단주기스펙트럼의 값이 커진 차이를 보인다. 또한 지진구역 I 에서는 모든 지반조건에서 설계스펙트럼가속도의 최댓값이 가장 큰 내진설계기준은 KBC 2005였으나, 지진구역 Ⅱ에서는 KBC 기준 전체를 비교하면, 연약지반인 S_D와 S_E에서만 가장 큰 값을 나타내었고 S_A, S_B, S_C에 해당하는 값은 비슷한 추이를 나타내고 있다.

같은 방법으로 S_{D1}값을 비교하면, AIK 1988에서 AIK 2000으로 개정되면서 S_E값을 제외한 모든 지반조건에서 S_{D1}값이 감소하는 경향을 보였다. S_{D1}값 역시 S_{DS}값을 비교한 내용처럼 연암지반인S_D와 S_E에서 최댓값을 보여주는 내진설계기준은 KBC 2005이다. KBC 2009와 KBC 2016과는 암반지역에서 비슷하나, 연약지반인 S_D와 S_E에서는 감소하거나 같은 값을 가지고 있다. 따라서 KBC 2005 도입 전후로 내진설계기준의 강화가 보이므로 2005년 전 후의 건축물의 내진설계 차이가 많이 나타날 것으로 추측된다.

마지막으로 S_{DS}값이 유지되는 주기인 T_S값을 비교하면 S_{DS}와 S_{D1}의 변화와 같이 KBC 2005 도입부터 T_S값이 증가하는 경향을 보인다. 이는 지진구역 I 에서처럼 주기가 긴 건축물일수록 높은 설계스펙트럼가속도를 적용하였을 것이라고 예상된다.

(3) 소결

지진구역 Ⅰ, Ⅱ의 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E 지반별 설계스펙트럼가속도를 연대별 내진설계기준에 맞춰 비교 분석하였다. 그 결과, AIK에서 KBC기준으로 개정되면서 내진설계기준이 크게 증가되었음을 볼 수 있었고, 경암지반보다 연암지반에 대한 설계기준이 더 엄격해졌음을 알 수 있었다. 특히 KBC2005의 S_C, S_D, S_E지반의 설계스펙트럼가속도 값이 기준 중에 가장 높은 값을 보였으며, KBC2009와 KBC2016에서는 조금 더 완화된 값으로 변경되었다.

단주기 설계스펙트럼 S_{DS}값을 비교하여 보면 지진구역 Ⅰ, Ⅱ 모두 KBC2005로 기준이 변경되면서 그 값이 급격하게 증가하였다. 그러나 지진구역 I 의 경우 KBC2009로 개정되면서 S_A, S_B, S_C의 값이 비슷하거나 줄어든 반면, 지진구역 Ⅱ의 경우 S_A, S_B, S_C지반의 값이 증가하였으며 그 외 지반에 해당하는 값은 줄어들었다.

1초주기 설계스펙트럼S_{D1} 역시 단주기스펙트럼과 비슷한 양상을 나타낸다. 그러나 지진구역 Ⅱ의 S_E값은 기준이 수정될 때마다 증가하는 경향을 보였다. 전단파 속도가 180 미만인 연약지반의 경우 더욱 강화된 내진설계 기준이 적용되었음을 보여준다. 따라서 2005년도 이전과 이후의 내진 설계된 건축물 중 가장 큰 차이를 보일 것으로 예상되는 건물은 지진구역 Ⅱ의 S_E지반에 해당되는 곳이라고 예측할 수 있다.

2. 지반에 따른 지진동 감쇠식

가. 진동의 감쇠현상

전 세계 각국에서 지진에 대한 위험성을 평가하기 위해, 지진재해도 및 진도분포도 등을 제작하고 있다. 지진에 의해 발생되는 진동은 지역적인 특성 및 지진발생특성을 고려하여 만들어진다. 지진 재해도 및 진도분포도 작성 시 가장 중요한 요소 중 하나는 진원으로부터 거리에 따라 지진파의 속도 및 가속도의 감소를 추정하는 것이다. 지진동에 의한 지진재해도를 예측하기 위해서는 지진동의 전달경로 상에서 발생하는 지진동의 변화를 모델화해야 한다. 지진동의 변화는 일반적으로 진앙거리 및 지반조건에 영향을 크게 받는 다고 알려져 있다. 지진동이 지표면에 전달되는 과정에서 감쇠되는 현상을 수식으로 표현한 것을 지진동 감쇠식(attenuation relationship)이라 한다.

대부분의 연구에서 제시하는 지진동 감쇠식은 지지원 특성, 지진파의 전달경로 특성, 부지효과에 따른 지반특성으로 구성되는데, 이는 지진동에 대한 변화양상 및 지진동 분석을 위한 역산 시에 편리함을 위해서다. 하지만 이것은 지진동 예측의 편리함과 이해를 위해 인위적으로 만든 형태이므로 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 최신의 기술을 개발 하고 양질의 지진자료를 활용하여 지진동 예측에 대한 오차를 줄여야 할 필요가 있다.

지진파는 지역적인 지질 상태에 따라 그 양상이 변화하므로 해당 지역에 대한 양질의 실계측 자료가 필수적이다. 우리나라는 지진활동이 활발하지 않은 편이고 규모가 큰 지진의 발생빈도가 낮아 지진학 및 지진공학적으로 큰 의미를 가지는 자료는 드물다. 따라서 모사나 합성과 같은 방법으로 한반도의 지진특성에 맞는 진동을 얻을 수밖에 없다.

나. 감쇠식의 기본형태

감쇠식 또는 지진동 모델은 주어진 지진의 규모와 진원에 따른 거리에 대하여 지표에 미치는 영향을 계산한다. 일반적으로 사용되는 감쇠식의 형태는 식 (1.28)과 같다.

$$\log y = (\log y)_{mean} + \epsilon \tag{1.28}$$

여기서,

y : 최대지반가속도, 속도, 변위, 특정 고유주기의 응답스펙트럼

ϵ : 확률변수

$(\log y)_{mean}$의 경우 여러 가지 형태의 모델이 있으나 다음의 식 (1.29)의 형태가 자주 사용된다.

$$(\log y)_{mean} = c_0 + c_1 M + c_2 \log[R + g(M)] + c_3 R \tag{1.29}$$

$$R = \sqrt{r^2 + h^2} \tag{1.30}$$

여기서,

c_1, c_2, c_3, c_4 : 계수

y : 가속도($cm/\sec^2$)

M : 지진규모

R : 진원거리(km)

r : 진앙거리(km)

h : 진원깊이(km)

거리 R은 진앙거리, 진원거리 또는 단층 파열면에 대한 최단 거리 등이 사용될 수 있다. 큰 지진에 대하여는 파괴면의 연장성이 고려되어야 한다. ϵ은 확률변수로서 일반적으로 표준편차 σ_ϵ의 정규분포 모델이 가정된다. 일반적으로 σ_ϵ상수로 가정되어 왔으나, 규모가 증가함에 따라 σ_ϵ가 감소하는 것이 관측되기도 한다. 국내 "내진설계기준연구II"에서는 규모, 거리에 따른 최대지반가속도를 산출하기 위한 지진동 감쇠식의 기본 형태는 식 (1.31)과 같이 제안하고 있다.

$$\ln a = c_0 + c_1 M + c_2 \ln R + c_3 R \tag{1.31}$$

여기서,

a : 최대지반가속도($cm/\sec^2$)

M : 지진규모

R : 진원거리(km)

$c_0 = 0.4854,\ c_1 = 1.2,\ c_2 = -0.8416,\ c_3 = -0.0061$

거리와 규모에 대한 지진동의 변화정도가 주파수에 따라 다르다는 것이 많은 강진자료의 해석으로부터 밝혀진 바 있다. 저주파 성분의 지진동은 규모에 따른 변화가 크고 거리에 대한 변화는 작다. 결과적으로 고층 건물이나 긴 교량과 같은 고유주기가 큰 구조물은 먼 곳에서 발생한 규모가 큰 지진에 취약할 가능성이 높다. 반면, 고유주기가 낮은 구조물은 100km이내에서 발생한 규모가 작은 지진에 취약할 가능성이 높을 수 있다. 즉, 구조물에 대한 확률론적 지진재해도 분석은 최대지반가속도나 최대지반속도 뿐만 아니라, 대상 구조물의 관심 주파수 대역에 상응하는 여러 주파수에 대한 스펙트럼 가속도나 스펙트럼 속도에 대하여 수행되어야 할 필요도 있다.

다. 추계학론적 지진동 감쇠

지진다발지역에서는 강지진동 경험 자료를 이용하여 지진동 감쇠식을 개발하나, 국내와 같은 중저지진 활동성 지역에서는 중규모 미만의 지진파 전달, 지진원, 부지특성을 기반으로 중규모 이상의 지진동 특성을 이론적으로 추정하여 감쇠식을 개발한다.

현재까지 연구된 한반도지역의 감쇠현상은 대체로 미국 중·동부의 감쇠식 적용이 적합한 것으로 보고되고 있다. 최대지반가속도와 주파수별 스펙트럼 가속도의 국내외 감쇠식은 현재 우리나라에는 강진기록이 없으므로 간접적인 방법으로 지진규모별 감쇠공식을 유도하여야한다. 중규모 지진지역에서는 일반적으로 백색 가우스잡음을 이용한 추계학적 강지진동 모사법이 적용되어진다.

국내 연구의 강진동 모사방법은 Boore(1983)의 추계학적 모사방법이 많이 이용되고 있으며, 이 방법은 Brune w^2의 진원모델에 국내 지진환경에 적합한 응력강하상수, 스펙트럼 감쇠상수 등을 적용하여 모멘트규모와 진원거리에 따른 합성지진파를 계산한다. 추계학적 분석이란 시간과 함께 변하는 양의 분석을 확률론적으로 나타내고자 하는 것으로, 시점 t의 값을 확률변수 X(t)로 생각하고, 모든 t에 대해서 이와 같이 생각한 확률변수의 계열을 말한다.

추계학적 모사법을 이용하여 강지진동에 의한 지반의 움직임을 추정하기 위해서는 진원, 지진파 전파경로, 그리고 관측점에서의 특성을 파악하여 입력 자료로 사용하여야 하며 계산에 사용되는 입력 자료로는 전단파 전달속도(β), 지각밀도(ρ), 지진파 평균방사상수, 모서리주파수(f_c), 응력강하($\Delta\sigma$), 스펙트럼 감쇠상수(k)등이 있다. 추계학적 지진모델은 단일 코너주파수 및 일정한 응력강하(Stress Drop)의 ω^γ 지진원 모델을 이용한다. RVT(Random Vibration Theory) 방법은 파워스펙트럼으로부터 시간영역의 최대값을 추정하는 방법으로 가속도의 최대지반가속도와 RMS(Root-Mean-Square), 응답스펙트럼 값을 관련지을 수 있다. 가속도 Fourier Spectrum의 형태 $a(f)$는 (1.32)와 같이 수식화 할 수 있다.

$$a(f) = C\frac{f^2}{1+\left(\frac{f}{f_0}\right)^\gamma} \cdot \frac{M_0}{R} \cdot P(f) \cdot A(f) \cdot e^{\frac{-\pi f R}{\beta_0 Q(f)}} \tag{1.32}$$

$$C = \left(\frac{1}{\rho_0 \beta_0^3}\right) \cdot (2) \cdot (0.55) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \pi, f = \text{주파수} \tag{1.33}$$

여기서,

M_0 : 지진모멘트

R : 진원거리

β_0 : 지진원에서의 S파 속도

ρ_0 : 진원에서의 밀도

$Q(f) = Q_0 f^{\eta}(quality)$

$A(f)$: 지각증폭

$P(f)$: 고주파 제거 필터

f_0 : 지진원 코너주파수

γ : 1, 2, 3(f_0 이상에서의 지진원 변위스펙트럼 감쇠율)

여기에서 C는 상수로서 지진원 밀도(ρ_0)와 S파속도, 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는 지진에너지의 평균값(0.55), 2개의 수평방향으로의 에너지 분리 ($1/\sqrt{2}$)와 관련된 파의 특성을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파 응력 파라미터 즉 응력강하($\Delta\sigma$)의 두 개의 독립적인 파라미터에 의해서 결정된다. 지진모멘트와 모멘트규모의 상관관계는 지진모멘트 규모의 정의 (Kanamori)에 따라 식 (1.34)와 같은 관계식이 있다.

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.05 \tag{1.34}$$

응력강하($\Delta\sigma$)는 지진원 코너주파수와 지진모멘트(M_0) 등과 관련되어 있으며 식 (1.35)과 같은 관계식으로 표현된다.

$$f_0 = \beta_0 (\Delta\sigma / 8.44 M_0)^{1/3} \tag{1.35}$$

지각증폭을 나타내는 $A(f)$는 지진파가 지진원에서 지표 가까이 얕은 심도에 존재하는 저속도층(미국 서부의 경우 약 100 ~ 300m, 국내의 경우 30m이하)을 전파함에 따라 고주파수 대역에서 파의 진폭이 주파수에 의존하여 증가하는 현상을 설명한다. 지진파의 진폭증폭률은 평균 지각속도와 지표 근처의 전단파 속도 및 밀도에 의해 결정된다.

$P(f)$ 필터는 일정한 주파수값 이상에서 스펙트럼 값이 급격히 감소하는 현상을 모델화하였다. 이러한 고주파수영역에서의 스펙트럼 값의 감쇠는 광역적인 현상, 관측소 부지부근 지표에서의 감쇠나 지진원 특성 자체 등에 의해 설명된다. 고주파 영역에서 급격한 감소를 모델화하는 이론은 f-max 및 kappa 모델과 같은 2가지 종류가 있다.

$$P(f,r) = e^{-\pi\kappa(r)f} \tag{1.36}$$

$\kappa(r)$은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 Intrinsic 감쇠의 효과를 표시하며 크게 2가지 효과 즉, 관측소 부지부근의 탄성적 감쇠특성 효과 및 진앙거

리와 관련된 지각전체 구조에 의한 효과로 구성되어 있다. 따라서 $\kappa(r)$은 진앙거리(r) 및 S 파속도(β), 부지직하의 지반층 두께 H 및 지반층 두께 H에 걸친 평균적인 전단파 Q값에 영향을 받는다. 위에서 제시한 2가지 종류의 고주파 대역에서의 감쇠효과를 모두 고려한 식은 식 (1.37)에 의해 모델화 된다.

$$\kappa(r) = \frac{H}{\overline{\beta}\,\overline{Q_s}} + \frac{r}{\beta_0 Q(f)} \tag{1.37}$$

위 식 중에서 첫 번째 항은 진앙거리가 0인 경우에 해당하며 $\kappa(0)$로 표시되며 식 (1.38)와 같이 표현된다.

$$\kappa(0) = \frac{H}{\overline{\beta}\,\overline{Q_s}} \tag{1.38}$$

따라서 $\overline{\beta}, \overline{Q_s}$는 관측소 부지하부의 지반층 깊이 H 전체에 대한 이들 값들의 평균을 의미한다. 이 식에서 제시된 바와 같이 진앙거리가 0인 경우 κ값은 주파수와 무관하게 모델화 가능하며 관측소부지 부근 특성에 좌우되는 변수값으로 간주된다.

다음으로 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 Intrinsic 감쇠의 2가지 종류의 효과 중에서 2번째 효과에 해당하는 진앙거리와 관련된 지각전체 구조에 의한 효과는 주파수 함수인 $Q(f)$로 모델링 된다. 따라서 이러한 감쇠특성은 식 (1.37)의 $\kappa(r)$ 중에서 2번째 항에 해당되며 진앙거리가 증가함에 따라 감쇠특성은 $Q(f)$및 진앙거리 변수로 표현된다.

지진동 예측은 편의상 지진원, 전파경로, 부지효과로 구성된다. 지진원에는 기하학적인 정의 및 지진활동 특성이 포함되며 전파경로에는 지진동 감쇠식이 부지효과에는 부지의 지질 특성이 고려된다. 지진의 발생 및 전파과정에서 근본적으로 많은 불확실성이 내재되어 있다. 불확실성은 동일한 현상에 대하여 다양한 해석을 가능하게 한다. 특히 지진자료가 충분하지 않은 지역일수록 해석간의 차이가 심하며 이 경우 여러 가지 서로 다른 해석을 통합하여 하나의 결과를 이끌어 내는 것은 매우 어렵다.

라. 전파경로 지진동 감쇠

(1) 기하학적 감쇠

지진파의 기하감쇠는 지진파가 진원에서 발생되어 지표면까지 올라오면서 거리가 늘어나는 기하학적 확장에 의해 파가 감쇠되는 것을 말하며 식 (1.39)과 같이 나타낸다.

$$A = A_0 R^{-r} \tag{1.39}$$

여기서,

A : 지진동의 진폭

A_0 : 초기치

R : 전달거리

r : 기하 감쇠항

(2) 비탄성적 감쇠(intrinsic)

매질의 에너지 감쇠는 매질을 구성하는 업자들과의 마찰에 의한 Q_i(고유감쇠)와 매질입자에 의한 산란으로 일어나는 감쇠를 구한 산란감쇠 Q_s로 나눌 수 있다. Q는 매질에 의한 감쇠 크기 대표지표로서 널리 이용 되며, 낮은 Q는 높은 감쇠를 나타낸다. Q값은 지진파가 지진원에서 지표면으로 전달하는 경로사이에 지각에서 일어나는 감쇠를 대표하며, 식 (1.40)과 같이 나타낸다.

$$\frac{1}{Q(w)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \tag{1.40}$$

여기서,

E : 1주기당의 변형에너지

ΔE : 변화량

(3) 분산감쇠 (Scattering attenuation)

표면파 등의 분산성에 따른 도달시간 차에 의한 감쇠를 말하며 산란감쇠라고도 부른다. 탄성파의 분산은 지각내의 매질간의 탄성적인 성질의 차이로 인해 발생한다. 탄성과 밀도의 차이는 매질의 성질을 확인해야한다.

(4) 고유감쇠 (Intrinsic attenuation)

지구내부 구성물질의 비탄성적 성질에 의한 에너지의 흡수, 지각의 전달매질의 불균질성과 비탄성 성질에 의한 영향을 나타내며, 매질에 의한 감쇠 크기 지표를 의미한다. 감쇠는 주파수와 무관한 감쇠로서 지역의 지열량과 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 탄성파 전파는 포텐셜(변위)과 운동(속도)에너지사이의 영구적인 교환으로 구성되어있다.

(5) 부지효과

감쇠식 또는 지진동 모델은 주어진 지진의 규모와 거리에 대하여 부지에 미치는 영향을

계산한다. 지표층에서의 지진동의 증폭 및 감쇠효과는 지진동예측에 상당히 큰 영향을 미친다. 지진동의 관측 값은 상당한 분산을 보이므로 감쇠식에 내재된 불확실성을 명확하게 표현할 필요가 있다.

마. 지반증폭

(1) 지반증폭 현상

일반적으로 지진동은 국지적인 지반 및 지질특성의 영향을 많이 받으며 기반암이 아닌 토사층이나 연약층에서 증폭현상이 발생한다. 지반증폭(부지효과)현상이 발생하는 몇 가지의 원인 중 한 가지는 물질의 에너지 보존법칙에 따라 지표면으로 가까워질수록 매질의 밀도와 지진파의 속도가 감소하고 에너지 보존의 법칙에 따라 이를 보존하기 위해 지진파의 입속도가 증가하여 지진파가 증폭되는 것이다. 그 외 매질의 차이로 인한 지진파가 반사되는 현상인 고립된 지진파의 다중 반사로 인하여 지진파가 증폭되는 현상이 발생하게 된다.

실제 1985년 멕시코시티 지진의 경우 진앙지 부근 보다 350km 떨어진 위치에 있는 멕시코시티에 큰 피해를 주었다. 멕시코시티 지역은 원래 호수지역을 매립하여 세운 도시였으므로 연약한 지반층으로 인해 지진파가 크게 증폭되어 피해가 발생한 것으로 알려져 있다.

(2) 지반증폭 연구방법

지반증폭에 대한 연구는 다음과 같다. 어느 한 부지의 지반증폭 특성은 보통굴절 또는 반사하지 않고 직접적으로 도달한 S파에 의하여 분석된다. 이러한 S파에 의해 부지증폭 특성을 밝히기 위한 연구는 크게 스펙트럼법 (Cranswick, 1988; Menke 외, 1990; Shneider 외, 1992)과 역산법 또는 미지수함 분리법 (Boatright 외, 1991; Castro 외, 1997 Kato 외, 1995; Hartzell 외, 1992, 2000)으로 나눌 수 있다. 스펙트럼법은 특정의 관측소와 인접한 암반지반 관측소에서 동일 지진을 관측하여 암반지반 관측소에 대한 대상 관측소의 스펙트럼비를 그 관측소의 부지중폭비로 간주하는 방법이다. 이 방법은 암반지반이 지진파의 중폭이 없다는 가정을 포함하고 있다. 그러나 스펙트럼법을 활용하여 구한 스펙트럼비는 일정하지 않고 상황에 따라 많이 달라진다는 점이 밝혀져 있다(Menke 외, 1990; Schneider 외, 1992; Steidl 외, 1996).

역산법은 관측된 지진파 스펙트럼이 지진원과 전파 과정 및 부지증폭 스펙트럼의 곱으로 표현된다고 가정하여 역산에 의하여 전파과정의 감쇠특성이나 부지증폭 특성을 구하는 방법이다. 이 방법은 통상 불확실한 자유도를 줄이기 위하여 미지수의 수를 줄이거나, 추가적인 제한조건을 부여하게 된다. 관측된 스펙트럼으로부터 전파과정 중의 감쇠특성을 제거하여 부지증폭 특성을 구한 예는 여러 연구(Castro 외, 1997, 2004; Hartzell 외, 1992, 2000)에서 찾아 볼 수 있다. 한편 제한조건으로서는 특정 관측소를 기준 관측소(통상 암반지반 관측소)

로 정하여 다른 관측소의 부지증폭비를 기준 관측소에 대한 상대적인 값으로 정의하는 경우(예를 들면, Kato 외, 1995)나 모든 관측소의 증폭비의 합이 0이라고 가정하여 평균적인 관측소에 대하여 상대적인 증폭비로 정의하는 경우(예를 들면, Andrews, 1986; Malagnini 외, 2000) 등이 있다.

부지증폭 특성의 추정에 S파 이외의 coda파 스펙트럼비를 이용하는 방법(Tsujiura, 1978; Phillips 와 Aki, 1986; Mayeda 외, 1991; Koyanagi 외, 1992; Su 외, 1992; Su 와 Aki, 1995; Taira 와 Yomogida, 2003)도 널리 사용되고 있다. 이 방법은 지진발생 후 일정시간(보통 지진발생 후 S파가 도달한 시간의 2배) 경과 후에는 어떤 범위의 공간 내에서 진원거리와 방향에 관계없이 coda파의 진폭이 같다는 가정을 포함하고 있다. 위에 설명한 S파와 coda파를 이용한 방법 외에도 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼 비(H/V 비)에 의해 부지효과를 추정하는 방법이 있다. 이 방법은 Langston(1979)에 의해 처음으로 소개되었으며, Nakamura(1989)는 상시미동 의 H/V비를 이용하여 S파에 대한 부지증폭비를 결정하는 방법을 제안하였다. 이후에도 여러 연구자(Bonilla 외, 1997; Zhao와 Horike, 2003)에 의해 이 방법이 사용되었다. 이 방법은 다른 부지에 대한 자료가 필요하지 않다는 점에서 이용되어 왔으며, 지표에서 관측된 S파의 수직성분은 부지의 증폭과 무관하다는 가정을 포함하고 있다.

(3) 지반증폭률 계산모델

기준 지반 상에서의 지진의 흔들림은 진원 거리 및 규모와 기준 지반 최대 속도와의 상관관계를 이용한다. 지표 최대 가속도는 기준 지반 최대 가속도에 표층 지반에 의한 가속도의 증폭률을 곱해 계산한다. 이 최대 가속도 증폭률은 표층 지반의 S파 속도와 일정한 상관관계에 있어, 해당지역의 증폭률을 구한다.

(4) 지반 분류

<표 1.44> 내진설계 지반분류체계

지반분류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파속도 $\overline{V_{s30}}$ (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}(\overline{N_{CH}})$ (blow/foot)	비배수전단강도 $\overline{S_u}$ (kPa)
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760에서 1500	>50	>100
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760		
S_D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	180 미만	<15	<50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

(5) 지반도에 의한 S파 속도(V_s) 계산 – 시추주상도 자료가 있는 경우

시추주상도 자료가 있는 경우 주상도 자료에서 표층 깊이가 30m 이상인 경우는 V_s30을 이용하고 그 이하인 경우는 V_s20, V_s15, V_s10 값을 각각 이용하여 계산한다.

(6) 토양도에 의한 S파 속도(V_s) 계산 – 시추주상도 자료가 없는 경우

시추주상도 자료가 없는 경우 경험적인 방법으로 30m 평균 전단파속도 AVS_{30}을 식 (1.41)과 <표 1.44>에 따라 추정한다. AVS_{30}은 지형분류와 표고로부터 이하의 경험식으로 평가한다.

$$\log AVS_{30} = a + b\log H \tag{1.41}$$

여기서,

H : 표고(m)

a, b : 경험적으로 추정된 계수로 <표 1.45>의 지형 분류에 따라 결정

<표 1.45> 지형분류 계수

지형 분류	계수		표고의 범위	
	a	b	하한	상한
산지	2.64	0	-	-
대지	2.00	0.28	10m	400m
선상지	1.83	0.36	15m	200m
자연제방	1.94	0.32	5m	30m
사주	2.29	0	-	-
골짜기의 밑바닥 평야	2.07	0.15	10m	500m
삼각주 및 구하도	2.34	0	-	-
매립지	2.23	0	-	-
하천, 기타	-	-	-	-

(7) 속도 증폭률의 계산

시추주상도 자료가 있는 경우에는 지반도에 의한 V_s값을 이용하며, 시추주상자료가 없는 경우에는 토양도에 근거한 V_s값을 이용한다. 어떠한 지진에 대한 각 지역의 속도 증폭도는 식 (1.42)의 경험식(Midorikawa 외, 1994)을 이용한다.

$$\log R = 1.83 - 0.66\log AVS_{30} \tag{1.42}$$

여기서,

R : 공학적 기반에 대한 표층 지반에 의한 속도의 증폭도

AVS_{30} : 지표로부터 깊이 30m 까지의 평균 S파속도(m/s)

국내 지진파 증폭특성 연구는 거의 시작하는 단계라고 할 수 있으며, 이는 지진공학적으로 의미 있는 규모를 가지는 지진이 거의 계측되지 못했기 때문에 국내 지진파 증폭특성 연구는 거의 시작하는 단계라고 할 수 있다. 또한 지진파가 증폭이 될 때, 토층의 깊이에 따라 증폭률이 달라지기 때문에 이에 따른 시추자료, 토양층 자료 등이 효율적으로 관리되지 못하여 그 활용성이 떨어진 영향도 있다. 이에 대한 지진방재용 지질 및 지반자료의 체계적인 관리가 선행되어져야 할 것으로 판단된다.

바. 진도 환산식

지진의 크기를 나타내는 용어중 지진의 크기를 대표하는 수치로 절대적 개념의'규모'와 상대적 개념의 '진도'라는 용어를 사용한다. 지진의 규모는 발생한 지진 에너지의 크기를 나타내는 척도로서 지진계에 기록된 진폭을 진원의 깊이와 진앙까지의 거리 등을 고려하여 지수로 나타낸 것으로 장소에 관계없는 절대적 개념의 지진크기를 말한다. 지진 진도는 어떤 장소에 나타난 지진동의 세기를 사람의 느낌이나 주변의 물체 또는 구조물의 흔들림 정도를 수치로 표현한 것으로 정해진 설문을 기준으로 계급화한 상대적 개념의 지진크기이다. 지진크기를 나타내는 가장 오래된 척도로 규모가 창안되기 이전부터 통용되었으며, 각 지역마다 다른 진도계급이 있다.

진도는 지진의 규모와 진앙거리, 진원깊이에 크게 좌우될 뿐만 아니라 지역의 지질구조와 구조물의 형태, 인원현황에 따라 달리 평가될 수 있다. 규모와 진도는 1대 1 대응이 성립하지 않아 하나의 지진에 대하여 여러 지역에서의 규모는 동일수치이나 진도 계급은 달라질 수 있다. 진도는 계급값을 쓰는 대신 가속도단위($cm/\sec^2$)로 나타내기도 하고, 중력가속도 $1g = 980cm/\sec^2$를 사용하기도 한다. $cm/\sec^2$는 gal로 표시하며 $1g = 980gal$이라고도 쓴다. 진도계급은 세계적으로 통일되어 있지 않아 나라별 실정에 맞는 척도를 채택하고 있다.

(1) 진규-규모 변환 공식

지진의 규모, 진도, 최대지반가속도 사이의 정확한 상관관계식은 없으나 학자들마다의 연구결과와 미국 등지에서 사용하는 경험식은 존재한다. 국내에서는 한반도에서 발생한 역사지진의 진도자료로부터 규모를 계산하는 관계식이 아직 설정되어 있지 않다. 미국 동부지역에서 사용되는 진도-규모 변환 공식(내진설계 기준연구 1997)을 식 (1.43)과 같이 사용하고 있다.

$$M = 1.75 + (1/2)I \tag{1.43}$$

식 (1.44)는 미국 서부지역 경험식이다. 여기에서 I는 MMI를 나타내며, M은 리히터 규모를 나타낸다.

$$M = 1.75 + (2/3)I \tag{1.44}$$

식 (1.45)은 진도와 지진의 최대지반가속도와의 상관관계식이며, Trifunac and Brady(1975)의 연구결과에 의한 경험식(미국동부지역)이다.

$$\log 10 Acc = 0.30 MMI + 0.014 \tag{1.45}$$

일반적인 에너지와 지진규모와의 관계는 식 (1.46)과 같은 상관관계식이 존재한다.(Gutenberg & Richter 1956)

$$\log 10 E = 1.5 M + 11.8 \tag{1.46}$$

(2) 진도-규모 상관식

규모와 진도는 서로 다른 의미를 가지지만 어떤 지진의 최대진도는 그 규모와 상관관계가 있다. 이를 진도-규모 경험식이라고 하며 지역적으로 다르므로 미국이나 일본의 진도-규모 경험식을 한국에서 적용하기 어렵다. 진도-규모 경험식은 역사지진을 정량화하는데 필수적이며, 장기간의 관측과 설문조사가 필요하다. 일본에서는 일본기상청이 1949년에 제시한 JMA진도를 사용하고 있다. 일본에서 오랜기간의 설문조사와 지진동가속도 관측값 사이에 식 (1.47)와 경험식이 성립되어있다.

$$Accel(gal) = 10\left(\frac{JMAI}{2} - 0.35\right) \tag{1.47}$$

여기에서 $Accel$=가속도 관측값, $JMAI$= JMA진도를 나타낸다. 일본에서는 이 경험식의 높은 상관관계를 이용하여 0.5단위의 진도등급을 부여한다. 지진의 규모, 진도, 최대지반가속도(PGA) 사이의 정확한 상관관계식은 없으나 학자들마다의 연구결과와 미국 등지에서 사용하는 경험식은 존재한다. 미국의 지진 규모와 진도와의 상관 관계식은 동부지역과 서부지역에서 관측된 많은 지진데이터를 이용하여 경험적으로 아래와 같은 공식을 사용한다.

○ 미국 동부지역 경험식

$$Mag = (1/2)MMI + 1.75 \tag{1.48}$$

○ 미국 서부지역 경험식

$$Mag = (2/3)MMI + 1.00 \tag{1.49}$$

(3) 진도와 지진의 최대지반가속도와의 상관 관계식

계기지진의 경우 가속도 시간이력으로부터 직접 지진가속도를 알 수 있지만, 역사지진과 같이 진도만을 추정할 수 있는 정우에는 경험식으로부터 지진가속도를 구한다. 진도 또는 규모 및 진앙거리로부터 최대지반가속도를 구하기 위한 여러 가지 경험식이 제시되어 있으나, 국내에 적합한 경험식에 대해서는 연구된 바가 없다. 1974년에 Ambraseys는 MMI진도와 최대지반가속도의 관계를 식 (1.50)과 같이 정리하였다.

$$\log a = -0.16 + 0.36MMI \tag{1.50}$$

Trifunac and Brady(1975)의 연구결과에 의한 경험식은 식 (1.51)와 같다.

$$\log 10 Acc(cm/\sec^2) = 0.3MMI + 0.014 \tag{1.51}$$

이외에도 1956년에 Hershberger(1956), Gutenberg와 Richter(1956), Murphy와 O'brien(1977)의 연구결과에 의해 아래의 관계식이 정리되었다.

$$\log a = -0.9 + 0.43MMI \tag{1.52}$$

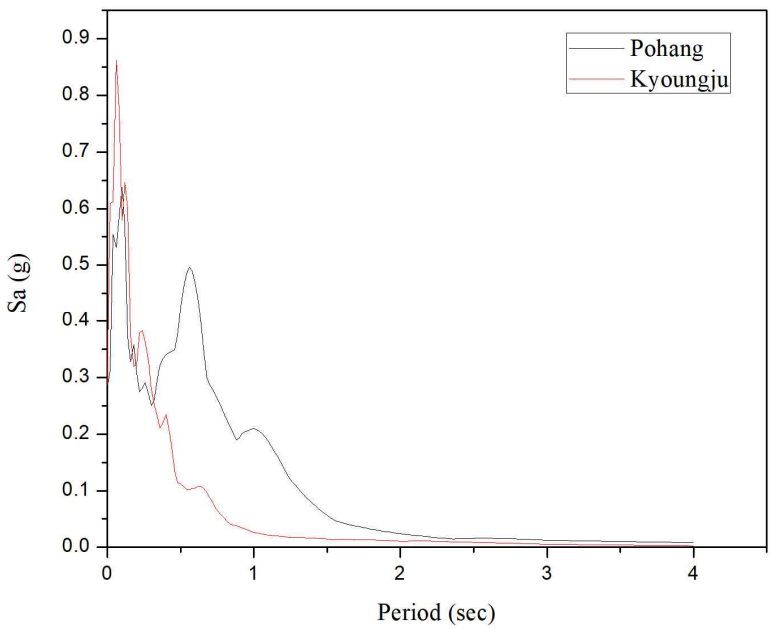
$$\log a = -0.5 + 0.33MMI \tag{1.53}$$

$$\log a = 0.25 + 0.25MMI \tag{1.54}$$

3. 건축물의 손상을 고려한 지진시나리오 구축

가. 지진파의 불확실성

최근 세계적으로 지진발생의 횟수와 빈도수는 크게 증가하고 있다. 지진발생으로 인해 많은 인명피해와 재산피해가 동반되고 있다. 지진의 발생을 예측할 수 있다면, 이러한 인명피해, 재산피해 예방이 가능하다. 그러나 지진 발생 및 지진의 성격, 특성에는 수많은 불확실성 요소가 존재하여, 현실적으로 지진발생을 예측하기는 쉽지 않다. 지진발생을 예측한다고 해도 어떤 특성을 가지는 지진이 발생할지 예상하기란 불가능하다. 지진파의 특성은 불확실한 요소가 매우 많다. <그림 1.45>은 포항지진과 경주지진의 응답스펙트럼가속도 그래프이다. 경주지진의 리히터규모는 5.8(기상청)이며, 포항지진의 규모는 5.4(기상청)이다. 리히터규모를 비교하였을 때, 경주지진은 포항지진보다 더 큰 피해가 예상된다. 그러나 포항지진으로 인해 2017년 12월 7일 기준으로 부상자 92명, 이재민 1700여명의 인명피해가 발생하였으며, 재산피해는 551억원으로 경주지진의 5배가 넘는 규모로 확인되었다.(중앙재난안전대책본부) 이처럼 포항지진의 규모가 작음에도 불구하고 피해가 크게 발생한 것은 포항지진과 경주지진의 지진파 특성이 다르기 때문이다. 그림 1은 포항지진과 경주지진의 응답스펙트럼 가속도 그래프이다. 경주지진의 응답스펙트럼 가속도는 낮은 고유주기에서 큰 값을 나타내고 있다. 포항지진의 응답스펙트럼 가속도는 0.5초~1초사이에 경주지진에 비해 높은 값을 보여주고 있다. 포항지진에 의해 발생한 건축물 피해는 중저층건물(1~3층)에 집중되어 발생하였다. 중저층 건물의 고유주기는 0.5초~1초사이에 위치하기 때문에 경주지진에 비해 피해가 집중된 것으로 사료된다. 이처럼 지진의 크기가 작은 지진에도 불구하고, 지진파의 특성에 따라 구조물의 피해는 커질 수 있다.



<그림 1.45> 포항지진, 경주지진 응답스펙트럼

나. 지진시나리오 선정의 필요성

확률론적 지진취약도평가는 임의의 지진동의세기(Intensity Measure, IM)에 의해 구조물의 지진응답(Engineering demand parameter, EDP)이 일정수준을 넘을 확률, 또는 구조물의 손상확률을 나타내어주는 지진취약도 곡선을 도출함으로써 대상 구조물의 내진성능을 평가할 수 있다. 지진동의세기(IM)는 일반적으로 지반운동의 크기를 나타낼 수 있는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 구조물의 고유주기 특성이 반영된 스펙트럼가속도(Spectral Acceleration, S_a), 스펙트럼 변위(Spectral Displacement, S_d), 그리고 구조물의 지진응답(EDP)은 건축구조물의 경우 최대 층간 변위비(Maximum Inter Drift Ratio)가 많이 사용되고 있다. 지진 취약도평가를 위한 확률론적 내진성능평가 방법은 수많은 지진시나리오를 통해 임의의 지진강도에 대해 구조물의 지진반응계수가 성능수준으로 초과하는 손상확률을 도출할 수 있다. 확률론적 내진평가는 결정론적 내진평가에 비해 시간과 모델링에 비용이 많이 필요하지만, 구조물의 보유성능수준과 구조물의 손상확률을 1:1 대응시킬 수 있으며, 이는 구조물 보유성능에 대한 손상-손실 관계구축에 용이한 측면을 가지고 있다.

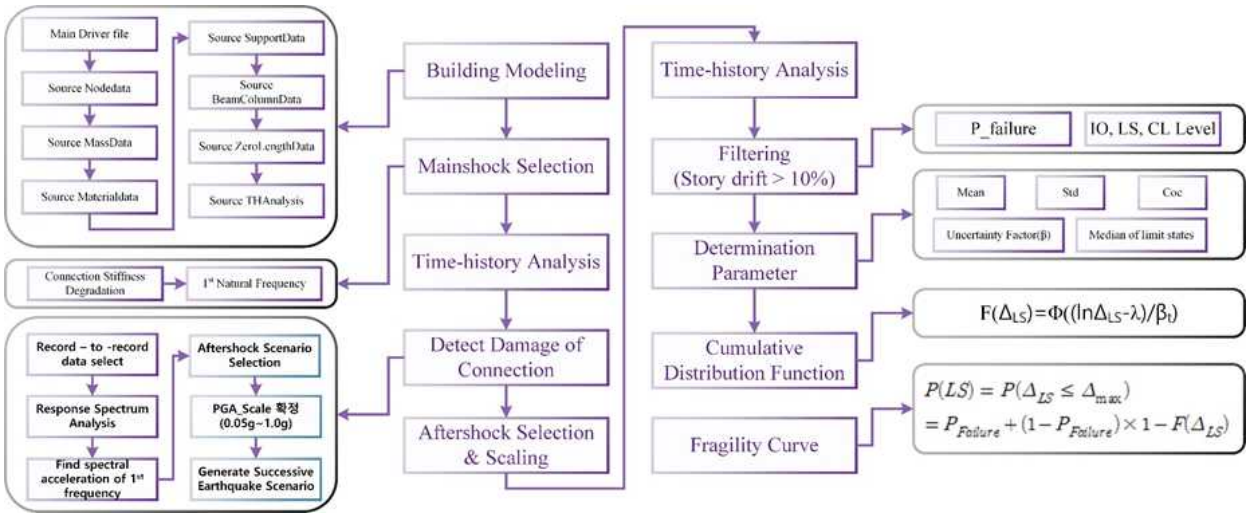
확률론적 지진취약도 평가를 위해서는 지진데이터를 통한 시간증분해석(Time Incremental Analysis)가 필요하다. 시간증분해석을 위해서는 지진데이터의 선정, 즉 지진시나리오의 선정이 필수적이다. 지진시나리오, 즉 해석을 위한 지진파선정은 동적해석결과에 큰 영향을 미치게 된다. 수많은 지진데이터를 이용하여 동적해석을 진행하면, 지진파에 대한 불확실한 요소를 많은데이터를 통하여 보완할 수 있다. 그러나 수많은 데이터가 사용된다 하더라도, 지진특성의 불확실성은 충족시켜주기 어렵고, 비용과 시간이 많이 소모된다.

ASCE 7-10 16.1.4절에 따르면 2차원 동적해석에서는 사용된 지반운동의 수가 7개 이하인 경우, 설계부재력과 설계층간변위가 같은 요구설계응답은 사용된 모든 지반운동으로 얻은 지진응답 중 최대값으로 결정하도록 하고 있다. 반면, 7개 이상의 지반운동을 사용할 경우에는 설계응답이 사용된 모든 지반운동으로 얻은 지진응답의 평균을 사용하여 결정할 수 있다. 그러나 7개의 지진파를 선정하는 방법에 대해서는 명확하게 명시되지 않고 있다.

무작위로 7개의 지진파가 선정될 경우, 경우에 따라 내진성능평가의 결과는 크게 달라질 수 있다. 구조물에 취약한 지진파가 선정될 경우, 구조물의 요구성능을 높아지겠지만, 구조물에 영향이 적은 지진파가 선정될 경우 구조물의 요구성능은 앞선 케이스에 비하여 낮아질 것이다. 본 연구에서는 ASCE 7-10에서 제안한 7개의 지진파시나리오를 선정하는 방법을 대상구조물의 구조적특성을 고려하여 제안하고자 한다.

다. 건축물의 손상을 고려한 지진시나리오 구축 방법

지진시나리오 선정에 따른 구조물의 내진성능평가는 취약선 곡선 도출을 통하여 진행할 것이다. 구조물의 취약성 곡선 비교는 내진성능평가를 위한 방법 중 하나이다. 지진 하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 안전성은 하중과 저항의 관계를 통하여 평가할 수 있다. 그러나 지진하중은 강도, 진동수 및 재하시간, 등으로 표현되고 있으며, 진앙지로부터 구조물의 위치까지 전달되는 과정에서 지반 조건 등의 많은 요인들에 의해서 지진동이 확대되는 현상이 발생한다. 이런 이유로 지진 하중의 효과를 수학적으로 정확하게 모델링하기는 쉽지 않으며, 모델링과정에서 수 많은 불확실성을 내포하게 된다. 철근콘크리트 구조물의 내진성능 저항도 재료의 비선형 특성으로 불확실성을 가지게 된다. 따라서 지진하중과 구조물의 내진 저항력을 확률변수로 취급하여 지진하중의 영향이 내진 저항력을 초과할 확률을 계산함으로서 구조물의 지진 취약도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 <그림 1.46>과 같은 순서에 의해서 구조물의 취약성 곡선을 도출하고, 접합부 설계정도에 따른 철골구조물의 내진성능평가를 실시하였다.



<그림 1.46> 취약성곡선 도출방법

라. 건축물 모델링 및 해석방법

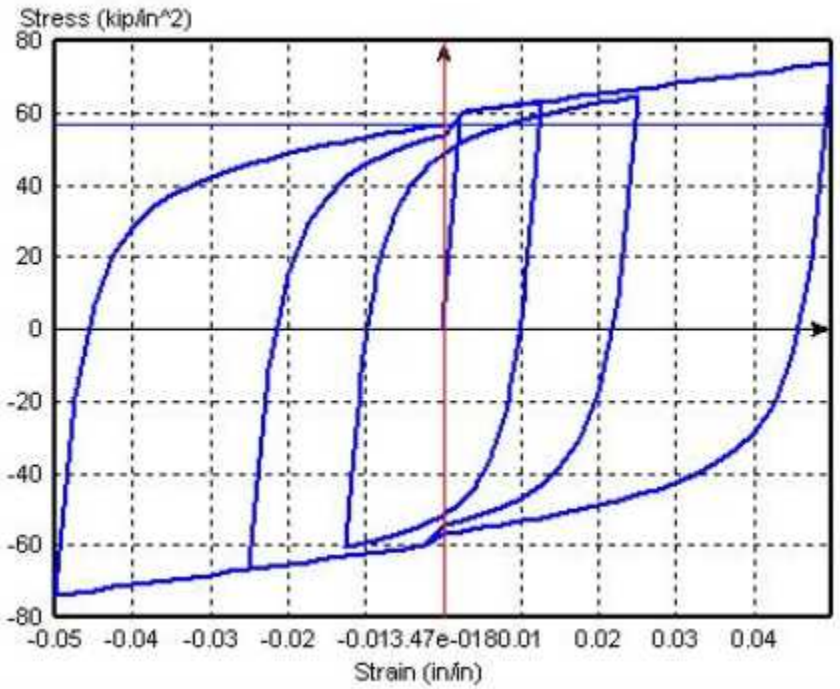
예제 구조물은 4층 철골 모멘트골조 시스템으로 구조모델링을 진행하였다. 비선형시간이력해석을 위하여 재료모델의 비선형을 고려하였다. 구조물은 로스엔젤레스에 위치한 4층 오피스 건물을 대상으로 진행하였다.

(1) 재료모델

철근의 강재모델은 비선형 거동을 구현할 수 있는 Giuffren-Menegotto-Pinto Model을 사용하였다. Giuffren-Menegotto-Pinto Model은 'R' 매개변수를 통하여 강재모델의 unloading curve의 형상을 정의할 수 있으며, 이는 응력과 변형률의 관계는 아래의 식을 통해 구할 수 있다. Giuffren-Menegotto-Pinto Model은 철근에 하중재하(reloadin)와 저하(unloading)의 주기적인 응답을 특징화한 모델이다.

$$\sigma^* = b\epsilon^* + \frac{(1-b)\epsilon^*}{(1+\epsilon^{*R})^{1/R}} \tag{1.55}$$

Giuffren-Menegotto-Pinto Model을 구현하기 위해서는 항복강도(Yield strength), 초기 탄성강성(Initial Stiffness), 변형경화비(Strain-hardening ratio), R, cR1, cR2(Control the transition from elastic to plastic branches) 6가지 매개변수가 필요하다.



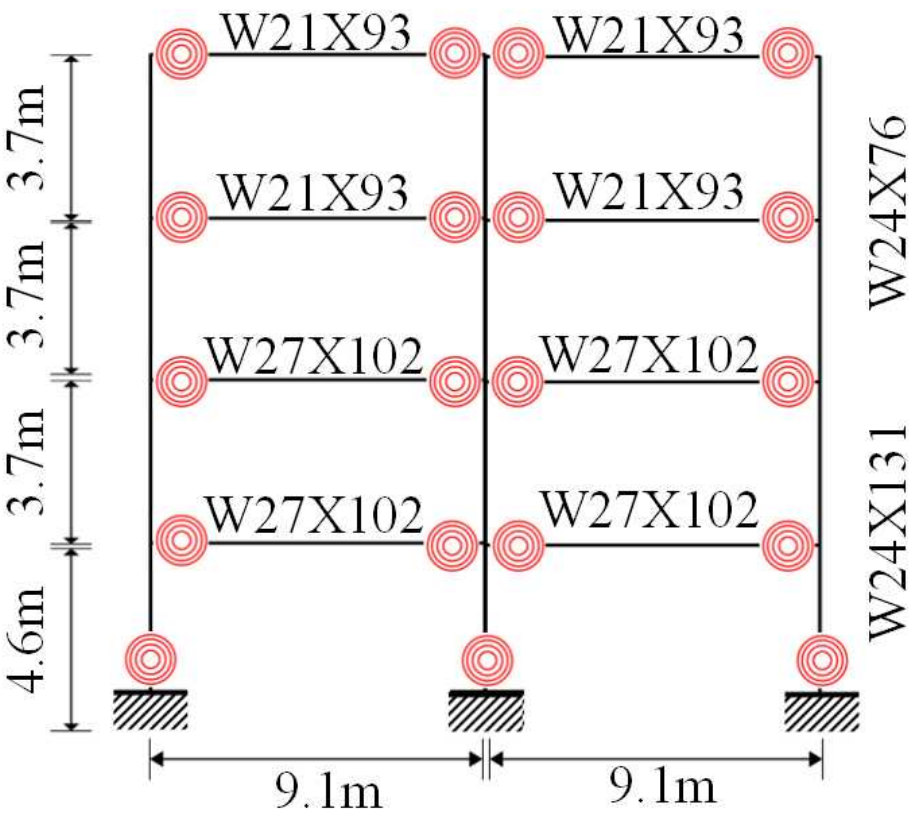
<그림 1.47> 강재 재료모델

(2) 단면정보 및 하중정보

오피스 4층 구조물의 보, 기둥 단면정보와 하중정보를 고려하기 위하여 IBC(International Building Code) 2013을 참조하여 오피스건물의 하중산정을 진행하였다. 1~2층과 3~4층의 활하중을 다르게 하여 층간 하중설계에 차이를 두고 진행하였다. 예제구조모델에서는 지하층의 설계는 진행하지 않고, 지상층은 사무실을 가정하여, 하중산정을 진행하였다. <표 1.46>와 같이 하중산정을 진행하였다. 1층, 2층 보는 W27 X 102가 사용되었으며, 3, 4층은 W21 X 93이 적용되었다. 1층, 2층 기둥은 W24 X 131, 3층 4층 기둥은 W24 X 76이 사용되었다.

<표 1.46> 해석모델의 중력하중 정보

고정하중		수직하중(kN/m^2)
용도	두께(mm)	
마감	30	0.6
모르타르	30	0.6
콘크리트 슬라브	210	5
천정		0.2
합계		6.4
활하중		
사무실(1~2층)		4
사무실(3~4층)		2



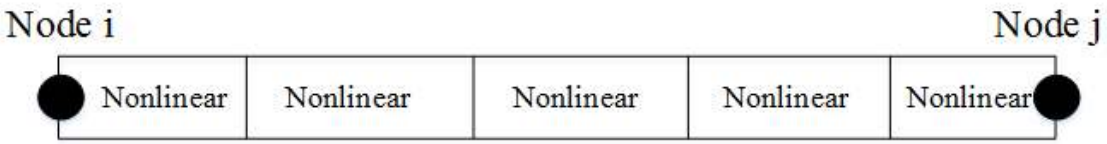
<그림 1.48> 4층 오피스 예제건축물

(3) 보, 기둥, 접합부 요소 모델링

철근콘크리트 구조모델의 보, 기둥 요소는 Opensees 프로그램의 비선형보기둥요소모델(Nonlinear Beam Column Element)를 사용하였다. 비선형보기둥요소모델은 보, 기둥 요소를 좀 더 세분화하여, 층간변위 또는 처짐을 자세하게 구현할 수 있다. 선형모델의 경우, 보를 <그림 1.49>와 같이 i점과 j점 사이를 선형탄성요소로 구분하여 구조해석을 진행하게 된다. 선형탄성모델을 이용할 경우, i점과 j점 사이에서 발생하는 비선형거동을 구현할 수 없으며, 앞서 Fiber-Section을 이용하여 단면설계의 효과를 확인할 수 없다. 따라서 선형탄성요소가 아닌 비선형보기둥요소모델을 사용함으로써, i점과 j점 사이에서 발생하는 비선형거동을 구현하고자 했다. 본 연구에서는 i점과 j점 사이를 5개의 integration point로 구분하여 비선형요소를 모델링하였다. 지반과 기둥은 강접을 가정하여 모델링하였다.

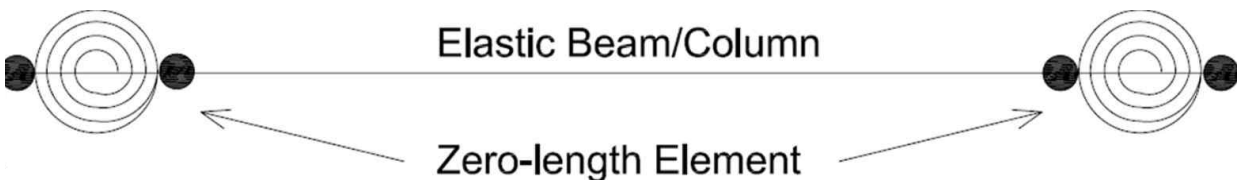


<그림 1.49> 선형탄성 빔요소

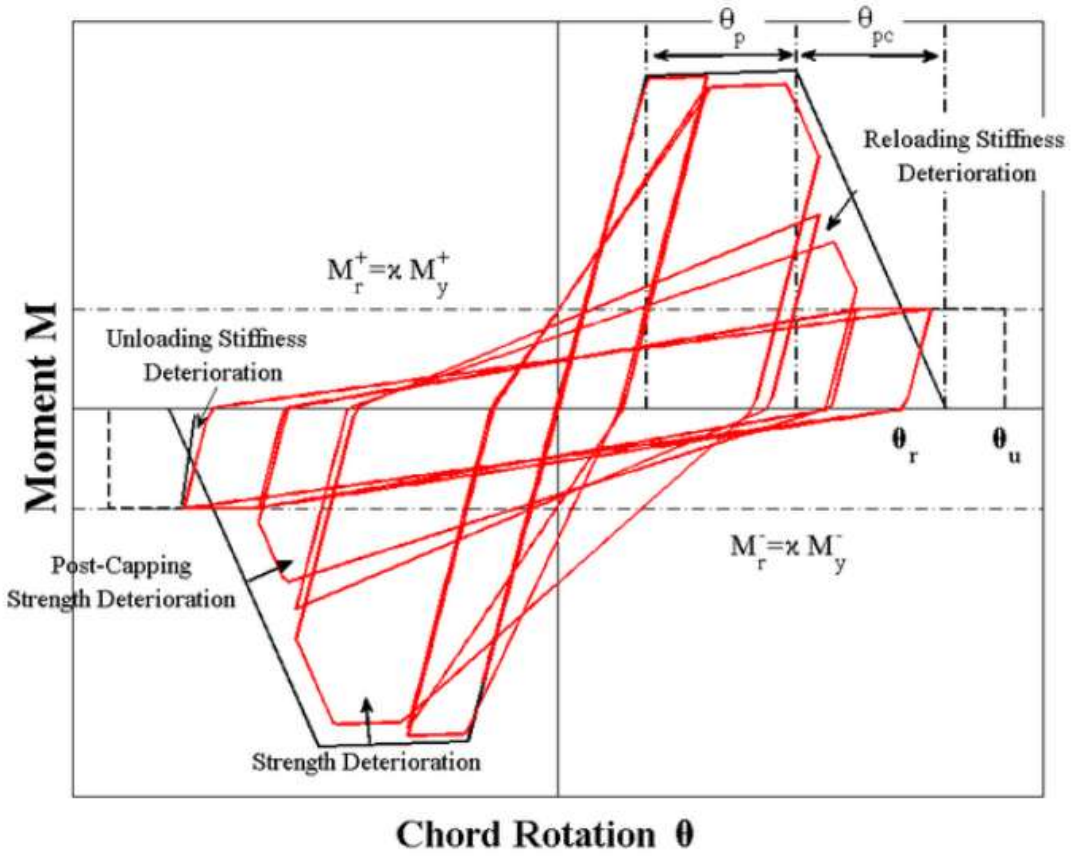


<그림 1.50> 비선형보기둥요소모델

보-기둥 접합부의 경우, 비선형을 고려하기 위하여, 힌지모델을 사용하였다. 힌지모델을 적용하기 위하여 <그림 1.51>과같이 zero-length element를 사용하였다. Zerolength element는 보를 구성하는 I점과 j점에 길이가 0인 스프링요소를 적용하는 요소이다. 스프링요소에 적용하는 모델은 Ibarra-Medina-Krawinkler model을 사용하였다. barra-Medina-Krawinkler model은 접합부힌지 손상에 의한 강성저감과 강도저감을 모두 표현할 수 있는 모델이다.



<그림 1.51> Zero-length Element



<그림 1.52> Ibarra-Medina-Krawinkler model

(4) 비선형시간이력해석

시간이력해석은 구조물의 동적거동을 파악하기 위한 해석이며, 그 중에서 비선형 시간이력해석은 구조물의 비선형 동적거동을 파악할 수 있는 가장 정확한 해석방법이다. 정적거동의 핵심은 구조물이 가지고 있는 강성과 외력과의 관계를 통해 변위를 얻어내는 것이다. 구해진 변위응답과 뉴턴 제2법칙인 '$F=ma$'를 통해 구조물의 강성을 고려하여 부재력(모멘트, 전단력, 축력)을 도출한다. 그러나 시간이력해석방법은 구조물에 대하여 동적하중이 작용할 때, 아래의 식과 같이 동적평형방정식의 해를 구하는 것으로, 구조물의 동적특성과 가해지는 가속도(하중)를 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물의 거동을 계산하는 방식이다.

$$[m]\ddot{u}+[c]\dot{u}+[k]u=p(t) \tag{1.56}$$

여기서,

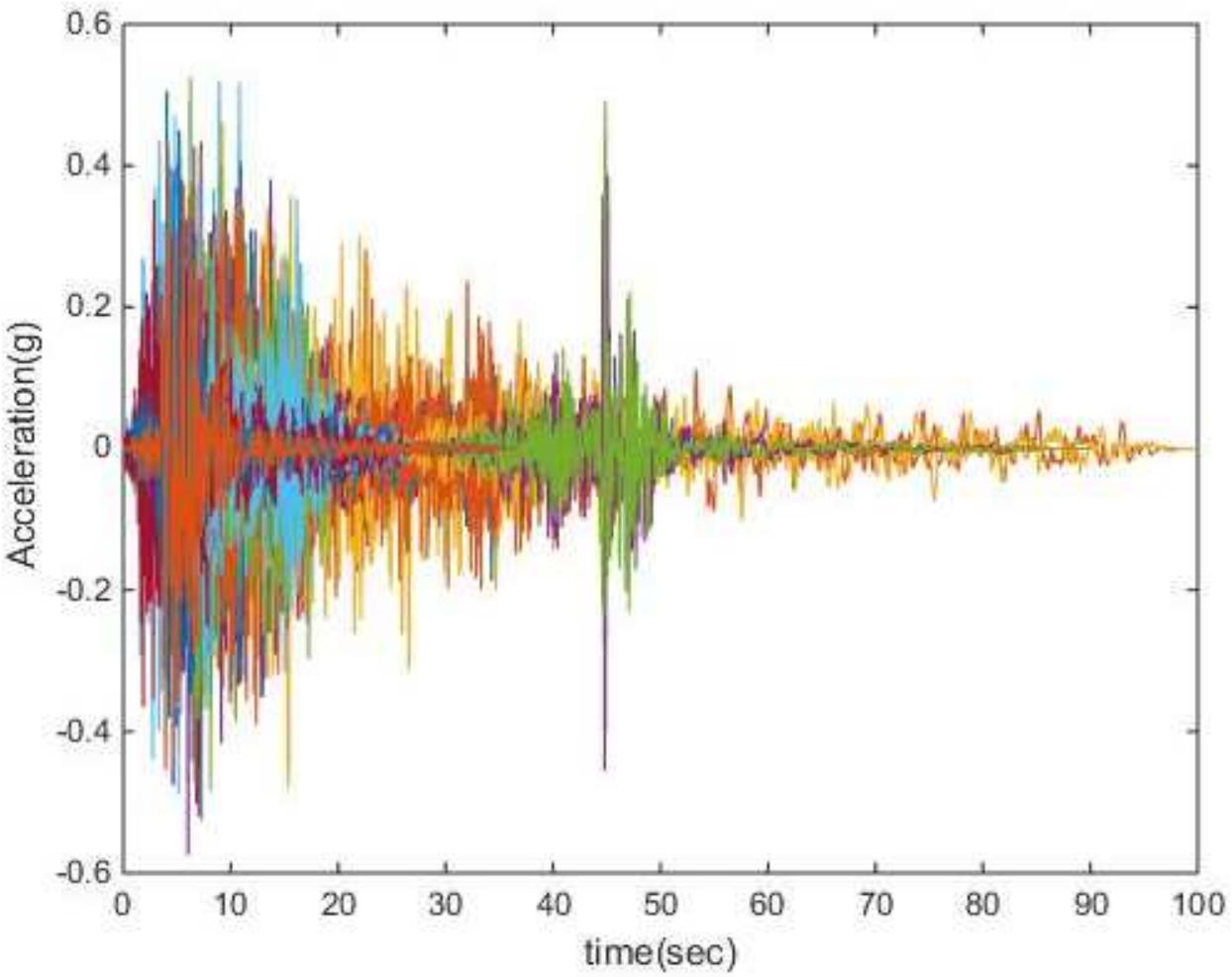
$[m]$: 구조물의 질량행렬

$[c]$: 감쇠행렬

$[k]$: 강성행렬

$p(t)$: 동적하중

시간이력해석방법은 구조물이 가지고 있는 특성(강성, 질량, 감쇠)을 고려하고 외력과의 관계를 통해 변위, 속도, 가속도 응답을 구하는 것이 시간이력해석이다. 선형시간이력해석은 힘과 응답의 관계가 선형적으로 변한다. 그러나 비선형 시간이력해석은 힘과 응답의 관계가 선형관계가 아닌 비선형관계를 보이며, 이는 실제 구조물의 거동과 가장 가까운 모습을 보여준다. <그림 1.53>은 44개의 선정된 지진파에 대한 시간-가속도 그래프이다. 시간에 따라 주어진 가속도 값을 동적하중으로 입력하여, 지반 가속도에 대한 구조물의 가속도/속도/변위 응답을 도출하게 된다. 본 연구에서는 비선형 시간이력해석을 위한 Newton-Raphson 알고리즘을 이용하였으며, 시간이력해석을 위한 구조해석 프로그램은 U.C Berkeley의 PEER Center에서 제공하는 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)를 사용하였다.



<그림 1.53> 44개 지진파에 대한 시간-가속도 곡선

(5) 구조물의 손상상태 판별

구조물의 지진취약도를 평가하기 위해서는 먼저 구조물의 손상상태와 손상상태를 판별할 수 있는 척도를 정의하여야 한다. 구조물의 손상상태를 나타내는 척도로는 손상지수, 변위연성도, 수평변위한계 등이 있으나, 본 연구에서는 FEMA356에서 제안하고 있는 손상지표인 최대층간변위비를 사용하였다. FEMA 356에서는 구조물의 성능수준에 따른 최대 층간변위비를 바탕으로 손상상태 따른 손상지표를 제안하고 있다. 구조물의 성능수준은 붕괴 방지(Collapse Prevention, CP), 인명 안전(Life Safety, LS), 즉시 입주(Immediate Occupancy, IO)로 정의하며, 각 성능수준에 따른 한계 최대 층간변위비와 손상상태는 아래의 표와 같다.

<표 1.47> 철근콘크리트 모멘트 시스템 성능수준별 허용 층간변위비

구조시스템	성능수준			
	구분	IO	LS	CP
철근콘크리트 골조	1차	• 미세 균열 발생. 소수의 부재에서 제한적인 항복. • 압축 파괴 없음.	• 보에서 광범위한 손상 발생. • 연성 기둥의 피복 박리 및 전단균열 발생. • 접합부 균열 발생.	• 연성부재에서 광범위한 균열 및 힌지 발생. • 비연성 기둥의 제한적인 균열. • 단주에서 심각한 손상 발생.
	2차	• 연성 기둥과 보에서 미소한 박리. • 보와 기둥의 휨 균열 발생, • 접합부의 전단 균열.	• 연성 부재의 광범위한 균열. • 비연성 기둥의 제한적인 균열. • 단주에서 심각한 손상 발생.	• 기둥과 보의 광범위한 파괴. • 접합부의 심각한 손상 및 철근의 좌굴.
	층간 변위비	• 일시적 1% • 영구변형 없음	• 일시적 2% • 영구적 1%	• 일시적 또는 영구적 4%

(6) 지진취약도 곡선 도출 방법

본 연구에서 지진취약도 곡선을 도출하기 위한 방법은 incremental dynamic analysis(IDA)를 사용하였다. 지진취약도 곡선 도출에 사용된 지진의 강도는 PGA이며, 지진반응계수는 최대층간변위비(IDR)를 사용하였다.

마. 지진시나리오 선정에 따른 건축물의 지진취약도 결과

(1) 지진데이터 수집

증분동적해석을 통하여 구조물의 취약도를 평가하기 위해 본 연구에서는 FEMA P695(2009)에서 제시하고 있는 원단층 지반운동(Far-field ground motion) 22쌍의 지진기록을 선정하였다. 지진파 기록은 진원에서 직접적으로 측정된 데이터가 아닌, 진원으로부터 길게는 수십, 수백키로 떨어진 관측소에서 기록되어진다. 따라서 얻어진 지진 데이터 속에는 지진의 규모, 진앙거리, 지반조건에 따른 불확실성요소가 내포되어있다. 수많은 관측소에서 측정된 서로 다른 지진에 대하여 신뢰성분석을 기초로한 내진성능평가를 진행하게 된다면, 평가 결과에 대한 신뢰도는 떨어지게 된다. 따라서 지진데이터 속의 불확실성요소를 제거하기 위해 정규화를 통해 불확실성요소에 대한 영향력을 줄여주어 구조물 손상을 보다 정확하게 예측하였다. 정규화는 FEMA P695에서 제시하고 있는 방법을 통하여 진행하였다. 각각의 22쌍의 지진파 데이터를 PGV(Peak Ground Velocity)의 중간값을 도출하여, 각각의 지진에 대한 정규화 계수를 구하게 된다. 앞서 구한 정규화 계수를 지진데이터에 곱하여 지진데이터의 정규화를 진행하였다. 정규화를 위한 자세한 식은 식 (1.57)과 같으며, 정규화된 지진데이터의 normalization factor, PGA, PGV를 <표 1.48>에 정리하였다

$$NM_i = Median(PGV_{PEER,i})/PGV_{PEER,i} \tag{1.57}$$

$$NTH_{1,i} = NM_i \times TH_{1,i} \tag{1.58}$$

$$NTH_{2,i} = NM_i \times TH_{2,i} \tag{1.59}$$

여기서,

NM_i: i번째 지진기록의 정규화 계수

$Median(PGV_{PEER,i})$: i번째 지진기록의 PGV의 중앙값(median)

$PGV_{PEER,i}$: i번째 지진기록의 PGV

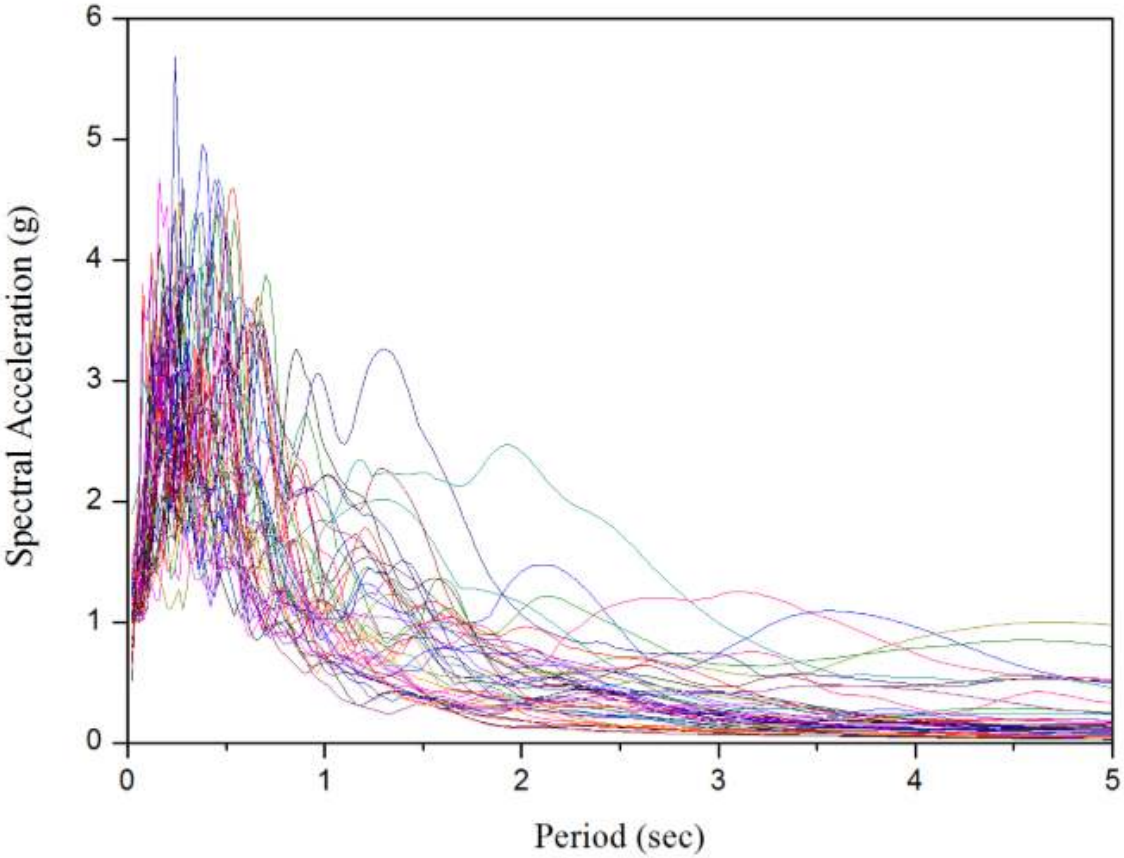
NTH: 정규화된 지진기록

TH: 원 지진기록

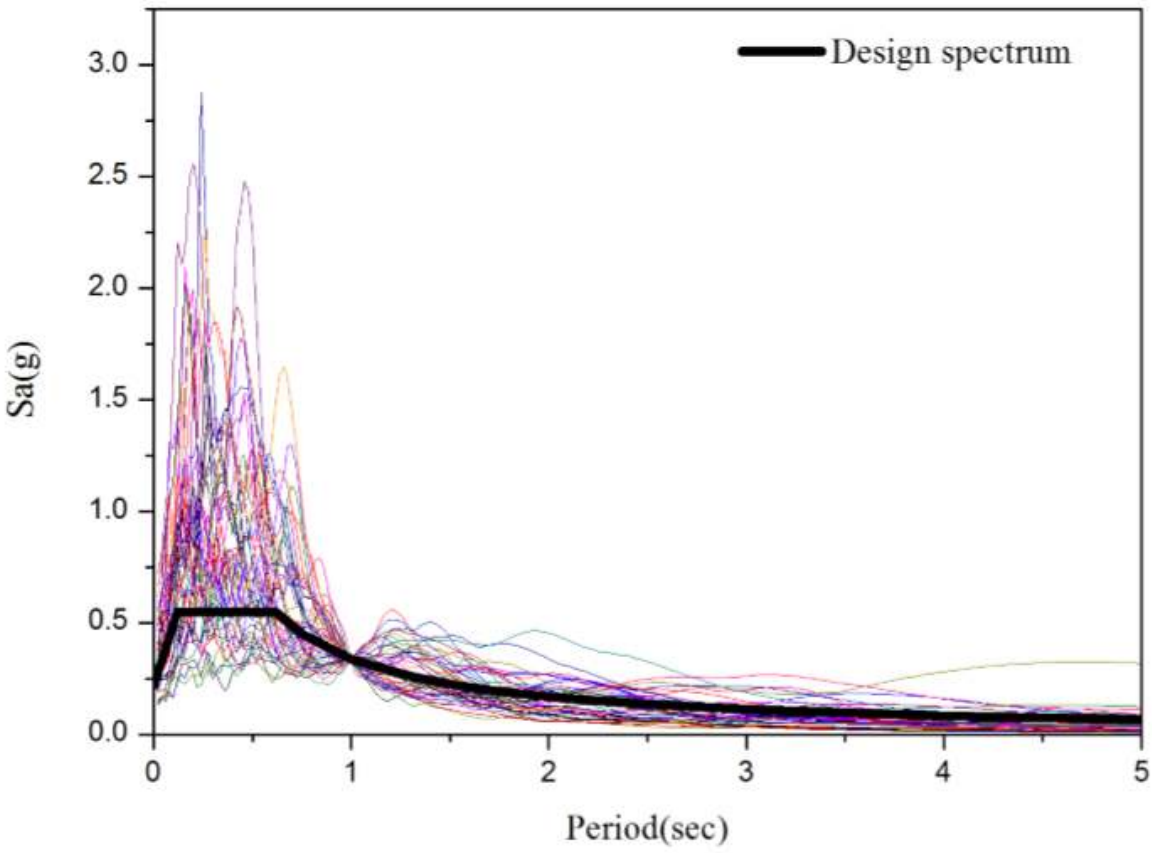
<그림 1.54>은 22쌍의 원 지진기록에 대한 가속도응답스펙트럼, <그림 1.55>는 정규화를 진행한 지진기록의 가속도 스펙트럼이다. 두 그림을 비교해 보았을 때, 정규화를 통하여 각각의 지진파에 대한 응답스펙트럼을 지진파 전체에 대한 응답스펙트럼에 맞출 수 있었다.

<표 1.48> 원단층 지반운동 22쌍의 PGA와 PGV 및 정규화된 데이터의 PGA와 PGV

EQ ID	PEER-NGA Record Information		Recorded Motion		Normaliz. Factor	Normalized Motions	
	File Names - Horizontal Records		PGA (g)	PGV (cm/s.)		PGA (g)	PGV (cm/s.)
	Comp. 1	Comp. 2					
12011	NORTHR/MUL009	NORTHR/MUL279	0.52	63	0.65	0.34	41
12012	NORTHR/LOS000	NORTHR/LOS270	0.48	45	0.83	0.40	38
12041	DUZCE/BOL000	DUZCE/BOL090	0.82	62	0.63	0.52	39
12052	HECTOR/HEC000	HECTOR/HEC090	0.34	42	1.09	0.37	46
12061	IMPVALL/H-DLT262	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33	1.31	0.46	43
12062	IMPVALL/H-E11140	IMPVALL/H-E11230	0.38	42	1.01	0.39	43
12071	KOBE/NIS000	KOBE/NIS090	0.51	37	1.03	0.53	39
12072	KOBE/SHI000	KOBE/SHI090	0.24	38	1.10	0.26	42
12081	KOCAELI/DZC180	KOCAELI/DZC270	0.36	59	0.69	0.25	41
12082	KOCAELI/ARC000	KOCAELI/ARC090	0.22	40	1.36	0.30	54
12091	LANDERS/YER270	LANDERS/YER360	0.24	52	0.99	0.24	51
12092	LANDERS/CLW-LN	LANDERS/CLW-TR	0.42	42	1.15	0.48	49
12101	LOMAP/CAP000	LOMAP/CAP090	0.53	35	1.09	0.58	38
12102	LOMAP/G03000	LOMAP/G03090	0.56	45	0.88	0.49	39
12111	MANJIL/ABBAR--L	MANJIL/ABBAR--T	0.51	54	0.79	0.40	43
12121	SUPERST/B-ICC000	SUPERST/B-ICC090	0.36	46	0.87	0.31	40
12122	SUPERST/B-POE270	SUPERST/B-POE360	0.45	36	1.17	0.53	42
12132	CAPEMEND/RIO270	CAPEMEND/RIO360	0.55	44	0.82	0.45	36
12141	CHICHI/CHY101-E	CHICHI/CHY101-N	0.44	115	0.41	0.18	47
12142	CHICHI/TCU045-E	CHICHI/TCU045-N	0.51	39	0.96	0.49	38
12151	SFERN/PEL090	SFERN/PEL180	0.21	19	2.10	0.44	40
12171	FRIULI/A-TMZ000	FRIULI/A-TMZ270	0.35	31	1.44	0.50	44



<그림 1.54> 원 지진데이터의 응답스펙트럼



<그림 1.55> 스케일링한 지진데이터의 응답스펙트럼

(2) 지진시나리오 선정 방법

ASCE 7-10에 언급된 7개의 지진데이터를 선정하기 위해 44개의 지진데이터를 스케일링을 진행하였다. 본 연구에서 제안하는 지진시나리오 선정방식을 다음과 같다. 제안된 지진시나리오 선정방법은 구조물의 고유주기를 고려하여, 44개 지진파 중 $S_{aT_n(record)} \geq S_{aT_n(Design)}$을 만족하는 상위 7개 지진시나리오를 선정하는 방식이다. Case 1은 44개 지진파 중 무작위로 지진파를 선택할 경우 구조물에 영향력이 적은 지진시나리오가 선정될 경우를 고려하였다. $S_{aT_n(record)} \leq S_{aT_n(Design)}$를 만족하는 지진시나리오 중 하위 7개의 지진시나리오를 선택한 경우이다. Case 2는 44개 지진데이터를 모두 활용하여 구조물의 취약성평가를 진행한 경우이다.

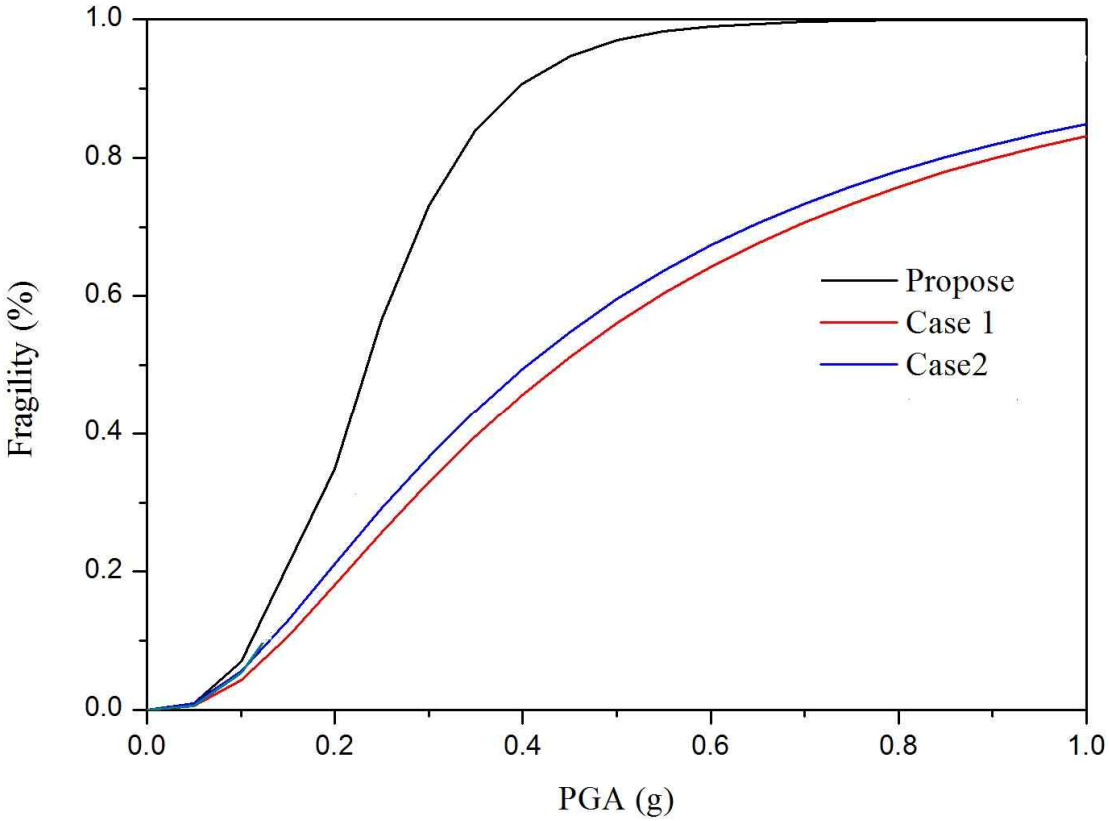
<표 1.49> Earthquake Scenarios

Case	Earthquake Scenario	Details
Propose	$S_{aT_n(record)} \geq S_{aT_n(Design)}$	Consider Structure
case 1	$S_{aT_n(record)} \leq S_{aT_n(Design)}$	
case 2	44 earthquake/?(all)	All earthquake

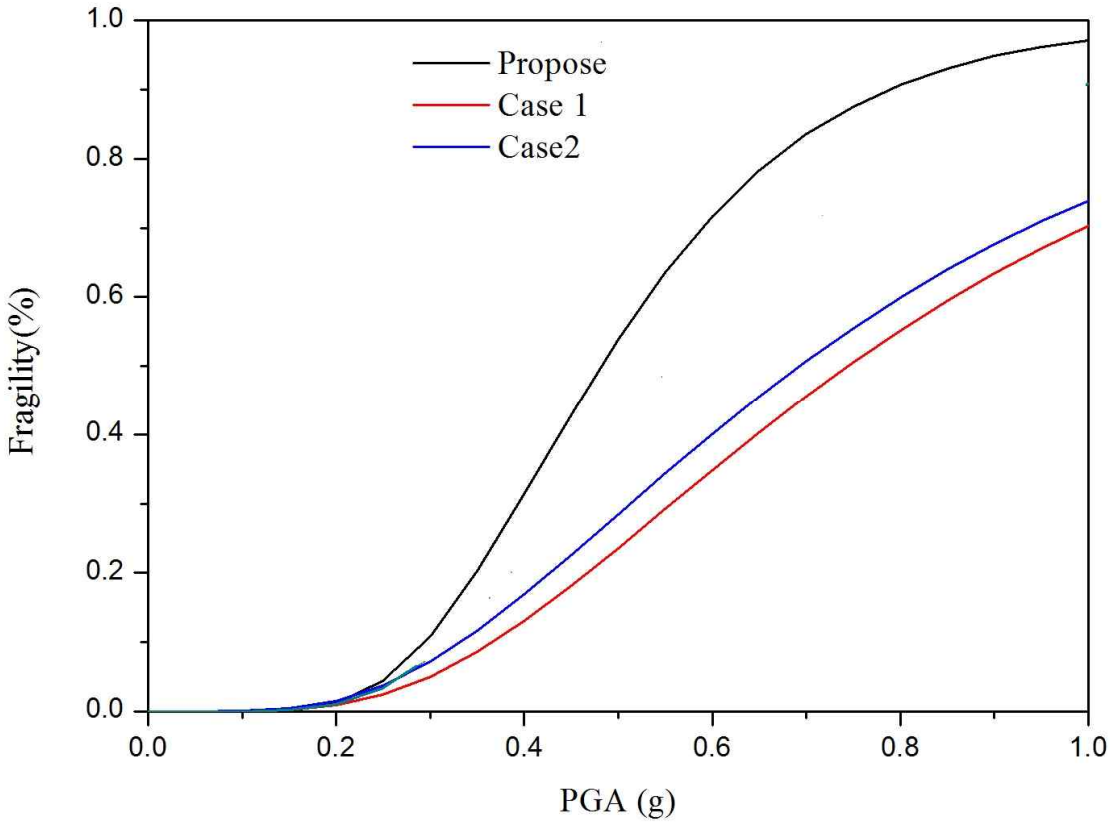
(3) 지진시나리오 선정에 따른 지진취약도 평가 결과

제안된 지진시나리오 선정방법과 Case 1, Case2 3가지 지진시나리오 선정을 통해 대상 예제 구조물의 취약성평가를 진행하여, 시나리오선정에 따른 구조물의 취약도를 비교하였다. <그림 1.56>과 <그림 1.57>은 3가지 지진시나리오 선정방식에 대한 구조물의 LS(Life Safety), CP(Collapse Prevention) 레벨을 초과할 확률이다. 포항지진(PGA = 0.4g)이 발생하였을 때, 예제구조물이 LS레벨의 손상을 입을 확률은 3가지 방법 각각 84%, 49%, 43%이다. 소수의 지진파(7개 지진파)를 통하여 취약도평가를 진행할 경우, 지진데이터의 불확실성을 보완하기는 쉽지않다. 제안된 구조물의 고유주기를 고려하여 지진시나리오를 선정할 경우가 44개 지진파를 모두 사용하였을 경우(Case 1), 지진시나리오선정이 가장 취약하게 진행될 경우(Case 2)보다 약 34%가 높게나왔다.

예제구조물이 CP레벨의 손상을 입을 확률은 3가지 방법 각각 31%, 15%, 10%이다. 소수의 지진파(7개 지진파)를 통하여 취약도평가를 진행할 경우, 지진데이터의 불확실성을 보완하기는 쉽지않다. 제안된 구조물의 고유주기를 고려하여 지진시나리오를 선정할 경우가 44개 지진파를 모두 사용하였을 경우(Case 1), 지진시나리오선정이 가장 취약하게 진행될 경우(Case 2)보다 약 15%가 높게나왔다.



<그림 1.56> LS 레벨의 취약도



<그림 1.57> CP레벨의 취약도

4. 소결

본 장에서는 주요시설물의 보유성능을 파악하기 위하여 국내 내진기준의 변화와 그에 대한 설계스펙트럼의 변화, 확률기반 지진시나리오 작성에 관한 기존연구방법, 결정론적 내진성능평가기법과, 확률론적 내진성능평가기법에 대해서 언급하였다. 본 장의 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- ❍ 국내 내진기준의 변화에 따른 지역계수와 지반등급 차이를 파악하고 이에 따른 설계스펙트럼가속도 값을 비교하였다. 설계스펙트럼가속도는 KBC 2005를 기준으로 큰 폭으로 증가하였다. AIK 1988과 KBC 2016의 설계스펙트럼 가속도는 지진구역 1에서 평균 2.24배, 지진구역 2에서 2.38배 증가하였는데 이는 지진의 재현주기를 500년에서 2400년으로 개정한 효과로 분석된다. 연약지반(S_D, S_E)의 설계스펙트럼 가속도는 KBC 2005 이후 소폭 감소하였다.
- ❍ 지진의 진도 분포도 작성 시 진도에 대한 불확실성을 감소시키고 신뢰성을 확보하기 위해서는 지진동 감쇠식, 지반증폭현상와 진도환산식에 대한 충분한 이해와 검증을 통한 연구가 필요하다. 진도환산식의 경우 국내 실계측 자료가 거의 전무한 실정이므로 적절한 국외 진도환산식 연구를 참조하고 이를 국내 환경에 맞게 접목시켜야 된다. 또한 진도와 PGA와의 관계 뿐만 아니라 응답스펙트럼 가속도등의 다양한 지진동 상수인자들의 관계식을 검토하여 국내 지진환경상 어려운 여건을 채워나가야 할 것으로 보인다.
- ❍ 현행 내진성능평가 방법인 결정론적 내진성능평가기법은 대상구조물의 동적해석을 진행하지 않고, 비선형정적해석을 통해 구조물의 보유성능을 구하는 방법이다. 결정론적 내진성능평가기법은 구조물의 보유성능을 성능수준을 통해 도출한다. 기준으로 정해진 4가지 성능수준(거주가능, 인명안전, 붕괴방지, 붕괴위험)으로 모든 손상을 평가하기 때문에 구조물의 보유성능수준과 구조물의 손상정도는 1대1 대응이 아닌 1대다 대응이 된다. 따라서 본 연구에서 보유성능에 대한 손상-손실 관계구축에 어려움이 존재한다.
- ❍ 지진 취약도평가를 위한 확률론적 내진성능평가 방법은 수많은 지진시나리오를 통해 임의의 지진강도에 대해 구조물의 지진반응계수가 성능수준으로 초과하는 손상확률을 도출할 수 있다. 확률론적 내진평가는 결정론적 내진평가에 비해 시간과 모델링에 비용이 많이 필요하지만, 구조물의 보유성능수준과 구조물의 손상확률을 1:1 대응시킬 수 있으며, 이는 구조물 보유성능에 대한 손상-손실 관계구축에 용이한 측면을 가지고 있다.

4절. 구조재 및 비구조재 통합 지진취약도평가 기법 개발

1. 지진취약도함수의 정의와 도출방법

가. 정의

지진취약도함수(seismic fragility function 또는 간단히 fragility function)는 건축물의 지진하중에 대한 손상을 확률적으로 나타내기 위한 함수이다. 좀 더 정밀히 정의하면, 지진취약도함수는 건축물이 주어진 지진의 강도(intensity measure)에 대해 특정한 손상상태를 만족하거나 초과할 가능성을 제공하는 조건부 확률이라고 할 수 있다. 지진취약도함수의 조건부 확률은 일반적으로 아래의 식 (1.60)와 같이 정의할 수 있다.

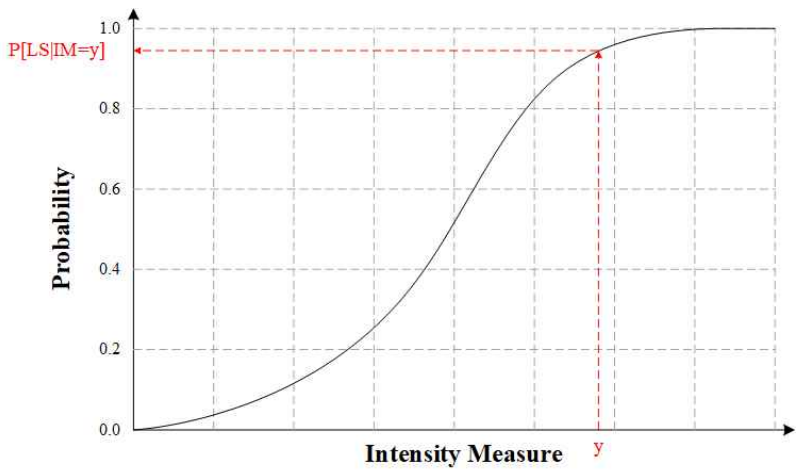
$$Fragility = P[LS|IM = y] \tag{1.60}$$

여기서, LS: 건축물 구성요소의 손상상태(limit state) 또는 손상정도(damage level)

IM: 지진의 강도

y: 선택된 지진의 강도

지진취약도함수의 정의로부터, 지진취약도함수를 도출하기 위해선 지진의 강도, 손상상태가 필요한 것을 알 수 있다. 앞서 HAZUS에 대한 지진취약도함수 데이터베이스를 참고하면, HAZUS는 구조재와 비구조재의 손상상태를 총 4가지 단계(slight, moderate, extensive, complete)로 구분하여, 한 가지 건축물에 대해 각 손상상태에 대한 지진취약도함수를 제공하고 있다. <그림 1.58>는 지진취약도함수를 그래프로 나타낸 것이며, 가로축은 지진의 강도, 세로축은 특정한 지진강도에 대한 손상상태에 도달할 확률을 나타낸다.



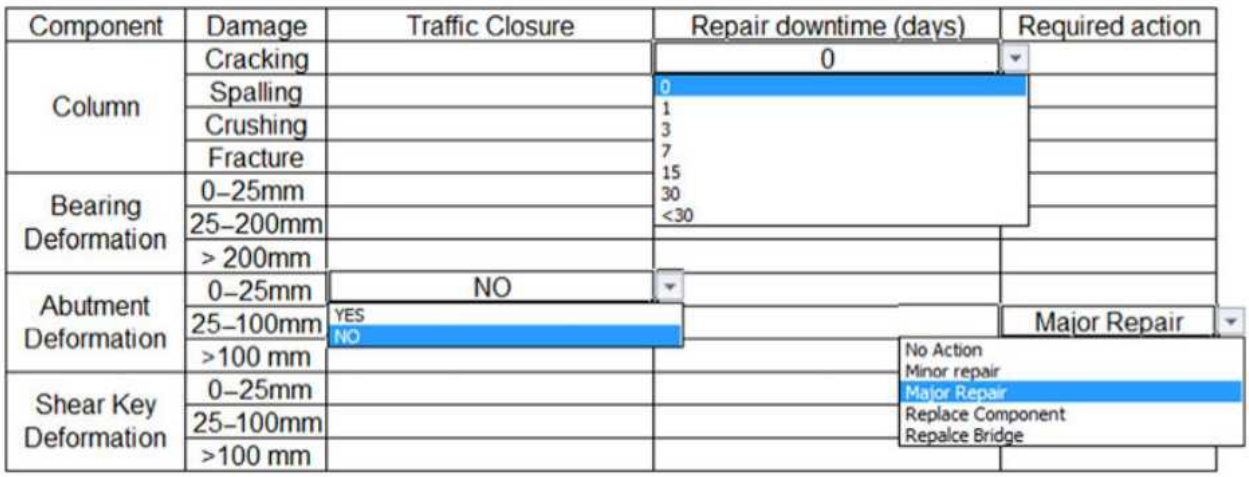
<그림 1.58> 지진취약도 함수의 예

나. Expert-Based Method

Expert-based method 또는 heuristic method는 지진취약도를 도출하는데 가장 오래되고 간단한 방법이다. 이 방식은 다른 지진강도에 대한 건축물의 손상확률분포를 지진공학분야의 전문가들에 의해 추정하여 지진취약도함수를 도출한다. 선택된 전문가들로부터 건축물이나 구조물의 다양한 지진강도에 대해 예상되는 피해분포로 구성된 설문지 응답데이터를 통해, 대상 건축물이나 구조물의 지진취약도함수 도출에 필요한 자료를 얻을 수 있다. Expert-based method를 통한 건축물의 지진취약도함수 평가 방식을 정리하면 아래와 같다.

- ○ 전문가 패널의 구성
- ○ 설문지 제작
- ○ 설문결과의 통계분석
- ○ 건축물의 손상확률 matrix 구성
- ○ 손상확률 분포함수 선택

<그림 1.59>은 다리 구조물에 대해 전문가의 의견을 조사하기 위한 설문지를 나타낸 것이다. 설문지를 보면, 전문가들은 각각의 damage state(DS)를 초과하는 의견을 제시하기 때문에, 광범위한 지진강도에 대해 각 DS에 대한 지진취약도함수를 개발할 수 있는 장점이 있다.



<그림 1.59> 다리 구조물 구성요소의 지진취약도를 도출하기 위한 전문가 설문지 (Munstasir et al. 2015)

실제 expert-based method를 이용하여 건축물의 지진취약도함수를 도출한 실제 사례 중 하나가 ATC-13보고서에 수록되어있다. 미국의 ATC(Applied Technology Council)에서 미국 캘리포니아 지역의 지진손상평가에 대한 보고서인 ATC-13을 제작하였을 당시, 건축물이나 구

조물의 손상을 확률적으로 평가할 수 있는 기록이 매우 적었다. ATC-13 보고서에 따르면, 캘리포니아 지역의 전형적인 건축물, 주요시설물, 기반시설물에 대한 지진손상평가는 42명의 전문가 의견에 의해 도출되었다고 명시하고 있다. 당시 전문가들에 의해 MMI를 지진강도로 하는 확률적 손상함수를 개발하였다. 이 방식은 전문가의 의견에 따라 건축물의 지진취약도함수가 도출되므로, 설문지의 사용, 전문가의 경험 및 컨설팅에 참여한 전문가의 수에 따라, 도출된 지진취약도함수의 크게 달라진다. 일반적으로 전문가의 판단이나 의견에는 불확실성이 포함될 수 있고 정확도가 낮을 수 있으므로, 이 방식으로 도출된 지진취약도함수의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다.

다. Empirical Method

Empirical method는 실제 지진피해 조사나, 지진피해탐사(reconnaissance)보고서로부터 얻어진 실제 지진데이터를 이용하여 지진취약도함수를 도출하는 방식이다. 1989년 발생한 Loma Prieta 지진, 1994년 발생한 Nothridge 지진, 1995년 발생한 Kobe 지진의 지진피해탐사 보고서로부터, empirical method를 이용한 지진취약도함수 도출방법의 개념이 정립되었다.

지진피해데이터를 이용하여 empirical method로 지진취약도함수를 도출하는 방식은 연구자들마다 차이는 있다. Basoz and Kiremidjian (1997)은 Northridge 지진데이터를 이용한 로지스틱 회귀분석(logistic regression analysis)을 통해 지진취약도함수를 도출하였다. Shinozuka et al. (2001)은 Kobe 지진데이터를 이용하여 최우도기법(maximum likelihood method)을 적용하여 로그정규분포로 지진취약도함수를 추정하였다. 반면, Der Kiureghian (2002)는 동일한 지진데이터를 이용하여 지진취약도함수를 베이지안(Bayesian)을 이용하여 추정하였다. 이들의 차이는 건축물의 손상확률 분포함수를 선택하는데 차이가 있으며, 일반적으로 empirical method를 통한 건축물의 지진취약도 평가 방식을 정리하면 아래와 같다.

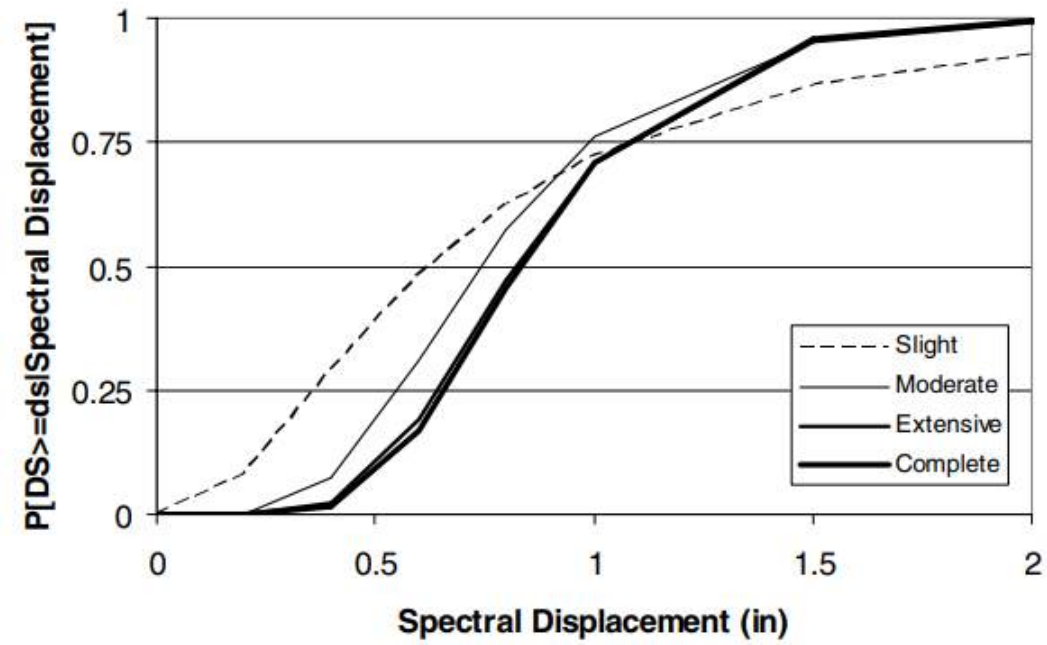
- ○ 건축물의 한계상태 부여
- ○ Shake map으로부터 지진강도 선택
- ○ 건축물의 손상확률 matrix 구성
- ○ 손상확률 분포함수 선택

<표 1.50>은 Northridge 지진의 500개 이상 건축물에 대한 지진피해보고서인 ATC-38을 이용하여 얻어진 목구조 건축물에 대한 손상확률 matrix에 대한 예제이다. 손상확률 matrix에 따르면, 지진의 강도가 0-0.2g일 때, 목구조 건축물의 DS가 slight에 도달할 확률은 10%이다. <그림 1.60>은 손상확률 matrix로부터 지진취약도함수를 도출한 것이다. 여기서 지진의 강도를 PGA가 아닌 spectral displacement를 사용하였는데, 해당연구에서 HAZUS에서 제시하

는 PGA와 spectral displacement의 변환식을 이용하여 나타냈기 때문이다. 이 연구에서는 손상확률 분포함수를 특별히 선택하지 않고, 건축물의 손상확률 matrix로부터 지진의 강도에 따른 각 DS에 대한 손상확률을 점으로 이어서 지진취약도 함수를 도출하였다.

<표 1.50> 목구조 건축물의 손상확률 matrix (Sarabandi et al. 2004)

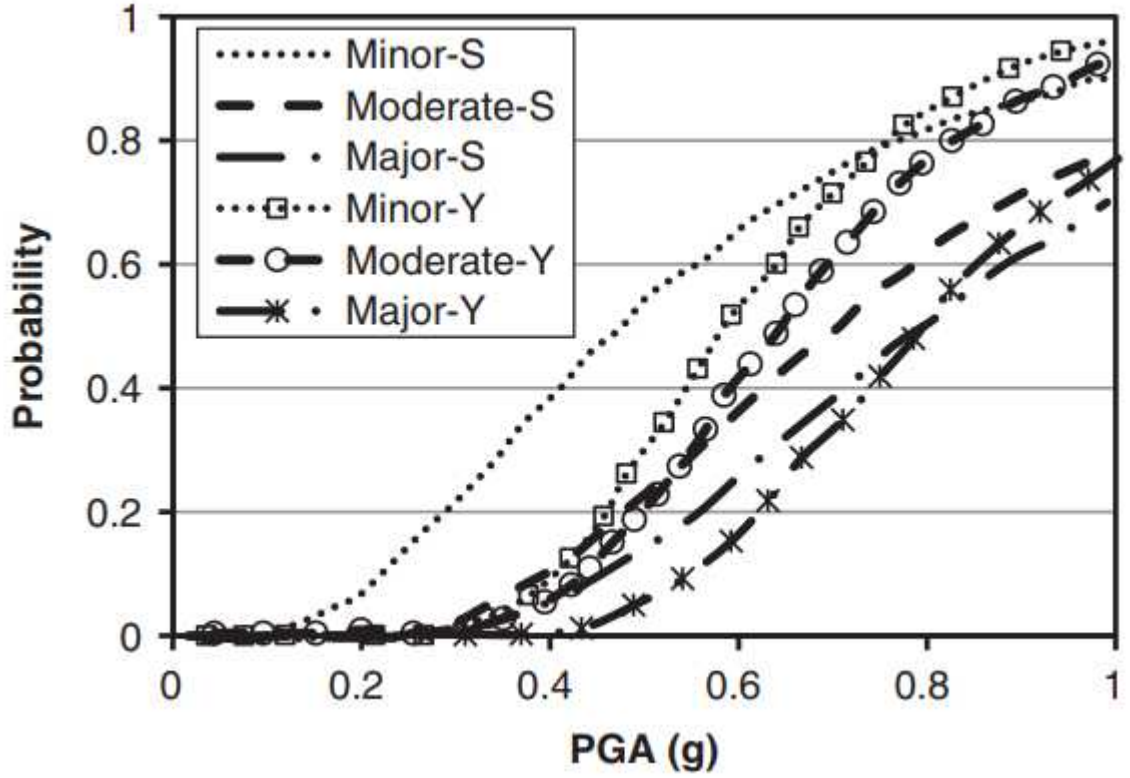
Probability (%) of being in a given damage states as a function of PGA for a given building type					
Damage State	**PGA 0-0.2g**	**PGA 0.2-0.4g**	**PGA 0.4-0.6g**	**PGA 0.6-0.8g**	**PGA 0.8-1.0g**
None	90	80	60	25	20
Slight	10	15	20	40	30
Moderate	0	5	15	20	30
Extensive	0	0	5	10	15
Complete	0	0	0	5	5



<그림 1.60> 목구조 건축물의 지진취약도 함수 (Sarabandi et al. 2004)

Expert-based method와 empirical method를 비교하면, expert-based method는 건축물의 손상확률 matrix를 구성하는 데이터를 전문가로부터 얻는 반면, empirical method는 실제 지진데이터로부터 건축물의 손상확률 matrix를 구성하는데 차이점이 있다. 즉, empirical method는 실제 데이터를 이용하기 때문에, 건축물의 실제 지진취약도를 expert-based method보다 정밀하게 추정할 수 있는 장점이 있다. 하지만, empirical method는 실제 조사된 지진데이터를 이용하므로, 지진조사팀들 간의 조사결과의 차이, 건축물 DS정의의 불일치는 개발된 지진취약도함수의 불확실성을 증폭시키는 요인이 될 수 있다.

Yamazaki et al. (2000)과 Shinozuka et al. (2001)이 Kobe 지진의 손상데이터를 이용하여 얻어진 다리구조물의 지진취약도함수를 도출하였다. 두 연구에서 Hanshin고속도로에 대한 같은 지진으로부터 얻어진 손상데이터를 사용하였지만, <그림 1.61>에 표현된 바와 같이 두 연구에서 얻은 지진취약도함수사이엔 큰 사이가 있는 것을 알 수 있다.



<그림 1.61> Shinozuka et al. (2001) [S]와 Yamazaki et al. (2000) [Y]연구의 empirical fragility curve 비교

<표 1.51>은 두 연구에서 지진취약도함수를 정의하기 위한 로그정규분포의 중앙값과 표준편차를 정리한 것이다. 두 지진취약도곡선의 차이는 고려한 손상된 교량의 수, 구조물의 구성요소, DS의 정의에 기인한다. 이러한 오차는 empirical method의 불확실성을 높이는 요인이 되어, empirical method의 한계적으로 작용한다.

<표 1.51> Empirical fragility curve parameter의 비교

Damage State	Median		Standard Deviation	
	Yamizaki et al. (2000)	Shinozuka et al. (2001)	Yamizaki et al. (2000)	Shinozuka et al. (2001)
Minor	0.59	0.47	0.53	0.59
Moderate	0.66	0.69	0.52	0.45
Major	0.81	0.80	0.51	0.43

라. Analytical Method

지진에 대한 건축물의 실제 손상데이터나 지진동에 대한 데이터가 없을 때, 지진취약도 함수는 analytical method를 이용하여 도출할 수 있다. 모든 건축물이나 구조물은 각각의 지진취약도를 가지는데, 기본적인 도출방법은 식 (1.60)을 이용하여 얻어진다. 건축물을 구성하는 구조재, 비구조재 그 외 기계장비와 같은 contents에 대한 손상확률(p_f)을 나타내는 지진취약도는 건축물 또는 건축물 구성요소의 capacity(C)와 지진의 강도와 관련된 건축물의 demand(D)로 아래의 식 (1.61)과 같이 표현할 수 있다.

$$p_f = P[D \geq C] \tag{1.61}$$

여기서 지진의 강도와 관련된 건축물의 demand는 층간변위비와 같은 지진의 강도에 대한 지진반응계수(EDP_{IM})이며, 좀 더 일반적으로 아래의 식 (1.62)과 같이 나타낸다.

$$p_f = P[EDP_{IM} \geq C] \tag{1.62}$$

지진의 강도를 나타내는 D는 지진의 재현주기, 지반조건, 지진동의 크기 등에 의해 어떠한 확률분포를 이루며, 건축물 구성요소의 성능을 나타내는 C는 사용재료, 시공의 질, 사용년수 등에 의해 어떠한 확률분포를 이룬다. 만인 어떤 특정한 지진의 강도에 대한 확률분포를 d, 특정한 건축물의 성능을 c라고 한다면, 지진에 의해 발생되는 전체사건에 대한 집합 U는 아래의 식 (1.63)과 같이 정의된다.

$$U = \{(d, c) \mid d \in D, c \in C\} \tag{1.63}$$

지진에 의해 건축물이 손상을 받는 경우는 다음의 2가지 경우로 생각할 수 있다.

- Excessively high demand case, EHD: 지진에 의한 demand가 건축물 capacity의 대푯값보다 큰 경우
- Excessively low capacity case, ELC: 건축물의 capacity가 지진에 의한 demand의 대푯값보다 작은 경우

EHD, ELC경우에 대한 사건에 대한 집합은 전체사건에 대한 집합 U의 부분집합이며, 아래의 식 (1.64), 식 (1.65)와 같이 정의된다.

$$EHD = \{(d, c) \mid d \in D, c \in C \text{ and } d > m_C\} \tag{1.64}$$

$$ELC = \{(d, c) \mid d \in D, c \in C \text{ and } c < m_D\} \tag{1.65}$$

여기서, m_C: 건축물 구성요소의 성능에 대한 중앙값(median)

m_D: 지진의 강도에 대한 중앙값

사건 EHD, ELC에 대한 확률을 각각 p_{EHD}, p_{ELC}라 하면 아래의 식과 같이 정의할 수 있다.

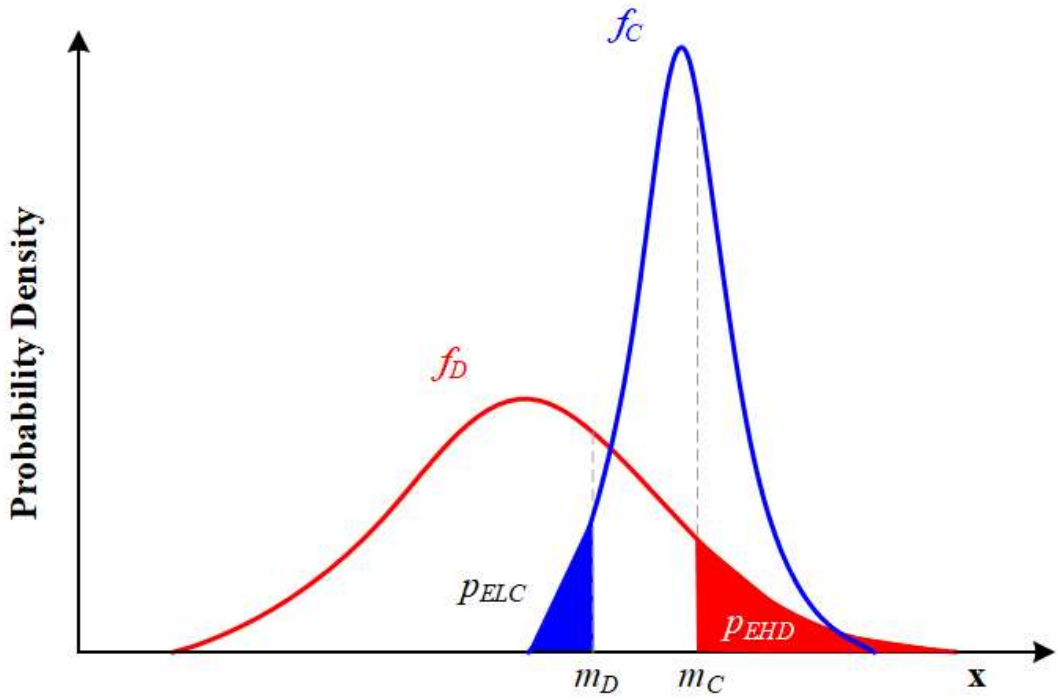
$$p_{EHD} = P[EHD] = 1 - F_D(m_C) \tag{1.66}$$

$$p_{ELC} = P[ELC] = F_C(m_D) \tag{1.67}$$

여기서, $P[X]$: 사건 X에 대한 확률

$F_X(x)$: 집합 X에 대한 누적분포함수

식 (1.66)와 식 (1.67)에 대한 내용을 그림으로 표현하면 <그림 1.62>와 같다. 그림에서 p_{EHD}는 집합 D에 대한 확률밀도함수가 m_C보다 큰 부분을 의미하며, p_{ELC}는 집합 C에 대한 확률밀도 함수가 m_D보다 작은 부분을 의미한다.



<그림 1.62> 사건 EHD, ELC에 대한 수학적 확률 개념도

즉, 지진취약도를 나타내는 손상확률 p_f는 p_{EHD}와 p_{ELC}의 합으로 아래의 식 (1.68)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = p_{EHD} + p_{ELC} \tag{1.68}$$

하지만, 두 개의 분포 f_C와 f_D 각각을 고려하여 손상확률 p_f을 계산하는 것보다, 건축물의 성능에 대해 표준화된 지진강도에 대한 건축물의 demand (D/C)의 확률밀도함수를 이용하여 직접적으로 지진취약도함수를 도출하는 방법이 좀 더 편리하다. 이를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$p_f = P[D \geq C] = P\left[\ln\left(\frac{D}{C}\right) \geq 0\right] = \Phi\left[\frac{\ln(D/C)}{\beta_t}\right] \tag{1.69}$$

여기서, $\Phi[\cdots]$: 로규정규분포의 누적분포

β_t: 총 분산

식 (1.62)를 참고하여 식 (1.69)를 자세히 정리하면 아래의 식 (1.70)과 같다.

$$p_f = \Phi\left[\frac{\ln(EDP_{IM}/C)}{\sqrt{\beta^{2}_{EDP/IM} + \beta^{2}_{C}}}\right] \tag{1.70}$$

여기서, $\beta_{EDP/IM}$: 지진에 대한 건축물의 응답에 대한 분산

β_C: 건축물 성능에 대한 분산

식 (1.70)에서 $\beta_{EDP/IM}$는 지진에 대한 건축물의 응답(지진응답계수)의 불확실성, β_C는 건축물 성능에 대한 불확실성을 나타낸다. 두 불확실성이 독립적이라고 가정한다면, 건축물 손상에 대한 총 불확실성 β_t는 식 (1.70)의 분포와 같이 나타낼 수 있다. 기존 지진취약도함수를 살펴보면, 총 불확실성을 구성하는 $\beta_{EDP/IM}$와 β_C는 고려하는 요소에 따라 차이가 있다. 예를 들어, FEMA P695에서는 건축물 손상상태가 붕괴일 경우, 총 불확실성에 대해 아래의 식 (1.71)과 같이 정의한다.

$$\beta_t = \sqrt{\beta^2_{RTR} + \beta^2_{DR} + \beta^2_{TD} + \beta^2_{MDL}} \tag{1.71}$$

여기서, β_{RTR}: record-to-record collapse uncertainty (0.20-0.40)

β_{DR}: design requirements-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

β_{TD}: test data-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

β_{MDL}: modeling-related collapse uncertainty (0.10-0.50)

FEMA P695에서 제시하는 건축물 붕괴에 대한 총 불확실성을 (1.65)의 $\beta_{EDP/IM}$와 β_C로 구분할 수 있다. 지진에 대한 건축물의 응답에 대한 불확실성 $\beta_{EDP/IM}$은 지진데이터의 불확실성인 β_{RTR}, 모델링의 불확실성인 β_{MDL}을 포함하며, 건축물 성능에 대한 불확실성 β_C은 설계요구조건의 불확실성인 β_{DR}, 실험데이터의 불확실성인 β_{TD}을 포함한다. 건축물 구성요소의 손상확률을 나타내는 지진취약도는 이러한 불확실성에 의해 크게 좌우되므로, 지진의 특성, 건축물의 특성을 고려하여 전체 불확실성을 도출해야 한다.

식 (1.70)으로부터 건축물의 손상확률에 대한 지진취약도는 다음의 4가지 요소를 도출할 수 있다면 정의가 가능하다.

- 지진에 대한 건축물 응답(지진반응계수)의 중앙값 [=EDP_{IM}]
- 지진에 대한 건축물 응답(지진반응계수)의 불확실성(분산) [=$\beta_{EDP/IM}$]
- 건축물 성능에 대한 중앙값 [=C]
- 건축물 성능에 대한 불확실성(분산) [=β_C]

기존 문헌의 분석결과, analytical method를 이용한 지진취약도를 도출하는 방법은 다음의 총 4가지가 있다.

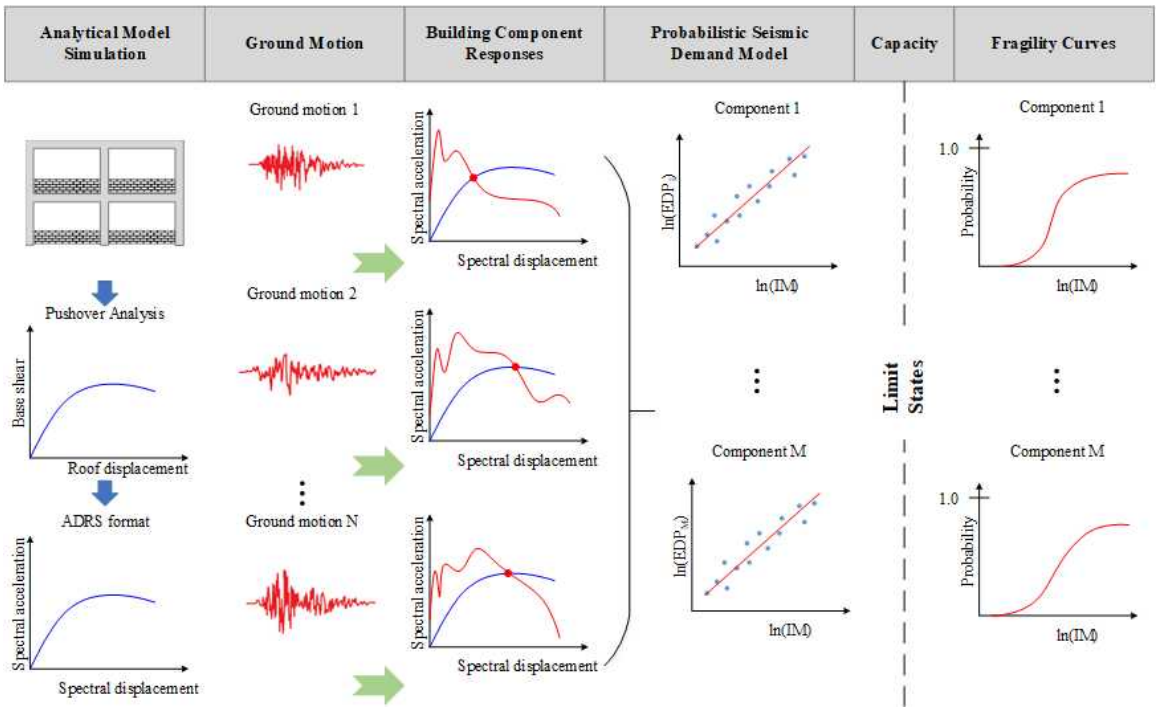
- Response Spectrum Analysis (Elastic)
- Nonlinear Static Analysis (or Capacity Spectrum Method)
- Nonlinear Time History Analysis
- Incremental Dynamic Analysis

각 방식의 차이는 지진취약도함수 정의에 필요한 식 (1.71)을 구성하는 4가지 요소를 어떻게 도출하는데 있다. 이후 내용에서는 성능기반설계 및 내진성능평가에 가장 빈번히 사용되는 비선형정적해석을 통한 지진취약도함수 도출과정을 알아보고자 한다.

(1) Nonlinear Static Analysis or Capacity Spectrum Method

Capacity Spectrum Method(CSM, 역량스펙트럼법)은 지진에 대한 건축물의 거동을 평가하는 단순화된 방법이다. 건축물의 성능(capacity)은 건축물의 비선형정적해석을 통해 평가된다. 반면, 건축물의 지진에 대한 요구성능(demand)은 각 지진파의 응답스펙트럼을 건축물의 비선형성을 고려한 축소된 응답스펙트럼으로부터 평가된다. 건축물의 성능곡선과 건축물의 지진에 대한 요구성능곡선의 교차점은 특성 지진파에 대한 건축물의 최대응답으로 추정하여 지진취약도함수를 도출할 수 있다. 이 방식은 시간이력해석보다 시간이 절약되는 장점이 있기 때문에, 과거 수만은 연구자들에 의해 CSM을 이용한 건축물의 지진취약도함수가 많이 개발이 되었다.

CSM을 이용해 건축물의 내진성능을 평가하는 방식은 ATC-40 (1996)과 FEMA 273 (1997)에 제시되어 있다. 두 보고서에서는 단순히 단일지진에 대한 건축물의 내진성능을 평가하기 위한 방법이 제시되어 있지만, ATC-40을 보완한 FEMA 440 (ATC-55 project, 2005)에서 보고하듯이, CSM은 궁극적으로 지진에 대한 건축물의 응답을 정밀하게 추정하여 지진취약도함수를 개발하는데 있다. CSM을 이용하여 건축물의 지진취약도를 평가하는 과정은 <그림 1.63>과 같다.



<그림 1.63> Analytical fragility curve using nonlinear static analysis

<그림 1.63>에 표현한 CSM방식을 이용한 건축물의 지진취약도를 평가하는 과정을 단계별로 자세히 설명하면 다음과 같다.

- ○ 비선형정적해석(pushover analysis)을 통한 역량스펙트럼(capacity spectrum) 산정
- ○ 지진파의 응답스펙트럼을 통한 요구스펙트럼(demand spectrum) 산정
- ○ 건축물의 비선형성을 반영한 요구스펙트럼의 축소
- ○ 축소된 요구스펙트럼과 역량스펙트럼의 교차점으로부터 건축물의 응답 도출
- ○ 여러 지진파에 대해 위의 과정 수행
- ○ 도출된 건축물의 응답으로부터 건축물응답의 확률적 평가 (probabilistic seismic demand model)
- ○ 각 한계상태에 대한 건축물의 응답으로부터 지진취약도 추정

먼저 역량스펙트럼은 건축물의 재료비선형과 $P-\Delta$와 같은 기하학비선형이 고려한 비선형모델의 정적해석을 통해 얻을 수 있다. 비선형정적해석으로 얻어진 건축물의 pushover 곡선은 <그림 1.64>과 같이 가로축은 최상층변위, 세로축은 밑면전단력으로 나타낼 수 있다. <그림 1.64>과 같은 건축물 pushover 곡선을 역량스펙트럼으로 표현하기 위해선 가속도-변위형태의 스펙트럼 응답(acceleration-displacement response spectra, ADRS)형태로 변환해야 한다. ATC-40에서는 세로축의 스펙트럼가속도 S_a와 가로축의 스펙트럼변위 S_d를 각각 식 (1.72)와 식 (1.73)으로 제시한다.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \tag{1.72}$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1\phi_{roof,1}} \tag{1.73}$$

여기서, V: 밑면전단력

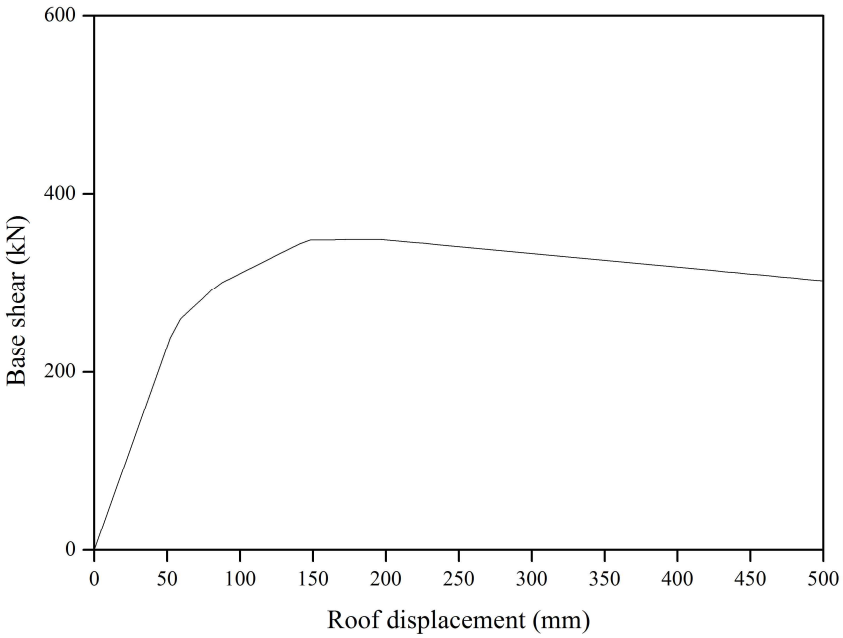
W: 건축물의 전체 무게

Δ_{roof}: 최상층 변위

$\phi_{roof,1}$: 1차 모드에 의한 최상층의 진폭

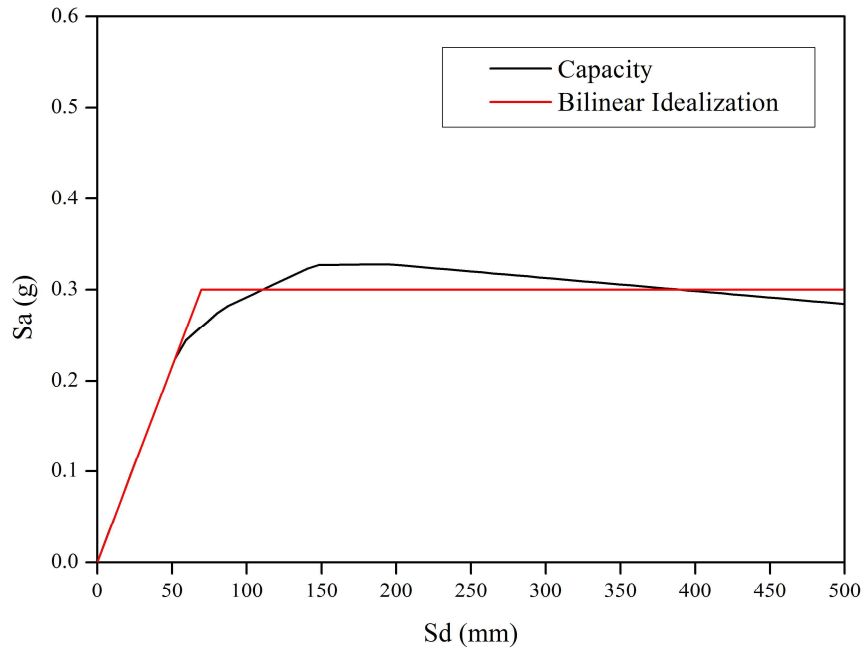
α_1: 1차 모드 유효질량계수

PF_1: 1차 모드 모드참여계수

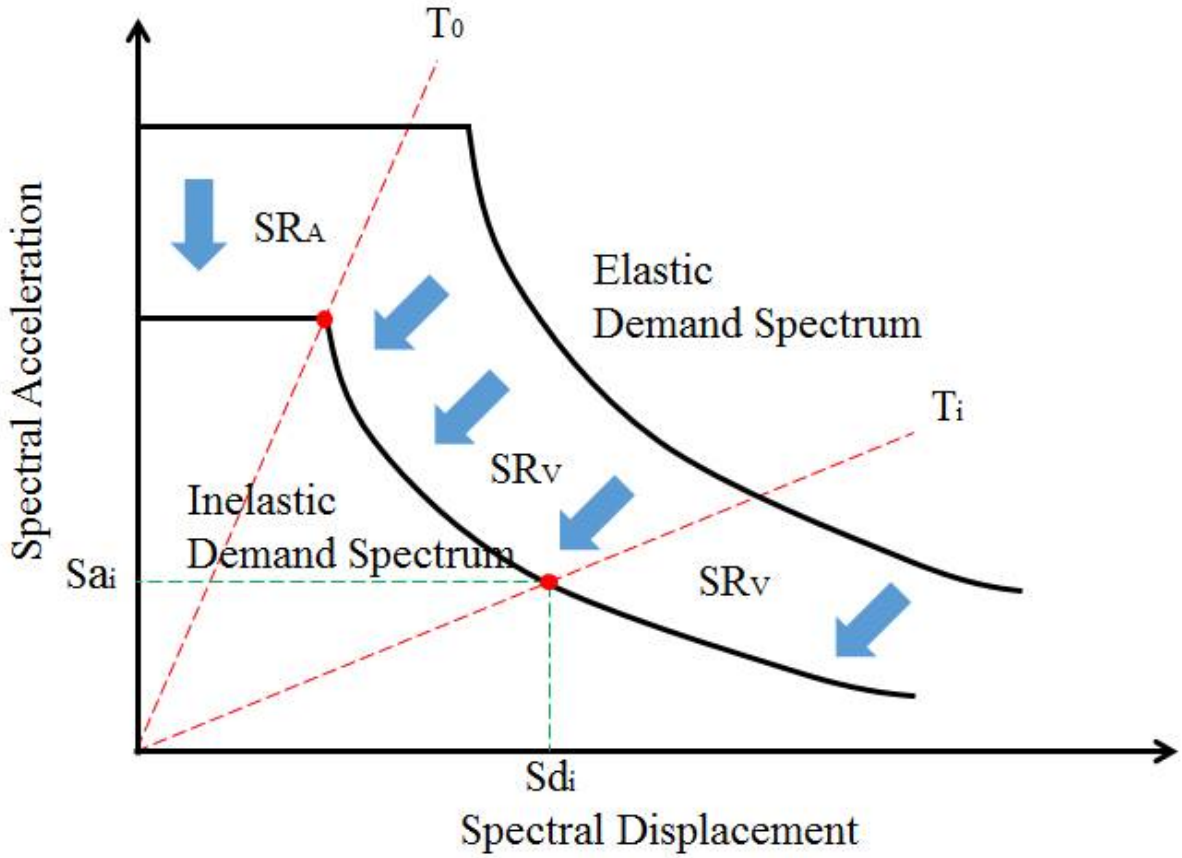


<그림 1.64> 비선형정적해석을 통한 건축물 pushover 곡선의 예

<그림 1.65>은 <그림 1.64>의 pushover 곡선을 식 (1.72)와 식 (1.73)으로 이용하여 건축물의 역량스펙트럼을 나타낸 것이다. <그림 1.65>은 건축물을 단자유도계로 치환하여 건축물의 성능을 스펙트럼가속도와 스펙트럼변위로 나타낸 것이기 때문에, 건축물의 지진에 대한 응답인 요구곡선 또한 단자유도계로 표현되어야 두 곡선의 직접적인 비교가 가능하다. 지진파에 대한 건축물의 응답은 응답스펙트럼을 통해 얻어진 elastic demand spectrum에서 건축물의 비선형을 고려한 inelastic demand spectrum으로 <그림 1.66>와 같이 얻을 수 있다.



<그림 1.65> 비선형정적해석을 통한 건축물 역량스펙트럼의 예



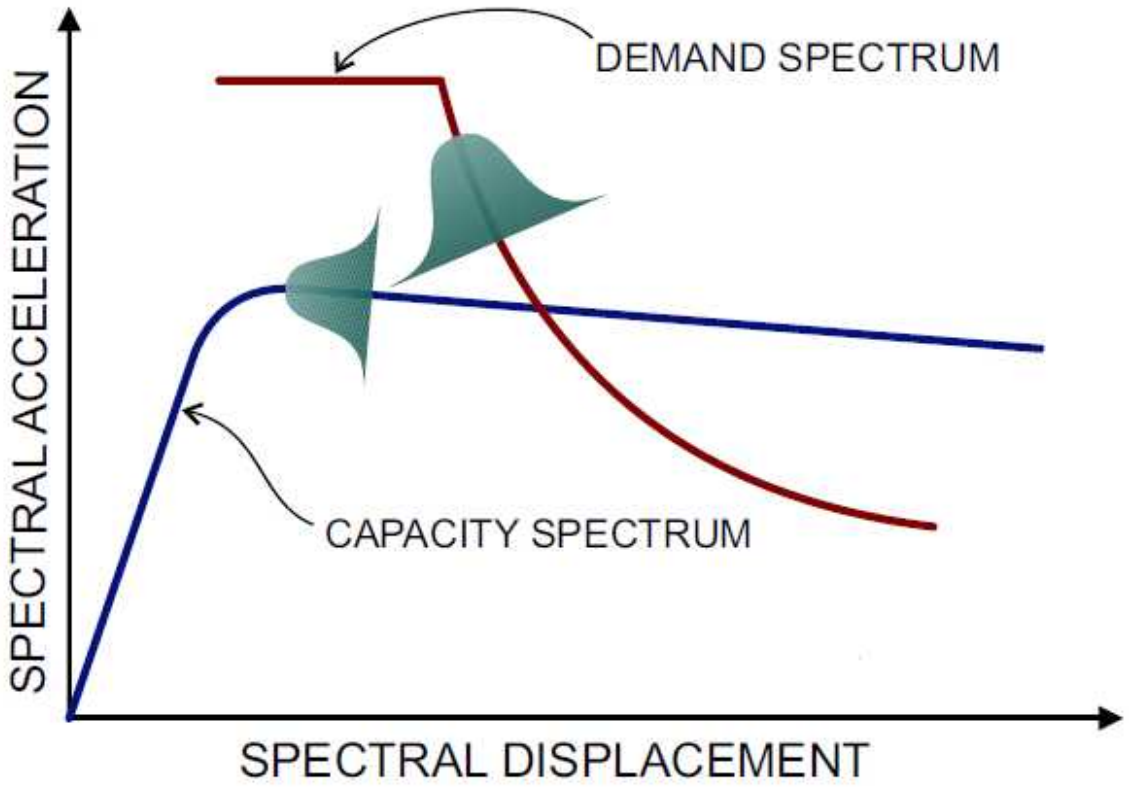
<그림 1.66> 지진에 대한 건축물 응답스펙트럼의 예

단자유도계에 대한 지진파의 응답스펙트럼은 고유주기와 스펙트럼가속도의 형태로 표현되며, 응답스펙트럼을 ADRS형태의 demand spectrum로 치환하기 위해 식 (1.74)을 사용한다.

$$S_d = S_a g\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \tag{1.74}$$

또한 ATC-40에 따르면, 선형 요구스펙트럼에 스펙트럼가속도 감소계수 SR_A와 스펙트럼속도 감소계수 SR_V를 곱하여 축소된 비선형 요구스펙트럼을 구할 수 있다. <그림 1.67>은 역량스펙트럼과 요구스펙트럼을 확률적으로 표현한 것이다. 어떠한 지진파에 대한 건축물의 응답인 요구스펙트럼과 건축물의 성능에 대한 역량스펙트럼은 각각 확률적분포를 가지기 때문에, 각 분포에 불확실성이 건축물 손상에 대한 불확실성에 영향을 미친다. 여기서 두 곡선의 교점은 비선형성의 고려가 같다고 가정된 동일한 단자유도계의 지진의 강도에 대한 건축물의 평균지진응답을 나타낸다. 건축물을 구성하는 구조재나 비구조재와 같은 구성요소의 지진취약도를 평가하기 위해선, 각 구성요소에 대한 probabilistic seismic demand model을 통해 평가할 수 있다.

Probabilistic seismic demand model은 지진강도에 대한 건축물 구성요소의 지진응답을 확률적으로 추정하는 모델이다. 예를 들어, 건축물 전체의 지진취약도함수를 도출할 경우, 지진응답계수 *EDP*는 일반적으로 층간변위비(interstory drift ratio, IDR)를 사용한다. IDR을 사용할 경우, 건축물의 역량스펙트럼과 각 지진파에 대한 요구스펙트럼의 교점에서 층간변위비를 도출한다. 도출된 층간변위비는 각 지진파의 *PGA*나 S_a와 같은 지진강도에 따라, <그림 1.63>의 probabilistic seismic demand model에서 표현된 바와 같이 지진강도에 대한 지진응답계수의 분포($EDP|IM$)를 추정할 수 있다. 또한 추정된 $EDP|IM$와 해석결과로 얻어진 *EDP*의 차이로부터, 지진에 대한 건축물 응답의 불확실성 $\beta_{EDP/IM}$을 수학적으로 도출할 수 있다. 즉, Probabilistic seismic demand model은 식 (1.70)으로 표현된 지진취약도함수 정의에 필요한 $EDP|IM$과 $\beta_{EDP/IM}$을 도출할 수 있는 모델이다. 지진취약도함수 정의에 필요한 건축물의 limit state와 관련된 성능 중앙값 C와 불확실성 β_C는 미리 정의된 건축물의 한계상태에 따르며, FEMA 356, FEMA P695와 같은 보고서에 건축물의 구조형식에 따라 정의된 값을 사용한다.



<그림 1.67> Probabilistic representation of capacity and demand spectrum (Mander and Basoz, 1999)

2. 프로토타입모델 구조재에 대한 지진취약도 평가

본 연구에서 설정한 주요시설물의 프로토타입모델 중 하나인 학교시설물에 대한 지진취약도 평가를 수행하였다. 학교시설물 프로토타입모델은 <그림 1.22>와 <그림 1.23>와 같으며, 구조재에 대한 지진취약도 평가는 IDA(Incremental Dynamic Analysis)를 사용하였다.

가. Earthquake Record

현재 내진설계기준인 KBC 2016에서는 원단층 지반운동(far-filed ground motion)을 기반으로 내진설계를 진행하기 때문에, 프로토타입모델의 지진응답을 평가하기 위해 FEMA P695에서 제시하는 원단층 지반운동 데이터 22쌍(총 44개)을 사용하였다. FEMA P695에서 제시하는 원단층 지반운동의 정의는 지앙까지 거리가 10km이상인 지반운동을 말한다.

<표 1.52> 해석에 사용된 원단층 지반운동

ID No.	Earthquake			Magnitude	PGA(g)	
	Name	Station	Year		Component 1	Component 2
1	Northridge	6.7	1994	Beverly Hills - Mulhol	0.271	0.336
2	Northridge	6.7	1994	Canyon Contry - WLC	0.341	0.401
3	Duzce, Turkey	7.1	1999	Bolu	0.458	0.517
4	Hector Mine	7.1	1999	Hector	0.290	0.368
5	Imperial Valley	6.5	1979	Delta	0.312	0.461
6	Imperial Valley	6.5	1979	El Centro Arrary #11	0.369	0.385
7	Kobe, Japan	6.9	1995	Nishi-Akashi	0.527	0.420
8	Kobe, Japan	6.9	1995	Shin-Osaka	0.267	0.233
9	Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Duzce	0.215	0.246
10	Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Arcelik	0.298	0.204
11	Landers	7.3	1992	Yermo Fire Station	0.242	0.150
12	Landers	7.3	1992	Coolwater	0.325	0.479
13	Loma Prieta	6.9	1989	Capitola	0.575	0.483
14	Loma Prieta	6.9	1989	Gilroy Arrary #3	0.489	0.323
15	Manjil, Iran	7.4	1990	Abbar	0.405	0.391
16	Superstition Hills	6.5	1987	El Centro Imp. Co.	0.311	0.225
17	Superstition Hills	6.5	1987	Poe Road (temp)	0.524	0.353
18	Cape Mendocino	7.0	1992	Rio Dell Overpass	0.316	0.450
19	Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	CHY101	0.145	0.181
20	Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	TCU045	0.455	0.491
21	San Fernando	6.6	1971	LA - Hollywood Stor	0.440	0.365
22	Friuli, Italy	6.5	1976	Telmezzo	0.506	0.453

<표 1.52>은 해석에 사용된 원단층 지반운동에 대해 정리한 것이다. 원단층 지반운동의 규모는 6.5~7.6이며, 최대지반가속도 PGA의 최솟값은 0.145g, 최댓값은 0.575g, 평균값은 0.366g이다. 해당 원당층 지반운동은 최대지반속도에 대해 아래의 식 (1.75)을 이용하여 normalization을 진행한 지진파데이터이다.

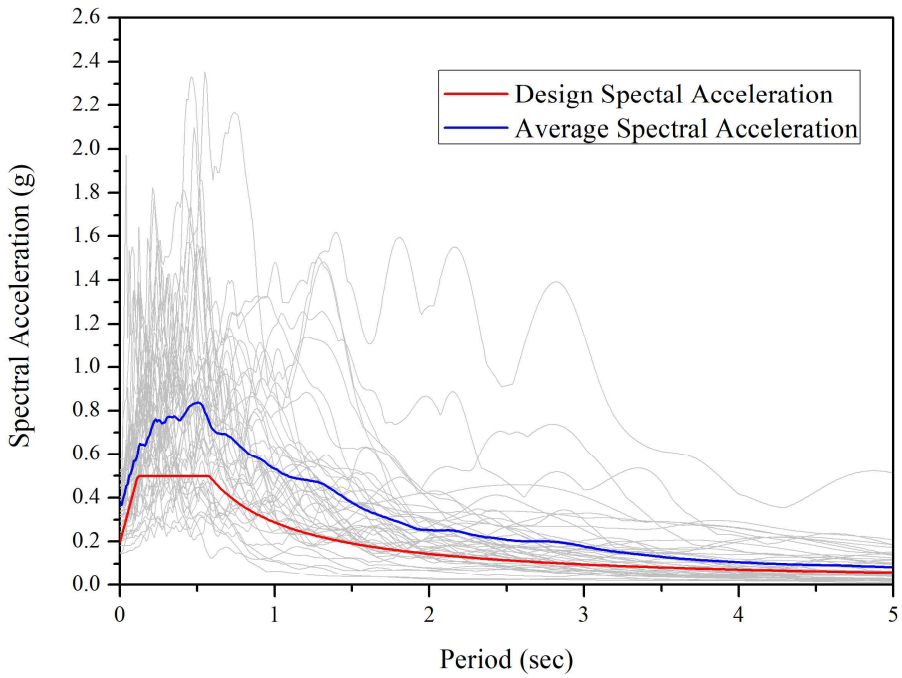
$$NM_i = Median(PGV_i)/PGV_i \tag{1.75}$$

여기서, NM_i: i번째 지진데이터에 대한 normalization factor

$Median(PGV_i)$: 지진데이터 set의 최대지반속도에 대한 중앙값

PGV_i: i번째 지진데이터에 대한 최대지반속도

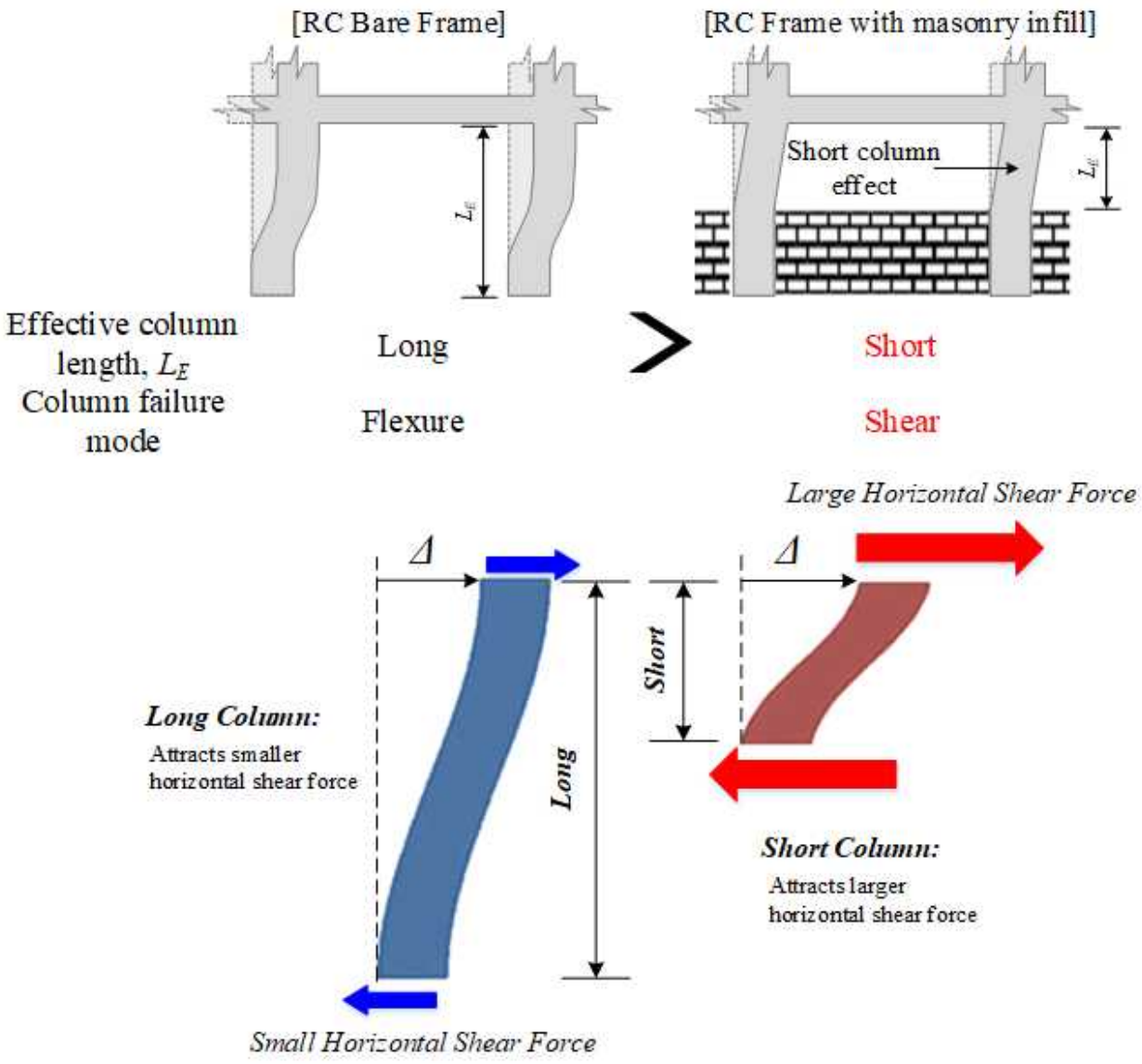
<그림 1.68>은 44개의 지진파에 대한 응답스펙트럼과 설계스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 해당그림에서 붉은색 실선은 설계스펙트럼을 나타내며, 파랑색실선은 지진파 응답스펙트럼의 평균값을 나타낸다. 프로토타입 모델의 설계스펙트럼은 KBC 2016을 기준으로 지진구역 Ⅰ, 지반조건 S_D에 대해 작성하였다. 설계스펙트럼의 단주기스펙트럼가속도 S_{ds}는 0.499g이며, 1초주기 스펙트럼가속도 S_{d1}는 0.288g이다. 설계스펙트럼과 지진파의 평균응답스펙트럼을 비교하면, 지진파의 평균응답스펙트럼이 전주기 영역에서 설계스펙트럼보다 큰 것을 알 수 있다.



<그림 1.68> 지진파의 응답스펙트럼과 설계스펙트럼의 비교

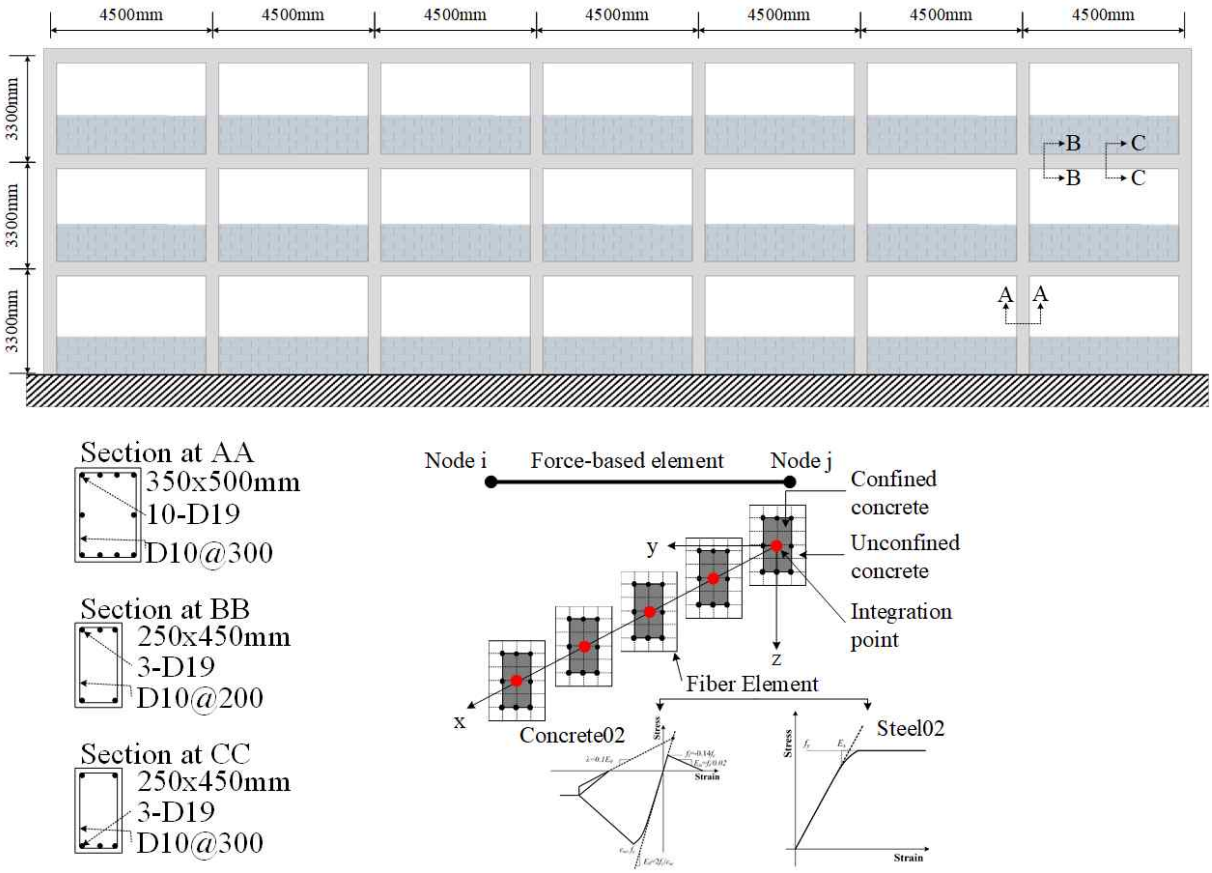
나. 학교시설물 프로토타입모델의 구조재 모델링

본 연구에서 의미하는 학교시설물 프로토타입모델의 구조재 모델링은 기둥과 보와 같은 구조재의 거동에 영향을 미치는 대상에 대한 해석모델링을 의미한다. 비구조재에 대한 해석모델링은 따로 진행하지 않았으며, 구조재 모델링을 통한 최대층가속도와 층간변위비를 통해 비구조재의 지진취약도를 평가하였다. 학교시설물의 평면도와 입면도는 각각 <그림 1.22>와 <그림 1.23>와 같다. 학교시설물은 장변으로 긴 구조적 특징을 가지며, 장변방향 기둥사이의 조적허리벽으로 인해 단주효과가 발생할 가능성이 높다. 기둥의 단주효과는 기둥의 유효길이를 줄여 <그림 1.69>에 표현된 바와 같이 기둥의 파괴모드를 휨파괴가 아닌, 전단 또는 전단-휨파괴모드로 발생할 가능성이 높다. 즉, 학교시설물은 장변방향이 지지에 대해 취약할 가능성이 높으므로, 본 연구에서는 기둥의 장변방향에 대한 2D해석을 수행하여 지진취약도를 평가하였다.



<그림 1.69> 기둥사이의 조적허리벽에 의한 기둥의 단주효과

학교시설물에 대한 비선형해석은 OpenSees를 이용하여 수행하였다. <그림 1.70>은 2D해석에 사용된 학교시설물의 입면도와 부재상세 및 모델링 방식에 대해 표현한 것이다. 3층 7경간 RC모멘트골조를 학교시설물의 해석에 사용하였고, 기둥단면의 크기는 350x500mm, 보 단면의 크기는 250x400mm이다. 기둥과 보 부재는 fiber element로 모델링하였으며, 콘크리트의 경우 전단보강근안의 confined concrete와 전단보강근밖의 unconfined concrete로 구분하였다. 콘크리트의 재료모델은 OpenSees에서 제공하는 Concrete02를 사용하였고, 철근의 재료모델은 Steel02를 사용하여, 재료비선형성을 고려하였다. 해당 학교시설물의 1차 고유주기는 0.278초이다.



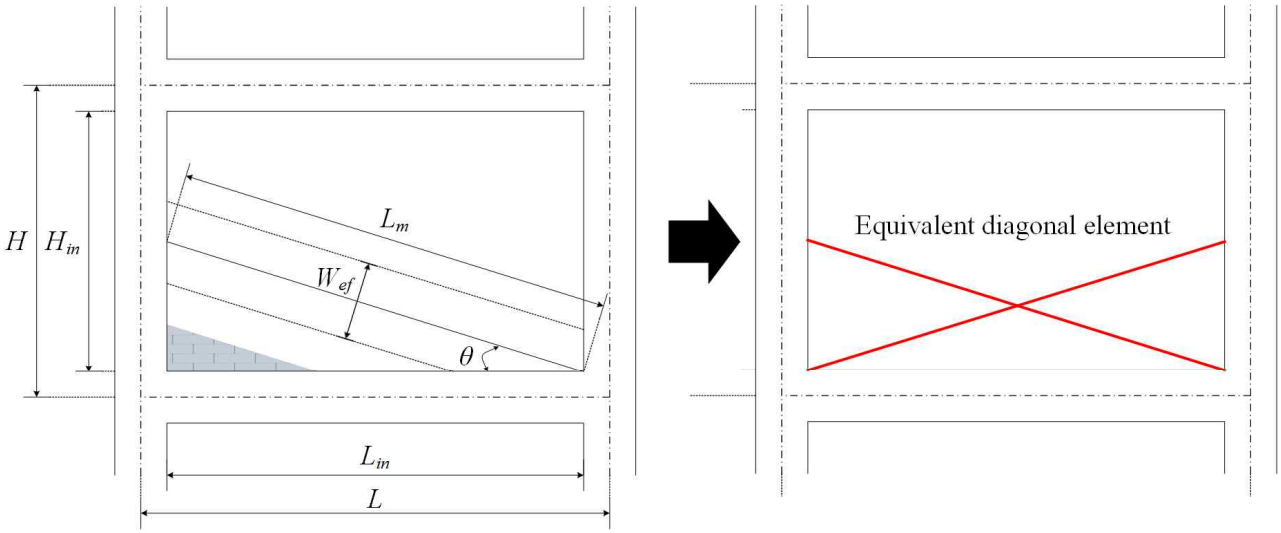
<그림 1.70> 해석대상 학교시설물의 입면도와 부재상세 및 모델링 방법

학교시설물의 큰 구조적 특징은 비구조재로 분류되는 기둥사이의 조적허리벽이 구조재인 기둥의 거동에 영향을 미친다는 점이다. <표 1.53>은 조적채움벽 또는 조적허리벽이 건축물의 구조적 거동에 영향을 미친다고 보고하는 기존 연구에 대해 정리한 것이다. 따라서 조적허리벽이 비구조재로 분류된다 할지라도 구조재인 기둥의 거동에 영향을 미치므로, 조적허리벽에 대한 모델링을 해석모델에 추가하여 비선형해석을 수행하였다. 기존 연구들에 따르면 조적허리벽의 거동을 FEMA 356에서 제시하는 등가대각압축가새(equivalent diagonal struct)가 실제 거동과 가장 가깝게 모사한다고 보고하고 있다.

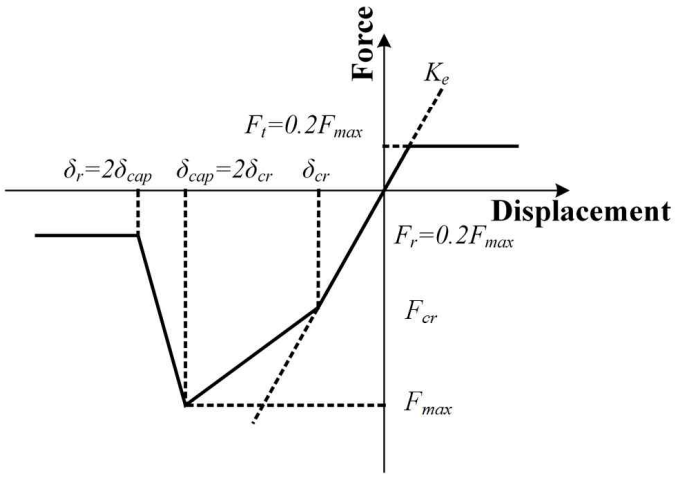
<표 1.53> 조적채움벽 및 조적허리벽이 건축물의 거동에 미치는 영향에 대한 기존 연구 정리

선행연구	연구내용	연구의 특화성
Conceptual Investigation of Short-Columns and Masonry Infill Frames Effect in the Earthquake (2009, Vahidi and Malekabdi)	• 실제사례를 중심으로 조적채움벽이 건축물 기둥에 미치는 영향 분석 • 건축물 기둥에 단주효과가 발생하는 원인에 대한 분석 수행	• 단주효과를 방지하기 위해선 조적채움벽과 기둥과의 접합을 약하게 하는 것이 효과적 • 건축물에 내진설계기준에서 조적채움벽과 기둥과의 접합상세의 제시가 필요함
The Influence of Masonry infill on the Seismic Behavior of RC frame Buildings(2012,Fioreetal.)	• 기존 문헌에서 제시하는 조적채움벽의 강도, 강성, 변형능력에 대한 조사 • FEM모델링을 통한 조적채움벽의 모델링 제안	• 조적채움벽의 형상비에 따른 모델링 기법의 제안 • FEMA 356에서 제시하는 등가압축스트럿 모델이 조적채움벽의 거동을 가장 가깝게 모사함
The Sensitivity of Seismic Response Parameters to the Uncertain Modeling Variables of Masonry-Infilled Reinforce Concrete Frame (2012, Celarec et al.)	• 비선형해석을 통한 조적채움벽의 parameter가 RC모멘트프레임의 지진거동에 미치는 영향 분석 • 조적채움벽의 거동을 모사하기 위해 quadrilinear model을 제안하고, 조적채움벽의 강성, 강도, 변형능력을 변수로 설정하여 RC모멘트골조의 내진성능평가를 수행함	• 조적채움벽의 균열강도, 전단강도는 RC모멘트골조의 초기강성과 최대밑면전단력에 큰 영향을 미치는 것으로 분석됨 • 조적채움벽이 있는 RC모멘트골조의 지진거동은 조적채움벽의 모델링에 큰 영향을 받으므로, 신뢰도 있는 조적채움벽 모델링 기법의 필요성 언급
등가 스트럿 모델을 이용한 조적조채움벽 골조의 내진성능평가 (2012, 박지훈 외 2인)	• 내진설계 미적용 학교건물의 표준모델 제시 • 비선형정적해석을 통한 개구부가 없는 채움벽 골조의 내진성능평가 수행	• 채움벽의 강도에 따른 학교건축물의 지진거동 비교 • 현장에서 채위한 시료의 재료시험을 통한 채움벽의 강도 확인 필요성 언급
비보강조적끼움벽체를 가지는 철근콘크리트 골조 구조물 내진성능평가 (2012, 조원선 외 5인)	• FEMA 356에서 제안하는 조적채움벽의 모델링 방법을 이용하여 학교건축물의 내진성능평가 수행 • 보-기둥 강성비, 기둥의 전단강도가 대상건축물의 지진거동에 미치는 영향 분석 • ½ scale 실험체의 실험결과와 해석결과와의 비교 수행	• 학교건축물의 초기강성과 항복강도는 보-기둥 강성비에 비례하는 것으로 파악됨. • 제안하는 해석모델의 소성힌지 발생분포와 실험결과와 비교를 통한 해석모델의 검증 • 조적채움벽을 고려할 경우, 학교건축물의 내력은 증가하나, 연성도가 감소하여 급격한 파괴가 발생할 가능성이 큼
비내력을 가진 RC모멘트저항골조의 지진거동 평가 (2010, 고현 외 3인)	• 등가대각압축스트럿 모델을 이용한 조적채움벽을 고려한 건축물의 지진거동 해석 수행 • 조적채움벽의 설치위치가 건축물의 지진거동에 미치는 영향 분석	• 조적채움벽을고려시, 건축물의 강성이 높아져 주기는 짧아져, 고려한 설계지진하중보다 높은 하중을 받음 • 조적채움벽에 의한 연약층이 발생할 경우, 저층의 기둥과 보에 소성변형이 집중되는 현상 발생

본 연구에서는 기존 연구를 참고하여 학교시설물 기둥사이에 설치되는 조적허리벽을 등가대각압축가새로 <그림 1.71>과 같이 모델링하였다. 등가대각압축가새에 대한 analytical modeling을 결정하는 parameter는 등가압축가새의 유효폭(W_{ef}), 등가압축가새의 유효강성(K_e), 등가압축가새의 최대하중($F_{\max}$)가 있다. 조적허리벽의 등가대각압축가새는 1.0B쌓기를 기준으로 하여, 각 parameter를 식 (1.76)부터 식 (1.78)까지를 이용하여 계산하였다. 또한 등가압축가새의 균열하중(F_{cr})은 $0.55F_{\max}$, 인장강도(F_t)와 residual 강도(F_r)은 $0.2F_{\max}$로 가정하였고, 최대강도시 변위(δ_{cap})는 $2\delta_{cr}$(균열변위), residual 강도시 변위(δ_r)는 $2\delta_{cap}$으로 가정하였다.



Analytical model of masonry infill



<그림 1.71> 연구에서 사용된 조적허리벽의 등가대각압축가새

$$W_{ef} = 0.175(\lambda_h H)^{-0.4}\sqrt{H^2+L^2} \tag{1.76}$$

$$K_e = \frac{E_w W_{ef} t_w}{\sqrt{H^2+L^2}} cos^2\theta \tag{1.77}$$

$$F_{\max} = 0.818 \frac{L_{\in} t_w f_{tp}}{C_I} \left(1 + \sqrt{C_I^2 + 1}\right) \quad (1.78)$$

여기서, $\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_w t_w \sin(2\theta)}{4 E_c I_c H_{in}}}$

$C_I = 1.925 \frac{L_{in}}{H_{in}}$

E_w: 조적허리벽의 탄성계수

E_c: 콘크리트의 탄성계수

t_w: 조적허리벽의 두께

I_c: 기둥의 단면2차 모멘트

H: 층높이

L: 경간길이

H_{in}: 조적허리벽의 순높이

L_{in}: 조적허리벽의 순길이

f_{tp}: 조적허리벽의 균열강도

θ: 대각선기울기

다. 구조재의 한계상태 정의

구조재에 대한 지진취약도를 정의하기 위해선 구조재의 성능에 대한 중앙값과 불확실성이 결정되어야 한다. 보통 구조재 성능에 대한 중앙값(구조재의 한계상태에 따른 손상수준)은 층간변위비에 대해 정의된다. 본 연구에서 사용한 학교시설물의 한계상태는 <표 1.54>과 같이 한국시설안전공단의 “기존 시설물 내진성능 평가요령, 2011”에서 제시하는 조적채움벽이 있는 RC모멘트골조에 대한 성능수준별 허용 층간변위비를 사용하였다. 한국시설안전공단에서 정의하는 성능수준(한계상태)은 IO(immediately occupancy, 즉시거주), LS(life safety, 인명만전), CP(collapse prevention, 붕괴방지)이다. 본 연구에서 제시하는 학교시설물의 프로토타입모델은 내진설계가 되지 않은 경우를 사용하였고, 성능수준에 대한 불확실성은 FEMA P695를 참고하여 0.4로 결정하였다.

<표 1.54> 구조시스템 및 성능수준별 허용 층간변위비(한구시설안전공단, 2011)

구조시스템	내진설계가 된 경우			내진설계가 되지 않은 경우		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
조적채움벽이 있는 RC모멘트골조	0.7%	1.4%	2.4%	0.35%	0.7%	1.2%

라. 구조재의 지진취약도 평가

구조재에 대한 지진취약도 평가는 지진파 44개에 대한 비선형시간이력해석으로 얻어진 층간변위비를 이용해 수행하였다. 지진취약도 평가에 사용된 지진파의 PGA범위가 0.145~0.575g로 지진동의 세기가 광범위하므로, 지진파를 스케일링하지 않고 cloud method를 이용해 지진취약도 평가를 수행하였다. <표 1.55>은 구조재에 대한 비선형시간이력해석로 얻어진 최대층간변위비를 정리한 것이다.

<표 1.55> 비선형시간이력해석으로 얻어진 학교건축물의 PGA에 따른 최대층간변위비

순번	PGA (g)	1층 층간변위비	2층 층간변위비	3층 층간변위비	최대층간변위비
1	0.271	0.149%	0.186%	0.121%	0.186%
2	0.336	0.263%	0.289%	0.166%	0.289%
3	0.341	0.224%	0.253%	0.151%	0.253%
4	0.401	0.297%	0.309%	0.170%	0.309%
5	0.458	0.446%	0.472%	0.264%	0.472%
6	0.517	0.190%	0.221%	0.133%	0.221%
7	0.29	0.132%	0.167%	0.109%	0.167%
8	0.368	0.370%	0.411%	0.241%	0.411%
9	0.287	0.246%	0.285%	0.173%	0.285%
10	0.461	0.335%	0.374%	0.224%	0.374%
11	0.369	0.327%	0.382%	0.234%	0.382%
12	0.34	0.411%	0.459%	0.274%	0.459%
13	0.52	0.459%	0.466%	0.263%	0.466%
14	0.337	0.316%	0.346%	0.206%	0.346%
15	0.267	0.123%	0.148%	0.091%	0.148%
16	0.233	0.144%	0.174%	0.107%	0.174%
17	0.149	0.122%	0.150%	0.093%	0.150%
18	0.227	0.279%	0.308%	0.173%	0.308%
19	0.204	0.090%	0.126%	0.086%	0.126%
20	0.147	0.110%	0.150%	0.102%	0.150%
21	0.166	0.098%	0.122%	0.079%	0.122%
22	0.145	0.120%	0.158%	0.103%	0.158%
23	0.316	0.439%	0.492%	0.297%	0.492%
24	0.357	0.770%	0.631%	0.351%	0.770%
25	0.491	0.967%	0.804%	0.419%	0.967%
26	0.401	0.398%	0.398%	0.227%	0.398%
27	0.472	0.260%	0.292%	0.215%	0.292%
28	0.323	0.318%	0.358%	0.213%	0.358%
29	0.405	0.219%	0.285%	0.205%	0.285%
30	0.364	0.300%	0.310%	0.207%	0.310%
31	0.311	0.130%	0.164%	0.111%	0.164%
32	0.12	0.089%	0.115%	0.076%	0.115%
33	0.524	0.273%	0.296%	0.170%	0.296%
34	0.353	0.262%	0.313%	0.197%	0.313%
35	0.2	0.233%	0.261%	0.165%	0.261%
36	0.45	0.417%	0.434%	0.263%	0.434%
37	0.127	0.079%	0.106%	0.070%	0.106%
38	0.181	0.095%	0.120%	0.077%	0.120%
39	0.385	0.381%	0.414%	0.226%	0.414%
40	0.491	0.237%	0.256%	0.176%	0.256%
41	0.436	0.348%	0.382%	0.239%	0.382%
42	0.352	0.192%	0.253%	0.183%	0.253%
43	0.506	0.399%	0.435%	0.252%	0.435%
44	0.431	0.533%	0.538%	0.316%	0.538%

지진취약도를 평가하기 위한 seismic demand analysis는 지진에 대한 지진반응계수의 중앙값(EDP_{IM})을 식 (1.79)와 같은 least square fitting(최소제곱법)을 이용해 추정하였다. 또한 지진에 대한 건축물 응답의 불확실성($\beta_{EDP/IM}$)은 식 (1.80)을 이용해 평가하였다. Seismic demand analysis에 대한 결과는 <그림 1.72>와 같다. 해당그림에서 fitted curve는 지진파의 PGA에 따른 건축물의 최대층간변위비의 중앙값을 나타낸다. 또한 식 (1.80)을 이용해 얻어진 건축물 최대층간변위비의 불확실성은 0.345이다.

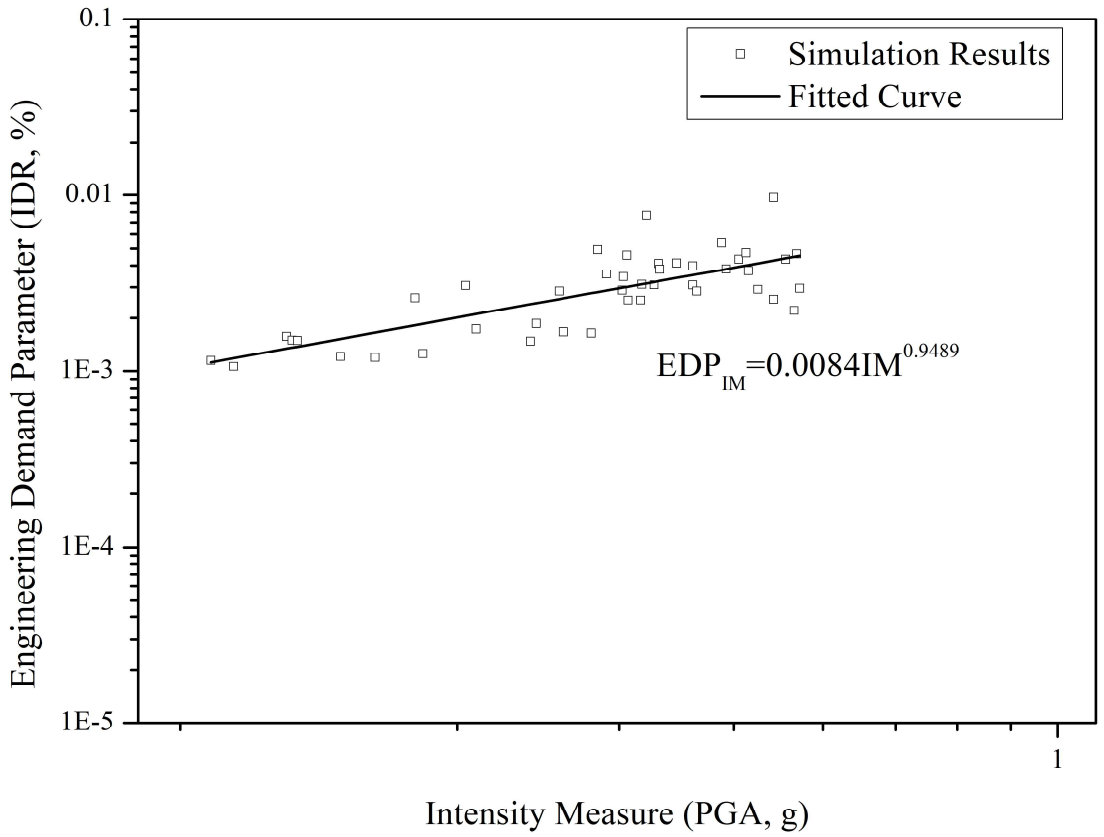
$$EDP_{IM} = A(IM)^B \tag{1.79}$$

$$\beta_{EDP|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\ln D_i - \ln EDP_{IM_i}\right]^2}{N-2}} \tag{1.80}$$

여기서, A와 B는 최소제곱법의 regression parameter

D_i는 i번째 지진파에 대한 건축물의 최대응답(e.g. 최대층간변위비)

EDP_{IM_i}: i번째 지진파 강도에 대한 건축물의 지진반응계수의 중앙값

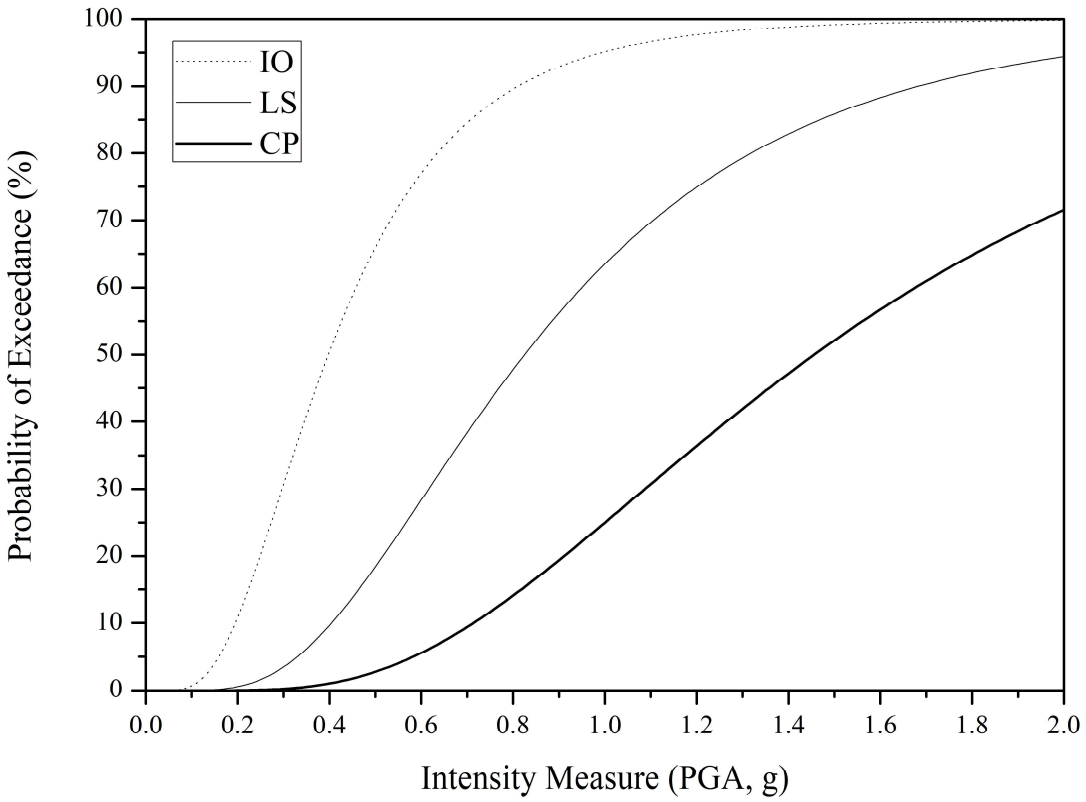


<그림 1.72> Seismic demand analysis result for structural elements of school building

지진취약도는 식 (1.70)을 이용해 평가하였으며, 건축물 성능수준에 대한 불확실성은 0.4를 사용하였으므로, 지진취약도평가에 사용된 총 불확실성은 0.528이다. 지진취약도를 도출하기 위한 각 한계상태에 따른 parameter를 <표 1.56>에 정리하였다. <표 1.52>으로부터 얻어진 학교건축물 구조재에 대한 지진취약도 함수를 그림으로 표현하면 <그림 1.60>과 같다.

<표 1.56> 학교시설물의 지진취약도를 도출하기 위한 한계상태별 parameters

Damage States	C	β_C	EDP_{IM}	$\beta_{EDP\|IM}$
IO	0.0035	0.4	$0.0084IM^{0.9489}$	0.345
LS	0.0070	0.4	$0.0084IM^{0.9489}$	0.345
CP	0.0120	0.4	$0.0084IM^{0.9489}$	0.345



<그림 1.73> Seismic fragility curve for school building

울산관측소에서 측정된 경주지진에 대한 PGA값이 0.434g로 해당 IM에서 IO이하로 손상이 발생할 확률은 44.38%, IO수준의 손상이 발생할 확률은 43.54%, LS수준의 손상이 발생할 확률은 10.66%, CP수준의 손상이 발생할 확률은 1.42%로 분석된다. 하지만, 이러한 손상확률로 학교시설물에 발생되는 손실을 평가하기 어려우므로, 정책입안자나 보험회사와 같은 사용자는 건축물의 손실이 cost로 표현되어야 의사결정을 지원하는데 도움을 줄 수 있다.

3. 프로토타입모델 비구조재에 대한 지진취약도 평가

가. 비구조재의 지진취약도 평가 원리

비구조재에 대한 해석적 지진취약도 평가 원리는 기본적으로 구조재와 동일하다. 다만 비구조재의 경우, 조적채움벽이나 조적허리벽과 같이 구조재의 거동에 큰 영향을 미치는 요소를 제외하고, 일반적으로 수학적 모델링에 반영되지 않는다. ASCE 41에서는 비구조재의 내진성능평가 시 가속도민감 비구조재와 변위민감 비구조재로 구분하여 내진성능평가를 수행한다. HAZUS 또한 건축물의 occupancy에 따라 변위민감 비구조재와 가속도민감 비구조재로 구분하여 비구조재에 대한 지진취약도함수를 제공하고 있다. FEMA P58은 변위민감 비구조재와 가속도민감 비구조재와 같이 비구조재를 직접적으로 두 가지 분류로 나누지 않지만, 비구조재에 대한 손상수준별 성능에 대한 중앙값과 불확실성에 대한 parameter를 제공하고 있다. 또한 FEMA P58은 학교시설물에 설치되는 비구조재에 대해 정의하고 있어 비구조재의 지진취약도를 평가하기 수월한 측면이 있다. 따라서 본 연구에서는 FEAM P58에서 제공하는 학교시설물에 대해 정의된 비구조재와 비구조재에 대한 손상수준별 중앙값과 불확실성을 사용하여 지진취약도평가를 수행하였다. 학교시설물에 설치되는 여러 비구조재 중, 본 연구에서 고려한 비구조재는 아래와 같다.

- 치장벽돌
- 옥상마감
- 내벽(파티션)
- 내벽(타일)
- 천장재

학교시설물을 구성하는 비구조재는 엘리베이터, 배관설비와 같은 기계 및 전기 비구조요소를 포함하지만, 본 연구에서는 치장벽돌 천장재와 같은 건축적 비구조재에 대해 지진취약도 평가를 수행하였다.

비구조애에 대한 해석적 지진취약도 평가과정은 구조재와 동일하지만, 비구조재가 설치되는 층에 대한 지진강도에 따른 지진반응계수로 평가하는 측면이 다르다. 구조재의 경우 지진강도에 따른 최대층간변위비를 이용하여 지진취약도를 평가하지만, 비구조재는 설치되는 층의 최대층간변위비 또는 최대층가속도를 이용하여 지진취약도를 평가한다. 따라서 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위해선, 층별로 비구조재의 지진반응계수에 대한 지진강도에 따른 응답데이터가 필요하다.

나. 비구조재의 한계상태 정의

<표 1.57>은 본 연구에서 고려한 각 비구조재의 한계한태별 성능에 대한 중앙값과 불확실성을 정리한 것이다. 해당 값은 FEMA P58에서 제시하는 값을 사용하였다. 비구조의 손상상태(damage state)는 비구조재에 따라 최대 3가지로 구분되며, 각 비구조재의 성능을 나타내는 capacity parameter에 차이가 있다. 치장벽돌, 파티션, 타일은 구조재와 동일하게 층간변위비를 지진반응계수로 사용하며, 바닥마감과 천장재은 최대층가속도를 지진반응계수로 사용한다. 따라서 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위해선, 지진강도에 따라 층별로 층간변위비와 최대층가속도에 대한 응답의 중앙값 및 불확실성이 seismic demand analysis를 통해 도출되어야 한다.

<표 1.57> 학교시설물 비구조재의 성능수준별 capacity parameter의 중앙값과 불확실성

비구조재	Capacity Parameter	Unit	DS1		DS2		DS3	
			C	β_C	C	β_C	C	β_C
치장벽돌	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.60	0.0071	0.45	0.0120	0.45
바닥마감	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4	0.7	0.4	-	-
파티션	Story Drift Ratio	Unit less	0.0064	0.3	-	-	-	-
타일	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.60	0.0071	0.45	-	-
천장재	Peak Floor Acceleration	g	0.7	0.25	1.2	0.25	1.43	0.25

다. 비구조재의 지진취약도 평가

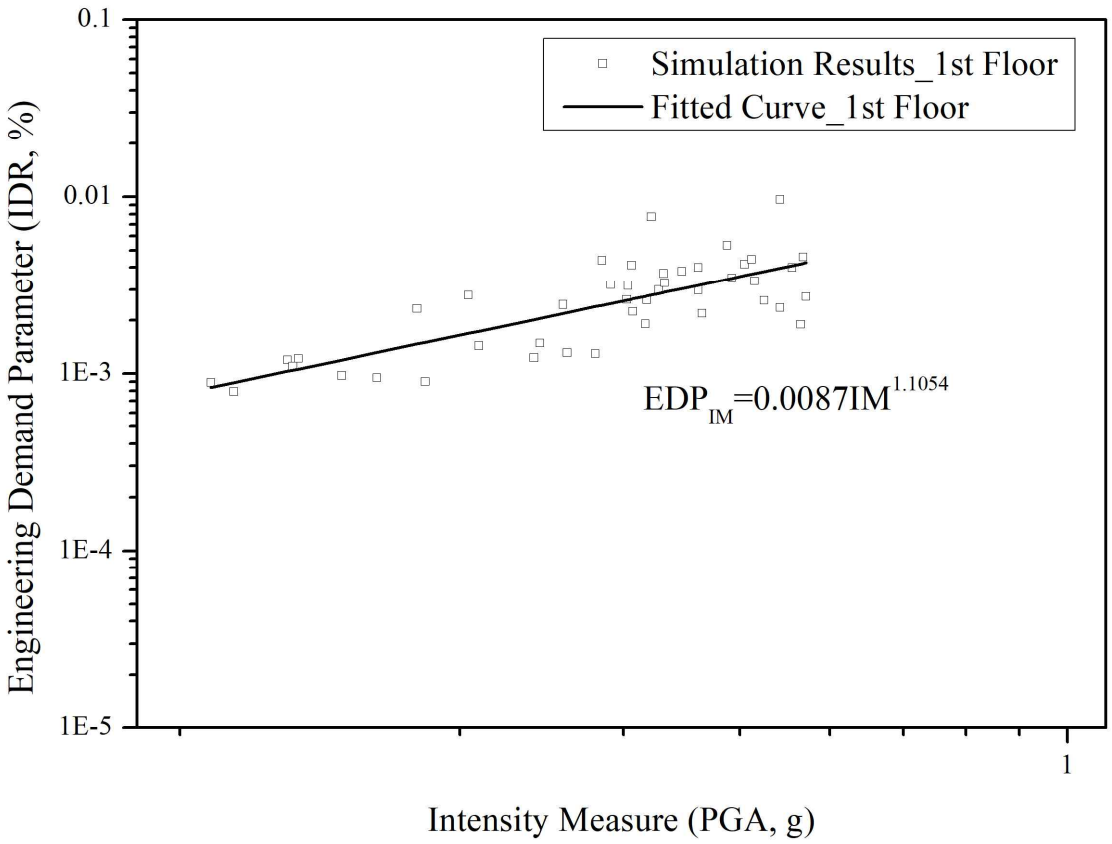
비구조재에 대한 지진취약도 평가는 지진파 44개에 대한 학교시설물의 비선형시간이력해석으로 얻어진 층별 층간변위비와 최대층가속도를 이용해 수행하였다. 층별 층간변위비는 <표 1.55>와 같으며, 층별 최대층가속도는 <표 1.58>과 같다.

<표 1.58> 비선형시간이력해석으로 얻어진 학교건축물의 PGA에 따른 층별 최대층가속도

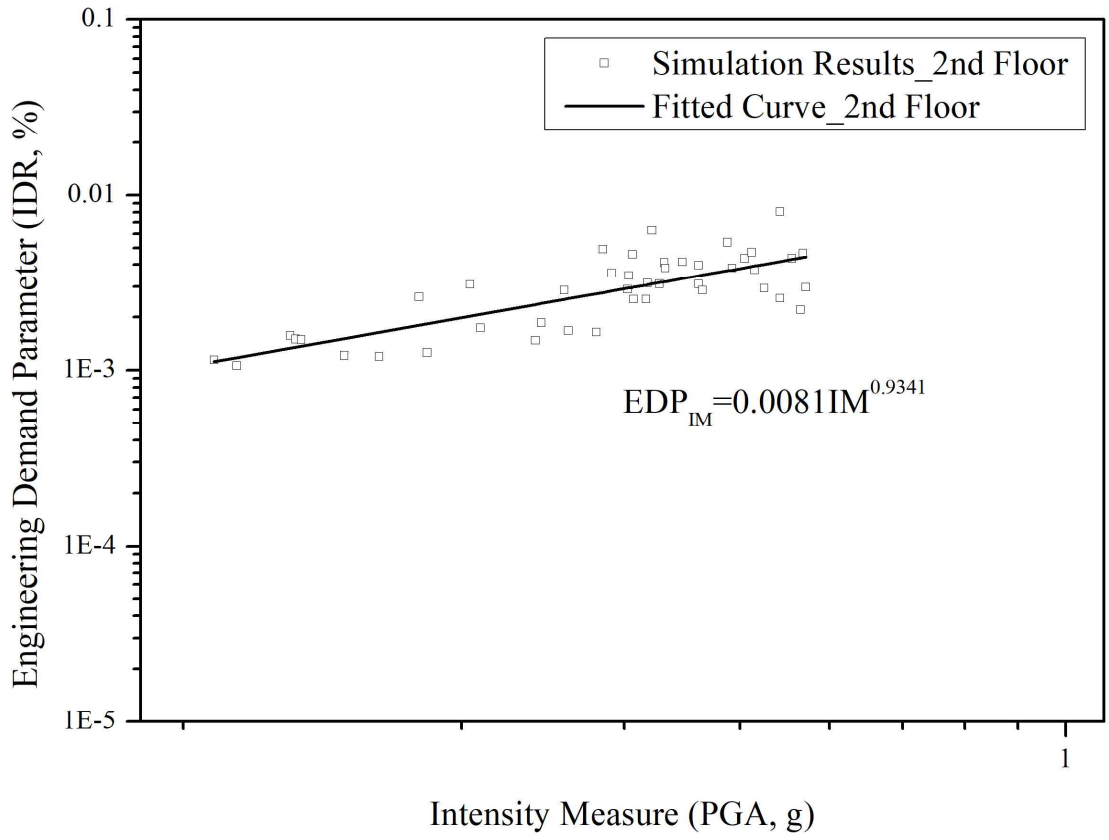
순번	PGA (g)	최대층가속도 (PFA, g)		
		1층	2층	3층
1	0.271	0.179	0.378	0.572
2	0.336	0.415	0.648	0.772
3	0.341	0.325	0.538	0.690
4	0.401	0.599	0.827	0.971
5	0.458	0.668	1.146	1.139
6	0.517	0.197	0.399	0.583
7	0.29	0.254	0.447	0.613
8	0.368	0.499	0.962	0.903
9	0.287	0.420	0.745	0.871
10	0.461	0.601	1.059	1.127
11	0.369	0.589	1.210	1.474
12	0.34	0.589	1.113	1.391
13	0.52	0.594	0.998	1.128
14	0.337	0.521	0.850	0.895
15	0.267	0.102	0.238	0.361
16	0.233	0.186	0.326	0.452
17	0.149	0.171	0.314	0.388
18	0.227	0.398	0.708	0.759
19	0.204	0.178	0.385	0.569
20	0.147	0.168	0.405	0.610
21	0.166	0.143	0.332	0.462
22	0.145	0.212	0.460	0.638
23	0.316	0.591	1.115	1.306
24	0.357	0.747	1.324	1.483
25	0.491	1.505	1.468	1.694
26	0.401	0.597	0.801	1.056
27	0.472	0.448	0.980	1.601
28	0.323	0.660	1.061	1.164
29	0.405	0.534	0.861	1.271
30	0.364	0.617	1.042	1.223
31	0.311	0.211	0.433	0.622
32	0.12	0.240	0.435	0.545
33	0.524	0.404	0.704	0.928
34	0.353	0.421	0.756	0.948
35	0.2	0.325	0.702	0.963
36	0.45	0.758	1.136	1.415
37	0.127	0.126	0.285	0.390
38	0.181	0.104	0.237	0.330
39	0.385	0.475	0.817	0.821
40	0.491	0.418	0.663	0.982
41	0.436	0.649	1.005	1.268
42	0.352	0.576	0.884	1.360
43	0.506	0.613	1.093	1.232
44	0.431	0.632	1.025	1.286

비구조재의 지진취약도를 평가하기 위한 seismic demand analysis를 구조재와 동일한 방식을 사용하였다. 구조재와의 차이는 층별로 seismic demand analysis를 수행하였다는 점이며, 지진의 PGA에 따른 층별 층간변위비와 최대층가속도를 이용하여 층별 지진반응계수의 중앙값(EDP_{IM})과 응답의 불확실성($\beta_{EDP/IM}$)을 평가하였다. <그림 1.61>부터 <그림 1.76>은 최소제곱법으로 얻어진 변위민감 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위한 층간변위에 대한 seismic demand analysis를 결과로 나타낸 것이고, <그림 1.77>부터 <그림 1.79>은 가속도민감 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위한 최대층가속도에 대한 seismic demand analysis를 결과로 나타낸 그림이다.

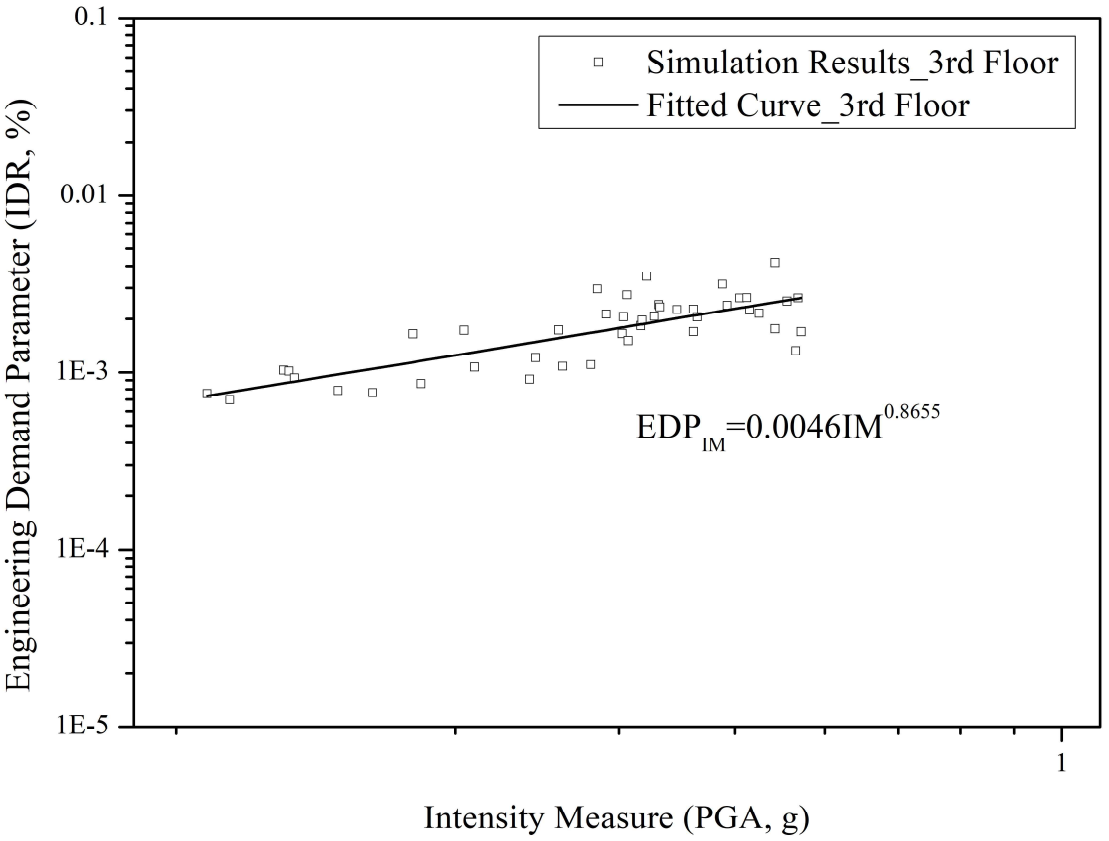
비구조재에 대한 seismic demand analysis 결과를 살펴보면, 1층에 설치되는 변위민감 비구조재의 지진응답이 2층과 3층보다 큰 것을 알 수 있다. 반면, 3층에 설치되는 가속도민감 비구조재의 지진응답이 1층과 2층보다 큰 것을 알 수 있다. 즉, 학교시설물의 1층에 설치되는 변위민감 비구조요소는 다른 층에 설치되는 비구조요소 보다 손상을 받을 확률이 높고, 3층에 설치되는 가속도민감 비구조요소는 다른 층에 설치되는 비구조요소 보다 손상을 받을 확률이 높을 것이라고 예상할 수 있다.



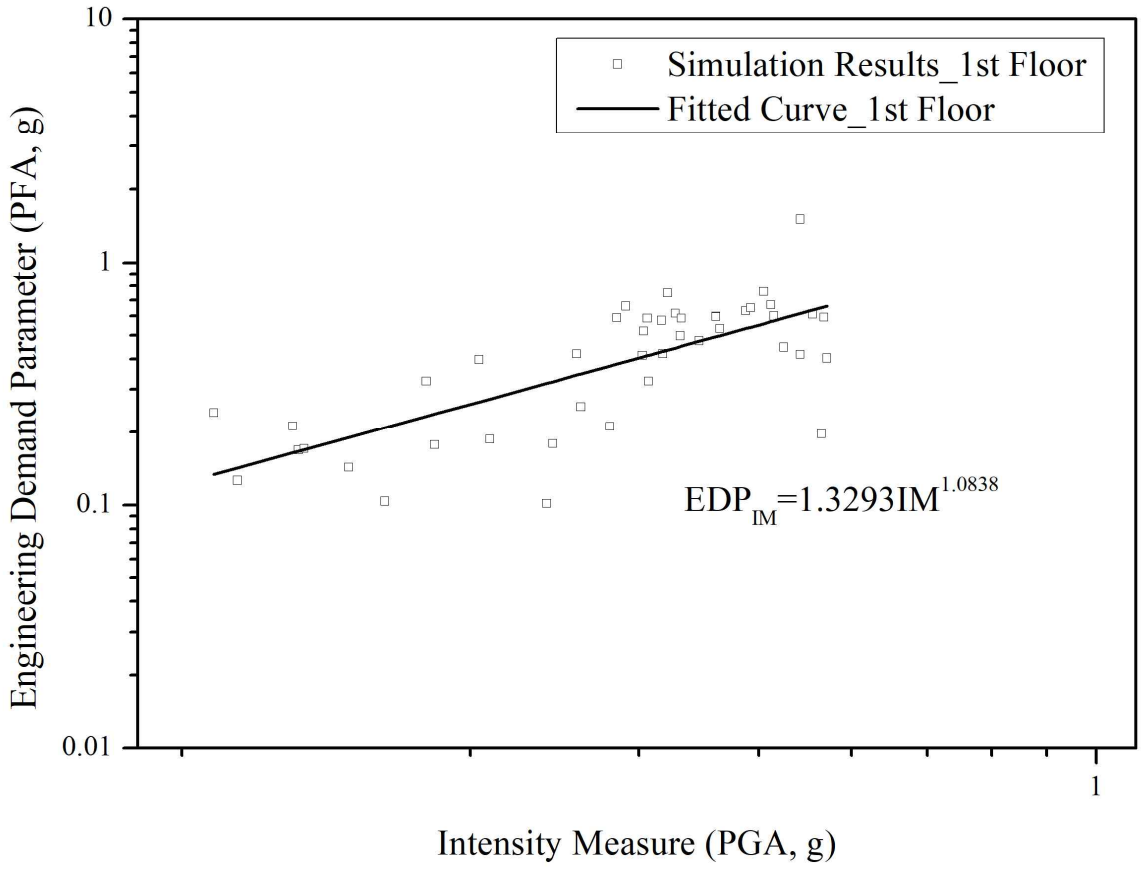
<그림 1.74> Seismic demand analysis result for drift-sensitive nonstructural elements of 1st floor



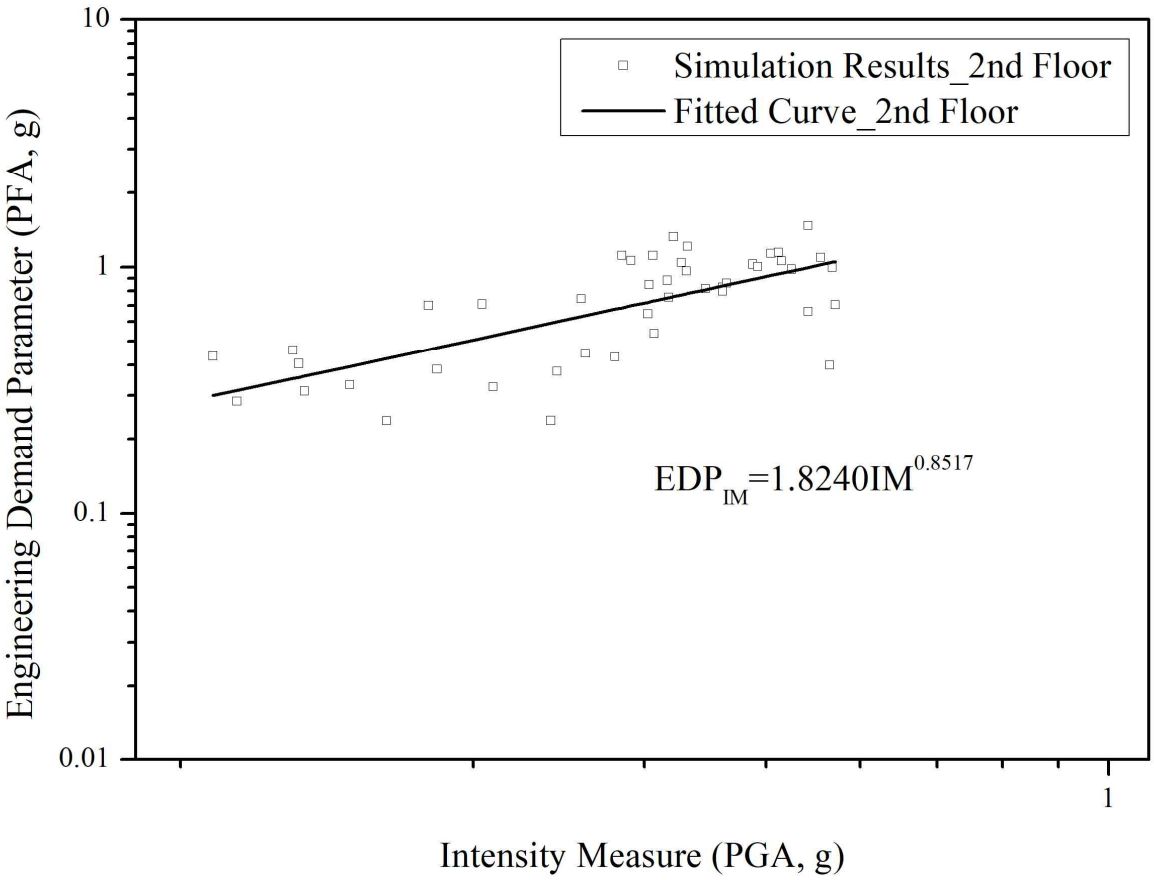
<그림 1.75> Seismic demand analysis result for drift-sensitive nonstructural elements of 2nd floor



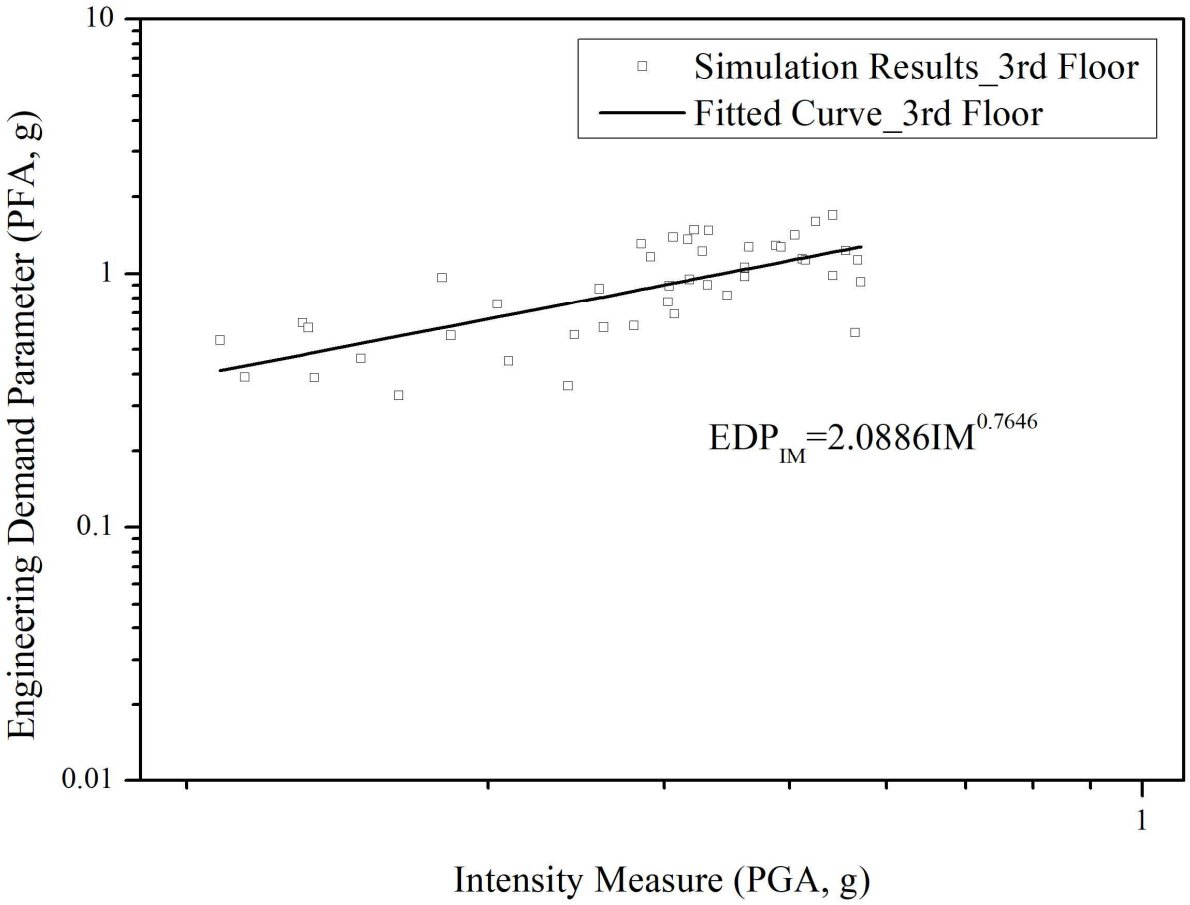
<그림 1.76> Seismic demand analysis result for drift-sensitive nonstructural elements of 3rd floor



<그림 1.77> Seismic demand analysis result for acceleration-sensitive nonstructural elements of 1st floor



<그림 1.78> Seismic demand analysis result for acceleration-sensitive nonstructural elements of 2nd floor



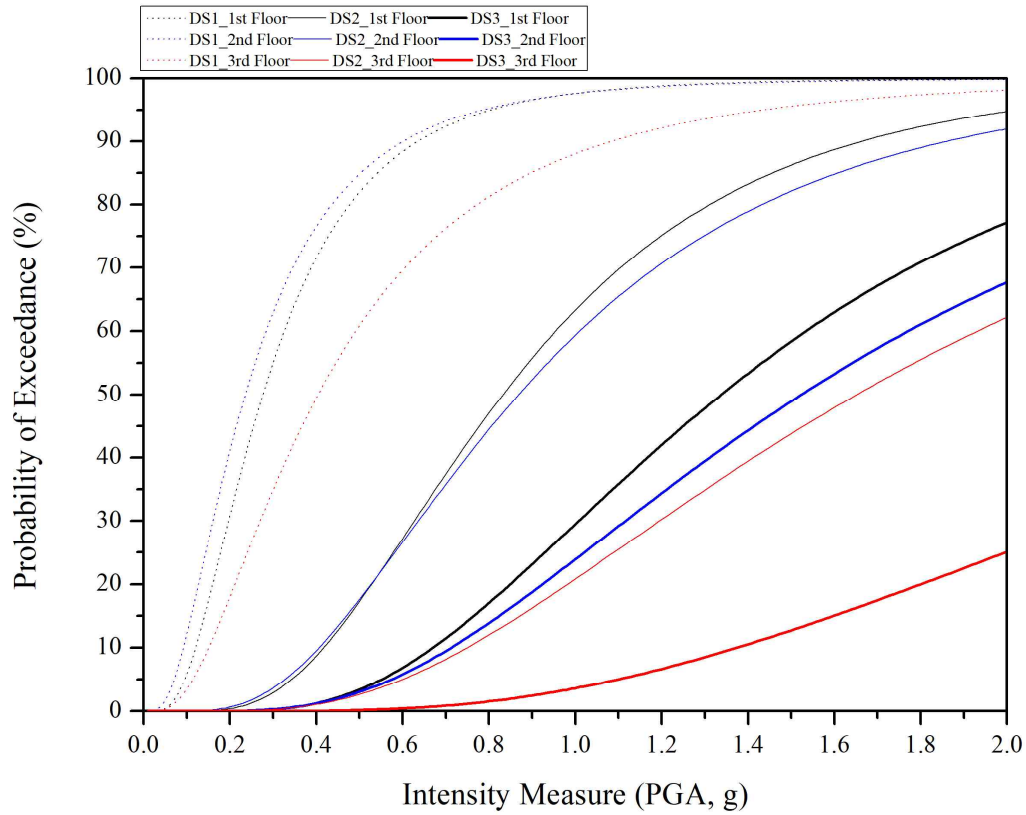
<그림 1.79> Seismic demand analysis result for acceleration-sensitive nonstructural elements of 3rd floor

<표 1.59>은 seismic demand analysis로 얻어진 비구조재의 지진취약도를 도출하기 위한 demand parameter를 정리한 것이다. 정리된 표에서 변위민감 비구조요소의 지진취약도는 층별 층간변위비에 대한 demand parameter와 <표 1.57>에서 정리된 비구조요소의 capacity parameter를 통해 정의된다.

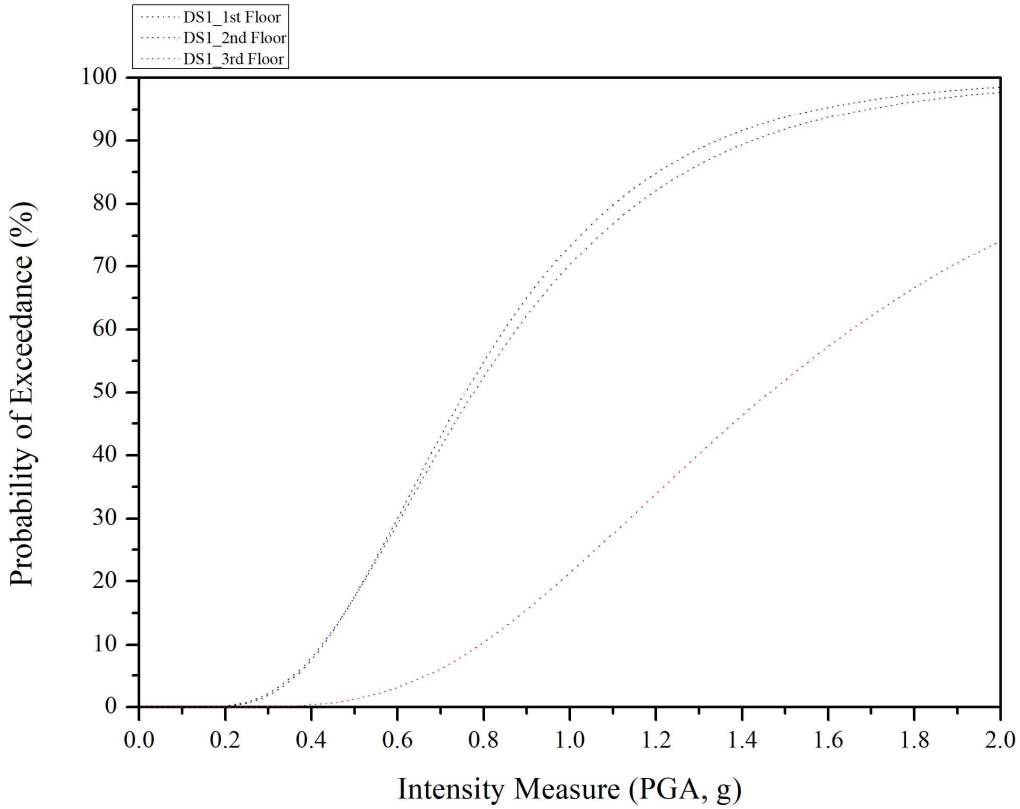
<표 1.59> 학교시설물 비구조요소의 지진취약도를 도출하기 위한 demand parameters와 불확실성

Demand Parameter	**Floor Level**	EDP_{IM}	$\beta_{EDP\|IM}$
Story Drift Ratio	1	$0.0087IM^{1.1054}$	0.392
	2	$0.0081IM^{0.9341}$	0.324
	3	$0.0046IM^{0.8655}$	0.288
Peak Floor Acceleration	1	$1.3293IM^{1.0838}$	0.432
	2	$1.8240IM^{0.8517}$	0.362
	3	$2.0886IM^{0.7646}$	0.310

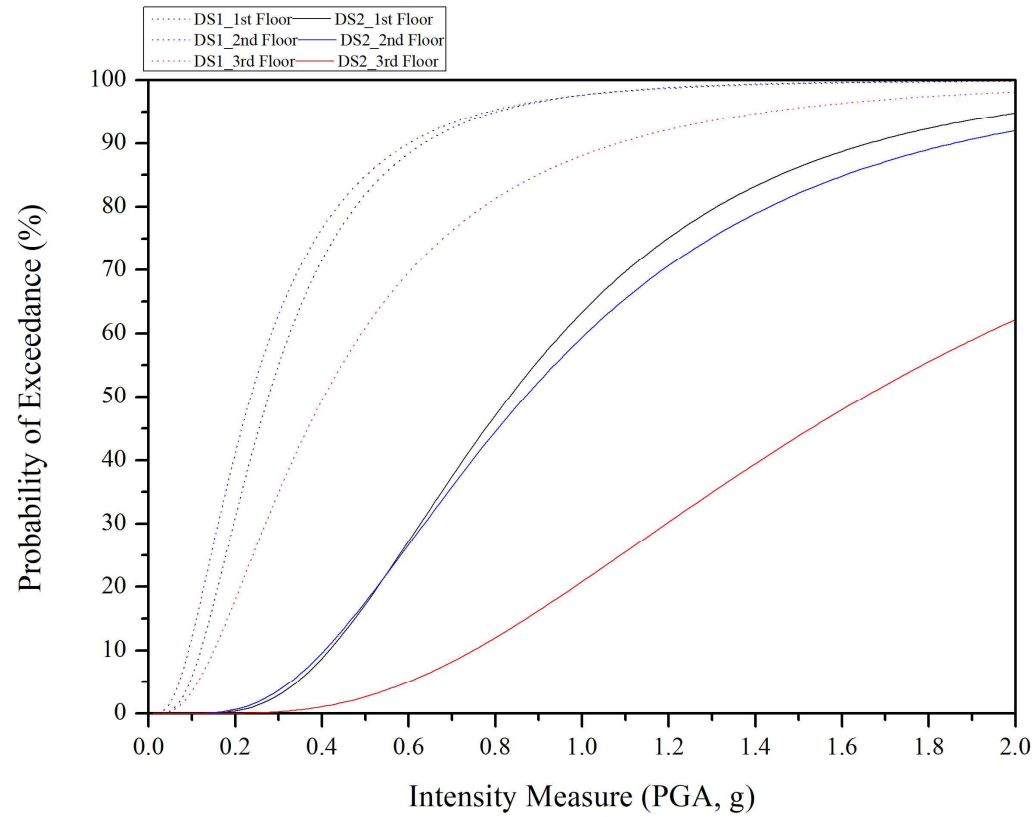
<그림 1.80>은 치장벽돌에 대한 층별 지진취약도 곡선이다. 치장벽돌에 대한 지진취약도 곡선을 살펴보면, 같은 DS에 대한 손상확률이 층별로 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 층별로 설치되는 치장벽돌의 성능에 대한 capacity parameter는 동일하지만, 지진의 강도에 대한 demand parameter에 차이가 있어서 발생되는 현상이다. 치장벽돌이 DS1에 도달할 확률은 2층, 1층, 3층 순서로 낮아지며, DS2에 도달할 확률은 IM가 약 0.5g이후 1층, 2층, 3층 순서로 낮아지며, DS3에 도달할 확률은 1층, 2층 3층 순서로 낮아진다. 층간변위비를 demand parameter로 사용하는 파티션과 타일에 대한 층별 지진취약도는 각각 <그림 1.81>, <그림 1.82>이다. 파티션에 대한 지진취약도 곡선을 살펴보면, DS1에 도달할 확률이 1층이 가장 높은 것을 알 수 있다. 타일의 경우, DS1에 도달할 확률은 2층이, DS2에 도달할 확률은 IM가 약 0.5g이후 1층이 가장 높다. 즉 변위민감 비구조재인 치장벽돌, 파티션, 타일은 3층에 설치된 요소의 손상확률이 가장 적으며, DS별로 차이가 있지만, 전체적으로 1층에 설치된 변위민감 비구조재의 손상확률이 높다고 할 수 있다.



<그림 1.80> 학교시설물 비구조재(치장벽돌)에 대한 층별 지진취약도 곡선

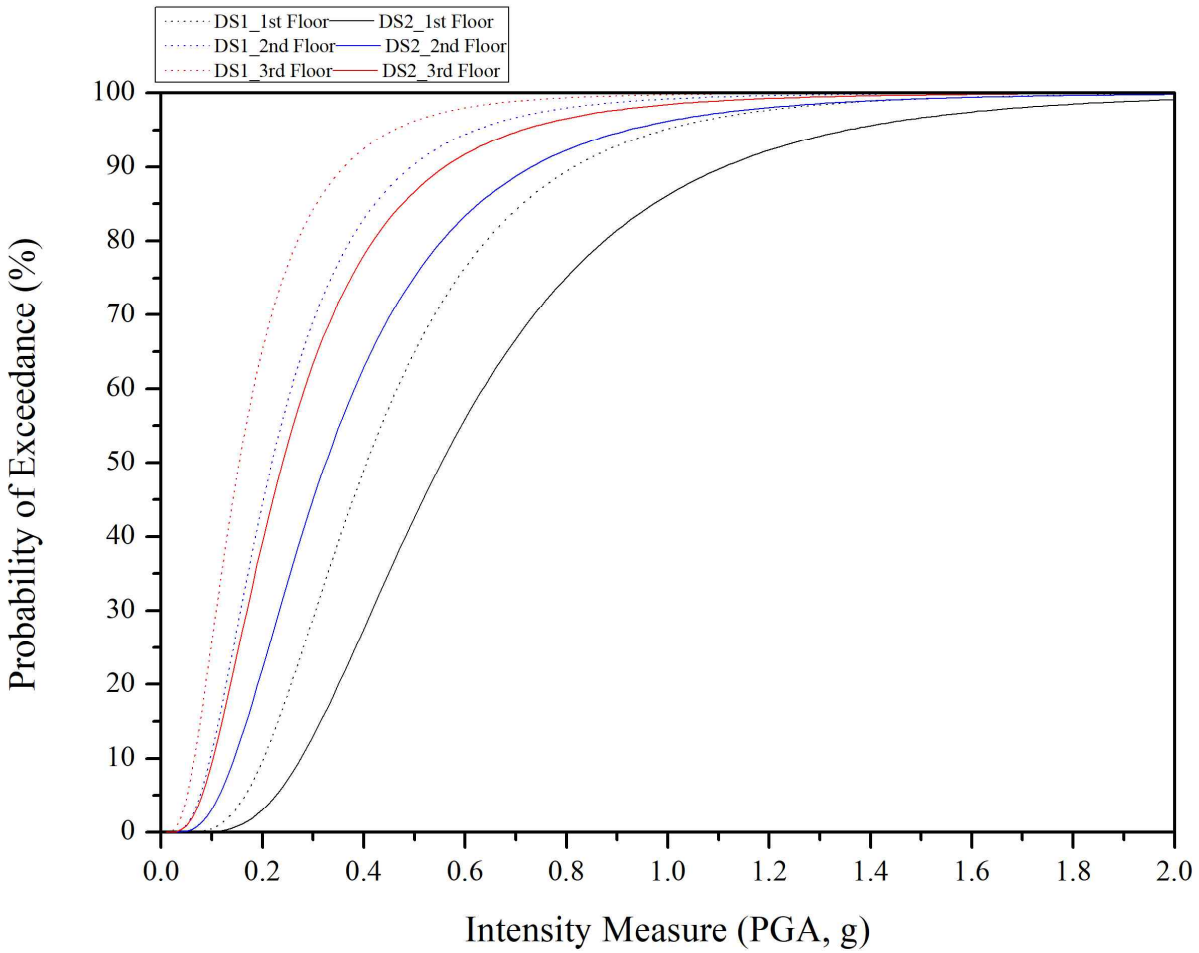


<그림 1.81> 학교시설물 비구조재(파티션)에 대한 층별 지진취약도 곡선



<그림 1.82> 학교시설물 비구조재(타일)에 대한 층별 지진취약도 곡선

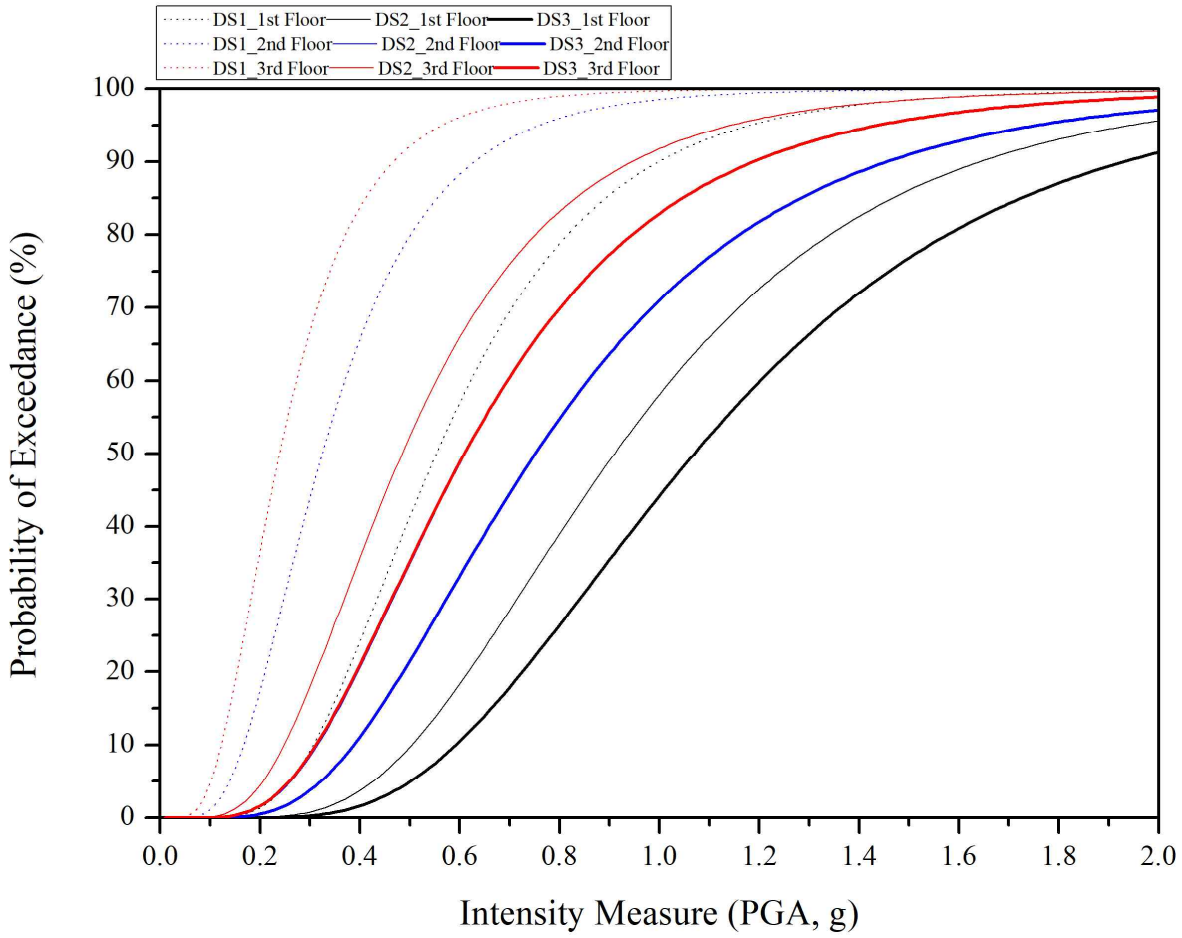
<그림 1.83>은 바닥마감에 대한 층별 지진취약도 곡선이다. 변위민감 비구조재와 마찬가지로, 가속도민감 비구조재인 바닥마감에 대한 지진취약도 곡선은 같은 DS에 대한 손상확률이 층별로 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. Seismic demand analysis에서 3층에 발생되는 PFA에 대한 demand가 가장 큰 것으로 분석되었기 때문에, 같은 DS에서 3층에 설치되는 바닥마감에 대한 손상확률이 가장 높은 것을 알 수 있다. 바닥마감이 DS1에 도달할 확률은 3층이 가장 높고, 그다음은 2층, 1층 순서로 낮아진다. DS2에 도달할 확률 또한 3층이 가장 높으며, 2층, 1층 순서로 손상확률이 낮아지는 것을 알 수 있다. 동일한 DS에서 3층, 2층, 1층 순서로 손상확률이 낮아지는 현상이 <그림 1.84>에 표현된 천장재에 대한 지진취약도 곡선에서도 나타난다. 즉, 해당 학교시설물에 설치되는 가속도민감 비구조재인 바닥마감과 천장재는 3층에 설치된 요소의 손상확률이 가장 높으며, 층수가 낮아질수록 가속도민감 비구조재의 손상확률이 적다고 할 수 있다.



<그림 1.83> 학교시설물 비구조재(바닥마감)에 대한 층별 지진취약도 곡선

ASCE 7이나 KBC 2016에서 가속도민감 비구조재의 설계하중인 등가정적하중은 층수가 높을수록 선형적으로 증가한다. 만약 비구조재에 대한 내진설계가 진행된 건축물의 비구조

재에 대한 지진취약도를 평가한다면, 높은 층수에 설치되는 가속도민감 비구조재의 capacity parameter가 높을 것으로 예상된다. 즉, 층별로 동일한 capacity parameter를 가진다고 가정한 <그림 1.83>과 <그림 1.84>의 지진취약도 곡선과 실제 손상확률은 차이가 있을 수 있다. 하지만, 해당 학교시설물은 구조재에 대한 내진설계가 적용되지 않은 건축물이기 때문에, 비구조재에 대한 내진설계도 적용되지 않았다. 따라서 층별로 동일한 capacity parameter를 사용하여 비구조재의 지진취약도를 평가하는 것은 합당하다고 사료된다.



<그림 1.84> 학교시설물 비구조재(천장재)에 대한 층별 지진취약도 곡선

구조재와 동일하게 울산관측소에서 측정된 경주지진에 대한 PGA 0.434g에서 각 비구조재의 DS에 따른 층별 손상확률은 <표 1.60>에 정리하였다. 변위민감 비구조재는 전체적으로 층수에 따라 손상확률의 차이가 크지 않다. 변위민감 비구조재인 치장벽돌의 DS1에 도달할 최대 확률은 67.77%, DS2의 경우 10.78%, DS3는 1.97%이다. 타일의 경우 DS1과 DS2의 capacity parameter가 치장벽돌과 동일하므로 DS1와 DS2에 도달할 확률이 치장벽돌과 동일하다. 파티션은 DS1에 도달할 최대 확률이 11.44%로, 치장벽돌과 타일에 비해 파티션이 손상을 받을 확률은 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 반면, 가속도민감 비구조재인 바닥마감과 천

장재는 층수에 따라 손상을 받을 확률이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 바닥마감의 DS1의 최대 손상확률은 1층에서 22.28%, DS2의 경우 3층에서 82.09%이다. 천장재의 DS1의 최대 손상확률은 2층에서 46.00%, DS2의 경우 3층에서 16.05%, DS3의 경우 3층에서 26.63%이다. 전체적으로 가속도민감 비구조요소의 손상확률이 큰 것으로 조사되어, 학교시설물에 지진이 발생시 층수가 높은 곳에 설치된 바닥마감재와 천장재에 손상확률이 클 수 있다고 생각할 수 있다.

<표 1.60> 학교시설물 비구조요소의 경주지진(IM=0.434g)에 대한 각 DS별 손상확률

비구조요소	층	Probability of Reaching Damage State (%)			
		None	DS1	DS2	DS3
치장벽돌	1층	23.66	64.45	9.92	1.97
	2층	19.63	67.77	10.78	1.82
	3층	45.60	52.79	1.52	0.09
파티션	1층	88.82	11.18	-	-
	2층	88.56	11.44	-	-
	3층	99.39	0.61	-	-
타일	1층	23.66	64.45	11.89	-
	2층	19.63	67.77	12.60	-
	3층	45.60	52.79	1.61	-
바닥마감	1층	44.06	22.28	33.66	-
	2층	13.50	18.09	68.41	-
	3층	5.67	12.24	82.09	-
천장재	1층	69.05	25.20	3.05	2.70
	2층	27.83	46.00	11.18	14.99
	3층	12.16	45.15	16.05	26.63

4. 소결

본 장에서는 구조재 및 비구조재의 통합 지진취약도평가 기법에 대한 연구를 수행하였다. 지진취약도에 대한 정의와 지진취약도를 평가하는 총 4가지 방식인 expert-based method, empirical method, analytical method, hybrid method에 대한 리뷰를 진행하였다. 리뷰된 내용을 바탕으로 analytical method 중 time history analysis를 이용하여 학교시설물의 구조재 및 비구조재에 대한 지진취약도를 평가하였다. 학교시설물의 지진취약도를 평가한 결론은 다음과 같다.

- 지진취약도 함수는 지진의 강도(intensity measure, IM)에 대해 특정한 손상상태를 만족하거나 초과할 가능성능 나타내는 조건부 확률이다. 지진취약도를 평가하는 방식은 expert-based method, empirical method, analytical method, hybrid method로 나뉜다. Expert-based method는 전문가의 의견에 따라 지진취약도 함수의 편차가 크며, empirical method는 동일한 데이터를 사용하더라도, 확률을 평가하는 방식에 따라 큰 편차가 발생한다.
- Analytical method는 특정건축물에 대한 실제 손상데이터나 특정지역의 지진동에 대한 데이터가 부족할 때, 지진취약도를 도출할 수 있는 방식이다. Analytical method로 지진취약도 함수를 도출하기 위해선 1) 지진에 대한 건축물의 응답(=지진반응계수)의 중앙값(EDP_{IM}), 2) 지진반응계수의 불확실성($\beta_{EDP/IM}$), 3) 건축물 성능에 대한 중앙값(C), 4) 건축물 성능에 대한 불확실성(β_C)이 필요하다. 여기서 EDP_{IM}과 $\beta_{EDP/IM}$은 seismic demand analysis를 통해 얻을 수 있으며, seismic demand analysis는 해석방식에 따라, linear static analysis (response spectrum analysis), nonlinear static analysis (capacity spectrum analysis), time history analysis, incremental dynamic analysis로 나뉜다.
- 구조재에 대한 지진취약도를 성능수준인 IO(immediately occupancy, 즉시거주), LS(life safety, 인명만전), CP(collapse prevention, 붕괴방지)에 따라 분석한 결과, 경주지진의 PGA 0.434g에 해당하는 IM의 경우, IO수준의 손상이 발생할 확률은 43.54%, LS수준의 손상이 발생할 확률은 10.66%, CP수준의 손상이 발생할 확률은 1.42%로 분석되었다.
- 비구조재는 FEMA P58에서 제시하는 학교건축물에 설치되는 건축적 비구조재인 치장벽돌, 파티션, 타일, 바닥마감, 천장재에 대해 지진취약도를 평가하였다. 치장벽돌, 파티션, 타일은 변위민감 비구조재로 분류되며, 바닥마감, 천장재는 가속도민감 비구조재로 분류된다. 변위민감 비구조재의 손상확률은 대체적으로 2층에서 가장 큰 것으로 분석되었으며, 가속도민감 비구조재의 손상확률은 층수가 높을수록 손상확률이 증가하는 것으로 분석되었다.

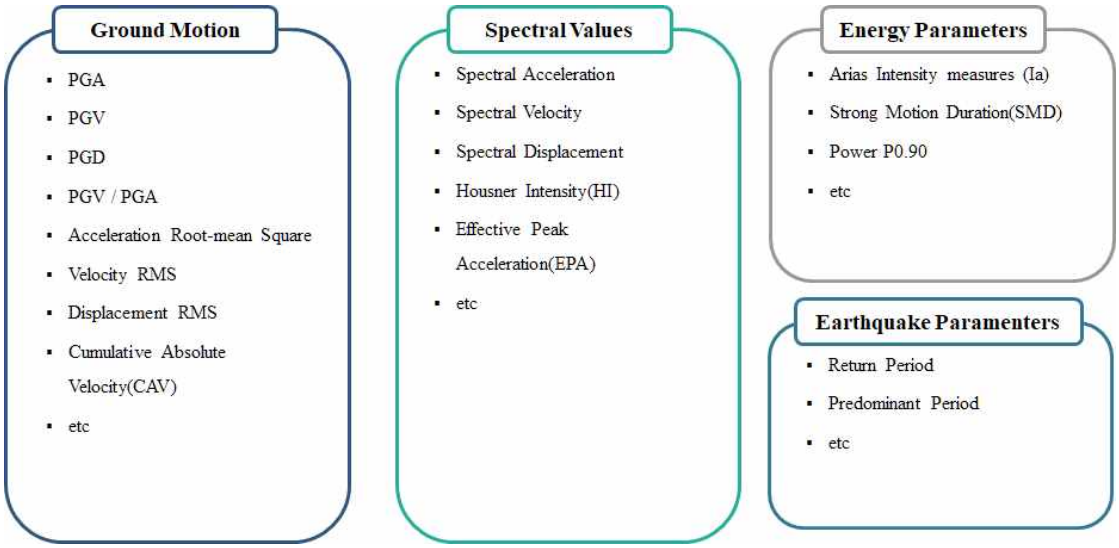
5절. 최적지진강도 및 최적지진반응계수 도출

1. 최적지진강도의 정의

지진 데이터의 선정 이후 취약도 곡선 도출 과정에서 선정하여야 하는 과정이 최적지진강도의 선정이다. 최적지진강도는 지진강도 중 구조물에서 손상을 분석하고자 하는 대상(구조재, 비구조재 등)의 손상 상태를 넘어설 확률을 가장 잘 대표하는 지진강도를 말한다. 본 연구에서는 최적지진강도의 선정 위하여 기존 연구 동향을 조사하였고, 이를 토대로 가장 빈번하게 사용한 지진강도와, 분석하려는 구조물이나 구조재, 비구조재에 가장 최적의 값을 대표하는 지진 강도를 최적 지진강도로 정의하였다.

지진 강도는 지진 강도가 나타내는 값에 따라 크게 4가지의 종류로 지진 강도를 나눌 수 있다. <그림 1.85>에 지진 강도의 큰 분류에서 취약도 곡선에 사용하는 대표적인 지진 강도들에 대한 분류를 나누었다.

- ○ 지반의 운동 (Ground motion)
- ○ 스펙트럴 값 (Spectral Values)
- ○ 에너지 상관계수 (Energy Parameters)
- ○ 기타 지진파 관련 계수 (Earthquake Parameters)

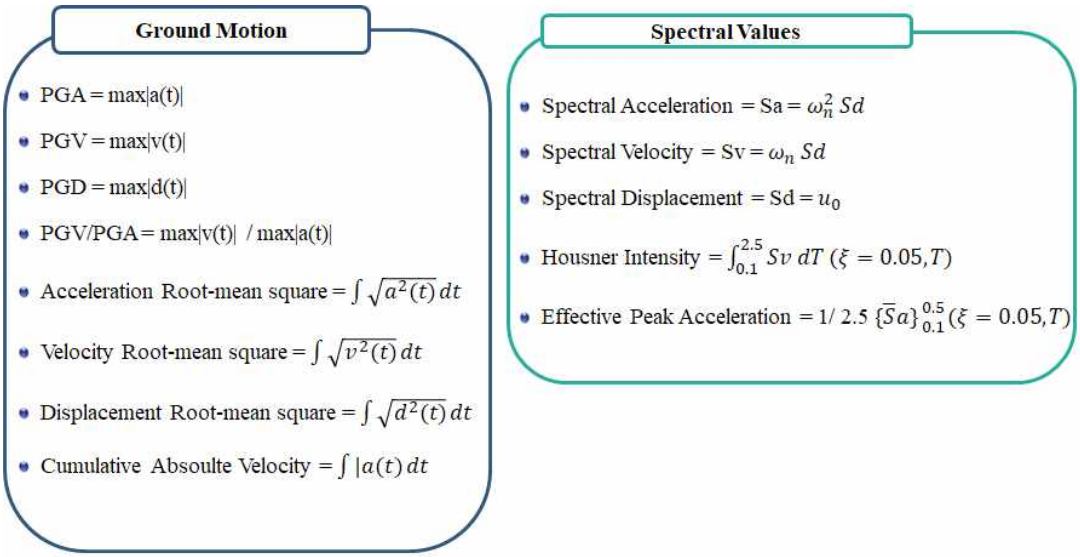


<그림 1.85> 지진강도 분류 체계

지반 운동에 관련된 지진 강도는 가속도, 속도, 변위들에 관한 값으로 PGA, PGV, PGD와 같은 지진 강도의 경우 지진파가 기록된 지반의 순수한 가속도, 속도, 변위값을 나타낸다. 또한 그 외의 지반 운동에 관련된 지진 강도의 경우, 지진 강도가 분석하고자 하는 대상에 대한 정확성을 높이기 위해 지진의 주기에 대해 평균을 산출하거나, 제곱값의 평균을 구하

는 방식 등으로 지진파에 값에 대한 변환 과정을 거쳐 구하게 된다.

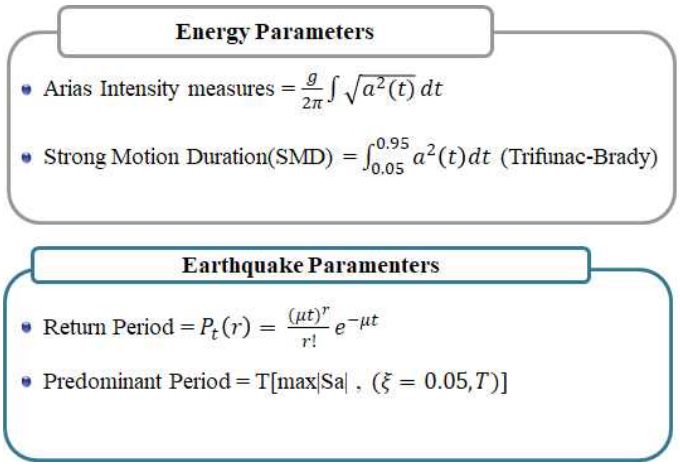
그 다음으로 스펙트럴 값과 관련된 지진 강도의 경우, 지반 운동과 직결된 지진 강도와는 달리, 지반 운동이 취약도를 분석하려는 대상 구조물이나 구조재, 비구조재에 대한 영향을 고려하기 위한 값이다. 따라서 분석하려는 대상을 단자유도화하는 과정을 통해 간략하게 대상의 고유주기를 산정하고, 그에 따라 대상에 지반 운동이 미치는 영향을 대표하는 지진 강도들로 구성되어 있다. <그림 1.86>에서 각각의 지진강도를 산출하는 과정이 나와 있으며, 각 식의 $a(t), v(t), d(t)$는 입력한 지진파의 가속도, 속도, 변위값을 말하며, u_0, w_n은 구조물의 초기변위, 단자유도계 변환한 고유 주기를 말한다.



<그림 1.86> 지반운동과 스펙트럴 관련 지진강도 산출식

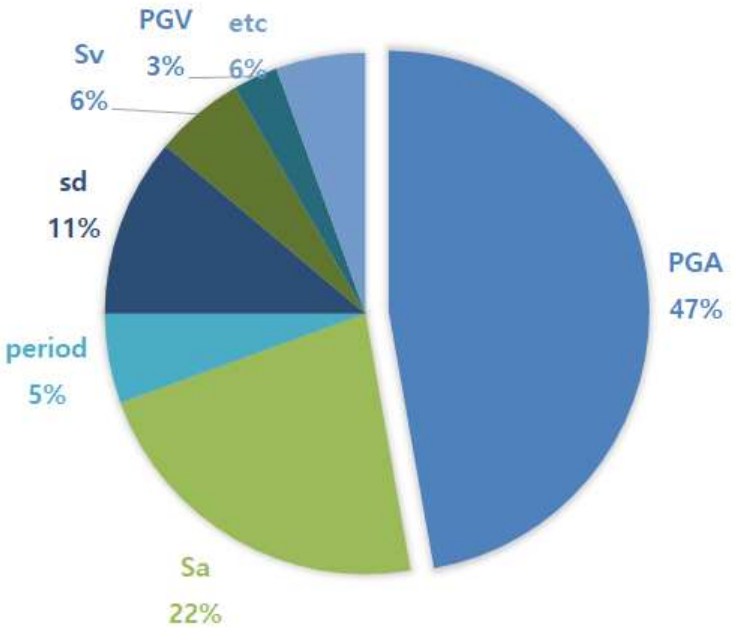
또한 에너지 상관계수에 관련된 지진 강도는 입력하려는 하중 값, 즉 지진파에 대한 절대적인 에너지 크기에 관련된 강도이다. 그림 에서 확인할 수 있듯이, 에너지 관련 지진강도 중 대표적인 Arias Intensity measures의 경우 <그림 1.87>와 같이 지진파의 가속도의 RMS 값에 상수를 곱해준 값으로 입력한 지진파가 지속되는 동안의 에너지를 나타내게 된다.

마지막으로 기타 지진파에 관련된 계수로는 지진파의 재현주기, 우세주기 값으로 그림 4에서 확인할 수 있듯, 같은 세기의 지진이 다시 지반에 발생할 확률과, 지진이 구조물에 미치는 영향이 가장 큰 시간대에 관련된 강도이다. 따라서 위와 같은 지진 강도의 경우, 흔히 구조물의 Life Cycle Cost(LCC)와 같은 생애주기 비용 산정과 구조 기준에서 제시하는 지반계수 산정 등에 주로 이용된다.



<그림 1.87> 에너지 & 지진파 관련 지진강도 산출식

위의 4가지 지진 강도의 분류 중 확률 기반 취약성 확률 분석 즉, 지진취약도 곡선에 주로 이용되는 지진 강도 분류는 <그림 1.88>에 보여지는 지반 운동과 스펙트럴 관련 지진 강도이며, 기존 문헌 조사를 수행했을 때 2016년 이후 국외 지진취약도 곡선 도출에 사용된 지진 강도 통계는 아래 그림 5와 같다. 통계 방법으로는 지진취약도 곡선 관련 국외 연구 50건을 무작위 추출하고, 50건의 연구를 대상으로 통계자료를 도출하였다. 통계 자료를 참고하면 PGA, PGV, Sa, Sv와 같은 지진강도를 가장 많이 사용함을 확인할 수 있다.



<그림 1.88> 지진 취약도 곡선 사용 지진 강도 임의추출 통계 자료

또한, 통계 자료와 함께 확률기반 지진 취약성 평가의 분석대상을 구조재, 비구조재 등으로 국한 시키면, 가장 많이 분석한 지진 강도는 5가지로 PGA, PGV, PGD, Sa, Sd로 나눌 수 있다.

2. 최적지진반응계수의 정의

최적지진반응계수는 최적지진강도와 유사한 개념으로 지진반응계수 중 구조시스템 및 부재의 지진반응계수 중 최적값을 대표하는 값이다. 지진 강도가 구조물이나 구조재, 비구조재 등의 분석대상에 관한 계수라면, 지진반응계수는 발생하는 손상 정도(Damage State)를 나타내는 지진반응계수 중 최적의 지진반응계수를 말한다. 따라서 최적지진반응계수는 손상정도를 나타내는 지진반응계수를 기존 문헌 및 구조 기준을 참고하여 선정하였고, 구조 기준의 경우 국외의 여러 기준을 참고하여 산정하였다. 손상 정도에 대한 지진반응계수를 다룬 해외 구조 기준은 HRC, HAZUS 1999, VISION 2000 등이고 상세한 기준은 아래의 <그림 1.89>을 참고하여 손상 정도에 대해 분류하였다.

<table>
<tr><th>DI_{HRC}</th><th>HRC</th><th>HAZUS 1999 [17]</th><th>VISION 2000 [18]</th><th>FEMA 273 [19]</th><th>EMS98 [20]</th><th>MSK [2]</th><th>AIJ [5]</th><th>ATC-13 [7]</th><th>ATC-21 [21]</th><th>EPPO [22]</th></tr>
<tr><td>0</td><td>None</td><td colspan="9">No damage limit state</td></tr>
<tr><td>10</td><td rowspan="3">Slight</td><td rowspan="4">Slight damage</td><td rowspan="2">Fully operational</td><td rowspan="2">Immediate occupancy</td><td rowspan="2">Grade 1</td><td rowspan="2">D1</td><td rowspan="2">Light</td><td>Slight</td><td rowspan="3">Green Tag</td><td rowspan="3">Green Tag</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Light</td></tr>
<tr><td>20</td><td rowspan="3">Operational</td><td rowspan="3">Damage control</td><td rowspan="3">Grade 2</td><td rowspan="3">D2</td><td rowspan="4">Minor</td><td rowspan="2">Light</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
<tr><td>40</td><td rowspan="3">Moderate</td><td rowspan="2">Moderate</td></tr>
<tr><td>50</td><td rowspan="3">Moderate damage</td><td rowspan="3">Grade 3</td><td rowspan="3">D3</td><td rowspan="3">Yellow Tag</td><td rowspan="3">Yellow Tag</td></tr>
<tr><td>60</td><td>Life safe</td><td>Life safe</td><td rowspan="3">Moderate</td></tr>
<tr><td>70</td><td rowspan="3">Extensive</td><td rowspan="3">Extensive damage</td><td rowspan="3">Near collapse</td><td>Limited safety</td><td rowspan="3">Grade 4</td><td rowspan="3">D4</td><td rowspan="2">Heavy</td></tr>
<tr><td>80</td><td rowspan="2">Collapse prevention</td><td rowspan="2">Major</td></tr>
<tr><td>90</td><td rowspan="2">Major</td></tr>
<tr><td>100</td><td>Partial Collapse</td><td>Collapse</td><td>Partial collapse</td><td>Red Tag</td><td>Red Tag</td></tr>
<tr><td></td><td>Collapse</td><td colspan="9">Collapse limit state</td></tr>
</table>

<그림 1.89> 해외 연구에 기술되어 있는 손상 정도 분류

손상 정도에 대한 지진반응계수는 각 기준에서 제시하고 있는 정도가 각각 다르고, <그림 1.49>의 손상 정도 구분을 확인할 경우, DI_{HRC}의 경우 0에서 100까지 10단위로 손상 정도를 나누고 있는 반면, HAZUS 1999의 경우 손상정도에 대한 단계를 정성적인 표현으로 None(전혀 없음)부터 Slight, Light, Moderate, Extensive, Partial Collapse, 마지막으로 붕괴상태를 나타내는 Collapse까지 나누고 있다. 마찬가지로 VISION 2000, FEMA 273, EMS98, MSK, AIJ, ATC-13, ATC-21, EPPO의 구조 기준들도 보통 3~6단계의 손상 정도를 가지고 손상 상태를 정의하고 있으며 각각의 값을 같은 상태의 구조의 상태로 나타낼 수 있다. 따라서 지

진반응계수는 최적지진강도에 의해 결정되는 구조재나 비구조재의 지진반응을 대표할 수 있는 계수이다. 최적지진반응계수를 선정하기 위해서는 최적의 손상 정도를 선정하는 것이 필연적이다. 최적 지진강도를 PGA, PGV, PGD, Sa, Sd 다섯 가지로 규정하면 최적지반응계수는 다음과 같은 지진반응계수로 도출할 수 있다.

- ❍ 층간변위비(interstory drift ratio, IDR): 구조재 및 변위민감 비구조재에 사용 됨
- ❍ 최대층가속도(Peak Floor Acceleration): 가속도민감 비구조재에 사용 됨

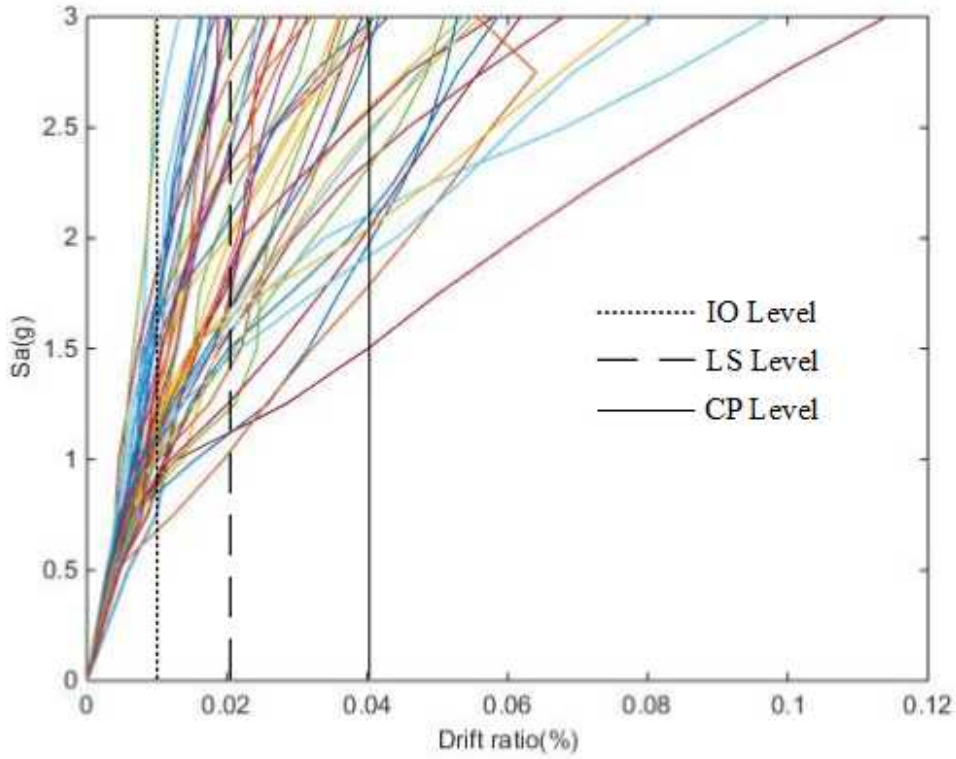
기존 문헌조사와 연구동향을 파악했을 때, 구조재의 손상 지수를 반영하기에 최적인 지진반응계수는 IDR, PFA, 그 외의 층가속도와 가속도비, 그리고 회전각으로 나눌 수 있다. 분석하려는 구조물, 구조재, 비구조재 등의 손상 정도를 규명하기 위해서는 구조형식과 지진 강도의 선택이 가능할 수 있도록 다양한 형태의 지진반응계수를 고려할 수 있어야 하고, 건축물의 취약도 평가를 진행해야 할 것이다.

3. 지진강도선택에 따른 취약도 곡선 도출 방법

본 장에서는 소방시설물 프로토타입모델에 대한 지진강도의 종류에 따른 취약도 분석을 진행하였으며, 지진강도는 최대지반가속도, 스펙트럼 가속도 2가지를 변수로 선정하였다. 증분동적해석(IDA)를 통해 지진취약도를 평가하였으며, 지진데이터는 <표 1.52>에 정리된 FEMA P695의 총 44개에 대한 원단층 지반운동을 사용하였다.

가. 스펙트럼가속도 지진강도에 대한 증분동석해석 결과

소방시설물 프로토타입모델의 1차 고유주기는 0.46초로 T_n=0.46일 때, 스펙트럼 가속도를 통하여 지진파를 0g부터 3g까지 0.25g를 간격으로 11등분하여 총 484개의 지진시나리오를 통하여 IDA를 수행하였다. 구조재의 지진취약도를 정의하기 위한 최적지진반응계수는 최대층간변위비를 사용하였다. <그림 1.90>은 지진강도를 스펙트럼가속도를 사용한 IDA의 해석결과이다. 소방시설물 프로토타입모델의 성능수준은 IO, LS, CP로 구분하였으며, 각 성능수준에 대한 capacity parameter FEMA 356에서 정의된 철근콘크리트 구조물에 대한 성능수준별 허용 층간변위비를 사용하였다. 해당 문헌에서 성능수준별 허용 층간변위비는 IO일 경우 1%, LS일 경우 2%, CP일 경우 4%로 정의하고 있다. 또한 성능수준에 대한 불확실성은 FEMA P695를 참고하여 0.4로 결정하였다. FEMA 356에서 정의된 철근콘크리트 구조물의 3단계 성능수준(IO, LS, CP)을 비교해보면, 스펙트럼 가속도가 커질수록 각 성능수준을 만족하지 못하는 경향을 파악할 수 있다.



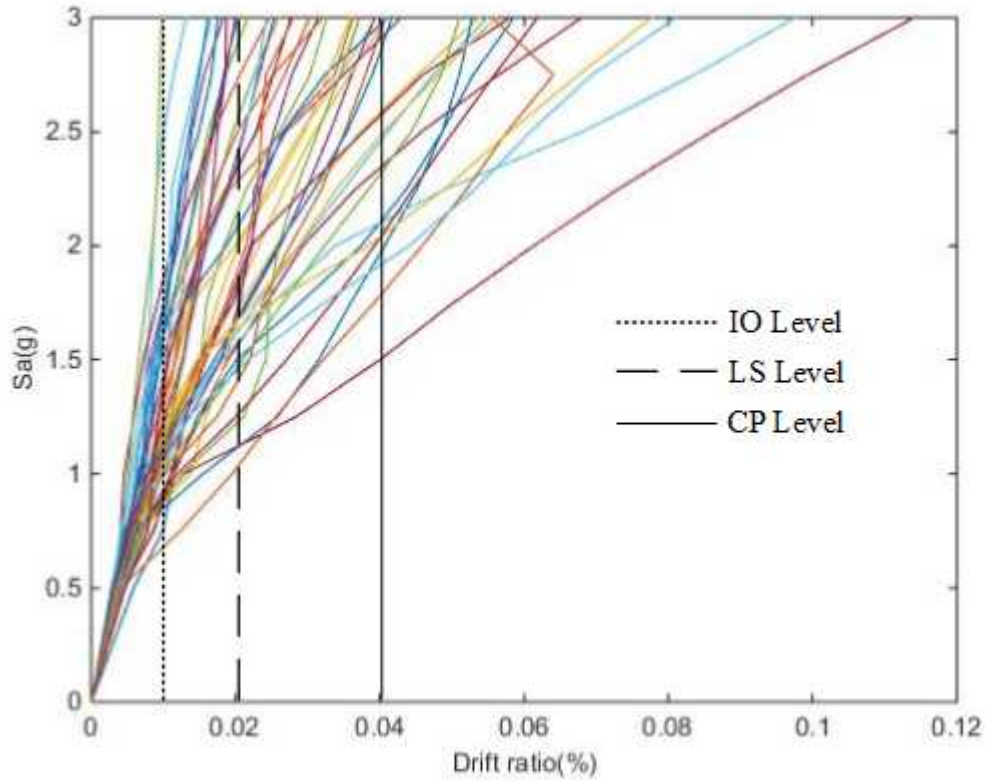
<그림 1.90> 소방시설물 프로토타입모델의 증분동적해석결과(스펙트럼 가속도)

나. 최대지반가속도 지진강도에 대한 증분동석해석 결과

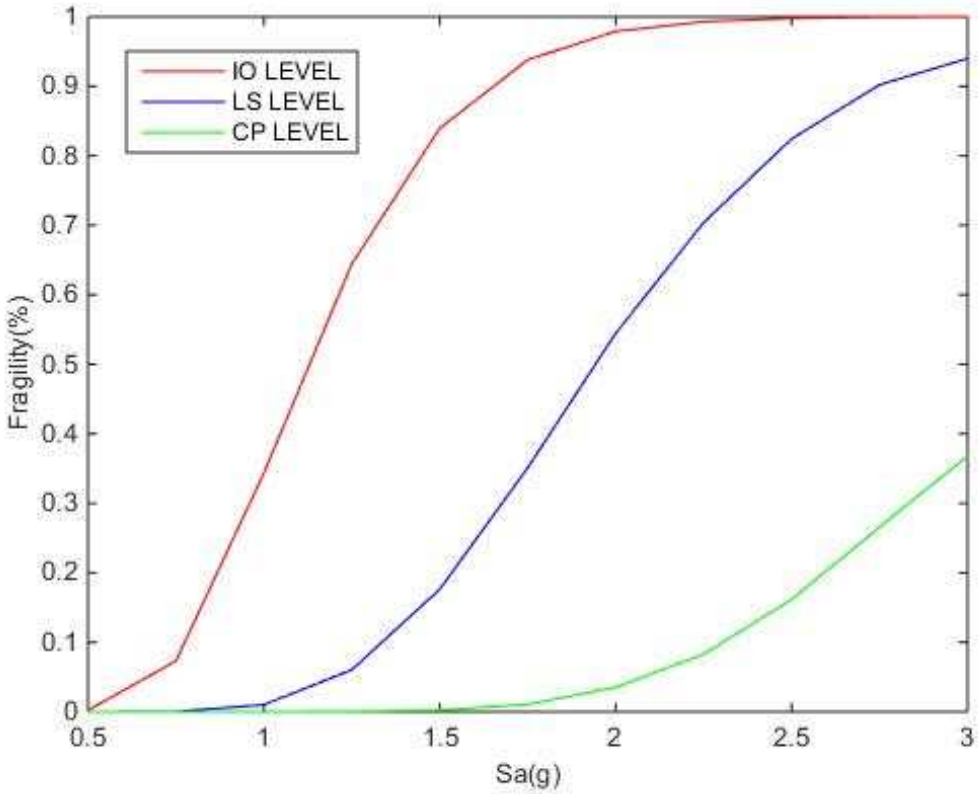
총 44개의 지진데이터에 대한 최대지반가속도를 0g부터 1g까지 0.5g를 간격으로 20등분하여 총 880개의 지진시나리오를 통하여 IDA해석을 수행하였다. <그림 1.91>은 지진강도를 최대지반가속도로 설정한 IDA의 결과이다. FEMA 356에서 정의된 철근콘크리트 구조물의 3단계 성능수준을 비교해보면, 최대지반가속도(PGA)가 커질수록 각 성능수준을 만족하지 못하는 경향을 파악할 수 있다. 3단계 성능수준(IO, LS, CP)을 비교해보면, 스펙트럼 가속도가 커질수록 각 성능수준을 만족하지 못하는 경향을 파악할 수 있다.

다. 스펙트럼 가속도를 이용한 취약도 곡선

스펙트럼가속도를 지진강도로 한 소방시설물 프로토타입모델의 지진취약도 곡선은 <그림 1.92>와 같다. 스펙트럼 가속도가 1g일 경우, 소방서 프로토타입 모델의 IO레벨 손상확률은 34.3%이며, LS레벨 손상확률은 1%이며, CP레벨 손상확률은 0%인 것으로 나타났다. 스펙트럼가속도가 커질수록 구조물이 받는 손상은 확률적으로 증가함을 확인할 수 있다.



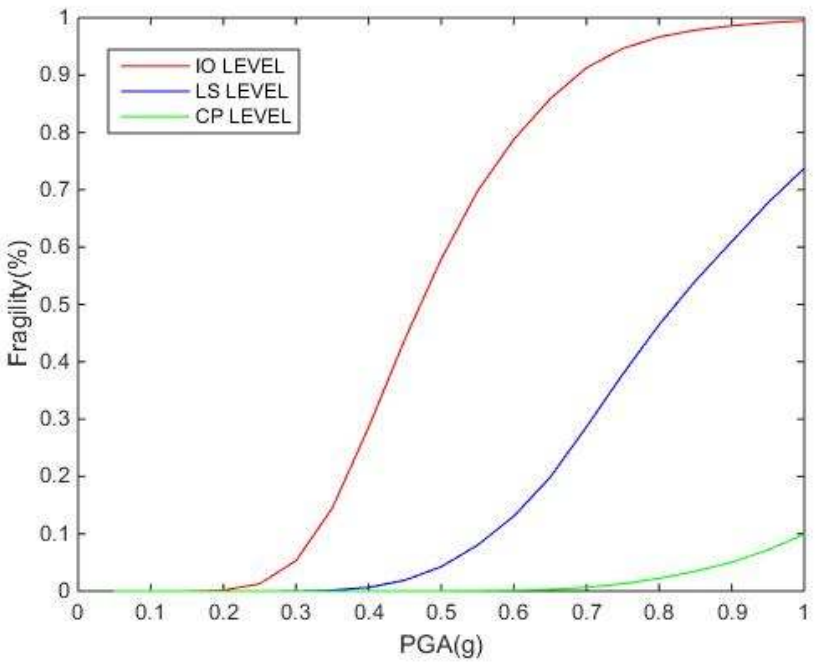
<그림 1.91> 소방시설물 프로토타입모델의 증분동적해석결과(최대지반가속도)



<그림 1.92> 지진취약도곡선(스펙트럼 가속도)

라. 최대지반가속도를 이용한 취약도 곡선

최대지반가솓로를 지진강도로 한 소방시설물 프로토타입모델의 지진취약도 곡선은 <그림 1.93>와 같다. 0.45g(고베지진)의 지진이 발생할 경우, 소방서 프로토타입 모델의 IO레벨 손상확률은 43.9%이며, LS레벨 손상확률은 19%이며, CP레벨 손상확률은 0%인 것으로 나타났다. 최대지반가속도가 커질수록 구조물이 받는 손상은 확률적으로 증가함을 확인할 수 있다. 2016년 9월 12일 발생한 경주지진의 계측소별 최대지반가속도는 <표 1.61>과 같다. 3개의 관측소에서 측정된 최대지반가속도와 취약도 곡선을 비교하여 소방서프로토타입의 손상확률을 평가하였다. DKJ 관측소의 경우, 진앙거리가 22km로 MKL 관측소(5.9km)에 비해 진도감쇠효과로 인해 작은 최대지반가속도가 측정되었다. DKJ 관측소의 최대지반가속도에 의하면 모든 성능수준을 초과할 확률이 0%이다. MKL 관측소의 최대지반가속도에 의하면 소방서 프로토타입 구조모델의 층간변위가 IO레벨을 초과할 확률이 E-W성분의 경우 14.4%, N-S성분의 경우 3.2%이며, LS레벨을 초과할 확률은 두 모델 모두 0%에 가까웠다. USN관측소 최대지반가속도에 의하면 소방서 프로토타입 구조모델의 층간변위가 IO레벨을 초과할 확률이 E-W성분의 경우 28.5%, N-S성분의 경우 36.2%이며, LS레벨을 초과할 확률은 두 모델 모두 1%에 가까웠다. 경주지진 피해양상이 마감콘크리트에 미세균열과 타일마감재 균열, 슬라브 균열 등 미세균열으로 나타난 것으로 보아, FEMA 356에서 정의하는 IO레벨 성능수준의 피해(미세 균열 발생. 소수의 부재에서 제한적인 항복. 압축 파괴 없음.)와 유사한 형태로 발생한 것을 확인할 수 있었다.



<그림 1.93> 지진 취약도 곡선(최대지반가속도)

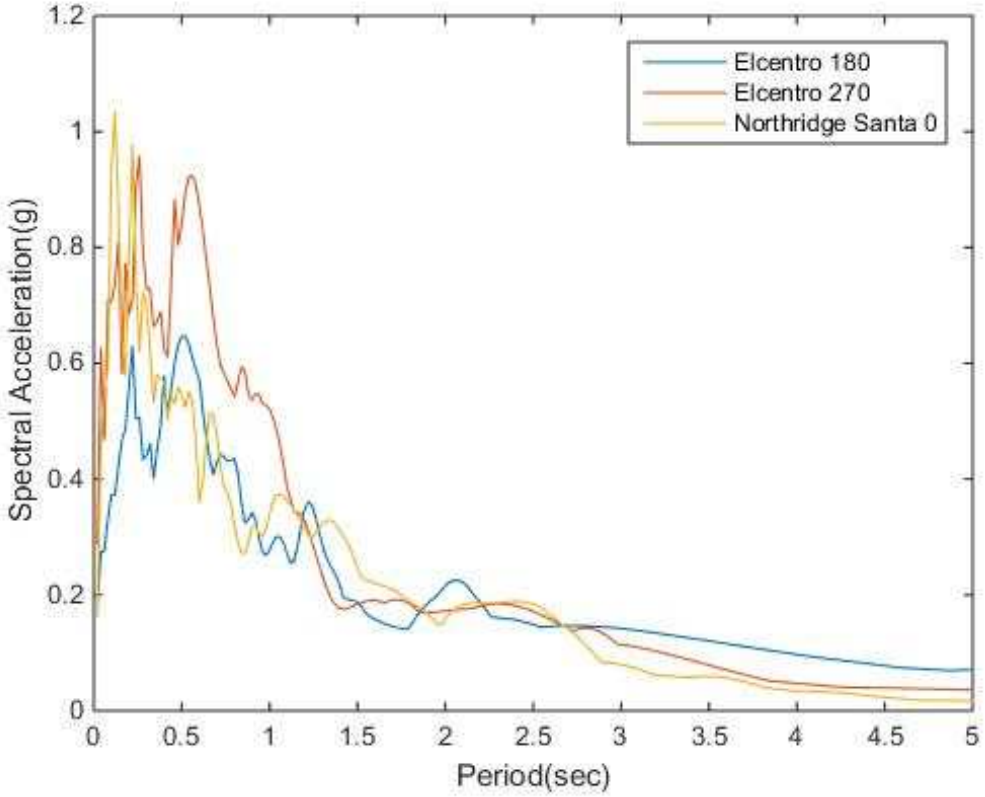
<표 1.61> 912 경주지진 최대지반가속도에 의한 취약도 분석

Station	Component	PGA(g)	성능수준	손상확률(%)
MKL	E-W	0.346	IO level	14.4%
			LS level	0.1%
			CP level	0%
	N-S	0.275	IO level	3.2%
			LS level	0.01%
			CP level	0%
DKJ	E-W	0.091	IO level	0%
			LS level	0%
			CP level	0%
	N-S	0.098	IO level	0%
			LS level	0%
			CP level	0%
USN	E-W	0.400	IO level	28.5%
			LS level	0.6%
			CP level	0%
	N-S	0.430	IO level	36.2%
			LS level	1.2%
			CP level	0%

4. 지진강도에 따른 취약도 곡선 비교

가. 예제 지진시나리오의 분석

철근콘크리트 구조물의 취약도 곡선은 지진강도에 따라 다양하게 도출할 수 있다. 본 연구에서는 지진데이터의 최대지반가속도와 스펙트럼 가속도, 스펙트럼 속도를 통하여 소방서 프로토타입 구조모델의 취약도 곡선을 도출하였다. 본 절에서는 임의의 지진 데이터를 통하여 얻어진 최대지반가속도와 스펙트럼 가속도, 스펙트럼 속도에 따른 대상구조물의 성능수준을 분석하였다. 본 연구 검증에 사용될 지진데이터는 Mexico city지진과 El centro 지진을 선택하였다. Elcentro 지진의 경우, 단주기성분이 많이 포함된 지진으로 단주기건물에 영향력이 큰 지진이며, Mexico city 지진은 장주기성분이 많이 포함ㅎ된 지진으로 장주기 건물에 영향력이 큰 지진이다. <그림 1.94>는 Elcentro 지진과 Mexico city 지진의 응답스펙트럼 가속도와 속도 그래프이다. <그림 1.94>에서 보면 Elcentro 지진의 경우 주기가 0.2초~0.7초 사이에서 최댓값을 보여주었으며, Mexico city 지진의 경우, 주기 2초 부근에서 최댓값이 나타났다. <표 1.62>는 4개 지진파에 대한 최대지반계수, 스펙트럼 가속도이다.



<그림 1.94> Elcentro, Mexico city 지진의 응답스펙트럼 가속도

<표 1.62> Elcentro, Mexico city 지진의 최대지반가속도, 스펙트럼가속도, 속도

지진파	최대지반가속도(g)	스펙트럼가속도(g) $T_n = 0.46\text{sec}$	스펙트럼속도(m/s) $T_n = 0.46\text{sec}$
Elcentro 180	0.21	0.60	0.044
Elcentro 270	0.35	0.88	0.064
Northridge Santa 0	0.37	0.53	0.038

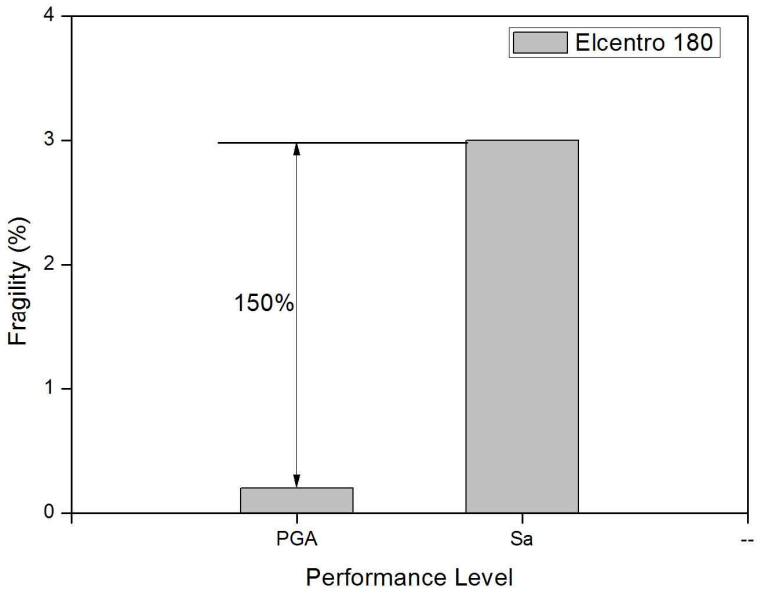
나. 예제 지진시나리오에 따른 취약도 분석

Elcentro 180, 270, Northridge Santa 0 3가지 예제 지진 시나리오의 최대지반가속도, 스펙트럼 가속도와 그림 139와 그림 140을 통하여 소방서 1차 프로토타입 구조모델의 취약도 차이를 분석하였다. Elcentro 180 지진의 경우, 최대지반가속도는 0.21g 이며, 스펙트럼 가속도는 0.6g를 나타냈다. 최대지반가속도와 층간변위비를 통한 취약도곡선과 스펙트럼 가속도와 층가변위비를 통한 취약도곡선을 이용하여 IO레벨 성능수준(층간변위비 1%)를 초과하여 손상될 확률은 각 각 0.2%와 3.0%가 도출되었다. 동일한 지진데이터에 대하여 동일한 성능수준을 초과할 확률은 응답스펙트럼 가속도를 사용한 경우 <그림 1.95>과 같이 1.5배 더 크게 나왔다. 또 다른 지진인 Elcentro 270의 경우 최대지반가속도는 0.35g이며, 스펙트럼 가속도는 0.88g가 나왔으며, 이를 통하여 IO레벨 성능수준을 초과하여 구조물의 손상이 발생할

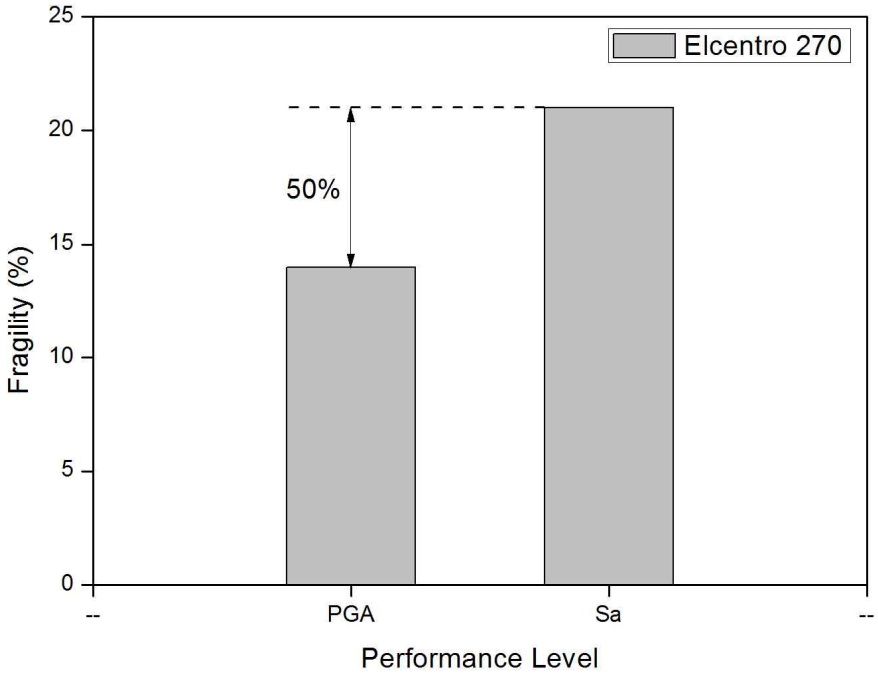
확률은 14%(최대지반가속도), 21%(스펙트럼 가속도)가 나왔다. 스펙트럼 가속도를 지진강도로 선정하여 취약도 분석을 진행한 경우 <그림 1.96> 와 같이 더 큰 손상확률이 0.5배 더 크게 발생하였다. Northridge Santa 0 지진의 경우, 최대지반가속도가 0.37g, 스펙트럼가속도는 0.53g를 나타냈으며, IO레벨 성능수준을 초과할 확률은 최대지반가속도를 지진강도로 선정하였을 때 20.1%, 스펙트럼가속도를 지진강도로 설정하였을 때 0.8%를 나타냈다. 스펙트럼 가속도를 지진강도로 선정하여 취약도 분석을 진행한 경우 <그림 1.97>와 같이 더 큰 손상확률이 2.5배 더 크게 발생하였다.

<표 1.63> 지진강도에 따른 성능수준차이

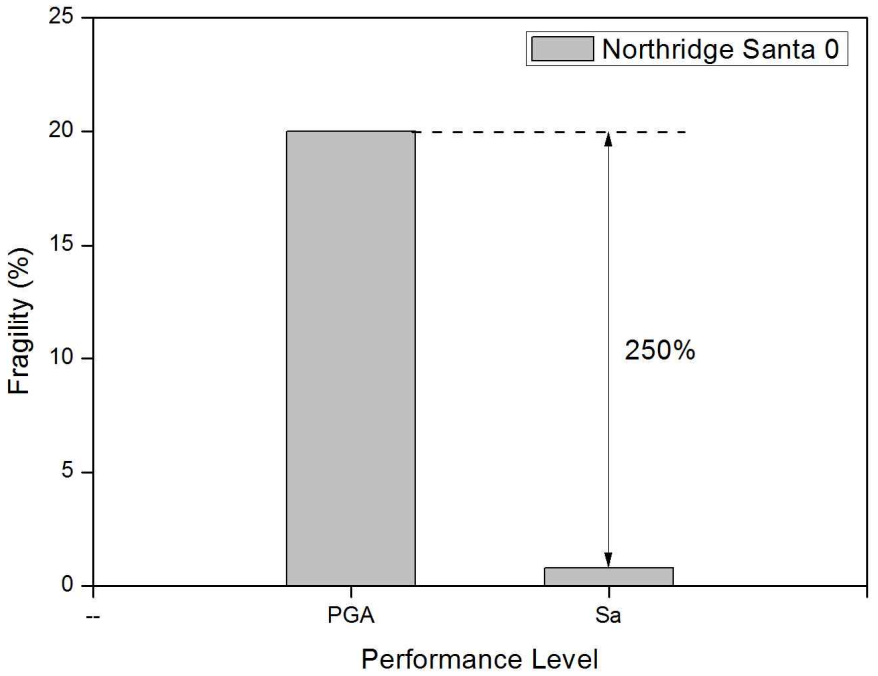
지진파	지진강도	지진강도 수치	성능수준	손상확률
Elcentro 180	최대지반가속도(g)	0.21	IO level	0.2%
			Ls level	0%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.60	IO level	3.0%
			Ls level	0%
			CP level	0%
Elcentro 270	최대지반가속도(g)	0.35	IO level	14%
			Ls level	0.1%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.88	IO level	21%
			Ls level	0.5%
			CP level	0%
Northridge Santa 0	최대지반가속도(g)	0.37	IO level	20.1%
			Ls level	0.3%
			CP level	0%
	스펙트럼가속도(g)	0.53	IO level	0.8%
			Ls level	0%
			CP level	0%



<그림 1.95> Elcentro 180 지진에 대한 IO레벨을 초과할 손상확률



<그림 1.96> Elcentro 270 지진에 대한 IO레벨을 초과할 손상확률



<그림 1.97> Northridge Santa 0 지진에 대한 IO레벨을 초과할 손상확률

5. 소 결

소방서 1차 프로토타입 구조모델의 보유성능파악을 위해 확률론적으로 지진취약도 곡선을 도출하였다. 구조물의 보유성능을 파악하기 위해 지진강도와 지진반응계수의 선택은 가장 중요한 부분이다. 최대지반가속도와 스펙트럼지진가속도를 변수로 2가지 취약도 곡선을 구성하였다. 그리고 2가지 취약도곡선을 이용하여 특정 지진파에 대한 FEMA 356의 철근콘크리트 모멘트 골조의 성능수준에 따른 손상확률을 도출하여 지진파에 대한 보유성능 수준을 확률적인 방법으로 구했다. 지진파 지진강도(최대지반가속도, 스펙트럼가속도)의 선정에 따라 대상 구조물의 보유성능수준평가결과에 차이가 발생할 수 있기 때문에, 지진파의 지진강도선정은 보유성능평가에 중요한 요소이다. 지진강도 선정에 따른 소방서 프로토타입의 보유성능평가의 결과는 다음과 같다.

- ❍ 지진데이터의 지진강도를 최대지반가속도와 스펙트럼가속도로 선정하여, 확률론적인 접근방법인 취약성 분석을 진행하였다. 3개 관측소에 따른 경주지진데이터의 최대지반가속도를 통해 철근콘크리트 구조모델의 취약도를 평가한 결과 MKL 관측소의 최대지반가속도는 E-W성분은 0.346g, N-S성분은 0.275g로 관측되었으며, FEMA 356에서 정의하고 있는 IO레벨 성능수준인 층간변위비 1%를 초과할 손상확률은 각각 14.4%와 3.2%로 나타났다. USN 관측소의 최대지반가속도는 E-W성분의 경우 0.4g, N-W성분의 경우 0.43g로 관측되었으며, IO레벨 성능수준을 초과할 확률은 각각 28.5%와 36.2%로 나타났다. LS레벨 성능(층간변위비 2%), CP레벨 성능(층간변위비 4%)를 초과할 확률은 0%에 가깝게 도출되었다. 실제 경주지진 피해가 FEMA 356에서 제시하는 IO레벨의 대부분 경미한 균열에 미친 것을 확인할 수 있었다.
- ❍ 3가지 특정지진파에 대하여 지진강도에 따른 취약도곡선의 보유성능평가결과 비교를 진행하였다. 최대지반가속도와 스펙트럼가속도를 사용하여 프로토타입의 보유성능평가결과, 큰 차이가 나타났다. Elcentro 180 지진과 Elcentro 270 지진은 스펙트럼가속도를 사용한 IO레벨에 대한 보유성능평가결과가 최대지반가속도를 사용한 결과보다 각각 1.5배 0.5배 더 크게 나타났으며, Northridge Santa 0 지진에 대해서는 최대지반가속도를 사용한 결과가 스펙트럼가속도를 사용한 결과보다 2.5배 더 크게 도출되었다. 구조물의 보유성능평가 시 지진강도의 선정이 중요한 변수로 작용된 것으로 사료된다.

6절. 결론

1절에서는 구조재 및 비구조재의 최적지진취약도 평가 기법 개발에 대한 연구를 수행하였다. 수행결과 결론은 다음과 같다.

- ○ 건축물의 요소정보를 분류하는 기준은 크게 2가지의 형태로 나눌 수 있는데, FEMA-P58에서 사용하는 건축물을 구성하는 부재레벨에서의 요소정보 분류체계와 FEMA-P58외의 자료에서 사용하는 시스템 레벨에서의 요소정보 분류체계이다. 요소정보 분류체계에 따라 구조재 1058건, 비구조재 985건에 대한 지진취약도 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 지진취약도에 대한 데이터베이스는 시스템레벨과 부재레벨에서의 요소정보에 따른 지진취약도를 포함하여, 향후 연구개발에 사용될 데이터기반을 마련하였다.
- ○ 주요시설물인 학교시설물과 소방시설물에 대한 프로토타입 모델을 개발하였다. 학교시설물은 80년대 “학교교사 표준 설계도”를 기준으로 기둥사이에 조적채움벽이 있는 3층 7경간 RC모멘트골조로 선정하였다. 학교시설물의 조적채움벽에 의한 기둥의 단주효과가 예상되므로, 해석시 조적채움벽에 대한 영향을 고려해야 한다. 소방시설물은 1층의 층고가 높은 4층 5경간 RC모멘트 골조로 선정하였다. 추가적으로 포항지진시 피해가 많이 발생한 1층에 연약층을 갖는 필로티구조물에 대한 프로토타입 모델을 개발하였다.
- ○ 지진취약도 함수를 도출하는 방식엔 expert-based method, empirical method, analytical method, hybrid method가 있으며, analytical method는 해석방식에 따라, linear static analysis (response spectrum analysis), nonlinear static analysis (capacity spectrum analysis), time history analysis, incremental dynamic analysis로 나뉜다. 구조재 및 비구조재의 지진취약도를 평가하기 위해 time history analysis를 이용해 seismic demand analysis를 수행하였으며, 학교시설물 프로토타입모델에 대해 지진취약도를 평가하였다. 평가결과, 경주지진의 PGA 0.434g에 대해, 구조재의 한계상태에 따른 손상확률은 IO(43.54%), LS(10.66%), CP(1.42%)로 분석되었다. 변위민감 비구조재의 손상확률은 2층에서 가장 큰 것으로 분석되었으며, 가속도민감 비구조재의 손상확률을 층수가 높을수록 손상확률이 증가하는 경향을 보였다.
- ○ 최적지진강도와 최적지진반응계수를 도출하기 위해, 소방시설물의 스펙트럼가속도와 최대지반가속도를 지진강도로 사용하였을 때 지진취약도에 대한 비교분석을 수행하였다. 최대지반가속도를 지진강도로 사용하였을 때 지진취약도는 동일한 지진에 대한 스펙트럼가속도의 지진취약도보다 최대 2.5배 크게 도출되었다. 따라서 구조재 및 비구조재의 지진취약도 도출시 적절한 지진강도의 선정이 중요한 변수가 될 수 있다.

제2장. 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발

1절. 구조재 및 비구조재의 목표성능수준 구축

1. 성능수준의 정의

구조재에 대한 내진설계는 미국의 경우 UBC 1927(Uniform Building Code)에서 처음 건축물에 대한 내진설계기준이 적용되었고, 이후 UBC 1935에서 비교구조요소에 대한 내진설계기준이 도입되었다. 국내의 경우, 국내 건축법이 처음 도입된 1962년 건축법 제 10조 구조내력에서는 건축물이 지진에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다고 명시하고 있지만, 건축물의 내진설계기준에 대한 상세내용은 1988년 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에 처음 규정이 되었다. 국내 건축물의 비구조재에 대한 내진설계 기준은 한국건축구조기준(Korean Building Code, KBC) 2005에서 처음 도입이 되었다.

처음 내진설계가 도입되었을 당시 지진에 대한 성능수준은 명확히 정의되지 않았다. 강한지진에 대해 견딘 건축물의 구조를 모방하거나, 붕괴 및 파괴가 발생한 건축물 구조를 피하는 방법으로 내진설계의 개념을 도입하였다. 처음 건축물의 내진성능목표에 대한 정의는 1973년 Blue Book[2)]에서 아래와 같이 도입 되었다.

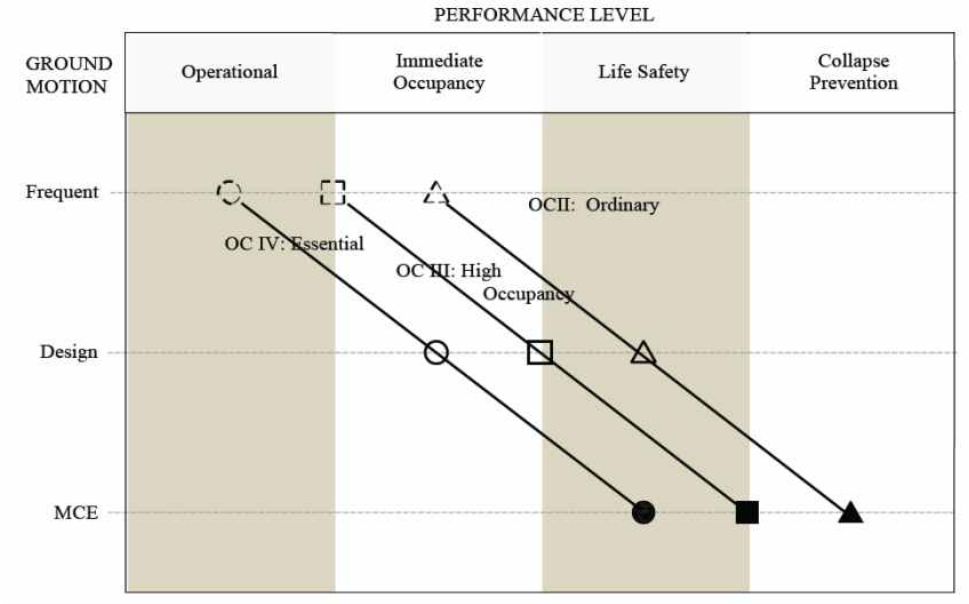
- ❍ 주요지진(major earthquake)에 대해 붕괴수준이 아닌 손상 허용
- ❍ 중간지진(moderate earthquake)에 대해 복구가 가능한 손상 허용
- ❍ 약한지진(minor earthquake)에 대해 중요 손상 발생 없음

1973년 Blue Book에 대한 영향으로 1976년 UBC에서는 건축물의 설계가속도를 최대 50%까지 증가시킬 수 있는 건축물의 용도에 따른 중요도 계수(importance factor)를 도입하였다. 1976년 UBC의 중요도 계수는 주요시설물에 대해선 1.5, 한 방에 300명 이상 수용할 수 있는 시설에 대해선 1.25, 그 외 건축물에 대해선 1.0으로 정의하고 있다. 즉, 건축물의 용도에 따라 내진설계의 정도를 반영하기 시작하였다.

1978년 ATC-3(Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings)는 500년 재현주기 지진(50년동안 10% 발생가능성)에 대해 건축물이 인명안전수준(life safety)의 성능을 제공하여야 한다고 명시하고 있다. 설계가속도에 대한 중요도계수는 삭제되었고, 그 대신 주요시설물에 대해선 변형에 대한 제한을 설정하였다. 이후 1997년 미

2) SEAOC (Structural Engineer Association of California)에서 발간한 Seismic Design Recommendations로 일반적으로 Blue Book으로 불림

국의 재해경감프로그램(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)에서 2500년 재현주기 지진(50년 동안 2% 발생가능성)인 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대해 낮은 붕괴가능성을 건축물의 성능목표로 제시하였다. 또한 중요도계수를 다시 도입하였다. 2009년에 ATC-63프로젝트의 보고서인 FEMA P695 (Quantification of Building Seismic Performance Factors)에서 낮은 붕괴가능성을 10%로 정의하고 있다.



<그림 2.1> 건축물 용도에 따른 내진성능목표

현재 건축물의 용도에 따른 내진성능목표는 NEHRP 2009에서 제시하고 있으며, 미국의 IBC(International Building Code)나 우리나라의 KBC에서도 <그림 2.1>에 제시된 내진성능목표를 사용하고 있다. 건축물의 category는 용도에 따라 나뉘며 아래와 같이 붕괴가능성을 정량적으로 제시하고 있다.

- ❍ Category Ⅱ: MCE_R[3]에 대한 10% 붕괴가능성
- ❍ Category Ⅲ: MCE_R에 대한 5~10% 붕괴가능성
- ❍ Category Ⅳ: MCE_R에 대한 2.5~5% 붕괴가능성

건축물에 적용되는 내진성능목표는 위와 같지만, 건축물의 용도 (특히 병원), 경제적 손실에 대한 내진성능목표에 대해선 따로 정의가 필요하다. 왜냐하면 건축물의 내진성능목표는 건축물의 기능을 수행하기 위한 안전성(safety)측면의 목표이기 때문에, 건축물의 사용성(serviceability)나 재해복구와 같은 의사결정을 지원할 수 있는 경제적 손실에 대한 자료를 제공하기 어렵기 때문이다.

3) Risk Targeted Maximum Considered Earthquake, 위험도기반최대고려지진

2. 비구조재 내진설계 및 내진성능평가 변화 분석

2016년 9월 12일 규모 5.8의 경주지진에 대한 피해현황을 정리한 행정안전부의 9.12 백서에 따르면, 총 5,664동의 주택파손이 있었으며, 이 중 5,640건이 비구조재의 피해로 집계되었다. 최근 우리나라의 발생한 지진피해현황과 과거 사례에서 밝혀졌듯이, 건축물 비구조재에 대한 피해가 지진손실에 상당부분 차지하지만, 건축물 중 구조재에 대한 내진설계 및 내진성능평가에 초점을 맞추고 있으며, 아직까지 비구조요소의 내진설계 및 내진성능평가에 대해 활발히 수행되고 있지 않고 있다.

우리나라 비구조요소 내진설계기준의 벤치마크 대상인 미국의 기준을 살펴보면, 여러 지진피해의 조사를 통해 비구조재의 지진에 대한 응답 및 손상과 같은 특성을 내진규정에 반영하고 있다. 1964년 3월 27일 발생한 규모 9.2의 알래스카(Alaska) 대지진을 조사한 보고서(Ayres 1964)에 따르면, 천정재, 파티션, 저장용 캐비닛 등과 같은 비구조요소의 손상에 대해 정리하였고, 비구조요소의 지진피해가 건축물에서 발생하는 변위 및 가속도와 밀접한 연관이 있다고 보고하고 있다. 1971년 2월 9일 캘리포니아 남부에서 발생한 규모 6.6이 산훼르난도(San Fernando) 지진피해 보고서(Lew et al. 1971, Ayres and Sun 1973)에서는 주요시설물인 병원에 대한 조사가 다수 이루어 졌고, 엘리베이터, 스프링클러 파이프, 공기청정시스템과 같은 기계 및 전기 비구조요소에 대한 피해현황을 조사하였다. 이후 1989년 10월 17일 발생한 규모 6.9의 로마프리에타(Loma Prieta)지진, 1994년 1월 17일 발생한 규모 6.7의 노스리지(Nothridge)지진의 피해조사보고서(Rihal 1994, OSHPD 1996)에서는 비구조요소의 손상과 지진데이터와의 상관관계에 대한 분석을 수행하였다. 가장 최근에 수행된 비구조요소에 대한 지진피해조사는 2014년 8월 24일 캘리포니아 북부에 발생한 규모 6.0의 South Napa지진에 대한 것으로, 조사된 내용은 FEMA P-1024에 수록되어 있다. 이와 같은 지진피해 조사결과를 통해 미국의 재해경감프로그램 (National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)에서 지속적으로 비구조요소에 대한 내진설계 규정을 개정하고, UBC와 2000년 이후 IBC에서 개정된 내용으로 적용하고 있다.

가. 비구조재의 시대별 내진설계 대상

건축물에 설치되는 비구조요소는 건축물의 용도에 따른 기능유지를 위해 필수적이므로, 지진에 의한 피해를 방지하기 위해선 비구조요소도 필수적으로 내진설계가 필요하다. 건축물에 대한 내진설계기준이 처음 도입이 되었을 때 모든 건축물에 대해 내진설계가 적용되지 않았던 것과 마찬가지로, 처음 비구조요소에 대한 내진설계기준이 도입되었을 당시 모든 비구조요소가 내진설계대상에 포함되지 않았다.

<표 2.1>는 UBC 1935부터 IBC 2015까지 내진설계대상 비구조요소의 주요변화내용을 정리한 것이다. 비구조요소의 내진설계기준이 도입된 UBC 1935를 살펴보면, 커튼월, 담장, 방

화벽, 칸막이벽과 같은 건축물 내외부 비구조벽체가 내진설계대상에 처음 포함이 된 것을 알 수 있다. UBC 1955에서 건축물 내부와 외부의 비구조벽체를 나누기 시작하였고, UBC 1949에서 높이 6feet(1829mm)이상인 조적벽, UBC 1955에서 높이 10feet(3048mm)이상인 비내력벽과 칸막이벽에 대한 높이 규정이 마련되었다. 이후 UBC 1967에서 외부 비구조벽체의 접합부와 접합요소가 비구조요소로 추가되고, 내부 비구조벽체에 대한 높이 규정이 실의 높이의 3/4로 변경되었으며, 외부 비구조벽체에 콘크리트펜스가 추가되었다.

UBC 1973부터 천장재와 캐비닛이 내진설계대상으로 포함되었는데, 이는 알래스카대지진에서 천장재와 캐비닛의 피해가 다수 관찰되어 내진설계의 필요성이 인식되었기 때문이다. UBC 1979에서는 굴뚝 및 골조구조에 지지된 수직 배기구가 캔틸레버 부재로 명확히 분류가 되었으며, 외부 비구조벽체 접합시스템의 조임구가 내진설계대상 비구조요소에서 제외되었다. 외부 비구조벽체 접합시스템의 조임구는 이후 UBC 1988에서 다시 추가되어 현재까지 내진설계대상에 포함되어 있다.

UBC 1985에서 액세스 플로어(이중바닥)이 내진설계대상으로 포함이 되었으며, 액세스 플로어의 내진설계 제한사항으로는 활하중의 25%와 0.48kN/m2의 파티션하중을 고정하중에 더하여 설계하도록 규정하고 있다. UBC 1988에서 횡지지되거나 질량중심 위에서 골조구조에 지지된 켄틸레버부재 중 굴뚝 및 배기구가 추가되었으며, 표지판 및 광고판도 내진설계대상으로 포함이 되었다. 또한 바닥에 영구히 지지되는 5feet(1524mm)이상의 캐비닛의 경우 접합부가 추가되었다. UBC 1997에서는 천정재에 lateral bracing의 설치가 추가되었으며, 캐비닛의 높이제한이 5feet(1524mm)에서 6feet(1829mm)로 변경되었다. 추가적으로 강성의 비구조요소와 연성의 비구조요소가 내진설계대상으로 포함이 되어, 전체적으로 현재의 기준에서 고려하는 비구조요소의 내진설계대상과 비슷한 것을 알 수 있다.

2000년 이후 미국의 UBC는 IBC로 통합 되었고, IBC 2000에서는 횡지지되거나 질량중심 위에서 골조구조에 지지된 캔틸레버 부재 중 파라펫이 추가가 되었으며, 표면마감재 또한 추가 되었다. IBC 2000에서 고려하는 내진설계대상 비구조요소는 IBC 2015와 동일하며, 이는 KBC 2016과도 동일한 것을 알 수 있다.

내진설계대상 비구조요소의 변화를 살펴보면, 실제 지진피해가 발생되었던 비구조요소에 대해 내진설계대상으로 추가가 되었던 것을 알 수 있다. <표 2.1>의 12번과 13번의 경우, 구체적으로 포함되지 않은 비구조요소에 대한 내진설계를 위해 추가된 것으로 보인다. 구체적인 비구조요소에 대한 내진설계가 필요한 이유는 비구조요소의 설계하중을 구조재와 비구조요소의 증폭을 고려하여 결정하기 때문이다. 증폭을 결정하는 증폭계수의 값은 비구조요소의 주기에 따라 변하는데, 주기가 0.06초 이하인 비구조요소는 강체로 취급하여 구조재와 비구조요소의 접합부에서 증폭이 없다고 가정하여 증폭계수의 값을 1.0으로 산정한다.

<표 2.1> Seismic design part or portion changes in UBC and IBC for nonstructural element by period

Architectural Components	Year									
	1935	1955	1967	1973	1979	1985	1988	1997	2000	2015
1. Interior Nonstructural Walls and Partitions										
Plain (unreinforced) masonry walls	✓	1)	2)							
All other walls and partitions	✓	1)	2)							
2. Cantilever Elements (Unbraced or braced to structural frame below its center of mass)										
Parapets and cantilever interior nonstructural walls	✓									
Chimneys and stacks where laterally braced or supported by the structural frame	△				✓4)					
3. Cantilever Elements (Braced to structural frame above its center of mass)										
Parapets									✓	
Chimneys and Stacks							✓			
Exterior Nonstructural Walls								✓		
4. Exterior Nonstructural Wall Elements and Connections										
Wall Element	✓	1)	3)							
Body of wall panel connections			✓							
Fasteners of the connecting system			✓		X5)	X5)	✓			
5. Veneer										
Limited deformability elements and attachments									✓	
Low deformability elements and attachments									✓	
6. Penthouses (except where framed by an extension of the building frame)	✓									
7. Ceilings										
All				✓				7)		
8. Cabinets										
Storage cabinets and laboratory equipment				✓			6)	8)		
9. Access Floors										
Special access floors									✓	
All other						✓				
10. Appendages and Ornamentations	✓									
11. Signs and Billboards							✓			
12. Other Rigid Components										
High deformability elements and attachments								✓		
Limited deformability elements and attachments									✓	
Low deformability materials and attachments								✓		
13. Other Flexible Components										
High deformability elements and attachments								✓		
Limited deformability elements and attachments									✓	
Low deformability materials and attachments								✓		

1) Divided into interior nonstructural wall and exterior nonstructural wall
2) Interior nonstructural wall which extend 3/4 of the height of the room
3) Masonry and concrete fence over 6feet (1829mm) in height
4) Clearly added as a cantilever element
5) Fasteners of the connecting system excluded until UBC 1979 to UBC 1985
6) Added anchorage for permanent floor-supported cabinet and bookstacks more than 5feet (1524mm) in height (includes contents)
7) Added lateral bracing for suspended ceilings and light fixtures
8) Change the height limit of floor-supported cabinet and bookstacks from 5feet (1524mm) to 6feet (1829mm)



<그림 2.2> 시대별 UBC에 제시된 비구조재의 내진설계 대상

나. 비구조재의 내진설계를 위한 시대별 등가정적하중

UBC와 IBC의 지진하중은 ASCE/SEI 7을 reference로 삼기 때문에, 시대별 ASCE/SEI 7의 비구조요소 등가정적하중에 대해 조사하였고, 또한 ASCE/SEI 7의 참고자료가 되는 NEHRP의 시대별 Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings에서 제시하는 비구조요소 등가정적하중에 대해 조사를 수행하였다. 비구조요소의 내진설계는 등가정적하중인 F_p를 만족하도록 비구조요소와 구조재와의 접합부인 앵커를 설계한다. <표 2.2>는 UBC/IBC, ASCE/SEI 7, NEHRP에서 비구조요소 설계시 적용하는 등가정적하중 F_p을 시대별로 정리한 것이다. 비구조요소를 설계하기 위해 적용하는 등가정적하중 F_p는 1935년 UBC에 식 (2.1)과 같이 처음 도입이 되었다. UBC 1994까지는 계수 앞에 1.4의 숫자가 붙는데, 이 숫자는 지진하중에 대한 ASD하중레벨을 LRFD로 변환하기 위한 계수이다(Diebold et al. 2008).

$$F_p = 1.4CW_p \tag{2.1}$$

여기서,

C: 수평지진하중계수 (horizontal seismic force factor)

W_p: 비구조요소의 무게

UBC 1935에 따르면, 수평지진하중계수 C는 지진구역 1(Zone 1)일 경우, wall과 glazing은 0.05, cantilevers와 appendages는 0.25를 사용하도록 규정하고 있다. 지진구역 2(Zone 2)일 경우 위의 값에 2배, 지진구역 3(Zone 3)일 경우 위의 값에 4배를 사용하도록 규정한다. 비구조재의 내진설계하중에 대해 동일한 규정을 UBC 1958까지 사용하다가, UBC 1961에서 등가정적하중 F_p가 식 (2.2)과 같이 변하였다.

$$F_p = 1.4ZC_pW_p \tag{2.2}$$

여기서,

Z: 지진구역계수 (seismic zone factor)

C_p: 수평하중계수 (horizontal force factor)

UBC 1961의 경우, UBC 1935의 수평지진하중계수 C가 지진구역계수 Z와 수평하중계수 C_p로 세분화 되었다. 또한 UBC 1961에서부터 비구조요소를 포함한 내진설계규정(seismic design provision)이 appendix에서 Chapter 23으로 옮겨졌다. 이 후, UBC 1976에서 등가정적하중 F_p가 식 (2.3)과 같이 변하였다.

$$F_p = 1.4ZIC_pSW_p \tag{2.3}$$

여기서,

I: 중요도계수 (importance factor)

S: 공진계수 (site-structure resonance factor)

UBC 1976에서부터 비구조요소의 등가정적하중을 산정시 중요도계수 I를 도입하기 시작하였다. 또한 지반과 구조물의 주기에 따라 최대 1.5의 값을 갖는 공진계수 S가 추가되었다. 하지만 이 공진계수 S는 UBC 1979부터 삭제가 되었다. 이후 지반과 구조물의 주기에 따른 공진효과를 고려하기 위해, 수평하중계수 C_p값을 대다수 비구조요소에 대해 50%정도 증가를 시켜 보수적으로 고려하였다(ICBO 1979). UBC 1979부터 UBC 1994까지는 식 (2.4) 을 이용하여 비구조요소의 등가정적하중을 산정한다.

$$F_p = 1.4ZIC_pW_p \tag{2.4}$$

<표 2.2>를 살펴보면, 1985부터 1991년도 까지 FEMA 95, FEMA 222에서 제시하는 비구조요소의 등가정적하중은 식 (2.5)과 같다.

$$F_p = A_v C_c P W_c \tag{2.5}$$

여기서,

A_v: 유효최대속도와 관련된 가속도계수 (effective peak velocity-related acceleration factor)

C_c: 수평하중계수 (horizontal force factor)

P: 성능수준계수 (performance criteria factor)

W_c: 건축비구조요소의 무게

NEHRP 1985 의 내용은 ATC 3-06과 내용이 동일하며, 건축비구조요소와 전기 및 기계비구조요소에 대한 등가정적하중을 산정하는 식을 구분하였다. UBC의 식 (2.4)와 NEHRP의 식 (2.5)를 비교하면, NEHRP의 A_v는 지진구역계수 Z와 매칭이 되며, C_c는 C_p, P는 I와 서로 매칭이 되는 것을 알 수 있다. 즉, NEHRP와 UBC에서 제시하는 비구조요소에 대한 설계지진하중을 산정하는 식의 계수 형태는 다르지만 물리적인 의미는 상응한다고 할 수 있다.

<표 2.2> Comparison of changes in seismic design load for architectural nonstructural components

Year	UBC/IBC	ASCE/SEI 7	NEHRP (FEMA)
1927	-	-	-
1935-1958	$F_p = 1.4^{1)} C W_p$	-	-
1961-1973	$F_p = 1.4 Z C_p W_p$	-	-
1976	$F_p = 1.4 Z I C_p S W_p$	-	-
1979-1982	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	-	-
1985	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	-	FEMA 95, $F_p = A_v C_c P W_c$
1988	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	FEMA 95 (Edition), $F_p = A_v C_c P W_c$
1991	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	-	FEMA 222, $F_p = A_v C_c P W_c$
1993	-	$F_p = A_v C_p P W_p$	-
1994	$F_p = 1.4 Z I C_p W_p$	-	FEMA 222A, $F_p = (a_p A_p I_p / R_p) W_p$
1995	-	$F_p = (a_p A_p I_p / R_p) W_p$	-
1997	$F_p = \frac{a_p C_a I_p}{R_p}\left(1+3\frac{h_x}{h_r}\right) W_p$	-	FEMA 302, $F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS}}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)}\left(1+2\frac{z}{h}\right) W_p$
2000 (IBC로 변경)	UBC 1997과 동일	-	FEMA 368, $F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS}}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)}\left(1+2\frac{z}{h}\right) W_p$
2002	-	FEMA 368과 동일	-
2003	ASCE/SEI 7-02와 동일	-	FEMA P-450, $F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS}}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)}\left(1+2\frac{z}{h}\right) W_p$
2005	-	FEMA 450과 동일	-
2006~2018	ASCE/SEI 7-05와 동일	-	-

1) A coefficient to change ASD(Allowable Stress Design)l to LRFD(Load Resistance Factor Design)

NEHRP 1994 (FEMA 222A)에서 제시하는 비구조요소의 등가정적하중을 산정하는 식은 식 (2.6)과 같다. 또한 식 (2.7)과 같이 비구조요소 등가정적하중에 상한값과 하한값에 대한 범위를 제한하였다.

$$F_p = (a_p A_p I_p / R_p) W_p \tag{2.6}$$

$$0.5 C_a I_p W_p \le F_p \le 4.0 C_a I_p W_p \tag{2.7}$$

여기서,

a_p: 증폭계수 (component amplification factor)

A_p: 가속도계수 (component acceleration factor)

I_p: 중요도계수 (importance factor)

R_p: 반응수정계수 (component response modification factor)

C_a: 지진계수 (seismic factor)

식 (2.6)을 살펴보면, 비구조요소의 수평하중계수 C_c가 비구조요소와 구조물간의 상호작용을 나타내는 증폭계수 a_p와 비구조요소의 에너지흡수능력을 나타내는 반응수정계수 R_p로 구분되었음을 알 수 있다. 증폭계수는 비구조요소의 고유주기가 0.06초 이하인 경우(rigid) 1.0의 값을 갖고, 고유주기가 0.06초를 초과할 경우(flexible) 2.5의 값을 갖는다. 또한 가속도계수 A_p의 경우, 구조물의 고유주기와 비구조요소의 설치높이를 고려하여 계산된다. 지진계수 C_a는 지진구역계수와 지반의 종류에 따른 증폭을 고려한 계수이다. FEMA 222A에서 제안하는 비구조요소의 등가정적하중을 산정하는 식은 구조물의 고유주기를 고려한다는 것을 제외하고 현재 사용되고 있는 식과 거의 유사한 것을 알 수 있다. 또한 1995년 ASCE/SEI 7에서 비구조요소에 대한 FEMA 222A의 식이 그대로 받아들여졌고, UBC 1997에서는 식 (2.8) 과 같이 비구조요소의 증폭계수, 반응수정계수, 설치높이를 반영하기 시작하였다. 식 (2.9)는 식 (2.8)로 구해지는 등가정적하중의 상한값과 하한값의 범위이다.

$$F_p = \frac{a_p C_a I_p}{R_p}\left(1 + 3\frac{h_x}{h_r}\right) W_p \tag{2.8}$$

$$0.7 C_a I_p W_p \le F_p \le 4.0 C_a I_p W_p \tag{2.9}$$

여기서,

h_x: 비구조요소의 설치높이

h_r: 건축물의 밑면으로부터 지붕층까지의 높이

UBC 1997부터 FEMA 222A의 영향으로 1961년부터 사용하던 비구조요소의 수평하중계수 C_p를 증폭계수 a_p와 반응수정계수 R_p로 분리하여 고려하기 시작하였다. 또한 비구조요소가 설치되는 높이에 따른 가속도의 증폭을 고려하였다. 현재 KBC 2016과 IBC 2015에서 비구조요소의 등가정적하중을 산정하는 식은 NEHRP 1997 (FEMA 302)에서 처음으로 제안한 식 (10)과 같다. 식 (2.10)은 식 (2.11)으로 계산되는 등가정적하중의 상한값과 하한값의 범위이다.

$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS}}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)}\left(1+2\frac{z}{h}\right)W_p \tag{2.10}$$

$$0.3 S_{DS} I_p W_p \le F_p \le 1.6 S_{DS} I_p W_p \tag{2.11}$$

여기서,

S_{DS}: 단주기설계스펙트럼가속도

z: 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 설치된 높이

h: 구조물의 밑면으로부터 지붕층까지의 평균높이

IBC 2003이후 현재까지, IBC, ASCE/SEI 7, NEHRP에서 제안하는 비구조요소의 등가정적하중을 산정하는 식은 식 (2.10)과 동일하다. NEHRP 2000 (FEMA 368)에서는 비구조요소의 주기 T_p가 식 (2.12)로 구해지는 T_{flx}보다 크다면, 식 (2.12)으로 계산된 비구조요소의 등가정적하중 F_p는 T_{flx}/T_p 만큼 감소시켜 사용한다는 조항이 추가되었다. 하지만 이 조항은 ASCE/SEI 7-05에서 받아들이지 않아, 현재 IBC 2015와 ASCE/SEI 7-16에서도 비구조요소의 주기를 고려하지 않고 있다.

$$T_{flx} = \left(1+0.25\frac{z}{h}\right)\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{2.12}$$

여기서,

S_{D1}: 1초주기설계스펙트럼가속도

다. 비구조요소의 내진설계를 위한 등가정적하중 산정식

KBC와 IBC의 비구조요소에 대한 설계하중을 산정하는 식을 살펴보면, 비구조요소의 설계용 등가정적하중은 다음의 다섯 가지 항목을 고려하여 산정한다.

○ $0.4S_{DS}$: 유효지반가속도 (Effective Peak Acceleration, EPA)

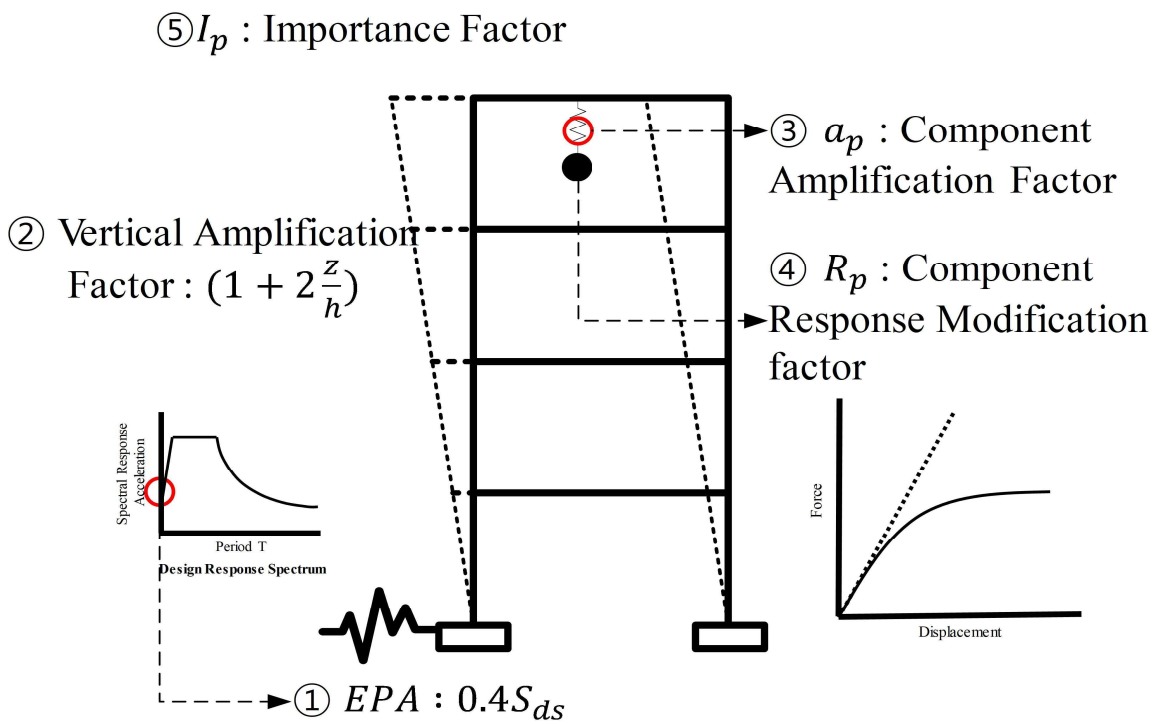
○ $1+2z/h$: EPA에 대한 건축물 높이에 따른 최대층가속도 (Peak Floor Acceleration ,PFA) 수직증폭계수

○ a_p: PFA에 대한 비구조요소의 응답증폭계수

○ R_p: 비구조요소의 연성도에 대한 반응수정계수

○ I_p: 중요도계수

<그림 2.3>은 비구조요소의 등가정적하중 산정시 고려되는 요소는 표현한 것이다. 처음 UBC 1935에서 비구조요소의 등가정적하중 산정시 지역계수만을 고려하였지만, 이후 실제 피해사례에 대한 연구를 통해 비구조요소의 설치높이, 구조재와의 접합, 비구조요소의 비선형선등을 고려하기 시작하였다. 위에 제시된 다섯 가지 항목에서 R_p와 I_p를 제외한 계수들은 구조물 또는 구조요소와 비구조요소의 동적상호작용에 의해 결정되는 계수들이다. 현재 내진설계기준이나 내진성능평가기법(ASCE/SEI 41-13)에서는 이러한 동적상호작용을 간단히 계산하도록 제시하고 있다.



<그림 2.3> Considerations to determine the seismic design force of nonstructural elements

비구조요소의 내진설계에 사용되는 등가정적하중은 주로 비구조요소가 받는 Peak Floor Acceleration (PFA)로 결정되는데, 이 PFA는 건축물의 고유주기, 모드형상과 같은 동적특성에 영향을 받음에도 불구하고, 현재까지는 단순히 Effective Peak Acceleration (EPA)와 건축물의 층수에 따라 계산된다. PFA의 수직증폭계수$(1+2z/h)$에 대한 기존 연구들(Fathali and Lizundia 2011, Fathali and Lizundia 2012, Chen et al. 2016)에 따르면, 건축물 높이에 따른 PFA의 증폭계수는 장주기인 높은 건축물에 대해 얻어진 결과이기 때문에, 대다수 건축물에는 적합하지 않는다고 보고되고 있다. 또한 비구조요소의 응답증폭계수 a_p는 주기 0.06초를 기준으로 초과시에는 2.5(flexible component), 이하일 때는 1.0(rigid component)으로 제시하지만, 이를 제시한 FEMA 222A에서는 구조재와 비구조요소를 선형으로 가정하여 해석된 값으로 얻어진 결과이기 때문에, 비구조요소의 비선형이 주기에 미치는 영향을 충분히 고려하고 있지 못하므로 한계점이 있다고 할 수 있다.

3. 병원건축물 구조재 및 비구조재의 내진성능평가 기준 분석

우리나라에서는 병원건축물의 수술시설과 응급시설의 유무, 연면적에 따라 중요도를 분류하여 내진성능목표를 설정한다. 종합병원·수술시설이나 응급시설이 있는 병원은 중요도(특)으로 분류되고, 수술시설과 응급시설 모두 없는 병원이나 연면적 1000m^{2}이상인 의료시설은 중요도(1), 이외의 건축물은 중요도(2)에 해당한다. 하지만 병원건축물은 구조재의 구조적 안전성도 중요하지만, 비구조재나 수술시설과 같은 content의 사용성도 내진성능목표에 고려하여야 한다.

미국 캘리포니아주의 병원건축물은 구조재 및 비구조재의 구체적인 내진성능목표를 설정하고 있다. 1971년 발생한 산페르난도 지진시 병원건축물의 붕괴 및 인명피해가 발생하여, 병원건축물에 대한 내진성능향상 프로그램을 수립하는 법안인 Alfred E.Alquist Hospital Facilities Seismic Safety Act(이하 Afred Act)가 시행되었다. 그리고 이 프로그램은 캘리포니아주 보건개발국(Office of Statewide Health Planning and Development, OSHPD)의 관할하에 주도되었다.

Afred Act 시행 후 병원건축물의 내진성능의 향상을 기대할 수 있었지만, 1994년에 발생한 노스리지 지진에서 줄어든 구조재의 피해에 비해 비구조재의 피해가 막심하게 발생하게 되었다. 이에 따라 캘리포니아 주는 Afred Act를 확장하여 Senate Bill 1953(1994, SB 1953)을 시행하였다. SB 1953에 따라 캘리포니아주 내의 모든 병원 건물에는 구조요소 및 비구조요소의 성능 분류가 적용되었다. 구조재 성능 분류인 SPC(Structural Performance Category)와 비구조재성능 분류인 NPC(Non-structural Performance Category)는 각각 1~5등급의 5개의 세부분류사항으로 나누어진다. 자세한 내용은 <표 2.3>과 같다.

<표 2.3> OSHPD에서 정의된 병원건축물 구조재 및 비구조재의 등급에 따른 정의

요소분류	등급	정의
구조재	SPC 1	• 1973년 이전에 설계되었으며, 붕괴의 위험이 있는 건물. • 2008년까지 SPC 2등급으로 상향되어야 함.
	SPC 2	• 1973년 이전에 설계되었으며, Afred Act지진 안전법의 조항을 준수하지 않는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년까지 Afred Act 지진 안전법의 조항을 준수하여야 함.
	SPC 3	• 높은 지진발생지역에서 철골 모멘트골조를 사용하는 건물. • 1994년 이전에 설계되었으며, Afred Act지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년 이후까지 사용이 가능.
	SPC 4	• Afred Act 지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에 정상적인 의료서비스 제공에 제한이 있는 건물. • 2030년 이후까지 사용이 가능.
	SPC 5	• Afred Act 지진 안전법의 조항을 준수하는 건물. • 강한 지진에도 정상적인 의료서비스 제공이 가능한 건물. • 2030년 이후에도 제한 없이 사용이 가능.
비구조재	NPC 1	• 다른 NPC 비구조요소 정착기준을 충족하지 못하는 건물.
	NPC 2	• 통신, 의료가스, 화재경보 등의 설비가 CBC(California Building Code) Part 2, title 24에 따라 정착되어 있는 건물. • 2002년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 3	• NPC 2의 기준을 충족하며, 수술실, 임상실험실, 방사선실 등에서 비구조요소가 Part 2, title 24에 따라 정착된 건물. • 2008년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 4	• NPC 3의 기준을 충족하며, 모든 비구조요소는 Part 2, title 24에 따라 정착된 건물. • 내진설계범주 및 연장요청에 따라 2020년 또는 2030년까지 본 등급의 유지가 가능.
	NPC 5	• NPC 4의 기준을 충족하며, 의료시스템의 정상운영을 위한 72시간의 비상공급이 가능한 건물. • 2030년까지 본 등급의 유지가 가능.

4. 손실기반 목표성능수준 구축

1990년대부터 적용이 시작된 성능기반내진설계법(performance-based seismic design, PBSD)은 건축물의 구조재의 물리적 손상을 기준으로 목표 및 보유성능을 기능유지, 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지와 같이 구분한다. 하지만 구조재의 물리적 손상측면의 성능목표는 경제적 손실과 직접적으로 연관되어 있지 않아, 의사결정권을 가지는 비전문가가 경제적인 손실을 판단하기 어려운 한계점이 있다. 현재 손실기반 목표성능수준에 대해 법제화된 기준은 없지만, 본 연구에서는 NETAP(national earthquake technical assistance program) training workshop을 참석하여 <표 2.4>와 같은 손실기반 목표성능수준을 정리하였다. 손실기반 목표성능은 수리비용(repair cost), 복구기간(repair time), 영구변형이 발생할 확률(probability of unrepairable permanent drift) 등으로 설계지진과 최대고려지진에 대해 구분된다.

<표 2.4> 손실기반 목표성능수준(NETAP training workshop)

Performance Measure	Design Earthquake	MCE
Median Repair Cost	5%	10%
90th percentile Repair Cost	10%	20%
Median Repair Time	30 days	60 days
90th percentile Repair Time	60 days	120 days
Probability of Unrepairable Permanent Drift	1%	3%
Probability of Unsafe Placard	5%	10%
Probability of Collapse	2%	5%

5. 소결

본 장에서는 구조재 및 비구조재의 목표성능 수준 구축에 대한 연구를 수행하였다. 연구 수행결과는 다음과 같다.

- ❍ 현재 건축물의 용도에 따른 내진성능목표는 NEHRP 2009에서 제시하고 있으며, 미국의 IBC(International Building Code)나 우리나라의 KBC에서도 제시된 내진성능목표를 사용하고 있다. 건축물의 category는 용도에 따라 나뉘며 용도에 따라 붕괴가능성을 정량적으로 제시하고 있다.
- ❍ 건축물 비구조요소 중 건축비구조요소의 내진설계하중 산정시 고려사항에 대한 분석을 세 가지 측면에서 수행하였다. 분석대상으로는 첫 번째, 내진설계대상 비구조요소의 시대별 변화, 두 번째, 비구조요소의 등가정적하중 산정식 변화, 세 번째, 등가정적하중 산정식 분석이며, 현재 우리나라 비구조요소 내진설계기준의 참고문헌인 미국의 UBC와 IBC에 대해 분석을 수행하였다.
- ❍ UBC 1935부터 비구조요소에 대한 내진설계조항이 추가되었으며, 내부 및 외부 비구조벽체, 횡지지되어 있지 않은 캔틸레버 부재, 옥탑, 부가물 및 장식물에 대해서만 내진설계를 하도록 규정하였다. 이후 내진설계대상 비구조요소가 확대되었고, UBC 1973에서 천장재, UBC 1985에서 이중바닥이 추가되었고, IBC 2000의 내진설계대상 비구조요소는 IBC 2015와 KBC 2016과 동일한 것으로 조사되었다.
- ❍ 비구조요소의 내진설계용 등가정적하중의 변화과정에 대해 분석한 결과, UBC 1935부터 UBC 1994까지는 비구조요소의 특성을 충분히 반영하지 않고, 단순히 비구조요소의 무게에 계수를 곱하여 산정하였다. 1994년 NEHRP (FEMA 222A), 1997년 NEHRP (FEMA 302)에서 비구조요소의 응답증폭계수, 반응수정계수, 수직증폭계수를 고려하기

시작한 이후, UBC 1997와 IBC 2000에서 이를 받아들여 비구조요소의 설계하중을 산정하고 있다. 하지만 현재 비구조요소의 설계하중 산정시, 구조물과 비구조요소의 주기에 따른 상호작용을 충분히 고려하고 있지 않고 있으며, IBC 2015에서 제시하는 비구조요소의 설계변수는 장주기 건축물을 대상으로 얻어진 변수이기 때문에, 중저층 건축물에 맞는 설계변수를 규정할 필요가 있다고 판단된다.

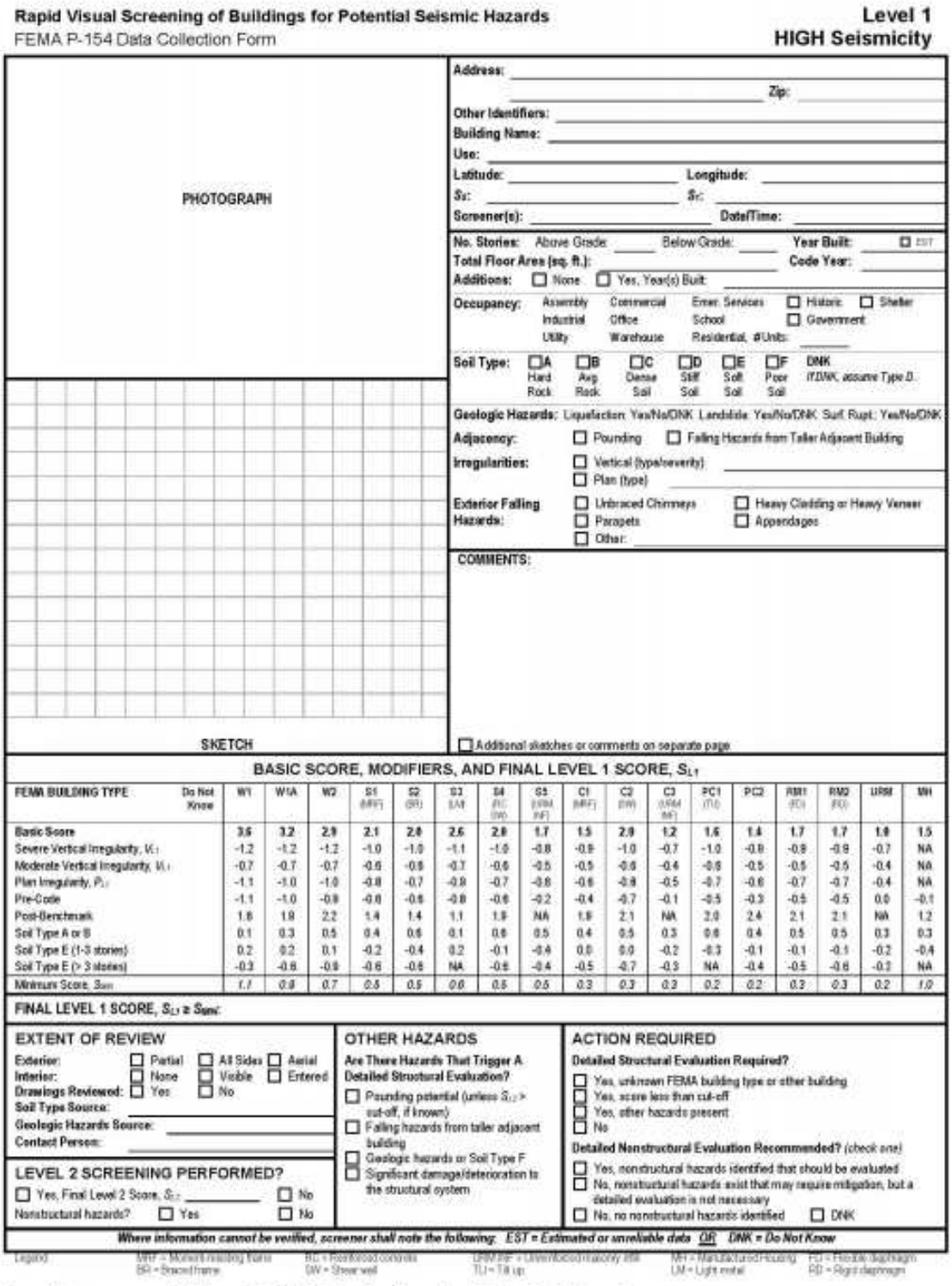
2절. 구조재 및 비구조재의 손상도 평가

1. 기존 건축물 손상도 평가 기준 분석 (FEMA P-154)

많은 건물들은 지진 발생위험성을 갖고 있지만, 실제 지진이 발생하였을 때 어떤 건물이 위험대상이 되는지를 구별하는 것은 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해 개발된 FEMA P-154는 지진에 대해 취약한 건물을 보다 정확한 기준으로 판별함으로써 엔지니어가 판단하는 것에 있어 도움을 준다. FEMA P-154는 Rapid Visual Screening(RVS)의 절차를 따라 위험성을 판단하게 되는데, 이 방법은 구조 분석을 하지 않기 때문에 지진 피해를 예측하기 위한 기존 방법에 비해 빠르고 간단하게 구현할 수 있다. RVS 절차를 통해 건물은 점수를 받게 되는데, 이 점수가 일정 점수 이상을 나타내면 건물의 내진성능이 적절하다고 간주한다.

RVS 프로그램은 Techniques for Rapid Assessment of Seismc Vulnerability (Scawthorn, 1986)에서 처음 논의되었다. 이후 FEMA 154는 Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (FEMA, 1988a)의 보고서로 시작이 되었다. FEMA 154는 10년동안 RVS 프로그램을 통해 70,000개 이상의 건물을 평가하는데 사용되었으며(FEMA 2002b), 이를 기반으로 더 정확한 점수 체계를 확립해나가게 되었다. 또한 이 기간 동안 발생한 많은 지진 피해와 National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP)를 통해 연구개발이 수행되었고, 이는 FEMA 154의 Second edition에 반영되었다. 이 보고서에서는 원래의 방식에 FEMA 310의 ground motion에 관한 내용과 FEMA funded HAZUS Technical Manual(FEMA,1999d)을 통합하였다.

Postearthquake에 신속하게 대응하기 위해 건물의 안전을 신속하고 지속적으로 결정하는 것이 중요하다. 가장 자주 사용되는 방법으로 ATC-20-1, Field Manual(ATC,2005) 가 있다. 이 절차는 안전하지 않은 건물 (Red tag)과 지속적인 거주에 위협이 되지않는 손상, 혹은 손상이 아예 없는 건물(Green tag), 또한 그 두 개에 속하지 않는 건물(Yellow tag)를 찾기 위해 신속한 평가가 수행된다는 점에서 RVS와 유사하다. RVS 프로그램이 완성되면 데이터베이스가 주어진 지역에서 지진이 발생하였을 때 우선적으로 수행될 일을 정하는 데 효과적일 것이다.



Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards — **Level 1**
FEMA P-154 Data Collection Form — **HIGH Seismicity**

PHOTOGRAPH

SKETCH

Address: _____ Zip: _____
Other Identifiers: _____
Building Name: _____
Use: _____
Latitude: _____ Longitude: _____
S_S: _____ S_1: _____
Screener(s): _____ Date/Time: _____

No. Stories: Above Grade: ____ Below Grade: ____ Year Built: ____ ☐ EST
Total Floor Area (sq. ft.): _____ Code Year: _____
Additions: ☐ None ☐ Yes, Year(s) Built: _____

Occupancy: Assembly, Commercial, Emer. Services, ☐ Historic, ☐ Shelter, Industrial, Office, School, ☐ Government, Utility, Warehouse, Residential, #Units: ____

Soil Type: ☐A Hard Rock ☐B Avg. Rock ☐C Dense Soil ☐D Stiff Soil ☐E Soft Soil ☐F Poor Soil DNK If DNK, assume Type D

Geologic Hazards: Liquefaction: Yes/No/DNK Landslide: Yes/No/DNK Surf. Rupt.: Yes/No/DNK

Adjacency: ☐ Pounding ☐ Falling Hazards from Taller Adjacent Building

Irregularities: ☐ Vertical (type/severity) _____ ☐ Plan (type) _____

Exterior Falling Hazards: ☐ Unbraced Chimneys ☐ Heavy Cladding or Heavy Veneer ☐ Parapets ☐ Appendages ☐ Other: _____

COMMENTS:

☐ Additional sketches or comments on separate page

BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL LEVEL 1 SCORE, S_{L1}

FEMA BUILDING TYPE (Do Not Know)	W1	W1A	W2	S1 (MRF)	S2 (BR)	S3 (LM)	S4 (RC SW)	S5 (URM INF)	C1 (MRF)	C2 (SW)	C3 (URM INF)	PC1 (TU)	PC2	RM1 (RD)	RM2 (RD)	URM	MH
Basic Score	3.6	3.2	2.9	2.1	2.8	2.6	2.9	1.7	1.5	2.9	1.2	1.6	1.4	1.7	1.7	1.9	1.5
Severe Vertical Irregularity, V_{L1}	-1.2	-1.2	-1.2	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0	-0.8	-0.9	-1.0	-0.7	-1.0	-0.8	-0.9	-0.9	-0.7	NA
Moderate Vertical Irregularity, V_{L1}	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	NA
Plan Irregularity, P_{L1}	-1.1	-1.0	-1.0	-0.8	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.4	NA
Pre-Code	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.2	-0.4	-0.7	-0.1	-0.5	-0.3	-0.5	-0.5	0.0	-0.1
Post-Benchmark	1.8	1.9	2.2	1.4	1.4	1.1	1.9	NA	1.9	2.1	NA	2.0	2.4	2.1	2.1	NA	1.2
Soil Type A or B	0.1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3
Soil Type E (1-3 stories)	0.2	0.2	0.1	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.4	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4
Soil Type E (> 3 stories)	-0.3	-0.6	-0.9	-0.6	-0.6	NA	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.3	NA	-0.4	-0.5	-0.6	-0.2	NA
Minimum Score, S_{MIN}	1.1	0.9	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	1.0

FINAL LEVEL 1 SCORE, $S_{L1} \geq S_{MIN}$:

EXTENT OF REVIEW
Exterior: ☐ Partial ☐ All Sides ☐ Aerial
Interior: ☐ None ☐ Visible ☐ Entered
Drawings Reviewed: ☐ Yes ☐ No
Soil Type Source: _____
Geologic Hazards Source: _____
Contact Person: _____

LEVEL 2 SCREENING PERFORMED?
☐ Yes, Final Level 2 Score, S_{L2}: _____ ☐ No
Nonstructural hazards? ☐ Yes ☐ No

OTHER HAZARDS
Are There Hazards That Trigger A Detailed Structural Evaluation?
☐ Pounding potential (unless S_{L2} > cut-off, if known)
☐ Falling hazards from taller adjacent building
☐ Geologic hazards or Soil Type F
☐ Significant damage/deterioration to the structural system

ACTION REQUIRED
Detailed Structural Evaluation Required?
☐ Yes, unknown FEMA building type or other building
☐ Yes, score less than cut-off
☐ Yes, other hazards present
☐ No
Detailed Nonstructural Evaluation Recommended? (check one)
☐ Yes, nonstructural hazards identified that should be evaluated
☐ No, nonstructural hazards exist that may require mitigation, but a detailed evaluation is not necessary
☐ No, no nonstructural hazards identified ☐ DNK

Where information cannot be verified, screener shall note the following: EST = Estimated or unreliable data OR DNK = Do Not Know

Legend: MRF = Moment resisting frame; BR = Braced frame; RC = Reinforced concrete; SW = Shear wall; URM INF = Unreinforced masonry infill; TU = Tilt up; MH = Manufactured housing; LM = Light metal; RD = Rigid diaphragm; FD = Flexible diaphragm

Figure 1-1 RVS Level 1 Data Collection Form for High seismicity region.

<그림 2.4> FEMA P-154에서 제공하는 level 1 post earthquake data collection form

Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards — **Level 2 (Optional)**

FEMA P-154 Data Collection Form — **HIGH Seismicity**

Optional Level 2 data collection to be performed by a civil or structural engineering professional, architect, or graduate student with background in seismic evaluation or design of buildings.

Bldg Name:	**Final Level 1 Score:**	S_{L1} =	*(do not consider S_{MIN})*
Screener:	**Level 1 Irregularity Modifiers:**	*Vertical Irregularity*, V_{L1} =	*Plan Irregularity*, P_{L1} =
Date/Time:	**ADJUSTED BASELINE SCORE:**	$S' = (S_{L1} - V_{L1} - P_{L1})$ =	

STRUCTURAL MODIFIERS TO ADD TO ADJUSTED BASELINE SCORE

Topic		Statement *(If statement is true, circle the "Yes" modifier; otherwise cross out the modifier.)*	Yes	Subtotals
Vertical Irregularity, V_{L2}	Sloping Site	W1 building: There is at least a full story grade change from one side of the building to the other.	-1.2	
		Non-W1 building: There is at least a full story grade change from one side of the building to the other.	-0.3	
	Weak and/or Soft Story *(circle one maximum)*	W1 building cripple wall: An unbraced cripple wall is visible in the crawl space.	-0.6	
		W1 house over garage: Underneath an occupied story, there is a garage opening without a steel moment frame, and there is less than 8' of wall on the same line (for multiple occupied floors above, use 16' of wall minimum).	-1.2	
		W1A building open front: There are openings at the ground story (such as for parking) over at least 50% of the length of the building.	-1.2	
		Non-W1 building: Length of lateral system at any story is less than 50% of that at story above or height of any story is more than 2.0 times the height of the story above.	-0.9	
		Non-W1 building: Length of lateral system at any story is between 50% and 75% of that at story above or height of any story is between 1.3 and 2.0 times the height of the story above.	-0.5	
	Setback	Vertical elements of the lateral system at an upper story are outboard of those at the story below causing the diaphragm to cantilever at the offset.	-1.0	
		Vertical elements of the lateral system at upper stories are inboard of those at lower stories.	-0.5	
		There is an in-plane offset of the lateral elements that is greater than the length of the elements.	-0.3	
	Short Column/ Pier	C1,C2,C3,PC1,PC2,RM1,RM2: At least 20% of columns (or piers) along a column line in the lateral system have height/depth ratios less than 50% of the nominal height/depth ratio at that level.	-0.5	
		C1,C2,C3,PC1,PC2,RM1,RM2: The column depth (or pier width) is less than one half of the depth of the spandrel, or there are infill walls or adjacent floors that shorten the column.	-0.5	
	Split Level	There is a split level at one of the floor levels or at the roof.	-0.5	
	Other Irregularity	There is another observable severe vertical irregularity that obviously affects the building's seismic performance.	-1.0	V_{L2} = _____
		There is another observable moderate vertical irregularity that may affect the building's seismic performance.	-0.5	*(Cap at -1.2)*
Plan Irregularity, P_{L2}	Torsional irregularity: Lateral system does not appear relatively well distributed in plan in either or both directions. *(Do not include the W1A open front irregularity listed above.)*		-0.7	
	Non-parallel system: There are one or more major vertical elements of the lateral system that are not orthogonal to each other.		-0.4	
	Reentrant corner: Both projections from an interior corner exceed 25% of the overall plan dimension in that direction.		-0.4	
	Diaphragm opening: There is an opening in the diaphragm with a width over 50% of the total diaphragm width at that level.		-0.2	
	C1, C2 building out-of-plane offset: The exterior beams do not align with the columns in plan.		-0.4	P_{L2} = _____
	Other irregularity: There is another observable plan irregularity that obviously affects the building's seismic performance.		-0.7	*(Cap at -2.1)*
Redundancy	The building has at least two bays of lateral elements on each side of the building in each direction.		+0.3	
Pounding	Building is separated from an adjacent structure by less than 1% of the height of the shorter of the building and adjacent structure and:	The floors do not align vertically within 2 feet.	-1.0	*(Cap total pounding modifiers at -1.2)*
		One building is 2 or more stories taller than the other.	-1.0	
		The building is at the end of the block.	-0.5	
S2 Building	"K" bracing geometry is visible.		-1.0	
C1 Building	Flat plate serves as the beam in the moment frame.		-0.4	
PC1/RM1 Bldg	There are roof-to-wall ties that are visible or known from drawings that do not rely on cross-grain bending. *(Do not combine with post-benchmark or retrofit modifier.)*		+0.3	
PC1/RM1 Bldg	The building has closely spaced, full height interior walls (rather than an interior space with few walls such as in a warehouse).		+0.3	
URM	Gable walls are present.		-0.4	
MH	There is a supplemental seismic bracing system provided between the carriage and the ground.		+1.2	
Retrofit	Comprehensive seismic retrofit is visible or known from drawings.		+1.4	M= _____

FINAL LEVEL 2 SCORE, $S_{L2} = (S' + V_{L2} + P_{L2} + M) \geq S_{MIN}$: *(Transfer to Level 1 form)*

There is observable damage or deterioration or another condition that negatively affects the building's seismic performance: ☐ Yes ☐ No

If yes, describe the condition in the comment box below and indicate on the Level 1 form that detailed evaluation is required independent of the building's score.

OBSERVABLE NONSTRUCTURAL HAZARDS

Location	Statement (Check "Yes" or "No")	Yes	No	Comment
Exterior	There is an unbraced unreinforced masonry parapet or unbraced unreinforced masonry chimney.			
	There is heavy cladding or heavy veneer.			
	There is a heavy canopy over exit doors or pedestrian walkways that appears inadequately supported.			
	There is an unreinforced masonry appendage over exit doors or pedestrian walkways.			
	There is a sign posted on the building that indicates hazardous materials are present.			
	There is a taller adjacent building with an unanchored URM wall or unbraced URM parapet or chimney.			
	Other observed exterior nonstructural falling hazard.			
Interior	There are hollow clay tile or brick partitions at any stair or exit corridor.			
	Other observed interior nonstructural falling hazard.			

Estimated Nonstructural Seismic Performance *(Check appropriate box and transfer to Level 1 form conclusions)*

☐ Potential nonstructural hazards with significant threat to occupant life safety → Detailed Nonstructural Evaluation recommended.

☐ Nonstructural hazards identified with significant threat to occupant life safety → But no Detailed Nonstructural Evaluation required.

☐ Low or no nonstructural hazard threat to occupant life safety → No Detailed Nonstructural Evaluation required.

Comments:

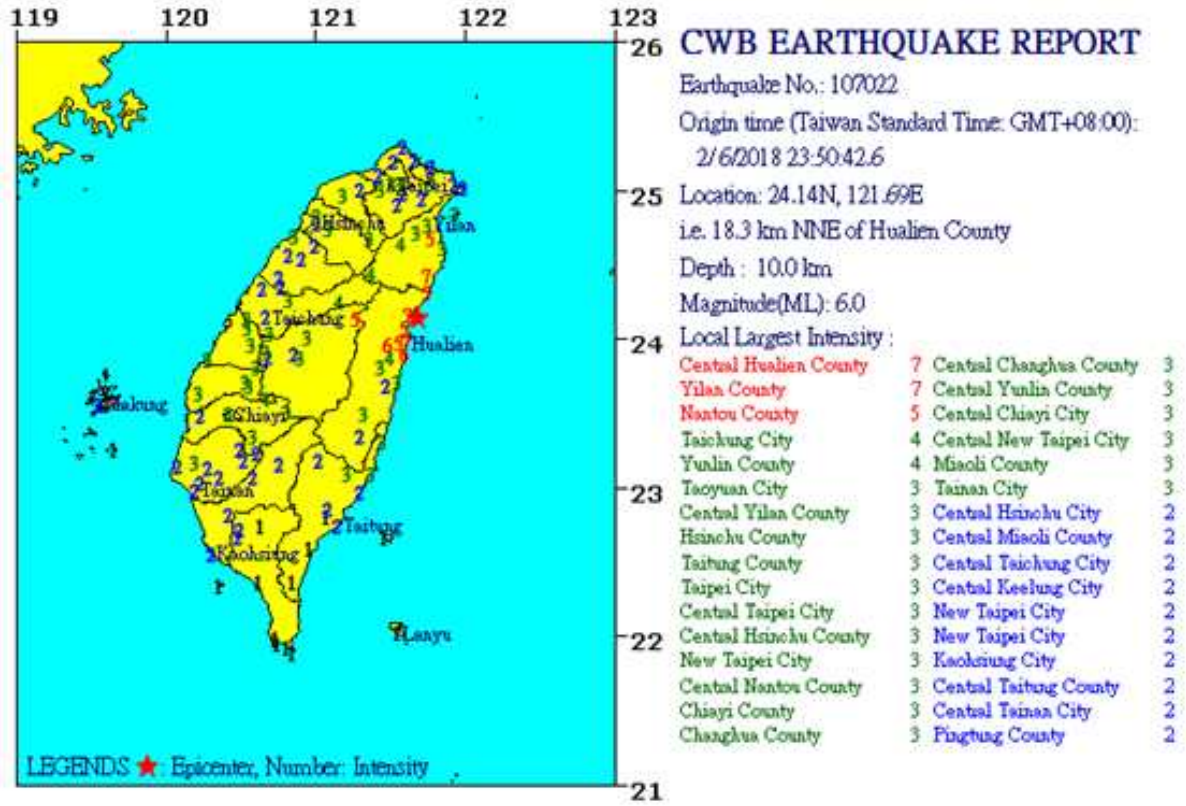
Figure 1-2 RVS Level 2 Optional Data Collection Form for High seismicity region.

<그림 2.5> FEMA P-154에서 제공하는 level 2 post earthquake data collection form

2. 대만 화롄지진 건축물 피해사례 분석

가. 화롄지진 개요

2018년 2월 6일 현지시각 23시 50분에 리히터 규모(M_L) 6.0[4], 모멘트 규모(M_W) 6.4[5]의 지진이 대만 화롄지역에 발생하였다. 진앙의 위치는 <그림 2.6>에서 나타나듯이 (24.14 °N, 121.69 °E) 깊이는 10.0km이며, 화롄시청으로부터 북동쪽으로 18.3km떨어진 지점에서 발생하였다. 화롄시청에서 감지된 MMI 진도는 7(very strong)로 보고되었다. 본 연구에서는 화롄지진에 대한 지진피해현장을 찾아 지진피해현황을 조사(reconnaissance)하였다.



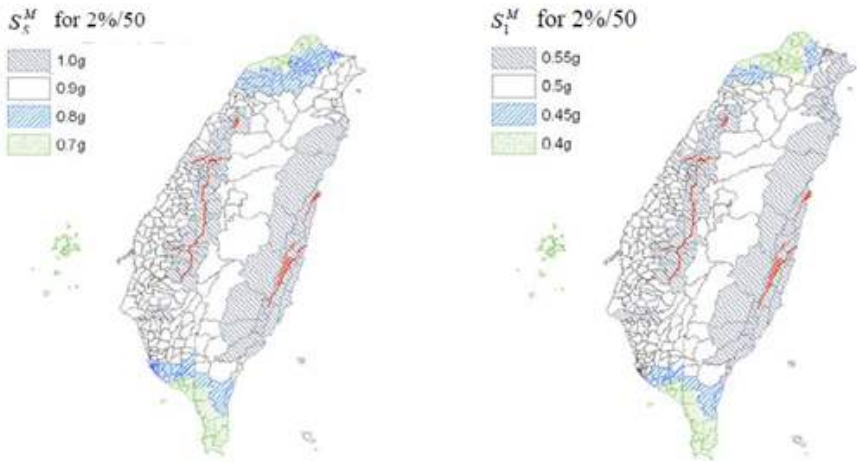
<그림 2.6> 대만기상청 화롄지진 요약

화롄지진으로 인해 총 4개의 건축물이 붕괴되었으며, 총 302명의 사상자 중 17명이 사망하였다. Taiwan Residential Earthquake Insurance Fund는 화롄지진으로 인해 주거건축물에 대한 재산피해를 약 NT$137 million (US$4.7 million)으로 추정하고 있다.

4) source: Central Weather Bureau, CWB
5) source: United States Geological Survey, USGS

나. 대만 내진설계기준 분석

대만의 내진설계기준(seismic force requirement, SFR)은 1974년 법으로 재정되었으며, 미국의 UBC를 기반으로 만들어 졌다. 1985년 멕시코시티 지진이후, 내진설계에 대한 연구가 활발히 수행되었고, 그 결과로 1989년에 SFR에 가속도스펙트럼에 대한 구체적인 내용이 실리게 된다. 강진에 대한 지진피해로 여겨지는 1999년 Chi-Chi 지진이후, 지진구역을 기존의 4개가 아닌 2개로 축소하여 내진규정을 강화하였다(현재는 4개의 지진구역으로 구분). <그림 2.7>는 2011년 기준 대만의 내진설계규정에서 제시하는 4개의 지진구역에 대한 지역계수를 나타낸다. 우리나라의 경우 지진구역을 2개로 나누고 지진구역에 따른 지역계수를 하나로 제공하고 있지만, 대만은 지진구역을 4개로 나누고 지역구역에 따른 지역계수를 단주기스펙트럼과 1초주기스펙트럼에 대해 2개로 제공하고 있다. 우리나라와 지역계수 최댓값인 0.22g와 비교하면, 대만의 지역계수의 최솟값은 0.7g이므로, 우리나라의 지역계수보다 최소 약 3배 이상 큰 것을 알 수 있다.



<그림 2.7> Seismic hazard map for 2%/50 (about 2,400years)

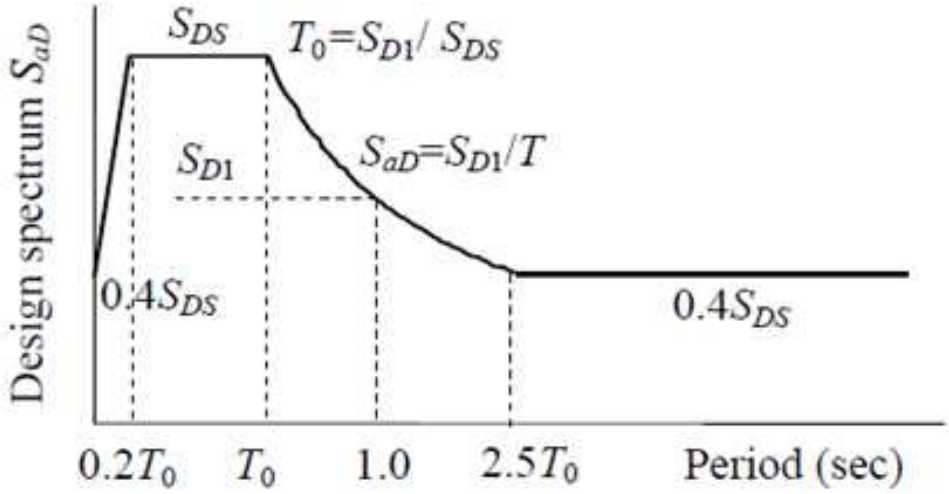
<그림 2.8>는 대만의 설계스펙트럼을 나타낸다. 우리나라의 설계스펙트럼은 T_o이후 주기에 따라 설계스펙트럼이 반비례하여 감소하지만, 대만의 경우 반비례하여 감소하는 것은 동일하나, 장주기 건축물에 대해서도 설계스펙트럼의 값을 $0.4S_{DS}$로 규정하고 있다. 우리나라와 대만의 설계스펙트럼을 비교하기 위해 다음의 가정을 하였다.

- 재현주기 2,400년의 최대고려지진사용
- 한국의 경우 지역계수 0.22g사용
- 대만 화롄지역의 경우(지진구역 1) 단주기스펙트럼에 대한 지역계수는 1.0g, 1초주기스펙트럼에 대한 지역계수는 0.55g를 사용
- 지반증폭계수는 한국과 대만 모두 1.0을 사용

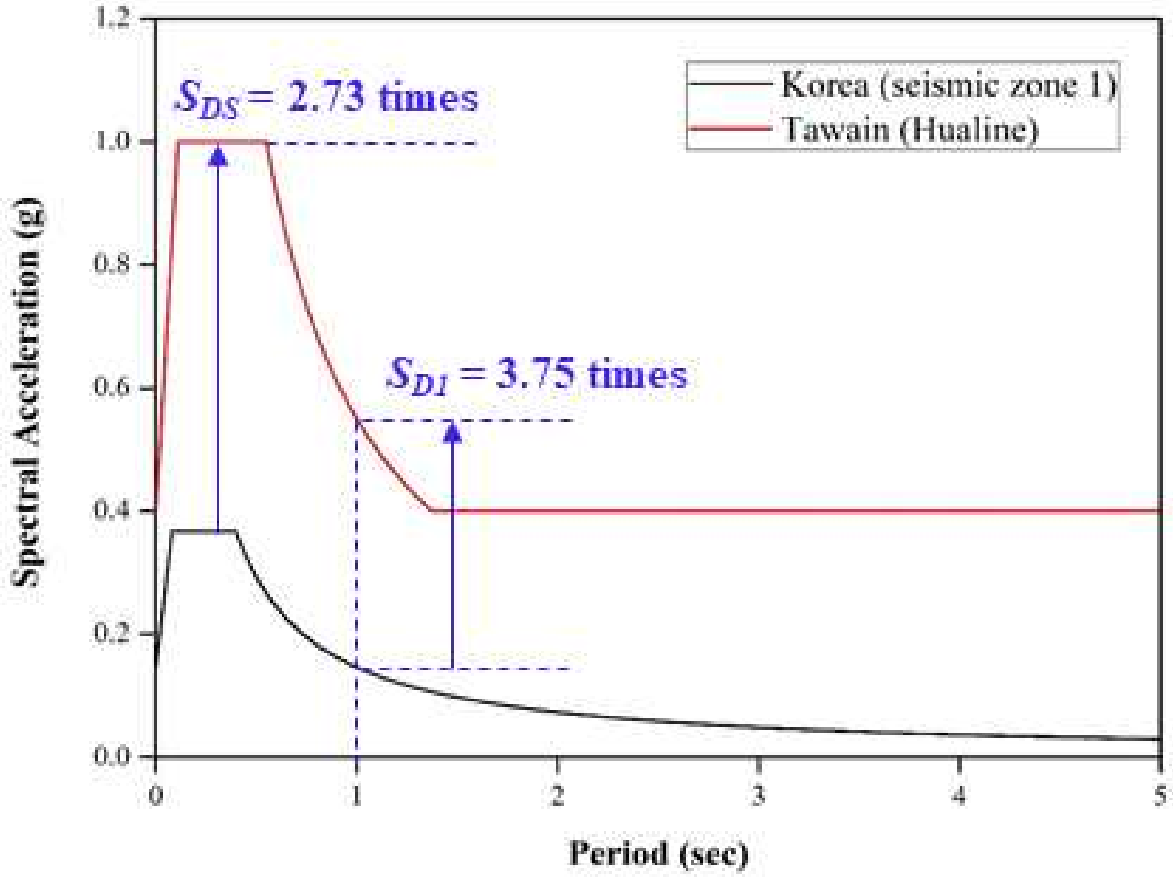
$$S_{Ds} = F_a S_S^D$$

$$S_{D1} = F_v S_1^D$$

$$S_{aD} = \begin{cases} S_{DS}(0.4 + 3T/T_0) & ; \quad T \le 0.2T_0 \\ S_{DS} & ; \quad 0.2T_0 < T \le T_0 \\ S_{D1}/T & ; \quad T_0 < T \le 2.5T_0 \\ 0.4S_{DS} & ; \quad T > 2.5T_0 \end{cases} \quad \text{with} \quad T_0 = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$



<그림 2.8> Design spectrum of Taiwan building code



<그림 2.9> 한국과 대만의 설계스펙트럼 비교

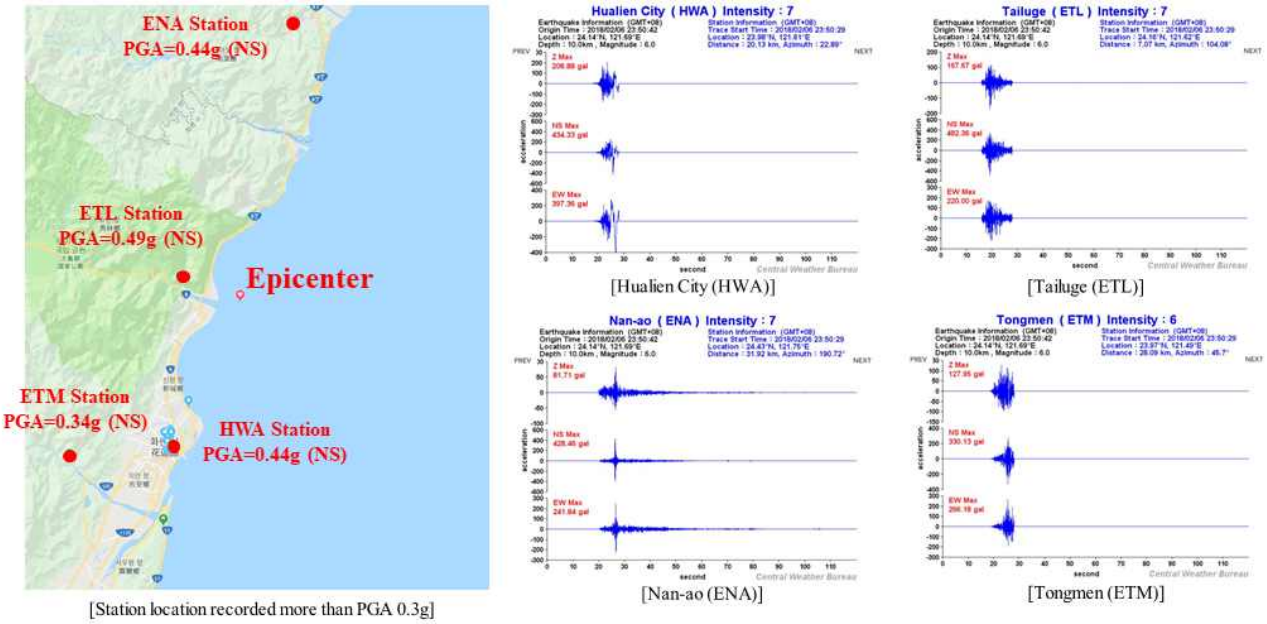
<그림 2.9>는 위의 가정으로 얻은 한국과 대만의 내진설계규정에서 제시한 설계스펙트럼을 비교한 것이다. 대만의 설계스펙트럼가속도는 한국의 설계스펙트럼가속도보다 전 주기영역에서 큰 것을 알 수 있다. 대만의 단주기설계스펙트럼 가속도는 한국의 단주기설계스펙트럼 가속도보다 2.73배 높으며, 1초주기 설계스펙트럼 가속도의 경우 대만이 한국보다 3.75배 높다. 대만은 한국보다 강진지역이기 때문에 설계스펙트럼가속도가 높은 것으로 판단된다.

다. 대만 화롄지진 데이터 분석

<표 2.5>는 화롄지진에 대한 관측소별 진앙과의 거리 및 최대지반가속도와 진도를 정리한 것이다. 진앙과의 거리가 가장 가까운 ETL관측소의 최대지반가속도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 하지만 진앙과의 거리가 가깝다고 해서 최대지반가속도가 큰 것은 아니며, 진앙과 관측소까지의 지반조건에 따라 차이가 발생할 수 있다. <그림 2.10>는 PGA가 0.3g이상 기록된 관측소의 위치와 지진데이터를 표현한 것이다. 지진피해 조사를 수행한 화롄시청 근방에서 측정된 PGA는 0.44g로 조사되었고, PGA가 0.3g이상 기록된 관측소에서 가장 높게 기록된 지진파의 성문은 NS성분으로 조사되었다.

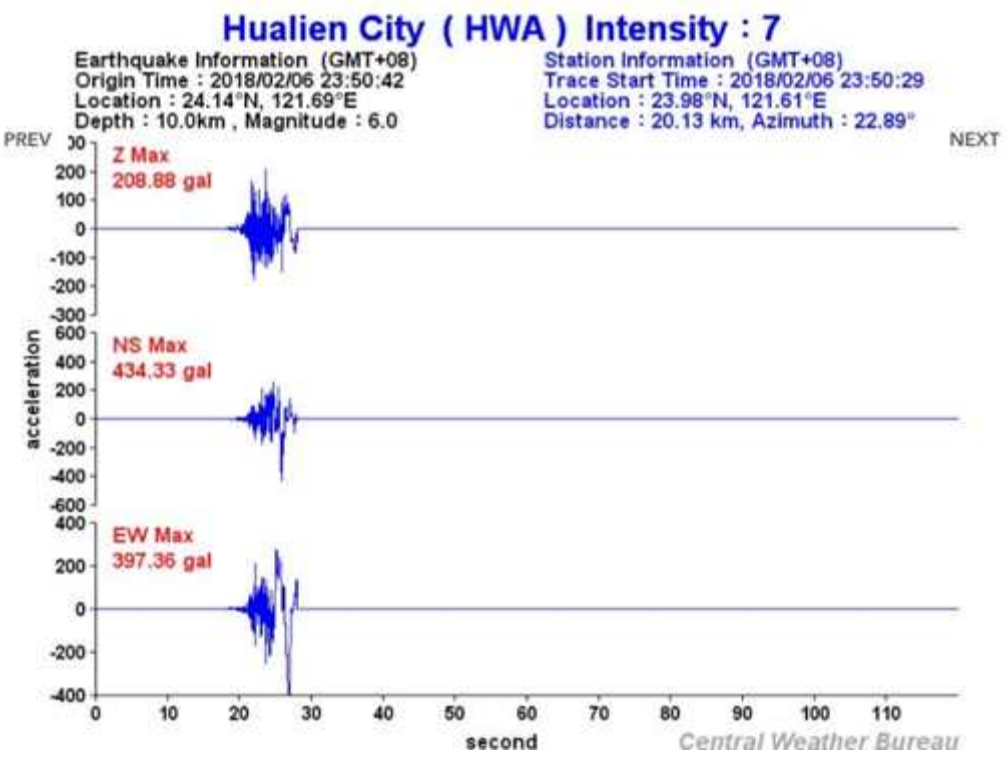
<표 2.5> 대만 화롄지진의 지진관측소별 최대지반가속도와 진도

Station		Distance (km)	PGA(g)			Intensity
ID	Name		NS	EW	Vert	
ETL	Tailuge	7.07	0.49	0.23	0.17	7
ENA	Nan-ao	31.92	0.44	0.25	0.08	7
HWA	Hualien City	20.13	0.44	0.30	0.21	7
ETM	Tongmen	28.09	0.34	0.27	0.13	6
NLD	Luodong	59.36	0.10	0.04	0.03	5
EHP	Heping	19.20	0.10	0.11	0.09	5
WHF	Hehuanshan	42.48	0.08	0.12	0.03	5
TWD	Xiulin	11.07	0.18	0.20	0.15	5
ENT	Niudou	56.05	0.04	0.05	0.02	4
CHN5	Caoling	119.56	0.02	0.04	0.01	4
TWT	Deji	55.01	0.03	0.02	0.01	4
NNS	Nanshan	45.29	0.08	0.03	0.01	4
BAC	New Taipei City	97.98	0.01	0.01	0.01	3
TAP	Taipei City	100.69	0.01	0.01	0.00	3



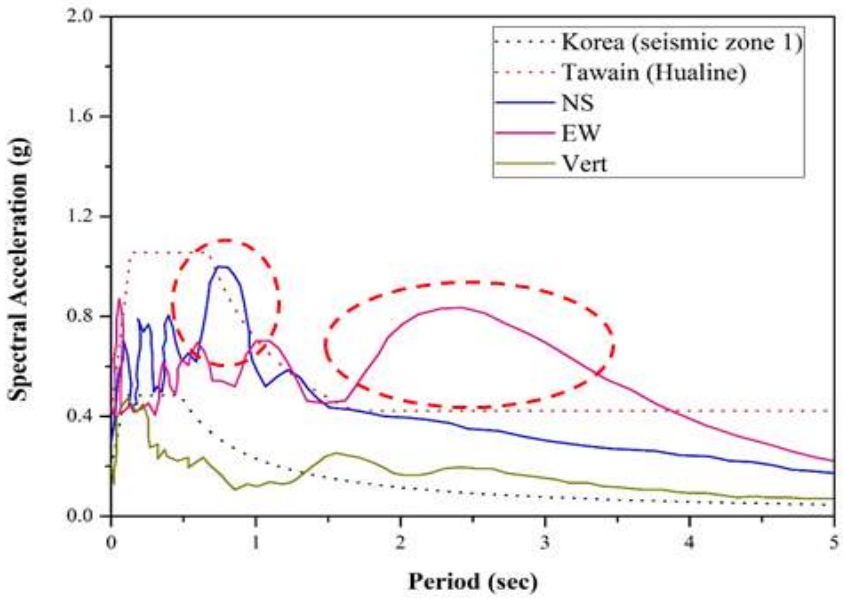
<그림 2.10> PGA 0.3g이상이 기록된 관측소와 지진파데이터

지진피해 조사를 진행한 지역은 화롄시청 근처로, <그림 2.11>와 같이 화롄시청에서 측정된 지진파를 이용하여 스펙트럼분석을 수행하였다.



<그림 2.11> Seismic wave recorded at Hualien City (HWA)

<그림 2.12>은 화롄시청에서 측정된 화롄지진의 성분별 지진파의 응답스펙트럼과 화롄지역의 설계스펙트럼 및 한국의 지지구역 Ⅰ에 해당하는 설계스펙트럼을 비교한 것이다. NS방향 성분의 최대 스펙트럼가속도는 주기 0.8초에서 약 1.0g이며, EW방향 성분의 최대 스펙트럼가속도는 주기 2.4초에서 약 0.9g이다. 화롄지진은 장주기 영역의 설계스펙트럼 가속도가 큰 경향을 보인다. 붕괴된 4개 건축물의 층수는 7층, 9층, 11층, 12층으로, 층수가 높은 건축물의 손상이 큰 경향과 장주기 영역의 스펙트럼가속도가 큰 경향이 어느 정도 부합한다고 할 수 있다.



<그림 2.12> Comparison of response spectrum

라. 건축물 피해사례 조사 및 분석

(1) 붕괴된 건축물 조사 내용

붕괴된 건축물은 총 4개이며 붕괴된 건축물에 대한 조사지역을 방문하였을 때, 해당 건축물이 위치한 부지가 정리되어 있었기 때문에, 붕괴된 건축물의 손상상태를 직접 조사하지 못하였다. 그래서 기사자료를 통해 붕괴된 건축물의 붕괴 원인과 구조적 특징에 대해 분석을 수행하였다.

❍ Wuju Wusu Building

Wuju Wusu Building은 9층 주거건축물이며, 1층을 주차장으로 사용하기 때문에 우리나라의 필로티건축물과 구조적 특징이 유사하다. 우리나라의 필로티건축물은 1층엔 기둥이 설치되고, 2층 이후엔 전단벽이 설치되지만, 대만의 필로티건축물은 전체 구조시스템이 보와 기둥으로 이루어진 모멘트골조이지만 기둥사이의 조적벽으로 인해, 건축물이 수직비정형성을 갖는다.



[No. 1 building before collapse from Google Map]





[No. 1 building after collapse, using a parking lot]



[Fracture of upper joint of 1st story column(Feb 9, 16:00)]

<그림 2.13> Wuju Wusu building의 붕괴 전, 중, 후 사진

<그림 2.13>은 Wuju Wusu Building의 붕괴 전, 중, 후 사진이다. 해당 건축물은 1층 기둥 상부가 지진에 의해 손상을 받아 단면의 성능이 낮아져, 중력하중에 의해 붕괴가 발생한 것으로 분석된다. 해당 건축물의 정면기둥이 앞쪽으로 기울면서 최종적으로 붕괴가 발생하였다. 이는 <그림 2.14>과 같이 2개 층을 증축하면서 수직비정형성을 갖는 건축물이 수평비정형성도 추가되어, 건축물의 무게중심이 건축물 앞쪽으로 몰리면서 발생된 현상으로 분석된다.



<그림 2.14> Wuju Wusu building의 최상부 증축

❍ Platinum Double Star Building

Platinum Double Star Building은 7층 주거건축물이며, 1층을 주차장으로 사용하는 필로티 구조를 가진다.



[No. 2 building before collapse from Google Map]



[Collapse of whole of 1st story columns]



[No. 2 building after collapse, using a parking lot]



[Collapse of whole of 1st story columns]

<그림 2.15> Platinum Double Star Building의 붕괴 전, 중, 후 사진

<그림 2.15>은 Platinum Double Star Building의 붕괴 전, 중, 후 사진이다. Platinum Double Star Building은 1층 기둥이 지진에 의해 손상을 받은 후, 기둥 단면의 성능이 저하되어 중력하중을 견디지 못하고 1층 기둥 전체가 붕괴된 것으로 조사된다. <그림 2.16>은 해당 건축물의 기둥사이의 조적채움벽에 의한 단주효과로 발생된 기둥의 전단균열을 나타낸다. 이와 같은 기둥의 손상은 한국의 학교시설물에서 발생되는 기둥의 손상형태와 유사하다. 5층 이상의 기둥에서도 기둥의 전단균열이 발생된 현상으로부터, 해당 건축물에 전체적으로 상당히 큰 층간변위가 발생하였음을 예상할 수 있다.



<그림 2.16> Platinum Double Star Building 단주효과에 의한 기둥의 전단균열

○ Yunmen Tsuiti Building

Yunmen Tsuiti Building은 12층, 준공 후 24년 경과된 상업용 건축물이며, 1층의 보행자 통로로 인해 필로티구조를 가진다. <그림 2.17>와 같이 건축물 북측 1층 기둥이 손상되면서 건축물이 북쪽으로 약 30도 가량 기울러져 건축물에 붕괴가 발생하였다.



[No. 3 building before collapse from Google Map] [No. 3 building after Hualien earthquake] [No. 3 building after collapse, using a parking lot]

<그림 2.17> Yunmen Tsuiti Building의 붕괴 전, 중, 후 사진

❍ Marshal Hotel

Marshal Hotel은 11층 숙박시설이며, 1층의 보행자 통로 확보를 위해 필로티구조를 가진다. 대만 건축물의 특징은 건축물의 범위가 보행자 통로를 포함한다는 점이며, 이러한 건축적 특징으로 인해 대다수 건축물이 필로티구조를 가진다. 해당건축물은 <그림 2.18>과 같이 ㄴ자 모양의 건축물로, 1층 기둥이 부분적으로 파손되어 건축물의 부분적인 붕괴가 발생하였다.


[No. 4 building before collapse from Google Map]


[No. 4 building after Hualien earthquake]


[No. 4 building after collapse, using a parking lot]

<그림 2.18> Marshal Hotel의 붕괴 전, 중, 후 사진

(2) 손상된 건축물 조사 내용

총 6개 건축물에 대해 지진피해 조사를 수행하였다. <표 2.6>은 조사된 6개의 건축물중 5개 건축물에 대한 구조시스템과 대만현지조사팀에서 조사한 결과(tag), 본 연구진이 조사한 결과를 정리한 것이다. 대만의 경우, 지진피해를 받은 건축물을 조사하여 yellow, red tag로 손상을 평가한다. 1번 건축물은 손상이 경미하여 tag를 붙이지 않았고, 2번부터 5번 건축물은 yellow tag가 부착되었다. 손상된 건축물을 조사한 결과, 1층 기둥과 조적채움벽에 전단균열이 발생한 건축물이 다수였고, 4번 건축물은 2층 기둥과 조적채움벽에서 전단균열이 발생하였다. 2번 건축물은 붕괴가 발생한 Platinum Double Star Building과 비슷한 구조를 가지며, 건축물의 위치는 붕괴가 발생한 건축물과 약 20m가량 떨어져 있다. 즉, 2번 건축물은 붕괴가 발생한 Platinum Double Star Building과 지반조건 및 구조시스템이 비슷하여, 지진에 대한 demand와 건축물 의 capacity가 비슷할 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 건축물 하나는 붕괴되고 다른 하나는 경미한 손상만 발생하여 지진손상에 큰 차이가 있었다.

<그림 2.19>부터 <그림 2.23>은 지진피해 현장을 조사하며 손상이 발생된 부분을 촬영한 사진이다. 3번 건축물의 경우, 지하층 1층 기둥에서 전단균열이 아닌 휨균열이 관측되었다. 기둥의 휨균열은 지반의 영향으로 판단되며, 해당 층 구조부재는 안전상의 이유로 서포트를 이용하여 지지해 놓았다. 수평증축을 한 5번 건축물의 경우, 수평증축이 진행된 부분에서 1층부터 3층까지 바닥과 천장에 균열이 발생하였다.

<표 2.6> 대만 화롄지진에 의해 손상된 건축물의 정리

No.	Structural System	Tag	Observation
1	6-stories piloti-structure	-	• 1층 기둥과 조적채움벽의 전단균열 발생 (남북방향) • 철골기둥과 콘크리트벽사이의 접합부 파괴 발생 (큰 변형의 증거)
2	7-stories piloti-structure	Yellow	• 붕괴가 발생한 Platinum Double Star Building과 비슷한 구조 • 1층 기둥과 조적채움벽에서 전단균열 발생 • 1층 기둥 일부를 철골부재로 지지해 둠
3	4-stories moment resisting frame	Yellow	• 1층 기둥과 조적채움벽의 전단균열 발생 • 지하 1층 기둥에서 휨균열 관측됨 • 지하층 구조부재를 임시로 지지해 둠
4	10-stories moment resisting frame	Yellow	• 2층 기둥과 조적채움벽에서 전단균열 발생 • Yellow tag를 건축물 앞에 붙여, 지진피해 현황을 알림
5	3-stories moment resisting frame	Yellow	• 1층부터 3층까지 수평증축 한 바닥부분에 균열이 발생함 • 1층 기둥과 조적채움벽에 전단균열 발생 • 1층 구조부재를 임시로 지지대 둠



<그림 2.19> 1번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.20> 2번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.21> 3번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.22> 4번 건축물 지진피해 조사 사진



<그림 2.23> 5번 건축물 지진피해 조사 사진

<그림 2.24>는 red tag가 부착된 Far Eastern Department Store에 대한 지진피해 전후 조사 사진과 내진보강 부분을 촬영한 사진이다. 해당 건축물의 규모는 12층이며, 구조시스템은 RC모멘트골조이다. 해당 건축물은 1층과 2층 기둥과 보에 대한 steel jacketing과 steel brace를 이용한 내진보강이 총 2번 진행되었다. 조사 당시 해당 건축물은 red tag를 받아 영업이 중지된 상태였으며, 건축물을 해체하고 있었다.

<그림 2.25>은 6번 건축물의 기둥에 대한 손상상태를 촬영한 것이다. 기둥부재는 약 1m의 정사각형 단면을 갖는 철근콘크리트였으며, 기둥의 주근 직경은 약 31mm로 측정되어 D32철근이 사용된 것으로 추정된다. 기둥 띠철근의 간격은 약 25mm였으며, 띠철근의 직경은 약 13mm로 측정되어 D13철근이 사용된 것으로 추정하였다. <그림 2.25>에 나타나있듯이, 기둥부재에 균열폭이 큰 전단균열이 발생하여 표면콘크리트의 대다수가 탈락되어 있음을 알 수 있다. 또한 기둥의 주근이 상당부분 노출되어 있으며, 노출된 주근에 발생된 좌굴로부터 기둥부재의 성능이 상당부분 낮아졌음을 짐작할 수 있다.

<그림 2.26>은 해당건축물의 4층 내부에서 촬영한 사진이다. 해당 사진에서 천장재의 손상상태가 매우 큰 것을 알 수 있으며, 2층과 3층의 천장재의 손상상태와 비교시, 4층 천장재의 손상상태가 더 심각하였다. 이는 최대층가속도가 층수가 높을수록 증폭되는 현상 때문에 발생되었다고 생각된다.



[No. 10 building before earthquake from Google Map]



[Evidence of steel jacketing]



[Dismantling after earthquake damage]



[Evidence of steel brace]

<그림 2.24> 6번 건축물 지진피해 전후 사진과 내진보강부분



[1st story RC column damage, hoop spacing, and diameter of rebar]

<그림 2.25> 6번 건축물 지진피해 후 구조재(기둥)의 손상상태



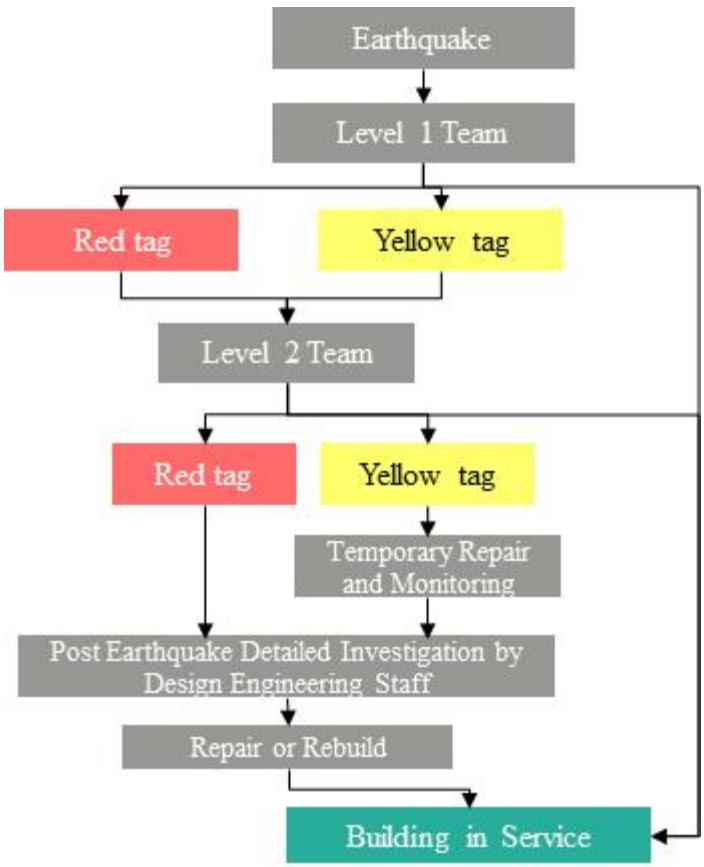
[Nonstructural component damage (ceiling system)]

<그림 2.26> 6번 건축물 지진피해 후 비구조재(천장재)의 손상상태

마. 지진피해 조사결과 정리

2~5층 규모(중저층) 건축물에 발생한 구조재(기둥)와 비구조재(조적채움벽)에 대한 손상은 남북방향(NS)이 큰 것으로 확인되었다. 이는 화롄지진의 응답스펙트럼에 대한 NS성분이 주기가 0.3초부터 약 1초까지 가장 큰 것과 일치하는 결과이다. 반면 붕괴가 발생한 7~12층 규모(중고층) 건축물의 대략적인 고유주기는 내진설계규정을 참고하면 약 0.67~1.14초로 추정할 수 있다. 해당 주기 범위에서 화롄지진의 응답스펙트럼의 NS성분과 EW성분이 설계스펙트럼을 초과하는 것으로 분석되었다. 따라서 붕괴가 발생한 건축물은 설계지진력 이상의 지진하중을 받아 건축물이 붕괴하였을 것이라고 추정할 수 있다.

FEMA P154에서는 지진피해 후 조사된 건축물에 대한 손상상태를 green tag, yellow tag, red tag로 구분한다. Green tag는 건축물을 조사하였지만 일부 비구조재를 제외한 구조재에는 큰 손상이 없다는 결과를 나타낸다. Yellow tag는 건축물의 사용을 제한하고, 정밀한 검사가 필요한 건축물에 대해 부착된다. Red tag는 안전하지 않은 건축물에 대해 부착되며, red tag가 부착된 건축물의 사용은 전면 금지시킨다. 대만의 경우 <그림 2.27>의 지진피해 조사과정을 거쳐 건축물에 yellow 또는 rad tag를 부착한다.

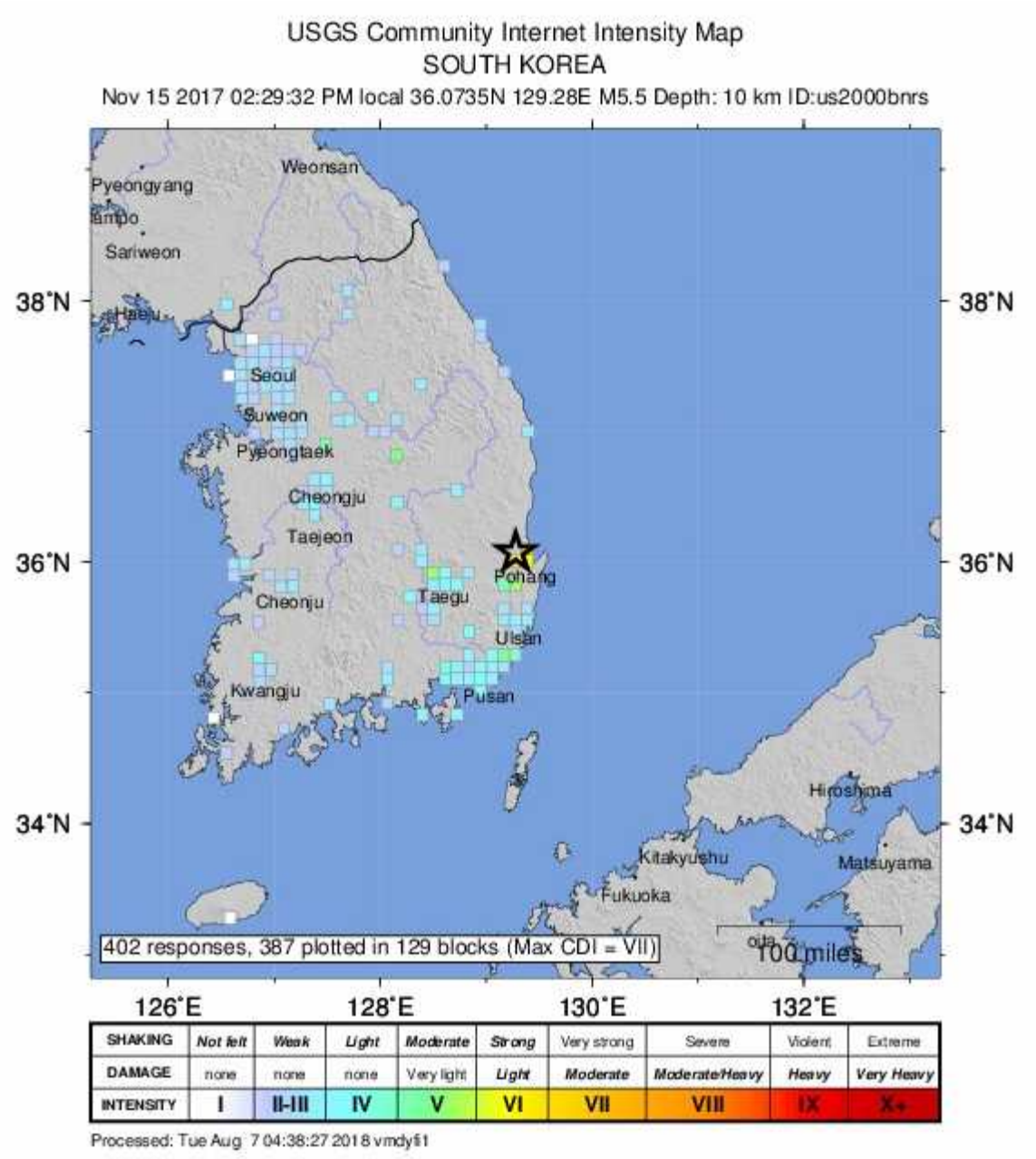


<그림 2.27> 대만의 지진피해 조사 과정

3. 포항지진 건축물 피해사례 분석

가. 포항지진 개요

2017년 11월 15일 현지시각 14시 29분에 리히터 규모(M_L) 5.4[6], 모멘트 규모(M_W) 5.4[7]의 지진이 대한민국 경사북도 포항시에 발생하였다. 진앙의 위치는 <그림 2.28>에서 나타나듯이 (36.0735 °N, 129.28 °E), 깊이는 10.0km이다. 포항시에서 관측된 최대진도는 6(strong)로 보고되었다. 본 연구에서는 포항지진에 대한 지진피해현장을 찾아 지진피해현황을 조사(reconnaissance)하였다.



<그림 2.28> 포항지진 진앙위치 및 진도(USGS)

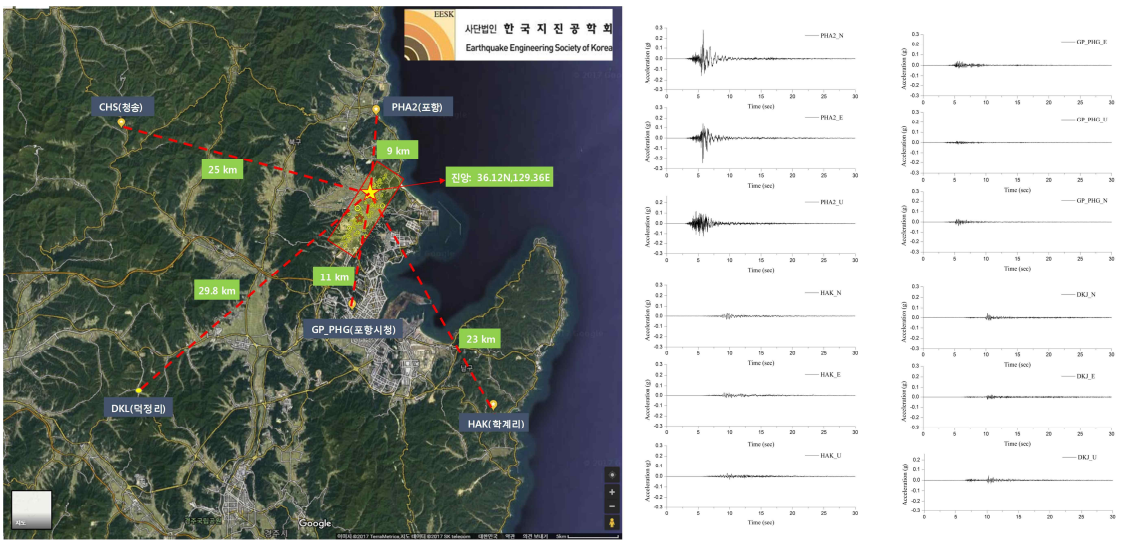
6) source: 한국기상청
7) source: United States Geological Survey, USGS

나. 포항지진 데이터 분석

<표 2.7>는 포항지진에 대한 관측소별 진앙과의 거리 및 최대지반가속도를 정리한 것이다. 진앙과의 거리가 가장 가까운 포항(기상청) 관측소의 지반가속도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 포항기상청 관측소와 진앙사이의 거리는 9km이며, 포항지진 중 가장 큰 지진데이터가 기록되었다. 포항기상청 관측소 외 다른 관측소에서도 지진이 감지되었으나, 거리가 먼 학계리, 청송, 덕정리에서는 작은 지반가속도가 기록되었다. <그림 2.29>는 포항지진이 기록된 관측소와 지진데이터를 표현한 것이다. 포항지진에서 최대지반가속도는 EW방향으로 0.246g, NS방향으로 0.283g으로 포항 기상청에서 가장 크게 기록되었다.

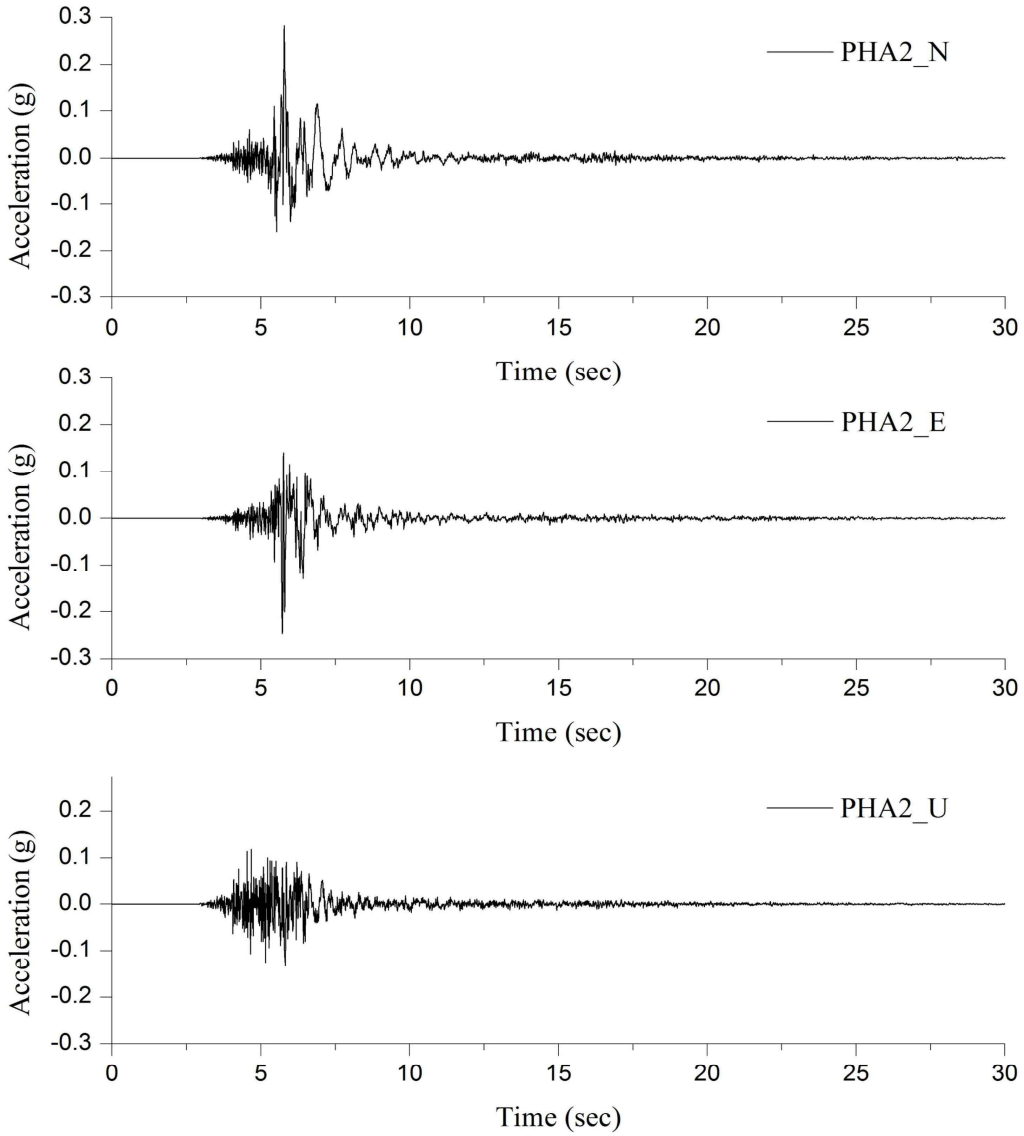
<표 2.7> 포항지진의 지진관측소별 최대지반가속도

Station		Distance (km)	PGA(g)		
ID	Name		EW	NS	Vertical
PHA	포항(기상청)	9	0.246	0.283	0.132
PHG	포항시청	11	0.040	0.039	0.018
HAK	학계리	23	0.026	0.035	0.031
CHS	청송	25	0.021	0.028	0.019
DKJ	덕정리	29.8	0.024	0.050	0.043



<그림 2.29> 포항지진이 기록된 관측소와 지진파데이터

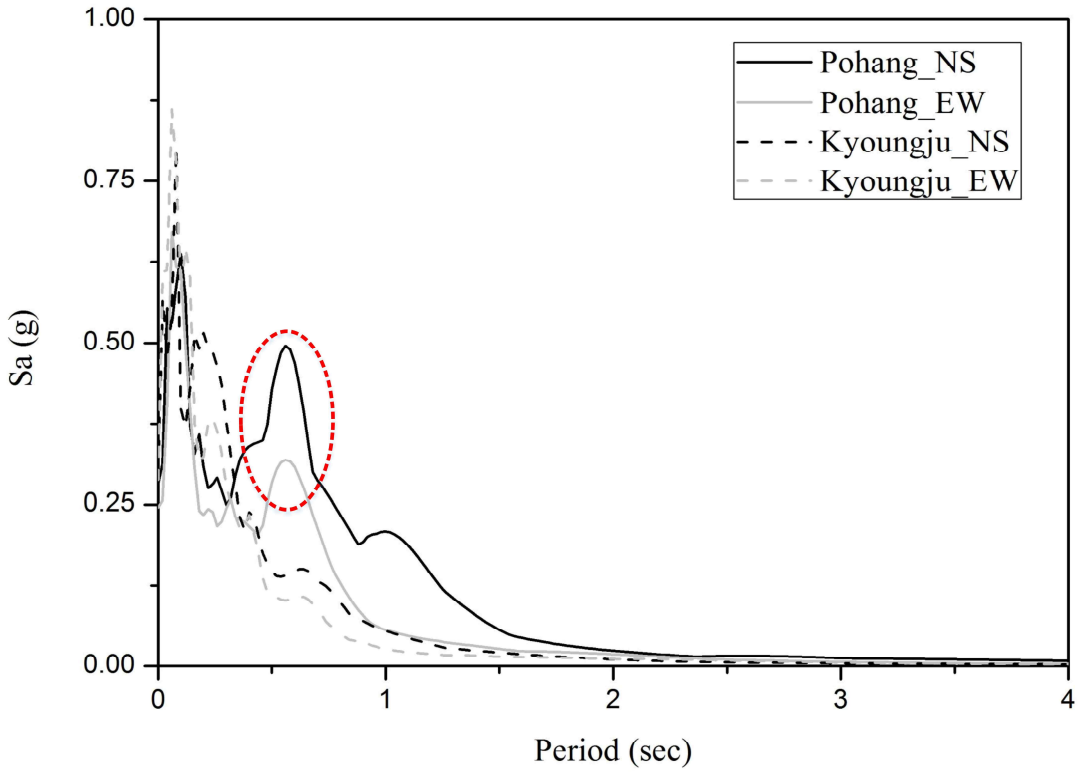
<그림 2.30>와 같이 포항기상청에서 측정된 지진데이터로 스펙트럼분석을 수행하였다.



<그림 2.30> Seismic wave recorded at Pohang(Weather Center)

<그림 2.31>는 포항기상청에서 측정된 포항지진의 성분별 지진파의 응답스펙트럼과 2016년에 발생한 경주지진의 설계스펙트럼을 비교한 것이다. 포항지진의 NS방향 성분의 최대스펙트럼 가속도는 주기 0.1초에서 약 0.63g이며, EW방향 성분의 최대스펙트럼가속도는 0.06초에서 약 0.67g이다. 경주지진의 NS방향 성분의 최대스펙트럼 가속도는 주기 0.08초에서 약 0.80g이며, EW방향 성분의 최대스펙트럼가속도는 0.12초에서 약 0.64g이다. 포항지진과 경주지진의 응답스펙트럼과 최대지반가속도를 비교하였을 때, 경주지진이 포항지진보다 큰 지진이며, 큰 피해가 발생될 것으로 보인다. 그러나 실제 포항지진의 피해액은 546억원이며, 경주지진은 92억원으로 약 5.9배 더 큰 피해가 발생하였다. 포항지진의 최대지반가속도와 응답스펙트럼가속도가 경주지진보다 작음에도 불구하고 피해가 더 큰 이유는 포항지진과

경주지진의 스펙트럼 형상에서 찾을 수 있다. 포항지진의 응답스펙트럼은 경주지진과 달리 주기 0.56초에서 다시 상승하는 형상을 보이고 있다. 주기 0.56초에서 포항지진의 응답스펙트럼 가속도는 0.5g이며, 경주지진의 응답스펙트럼 가속도는 0.14g로 약 3배의 차이를 보인다. 실제 구조물의 고유주기는 간략식으로 1/N초(N은 층수)로 구할 수 있으며, 0.56초는 층수가 2~3층인 저층 건물에 해당되는 고유주기이다. 건축물의 고유주기에서 지진파의 응답스펙트럼가속도 값이 높으면, 공진현상에 의해 더 큰 손상을 야기할 수 있다. 포항지진피해건물 중 학교건축물과 주거형 주택(필로티건축물)은 2~4층 건물로 구성되어 있으며, 피해가 집중된 것은 0.5초 부근에서 포항지진의 응답스펙트럼 가속도가 높은 것이 원인으로 생각된다.



<그림 2.31> Comparison of response spectrum

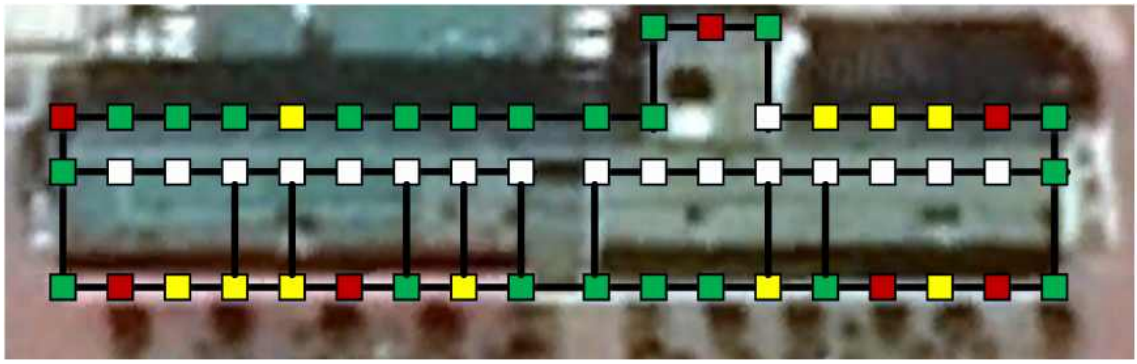
다. 건축물 피해사례 조사 및 분석

(1) 주요시설물(학교건축물)을 중심으로 한 포항지진 피해현황 분석

포항지진으로 인해 피해를 입은 학교건축물 중 피해현황을 분석한 건축물은 총 4개이며, 그 중 흥해초등학교, 대도중학교, 장성초등학교는 구조재의 직접적인 피해가 확인되었고, 장흥초등학교는 비구조재의 피해를 확인하였다. 지진피해를 입은 건축물의 손상 원인과 구조적 특징에 대해 분석을 수행하였다.

(가) 홍해초등학교

홍해초등학교는 3층 철근콘크리트 구조형식으로 1970년대에 지어진 건물로 내진설계가 진행되지 않은 건물이다. 홍해초등학교 기둥은 크고 작은 손상이 발생하였다. <그림 2.32>는 홍해초등학교 1층 기둥 피해현황이다. <그림 2.32>에 표현된 초록색 기둥은 외장콘크리트에 균열이 발생한 정도의 손상으로 일본 지진 피해도 판정기준 중 1,2등급의 손상을 의미하며, 구조체에는 직접적인 균열이 발생하지 않은 기둥이다. 노란 기둥은 구조체에 영향을 미치는 손상이 발생한 기둥으로 일본 지진피해도 판정기준 중 3등급에 속하는 손상정도이다. 붉은 기둥은 기둥내부 철근이 확인될 정도의 손상으로 판정기준 중 4,5등급의 손상이 발생한 기둥이다.



<그림 2.32> 홍해초등학교 1층 기둥 피해현황

<그림 2.33>, <그림 2.34>은 일본 지진 피해 판정기준으로 3등급의 손상이 발생한 기둥이다. 기둥은 X자 형태로 전단균열이 발생하였으며, 내부 콘크리트까지 균열이 이어진 것을 확인하였다. <그림 2.35>과 <그림 2.36>는 4, 5등급의 손상이 발생한 기둥이다. 홍해초등학교에는 본관과 동일한 구조와 형식을 가지는 별관이 존재한다. 별관의 경우 본관보다 10년 후인 1980년대에 지어진 건물이다. <그림 2.37>은 가장 큰 피해를 입은 본관과 동일한 구조와 형식을 가지는 별관 기둥에서 가장 심한 손상을 받은 기둥이다. 별관에는 3등급 이하의 손상만이 발생하였다. 본관과 별관의 콘크리트의 품질을 현장에서 비교해 보았을 때, 본관 콘크리트의 품질이 별관에 비해 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 현장에서 시각적으로 확인가능한 두 건물의 손상차이의 원인은 콘크리트의 품질과 부실시공으로 판단된다.

홍해초등학교의 기둥손상양상을 보면, 비내력 조적벽이 존재하는 기둥에서 손상이 적은 것을 확인할 수 있다. 비내력 조적벽과 연결된 기둥은 3등급 이하의 손상이 발생하였다. 반면 4, 5등급의 손상이 발생한 기둥은 비내력 조적벽과 연결된 경우가 존재하지 않는다. 비내력 조적벽이 기둥의 손상을 줄여주는데 긍정적인 효과를 보여주었다고 판단할 수 있다.



<그림 2.33> 1층 기둥 손상(Yellow)



<그림 2.34> 1층 기둥 손상(Yellow)



<그림 2.35> 1층 기둥손상(Red)



<그림 2.36> 1층 기둥손상(Red)



<그림 2.37> 별관 건물 손상 정도

(나) 대도중학교

대도중학교는 5층 철근콘크리트 건축물로 건물 모서리부분 1층기둥에 손상이 발생하였다. <그림 2.38>은 지진에 의해 지표레벨에 변형이 발생하여 주자창 콘크리트바닥에 균열이 발생한 모습이다. <그림 2.39>는 1층 모서리 기둥의 콘크리트가 탈락하고 주근이 변형된 모습이다. 주차장과 1층 모서리기둥이 인접한 위치에 존재하는 것으로 보아 주자장의 지반이 크게 흔들려 주차장 근처 기둥이 국부적으로 손상된 것으로 판단된다.



<그림 2.38> 주차장 바닥 균열



<그림 2.39> 1층 기둥 콘크리트 탈락

(다) 장성초등학교

장성초등학교는 4층 철근콘크리트 건축물로 건물 전체에 걸쳐 1개의 구조재(기둥)에 손상이 발생하였고, 비구조재(치장벽돌, 비내력조적벽)에 다수의 손상이 발생하였다. <그림 2.40>은 1층의 상부기둥에 X형태로 전단균열이 발생한 모습이다. 대부분의 기둥들은 외부 콘크리트에만 균열이 발생하였지만, <그림 2.40>의 균열은 구조재까지 균열이 연결되는 모습을 확인할 수 있었다. <그림 2.41>는 외부 치장벽돌에 발생한 전단균열 모습이다. 치장벽돌 내부의 기둥의 손상은 육안으로 확인되지 않았으며, 전층에 걸쳐 X형태로 전단균열이 발생하였다.



<그림 2.40> 기둥 전단균열



<그림 2.41> 치장벽돌 전단균열

(라) 장흥초등학교

장흥초등학교는 2005년에 개교한 4층 철근콘크리트 구조물로 구조재의 손상은 발생하지 않았지만 비구조재의 손상이 큰 건축물이다. <그림 2.42>는 지진으로 인해 발생된 지반침하에 따른 비구조재의 손상 모습이다. <그림 2.43>은 지반침하에 따른 계단의 단차가 발생한 모습이다. 장흥초등학교는 지진으로 인한 지반침하가 건물의 앞쪽에서 발생하여, 비구조재에 손상이 집중되었다. <그림 2.44>에서 확인할 수 있듯이, 9cm 정도 지반침하가 발생하였다. <그림 2.45>은 계단을 지지하는 비구조재의 균열 및 손상 모습이다. 건축물의 하중을 지지하지 않는 부재에서 손상이 발생하여, 건축물의 붕괴에는 영향을 미치지 않지만, 사람이 오르내리는 계단을 지지하는 부재이기 때문에 타 비구조재보다 더 큰 관심이 필요한 부분이다.



<그림 2.42> 지반침하에 따른 비구조재 손상



<그림 2.43> 지반침하에 따른 계단 단차 발생



<그림 2.44> 지반침하



<그림 2.45> 비구조재 균열 및 손상

(2) 주거형주택(필로티건축물)의 피해현황 및 구조적특징분석

포항 지진으로 인해 학교건축물 뿐만 아니라 주거형 주택 즉 필로티건축물에도 큰 피해가 발생하였다. 필로티건축물은 1층을 주차장으로 사용하기 위해 기둥과 입구가 있는 코어가 존재하고, 2층 이후엔 전단벽으로 구성된 건축물이다. 필로티 건축물은 1층이 기둥으로 구성되어 있기 때문에 1층의 강성이 2층 이상보다 작다. 따라서 지진이 발생할 경우, 1층 기둥에 집중적인 손상이 발생하지 않도록 부재설계를 진행하지만, 상대적으로 2층,3층에 비해 1층기둥에 손상이 발생할 확률이 크다.

(가) C 오피스텔

포항시 장성동에 위치한 C 오피스텔은 4층 주거형 필로티 건축물로 포항지진으로 가장 큰 피해가 발생한 건축물 중 하나이다. <그림 2.46>는 C 오피스텔의 손상 후 전경 모습이며, 기둥의 손상정도를 표현하였다. 손상된 기둥의 위치를 확인해 보면, 왼쪽 하단부에 위치한 코어와 떨어진 부분의 기둥이 4, 5등급의 손상이 발생하였다.



<그림 2.46> C 오피스텔 전경 및 1층 기둥 손상도

<그림 2.47>은 도면상에 왼쪽에 위치한 두 기둥의 파괴 모습이며, <그림 2.48>은 도면상에 오른쪽에 위치한 기둥의 파괴 모습이다. C 오피스텔은 총 8개의 기둥 중 3개의 기둥에서 전단파괴가 발생하였다. 기둥 철근에서 좌굴이 발생하고, 전단스트럽이 파단될 정도인 5등급의 심각한 손상이 발생하였다. <그림 2.49>는 주근의 좌굴 및 전단스트럽이 파단된 모습이다. 손상된 3개의 기둥을 제외한 5개의 기둥은 매우 양호한 상태로 확인된다. 건물의 코어가 모서리에 위치하기 때문에 수평비정형성이 존재하고, 이로 인해 지진 발생 시 건물이 비틀린 것으로 사료된다. 현행기준상 전단스트럽의 간격은 D/4 규정되어있으며, C 오피스텔의 기둥사이즈가 700mm X 400mm인 것으로 감안하면 100mm 이하로 시공되었어야 한다. 그러나 현장에서 전단보강근의 간격은 250mm로 확인되었다. 건물의 설계상의 오류또는 시공상의 오류가 건축물의 피해규모를 늘린 것으로 사료된다.



<그림 2.47> 1층 기둥의 전단파괴와 보강



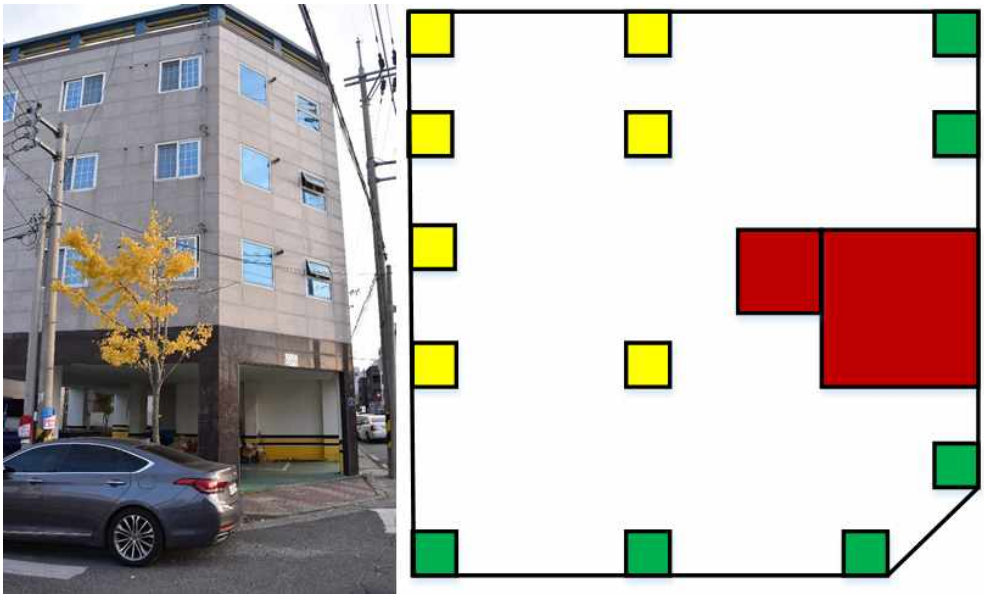
<그림 2.48> 1층 기둥의 전단파괴와 보강



<그림 2.49> 주근의 좌굴 및 전단스트럽 파단

(나) P 오피스텔

포항시 장성동에 위치한 P 오피스텔은 4층 주거형 필로티 건축물이다. <그림 2.50>은 P 오피스텔의 전경모습과 1층 기둥손상을 표현한 단면도이다. P 오피스텔은 기둥에서 전단파괴가 발생한 다른 필로티 건축물과 달리 코어에서 큰 손상이 발생한 건축물이다. <그림 2.50>의 기둥 손상도를 보면 기둥은 3단계 이하의 손상이 발생하였다. 반면 중앙 코어에서는 4, 5단계의 손상이 발생하였다.



<그림 2.50> P오피스텔 전경 및 1층 기둥손상도

<그림 2.51>는 기둥의 전단크랙이 발생한 모습이다. 전단크랙은 노란색으로 표시된 기둥에서 발견되었으나, 주근이 확인될 정도의 손상은 발생하지 않았다. 반면 <그림 2.52>와 같이 중앙부 코어에서 4단계 손상이 발생하였다. <그림 2.53>을 보면 코어벽에 발생한 전단균열은 코어 내부까지 손상된 모습을 확인할 수 있다.



<그림 2.51> 기둥의 전단크랙 발생



<그림 2.52> 코어의 전단파괴



<그림 2.53> 코어의 전단파괴 상세 모습

라. 지진 피해 조사 결과 정리

포항지진피해 현장조사 결과 주요시설물(학교건축물)과 주거형 필로티건축물의 피해가 큰 것으로 확인되었다. 포항지진파의 스펙트럼이 주기가 0.5초에서 상대적으로 높은 스펙트럼가속도 값을 가지는 특징을 가지고 있다., 이로 인해 2~3층 저층 건축물의 피해가 집중된 것으로 예상되었으며, 현장피해조사결과 3~4층 저층 학교건축물과 필로티건축물에서 피해가 집중된 것을 확인하였다. 학교건축물의 경우, 시공년도 오래된 건축물에서 구조재의 손상이 많이 발생하였다. 이는 내진설계 개념이 정립되기 이전에 시공된 건축물이고, 콘크리트의 품질이 좋지 않은 것을 원인으로 판단할 수 있다. 추가로 비내력 조적벽은 건축물에 구조적인 역할을 갖지 않지만, 기둥의 손상을 완화하는 역할을 보여주었다. 주거형 필로티건축물의 경우, 1층 기둥에서 다수의 손상이 발생하였다. 이는 필로티 구조물의 1층 강성이 상부층 보다 낮고, 수평비정형이 더해져 건물에 비틀림 현상이 발생된 것이 원인으로 추정할 수 있다.

4. 소결

본 장에서는 지진에 의한 구조재 및 비구조재의 손상도를 평가 기준인 FEMA P-154에 대한 분석을 수행하였다. 또한 대만화롄지진과 우리나라에서 발생한 포항지진에 대한 실제 현장조사를 통해, 지진에 의한 구조재 및 비구조재의 관측된 손상결과를 정리하였다. 관련 연구내용을 정리하면 아래와 같다.

- ○ FEMA P-154에서 제공하는 RVS(Rapid Visual Screening)은 개별 건축물의 사용재료, 설계년도, 규모, 형상에 따라, 육안검사와 도면검사, 제공되는 약식 구조해석과정을 통해, 건축물의 등급을 1등급(위험)~3등급(안전)으로 지진에 대한 안전성을 평가하는 방식이다. 이 방식은 구조해석을 수행하지 않고 간략한 표를 이용하여 건축물에 점수를 부여한다. 부여된 점수가 건축물의 분류에 따라 미리 정의된 일정점수 이상이면, 건축물은 절적한 내진성능을 확보한다고 간주한다. 또한 지진발생 후 피해를 입은 건축물을 RVS를 통해 검사한 결과를 기반으로 건축물에 green tag, yellow tag, red tag를 부여하여, 건축물의 구조재 및 비구조재 손상에 대한 신속한 post-earthquake평가가 가능하다.
- ○ 대만의 내진설계기준과 우리나라의 내진설계기준을 비교하면, 화롄지역의 단주기영역 설계스펙트럼가속도는 우리나라 포항지역의 단주기영역 설계스펙트럼가속도보다 약 2.76배 큰 것으로 조사되었다. 화롄지진데이터로부터 응답스펙트럼을 분석한 결과, 장주기영역(1초 이상)의 스펙트럼가속도이 설계스펙트럼보다 큰 특징이 있었다. 붕괴가 발생한 4개 건축물(7~12층)에 대해 약식으로 계산된 주기는 0.67~1.14초로, 해당 주기 범위에서 화롄지진의 스펙트럼가속도가 설계스펙트럼을 초과하는 것으로 분석되어, 붕괴가 발생한 건축물은 설계지진력 이상의 지진하중을 받아 건축물이 붕괴하였을 것이라고 추정 된다. 지진으로 손상을 받은 건축물은 1층이 주차장인 필로티건축물이 대다수였다. 대만의 필로티건축물은 전층이 기둥-보 구조이고 2층이상부터는 기둥사이에 조적채움벽이 있는 구조로, 1층이 기둥-보 구조이고 2층 이상은 전단벽구조인 우리나라의 필로티구조와 차이가 있는 것으로 조사되었다. 또한 대만은 FEMA P-154에 기반한 지진피해조사 과정을 거쳐, 손상을 받은 건축물을 yellow tag, red tag 두 분류로 구분한다.

3절. 손상도를 고려한 보수보강 정책 수립

1. 지진손상여부 판별을 위한 decision tree 구축

Decision tree(결정트리)는 어떤 항목에 대한 관측값과 목표값을 연결시켜주는 예측모델로, machine learning기법의 일종이다. 결정트리는 통계학과 데이터마이닝, 기계 학습분야에서 사용하는 예측 모델링 방법 중 하나로, 의사결정 분석에서 결정트리는 시각적이고 명시적인 방법으로 의사결정과정과 결정된 의사를 보여주는데 사용된다. 본 연구에서는데이터 마이닝을 이용한 손상-손실관계를 규명하는 연구를 수항히기 위해, 결정트리를 이용하여 건축물의 구조적 손상에 미치는 요소에 대해 분석을 진행하였다.

결정트리는 목표값에 도달하는 정보 획득량(information gain)이 큰 순서로 구성되는데, 정보 획득량은 정보 이론의 엔트로피(entropy)의 개념에 근거를 두고 있다. 어떠한 정보에 대한 엔트로피는 아래의 식을 통해 얻을 수 있다.

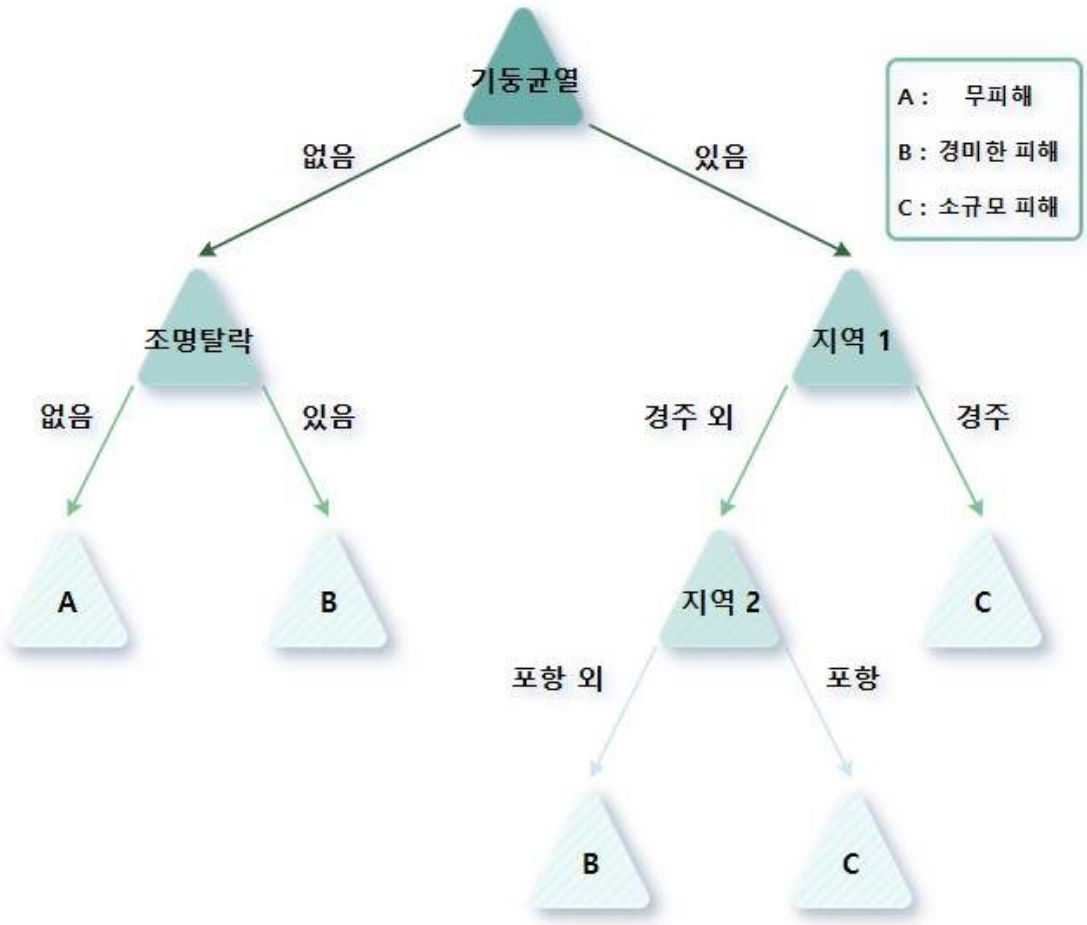
$$E(s) = -\sum_{i=1}^{m} p_i \log_2 p_i \tag{2.13}$$

여기서, p_i: 관측값으로 이루어진 집합

결정트리는 다른 데이터 마이닝 기법과 비교하면 직관적으로 결과를 해석하고 이해하기 쉽다. 또한 자료를 가공할 필요가 거의 없고, 수치자료와 범주자료에 모두 적용될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 학교건축물의 조사된 피해규모(무피해, 경미한피해, 소규모피해)를 목표값으로 설정하였고, 관측값으로는 (지역, 기둥균열, 천정마감, 조명탈락, 마감균열, 누수, 조적벽체균열)을 설정하여 엔트로피분석을 통한 지진피해규모에 대한 결정트리를 구축하였다. 결정트리 구축에 사용된 관측값과 목표값을 정리하면 아래의 표와 같다.

<표 2.8> 결정트리 구축을 위해 엔트로피분석에 사용된 관측값과 목표값

관측값	목표값
지역 (김해, 양산, 울산, 포함, 경주)	피해도 (무피해, 경미한피해, 소규모피해)
기둥균열 (있음, 없음)	
천정마감 (있음, 없음)	
조명탈락 (있음, 없음)	
마감탈락 (있음, 없음)	
마감균열 (있음, 없음)	
누수 (있음, 없음)	
조적벽체 균열 (있음, 없음)	



<그림 2.54> 엔트로피 분석을 통한 학교건축물의 지진피해규모의 결정트리

엔트로피분석을 통해 학교건축물의 지진피해규모에 대한 결정트리를 구축한 결과, 위의 그림과 같으며, 지진피해규모 의사결정에 가장 많은 영향을 미치는 관측값은 기둥균열의 유무로 분석되었다. 만약 경주지진에 의해 학교건축물이 기둥균열이 있고 지역이 경주나 포항이면, 지진피해규모는 소규모 피해인 것을 알 수 있다. 또한 비구조재인 조명탈락의 유무가 무피해 또는 경미한 피해의 의사결정의 지원하는데 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 그 외 천정마감, 마감탈락, 마감균열, 누수, 조적벽체 균열은 학교건축물 전체의 지진손상규모를 결정하는데 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다.

학교건축물 지진피해규모 결정트리 구축을 통해, 구조재의 손상이 전체 지진손상에 가장 많은 영향을 미치는 요소임을 알 수 있고, 비구조재 또한 전체 지진손상에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 지진에 의한 손상과 손실과의 관계를 규명하기 위해, 단순히 손상에 미치는 요소만 분석하는 것이 아닌, 손실에 미치는 영향을 구축된 데이터베이스를 활용하여 연구를 진행할 계획이다. 또한 학교건축물의 지진피해규모를 결정하는데 가장 영향을 많이 미치는 요소는 기둥균열의 유무로 분석되어, 기둥보강에 따른 보수보강 정책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 학교시설물의 보수보강 시나리오 구축 및 해석

본 연구에서는 학교시설물 프로토타입 모델의 결정론적 내진성능평가 및 확률론적 내진성능평가를 수행하여, 내진성능평가에 기반한 학교시설물의 보수보강 시나리오를 구축하였다. 또한 보수보강 시나리오를 통해 보강된 학교시설물의 내진성능평가를 수행하여, 학교시설물의 보수보강 효과에 대한 분석을 수행하였다.

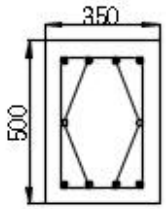
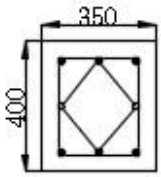
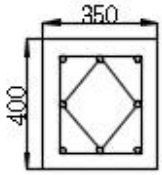
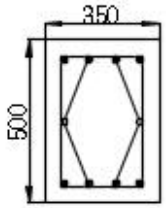
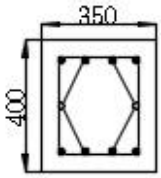
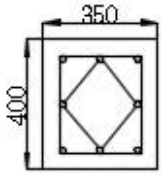
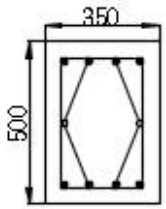
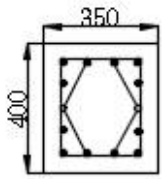
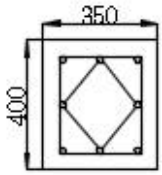
가. 학교시설물 프로토타입 모델의 결정론적 내진성능평가

본 예제에서 콘크리트의 압축강도는 21MPa, 철근의 항복강도는 240MPa로 가정하였으며 지진구역은 1, 지반조건은 S_D지반으로 가정하였다. 기둥과 보의 철근은 부재 일람표에 따라 배근하여 모델링 하였다. 고정하중 및 활하중은 표와 같이 지붕 층과 기준층을 구분하여 적용하였다. 활하중의 경우 KBC2009의 기준에 따라 지붕 층의 경우 $1.0kN/m^2$, 교실 및 복도의 경우 $3.0kN/m^2$으로 설정하였다. 조적채움벽 및 허리벽은 1.0B를 기준으로 하여 계산하고 해당 위치의 보에 하중으로 입력하였다.

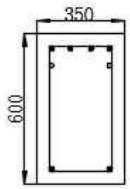
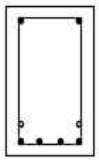
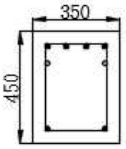
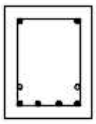
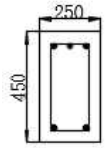
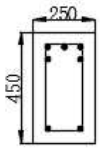
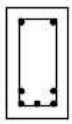
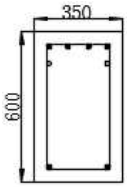
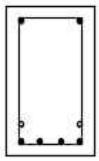
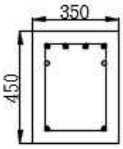
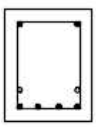
<표 2.9> 작용하중 (kN/m^2)

	고정하중	활하중
지붕 층	4.83	1.00
교실, 복도	3.68	3.00

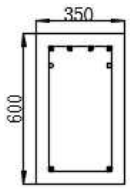
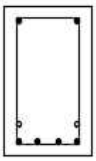
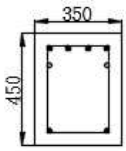
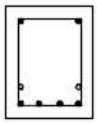
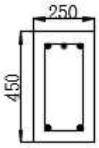
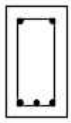
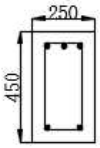
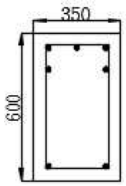
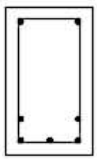
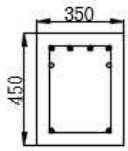
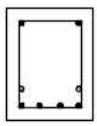
<표 2.10> 기둥 부재 일람표

	C1		C2		C3	
1층						
	1C1	10-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	3C2	8-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	3C3	8-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900
2층						
	2C1	10-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	2C2	10-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	2C3	8-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900
3층						
	3C1	10-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	1C2	14-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	1C3	8-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900

<표 2.11> 보(1층~2층) 부재 일람표

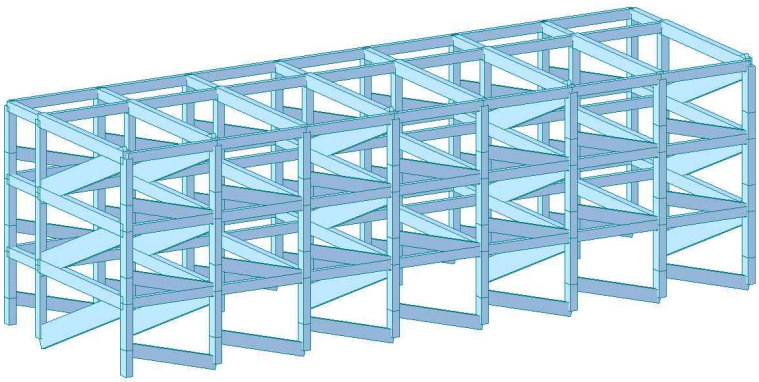
	G1		G2		G3	
1층 & 2층	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부
						
	상부근	8-D19	상부근	8-D19	상부근	8-D19
	하부근	2-D16	하부근	2-D16	하부근	2-D16
	늑근		늑근		늑근	
	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200
	G4		G6		G7	
	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부
						
	상부근	8-D19	상부근	8-D19	상부근	8-D19
	하부근	2-D16	하부근	2-D16	하부근	2-D16
	늑근		늑근		늑근	
	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200

<표 2.12> 보(지붕 층) 부재 일람표

	G1		G2		G3	
3층	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부
						
	상부근	8-D19	상부근	8-D19	상부근	8-D19
	하부근	2-D16	하부근	2-D16	하부근	2-D16
	늑근		늑근		늑근	
	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200
	G4		G6		G7	
	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부	내외단부	중앙부
						
	상부근	8-D19	상부근	8-D19	상부근	8-D19
	하부근	2-D16	하부근	2-D16	하부근	2-D16
	늑근		늑근		늑근	
	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200	D10@300	D10@200

(1) 학교시설물 프로토타입 모델의 비선형 정적해석결과

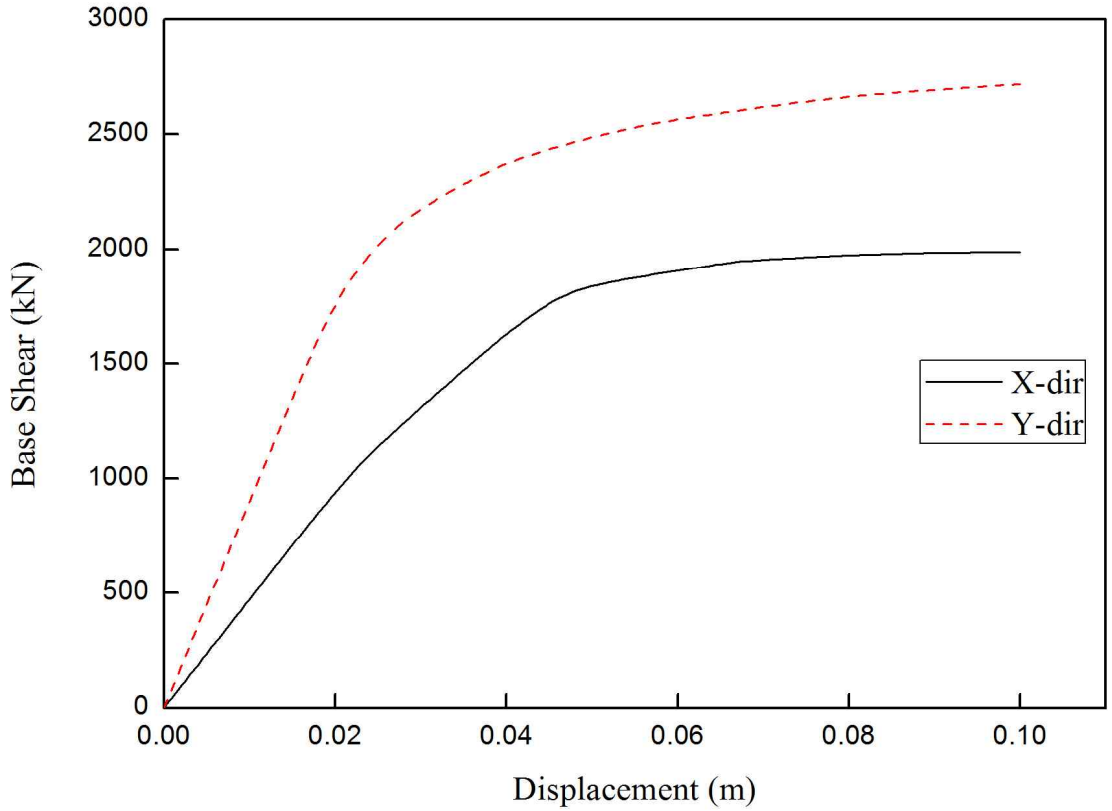
본 연구에서는 구조해석 소프트웨어인 midas Gen(Ver.835)를 이용하여 예제 학교시설물을 모델링 하고 비선형 정적 해석을 수행하였다. 횡하중의 수직분포는 장변 방향의 경우 1차 모드, 단변 방향의 경우 2차 모드의 모드형상과 비례하도록 하였다.



<그림 2.55> 예제 학교건물의 해석 모델

초기하중(1.0DL+0.25LL)에 대해 탄성해석을 수행하고 부재력을 통해 부재의 항복강도를 정의해주었으며 부재의 변형 능력은 매우 큰 값으로 가정하고 예비 해석을 수행 하였다.

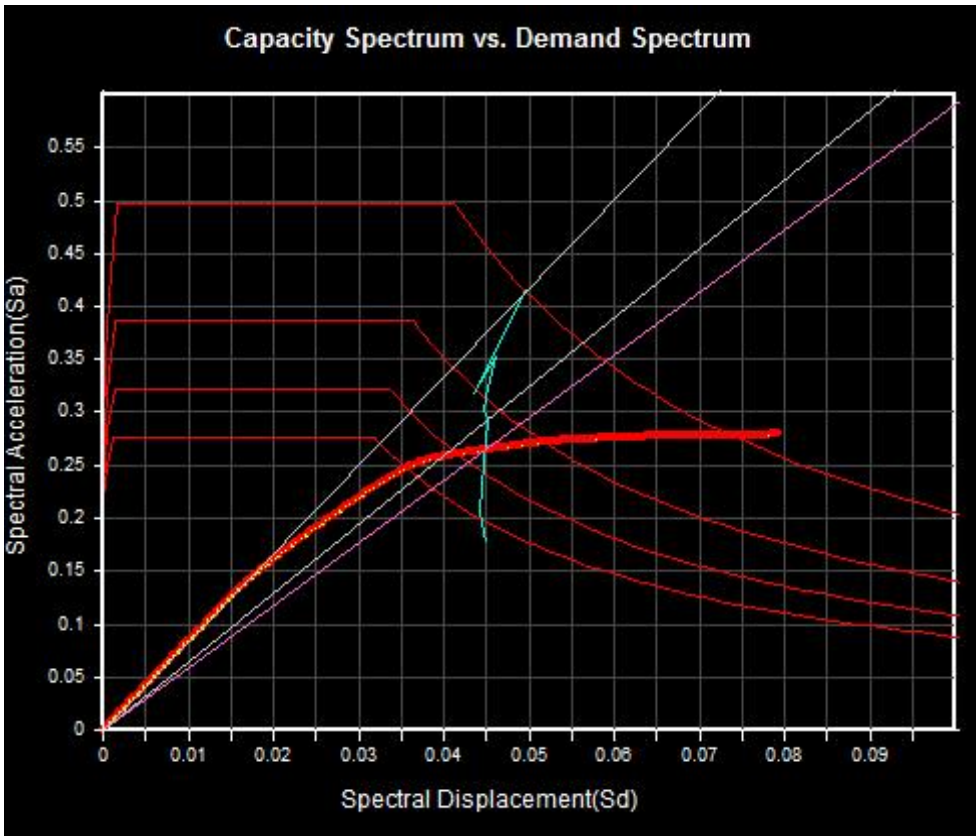
예비 해석 결과 밑면전단력과 최상층 변위와의 관계는 <그림 2.56>와 같다. 단변방향의 강도와 강성이 장변방향에 비해 높은 것으로 조사 되었다. 예비 해석 결과 성능점에서 밑면전단력은 1884kN, 지붕 층의 변위는 0.0565m, 응답 가속도(S_a)는 0.2646g, 응답 변위(S_d)는 0.0448m 유효주기(T_{eff})는 0.8251sec, 유효감쇠비(D_{eff})는 13.27%로 조사되었다. 단변방향 예비 해석 결과 성능점에서 밑면전단력은 2272kN, 지붕 층의 변위는 0.0344m, 응답 가속도(S_a)는 0.3345g, 응답 변위(S_d)는 0.0286m 유효주기(T_{eff})는 0.5857sec, 유효감쇠비(D_{eff})는 13.97%로 조사되었다.



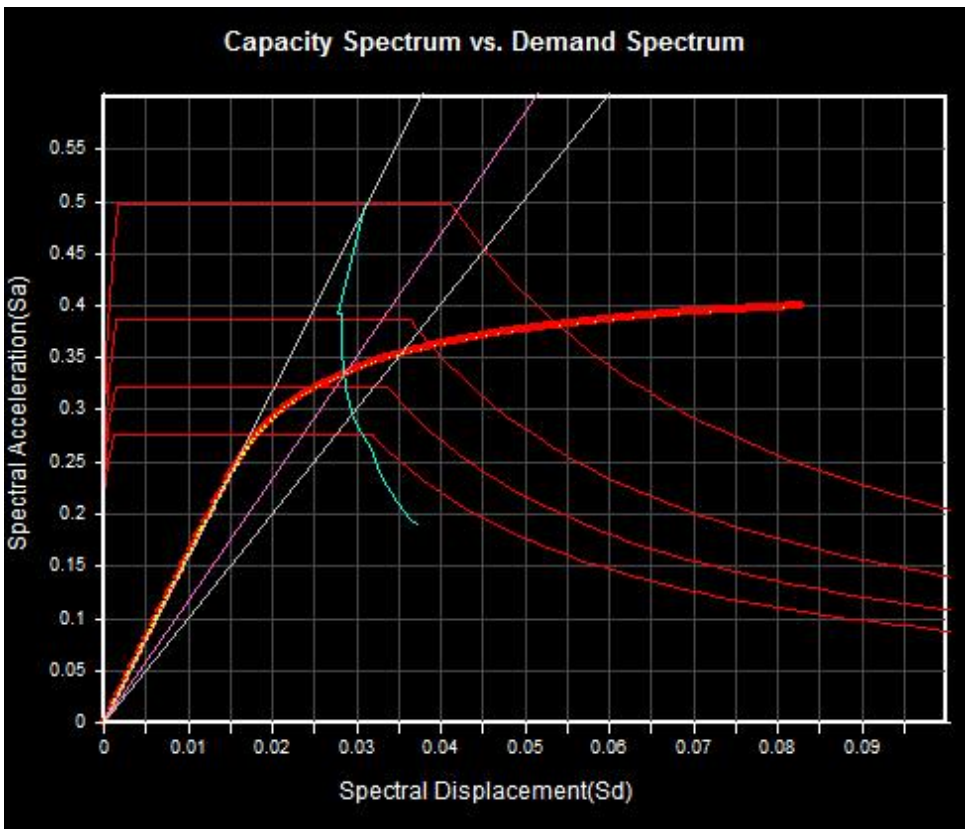
<그림 2.56> 예비 해석 결과 밑면전단력-변위 관계

<표 2.13> 예비 해석 결과 성능점

	Step	S_a**(g)**	S_d**(m)**	T_{eff}**(sec)**	D_{eff}**(%)**
장변방향	113	0.2646	0.0448	0.8251	13.27
단변방향	69	0.3345	0.0286	0.5857	13.97



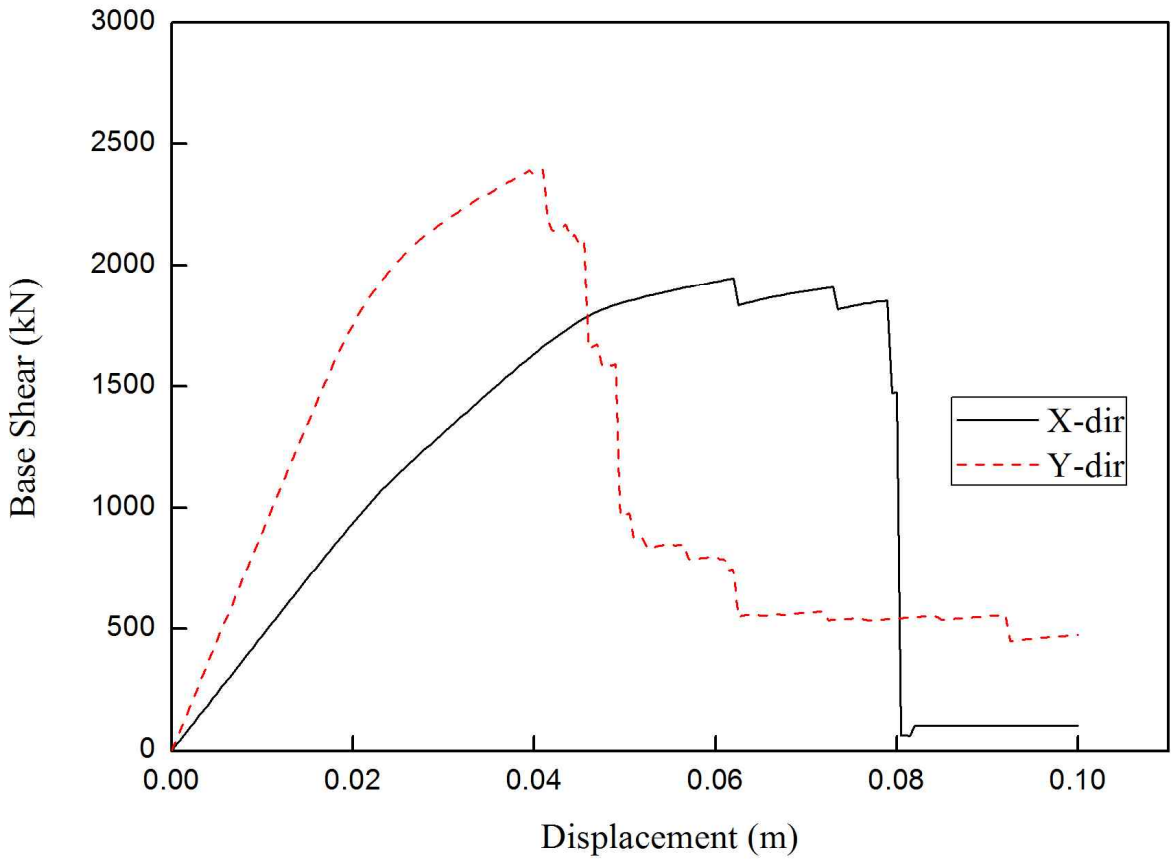
<그림 2.57> 예비 해석 성능점 산정 (a) 장변방향



<그림 2.58> 예비 해석 성능점 산정 (b) 단변방향

실시 해석을 수행하기 위해 예비 해석의 성능점에서 부재의 부재력을 통해 항복강도를 다시 산정하고, 부재의 변형 능력과 성능수준별 허용기준을 정의 하였다. 축 및 전단 힌지의 각 성능수준에 대한 허용 변형률은 CP(붕괴방지)에 해당하는 변형률은 항복변형률, LS(인명안전)의 경우 항복변형률의 75%, IO(거주가능)의 경우 항복변형률의 50%로 설정하였다.

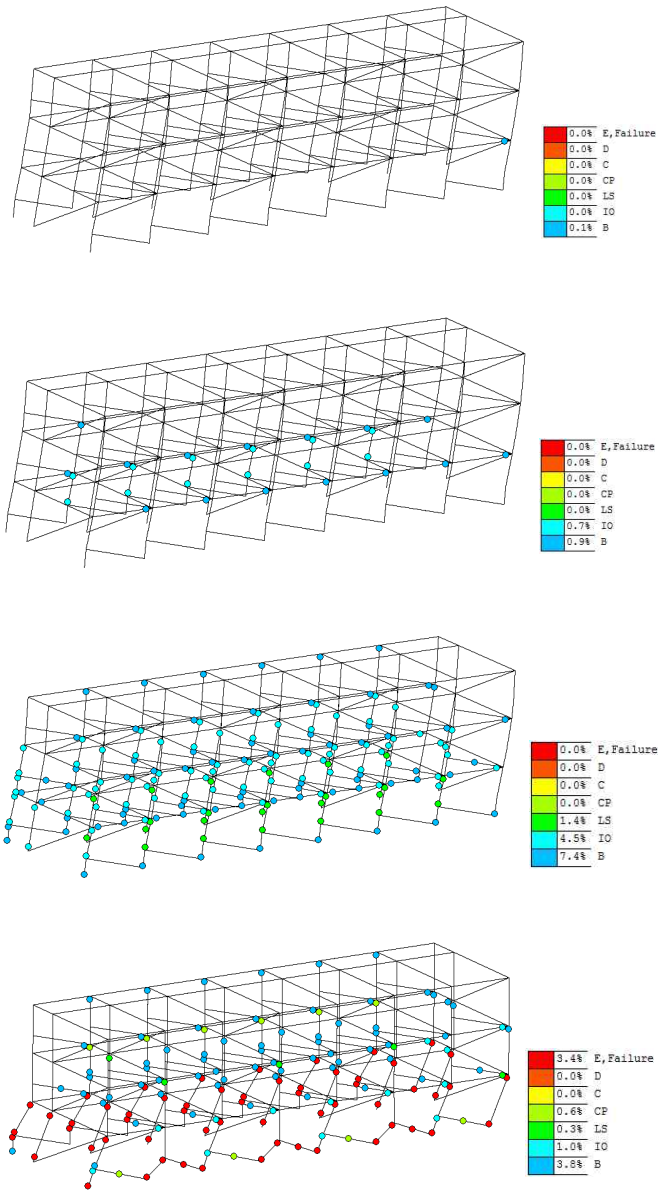
실시 해석 결과 밑면전단력과 변위와의 관계는 <그림 2.59>과 같다. 장변방향의 최대 내력은 지붕 층 변위 0.0620m에서 1946.38kN으로 조사되었고 단변방향의 최대 내력은 지붕 층 변위 0.0560m에서 2390.94kN으로 조사되었다. 보강 전 예제 학교건물의 장변방향 실시 해석 결과 성능점에서 밑면전단력은 1900.56kN, 지붕 층의 변위는 0.0560m, 응답 가속도(S_a)는 0.2668g, 응답 변위(S_d)는 0.0444m 유효주기(T_{eff})는 0.8197sec, 유효감쇠비(D_{eff})는 13.20%로 조사되었다. 단변방향 예비 해석 결과 성능점에서 밑면전단력은 2286.52kN, 지붕 층의 변위는 0.0345m, 응답 가속도(S_a)는 0.3363g, 응답 변위(S_d)는 0.0286m 유효주기(T_{eff})는 0.5846sec, 유효감쇠비(D_{eff})는 13.78%로 조사되었다.



<그림 2.59> 실시 해석 결과 밑면전단력과-변위 관계

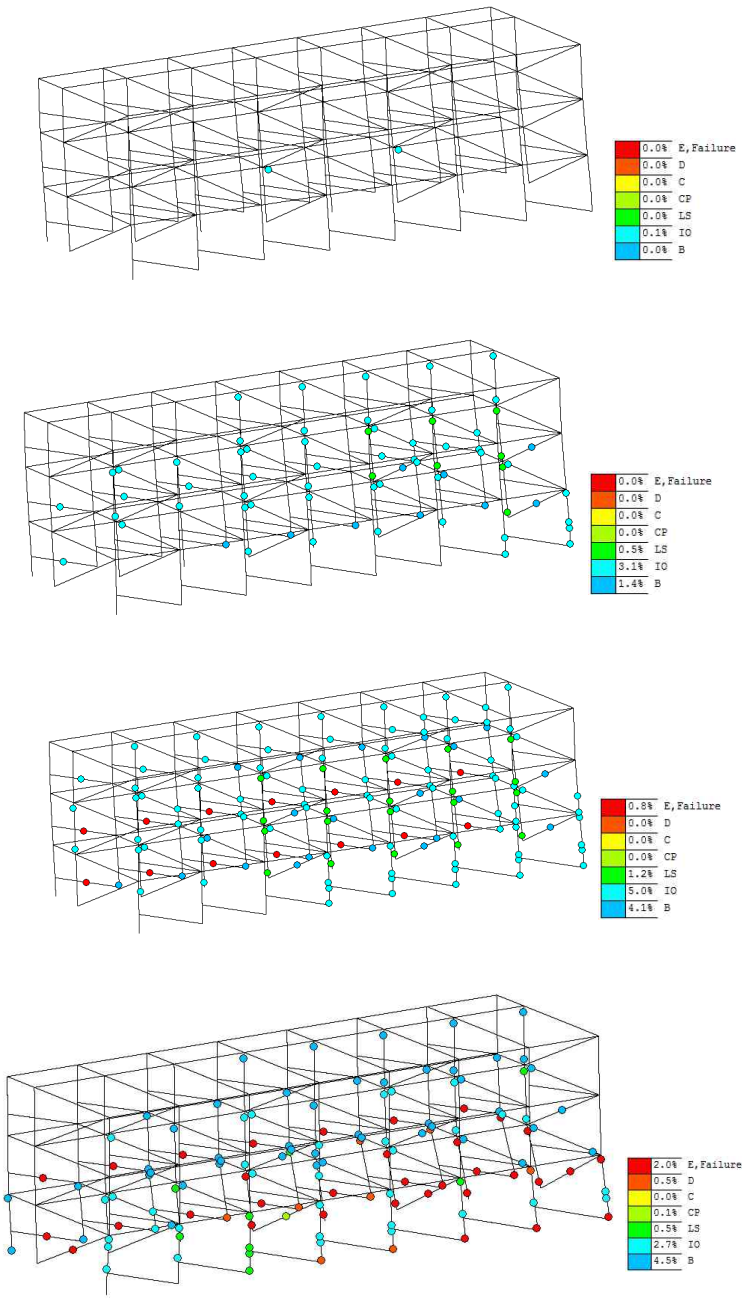
(2) 학교시설물 프로토타입모델 부재의 성능상태 검토

아래의 그림은 장변방향의 해석 Step별 부재의 성능상태를 나타낸 것이다. 가장 먼저 밑면 전단력 779.16kN에서 1층 보가 항복하였고 2층의 보가 항복함과 동시에 1층의 외부 기둥이 IO수준을 초과 하였다. 이후 2층 외부 기둥, 1층 내부 기둥이 IO수준을 초과하였다. 밑면 전단력 1716.38kN에서는 1층 외부 기둥이 최초로 LS수준을 초과하였다. 성능점에서 밑면 전단력인 1900.56kN에서는 1층 내부 기둥이 LS수준을 초과하였고 2층 조적허리벽에서 항복이 발생하였다. 최종적으로 내력이 급격히 저하되며 1층의 조적허리벽과 기둥이 파괴되었다.



<그림 2.60> 해석 Step별 부재의 성능상태 (장변방향)

아래의 그림은 단변방향의 해석 Step별 부재의 성능상태를 나타낸 것이다. 먼저 밑면 전단력 224.94kN에서 1층 보가 IO수준을 초과 하였다. 이후 단변방향에 설치된 조적채움벽이 항복하고 1층과 2층의 내부 기둥이 LS수준을 초과하였다. 성능점에서 밑면 전단력인 2286.52kN에서는 장변방향으로 설치되어 있는 조적허리벽이 파괴되었고 1층과 2층의 내부 기둥이 LS수준을 초과하였다. 최종적으로 내력이 급격히 저하되며 단변방향의 1층 조적채움벽과 기둥이 파괴되는 것으로 조사되었다.

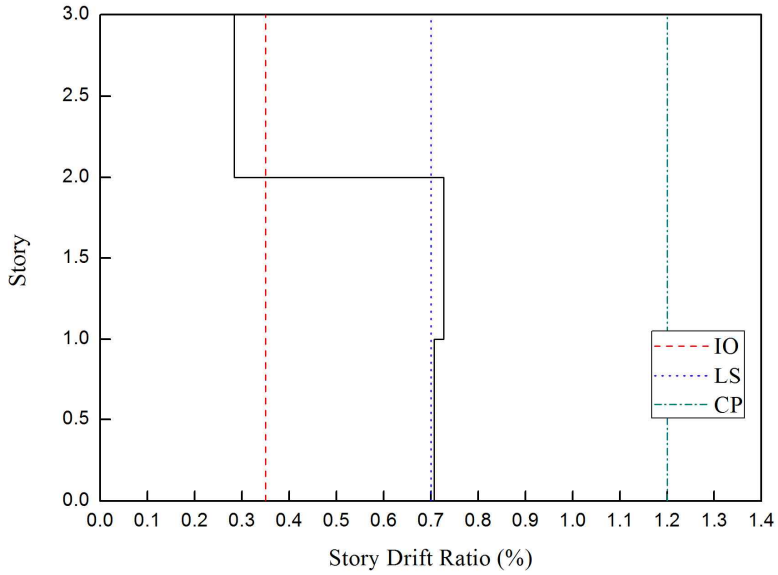


<그림 2.61> 해석 Step별 부재의 성능상태 (단변방향)

(3) 층간변위비에 따른 학교시설물 프로토타입모델의 보유성능수준

각 방향에 대해 성능점에서의 층간변위비에 따라 성능수준을 판정하였다. 층별 성능수준 중 가장 낮은 성능수준을 전체 구조물의 성능수준으로 판정하였다. 한국시설안전공단의 내진성능 평가요령에서는 조적채움벽이 있는 RC 모멘트 골조의 허용 층간변위비를 <표 1.56>과 같이 정의하고 있다. 예제 학교시설물은 내진설계가 되지 않은 경우이기 때문에 허용 층간변위비는 IO수준은 0.35%, LS수준은 0.7%, CP수준은 1.2%를 기준으로 하였다.

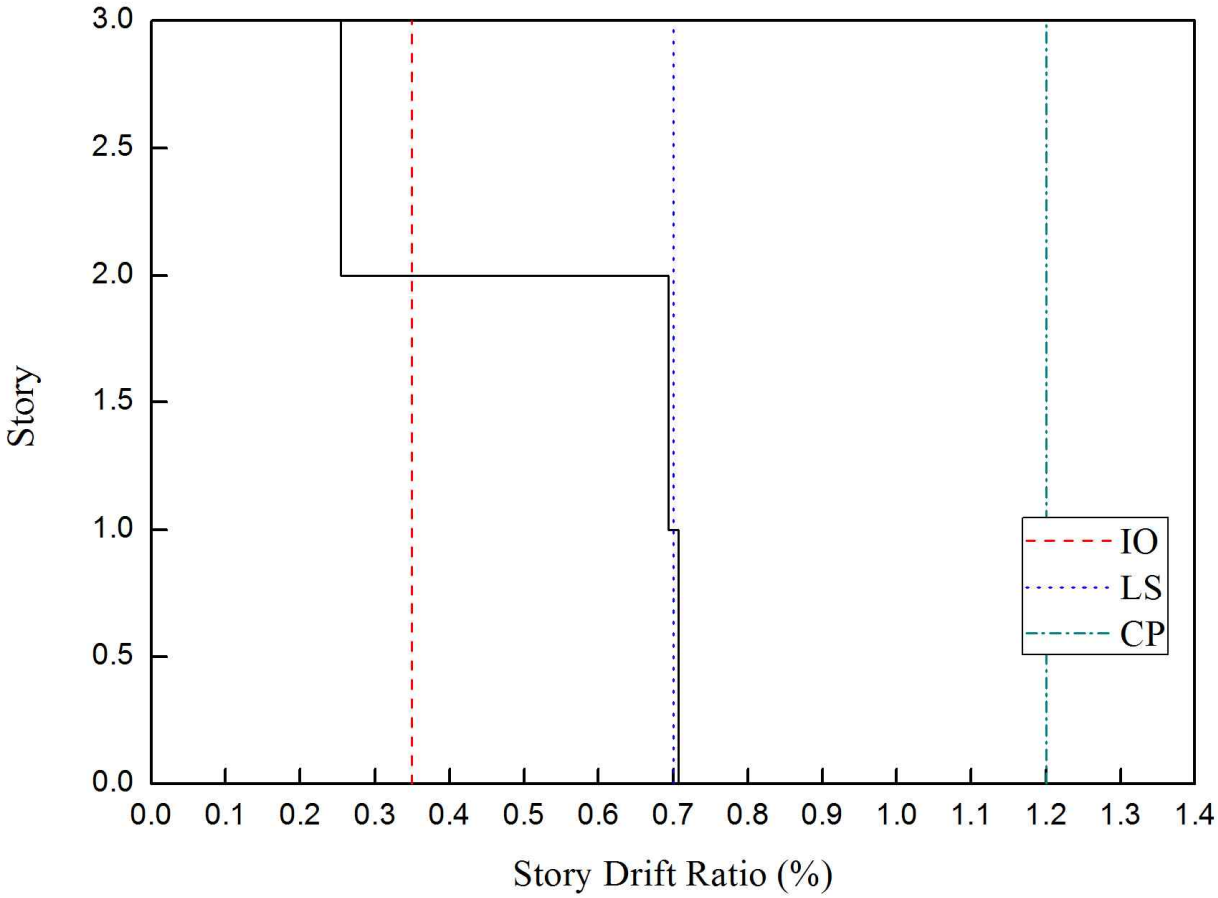
층별 최대 층간변위비에 따라 층별로 성능수준을 판별한 결과 장변방향의 경우 1층과 2층에서 LS수준의 허용 층간변위비인 0.7%를 초과 하였으므로 최종 성능수준은 CP수준으로 판정되었다. 단변방향의 경우 1층에서 LS수준의 허용 층간변위비를 초과하였기 때문에 최종 성능 수준은 CP수준으로 판정되었다.



<그림 2.62> 성능점에서 최대 층간변위비 (장변방향)

<표 2.14> 층간변위비 성능수준 판별 결과 (장변방향)

	층고 (m)	층간 변위 (m)	층간변위비 (%)	IO	LS	CP
1층	3.3	0.023	0.707	NG	NG	OK
2층	3.3	0.024	0.727	NG	NG	OK
3층	3.3	0.009	0.283	OK	OK	OK
최종 성능수준 : CP(붕괴방지)						



<그림 2.63> 성능점에서 최대 층간변위비 (단변방향)

<표 2.15> 층간변위비 성능수준 판별 결과 (단변방향)

	층고 (m)	층간 변위 (m)	층간변위비 (%)	IO	LS	CP
1층	3.3	0.023	0.707	NG	NG	OK
2층	3.3	0.023	0.694	NG	OK	OK
3층	3.3	0.008	0.254	OK	OK	OK

최종 성능수준 : CP(붕괴방지)

(4) 학교시설물 프로토타입모델의 보유성능수준

각 성능수준에 대해서 수직부재의 축력 합에 대한 성능수준을 만족하는 부재의 축력 합의 비가 80% 미만이면 해당 성능수준을 만족하지 못하는 것으로 판정한다. 층별로 축력비를 통해 성능수준을 결정한 후 가장 불리한 층의 결과를 전체 건물의 성능수준으로 판정하였다. 층별, 수직부재의 성능수준 및 부재의 수직하중 저항능력에 대하여 검토한 결과는 <표 2.13>과 <표 2.14>과 같다. 검토 결과 장변방향의 경우 1층의 수직부재의 축력 합에 대한 LS수준을 만족하는 1층 수직부재의 축력 합의 비가 52.76%로 조사되었다. 따라서 장변방향의 최종 성능수준은 CP수준으로 판정되었다. 단변방향의 경우 모든 층에서 IO수준을 만족하지 못하였으나 LS수준은 만족하는 것으로 조사되었다. 장변방향의 최종 성능수준은 LS수준으로 판정되었기 때문에 목표 성능수준을 만족하는 것으로 조사되었다.

종합해서 정리해보면 보강 전 예제 학교건물은 1층의 기둥이 파괴되며 급격한 내력저하를 보이는 것으로 조사되었다. 층간변위비를 근거로 보유성능수준을 판별한 결과 장변방향과 단변방향 모두 목표 성능수준인 LS수준을 만족하지 못하였다. 부재의 수직하중 저항능력을 근거로 판별한 경우 장변방향은 CP수준, 단변방향은 LS수준으로 판정되었다.

<표 2.16> 부재의 수직하중 저항능력 성능수준 판별 결과 (장변방향)

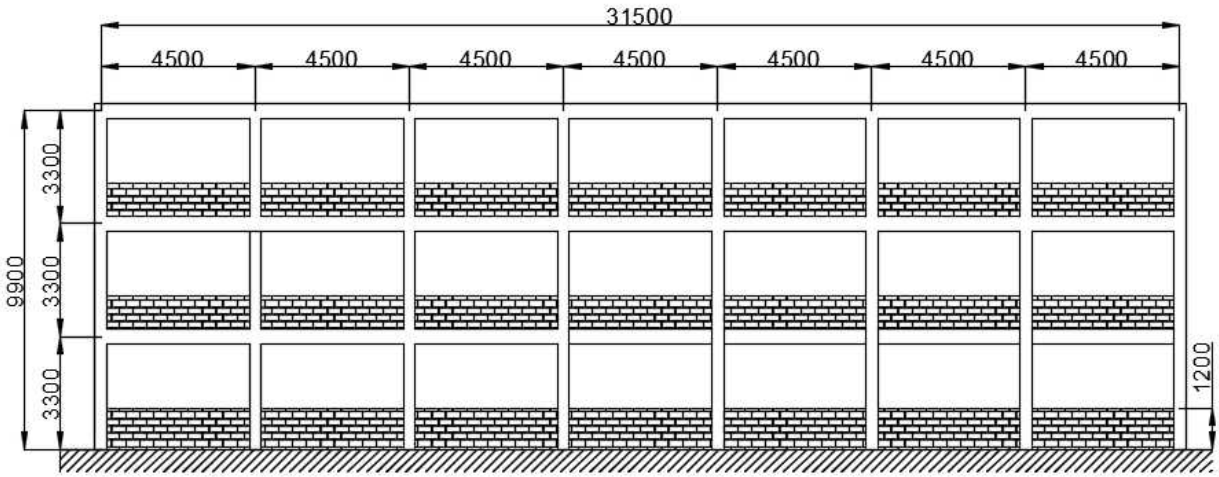
	축력합 (kN)	IO		LS		CP	
		축력합 (kN)	축력비 (%)	축력합 (kN)	축력 비 (%)	축력합 (kN)	축력비 (%)
1층	8366.46	3547.40	38.38	5767.10	52.76	8366.46	100.00
2층	3906.14	1944.38	42.55	3906.14	100.00	3906.14	100.00
3층	307.28	307.28	100.00	307.28	100.00	307.28	100.00
최종 성능수준 : CP(붕괴방지)							

<표 2.17> 부재의 수직하중 저항능력 성능수준 판별 결과 (단변방향)

	축력합 (kN)	IO		LS		CP	
		축력합 (kN)	축력비 (%)	축력합 (kN)	축력 비 (%)	축력합 (kN)	축력비 (%)
1층	12968.62	6948.19	53.58	10601.61	81.75	12968.62	100.00
2층	8029.15	4116.05	51.26	6448.59	80.31	8029.15	100.00
3층	3361.86	2080.99	61.90	3361.86	100.00	3361.86	100.00
최종 성능수준 : LS(인명안전)							

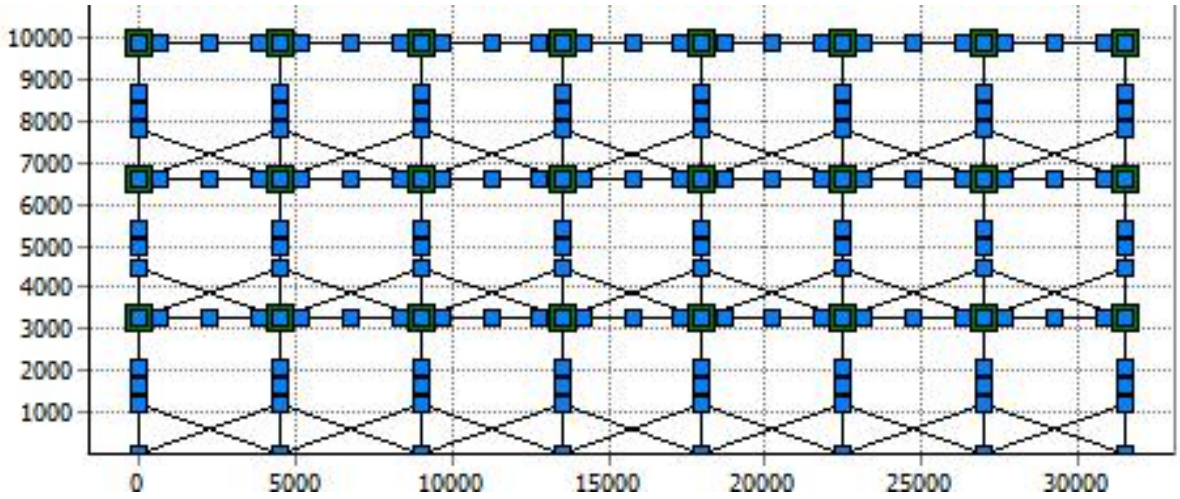
나. 학교시설물 프로토타입모델의 확률론적 내진성능평가

확률론적 내진성능 평가 방법인 취약도 분석을 수행하기 위해서는 다수의 지진파에 대해 증분동적해석을 수행하여야 한다. 증분 동적 해석은 비선형 동적 해석을 여러 번 반복하여 수행하는 것으로 부재의 수, 구조물의 차원이 높아질수록 더 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 <그림 2.65>과 같이 학교시설물의 대표적인 골조에 대해서 2차원 모델링을 하고 해석을 수행 하였다.



<그림 2.64> 증분 동적 해석 예제 골조

<그림 2.40>는 Zeus-NL로 구축 된 골조의 해석 모델이다. 분석에서 보다 정확한 결과를 얻기 위해 모든 보와 기둥은 5개의 하위 요소로 나뉘었다. 비선형 동적 해석을 위해 보-기둥 접합부에서 집중질량(Lmass)이 적용되었다.



<그림 2.65> Zeus-NL로 구축된 예제 골조 모델

(1) 재료모델

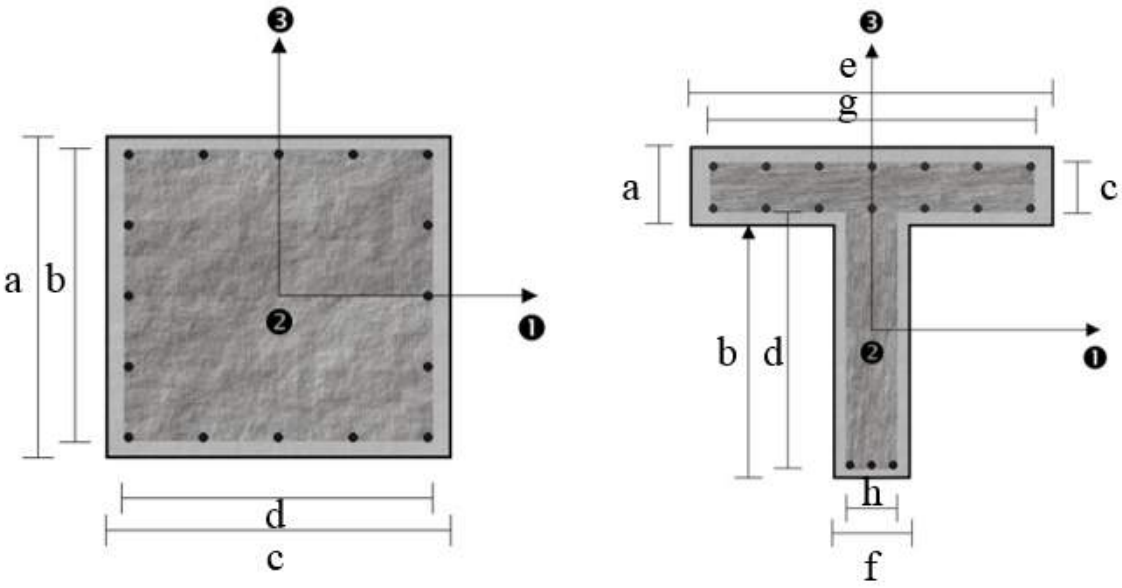
본 예제 골조의 재료모델은 3가지가 사용되었다. stl1(Bilinear elasto-plastic model with kinematic strain hardening) 모델은 철근에 사용되었고 con1(Trilinear concrete model) 모델은 조적재료에 사용 되었고 con2(Non-linear constant confinement concrete model) 모델은 콘크리트에 사용되었다. stl1 모델에는 탄성계수 (E), 항복 강도 (σ_y) 및 변형 경화 매개 변수 (μ)의 세 가지 매개 변수가 필요하다. conc1 모델의 경우 초기 강성 (E_1), 압축 강도 (f'_c), 최대 강도이후 강성 (E_2) 및 잔류 강도 ($f_{residual}$)의 네 가지 매개 변수가 필요하다. conc2 모델의 경우 압축 강도 (f'_c), 인장 강도 (f_t), 최대 강도에서의 변형률 (ϵ_{co}) 및 구속효과 계수 (k)의 네 가지 매개 변수가 필요하다. 사용된 재료 모델의 물성을 아래의 표로 정리하였다.

<표 2.18> Zeus-NL에 적용된 재료 모델 및 물성치

재료 모델	기호	물성치
stl1(rebar)	E	200,000 N/mm^2
	σ_y	240 N/mm^2
	μ	0.02
con1(masonry)	E_1	786.9 N/mm^2
	f'_c	1.398 N/mm^2
	E_2	-10,000 N/mm^2
	$f_{residual}$	0.001 N/mm^2
con2(concrete)	f'_c	21 N/mm^2
	f_t	2.1 N/mm^2
	ϵ_{co}	0.002
	k	1.0

(2) 요소 및 단면

기둥, 보, 조적벽의 경우 3차원 탄소성 cubic 요소가 사용되었다. 비선형 동적 해석을 위한 질량은 보-기둥 접합부에 집중질량(Lmass)가 사용되었다. 기둥과 조적벽의 경우 철근콘크리트 직사각형 단면(rcrs)가 적용되었다. 보는 T형 단면(rcts)가 사용되었으나 슬래브의 영향은 고려하지 않았다. 기둥과 보는 <표 2.10>에서 <표 2.12>까지 일람표에 따라 철근이 배근되었다. 조적벽은 등가대각가새로 치환하여 모델링 하였다.



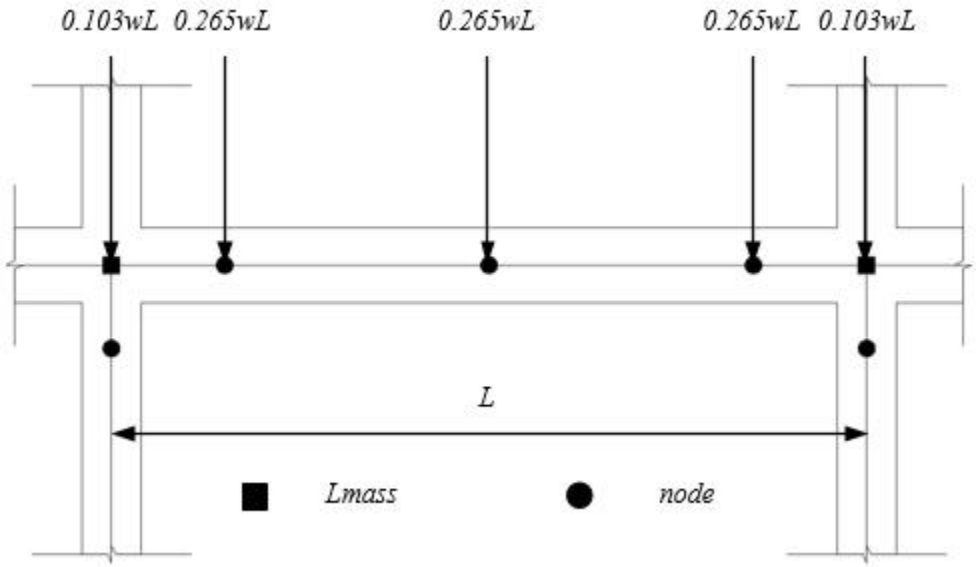
<그림 2.66> Zeus-NL에 적용된 단면 종류 (Elnashai et al. 2008)

<표 2.19> Zeus-NL에 적용된 단면 치수

부재	기호	단면 치수 (mm)
Coulmn	a	500
	b	450
	c	350
	d	300
Beam	a	130
	b	320
	c	80
	d	320
	e	251
	f	250
	g	201
	h	200
Masonry	a	603
	b	602
	c	190
	d	189

(3) 하중

Zeus-NL 소프트웨어에는 분포하중을 정의하는 것이 없으므로 고정하중 및 활하중은 절점하중으로 입력하였다. 분포하중을 절점하중으로 치환하기 위한 계수는 <그림 2.42>과 같이 적용하여 각 절점에 분배하였다.



<그림 2.67> 등가 절점하중

(4) 해석 모델의 검증

Zeus-NL 해석 모델의 검증을 위해 고유치 해석을 진행하고 근사 고유주기 산정식에 의한 고유주기와 midas gen으로 모델링된 해석 모델의 고유주기와 비교하였다. 근사 고유주기 (T_a)는 식 (2.14)을 통해 구한다.

$$T_a = C_T h_n^{3/4} \tag{2.14}$$

여기서,

$C_T = 0.085$: 철골 모멘트 골조

$= 0.073$: 철근콘크리트 모멘트 골조, 철골 편심가새 골조

$= 0.049$: 그 외 다른 모든 건축물

h_n : 건축물의 밑면으로부터 최상층까지의 전체높이 (m)

다만, 철근콘크리트와 철골 모멘트저항골조에서 12층을 넘지 않고 층의 최소높이가 3m 이상일 때에는 근사고유주기 (T_a)는 식 (2.15)을 통해 구할 수 있다.

$$T_a = 0.1N \tag{2.15}$$

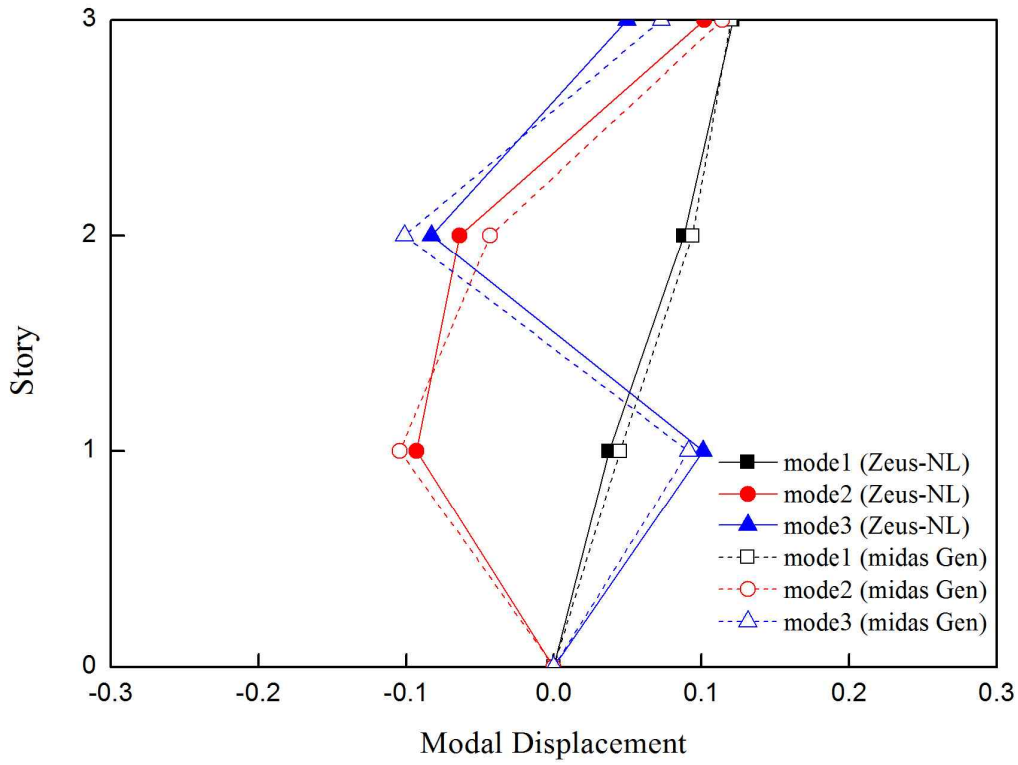
여기서,

N : 층수

<표 2.17>은 근사 고유주기식에 의한 고유주기와 Zeus-NL과 midas Gen의 고유치해석 결과를 비교한 표이다. 식 (2.14) 에서 C_T는 0.049를 적용하였다. 고유치 해석 결과 Zeus-NL에 의한 고유주기는 0.2748초로 식 (2.14) 에 의한 고유주기와 근사하게 나타났다. midas Gen에 의한 고유주기는 0.3226초로 조사 되었으며 근사 고유주기식과 Zeus-NL에 의한 고유주기에 비해 다소 높게 조사되었다. <그림 2.43>은 Zeus-NL과 midas Gen에 의한 모드 형상(Mode Shapes)을 비교한 것이다. 각 모드에 대한 고유벡터와 모드 형상이 유사한 것으로 보아 Zeus-NL의 해석 모델은 비선형 동적 해석을 수행하기에 타당하다고 판단하였다.

<표 2.20> 근사 고유주기 비교

Mode	Period (sec)			
	(2.94)	(2.95)	Zeus-NL	midas Gen
1	0.2735	0.3	0.2748	0.3226
2			0.0866	0.1070
3			0.0495	0.0676



<그림 2.68> 모드형상 비교

(5) 지진파 선정

FEMA P695에서는 지반운동의 종류를 두 가지로 나누어 제시하고 있다. 원단층 지반운동(Far-Field Ground motion) 데이터군은 단층지역으로부터 10km 이상 떨어진 곳에서 측정된 22개의 지반운동 기록이고 근단층 지반운동(Near-Field Groun motion) 데이터군은 단층지역으로부터 10km 이내에서 측정된 기록이다. 구조물에 대한 비선형 응답을 평가하기 위해서 일반적으로 원단층 지반운동 데이터군을 사용하지만, 근거리 지진에 의한 영향을 고려해야 하는 특별한 경우 근단층 지반운동 데이터군을 사용한다. 본 연구에서는 취약도 분석에 사용되는 확률매개변수의 표본 데이터를 구축하기 위해 원단층 지반운동 데이터 군에 나열된 지진파에 대해 증분 동적 해석(Incremental Dynamic Analysis, IDA)을 수행하였다. 선정된 지진파는 최대 지반 가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 0.05g에서 0.6g까지 0.05g 간격으로 조절하여 총 120개의 지진파(10x12)에 대하여 반복적인 비선형 동적 해석이 수행되었다.

<표 2.21> 증분 동적 해석에 사용된 지진파

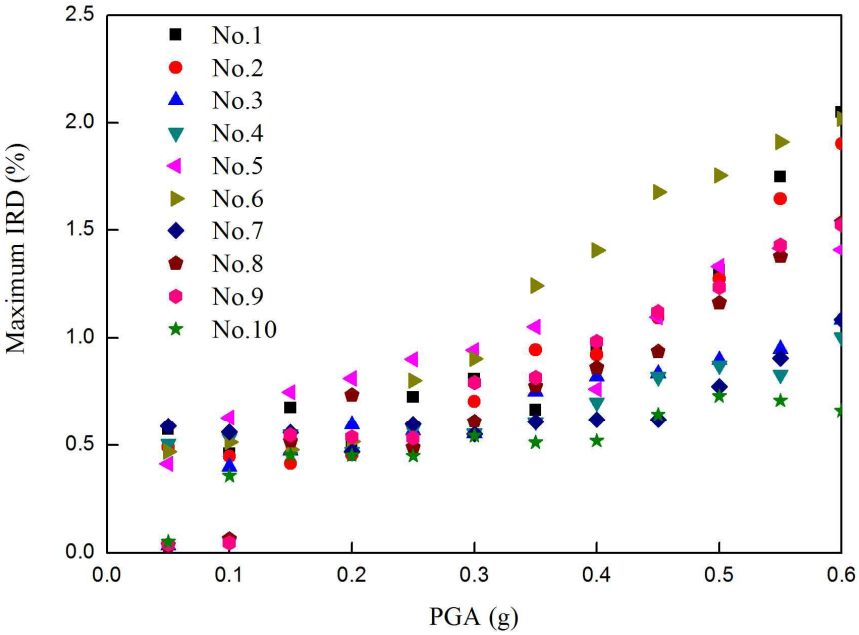
EQ ID	Earthquake			Recorded Motion	
	Name	Year	M	PGA (g)	PGV (cm/s)
No.1	Northridge	1994	6.7	0.52	63
No.2	Northridge	1994	6.7	0.48	45
No.3	Duzce, Turkey	1999	7.1	0.82	62
No.4	Hector	1999	7.1	0.34	42
No.5	Imperial Valley	1979	6.5	0.35	33
No.6	Imperial Valley	1979	6.5	0.38	42
No.7	Kebe, Japan	1995	6.9	0.51	37
No.8	Kobe, Japan	1995	6.9	0.24	38
No.9	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	0.36	59
No.10	Kocaeli, Turkey	1999	7.5	0.22	40

(6) 증분 동적 해석을 이용한 지진 취약도 분석

증분 동적 해석을 이용한 지진 취약도 분석은 다수의 지진파를 구조물이 탄성거동을 하는 범위에서 부터 붕괴에 이르기 까지 지진의 세기를 증가시켜 해석을 수행한 후 구조물의 응답 데이터베이스를 구축하고, 통계적인 방법을 통해 지진에 대한 손상확률을 평가한다. 보강 전 예제 구조물의 증분 동적 해석 결과는 <표 2.19>와 같다. <그림 2.44>를 보면 스케일링된 각각의 최대 지반가속도에 대한 최대 층간변위비는 지진파의 특성에 따라 다양하게 분포되어있는 것으로 조사되었다. 따라서 지진에 대한 구조물의 응답은 확률적으로 나타내야할 필요가 있다.

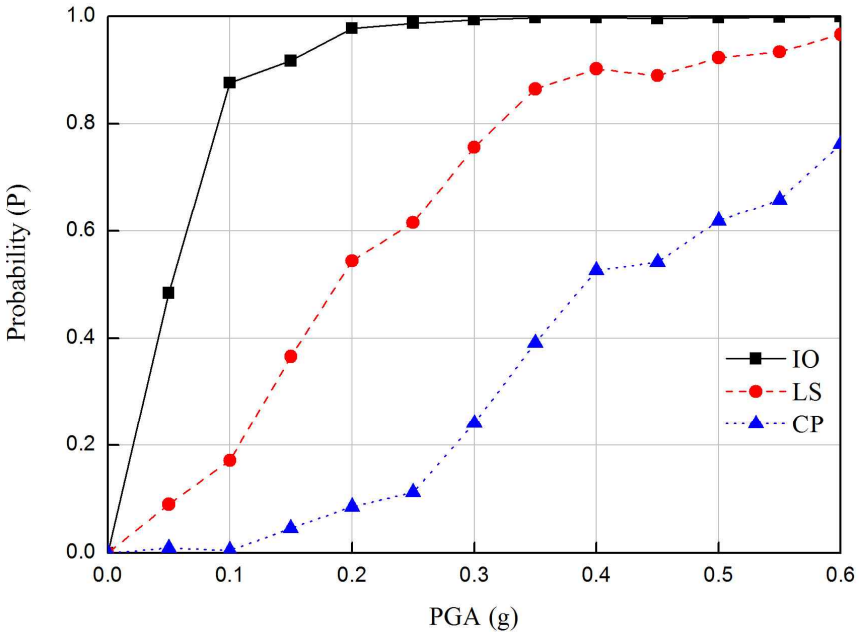
<표 2.22> 증분 동적 해석 결과 최대 층간변위비

PGA (g)	Maximum Inter-story Drift Ratio (%)									
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No,9	No.10
0.05	0.493	0.423	0.446	0.059	0.415	0.486	0.502	0.473	0.423	0.033
0.1	0.544	0.525	0.545	0.513	0.503	0.488	0.546	0.55	0.495	0.428
0.15	0.701	0.617	0.482	0.765	0.659	0.979	0.551	0.445	0.598	0.482
0.2	0.946	0.701	0.767	0.635	0.692	0.989	0.779	0.632	0.682	0.573
0.25	0.989	0.971	0.636	0.740	0.785	0.864	0.658	0.767	0.841	0.620
0.3	1.015	1.306	0.722	0.927	0.987	0.929	1.16	0.834	0.938	0.546
0.35	1.201	1.530	1.094	0.792	1.166	1.086	1.239	0.971	1.338	0.626
0.4	1.247	1.674	1.204	1.075	1.278	1.186	2.16	0.861	1.510	0.709
0.45	1.220	1.859	1.193	0.929	1.480	1.200	2.511	0.881	1.420	0.750
0.5	1.542	2.023	1.178	1.168	1.662	1.178	2.736	0.99	1.519	0.774
0.55	1.964	1.852	1.302	1.070	1.927	1.279	3.002	1.091	1.413	0.815
0.6	2.524	2.454	1.389	1.415	2.147	1.401	3.062	1.203	1.685	0.796



<그림 2.69> PGA에 따른 최대 층간변위비의 산점도

예제 구조물의 지진에 대한 응답과 손상을 확률적으로 나타내기 위해 먼저 최대 층간변위비의 평균값과 표준편차 및 불확실성 매개변수를 산정하였다. 그리고 구조물의 응답이 성능수준별 허용 층간변위비를 초과할 확률을 곡선의 형태로 나타내면 <그림 2.45>과 같다. 취약도 곡선의 가로축은 지진의 세기를 나타내는 축이며 세로축은 구조물이 성능수준을 초과할 확률을 나타낸다. 예를 들어 최대 지반가속도가 0.2g인 지진이 보강 전 예제 구조물에 작용할 때 구조물이 IO수준을 초과할 확률은 97%, LS수준을 초과할 확률은 54%, CP수준을 초과할 확률은 8%로 분석할 수 있다.

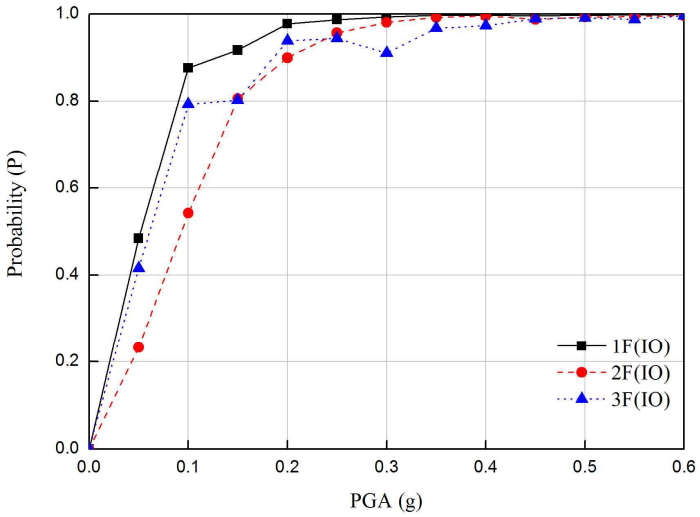


<그림 2.70> 학교시설물 프로토타입모델의 지진 취약도 곡선

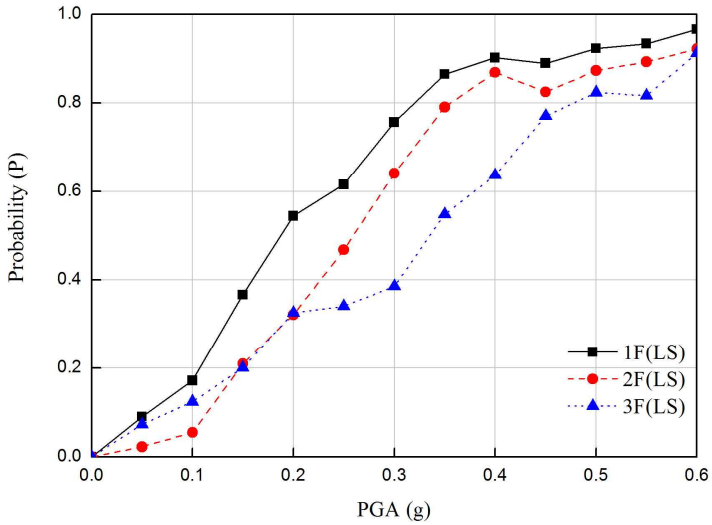
<표 2.23> PGA에 따른 학교시설물 프로토타입모델의 손상확률

PGA (g)	Reaching or exceeding each limit state with respect to PGA (%)		
	IO	LS	CP
0.05	48.40	9.03	0.94
0.1	87.66	17.14	0.48
0.15	91.74	36.58	4.56
0.2	97.78	54.38	8.57
0.25	98.72	61.53	11.23
0.3	99.37	75.69	24.12
0.35	99.80	86.55	39.13
0.4	99.80	90.25	52.60
0.45	99.62	89.01	54.14
0.5	99.80	92.32	61.86
0.55	99.82	93.41	65.88
0.6	99.95	96.65	76.26

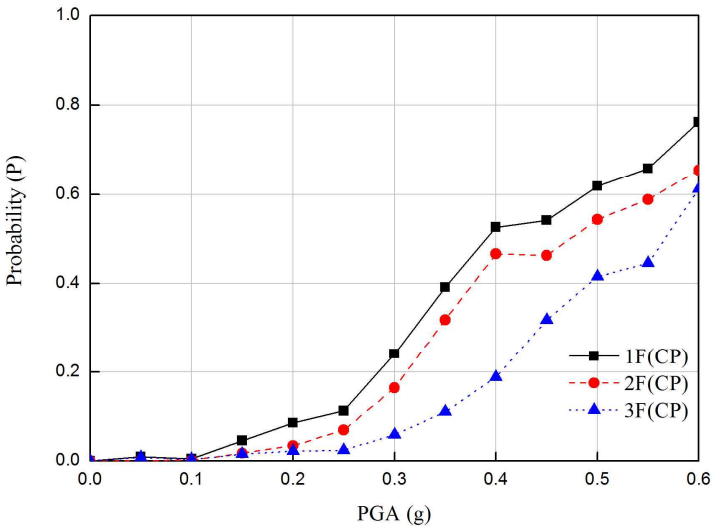
예제 구조물의 약층을 판별하기 위해 층별로 취약도를 평가한 결과는 <그림 2.46>에 나타내었다. IO수준의 경우 1층, 3층, 2층 순으로 손상확률이 높을 것으로 추정되었다. 학교건물의 목표성능 수준 이상(LS, CP)인 경우 1층, 2층, 3층 순으로 손상확률이 높을 것으로 추정되었다. 따라서 학교시설물 프로토타입모델은 대체적으로 1층과 2층이 지진에 대해 취약할 것으로 평가되었으며 취약한 층(1층, 2층)에 대해 내진보강을 실시하는 것이 효과적일 것으로 판단하였다.



(a) IO Level



(b) LS Level



(c) CP Level

<그림 2.71> 학교시설물 프로토타입모델의 층별 지진 취약도 곡선

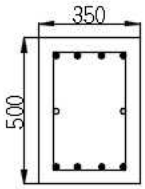
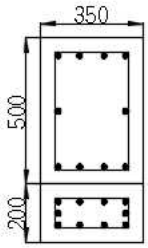
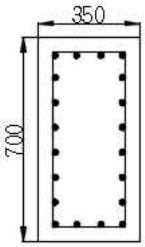
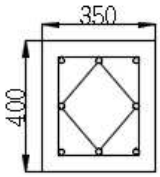
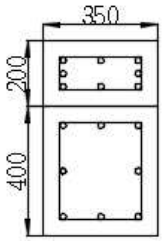
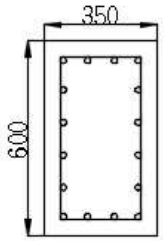
다. 보강 후 학교시설물 프로토타입모델의 비선형 정적 해석 결과

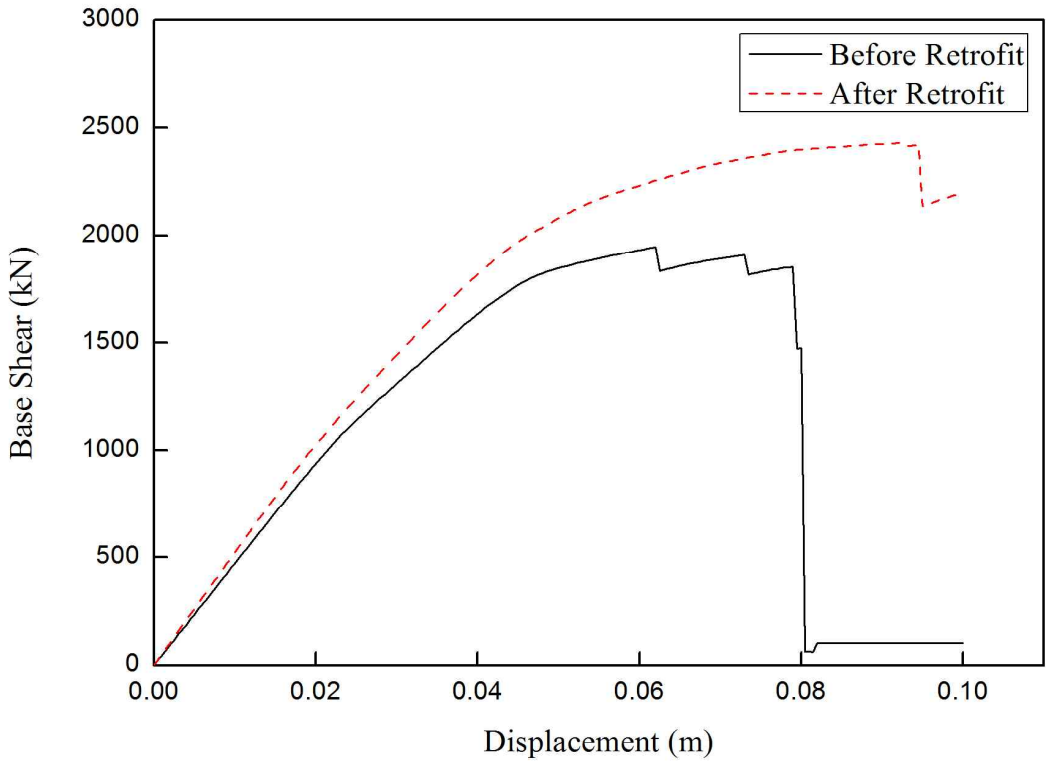
RC자켓을 이용한 기둥의 단면증설 보강은 기존 기둥을 구속할 수 있도록 하는 것이 이상적인 방법이다. 하지만 조적채움벽 및 허리벽을 가지고 있는 골조의 경우 기존 기둥의 모든 면에 대해 증설하기 위해서는 기존 조적벽을 허물고 기둥의 단면증설을 수행한 뒤 다시 조적벽을 쌓아야 한다. 따라서 모든 면에 대해 증설하는 방법은 시간 및 경제적 측면에서 불리한 단점이 존재한다. 본 연구에서는 그림과 같이 조적채움벽 및 허리벽이 없는 방향으로 기둥의 단면을 200mm 증설하고 철근량를 2배 늘리는 방안 단면증설을 하는 방안을 고안하였다.

단면증설 보강된 기둥을 모델링 하기 위해 <표 2.21>와 같이 기둥의 단면크기와 철근량을 수정하였다. RC자켓의 재료 물성은 콘크리트 강도와 철근의 강도는 각각 21MPa, 240MPa로 동일하게 하였다. 1층과 2층 기둥을 대상으로 보강된 기둥을 적용하였으며 비선형 정적 해석을 수행 하였다.

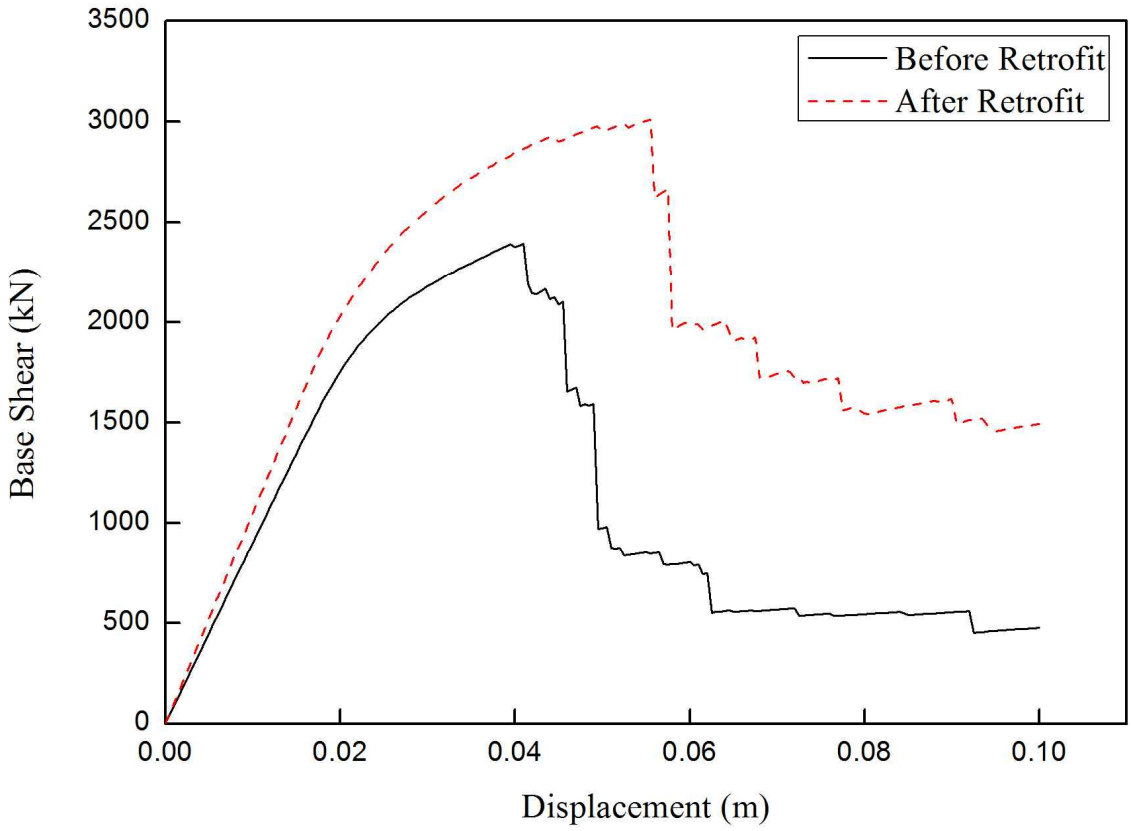
<그림 2.47>와 <그림 2.48>은 보강 전과 보강 후의 밑면전단력-변위 관계를 비교한 것이다. 보강 후 장변방향의 최대 내력은 변위 0.0925m에서 2431.82kN으로 조사되었다. 보강 전에 비해 485.44kN이 증가하여 24.94%의 최대 내력 증가 효과를 보였다. 단변방향의 최대 내력은 변위 0.0555m에서 3011.45kN으로 조사되었다. 보강 전에 비해 617.32kN이 증가하여 25.78%의 최대 내력 증가 효과를 보였다. 강성의 감소가 시작되는 Step의 변위와 내력을 통해 초기강성을 산정하였다. 보강 전 장변방향 초기강성은 47228.25kN/m, 단변방향은 89872.86kN/m로 조사되었다. 보강 후 초기강성은 장변방향 52248.80kN/m, 단변방향 10844.44kN/m로 각각 10.63%, 16.66%의 증가 효과를 보였다. 보강 전과 보강 후의 변위 연성비를 비교하기 위해 항복 시점의 변위와 최대 내력 시점의 변위의 비를 비교하였다. 항복 시점은 최초 강성 저하가 일어나는 Step으로 정의하였다. 보강 전 장변방향의 변위 연성비는 3.87, 단변방향은 2.93으로 조사되었다. 보강 후 장변방향의 변위 연성비는 6.37, 단변방향은 4.11로 조사되었다. 따라서 단면증설 보강은 강도, 초기강성, 변위 연성비 측면에서 효과적인 것으로 조사되었다.

<표 2.24> 단면증설 보강 방안 및 모델링

C1					
					
보강전	10-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	보강방안	20-D19 대근 D10@300 보조근 D10@900	모델적용	20-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900
C3					
					
보강전	8-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900	보강방안	16-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900	모델적용	16-D16 대근 D10@300 보조근 D10@900



<그림 2.72> 보강 전과 보강 후의 밑면전단력-변위 관계 (장변방향)

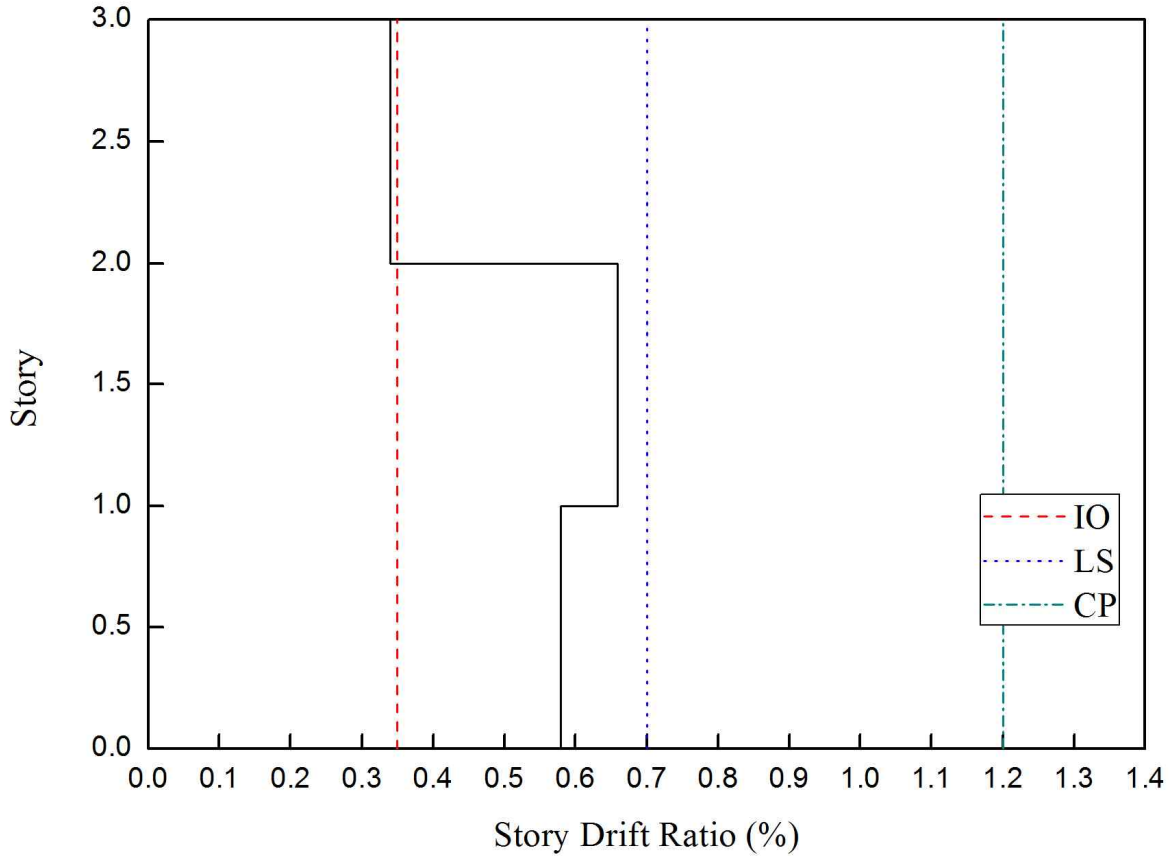


<그림 2.73> 보강 전과 보강 후의 밑면전단력-변위 관계 (단변방향)

라. 단면증설 보강 후 학교시설물 프로토타입모델의 보유성능수준

<그림 2.49>와 <그림 2.50>는 보강 후 성능점에서 각 방향에 대한 최대 층간변위비이다. 장변방향의 경우 1층의 최대 층간변위비는 0.579%, 2층은 0.659%, 3층은 0.340%로 조사되었다. 단변방향의 경우 1층의 최대 층간변위비는 0.387%, 2층은 0.556%, 3층은 0.328%로 조사되었다. 층별 최대 층간변위비에 따라 층별로 성능수준을 판별한 결과 장변방향과 단변방향 모두 1층과 2층에서 IO수준의 허용 층간변위비인 0.35%를 초과 하였으나 목표 성능수준인 LS수준은 만족하여 최종 성능수준은 LS수준으로 조사되었다.

보강 후 성능점에서 층별, 수직부재의 성능수준 및 부재의 수직하중 저항능력에 대하여 검토한 결과는 <표 2.22>과 <표 2.23>와 같다. 검토 결과 장변방향과 단변방향 모두 IO수준을 만족하지 못하였다. 장변방향은 모든 수직부재가 LS수준을 만족하는 것으로 조사되었고 단변방향은 1층 수직부재의 96.81%, 2층 수직부재의 80.34%가 LS수준을 만족하는 것으로 조사되었다. 따라서 보강 후 예제 학교건물의 최종 성능수준은 LS수준으로 판정되었으며 목표 성능수준을 만족하는 것으로 조사되었다.

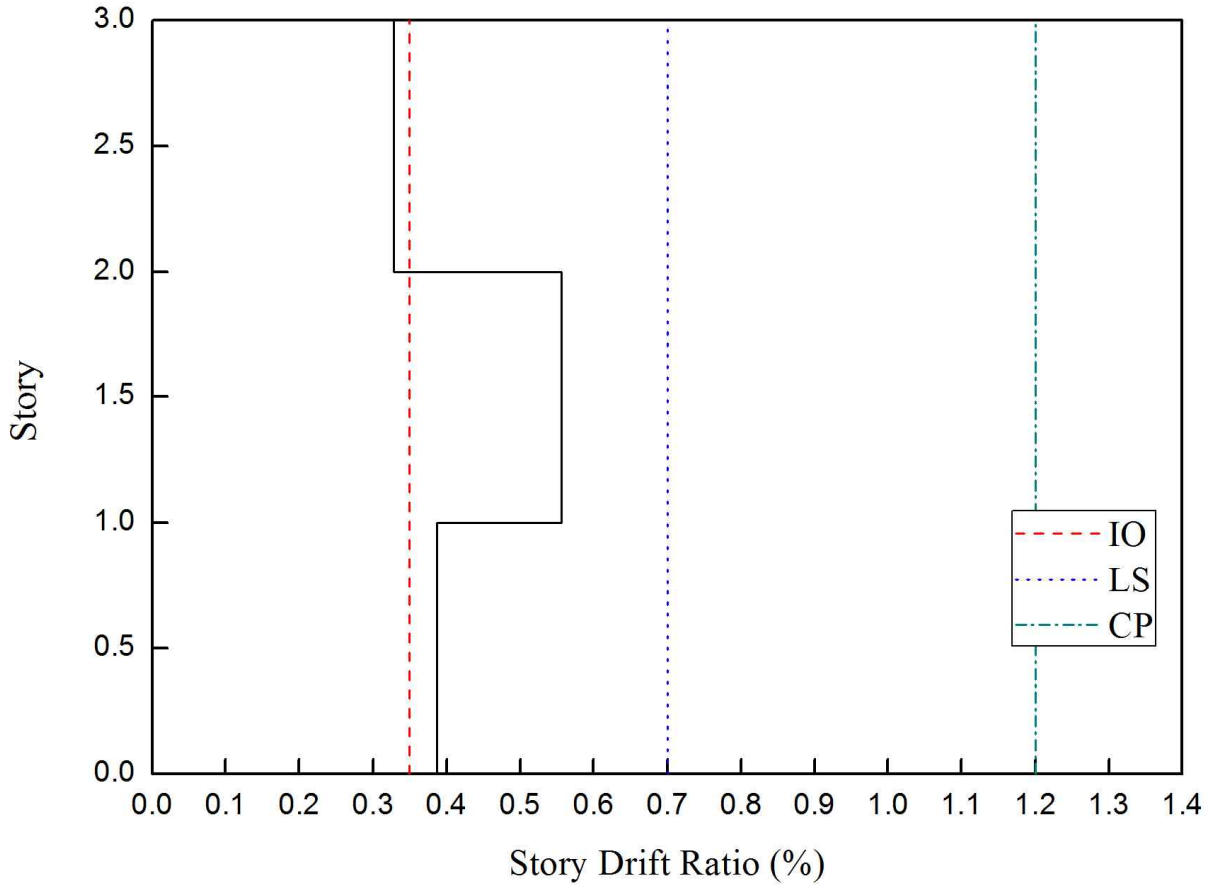


<그림 2.74> 단면증설 보강후 성능점에서 최대 층간변위비 (장변방향)

<표 2.25> 보강 후 층간변위비 성능수준 판별 결과 (장변방향)

	층고 (m)	층간 변위 (m)	층간 변위비 (%)	IO	LS	CP
1층	3.3	0.019107	0.579	NG	OK	OK
2층	3.3	0.021747	0.659	NG	OK	OK
3층	3.3	0.01122	0.340	OK	OK	OK

최종 성능수준 : LS(인명안전)



<그림 2.75> 단면증설 보강후 성능점에서 최대 층간변위비 (단변방향)

<표 2.26> 보강 후 층간변위비 성능수준 판별 결과 (단변방향)

층수	층고 (m)	층간 변위 (m)	층간 변위비 (%)	IO	LS	CP
1층	3.3	0.012771	0.387	NG	OK	OK
2층	3.3	0.018348	0.556	NG	OK	OK
3층	3.3	0.010824	0.328	OK	OK	OK

최종 성능수준 : LS(인명안전)

<표 2.27> 보강 후 부재의 수직하중 저항능력 성능수준 판별 결과 (장변방향)

층수	축력합 (kN)	IO		LS		CP	
		축력합 (kN)	축력비 (%)	축력합 (kN)	축력 비 (%)	축력합 (kN)	축력비 (%)
1층	13101.40	5228.20	39.91	13101.40	100.00	13101.40	100.00
2층	7918.26	3534.35	44.64	7918.26	100.00	7918.26	100.00
3층	3134.80	3134.80	100.00	3134.80	100.00	3134.80	100.00

최종 성능수준 : LS(인명안전)

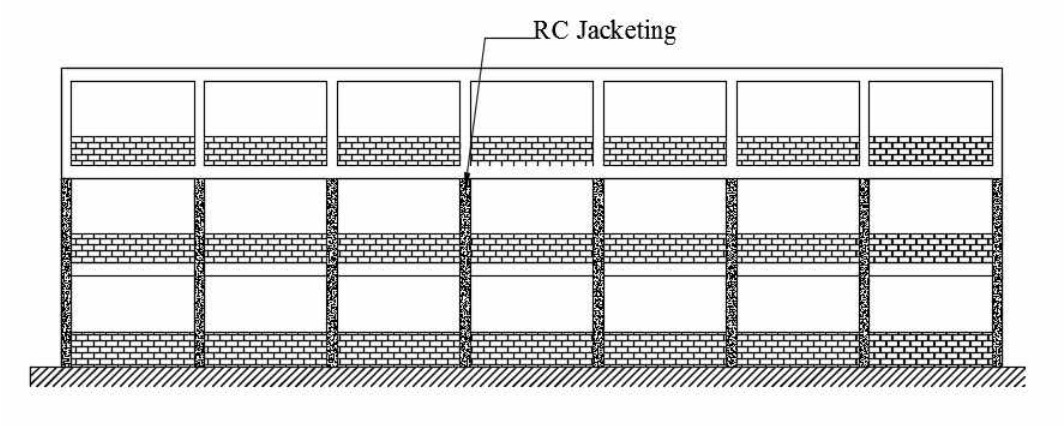
<표 2.28> 보강 후 부재의 수직하중 저항능력 성능수준 판별 결과 (단변방향)

층수	축력합 (kN)	IO		LS		CP	
		축력합 (kN)	축력비 (%)	축력합 (kN)	축력 비 (%)	축력합 (kN)	축력비 (%)
1층	12999.37	8162.89	62.79	12585.29	96.81	12999.37	100.00
2층	7838.19	4847.37	61.84	6297.07	80.34	7838.19	100.00
3층	2978.77	1939.92	65.12	2978.765	100.00	2978.765	100.00

최종 성능수준 : LS(인명안전)

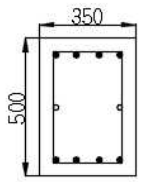
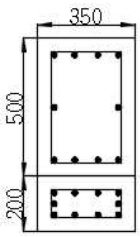
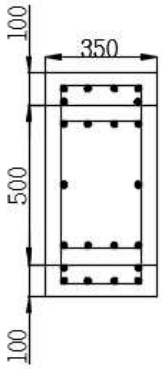
마. 보수보강 시나리오 및 확률론적 내진성능평가를 통한 보유성능수준 파악

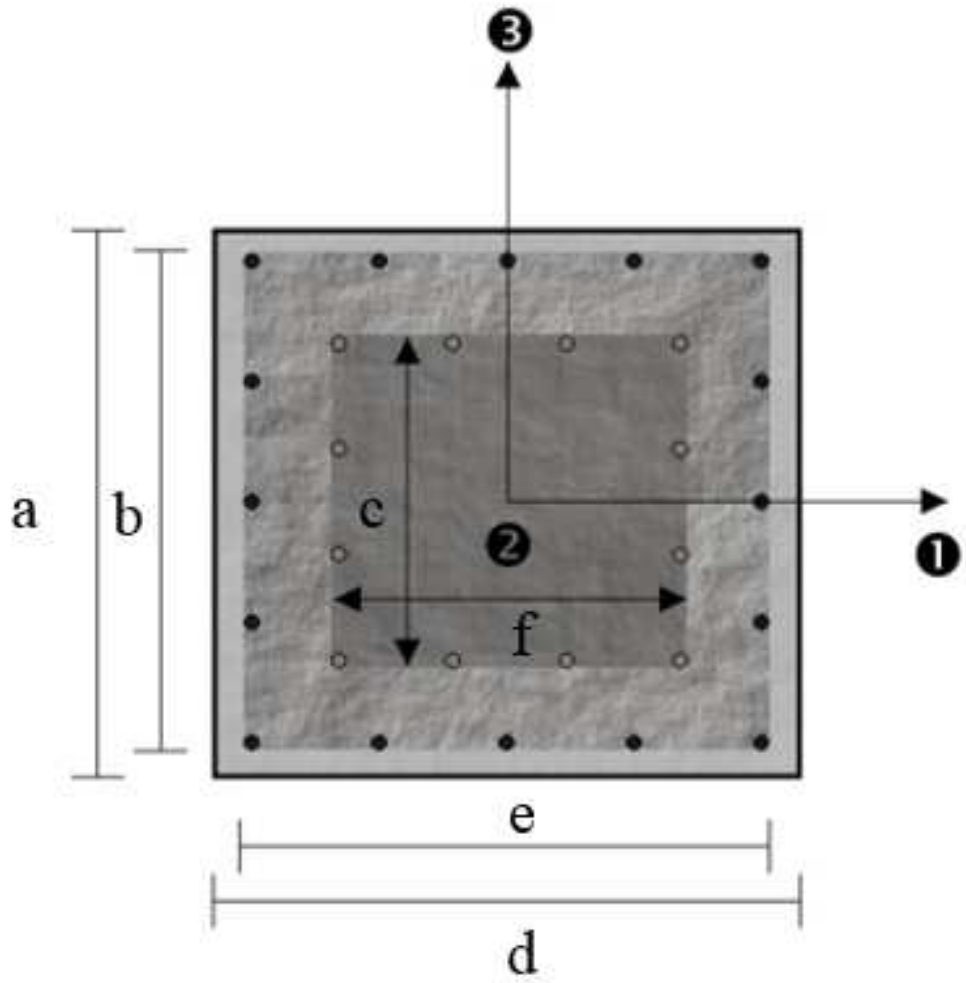
보강 전 예제 학교건물의 층별 취약도 분석 결과를 고려하여 1층과 2층 기둥을 대상으로 보강 시나리오를 작성하였다. 보강 전 예제 학교시설물의 층별 취약도 분석 결과를 고려하여 비교적 연약층인 1층과 2층 기둥을 대상으로 보강 시나리오를 작성하였다. 단면증설 보강설계는 조적채움벽이 없는 방향으로 기둥의 단면을 200mm 증가시키고 증가된 단면 내부에 기존 기둥의 철근량과 동일하게 철근을 배근하였다. Zeus-NL에서는 단면증설이 적용된 기둥을 모델링 할 수 있도록 단면 모델(rcjrs: RC jacket rectangular section)을 제공하고 있다. 이 모델은 <그림 2.52>의 1축과 3축을 기준으로 대칭하여 모델링한다. 따라서 본 연구에서는 <표 2.26>과 같이 단면증설이 적용된 기둥을 모델링 하였다. 여기서, 단면증설 보강효과의 하한을 평가하기 위해 콘크리트의 강도는 기존 기둥과 동일하게 21MPa로 적용하였다.



<그림 2.76> 단면증설 보강 위치

<표 2.29> 단면증설 보강 방안 및 모델링

보강전	이상적인 보강방안	Zeus-NL 적용 모델
		
f_{ck} : 21MPa	f_{ck} : 21MPa	f_{ck} : 21MPa
ρ : 0.01637	ρ : 0.02339	ρ : 0.02339

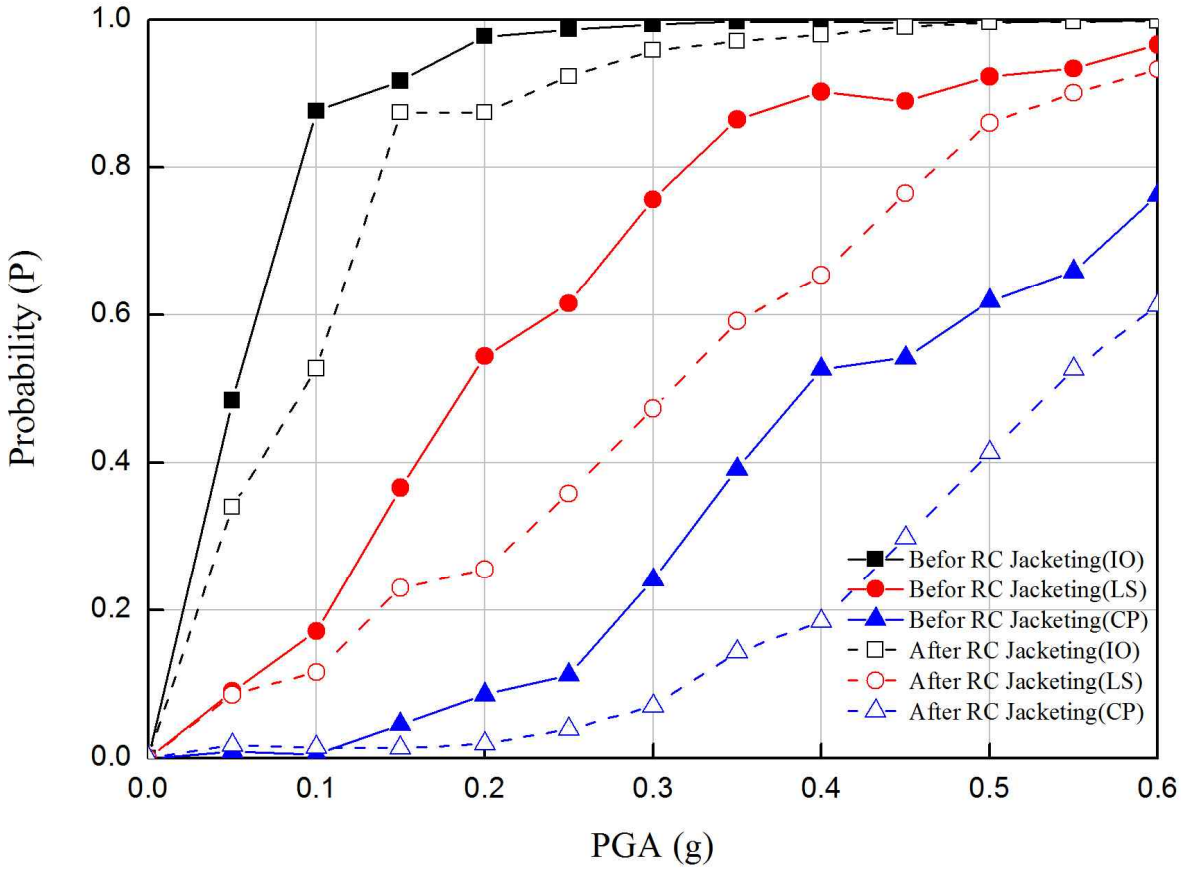


<그림 2.77> RC jacket rectangular section model (Elnashai et al. 2008)

바. 보강 후 학교시설물 프로토타입모델의 취약도 분석 결과

단면증설 보강이 적용된 예제 학교시설물을 대상으로 보강 전의 경우와 동일한 지진파에 대해 증분 동적 해석을 수행하였으며 최대 층간변위비의 평균값과 표준편차 및 불확실성 매개변수를 산정하였다. 취약도 분석에 따른 보강 전과 보강 후의 손상확률을 비교한 결과를 <그림 2.53>에 나타내었다. 0.05g와 0.1g에서 보강 후 손상확률이 보강 전에 비해 미소하게 웃도는 경우를 제외하고는 전체적으로 보강 후 손상확률이 줄어드는 경향을 보이는 것으로 조사 되었다. 0.05g와 0.1g의 경우는 비선형 동적 해석상의 수렴성에 의한 것으로 판단된다.

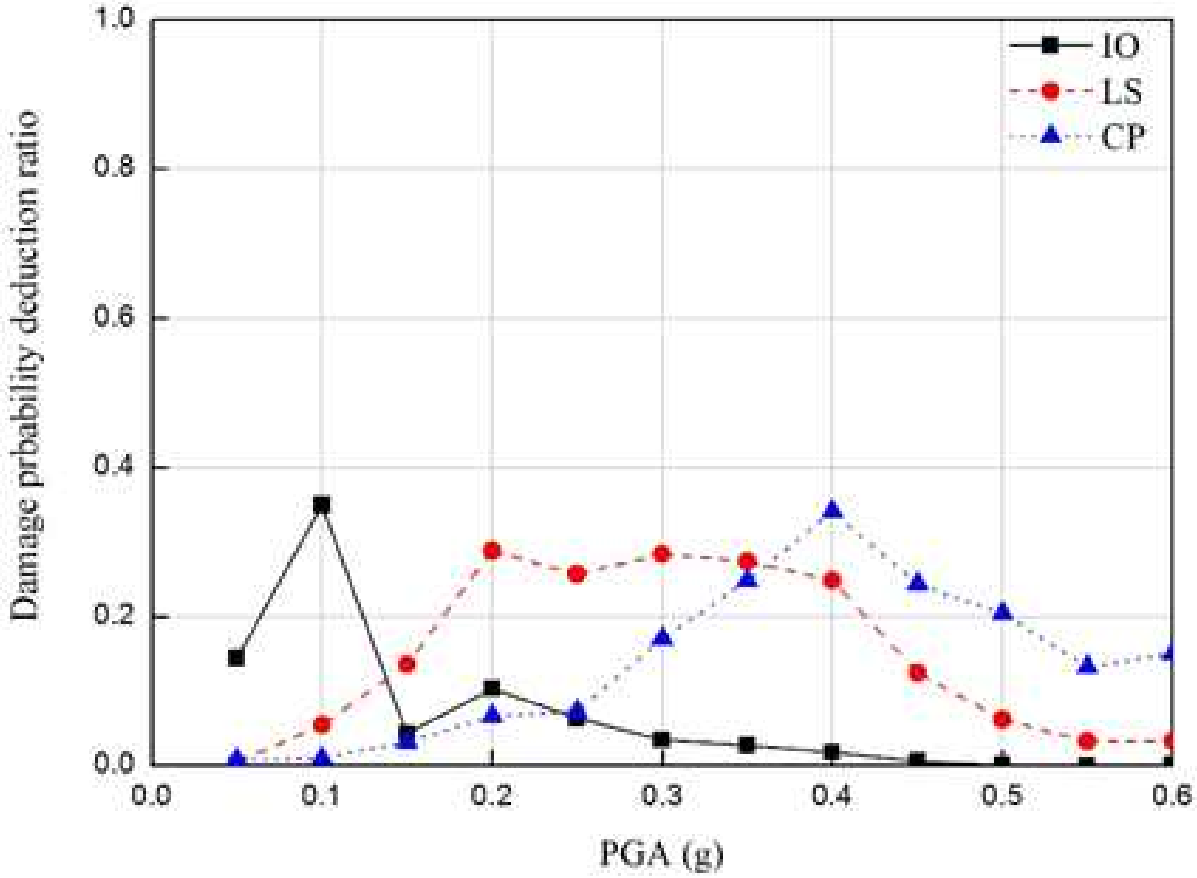
<표 2.27>과 <그림 2.54>는 단면증설 보강 후의 손상확률 감소의 절대차를 나타낸다. 낮은 PGA에서는 심각한 손상이 발생할 확률이 매우 낮기 때문에 LS 및 CP수준의 보강효과는 미미한 것으로 조사 되었다. CP수준의 경우 최고 34.10%의 손상확률 감소효과를 보인 것으로 조사되었다.



<그림 2.78> 단면증설 보강 전과 보강 후의 지진 취약도 곡선

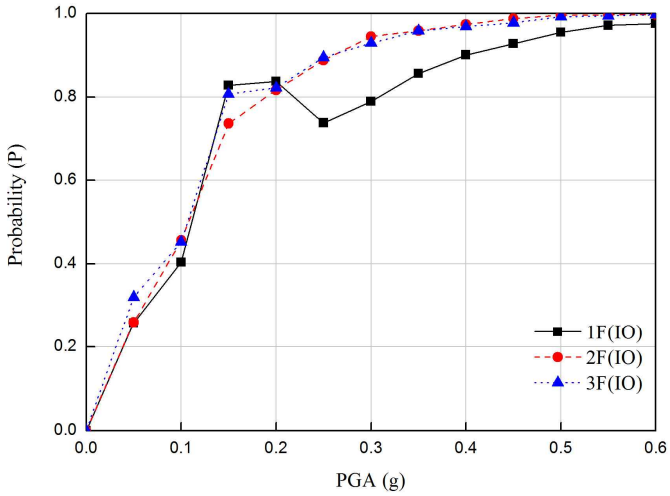
<표 2.30> 단면증설 보강 후 손상확률 감소의 절대차

PGA (g)	Damage probability reduction each limit state with respect to PGA		
	IO	LS	CP
0.05	0.1441	0.0045	0.0081
0.1	0.3495	0.0551	0.0099
0.15	0.0429	0.1357	0.0319
0.2	0.1034	0.2884	0.0660
0.25	0.0636	0.2570	0.0728
0.3	0.0347	0.2839	0.1708
0.35	0.0268	0.2743	0.2483
0.4	0.0178	0.2485	0.3410
0.45	0.0060	0.1249	0.2435
0.5	0.0009	0.0624	0.2046
0.55	0.0003	0.0327	0.1326
0.6	0.0006	0.0332	0.1503

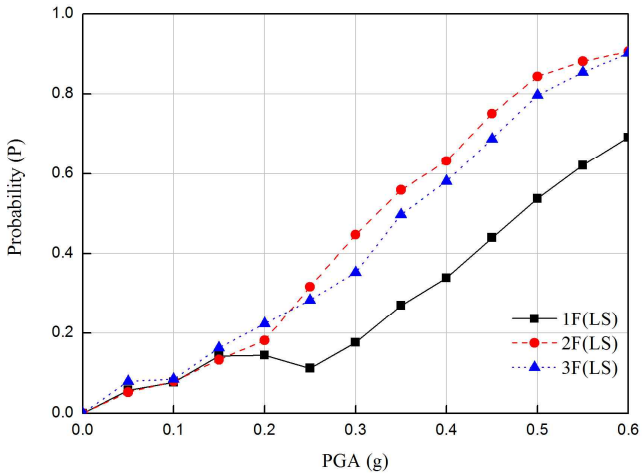


<그림 2.79> 성능수준별 단면증설 보강 후 손상확률 감소의 절대차

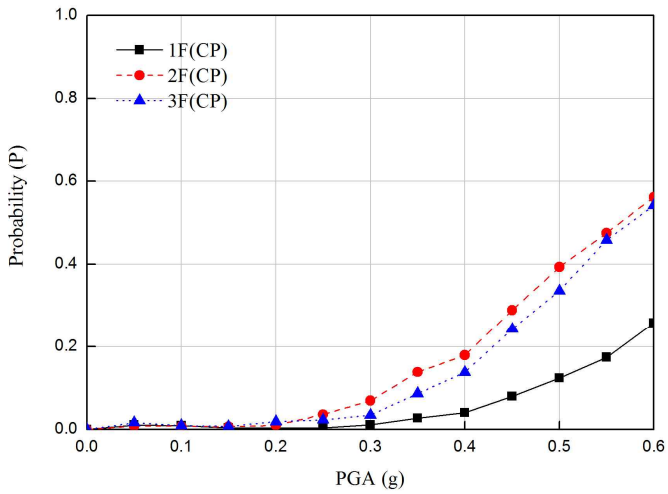
<그림 2.55>단면증설 보강 후 예제 구조물의 층별 취약도 곡선이다. 보강 전의 연약층은 1층과 2층으로 조사되었다. 보강 후 IO수준을 제외한 나머지 경우 1층의 손상확률이 크게 감소하여 각 성능수준에 대한 손상확률이 2층, 3층에 비해 낮은 것으로 조사되었다. 2층과 3층의 손상확률은 매우 유사하게 조사되었다. 따라서 단면증설 보강은 구조 시스템 측면에서의 손상확률을 감소시켜주는 것 뿐만 아니라, 예제 학교시설물의 비교적 연약층인 1층의 손상확률을 감소시키는데 효과적인 것으로 조사되었다.



(a) IO Level



(b) LS Level



(c) CP Level

<그림 2.80> 보강 후 예제 구조물의 층별 지진 취약도 곡선

3. 소결

본 연구는 주요시설물 중 내진설계가 되지 않은 80년대 “학교교사 표준 설계도”에 구조물을 대상으로 결정론적 방법과 확률론적인 방법을 표준설계도에 대한 보유성능을 파악하였다. 또한 경주지진 피해데이터 엔트로피분석을 통한 지진손상여부를 판단하는 디씨전 트리를 이용하여 보강시나리오를 구성하여, 기둥부재의 단면증설 내진보강을 진행하였으며, 내진보강에 따른 보유성능을 평가하였다. 결정론적 방법은 FEMA 356에 근간한 한국시설안전공단의 내진성능평가 방법을 따랐다. 확률론적 방법은 다수의 지진 데이터를 이용하여 임의의 지진 강도에 대해 구조물의 응답이 한계상태에 도달하거나 초과할 확률을 나타낼 수 있는 지진 취약도 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ❍ 현행 내진성능평가 요령에 따라 성능수준 판별 결과 “학교교사 표준 설계도”에 준하여 건립된 학교건물은 목표 성능수준인 LS수준을 만족하지 못하여 내진보강이 필요한 것으로 조사되었다.
- ❍ 확률론적인 내진성능평가 방법인 지진 취약도 분석을 통해 내진설계가 되지 않은 예제 학교 구조물의 성능수준별 손상확률을 산정하였다. 증분 PGA지점인 0.2g에서 구조물이 IO수준을 초과할 확률은 97%, LS수준을 초과할 확률은 54%, CP수준을 초과할 확률은 8%로 조사되었다.
- ❍ 엔트로피분석을 통해 학교건축물의 지진피해규모에 대한 결정트리를 구축한 결과, 지진피해규모 의사결정에 가장 많은 영향을 미치는 관측값은 기둥균열의 유무로 분석되었다. 만약 경주지진에 의해 학교건축물이 기둥균열이 있고 지역이 경주나 포항이면, 지진피해규모는 소규모 피해인 것을 알 수 있다. 또한 비구조재인 조명탈락의 유무가 무피해 또는 경미한 피해의 의사결정의 지원하는데 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 학교건축물 지진피해규모 결정트리 구축을 통해, 구조재의 손상이 전체 지진손상에 가장 많은 영향을 미치는 요소임을 알 수 있고, 비구조재 또한 전체 지진손상에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.
- ❍ 단면증설 보강 후 예제 구조물의 층별로 취약도를 분석하였다. 보강 후 IO수준을 제외한 나머지 경우에 대한 1층의 손상확률이 크게 감소하였다. 따라서 단면증설 보강은 구조 시스템 측면에서의 손상확률을 감소시켜주는 것 뿐만 아니라 저층부에 연약층을 가지고 있는 구조물의 손상확률을 감소시키는데 효과적인 것으로 조사되었다.

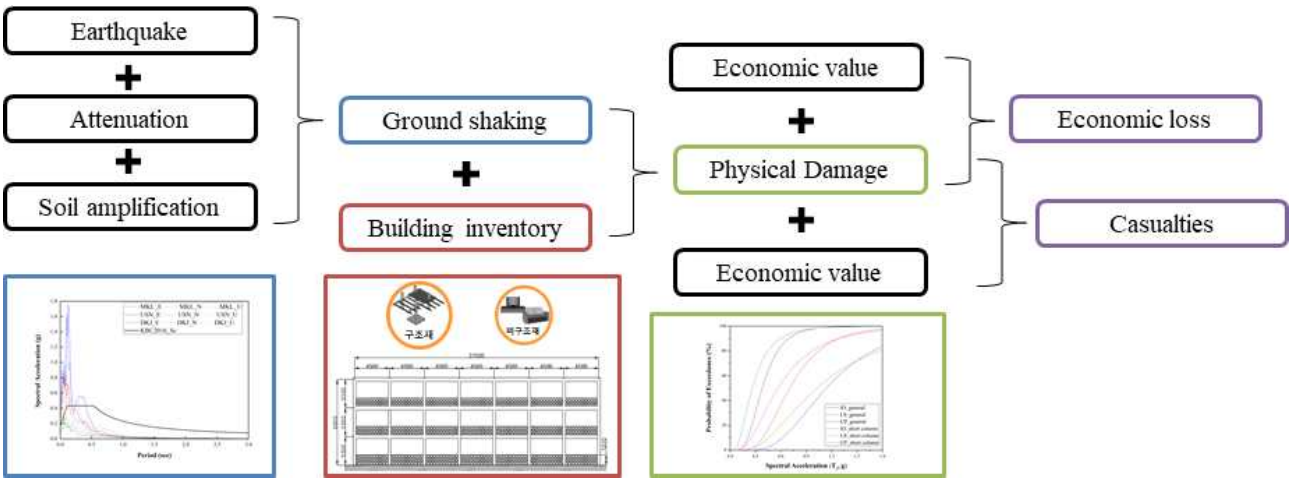
4절. 구조재 및 비구조재 통합 지진손실평가 기법 개발

1. 지진손실평가의 정의

지진손실평가는 지진이 건축물에 발생시 예상되는 경제적손실(economic loss)이나 인명피해(casualties), 복구기간(downtime) 등과 같은 지진에 의한 건축물에 손상에 대한 결과를 평가하는 것을 말한다. 1975년 US Nuclear Regulatory Commission에서 Reactor Safety Study[8]연구를 수행하여, 원자력 발전소의 발사선 유출에 의한 건강, 경제적, 사회적 위험도를 평가하기 시작하면서 지진손실평가가 시작되었다. 이후 건축구조물에 대해선 1978년 Cornell교수에 의해 도입이 되었다.

<그림 2.56>는 일반적인 지진손실평가의 과정을 나타낸 것이다. 지진손실평가 과정은 크게 다음의 4단계로 구분된다.

- Hazard Modeling: 재현주기별 지진의 강도 및 빈도를 결정하여, 건축물의 거리에 따른 지진의 감쇠와 지반증폭을 고려한 지반운동 결정 (e.g. design spectrum, earthquake data)
- Inventory Modeling: 건축물의 구조시스템, 규모, 용도, 사용년수 등에 따른 구조재 및 비구조재의 모델링 정보
- Fragility Assessment: 예상되는 hazard에 대한 건축물의 손상평가
- Loss Assessment: 손상에 의한 건축물의 경제적손실, 인명피해, 복구기간 평가



<그림 2.81> 일반적인 지진손실평가의 과정

$$P(Loss \geq x) = \sum_{DS_i} \iint P(Loss \geq x | D = DS_i) P(D = DS_i | F, \delta, a) P(F, \delta, a | S_a) P(S_a) dz \qquad (2.23)$$

<식 3.23>는 위의 지진손실평가 과정을 수식으로 표현한 것이다. 지진강도 S_a에 의해 건

8) WASH-1400

축물에 발생되는 부재력 F, 변위 δ, 가속도 a이 특정한 건축물의 손상도(damage state, DS)에 도달했을 때, 발생되는 손실(loss)을 확률적으로 평가하는 것이다. 즉, 지진손실평가를 수행하기 위해선 위의 수식에 표현된 각 항목들이 확률적으로 평가할 수 있어야 한다.

기존 지진손실평가 방법은 지역단위 지진손실을 평가하는 방법과 건축물 단위 지진손실을 평가하는 방법으로 구분된다. 지역단위 지진손실을 평가하는 방법은 건축물 하나하나를 수학적 모델링기법을 이용해 건축물을 해석하지 않고, 건축물의 구조시스템, 용도, 규모, 내진설계에 따라 건축물의 손상함수(fragility function)를 정의하여 지진손실을 평가한다. 반면, 건축물 단위 지진손실평가 방법은 건축물의 수학적 모델링에 의한 시뮬레이션 결과로 도출된 손상함수를 통해 지진손실을 평가한다. 즉, 지역단위 지진손실평가 방법은 건축물 전체 레벨에서 지진손실을 평가하는 방법(system based method), 건축물 단위 지진손실평가 방법은 건축물의 구조재 및 비구조재와 같은 부재레벨에서 지진손실을 평가하는 방법(component based method)로 구분할 수 있다. <표 2.29>는 기존 지진손실평가 방법론에 대해 정리한 것이다. 본 연구에서는 system based method 중 미국의 HAZUS-MH를 사용하였으며, component based method 중 미국의 FEMA P-58을 사용하였다. 두 방식은 open source로 접근성이 용이하다는 측면이 있어 본 연구에서 사용하였으며, 경주지진데이터를 이용하여 학교건축물의 지진손실평가를 수행하였다.

<표 2.32> 기존 지진손실평가 방법론 정리

Tool	Intensity Measure	Estimation Level	Region	Loss			Availability
				Building Economic Loss	Life-line Economic Loss	Casualties	
ABV (Assembly-Based Vulnerability) [Porter and Kiremidjian, 2001]	Spectral parameter	Component based	California	O	X	X	X
EPEDAT (Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool) [Eguchi et al., 1997]	Spectral parameter	System based	North America	O	O	O	X
HAZUS-MH [FEMA, 2004]	Spectral parameter Seismic intensity	System based	North America	O	O	O	O
LNECloss [Campos et al. 2006)	Spectral parameter	System based	Europe	O	X	O	X
MDLA (MATLAB Damage and Loss Analysis) [Muto et al. 2008]	Seismic intensity Structural response	Component based	California	O	X	X	O
PACT (FEMA P-58) [FEMA, 2012]	Seismic intensity Structural response	Component based	North America	O	X	O	O

2. HAZUS 방법론을 이용한 학교건축물의 지진손실평가

가. HAZUS-MH 손실평가 방법론

HAZUS-MH에서 평가하는 economic loss는 건축물 손상에 의한 direct economic loss와 공사시간, 영업손실 등을 고려한 indirect economic loss로 나눈다. 본 연구에서는 FEMA P58의 지진손실평가와 비교하기 위해, 건축물 손상에 의한 direct economic loss만 평가를 수행하였으며, direct economic loss를 repair cost(수리비용)로 정의하였다.

Repair cost인 total cost of building damage(CBD)는 총 33개의 occupancy class에 대해 식 (2.24)을 이용하여 계산된다. 학교건축물의 occupancy class는 32번째로, 학교건축물의 지진손실을 평가하기 위해선 식 (2.24)에서 i=32일 경우를 산출하면 된다.

$$CBD = \sum_{i} CBD_i \tag{2.24}$$

Occupancy class i에 대한 total cost of building damage(CBD_i)는 구조재의 수리비용(cost of structural damage, CS_i)와 비구조재의 수리비용(cost of nonstructural damage, CNS_i)의 합으로 식 (2.25)과 같이 계산된다.

$$CBD_i = CS_i + CNS_i \tag{2.25}$$

구조재의 수리비용은 occupancy class가 i인 건축물이 특정한 damage state일 때 정의되는 구조재 수리비용($CS_{ds,i}$)의 합으로 식 (2.26)과 같이 계산된다. HAZUS-MH에서는 구조재의 damage state를 총 5단계(none, slight, moderate, extensive, complete)로 구분하한다. 수리비용이 발생되는 damage state는 none을 제외한 총 4단계이므로, damage state가 slight(ds=2)부터 complete(ds=5)까지 합하여 구조재의 수리비용을 계산한다.

$$CS_i = \sum_{ds=2}^{5} CS_{ds,i} \tag{2.26}$$

각 damage state에 대한 구조재의 수리비용, $CS_{ds,i}$은 occupancy class에 따라 정의된 building replacement cost(BRC_i), 각 damage state에 대한 구조재에 손상이 발생할 확률($POSTR_{ds,i}$), 해당 damage state에 대한 구조재의 수리비용($RCS_{ds,i}$)의 곱으로 식과 같이 계산된다.

$$CS_{ds,i} = BRC_i \times POSTR_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \tag{2.27}$$

비구조재의 경우, 크게 가속도민감 비구조재와 변위민감 비구조재로 구분하여 수리비용을 계산한다. 계산방법은 구조재에 대한 수리비용 산출방식과 비슷하게 진행한다. 각 damage state에 대한 가속도민감 비구조재의 수리비용($CNSA_i$)과 변위민감 비구조재에 대한 수리비용($CNSD_i$)는 각각 식 (2.28), 식 (2.29)을 이용하여 계산한다.

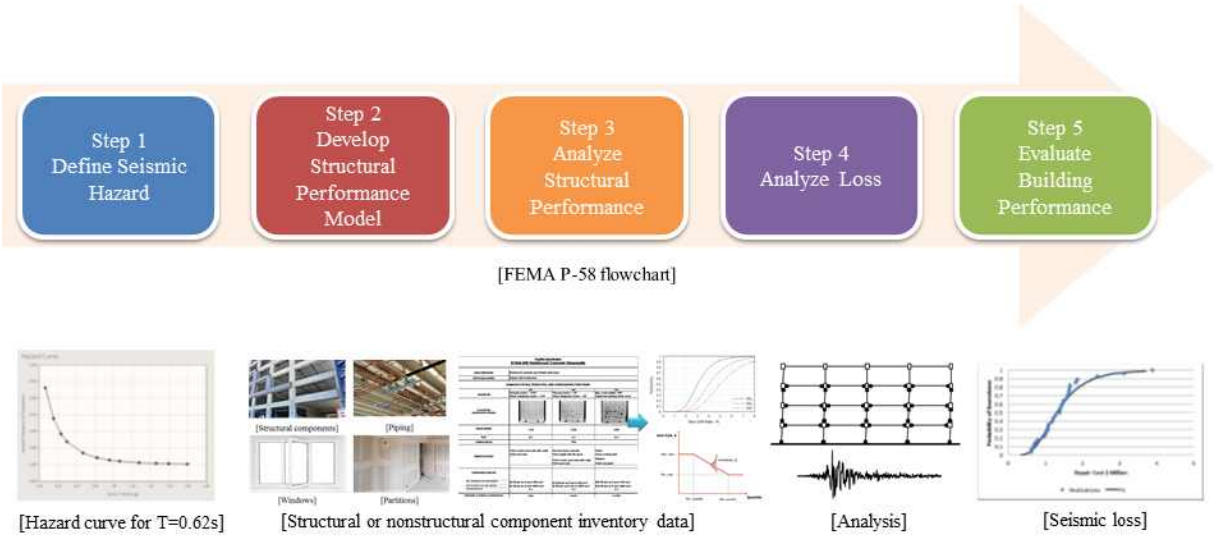
$$CNSA_i = \sum_{ds=2}^{5} CNSA_{ds,i} \tag{2.28}$$

$$CNSD_i = \sum_{ds=2}^{5} CNSD_{ds,i} \tag{2.29}$$

3. FEMA P-58 방법론을 이용한 학교건축물의 지진손실평가

FEMA P-58 방법론은 ATC-58 project로 개발된 방법으로 개별 건축물에 대한 손실평가를 목적으로 한다.

- Step 1: Define Seismic Hazard (hazard analysis) - intensity-based, scenario-based, time-based (ground shaking)
- Step 2: Develop structural performance model - include loss assessment model (building inventory)
- Step 3: Analyze structural performance - predict structural response (Physical Damage)
- Step 4: Analyze loss - quantify consequences of the component damage (Economic loss)
- Step 5: Evaluate building performance - decision making or rating



<그림 2.82> FEMA P58의 지진손실평가 과정

학교건축물의 손실을 평가하기 위한 내부 비구조재에 대한 inventory data는 아래의 표와 같다. FEMA P-58에서는 학교건축물인 Education Occupancy에 대해 비구조재별 면적에 관한 자료를 제공하고 있디. 이외에도 전기 및 기계 비구조요소에 대한 자료를 제공하고 있으나, 본 연구에서는 건축 비구조요소에 한정하여 지진손실을 평가하고자 한다. 기본으로 제공되는 단위는 피트기반으로 되어 있어, 이를 아래의 표와 같이 미터기반 단위로 변환하였으며, 50분위 (중앙값)을 기준으로 피해 건축물의 inventory data를 구성하였다. 비구조재도 구조재와 마찬가지로 비구조재의 fragility curve와 repair cost가 inventory data에 포함된다.

<표 2.33> 학교건축물의 구조재 및 비구조재의 면적

Component Type	Unit of Measure	50th Percentile Quantity	Calculated Quantities	
Gross area	SF	36,400	36,400 ft2	3,382 m2
Volume	CF per 1 gsf	13.370	468,668 ft3	13,781 m3
Cladding				
Gross wall area	SF per 1 gsf	0.750	27,300 ft2	2,536 m2
Windows or glazing area	100 SF per 1 gsf	1.1E-03	4,004 ft2	372 m2
Roof area - total	SF per 1 gsf	0.680	24,752 ft2	2,300 m2
Interior partition length	100 LF per 1 gsf	5.6E-04	2,038 ft	621 m
Ceramic tile floors	SF per 1 gsf	0.079	2,876 ft2	267 m2
Ceramic tile walls	100 LF per 1 gsf	1.4E-04	5010 ft	155 m
Ceilings				
Ceiling - lay in tile percentage	%	95%	2,732 ft2	254 m2
Ceiling - gypsum board percentage	%	3%	86 ft2	8 m2
Ceiling - exposed percentage	%	2%	58 ft2	5 m2
Stairs	FL per 1 gsf	7.0E-05	2.548 ft	0.777 m

경주지진에 의해 피해를 입은 학교건축물의 비구조재의 면적에 대한 inventory data는 아래의 표와 같다. 각 비구조재에 대한 inventory data(아래의 면적정보)는 이후 건축물의 지진해석을 통해 얻어지는 최대층간변위비(IDR, interstory drift ratio)와 최대층가속도(PFA, peak floor acceleration)를 이용하여, component fragility와 비교함으로써 각 비구조재의 지진손실을 평가할 수 있다. 아래의 학교건축물 중 7번 건축물에 한정하여 지진손실평가를 수행하였다.

<표 2.34> 경주지진에 대한 학교건축물의 구조재 및 비구조재의 면적

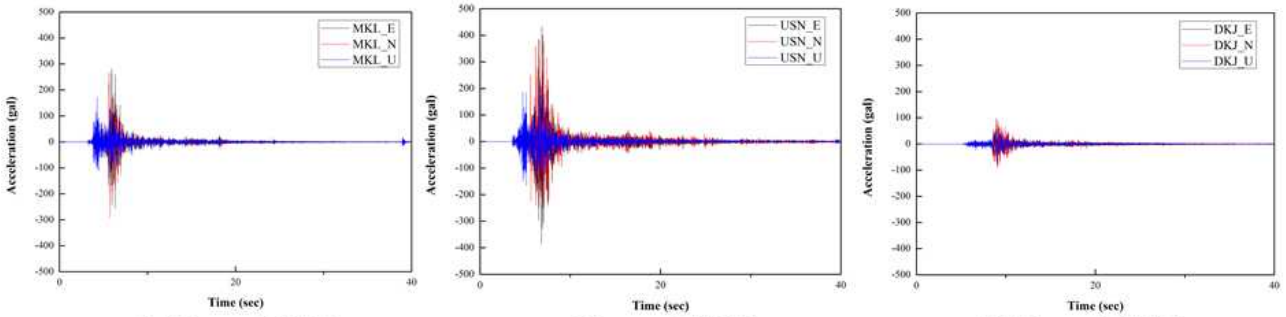
No.	Station	Economic Loss (₩)	Story	Span	Floor Area (m2)	Gross area (m2)	Volume (m3)	Cladding		Roof area (m2)	Interior partition length (m)	Ceramic tile floors (m2)	Ceramic tile walls (m)	Ceilings			Stairs (m)
								Gross wall area (m2)	Windows area (m2)					Ceiling – lay in tile (m2)	Ceiling - gypsum board (m2)	Ceiling - exposed (m2)	
1	DKJ	36,048,000	4	17	780	3121	12719	2341	343	2122	573	247	143	234	7	5	0.717
2	DKJ	36,048,000	2	9	1239	2479	101001	1859	273	1685	455	196	114	186	6	4	0.570
3	DKJ	32,641,000	2	15	689	1377	5612	1033	151	936	253	109	63	103	3	2	0.316
4	DKJ	14,580,000	4	37	1698	6793	27683	5095	747	4619	1248	537	312	510	16	11	1.560
5	DKJ	19,800,000	3	26	1193	3580	14590	2685	394	2435	658	283	164	269	8	6	0.822
6	DKJ	49,870,000	3	24	1102	3305	13468	2479	364	2247	607	261	152	248	8	5	0.759
7	MKL	20,400,000	3	24	1102	3305	13468	2479	364	2247	607	261	152	248	8	5	0.759
8	MKL	16,995,000	-	-													
9	MKL	6,100,000	6	17	780	4682	19079	3511	515	3184	860	370	215	351	11	7	1.075
10	MKL	21,230,000	4	16	734	2938	11971	2203	323	1998	540	232	135	220	7	5	0.675
11	MKL	29,594,000	4	26	1193	4774	19453	3580	525	3246	877	377	219	358	11	8	1.096
12	USN	6,554,000	5	20	918	4590	18705	3443	505	3121	843	363	211	344	11	7	1.054
13	USN	550,000	-	-													
14	USN	10,000,000	4	16	734	2938	11971	2203	323	1998	540	232	135	220	7	5	0.675
15	USN	9,991,000	5	15	689	3443	14029	2582	379	2341	632	272	158	258	8	5	0.791
16	USN	19,971,600	2	26	1193	2387	9727	1790	263	1623	439	189	110	179	6	4	0.548
17	USN	123,789,000	3	20	918	2754	11223	2066	303	1873	506	218	126	207	7	4	0.632

4. 지진손실평가 결과 및 분석

명계리(MKL), 울산(USN), 덕정리(DKJ)관측소에서 측정한 지진가속도 데이터는 EW, NS, Vertical 방향으로 총 9개이다. 각 건축물에 대해 3곳에서 측정된 지진관측소 데이터를 ground shaking 데이터로 활용하였다.

[관측소별 경주지진기록 특성]

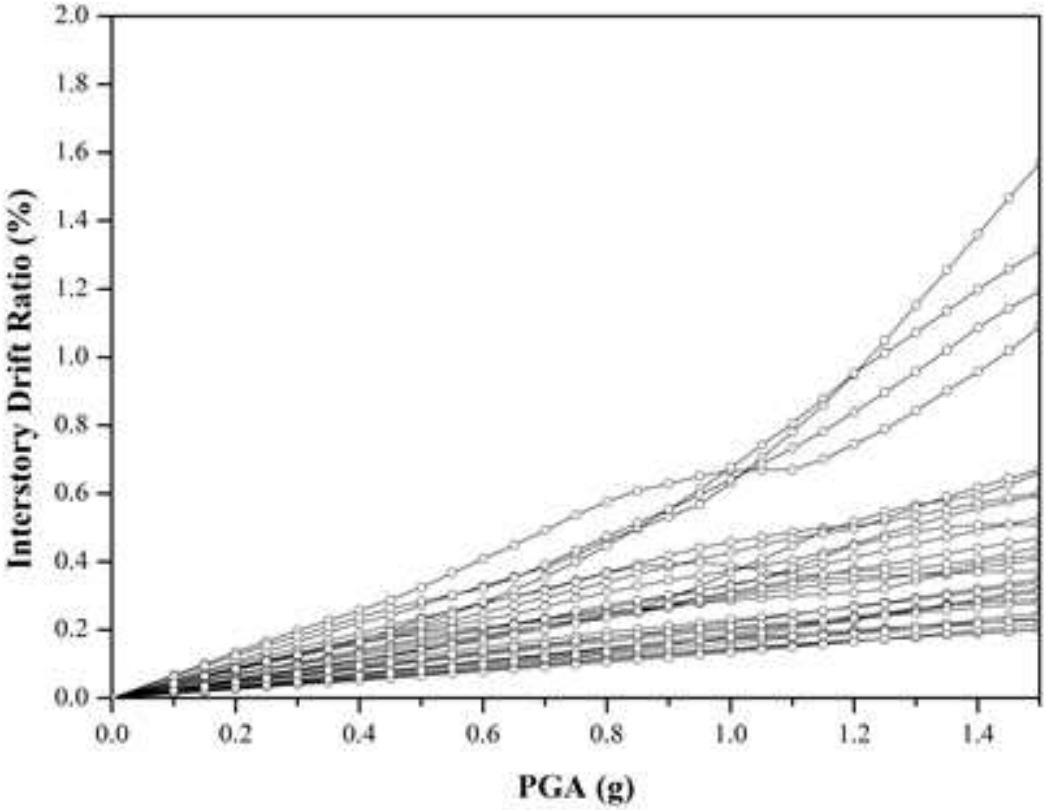
station	명계리 (지질자원연구원 관측소)			울산 (기상청 관측소)			덕정리 (지질자원연구원 관측소)		
	MKL_E	MKL_N	MKL_U	USN_E	USN_N	USN_U	DKJ_E	DKJ_N	DKJ_U
epi_dist.(km)	5.89	5.89	5.89	8.23	8.23	8.23	22.15	22.15	22.15
PGA(g)	282.2	291.3	172.1	433.7	383.2	221.6	84.6	98.5	71.0
Sa(g)	0.828	0.827	0.855	1.753	1.568	0.783	0.288	0.292	0.188
Sd(mm)	13.591	16.626	4.509	19.133	11.481	7.351	4.998	7.651	6.352



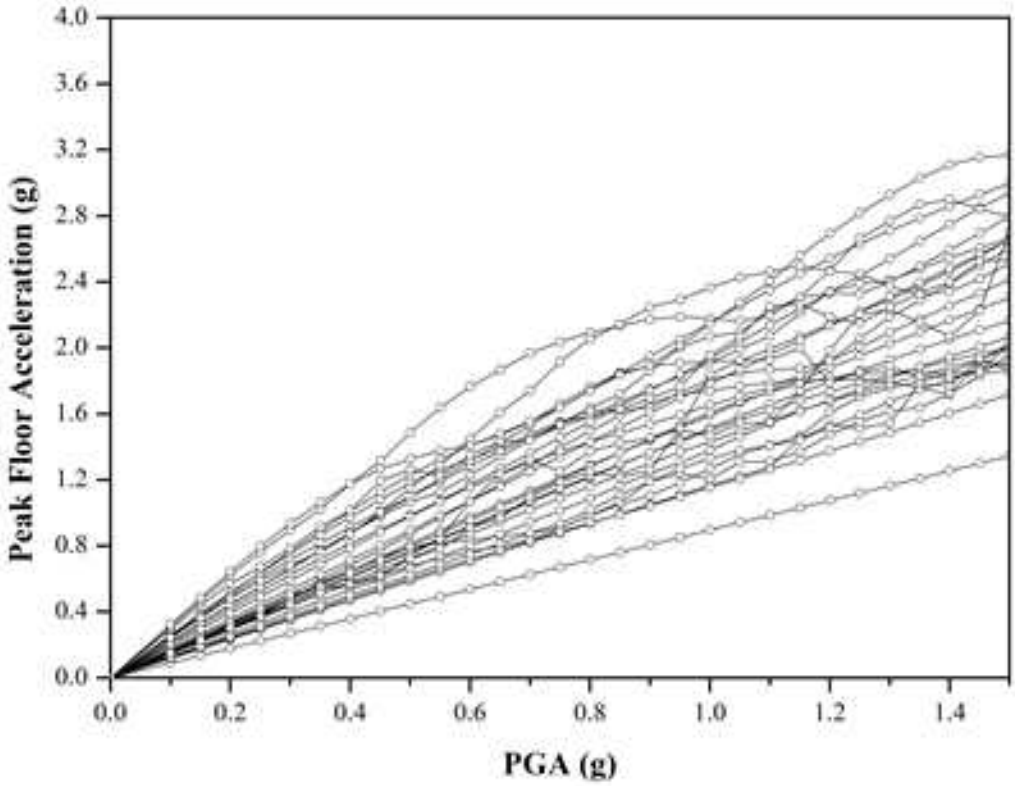
[명계리(MKL)지진데이터] [울산(USN)지진데이터] [덕정리(DKJ)지진데이터]

<그림 2.83> 지진손실평가에 사용된 지진파 정보

OpenSees를 이용하여 증분동적해석 (IDA, Incremental Dynamic Analysis) 수행하였다. 증분동적해석시 지진파의 PGA (Peak Ground Acceleration)을 기준으로 0.1g부터 0.05g간격으로 1.5g까지 지진파를 scaling하여 해석 수행하였다. 각 층별 층간변위비(IDR, Interstory Drift Ratio), 최대층가속도(PFA, Peak Floor Acceleration)를 이용하여 FEMA P-58에서 제공하는 구조재 및 비구조요소의 component fragility와 비교하여 damage assessment와 loss assessment 수행하였다.

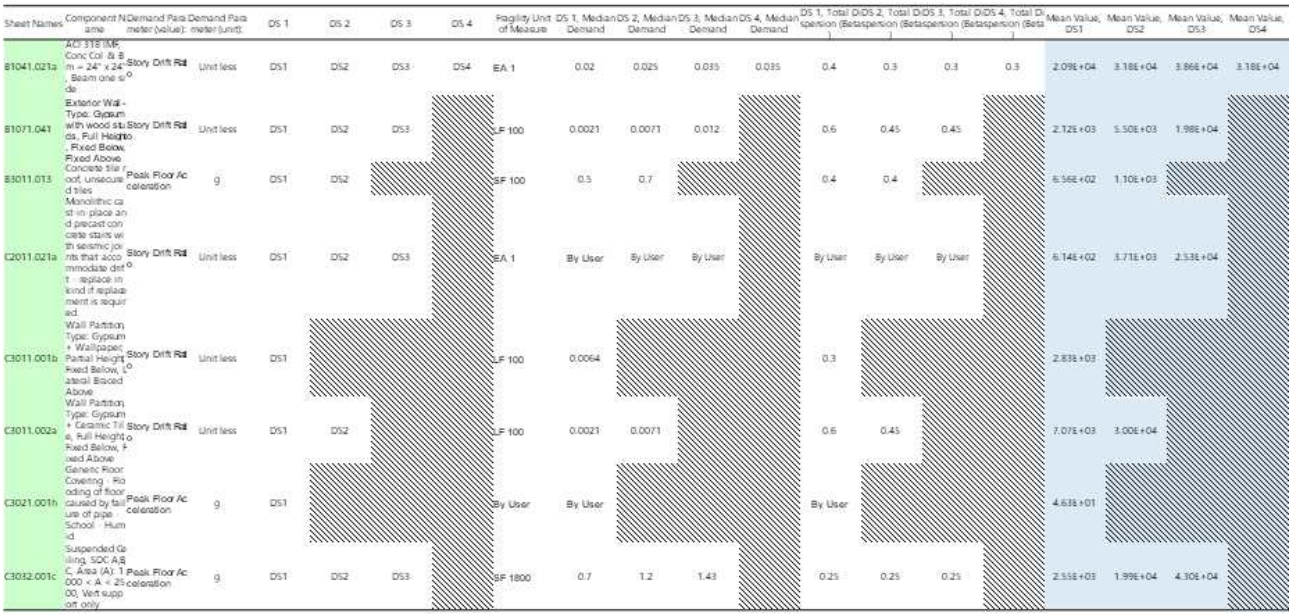


<그림 2.84> 대상건축물의 증분동적해석 결과(IDR)



<그림 2.85> 대상건축물의 증분동적해석 결과(PFA)

FEMA P-58에서는 각 구조요소 및 비구조요소에 대한 fragility parameter와 repair cost parameter를 제공하고 있다. 대상 학교건축물과 가장 유사한 구조재 및 비구조요소를 선택한 후, 아래와 같이 각 요소별로 fragility parameter와 repair cost parameter를 정리하였다.



Sheet Names	Component Name	Demand Parameter (value):	Demand Parameter (unit):	DS 1	DS 2	DS 3	DS 4	Fragility Unit of Measure	DS 1, Median Demand	DS 2, Median Demand	DS 3, Median Demand	DS 4, Median Demand	DS 1, Total Dispersion (Beta)	DS 2, Total Dispersion (Beta)	DS 3, Total Dispersion (Beta)	DS 4, Total Dispersion (Beta)	Mean Value, DS1	Mean Value, DS2	Mean Value, DS3	Mean Value, DS4
B1041.021a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm ~ 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unitless	DS1	DS2	DS3	DS4	EA 1	0.02	0.025	0.035	0.035	0.4	0.3	0.3	0.3	2.09E+04	3.18E+04	3.86E+04	3.18E+04
B1071.041	Exterior Wall - Type: Gypsum with wood studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unitless	DS1	DS2	DS3		LF 100	0.0021	0.0071	0.012		0.6	0.45	0.45		2.12E+03	5.50E+03	1.98E+04	
B3011.013	Concrete tile, Roof, unsecured tiles	Peak Floor Acceleration	g	DS1	DS2			SF 100	0.5	0.7			0.4	0.4			6.56E+02	1.10E+03		
C2011.021a	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with seismic joints that accommodate drift - replace in kind if replacement is required	Story Drift Ratio	Unitless	DS1	DS2	DS3		EA 1	By User	By User	By User		By User	By User	By User		6.14E+02	3.71E+03	2.53E+04	
C3011.001b	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Partial Height, Fixed Below, Lateral Braced Above	Story Drift Ratio	Unitless	DS1				LF 100	0.0064				0.3				2.83E+03			
C3011.002a	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unitless	DS1	DS2			LF 100	0.0021	0.0071			0.6	0.45			7.07E+03	3.00E+04		
C3021.001h	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe, School - Humid	Peak Floor Acceleration	g	DS1				By User	By User				By User				4.63E+01			
C3032.001c	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): 1000 < A < 2500, Vert support only	Peak Floor Acceleration	g	DS1	DS2	DS3		SF 1800	0.7	1.2	1.43		0.25	0.25	0.25		2.55E+03	1.99E+04	4.30E+04	

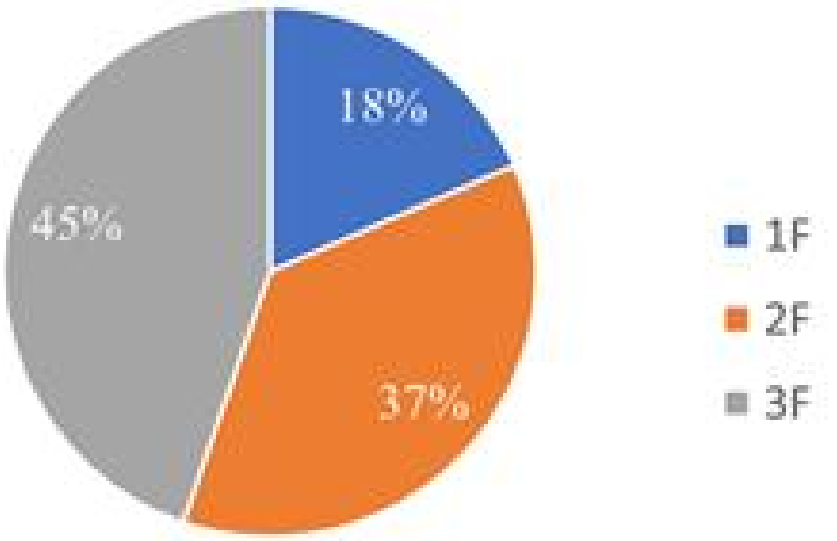
<그림 2.86> Component fragility parameters and repair cost parameters

아래의 표는 대상 학교건축물의 1층 구조재와 비구조요소의 손상평가를 수행한 결과를 정리한 것이다. 구조재 (기둥 및 보)에는 큰 손상이 발생할 확률이 거의 0이나, 외벽(치장벽돌), 옥상바닥에는 큰 손상이 발생할 확률이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다.

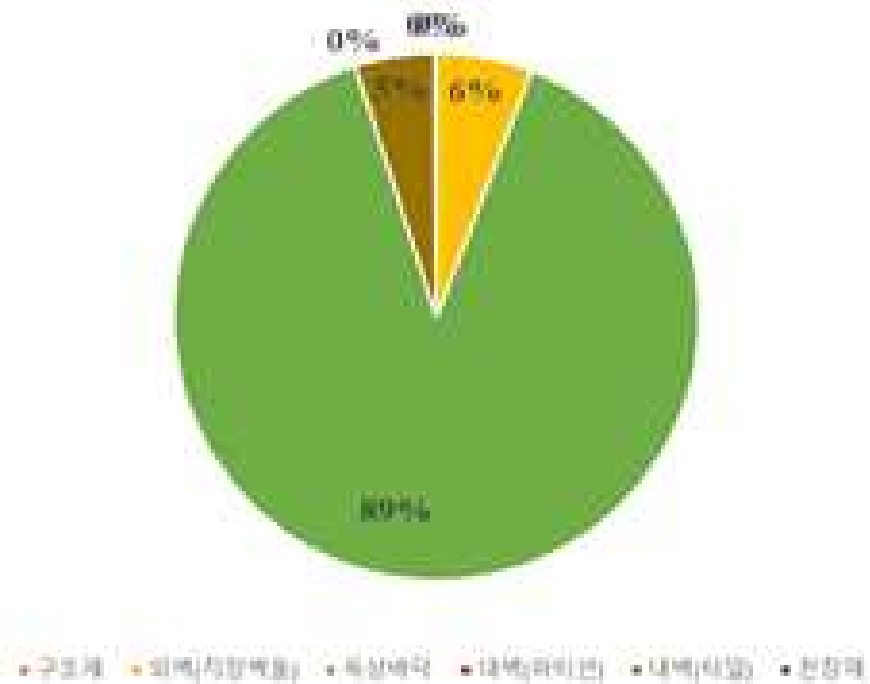
<표 2.35> 대상 학교시설물의 1층 구조재 및 비구조재의 지진손상평가

PGA(g)	기둥 및 보					외벽(치장벽돌)				옥상바닥			내벽(파티션)		내벽(타일)			천장재			
	None	DS1	DS2	DS3	DS4	None	DS1	DS2	DS3	None	DS1	DS2	None	DS1	None	DS1	DS2	None	DS1	DS2	DS3
0.1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	99.97%	0.03%	0.00%	0.00%	99.66%	0.32%	0.02%	100.00%	0.00%	99.97%	0.03%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.15	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	99.68%	0.32%	0.00%	0.00%	95.45%	3.98%	0.57%	100.00%	0.00%	99.68%	0.32%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.2	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	98.78%	1.22%	0.00%	0.00%	83.43%	13.07%	3.49%	100.00%	0.00%	98.78%	1.22%	0.00%	99.81%	0.19%	0.00%	0.00%
0.25	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	97.00%	3.00%	0.00%	0.00%	66.04%	23.48%	10.48%	100.00%	0.00%	97.00%	3.00%	0.00%	97.76%	2.23%	0.00%	0.00%
0.3	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	94.27%	5.73%	0.00%	0.00%	48.32%	30.47%	21.22%	100.00%	0.00%	94.27%	5.73%	0.00%	89.94%	10.03%	0.03%	0.00%
0.35	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	90.71%	9.29%	0.00%	0.00%	33.29%	32.59%	34.12%	100.00%	0.00%	90.71%	9.29%	0.00%	74.37%	25.38%	0.22%	0.02%
0.4	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	86.23%	13.77%	0.00%	0.00%	21.62%	30.62%	47.76%	100.00%	0.00%	86.23%	13.77%	0.00%	53.58%	45.19%	1.08%	0.16%
0.45	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	80.89%	19.11%	0.01%	0.00%	13.62%	26.26%	60.12%	100.00%	0.00%	80.89%	19.11%	0.01%	34.08%	61.87%	3.32%	0.72%
0.5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	75.05%	24.93%	0.02%	0.00%	8.25%	20.96%	70.78%	100.00%	0.00%	75.05%	24.93%	0.02%	19.07%	70.91%	7.64%	2.37%
0.55	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	69.06%	30.90%	0.04%	0.00%	4.90%	15.89%	79.21%	100.00%	0.00%	69.06%	30.90%	0.04%	9.64%	70.70%	13.66%	5.99%
0.6	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	63.12%	36.80%	0.08%	0.00%	2.82%	11.49%	85.69%	100.00%	0.00%	63.12%	36.80%	0.08%	4.40%	62.95%	20.17%	12.49%
0.65	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	57.34%	42.50%	0.16%	0.00%	1.64%	8.15%	90.21%	100.00%	0.00%	57.34%	42.50%	0.16%	1.92%	51.50%	25.02%	21.55%
0.7	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	51.75%	47.97%	0.28%	0.00%	0.91%	5.50%	93.59%	99.99%	0.01%	51.75%	47.97%	0.28%	0.75%	38.31%	27.35%	33.59%
0.75	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	46.73%	52.80%	0.46%	0.01%	0.51%	3.70%	95.79%	99.98%	0.02%	46.73%	52.80%	0.47%	0.29%	26.90%	26.57%	46.25%
0.8	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	42.22%	57.06%	0.71%	0.02%	0.31%	2.58%	97.11%	99.96%	0.04%	42.22%	57.06%	0.72%	0.12%	18.86%	23.99%	57.03%
0.85	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	37.05%	61.78%	1.14%	0.03%	0.19%	1.84%	97.96%	99.89%	0.11%	37.05%	61.78%	1.17%	0.05%	13.12%	20.67%	66.16%
0.9	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	32.54%	65.69%	1.72%	0.05%	0.13%	1.37%	98.49%	99.75%	0.25%	32.54%	65.69%	1.77%	0.03%	9.42%	17.57%	72.99%
0.95	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	28.68%	68.80%	2.43%	0.09%	0.10%	1.15%	98.75%	99.52%	0.48%	28.68%	68.80%	2.52%	0.02%	7.61%	15.66%	76.72%
1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	25.44%	71.17%	3.25%	0.14%	0.09%	1.05%	98.86%	99.17%	0.83%	25.44%	71.17%	3.39%	0.01%	6.83%	14.75%	78.41%
1.05	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	22.70%	72.93%	4.17%	0.20%	0.08%	0.95%	98.97%	98.67%	1.33%	22.70%	72.93%	4.38%	0.01%	6.09%	13.80%	80.10%
1.1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	20.30%	74.21%	5.21%	0.28%	0.07%	0.87%	99.06%	98.00%	2.00%	20.30%	74.21%	5.49%	0.01%	5.44%	12.92%	81.63%
1.15	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	18.26%	75.05%	6.30%	0.38%	0.07%	0.84%	99.10%	97.15%	2.85%	18.26%	75.05%	6.68%	0.01%	5.19%	12.56%	82.24%
1.2	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	16.51%	75.54%	7.45%	0.50%	0.07%	0.84%	99.10%	96.14%	3.86%	16.51%	75.54%	7.95%	0.01%	5.18%	12.55%	82.26%
1.25	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	15.01%	75.74%	8.62%	0.64%	0.07%	0.82%	99.11%	94.97%	5.03%	15.01%	75.74%	9.25%	0.01%	5.06%	12.37%	82.57%
1.3	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	13.50%	75.68%	10.01%	0.81%	0.07%	0.88%	99.05%	93.43%	6.57%	13.50%	75.68%	10.82%	0.01%	5.50%	13.00%	81.50%
1.35	99.99%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	12.06%	75.32%	11.58%	1.04%	0.08%	0.98%	98.93%	91.47%	8.53%	12.06%	75.32%	12.63%	0.01%	6.33%	14.12%	79.54%
1.4	99.99%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	10.86%	74.72%	13.12%	1.29%	0.10%	1.14%	98.75%	89.38%	10.62%	10.86%	74.72%	14.42%	0.02%	7.59%	15.65%	76.75%
1.45	99.99%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	9.85%	73.97%	14.62%	1.56%	0.04%	0.54%	99.42%	87.17%	12.83%	9.85%	73.97%	16.18%	0.00%	2.96%	8.84%	88.20%
1.5	99.99%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	9.08%	73.19%	15.91%	1.82%	0.05%	0.68%	99.27%	85.14%	14.86%	9.08%	73.19%	17.73%	0.00%	3.96%	10.65%	85.39%

대상 학교건축물의 지진손실(damage ratio)을 평가한 결과, PGA 0.25g에서 1.25%였다. 실제 지진손실인 0.52%와 약 2.38배 차이가 발생하였다. 차이가 발생한 이유는 1) 입력지진파의 불확실성, 2) 건축물 component fragility 차이, 3) 건축물 모델링(비구조요소) 불확실성, 4) 건축물 수학적모델링 오차 등을 생각할 수 있다. 이후 연구를 통해 실제 지진손실데이터와 해석으로 얻은 지진손실데이터를 calibration하는 과정이 필요하다고 사료된다.



<그림 2.87> 대상학교건축물의 층별 수리비용 (PGA=0.25g)



<그림 2.88> 대상학교건축물의 요소별 수리비용 (PGA=0.25g)



<그림 2.89> 대상학교건축물의 요소별 수리비용 (PGA=1.5g)

대상학교건축물은 HAZUS-MH에서 제공하는 building inventory에서 low-rise concrete moment frame(C1M)에 가장 유사한 구조적 특징을 가진다. Structural fragility curve와 nonstructural drift sensitive fragility curve는 기본적으로 spectral displacement (Sd)에 대해 fragility curve가 제공되어 있고, nonstructural drift sensitive fragility curve는 spectral acceleration (Sa)에 대해 제공된다. C1M에 대한 POSTR(구조재 손상확률), PONSD(변위민감 비구조재 손상확률), PONSA(가속도민감 비구조재 손상확률)는 아래의 표와 같다(명계리 지진데이터: Sd=13.591mm, Sa=0.828g 사용).

<표 2.36> 대상 학교시설물의 구조재 및 비구조재의 지진손상평가

Structural Seismic Fragility Curve Parameters - High Code (Sd)						C1M	
Slight		Moderate		Extensive		Complete	
Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
1.5	0.68	3	0.67	9	0.68	24	0.81
38.10	0.68	76.20	0.67	228.60	0.68	609.60	0.81
6.48%		0.50%		0.00%		0.00%	
Nonstructural Drift-Sensitive Fragility Curve Parameters - High Code (Sd)							
Slight		Moderate		Extensive		Complete	
Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
0.72	0.84	1.44	0.88	4.5	0.9	9	0.88
18.29	0.84	36.58	0.88	114.30	0.9	228.60	0.88
36.19%		13.03%		0.90%		0.07%	
Nonstructural Acceleration-Sensitive Fragility Curve Parameters - High Code (Sa, g)							
Slight		Moderate		Extensive		Complete	
Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
0.3	0.68	0.6	0.68	1.2	0.66	2.4	0.66
93.23%		68.21%		28.70%		5.34%	

HAZUS-MH에서 총 33개의 occupancy에 대해 지진손실을 평가하기 위한 데이터를 제공하고 있다. 이 중 학교건축물은 EDU1에 속한다. HAZUS-MH로 구한 대상건축물의 damage ratio는 2.12%로 실제 지진손실인 0.52%와 약 4.1배 차이를 보였다. 또한 FEMA P-58보다 크게 오차가 발생한 것을 알 수 있다. 다양한 오차의 원인이 있을 수 있지만, HAZUS-MH는 지역기반으로 지진손실을 평가하는 방식이기 때문에, 보수적으로 평가하는 것으로 판단된다. 하지만, FEMA P-58과 비교시 지진손실을 평가하는 방식이 매우 쉽고 간편하다는 장점이 있다.

<표 2.37> 대상 학교시설물의 수리비용 (HAZUS)

Label	Occupancy Class	구조재 (%)	변위민감 비구조재 (%)	가속도민감 비구조재 (%)	비구조재합계 (%)	합계 (%)
EDU1	Schools	0.04	1.15	0.93	2.08	2.12

5. 소결

본 장에서는 학교건축물에 대한 HAZUS와 FEMA P58을 적용한 지진손실평가를 수행하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

- ○ 지진손실평가방식은 크게 4단계로 구성된다(1단계: seismic hazard정의, 2단계: 건축물 모델링(inventory data), 3단계: 건축물 손상평가, 4단계: 건축물 손실평가). 기존 지진손실평가 방법은 크게 system-based method와 component-based method로 나눌 수 있다. 이 중, FEMA P-58은 component-based method, HAZUS-MH는 system-based method를 대표할 수 있는 방식으로, 본 연구에서는 두가지 방식을 이용하여 학교건축물의 지진손실평가를 수행하였다.
- ○ 학교건축물은 일반건축물에 비해 구조시스템이 비슷하므로, 구축된 지진손실데이터베이스를 이용하여 지진손실평가를 수행하기 용이하다고 할 수 있다. FEMA P-58의 경우 실제 지진손실액보다 약 2.38배 높게 학교건축물의 지진손실을 평가하였는데, 추후 여러 케이스(총 17건)에 대한 지진손실평가를 통해 calibration하는 과정이 필요하다. HAZUS-MH의 경우 FEMA P-58보다 간편하게 지진손실액을 평가할 수 있지만, 실제 지진손실액과의 오차는 약 4.1배로 다소 높으며, 여러 케이스에 대한 calibration과정이 어렵다는 단점이 있다고 할 수 있다.
- ○ 학교건축물의 세부적인 지진손실데이터(구조재 및 비구조요소 별)확보를 통한 시뮬레이션과의 비교 분석 수행이 필요하다고 판단된다. 실제 지진손실액과 해석으로 얻어진 지진손실액과의 차이를 보정하는 과정을 통해 우리나라에 적합한 지진손실평가 방법론을 구축이 필요하다.

5절. 결론

본 장에서는 목표성능수준 및 손상도를 고려한 지진손실평가 기법 개발에 대한 연구를 수행하였다. 연구수행결과 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- ❍ 현재 건축물의 용도에 따른 내진성능목표는 NEHRP 2009에서 제시하고 있으며, 미국의 IBC(International Building Code)나 우리나라의 KBC에서도 제시된 내진성능목표를 사용하고 있다. 건축물의 category는 용도에 따라 나뉘며 용도에 따라 붕괴가능성을 정량적으로 제시하고 있다.
- ❍ UBC 1935부터 비구조요소에 대한 내진설계조항이 추가되었으며, 내부 및 외부 비구조벽체, 횡지지되어 있지 않은 캔틸레버 부재, 옥탑, 부가물 및 장식물에 대해서만 내진설계를 하도록 규정하였다. 이후 내진설계대상 비구조요소가 확대되었고, UBC 1973에서 천장재, UBC 1985에서 이중바닥이 추가되었고, IBC 2000의 내진설계대상 비구조요소는 IBC 2015와 KBC 2016과 동일한 것으로 조사되었다.
- ❍ 주요시설물 중 내진설계가 되지 않은 80년대 “학교교사 표준 설계도”에 구조물을 대상으로 결정론적 방법과 확률론적인 방법을 표준설계도에 대한 보유성능을 파악 및 경주지진 피해데이터의 결정트리 분석을 통한 보강시나리오를 도출하였다. 지진피해규모 의사결정에 가장 많은 영향을 미치는 관측값은 기둥균열의 유무로 분석되어, 단면증설 보강 전후에 따른 학교건축물의 지진취약도를 분석하였고, 단면증설 보강은 구조적 측면에서의 손상확률을 크게 감소시키는 것으로 분석되었다.
- ❍ FEMA P-154에서 제공하는 RVS(Rapid Visual Screening)은 개별 건축물의 사용재료, 설계년도, 규모, 형상에 따라, 육안검사와 도면검사, 제공되는 약식 구조해석과정을 통해, 건축물의 등급을 1등급(위험)~3등급(안전)으로 지진에 대한 안전성을 평가한다. 실제 대만화롄지진과 포항지진의 사례분석으로부터, 건축물의 특징에 따른 구조재 및 비구조재의 손상도 평가를 수행하였다. 그 결과, 필로티건축물은 1층 기둥의 전단손상이 다수 관측되었으며, 비구조재인 조적채움벽이 구조재의 손상에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.
- ❍ 학교건축물은 일반건축물에 비해 구조시스템이 비슷하므로, 구축된 지진손실데이터베이스를 이용하여 지진손실평가를 수행하기 용이하다고 할 수 있다. FEMA P-58의 경우 실제 지진손실액보다 약 2.38배 높게 학교건축물의 지진손실을 평가하였는데, 추후 여러 케이스(총 17건)에 대한 지진손실평가를 통해 calibration하는 과정이 필요하다. HAZUS-MH의 경우 FEMA P-58보다 간편하게 지진손실액을 평가할 수 있지만, 실제 지진손실액과의 오차는 약 4.1배로 다소 높으며, 여러 케이스에 대한 calibration과정이 어렵다는 단점이 있다고 할 수 있다.

제3장. 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발

1절. 실제 지진피해사례 손상-손실 데이터베이스 구축

1. 경주지진 피해사례 claim data분석을 통한 DB구축 항목 도출

2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진피해사례에 대한 지진손실액을 조사하여 연구에 활용될 DB구축을 수행하였다. 우선적으로 위탁연구기관인 현대해상화재보험의 지진피해관련 claim data를 통해 지진손실액에 대한 DB구축을 진행하였다. 지진손실액에 대한 DB는 피해 건축물의 손상과의 관계를 규명하는데 사용될 것이므로 손실액을 추정하는 방법론에 따란 DB가 구축되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 실제 전문 손해사정보고서를 통해 지진손실액 DB구축에 필요한 항목과 손상과 연결시키기 위한 항목을 도출하여 DB를 구축하였다. <표 3.1>은 경주지진 피해사례 claim data분석을 통해 얻어진 DB구축 항목을 정리한 것이다.

<표 3.1> 지진손실 DB구축 항목

<table>
<tr><td rowspan="3">1. 사고사항</td><td>사고일시</td><td></td><td rowspan="6">2. 총괄표</td><td>보험목적물</td><td></td></tr>
<tr><td>사고장소</td><td></td><td>보험가입금액 (원)</td><td></td></tr>
<tr><td>사고원인</td><td></td><td>재조달가액 (원)</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">3. 건물개요</td><td>구조/용도</td><td></td><td>보험가액 (원)</td><td></td></tr>
<tr><td>신축년도</td><td></td><td rowspan="2">손해액 (원)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>건물연면적</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">4. 손해상태(사진)</td></tr>
<tr><td colspan="6">5. 보험가액 및 손해액</td></tr>
<tr><td colspan="6">5.1 평균감가율</td></tr>
</table>

구조	용도	경년감가율	경과년수	총감가율	면적(m^2)	가중치
계						
평균감가율						

5.2 재조달가액 및 보험가액

구분		산식	면적(m^2)	단가(원)	금액(원)
순공사비	공정명				
	-				
	계				
간접비	일반관리비				
	이윤				
	계				
재조달가액					
보험가액					

5.3 손해액

구분		손해액
수리비	공정명	
	-	
	계	
	공과잡비	
	합계	
총계		

2. 경주지진 피해사례에 대한 지진손실 DB구축

일반건축물에 대해 총 35건에 대한 DB를 구축하였고, 추가적으로 학교건축물에 대해 36건에 대한 DB를 구축하였다. DB는 부록에 제공되어 있다. 아래의 표는 일반건축물에 대한 지진손실 DB구축의 예이다. 사고장소 및 신축년도와 같은 개인정보는 삭제하였다.

<표 3.2> 실제 경주지진피해 사례 DB의 예

1. 사고사항	사고일시	2016년 9월 12일 20:32경	**2. 총괄표**	보험목적물	건물
	사고장소	-		보험가입금액 (원)	450,000,000
	사고원인	규모 5.8 경주지진		재조달가액 (원)	940,771,572
3. 건물개요	구조/용도	철골조 슬라브지붕/상가		보험가액 (원)	802,306,554
	신축년도	-		손해액 (원)	14,658,572
	건물연면적	-			
4. 손해상태					

5. 보험가액 및 손해액

5.1 평균감가율

구조	용도	경년감가율	경과년수	총감가율	면적(m^2)	가중치
철골조 슬라브지붕	상가	1.07%	13년 9개월	14.71%	1231.204	18,114
계					1231.204	18,114
평균감가율						14.71%

5.2 재조달가액 및 보험가액

구분		산식	면적(m^2)	단가(원)	금액(원)
순공사비	철골조	620.844m^2*855,000	620.844	855,000	530,821,620
	철콘조	610.36m^2*595,000	610.36	595,000	363,164,200
	계				893,985,820
부대설비공사	화재탐지설비	1231.204m^2*10,500	1231.204	10,500	12,927,642
	위생설비	1231.204m^2*27,500	1231.204	27,500	33,858,110
	계				46,785,752
재조달가액					940,771,572
보험가액					802,360,554

5.3 손해액

구분		손해액
수리비	가설공사	283,014
	방수공사	1,339,822
	타일공사	1,910,541
	수장공사	4,732,496
	미장공사	1,370,863
	도장공사	215,172
	기타공사	894,846
	소계	10,746,754
	공과잡비	2,579,221
	합계	13,325,975
잔존물제거비	철거공사	1,190,634
	계	1,190,634
	공과잡비	285,752
	합계	1,332,597
총계		14,658,572

학교건축물에 대해 총 36건에 대한 DB를 구축하였고, 학교건축물의 경우 피해유형에 따라 손상도를 평가할 수 있도록 아래와 같이 지진손실 DB를 구축하였다.

<표 3.3> 학교건축물 손상도에 대한 데이터베이스

학교명	지역	기둥 균열	천정 마감	조명 탈락	마감 탈락	마감 균열	누수	조적 벽체균열	피해도
구봉초	김해					O			무피해
삼방초	김해				O	O			무피해
합성초	김해					O			무피해
월산초	김해				O			O	무피해
봉황초	김해					O	O	O	무피해
삼정중	김해					O			무피해
진영여중	김해								무피해
중부초	양산				O	O			무피해
웅상여중	양산				O	O			무피해
매곡초	울산	O	O		O	O			경미한 피해
동천초	울산	O	O		O	O			경미한 피해
울산외고	울산	O	O			O			경미한 피해
호계초	울산	O				O	O		경미한 피해
달천중	울산	O	O	O		O			경미한 피해
상안중	울산	O	O	O	O	O			경미한 피해
두광중	울산	O			O	O			경미한 피해
상안초	울산		O		O	O			경미한 피해
영일중	포항					O			경미한 피해
포항제철공고	포항	O			O	O		O	소규모 피해
이동중	포항				O	O	O	O	무피해
양학초	포항				O			O	무피해
창포초	포항				O	O			무피해
문충초	포항	O				O		O	경미한 피해
구정초	포항				O	O			무피해
오천초	포항				O	O			무피해
흥해공고	포항			O		O		O	경미한 피해
삼성생활예술고	경주		O		O	O	O	O	무피해
계림초	경주		O		O	O		O	무피해
흥무초	경주		O		O			O	무피해
산대초	경주		O			O	O	O	무피해
경주여고	경주		O			O		O	무피해
경주마케팅고	경주	O	O					O	소규모 피해
월성초	경주		O					O	무피해
신라초	경주				O			O	무피해
외동중	경주					O		O	무피해
문화고	경주				O	O		O	무피해

추가적으로 학교건축물의 지진손실에 대한 정략적인 피해금액을 데이터베이스화 하였다.

<표 3.4> 학교건축물 손상도 및 피해금액에 대한 데이터베이스

지역	학교명	지진피해분류	지진피해 및 보수 내용	분류	피해액(원)
김해	구봉초	무피해	각층기둥 마감균열	비구조체	6,554,000
	삼방초	무피해	기둥, 보 조인트 마감균열및 탈락	비구조체	550,000
양산	중부초	무피해	조인트, 조적벽, 마감균열 및 탈락	비구조체	10,000,000
	평산초	-	건물 내외벽 균열	비구조체	10,000,000
	웅상여중	무피해	조인트, 벽체 마감균열, 난간대 파손, 화장실타일 균열 및 파손 등	비구조체	9,991,000
	양산남부고	-	건물 내외벽 균열	비구조체	8,000,000
울산	동천초	경미한 피해	기둥전단균열, 벽체균열, 화장실타일탈락, 전정마감재 뒤틀림, 승강기고장 등	비구조체	20,400,000
	상안초	경미한 피해	천정텍스, 마감균열 및 탈락	비구조체	21,230,000
	호계초	경미한 피해	기둥균열, 전단균열, 마감균열	비구조체	6,100,000
	울산초	-	지진피해복구비	비구조체	3,500,000
	두광중	경미한 피해	기둥균열, 마감 균열 및 탈락, 타일탈락	비구조체	19,971,600
	울산외고	경미한 피해	기둥균열, 천정텍스 탈락, 마감균열	비구조체	16,995,000
포항	오천초	무피해	마감균열및 탈락, 텍스탈락	비구조체	32,641,000
	문충초	경미한 피해	조적벽균열, 강당 수벽균열	비구조체	36,048,000
	창포초	무피해	조적벽,비내력벽 균열, 마감탈락, 텍스탈락	비구조체	36,048,000
경주	경주공고	-	벽체균열, 천정탈락, 담장파손,유리파손 등	비구조체	53,256,850
	경주마케팅고	소규모피해	기둥전단균열,조적벽 균열, 타일, 미장,텍스 탈락	비구조체	123,789,000
			내진성능평가,보강설계	구조체	18,859,600
	경주화랑고	-	천정파손 보수공사	비구조체	960,000
	문화고	무피해	벽체균열 보수보강, 유리교체, 천정처짐, 텍스 및 창틀 보수	비구조체	49,870,000
	산대초	무피해	벽체균열 및 천정탈락 보수	비구조체	14,580,000
	외동중	무피해	지진피해 승강기보수, 벽체균열 보수	비구조체	29,594,000

3. 포항지진 피해사례에 대한 지진손상 DB구축

추가적으로 일반건축물 의 손상 105건에 대한 DB를 구축하였다. DB는 부록에 제공되어 있다. 아래의 표는 일반건축물에 대한 지진손실 DB 구축의 예이다.

<표 3.5> 포항지진 주거건축물 구조재 손상도에 대한 데이터베이스

건물 번호	구조 형식	기둥 균열	기둥 완파	벽체 균열	벽체 완파	접합부 균열	보 균열	계단실 균열	내부바닥 균열
1	조적벽 구조								
2	RC라멘 구조			O				O	
3	벽식 RC구조					O			
4	벽식 RC구조 [필로티]			O	O			O	
5	RC라멘 구조 [필로티]								
6	RC라멘 구조 [필로티]	O		O		O		O	
7	조적벽 구조			O				O	
8	RC라멘 구조							O	
9	RC라멘 구조 [필로티]	O							
10	RC구조								
11	RC라멘 구조 [필로티]								
12	벽식 RC구조			O	O	O			
13	RC라멘 구조 [필로티]			O		O			
14	벽식 RC구조								
15	벽식 RC구조			O					
16	RC라멘 구조			O					
17	조적벽 구조 [황토]								
18	RC라멘 구조	O		O				O	
19	벽식 RC구조 [필로티]			O					O
20	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
21	벽식 RC구조 [필로티]			O					
22	RC라멘 구조 [필로티]			O				O	
23	벽식 RC구조			O					
24	벽식 RC구조								
25	벽식 RC구조								
26	벽식 RC구조								
27	조적벽 구조			O					
28	RC라멘 구조 [필로티]	O	O	O					
29	RC라멘 구조 [필로티]	O	O	O		O			
30	목조 구조								
31	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
32	벽식 RC구조 [필로티]								
33	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
34	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
35	벽식 RC구조			O					
36	RC구조								
37	벽식 RC구조			O				O	

건물 번호	구조 형식	기둥 균열	기둥 완파	벽체 균열	벽체 완파	접합부 균열	보 균열	계단실 균열	내부바닥 균열
38	벽식 RC구조			O					
39	벽식 RC구조 [필로티]	O	O					O	
40	벽식 RC구조					O	O		
41	벽식 RC구조 [필로티]			O					
42	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
43	벽식 RC구조 [필로티]	O							
44	벽식 RC구조			O					
45	벽식 RC구조								
46	RC라멘 구조 [필로티]	O	O						
47	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
48	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
49	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
50	벽식 RC구조								
51	벽식 RC구조 [필로티]					O			
52	벽식 RC구조 [필로티]	O	O	O					
53	벽식 RC구조 [필로티]	O	O	O					
54	벽식 RC구조 [필로티]			O				O	
55	RC라멘 구조								
56	벽식 RC구조 [필로티]								
57	벽식 RC구조	O		O				O	
58	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
59	벽식 RC구조			O					O
60	조적벽 구조								
61	조적벽 구조			O					
62	조적벽 구조			O					O
63	조적벽 구조			O					
64	철골 구조								
65	RC구조			O		O			
66	벽식 RC구조	O	O	O	O				
67	RC구조								
68	벽식 RC구조								
69	벽식 RC구조								
70	RC라멘 구조			O				O	
71	벽식 RC구조			O					
72	벽식 RC구조								
73	벽식 RC구조 [필로티]	O							
74	벽식 RC구조 [필로티]	O							
75	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
76	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
77	벽식 RC구조 [필로티]	O	O						
78	철골 구조			O		O		O	
79	벽식 RC구조			O					
80	벽식 RC구조			O					
81	벽식 RC구조								
82	벽식 RC구조								
83	RC라멘 구조								
84	벽식 RC구조			O					
85	조적벽 구조								
86	RC라멘 구조								
87	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
88	벽식 RC구조 [필로티]	O							
89	벽식 RC구조 [필로티]			O	O				
90	벽식 RC구조 [필로티]			O					
91	벽식 RC구조 [필로티]	O	O	O	O				
92	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					

건물 번호	구조 형식	기둥 균열	기둥 완파	벽체 균열	벽체 완파	접합부 균열	보 균열	계단실 균열	내부바닥 균열
93	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
94	벽식 RC구조 [필로티]	O		O					
95	RC라멘 구조								
96	조적벽 구조							O	
97	조적벽 구조								
98	RC라멘+조적벽 구조	O		O					
99	RC라멘 구조								
100	RC라멘 구조								
101	벽식 RC구조			O		O			O
102	벽식 RC구조			O					
103	RC라멘+조적벽 구조			O		O		O	
104	벽식 RC구조								
105	RC라멘+조적벽 구조					O			

<표 3.6> 포항지진 주거건축물 구조재 손상도에 대한 데이터베이스

건물 번호	구조 형식	지진피해 및 보수 내용
1	조적벽 구조	담장 균열 및 붕괴, 옥상난간균열 및 붕괴
2	RC라멘 구조	조적벽체 균열, 마감 균열
3	벽식 RC구조	조적벽체 균열
4	벽식 RC구조 [필로티]	
5	RC라멘 구조 [필로티]	기초외부바닥 균열, 담장균열
6	RC라멘 구조 [필로티]	개구부균열, 담장균열
7	조적벽 구조	조적벽체 균열, 담장균열, 마감균열 및 탈락
8	RC라멘 구조	조적벽체 균열, 마감균열 및 탈락
9	RC라멘 구조 [필로티]	기초및외부바닥 균열, 마감균열 및 탈락
10	RC구조	담장 균열
11	RC라멘 구조 [필로티]	개구부 균열
12	벽식 RC구조	개구부 균열
13	RC라멘 구조 [필로티]	내부타일 균열 및 탈락, 기초및외부바닥 균열, 마감균열 및 탈락
14	벽식 RC구조	조적벽체전도, 옥상난간균열 및 붕괴
15	벽식 RC구조	조적벽체 균열, 개구부균열, 기초및외부바닥 균열, 담장균열
16	RC라멘 구조	조적벽체 균열, 개구부균열
17	조적벽 구조 [황토]	조적벽체 전도
18	RC라멘 구조	개구부 균열, 마감균열 및 탈락
19	벽식 RC구조 [필로티]	
20	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
21	벽식 RC구조 [필로티]	
22	RC라멘 구조 [필로티]	내부타일 균열 및 탈락, 마감균열
23	벽식 RC구조	기초및외부바닥 균열
24	벽식 RC구조	조적벽체 균열, 마감균열 및 탈락
25	벽식 RC구조	마감균열 및 탈락
26	벽식 RC구조	내부타일 균열 및 탈락, 담장균열
27	조적벽 구조	조적벽체 균열, 개구부균열,

건물 번호	구조 형식	지진피해 및 보수 내용
28	RC라멘 구조 [필로티]	
29	RC라멘 구조 [필로티]	
30	목조 구조	조적벽체 균열 및 전도, 개구부균열
31	벽식 RC구조	
32	벽식 RC구조 [필로티]	내부타일 균열 및 전도, 마감균열 및 탈락
33	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
34	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
35	벽식 RC구조 [필로티]	
36	벽식 RC구조	조적벽체 균열, 개구부균열, 내부타일 균열 및 탈락, 마감균열 및 탈락
37	RC구조	마감균열 및 탈락, 설비손상
38	벽식 RC구조	개구부균열
39	벽식 RC구조	누수
40	벽식 RC구조 [필로티]	개구부균열, 옥상난간균열 및 붕괴
41	벽식 RC구조	
42	벽식 RC구조 [필로티]	
43	벽식 RC구조 [필로티]	
44	벽식 RC구조 [필로티]	내부타일 균열 및 탈락
45	벽식 RC구조	개구부균열
46	벽식 RC구조	마감균열 및 탈락
47	RC라멘 구조 [필로티]	
48	벽식 RC구조 [필로티]	
49	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
50	벽식 RC구조 [필로티]	
51	벽식 RC구조	천정탈락
52	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
53	벽식 RC구조 [필로티]	
54	벽식 RC구조 [필로티]	
55	벽식 RC구조 [필로티]	내부타일 균열 및 탈락
56	RC라멘 구조	옥상난간균열 및 붕괴
57	벽식 RC구조 [필로티]	기초및외부바닥 균열, 담장균열, 마감균열 및 탈락
58	벽식 RC구조	조적벽체 균열, 개구부균열, 마감균열 및 탈락
59	벽식 RC구조 [필로티]	
60	벽식 RC구조	
61	조적벽 구조	옥상난간균열 및 붕괴
62	조적벽 구조	조적벽체 균열, 개구부균열, 담장균열 및 붕괴, 옥상난간균열 및 붕괴
63	조적벽 구조	조적벽체 균열, 기초및외부바닥 균열, 옥상난간균열 및 붕괴
64	조적벽 구조	조적벽체 균열
65	철골 구조	조적벽체 균열, 마감균열 및 탈락
66	RC구조	조적벽체 균열, 천정탈락
67	RC구조	조적벽체 균열
68	벽식 RC구조	
69	벽식 RC구조	누수
70	RC라멘 구조	천정탈락
71	벽식 RC구조	천정탈락
72	벽식 RC구조	개구부균열
73	벽식 RC구조 [필로티]	
74	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
75	벽식 RC구조 [필로티]	
76	벽식 RC구조 [필로티]	
77	벽식 RC구조 [필로티]	
78	철골 구조	내부타일 균열 및 탈락
79	벽식 RC구조	조적벽체 균열

건물 번호	구조 형식	지진피해 및 보수 내용
80	벽식 RC구조	조적벽체 균열
81	벽식 RC구조	조적벽체 균열 및 옥상난간균열 및 붕괴, 누수
82	벽식 RC구조	담장균열 및 붕괴
83	RC라멘 구조	조적벽체 균열, 내부타일 균열 및 탈락, 마감균열 및 탈락
84	벽식 RC구조	조적벽체 균열, 개구부균열
85	조적벽 구조	조적벽체 균열, 내부타일 균열 및 탈락
86	RC라멘 구조	조적벽체 균열, 내부타일 균열 및 탈락, 마감균열 및 탈락
87	벽식 RC구조 [필로티]	
88	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
89	벽식 RC구조 [필로티]	조적벽체 균열, 개구부균열
90	벽식 RC구조 [필로티]	마감균열 및 탈락
91	벽식 RC구조 [필로티]	
92	벽식 RC구조 [필로티]	
93	벽식 RC구조 [필로티]	
94	벽식 RC구조 [필로티]	
95	RC라멘 구조	담장균열, 옥상난간균열 및 붕괴
96	조적벽 구조	조적벽체 균열, 옥상난간균열 및 붕괴
97	조적벽 구조	담장균열 및 붕괴
98	RC라멘+조적벽 구조	조적벽체 균열
99	RC라멘 구조	옥상난간균열 및 붕괴
100	RC라멘 구조	개구부균열, 담장균열, 마감균열
101	벽식 RC구조	
102	벽식 RC구조	담장균열
103	RC라멘+조적벽 구조	개구부균열
104	벽식 RC구조	마감균열 및 탈락
105	RC라멘+조적벽 구조	조적벽체 균열

4. 경주지진의 손상-손실데이터 비교 분석

가. 다변량 데이터 분석 방법

구조물의 손상과 손실을 그 상관관계가 분명히 존재하지만, 손상-손실에 영향을 주는 변수가 너무 많아 하나의 함수식으로 정의하기는 쉽지 않다. 또한 이런 여러 변수의 결합 분포를 알기 위해 필요한 계산량은 변수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 최근 상관관계 사이의 다양한 변수를 갖는 금융학, 대기학 등의 다양한 분야의 연구에서 Copula 함수를 사용하여 그 결합확률을 표현하고 있다.

나. Copula 함수의 정의

Copula 함수란 다변량 확률 분포 함수를 개별 주변 확률 분포로 연결 시키는 함수를 의미한다. 데이터의 다변수 함수 분석을 할 때, 자료의 관계를 Pearson correlation coefficient(선형상관계수) 만으로는 설명하기에는 한계점이 존재하기 때문에 하나의 함수로 표현할 수 있다는 것은 큰 장점을 가진다. Copula 는 '결합'이라는 뜻을 가진 라틴어로써, 1995년 Sklar 에 의해 처음 언급되었다. Sklar 는 2개의 한계분포함수 F_1, F_2가 연속 함수인 경우 아래와 같은 식을 만족하는 함수 C가 유일하게 존재한다는 Sklar's Theorem을 발표하였다.

$$F(x_1,x_2) = C(F_1(x_1),F_2(x_2)) \tag{3.1}$$

이후 이 정리는 다변량에 대해 일반화 되었고, 이러한 Copula 함수를 사용함으로써 일반적으로 다루기 힘든 n 변량 결합분포함수를 1 변량 한계분포함수를 통하여 계산할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

다. Copula 함수의 추정법

Copula 함수를 사용하기 위해서는 그 함수의 정확한 분포를 알아야하지만, 정확한 분포를 모르는 채로 데이터의 값만 아는 경우도 있다. 데이터의 분포를 정확히 알 수 없을 때 통계학에서는 모수 추정을 통해 데이터의 분포를 예측한다. 모수 추정에는 비모수적 방법과 모수적인 방법으로 나뉘고, 이것은 데이터의 모수의 특징을 알고 있는지와 없는지에 따라 나뉜다.

(1) 비모수적 추정

비모수적 추정은 데이터의 분포를 모르는 경우에 활용한다. n개의 변수에 대해 T개의 데이터를 측정한 자료를 갖고 있는 경우 식 (3.2)으로 표현한다.

$$\hat{C}(\frac{t_1}{T},\bullet\bullet\bullet,\frac{t_n}{T}) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} 1_{[x_1^i \le x_1^{t_1},\bullet\bullet,x_n^i \le x_n^{t_n}]} \tag{3.2}$$

이 함수는 주어진 데이터만을 활용하였기에 오차가 존재하지 않는다. 이 경우 Copula 함수를 적용하기 위해 식 (3.3)을 통해 여러 대안적인 Copula 함수중 최적 Copula를 선택하게 된다.

$$\overline{d_n}(\hat{C},C_k) = \left(\sum_{t_1=1}^{T}\cdots\sum_{t_n=1}^{T}[\hat{C}(\frac{t_1}{T},\cdots\frac{t_n}{T}) - C_k(\frac{t_1}{T},\cdots,\frac{t_n}{T})]^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.3}$$

(2) 모수적 추정

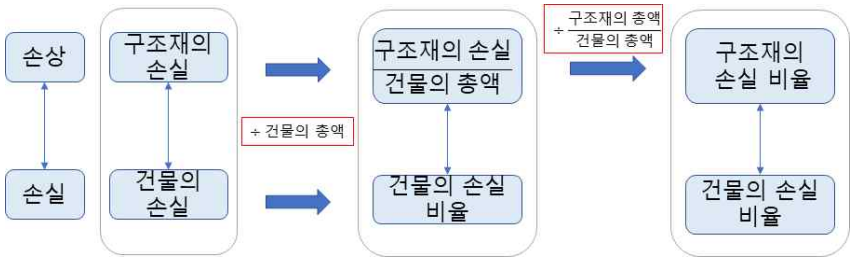
모수적 추정 방법은 크게 3가지로 나뉜다. 최우추정법, IFM(method of Inference Functions for Margins), CML(method of Canonical Maximum Likehood) 가 그것이다. 최우추정방법은 통계학에서 모수를 추정하기 위해 가장 많이 쓰는 방법으로 식 (3.4)을 통해 모수를 파악한다.

$$L(\theta)=\sum_{t=1}^{T}\ln C(F_1(x_1^t;\phi_1),\cdots,F_n(x_n^t;\phi_n);\theta)+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\ln f_i(x_i^t;\phi_i)$$
$$\hat{\theta}=\arg max L(\theta) \tag{3.4}$$

이런 최우추정방법은 파라미터 ϕ의 값을 알아야 적용이 가능한데, 이 ϕ의 값을 알기위해 적용하는 방법이 IFM 과 CML 이다. IFM 은 데이터의 분포가 어떤 함수 (Gaussian, student-t, ...)를 따른다고 가정을 하여 파라미터 값을 구하는 것이고, CML 은 비모수적 추정법을 사용하여 각 변수의 분포를 추정 한 뒤, 최우추정법에 대입하여 파라미터를 추정하는 것이다.

라. Copula 함수의 적용

2016년 9월 12일 발생한 경주지진으로 인한 손상과 손실 데이터를 코퓰라 함수를 통해 검증하고자 한다. 손상을 나타내는 척도로 구조재의 손실 비율(구조재의 손실액/총 구조재의 가치)을 사용하였고, 손실은 건물의 손실 비율(건물의 손실액/총 건물의 가치)을 사용하였다. (구조재의 총액/건물의 총액)이 건물마다 큰 차이가 없다고 가정할 때, 이 상관관계 모형은 구조재의 손실과 건물의 손실 상관관계 모형과 일치하게 된다.



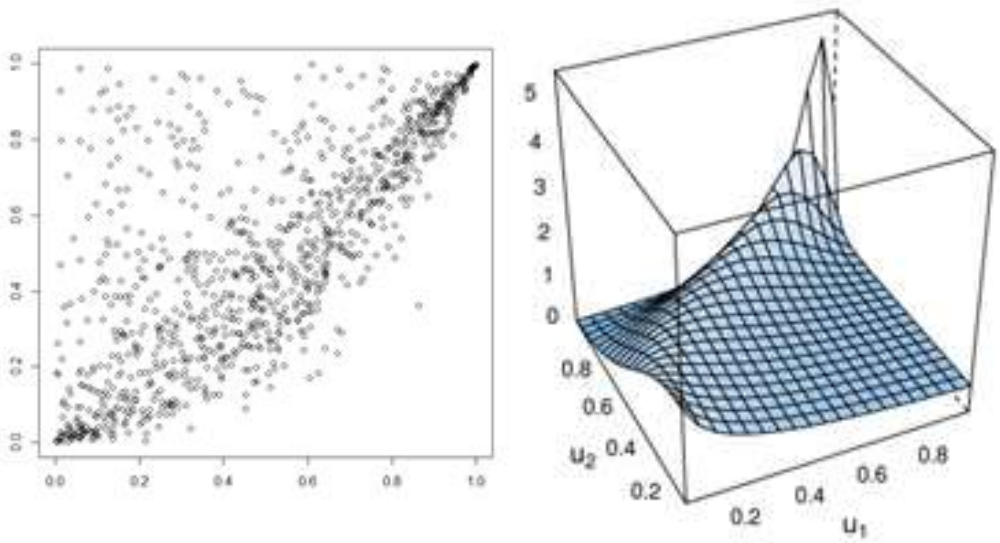
<그림 3.1> 구조물의 손상과 손실관계 모델링

<표 3.7> 경주지진 구조재의 손실과 총 손실액 비교

건물번호	구조재의 손실 (원)	건축물의 손실 (원)
A9	28,134,792	358,196,047
A10-3	5,814,717	10,647,097
A16-2	12,150,000	94,936,149
A24-1	2,739,662	3,082,717
A24-2	2,203,641	3,464,625
A24-3	3,859,350	11,197,833
A24-5	4,049,936	7,740,706
A25-4	1,727,178	1,943,452
A27	398,400	398,400
A29	10,727,772	11,058,081
A31	14,403,709	16,189,769

R 프로그램을 사용하여 손상과 손실의 최적 Copula 함수를 나타낸 결과 적정 Copula 함수는 Gumell Copula 함수의 유사 함수인 Tawn Type 2 Copula 함수로 제시되었다. 함수식과 분포 모형은 아래와 같다.

$$C(u_1,u_2)=u_1u_2e^{-\tau\frac{\log(u_1)\log(u_2)}{\log(u_1u_2)}} \tag{3.5}$$



<그림 3.2> 코퓰라 함수를 활용한 경주지진 손상-손실 데이터분포

<표 3.8> 실제 데이터와 상관관계 추정에 의한 확률 비교

Copula	Real Data	Error
1	1	0
0.6675	0.75	0.09
0.1531	0.1667	0.01
0.0352	0.0833	0.048
0.0257	0.0833	0.058
0.2407	0.25	0.01
0.4458	0.5	0.054
0.1430	0.25	0.107
0.3271	0.4167	0.09
0.4228	0.5	0.07
0.2142	0.3333	0.119
0.8621	0.9167	0.046

건물의 손상 확률과 구조재의 손실 확률, 2가지 변수를 갖는 Copula 함수는 Gumbell Copula 함수를 따른다. 또한 이 함수를 통해 구한 확률값과 실제 확률값은 평균적으로 9.3%의 오차를 나타낸다.

5. 소결

본 장에서는 실제 경주지진과 포항지진에 대한 피해사례 조사를 통해, 지진 손상과 손실에 대한 DB를 구축하였다. 또한 추가적으로 경주지진의 손상-손실 관계를 Copula함수를 이용하여 상관관계를 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

- ❍ 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진피해사례에 대한 지진손실액을 공동연구기관인 3D구조엔지니어링과 위탁연구기관인 현대해상과의 협업을 통해 연구에 필요한 데이터베이스를 구축하였다. 우선적으로 현대해상화재보험의 지진피해관련 claim data를 통해 지진손실액에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 지진손실액에 대한 데이터베이스는 향후 건축물의 손상과의 관계를 규명하는데 사용될 것이므로, 손실액을 추정하는 방법론에 따라 데이터베이스 구축에 필요한 항목을 도출하였다.
- ❍ 경주지진의 경우, 총 35건의 일반 건축물 지진손상과 손실에 대하여, 또 주요시설물인 학교건축물에 대해 총 36건의 지진손상과 손실에 대한 데이터베이스를 구축하였다.
- ❍ 포항지진의 경우, 일반건축물에 대해 총 105건의 지진손상에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 추루 연구를 통해 지진손실에 대한 데이터베이스를 추가할 것이다.
- ❍ 경주지진의 손상-손실데이터로부터, 손상과 손실의 상관관계를 규명하기 위해 Copula함수를 적용하였다. 그 결과, 구조재의 손상이 손실에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었으며, 포항지진의 손상-손실 데이터가 추가된다면, 분석된 결과의 신뢰도를 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2절. 중요요인을 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발

1. USRC (United States Resiliency Council) Rating System

가. USRC의 개요

United Stated Resiliency Council (USRC)는 지진 및 기타 자연재해가 발생하였을 때의 건물의 성능을 평가하여, 건물의 위험성을 알리고 이러한 등급을 책정할 수 있는 전문가를 양성하기 위하여 재정되었다.

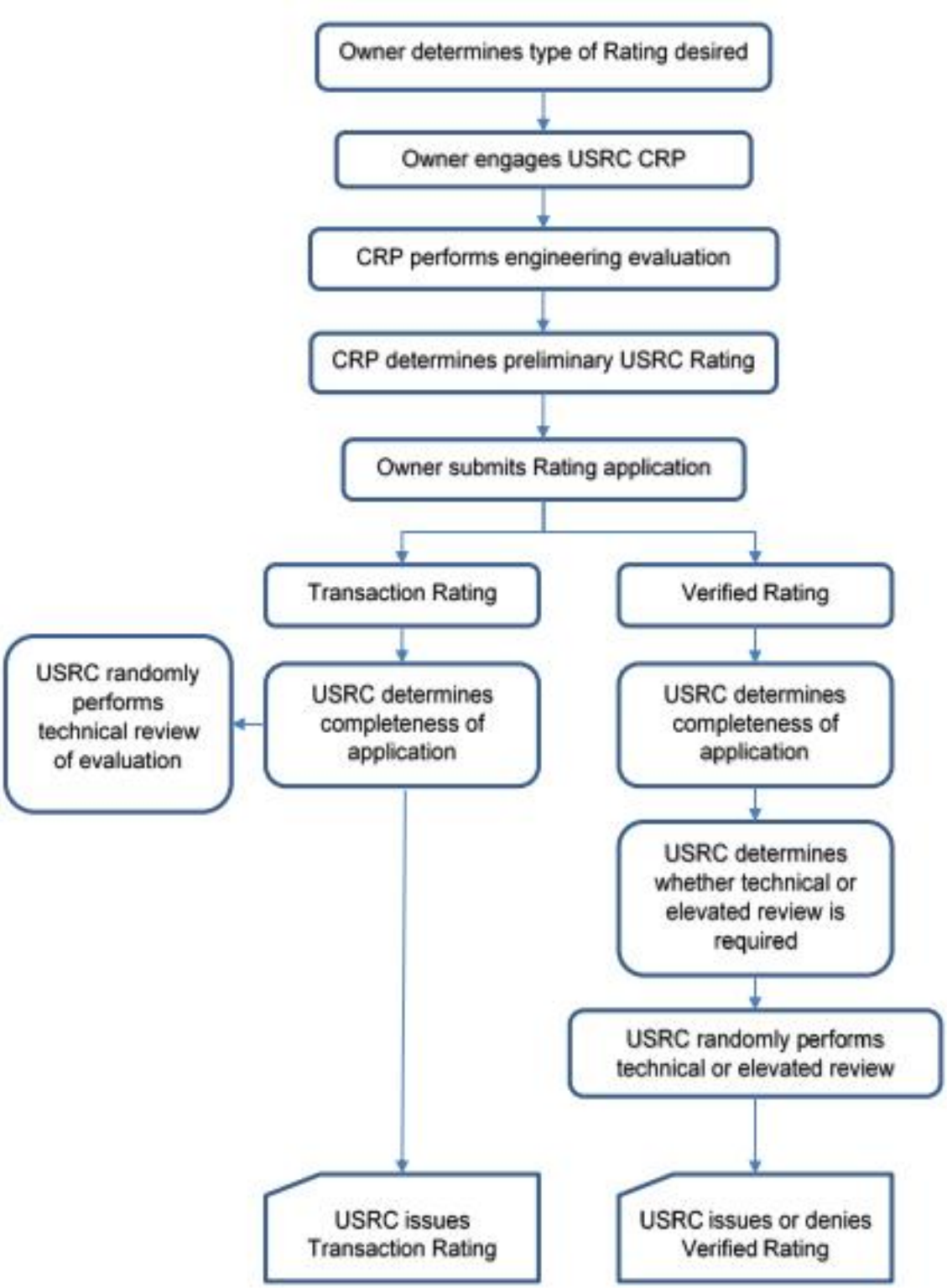
건물의 등급은 위험을 정량화 할 수 있는 방법을 제공함으로써 건물 소유주, 대출 기관 및 정부에 도움이 된다. 정부는 USRC 등급을 사용하여 건물간의 상대적인 위험성을 비교하여 개발 지역에 대한 우선순위를 정할 수 있다. 또한 USRC는 US Green Building Councill (USGBC)이 지속 가능한 디자인의 중요성에 대해 지역 사회에 교육할 때 지진 및 기타 자연 재해에서 건물 성능에 관해 진행되는 교육을 대신할 수 있다.

정확한 기준없이 건물의 성능을 정의하고 평가하면 그 평가결과에 대한 일관성이 없으며 검증 역시 어렵다. USRC는 건물의 구조 공학 및 특정 지식을 요구하는 전문 기술자를 위한 프로그램을 채택하였기 때문에 등급 제공에 있어 높은 수준의 기술 역량과 일관성을 이끌어내게 된다. Certified Rating Professional (CRP)에 의해 작성된 등급 보고서는 기술적 검토 프로세스를 통해 주기적으로 감사된다. USRC는 CRR(Certified Rating Reviewers)에 의해 감사를 수행함으로써 전체 등급 시스템의 신뢰성을 유지하게 된다.

나. 평가 절차

등급을 산출하는 과정은 아래의 단계와 <그림3.3>의 순서도를 포함한다.

- ❍ 건물 소유주는 원하는 USRC Rating Type을 결정한다.
- ❍ 건물 소유주는 건물의 내진 평가를 완료하기 위해 CRP를 선정하고 계약한다.
- ❍ CRP는 USRC가 승인한 방법론 중 하나를 사용하여 대상 건물에 대한 지진 평가를 수행한다. 평가는 USRC와는 별개로 CRP에서 제작한 엔지니어링 제품으로 이루어진다.
- ❍ CRP는 USRC가 승인한 번역 방법을 사용하여 평가 결과를 3 부분 평가로 변환한다.
- ❍ 평가는 CRP 평가를 기반으로한 적절한 방법으로 진행되며, 사용한 방법을 USRC 웹포털에 제출한다.
- ❍ USRC는 제출물의 완결성을 검토하며 거래 등급 인증서를 발급한다. 또한 동시에 확인된 등급 인증서 발급에 대한 기술 개발 또는 검토를 진행한다.



<그림 3.3> USRC Rating Process 순서도

다. Rating Types

Rating Type은 Transaction Rating과 Verified Rating으로 나눠진다. Transaction Rating은 주로 금융 및 부동산 거래에 사용되며 공공 전시 또는 마케팅 자료에 사용할 수 없다. 또한 이 등급은 세 가지 종류의 기준에 따라 각각의 등급을 별점 형태로 갖게 된다. 이 등급을 받은 건물은 성능 관리를 위하여 기술적 검토 과정을 거치게 되며, 그 과정은 CRP에 의해

확인된다. 반면 Verified Rating은 건물 입구에 공개되며 USRC 상표 사용 조건에 따라 마케팅 자료에 사용하기 위한 것이다. 이 등급은 양도할 수 없으며 5년마다 USRC에 재등록 절차를 진행해야 한다.

라. USRC Certifed Rating Professionals (CRP)

Rating System은 USRC에 의해 평가된 지진 또는 기타 자연재해에 대한 건물의 안정성 평가해본 경험을 갖춘 USRC CRP에 의해 활용되어야 한다. CRP가 되기 위해서는 USRC 인증위원회를 통해 자격을 평가받고 인증을 받는다. 이러한 인증을 통해 뽑힌 CRP는 USRC가 높은 수준의 전문 지식과 일관성, 신뢰성을 유지할 수 있도록 한다.

마. Engineering Evaluation

USRC를 통한 등급은 건물의 성능에 대한 평가를 쉽게 전달할 수 있는 방법이다. 즉 이 등급은 내진평가를 포함한 모든 구조적인 판단을 포함하는 성능을 나타낼 수 있어야한다. 그렇기 때문에 이 건물의 구조적인 평가는 구조에 대한 전문 지식을 갖춘 USRC CRP에 의해 수행되어야하고, 그 과정에서 이 전문가들의 적절한 공학적 판단을 반영하게 된다.

바. 기술 검증

USRC는 제출된 등급에 대해 기술에 대한 검토를 하며 그 프로그램의 품질을 관리한다. 일반적으로 각 USRC CRP는 평점의 근거가 되는 등급의 품질에 대한 책임이 있다. USRC의 기술 검토는 USRC Certified Rating Reviewers (CRR)에 의해 이루어진다. CRR은 지진 및 기타 자연 재해가 발생할 수 있는 구조물의 평가를 10년 이상 경험한 공인된 전문가가 맡게 된다. 또한 기술 검증 과정에서 심각한 문제점이 발생하면 USRC Rating Revie Committee (RRC)에 처리를 의뢰하게 된다. RRC는 문제점의 심각성을 파악하여 이전 등급을 검토하거나 해당 CRP의 미래 등급에 대한 기술적 검토를 요구할 권한을 갖는다.

Transaction Rating은 CRP가 해당 절차를 의도대로 적용하였음을 확인하기 위해 기술적인 검토 과정을 거쳐야 한다. 반면 Verified rating은 등급 인증서를 발급전에 등급의 기술 검토를 요구한다.

사. Elevated Review

아래와 같은 조건을 만족하는 특정 건물 평가는 Verified Rating에 대해 발전된 검토가 요구된다.

- ❍ 한가지 평가에 대해서라도 등급이 4 또는 5인 건물
- ❍ ASCE 7-10에 대해 Risk Category Ⅲ 또는 Ⅳ인 건물
- ❍ 철근이 없는 조적벽, 1985 UBC 이전에 설계된 철근 콘크리트가 포함된 건물

○ ASCE 31에 정의된 Soft /Weak story를 갖는 건물

○ 2000년 이전에 설계된 스틸 모멘트 프레임 건물

○ 비연성 골조 시스템

○ ASCE 41-13에 정의된 Common bulding type이 아니거나 ASCE 41-13의 Tier 1 절차를 통해 평가할 수 없는 건물

○ USGS 또는 CDMG 지도에서 결정된 중요한 지질학적 위험이 있는 3등급 이상의 건물

아. USRC Building Rating System의 특징

Rating System은 새로운 방법이지만, 기존의 Engineering 평가와 여전히 밀접한 관련성을 갖고있다. 따라서 Rating System을 적절히 사용하려면 기존의 평가가 의도한 내용과 개발 방법 및 활용법에 대한 이해가 필요하다. USRC Building Rating System은 이 내용을 (Safety / Damage expressed as Repair Cost / Recovery expressed as Time to Regain Basic Functions) 3가지의 등급을 별점을 통해 제공한다.

○ Safety

Safety 등급은 지진 발생 후 건물 외부로 나갔을 때, 사고로 인하여 부상을 당하거나 생명을 잃을 수 있는 가능성을 고려하여 나눠진다.

Safety Rating	
★★★★★	**Injuries and blocking of exit paths unlikely** Expected performance results in conditions that are unlikely to cause injuries or to keep people from exiting the building.
★★★★	**Serious injuries unlikely** Expected performance results in conditions that are unlikely to cause serious injuries.
★★★	**Loss of life unlikely** Expected performance results in conditions that are unlikely to cause loss of life.
★★	**Loss of life possible in isolated locations** Expected performance results in conditions associated with partial collapse or falling objects that have potential to cause loss of life at locations within or around the building.
★	**Loss of life likely in the building** Expected performance results in conditions associated with building collapse, which has a high potential to cause loss of life within or around the building.

<그림 3.4> Safety Rating 기준표

❍ Damage

Damage 등급은 지진 발생후 건물을 수리하기 위한 비용 견적을 반영하기 때문에 평가가 마지막으로 이루어진 시점의 데이터를 사용한다. Damage는 Replacement cost와 지진이 발생하기 전과 똑같은 건물을 만드는 데 필요한 비용의 퍼센트 비율로 정의된다. Damage는 건물의 모든 구성 부품에 대한 손상 비용을 포함하지만, 내용물(비구조재)의 손상 비용을 포함하진 않는다.

Damage Rating	
*****	**Minimal Damage** Repair Cost likely less than 5% of building replacement cost
****	**Moderate Damage** Repair Cost likely less than 10% of building replacement cost.
***	**Significant Damage** Repair Cost likely less than 20% of building replacement cost.
**	**Substantial damage** Repair Cost likely less than 40% of building replacement cost.
*	**Severe Damage** Repair Cost likely greater than 40% of building replacement cost.
NE	**Not Evaluated** Repair Cost has not been evaluated.

<그림 3.5> Damage Rating 기준표

❍ Recovery

Recovery는 부동산 소유주 또는 세입자가 본래의 기능을 위해 건물에 들어갈 수 있을때까지의 예상 시간이다. Recovery Rating은 필요한 수리를 수행하고 주요 안전 위험을 제거하고 사용이 가능하기까지의 최소 시간을 나타내기도 한다. 이 등급은 기능을 회복하기 위한 시간을 지연시킬 수 있는 (외부 인프라, 건물 내용의 손상 또는 상태, 인접한 건물의 형태) 등의 요소를 다루지는 않는다.

Recovery Rating	
*****	**Immediately to days** Expected performance will likely result in people being able to quickly re-enter and resume basic functionality of the building from immediately to a few days, excluding external factors.
****	**Within days to weeks** Expected performance may result in delay of basic functionality for days to weeks, excluding external factors.
***	**Within weeks to months** Expected performance may result in delay of basic functionality for weeks to months, excluding external factors.
**	**Within months to a year** Expected performance may result in delay of basic functionality for months to a year.
*	**More than one year** Expected performance may result in delay of basic functionality for at least one year or more.
NE	Not Evaluated Time to regain basic function has not been evaluated.

<그림 3.6> Recovery rating 기준표

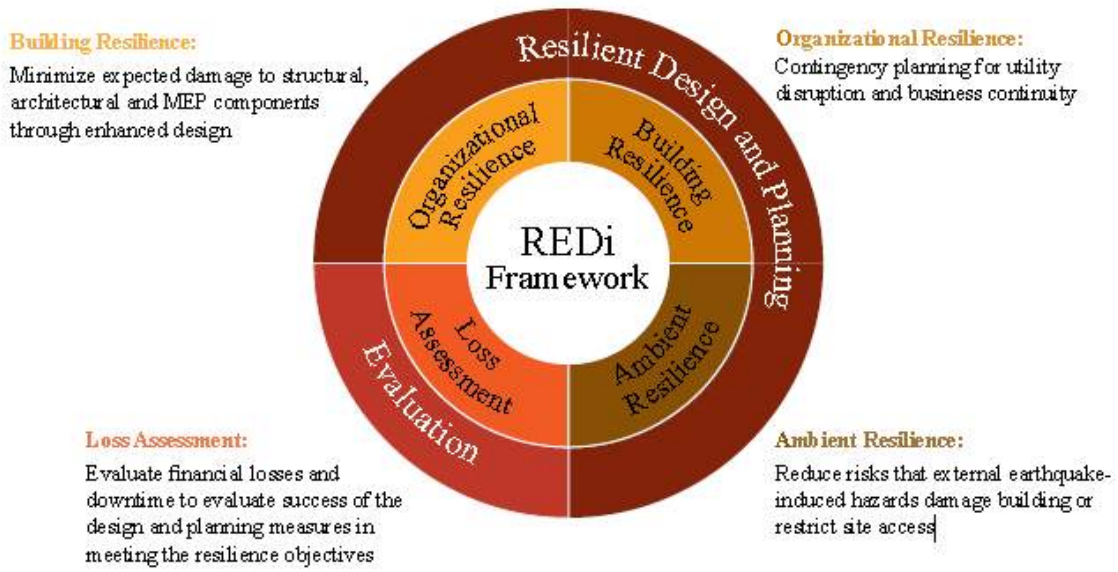
2. REDi Rating System

가. REDI의 개요

현재의 건물 코드는 지진 이후에 신속하게 복구 할 수 있는 조직의 능력 (지진 복원력)에 초점을 두지 않고, 건물 거주자의 생명을 보호하는 것을 목적으로 한다. 그렇기 때문에 코드를 따라 설계된 건물들도 구조재 및 기계/전기/배관 등의 비구조재에 대한 피해가 충분히 발생할 수 있다. 따라서 규모가 큰 지진이 도심을 강타할 때 건물의 손상으로 인한 손실은 엄청나다. 직접 손실로 분류되는 지진 발생 후 철거, 수리 및 복구 비용부터, 건물을 사용하지 못함으로써 생기는 간접적인 손실은 계량하기도 어려울뿐더러, 수년동안 영향을 주게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Resilience-based Earthquake Design Initiative(REDI)가 개발되었으며 이는 “resilience-based earthquake design”과 “beyond-code”를 구현한다.

나. REDI Roadmap to Resilience

REDI 프레임 워크는 지진 복원력이 건물을 설계함에 있어서 중요하다는 것을 알려준다. REDI 등급은 (Platinum / Gold / Silver) 3가지 등급으로 나눠지는데, 이를 획득하려면 (Organizational Resilience, Building Resdilience / Ambient Resilience)의 3가지 카테고리에서 각각의 기준을 만족시켜야한다.



<그림 3.7> REDi Framework

(1) Building Resilience

건물의 손상하는 기술인 Base Isolation 나 Energy dissipating system은 꾸준히 발전했으며, 신뢰성을 갖는 데이터를 만들어낸다. 또한 비구조적 구성 요소에 대한 세부적인 개선 방법도 개발되었다. 그와 동시에 구조적 거동에 대한 지식을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션이 발전됨으로써 Engineer는 지진에서 건물의 거동을 현실적으로 예측이 가능해졌다,

이러한 발전은 기존의 코드를 기반으로 설계된 건물들에 비해 더 적은 피해를 입을 수 있으며, 경제적으로 실현 가능한 건물을 설계할 수 있도록 하였다. 지진에 대한 Demand를 최소화하고 비구조 요소의 Capacity를 늘림으로써 loss를 최소화 하도록 한다.

(2) Organizational Resilience

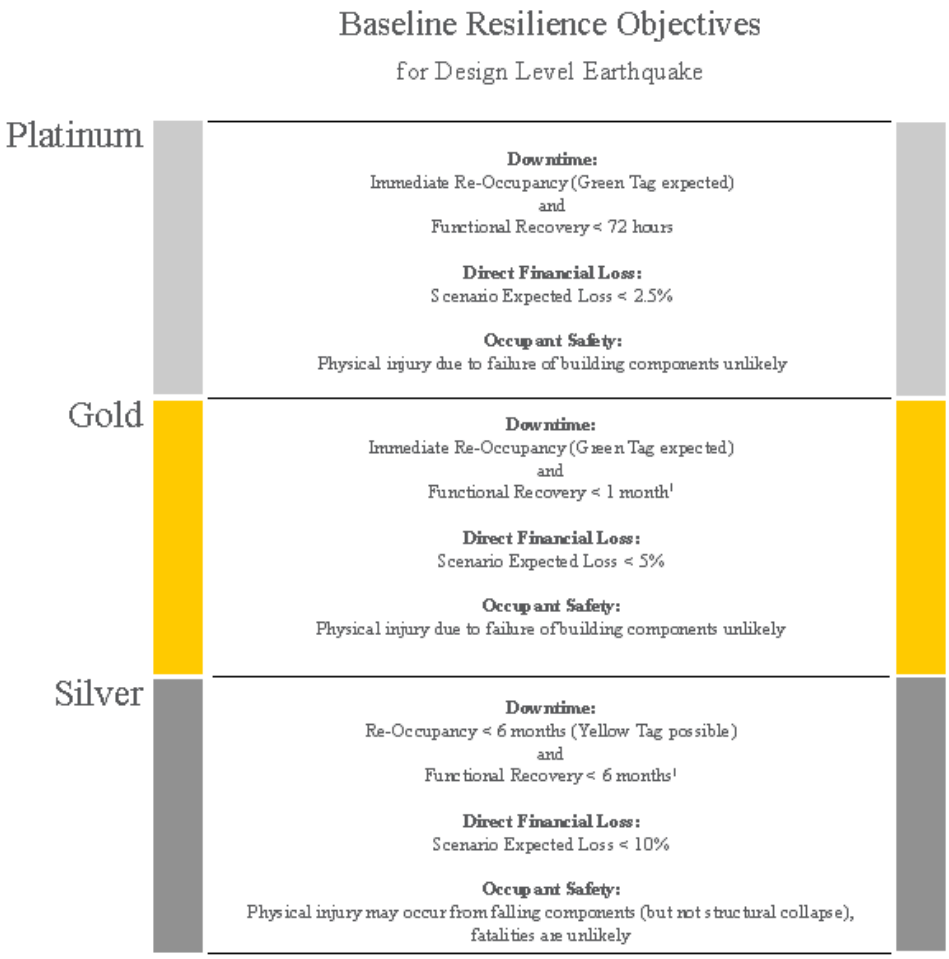
손상된 건물의 기능을 회복하기 위해 걸리는 시간에 건물의 지진 피해로 인한 수리 시간만 포함되는 것은 아니다. 여러 가지 요인에 의해 이런 복구 시간은 상당히 지연될 수 있다. 또한, 지진 발생 후 다시 이 건물을 활용할 수 있는 조건을 유지하기 위해 지진이 설비에 미치는 영향을 고려해야한다.

(3) Ambient Resilience

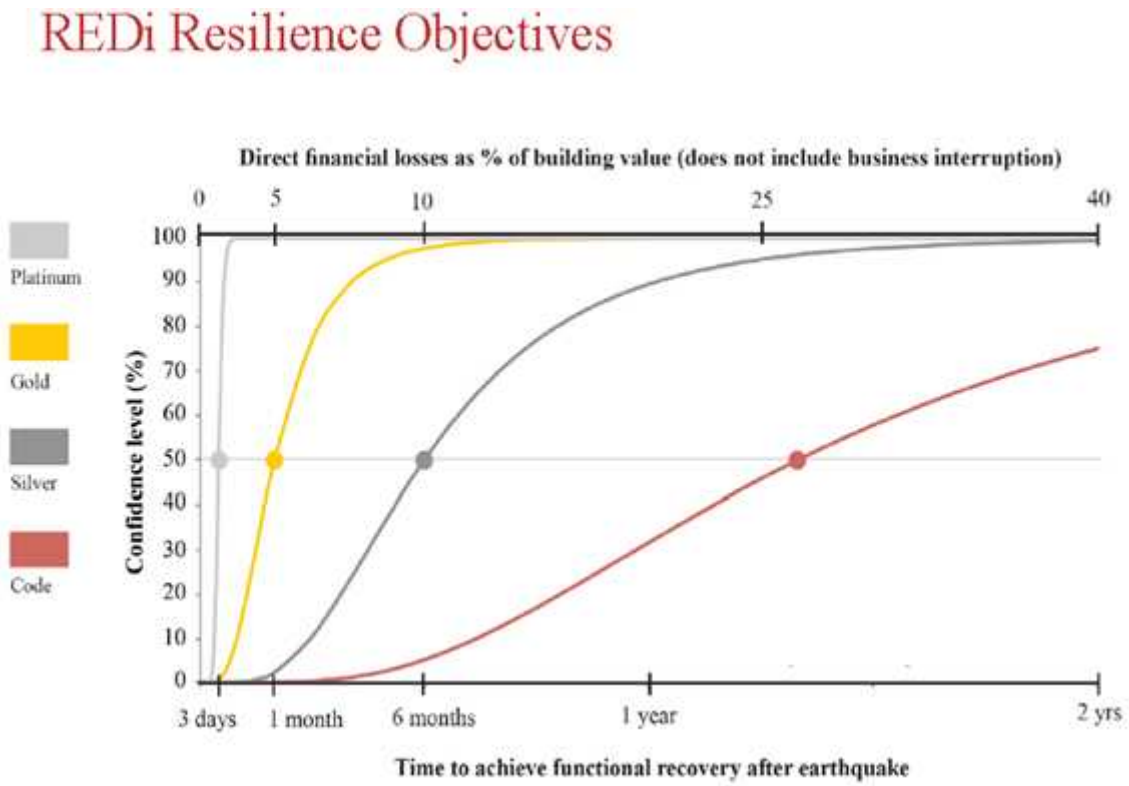
최근 지진의 피해를 통해 알 수 있는 점은 건물의 외부의 환경이 건물을 복구하는 데 걸리는 시간에 영향을 미친다는 것이다. 건물이 붕괴되거나, 그 파편을 주변 도로 혹은 건물에 피해를 줄 수 있는 밀도 높은 도시 환경에서 이런 효과는 더욱 증가한다. 지진 발생 후 건물에 쉽게 접근 할 수 있어야 복구에 걸리는 시간을 최소화 할 수 있기 때문에 건물의 사이트 계획 역시 중요하다.

다. REDi Rating system

REDi Rating system의 3단계 등급은 <그림 3.8>과 같이 나타난다. Gold 및 Platinum 등급은 지진이 발생한뒤 즉각적인 활용이 가능하고, 손실의 최소화를 목표로 하여 지진 위험을 최소화 하는 것을 목표로 한다. Silver 등급은 즉각적인 활용이 가능한 것은 아니지만 발생한 손상을 크게 줄일 수 있도록 계획을 수립함으로써 기능을 회복하는데 걸리는 시간을 6개월로 제한하게 된다.



<그림 3.8> Redi Rating system



<그림 3.9> Code와 Redi Rating 등급에 따른 건물의 복구시간 비교

3. WHO/PAHO Rating System

가. Hospital Safety Index

Hospital Safety Index는 응급 및 재해시 병원의 기능을 향상시키기 위한 세계적인 노력에서 개발되었다. World Health Organization (WHO)는 이것을 25년 이상 장려하고 지원하였으며, Pan American Health Organiztion (PAHO)과 2008년에 처음으로 발표하였다. 이 시스템은 재해시 병원의 안정성을 일관된 하나의 지표로 나타내기 위해 개발되었다. 병원이 비상상황에 기능을 사용할 수 없다면 많은 사람들이 위험에 처하게 되기 때문에 이런 시스템은 더욱 중요하게 다뤄진다.

“Safe Hospital”은 비상 사태 및 재해의 영향을 받는 중에도 평소와 동일하게 접근 가능하고 기능이 유지되는 시설이다. 병원의 지속적인 기능은 건물의 안전. 중요한 시스템 및 장비, 소모품의 가용성, 병원의 응급 재난 관리 능력, 위험에 대한 대응 및 복구를 비롯한 다양한 요소에 달려있다. 이런 다양한 요소를 빠르게 평가하기 위해 개발된 것이 바로 Hospital Safety Index 이다. 이 평가는 병원의 강점과 약점에 대한 유용한 정보를 제공하고 병원의 안정성 및 비상 사태 관리 능력을 향상시키는데 필요한 것을 알려준다. Hospital Safety Index는 병원의 안전을 평가함과 동시에 병원의 환경과 의료 서비스 네트워크 역시 고려한다. 구조 및 비구조재의 안전 등급 평가, 비상사태 관리 평가 방법을 단계 별로 평가하고, 그 결과로 Safety Index를 계산할 수 있다.

나. Hospital Safety Index 의 개정

최초의 Hospital Safety Index는 PAHO 와 WHO에 의해 다양한 분야의 전문가들과 함께 2008년에 발표되었다. Hospital Safety Index는 현재까지 3500개 이상의 시설의 안정성을 평가하는데 사용이 되었다. 그러나 일부 국가에서는 Hospital Safety Index가 해당 지역의 특성을 반양하지 못해 개정이 필요하다고 생각하였다. 예를 들어 보건 인력의 가용성과 훈련, 건강 시설, 직원 및 환자의 보안등을 평가하는 절의 추가를 제안하며, 전 세계의 건물에 적용할 수 있도록 요청하였다. 그 결과로 현재 Hospital Safety Index는 전 세계 여러 국가에서 병원 안전의 많은 전문가들의 합의로 인해 개정되었다.

다. Hospital Safety Index 적용법

Hospital Safety Index는 크게 2가지 종류(General information about the hospital/Safe Hospitals Checklist) 의 양식을 거친다.

(1) General information about the hospital

이 양식에는 평가 대상 병원의 치료 및 운영 능력에 대한 일반 정보가 포함된다.

○ 일반 정보 : 병원의 이름과 주소, 연락처, 경영진 및 재난 관리 직원의 이름, 침대수와 침대 점유율, 인원수, 시설 등

○ 병원 치료 및 수술 용량 : 각 의료기기당 침대수, 직원수, 비상 사태 및 재난 작전 등

이 양식은 평가전에 병원의 재난위원회에서 작성해야 한다.

GENERAL INFORMATION ABOUT THE HOSPITAL

1. **Name of the hospital:**.....
2. **Address:** .....
3. **Names of hospital senior managers** (e.g. chief executive, medical director, nursing director, administration director): .....
   .....
   .....
   .....
4. **Names and contact details of hospital emergency/disaster managers** (e.g. chair of emergency/disaster management committee, coordinator, manager of security/fire services): .....
   .....
   .....
   .....
5. **Telephone** (include area/city code): .....
6. **Website :** .....
   E-mail: .....
7. **Total number of beds:** .....
8. **Average bed occupancy rate (in normal situations):** .....
9. **Total number of personnel:** .....
   a. **Number of clinical staff** (e.g. physicians, nurses, medical technologists) .....
   b. **Number of nonclinical staff** (e.g. executive management, administration, engineers, information technology) .....
10. **General description of the hospital:** e.g. institution to which it belongs (e.g. ministry, private entity, university), type of establishment (e.g. tertiary referral hospital, specialized services), role in the network of health services, role in emergencies and disasters, type of structure, total population served, catchment area (routine services/emergencies and disasters) etc. .....
    .....
    .....
    .....
    .....
    .....

<그림 3.10> General information about the hospital 양식

(2) Safe Hospital Checklist

이 체크리스트는 비상 사태 및 재해가 발생할 경우 병원의 안전 및 서비스 제공 능력에 대한 예비 진단을 하기 위해 사용된다. 여기에는 총 151가지의 항목이 포함되며, 그 등급은 (low/average/high)로 나눠진다. 체크리스트는 크게 4가지 모듈로 나눠진다 (Hazards affecting the safety of the hospital and the role of the hospital in emergency and disaster management/Structural safety/Nonstructural safety/Emergency and disaster management)

❍ Module 1 : Hazards affecting the safety of the hospital and the role of the hospital in emergency and disaster management

이 모듈은 병원의 안전 또는 기능에 영향을 줄 수 있는 외부 및 내부의 지질학적 특성을 설명한다.

Module 1: Hazards affecting the safety of the hospital and the role of the hospital in emergency and disaster management

1.1 Hazards	Hazard Level				Should the hospital be prepared to respond to this hazard? If yes, mark the box.	Observations (evaluator's comments)
	No hazard	Hazard level				
		LOW	AVERAGE	HIGH		
1.1.1 Geological hazards						
Earthquakes Refer to regional and local hazard maps or other hazard information, and rate the level of earthquake hazard for the hospital's location (including catchment area) in terms of geotechnical soil analyses. Determine whether the hospital should be prepared to respond to an emergency or disaster due to earthquakes (based on exposure of the catchment population or the specialized role of the hospital for the treatment of injured patients).	☐	☐	☐	☐	☐	
Volcanic activity and eruption Refer to regional and local hazard maps or other hazard information, and rate the level of volcanic hazard for the hospital's location. This should take into account proximity to volcanoes, volcanic activity, routes of lava flow, pyroclastic flow and ash fall. Determine whether the hospital should be prepared to respond to an emergency or disaster due to volcanic activity and eruption (based on exposure of the catchment population or the specialized role).	☐	☐	☐	☐	☐	
Dry mass movement – landslides Refer to regional and local hazard maps or other hazard information for the region, and rate the level of landslide hazard for the hospital's location. Note that landslides may be caused by unstable soils. Determine whether the hospital should be prepared to respond to an emergency or disaster due to landslides (based on exposure of the catchment population).	☐	☐	☐	☐	☐	
Tsunamis Refer to regional hazard maps or other hazard information, and rate the level of tsunami hazard caused by submarine seismic or volcanic activity for the hospital's location. Determine whether the hospital should be prepared to respond to an emergency or disaster due to tsunamis (based on exposure of the catchment population).	☐	☐	☐	☐	☐	
Other geological hazards (e.g. rockfalls, subsidence, debris and mudflows (specify) ..... Refer to regional and local hazard maps or other hazard information to identify other geological phenomena not listed above. Specify the hazard and rate the corresponding hazard level for the hospital. Determine whether the hospital should be prepared to respond to an emergency or disaster due to the identified geological hazards (based on exposure of the catchment population).	☐	☐	☐	☐	☐	

<그림 3.11> Safe Hospital Checklist 양식 (Module 1)

❍ Module 2 : Structural Safety

이 모듈에서는 병원이 주요 재난시 평소보다 많은 인원을 수용하였을 때에도 구조적인 안정성을 보장할 수 있는지에 대한 평가를 한다. 또한 이전에 위험에 노출되어 손상을 입은 적이 있는지, 또 어떻게 수리가 되었는지에 대해 평가한다. 평가자는 건물의 구조재의 잠재적 위험을 식별하게 된다.

Module 2: Structural Safety

2.1 Prior events affecting hospital safety	Safety level			Observations (evaluators' comments)
	Low	Average	High	
1. Prior major structural damage or failure of the hospital building(s) *Safety ratings: Low = Major damage and no repairs; Average = Moderate damage and building only partially repaired; High = Minor or no damage, or building fully repaired.* *IF SUCH AN EVENT HAS NOT OCCURRED IN THE VICINITY OF THE HOSPITAL, LEAVE BOXES BLANK AND PROVIDE COMMENT.*	☐	☐	☐	
2. Hospital built and/or repaired using current safety standards *Safety ratings: Low = Current safety standards not applied; Average = Current safety standards partially applied; High = Current safety standards fully applied.*	☐	☐	☐	
3. Effect of remodelling or modification on the structural behaviour of the hospital *Safety ratings: Low = Major remodelling or modifications have been carried out with major compromising effect on the performance of the structure; Average = Moderate remodelling and/or modifications with minor effect on the performance of the structure; High = Minor remodelling and/or modifications; no modifications were carried out; or major remodelling and/or modification enhancing the structural behaviour or having no negative effect.*	☐	☐	☐	
2.2 Building integrity	Safety level			Observations (evaluators' comments)
	Low	Average	High	
4. Structural system design *Safety ratings: Low = Poor structural system design; Average = Moderate structural system design; High = Good structural system design.*	☐	☐	☐	
5. Condition of the building *Safety ratings: Low = Cracks on the ground and first floors; Major deterioration caused by weathering or normal ageing; Average = Some deterioration caused only by weathering or normal ageing; High = No deterioration or cracks observed.*	☐	☐	☐	
6. Condition of the construction materials *Safety ratings: Low = Rust with flaking; cracks larger than 3mm (concrete), excessive deformations (steel and wood); Average = Cracks between 1 and 3 mm present (concrete), moderate and visible deformations (steel and wood) or rust with no flaking; High = Cracks less than 1 mm (concrete), no visible deformations; no rust.*	☐	☐	☐	
7. Interaction of nonstructural elements with the structure *Safety ratings: Low = Partition walls rigidly attached to the structure, suspended ceilings or facades interacting with the structures, damage would have significant effect on the structure; Average = Some of the preceding nonstructural elements interacting with the structures, damage would not affect the structure; High = There are no nonstructural elements affecting the structure.*	☐	☐	☐	
8. Proximity of buildings (for earthquake-induced pounding) *Safety ratings: Low = Separation is less than 0.5% of the height of the shorter of two adjacent buildings; Average = Separation is between 0.5% and 1.5% of the height of the shorter of two adjacent buildings; High = Separation is more than 1.5% of the height of the shorter of two adjacent buildings.* *IF THE HOSPITAL IS NOT IN A HIGH/MODERATE SEISMIC ZONE, THEN LEAVE BOXES BLANK AND PROVIDE COMMENT.*	☐	☐	☐	

<그림 3.12> Safe Hospital Checklist 양식 (Module 2)

❍ Module 3 : Nonstructural Safety

병원에는 수많은 의료기기가 있기 때문에 비구조재에 대한 평가가 중요하다. 병원의 비상 출입구, 전기/수도/화재 예방, 의료기기, 실험실 및 사무 용품등이 비구조재에 포함된다.

Module 3: Nonstructural safety

3.1. Architectural safety	Safety level			Observations (evaluators' comments)
	Low	Average	High	
19. Major damage and repair of nonstructural elements *Safety ratings: Low = Major damage and no repairs completed; Average = Moderate damage, building only partially repaired; High = Minor or no damage, or building fully repaired.* *IF SUCH AN EVENT HAS NOT OCCURRED IN THE VICINITY OF THE HOSPITAL, LEAVE BOXES BLANK AND PROVIDE COMMENT.*	☐	☐	☐	
20. Condition and safety of doors, exits and entrances *Safety ratings: Low = Doors, exits and entrances in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations; entrance width is less than 115cm; Average = In fair condition, subject to damage but damage would not impede the function of this and other elements, systems or operations; or entrance width is less than 115cm; High = In good condition, no or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations; and entrance width is equal to or larger than 115cm.*	☐	☐	☐	
21. Condition and safety of windows and shutters *Safety ratings: Low = Windows and shutters in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations (e.g. weak protective glazing); Average = In fair condition, subject to damage but damage would not impede the function of this and other elements, systems or operations; High = In good condition, no or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations; protective glass (e.g. polycarbonate glazing, blast film) has been added in critical wards.*	☐	☐	☐	
22. Condition and safety of other elements of the building envelope (e.g. outside walls, facings) *Safety ratings: Low = Building envelope in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations; Average = In fair condition, subject to damage but damage would not impede the function of this and other elements, systems or operations; High = In good condition, no or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations.*	☐	☐	☐	
23. Condition and safety of roofing *Safety ratings: Low = Roofing in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations; Average = In fair condition, subject to damage but damage to element(s) would not impede the function of this and other elements, systems or operations; High = In good condition, no or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations.*	☐	☐	☐	
24. Condition and safety of railings and parapets *Safety ratings: Low = Railings and parapets in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations; Average = Subject to damage but damage to element(s) would not impede the function of this and other elements, systems or operations; High = No or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations.*	☐	☐	☐	
25. Condition and safety of perimeter walls and fencing *Safety ratings: Low = Perimeter walls and fencing in poor condition, subject to damage which would impede the function of this and other elements, systems or operations; Average = In fair condition, subject to damage but damage to element(s) would not impede the function of this and other elements, systems or operations; High = In good condition, no or minor potential for damage that would impede the function of this and other elements, systems or operations.*	☐	☐	☐	

<그림 3.13> Safe Hospital Checklist 양식 (Module 3)

❍ Module 4 : Emergency and disaster management

이 모듈에서는 비상 사태 또는 재난에 대응하여 환자에게 서비스를 제공하기 위한 병원의 조직, 인력 및 필수 운영 준비 수준을 평가한다. 평가자는 응급 및 재해에 대한 병원의 대응, 피난 대응, 금융 및 물류에 대한 계획 및 용량에 대한 수준을 점검한다.

Module 4: Emergency and disaster management

4.1 Coordination of emergency and disaster management activities	Safety level			Observations (evaluators' comments)
	Low	Average	High	
112. Hospital Emergency/Disaster Committee Safety ratings: Low = Committee does not exist, or 1–3 departments or disciplines represented; Average = Committee exists with 4–5 departments or disciplines represented, but is not fulfilling functions effectively; High = Committee exists with 6 or more departments or disciplines represented and is fulfilling functions effectively.	☐	☐	☐	
113. Committee member responsibilities and training Safety ratings: Low = Committee does not exist or members are untrained and responsibilities not assigned; Average = Members have received training and have been officially assigned; High = All members are trained and are actively fulfilling their roles and responsibilities.	☐	☐	☐	
114. Designated emergency and disaster management coordinator Safety ratings: Low = There is no staff member who has been assigned responsibilities as the emergency/disaster management coordinator; Average = Emergency/disaster management coordination tasks have been assigned to a staff member, but it is not his/her main task; High = A staff member is assigned the emergency and disaster management coordination responsibilities as his/her main task, is fulfilling the role of implementing the hospital's preparedness programme.	☐	☐	☐	
115. Preparedness programme for strengthening emergency and disaster response and recovery Safety ratings: Low = A programme for strengthening preparedness, response and recovery does not exist or, if it exists, no preparedness activities are being implemented; Average = A programme for strengthening preparedness, response and recovery exists and some activities are being implemented; High = A programme for strengthening preparedness, response and recovery is being fully implemented under the leadership of the Hospital Emergency/Disaster Committee.	☐	☐	☐	
116. Hospital incident management system Safety ratings: Low = No arrangements for hospital incident management exist; Average = Staff assigned to key hospital incident management positions but with no written procedures to operationalize its functions; High = Hospital incident management procedures exist and are fully operational with properly trained personnel to assume different coordination roles and responsibilities.	☐	☐	☐	
117. Emergency Operations Centre (EOC) Safety ratings: Low = The EOC is not designated or is in an unsafe or insecure location; Average = The designated EOC is in a safe, secure and accessible location, but would have limited operational capacity immediately in an emergency; High = The EOC is in a safe, secure, and accessible location with immediate operational capacity.	☐	☐	☐	
118. Coordination mechanisms and cooperative arrangements with local emergency/disaster management agencies Safety ratings: Low = No arrangements exist; Average = Arrangements exist but are not fully operational; High = Arrangements exist and are fully operational.	☐	☐	☐	
119. Coordination mechanisms and cooperative arrangements with the health-care network Safety ratings: Low = No arrangements exist; Average = Arrangements exist but are not fully operational; High = Arrangements exist and are fully operational.	☐	☐	☐	

<그림 3.14> Safe Hospital Checklist 양식 (Module 4)

라. Module score를 통한 Hospital Safety Index의 계산

평가자들은 Checklist의 데이터를 Safety index Calculator에 적용시켜 각 모듈의 점수를 계산한다. Calculator는 각 항목, 섹션, 하위 모듈에 가중치를 할당하여 Hospital Safety Index 값을 반환한다. 모듈별로 반환된 값은 각각 0에서 1사이의 값을 갖고, 0~0.35 사이의 값을 가질 경우 a, 0.36~0.65의 값을 가질 경우 b, 0.66~1의 값을 가질 경우 c로 분류된다. 지역이나 국가의 안정성 지수를 포함하여, 모든 병원에 적용하고, 비교할 수 있는 공통된 Hospital Safety Index를 만들어야 한다. Hospital Checklist Module Index는 병원의 지역에 따른 가중치를 곱할 수 있다. 이 가중치는 다음과 같은 두 가지 모델이 있다.

○ Model 1 (지진 및 태풍의 위험이 높은곳)

- Module 2 : 50%
- Module 3 : 30%
- Module 4 : 20%

○ Model 2 ((가)에 속하지 않는 모든 지역)

- Module 2 : 33.33%
- Module 3 : 33.33%
- Module 4 : 33.33%

병원 전체의 Safety index 역시 위의 두가지 모델에 따라 각 모듈의 index값을 조합하여 나타내게 되며, 같은 방법으로 0~0.35 사이의 값을 가질 경우 A, 0.36~0.65의 값을 가질 경우 B, 0.66~1의 값을 가질 경우 C로 분류된다.

Table 1: General recommendations for intervention

Safety index	Classification	What should be done?
0 – 0.35	C	Urgent intervention measures are needed. The hospital is unlikely to function during and after emergencies and disasters, and the current levels of safety and emergency and disaster management are inadequate to protect the lives of patients and hospital staff during and after emergencies or disasters.
0.36 – 0.65	B	Intervention measures are needed in the short term. The hospital's current levels of safety and emergency and disaster management are such that the safety of patients and hospital staff, and the hospital's ability to function during and after emergencies and disasters, are potentially at risk.
0.66 – 1	A	It is likely that the hospital will function in emergencies and disasters. It is recommended, however, to continue measures to improve emergency and disaster management capacity and to carry out measures in the medium- and long-term to improve the safety level in case of emergencies and disasters.

<그림 3.15> Hospital Safety Index값에 따른 등급 분류

4. 소결

본 장에서는 서로 다른 중요요인을 고려한 사용자기반 내진성능지수에 대한 연구를 수행하였다. USRC, REDi, WHO/PAHO 의 3가지 내진성능지수에 대한 연구를 진행하였고 그 결과는 다음과 같다.

- ❍ USRC는 건물에 지진 및 자연재해가 발생하였을 때의 건물의 위험성을 알리기 위한 등급을 나타낸다. USRC의 등급 평가는 1~5사이의 별점을 통해 제공되며, 크게 3가지의 등급을 통해 표현된다. Safety 등급은 지진 발생 후 건물 외부로 나갔을 때, 사고로 인해 부상을 당하거나 생명을 잃을 수 있는 가능성을 고려하여 등급을 책정하며, Damage 등급은 지진 발생 후 건물을 수리하는 비용을 고려하여 등급을 책정하게 된다. 마지막으로 Recovery 등급은 건물을 사용하던 사람들이 다시 건물을 사용할 수 있을 때까지 걸리는 시간을 고려하여 책정된다.
- ❍ REDi는 지진이 발생하였을 때 단순히 건물 거주자의 생명을 보호하는 것을 목적으로 하는 것이 아닌, 건물에 손상과 손실을 최소화하고 그에 대한 평가를 한다는 점에서 현재 Code와는 상이하다. REDi는 Platinum, Gold, Silver의 3가지 등급으로 나눠지고, 이것은 다음의 3가지 카테고리에서의 평가 결과에 따라 배정된다. Building Resileience에서는 건물의 손상에 대한 평가가 주로 이루어지며, 비구조재의 손상 역시 같이 고려된다. Organizational Resilience에서는 건물이 손상을 입었을 때 회복하는 데까지 걸리는 시간을 반영하여 평가가 되며, Ambient Resilience는 건물의 외부 환경을 고려하게 된다. 건물 외부 환경을 고려하게 되는 이유는 건물이 손상을 입었을 때, 건물에 쉽게 접근이 가능해야 복구에 걸리는 시간을 최소화할 수 있기 때문이다.
- ❍ WHO/PAHO 는 재난이 일어나도 그 용도를 유지해야만 하는 병원건축물에 대한 안전성을 평가하기 위해 Hospital Safety Index를 개발하였다. Hospital Safety Index는 0~1 사이의 값을 갖게 되며, 0~0.35의 값을 가진다면 C등급, 0.36~0.65의 값을 가진다면 B등급, 0.66~1의 값을 갖는다면 A등급을 받게 된다. 또한 이 Safety Index는 3가지 모듈로 평가가 되게 되는데, Module 1은 병원의 안전 또는 기능에 영향을 줄 수 있는 외부 및 내부의 지질학적 특성을 반영하고, Module 2는 병원이 주요 재난시 평소보다 많은 인원을 포함해도 구조적인 안정성을 보장할 수 있는지에 대해 평가한다. Module 3은 비구조재(의료기기, 출입구 등)에 대한 평가를 한다. 각 모듈에서도 0~0.35의 값을 가진다면 c등급, 0.36~0.65의 값을 가진다면 b등급, 0.66~1의 값을 갖는다면 a등급을 받게 된다

3절. 건물 수리비용 업데이트 기법 개발

본 연구에서는 건축물의 지진손실인 수리비용을 분석하여, 시뮬레이션기반 손실함수를 업데이트할 수 있는 방법론을 제시하였다. 실제 지진손실데이터는 경주지진에 의한 학교건축물의 수리비용을 사용하였으며, 시뮬레이션기반 손실함수는 HAZUS를 이용하여 도출하였다. 실제 지진손실데이터가 요소레벨로 정리되어 있지 않고 전체 수리비용으로만 정리되어 있어서, 단위성과 2-6-① (요소정보 통합 지진손실평가 기법)에서 제시된 건축물 요소레벨 기반 손실함수를 사용하지 않고, HAZUS의 건축물 시스템레벨 기반 손실함수를 사용하였다. 도출된 손실함수는 베이지안 업데이팅 기법을 이용하여 업데이트 하였다.

가. 경주지진에 의한 학교건축물 수리비용

손실함수의 가로축은 지진강도, 세로축은 수리비용(repair cost)을 대체비용(replacement cost)로 나눈 값인 damage ratio(%)로 정의되기 때문에, 경주지진에 의한 학교건축물의 수리비용을 지진의 강도에 대한 damage ratio로 정리하였다. 학교건축물의 replacement cost를 산정하기 위해선 층수 및 면적에 대한 정보가 필요하므로, 경주지진에 의해 손실데이터가 확보된 건축물은 총 36건이지만, 층수 및 면적에 대한 정보가 있는 18개의 건축물에 대한 damage ratio를 도출하였다[9)10)]. 또한 학교건축물의 위치에 따른 최대지반가속도와 스펙트럴 가속도는 USGS의 데이터를 이용하여 <표 3.9>에 정리하였다.

<표 3.9> 18개 학교건축물에 대한 지진강도 및 damage ratio

No.	Location	Num. of Stories	PGA(g)	Sa(g)	Damage Ratio (%)
1	Yangsan	4	0.05	0.12	0.340
2	Yangsan	4	0.05	0.12	0.319
3	Pohang	4	0.06	0.16	1.081
4	Ulsan	4	0.08	0.21	0.102
5	Pohang	2	0.08	0.22	2.219
6	Gyeongju	4	0.09	0.23	0.201
7	Pohang	2	0.09	0.25	1.361
8	Ulsan	4	0.10	0.25	0.322
9	Gyeongju	3	0.12	0.26	4.849
10	Ulsan	2	0.12	0.29	0.783
11	Ulsan	4	0.11	0.29	0.677
12	Ulsan	3	0.11	0.29	0.578
13	Gyeongju	2	0.12	0.30	0.070
14	Ulsan	5	0.11	0.31	0.146
15	Gyeongju	4	0.14	0.34	0.580
16	Gyeongju	3	0.15	0.38	1.413
17	Gyeongju	3	0.18	0.48	0.652
18	Gyeongju	4	0.18	0.48	1.044

9) 전용일, 학교건축의 공사비 분석 및 예측에 관한 연구, 목원대학교 석사학위논문, 2004.
10) 조달청, 2014년 공공건축물 유형별 공사비 분석, 2015

나. HAZUS의 손실평가 방법론

HAZUS-MH에서 평가하는 economic loss는 건축물 손상에 의한 direct economic loss와 공사시간, 영업손실 등을 고려한 indirect economic loss로 나눈다. 본 연구에서는 지진에 의한 물리적손상과 고려된 direct economic loss만 평가를 수행하였으며, direct economic loss를 repair cost(수리비용)로 정의하였다.

Repair cost인 total cost of building damage(CBD)는 총 33개의 occupancy class에 대해 식 32을 이용하여 계산된다. 학교건축물의 occupancy class는 32번째로, 학교건축물의 지진손실을 평가하기 위해선 식 (3.6)에서 i=32일 경우를 산출하면 된다.

$$CBD = \sum_{i} CBD_i \tag{3.6}$$

Occupancy class i에 대한 total cost of building damage(CBD_i)는 구조재의 수리비용(cost of structural damage, CS_i)와 비구조재의 수리비용(cost of nonstructural damage, CNS_i)의 합으로 식 (3.7)과 같이 계산된다.

$$CBD_i = CS_i + CNS_i \tag{3.7}$$

구조재의 수리비용은 occupancy class가 i인 건축물이 특정한 damage state일 때 정의되는 구조재 수리비용($CS_{ds,i}$)의 합으로 식 (2.34)과 같이 계산된다. HAZUS-MH에서는 구조재의 damage state를 총 5단계(none, slight, moderate, extensive, complete)로 구분하한다. 수리비용이 발생되는 damage state는 none을 제외한 총 4단계이므로, damage state가 slight(ds=2)부터 complete(ds=5)까지 합하여 구조재의 수리비용을 계산한다.

$$CS_i = \sum_{ds=2}^{5} CS_{ds,i} \tag{3.8}$$

각 damage state에 대한 구조재의 수리비용, $CS_{ds,i}$은 occupancy class에 따라 정의된 building replacement cost(BRC_i), 각 damage state에 대한 구조재에 손상이 발생할 확률($POSTR_{ds,i}$), 해당 damage state에 대한 구조재의 수리비용($RCS_{ds,i}$)의 곱으로 식 (3.9)과 같이 계산된다.

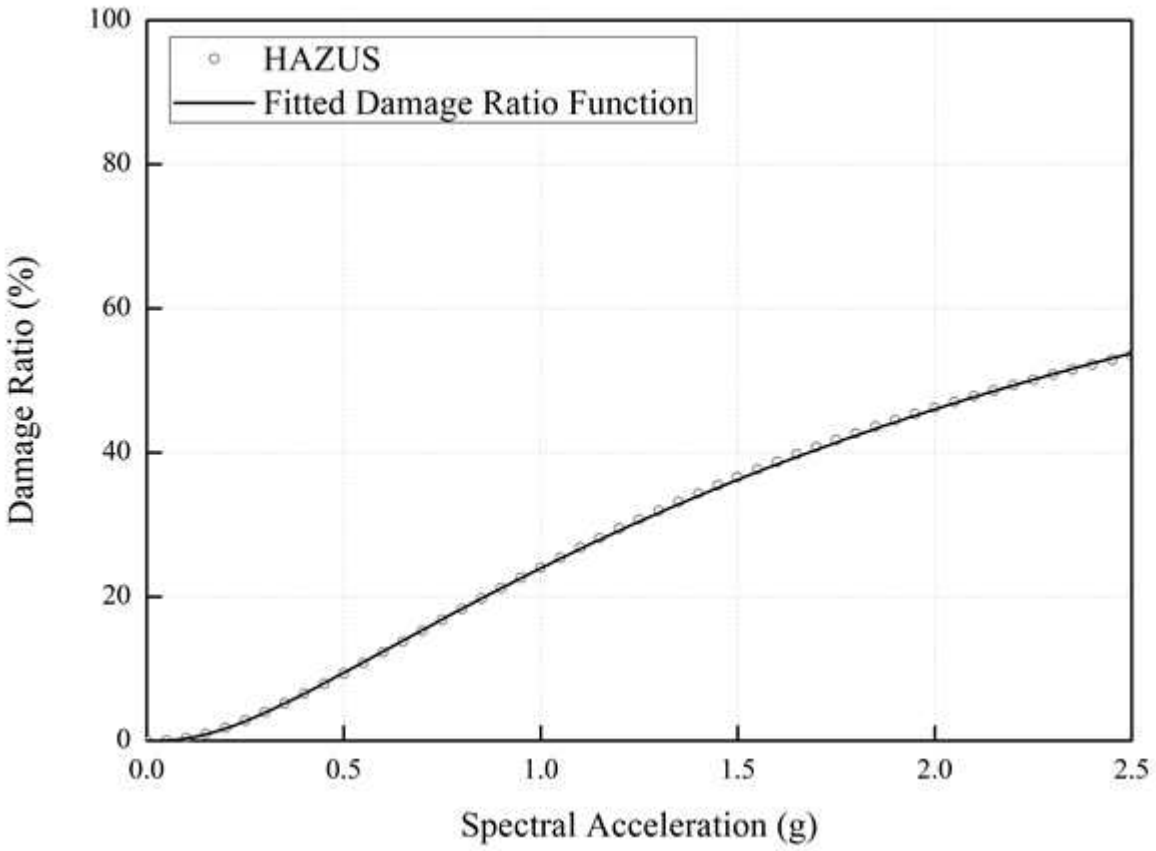
$$CS_{ds,i} = BRC_i \times POSTR_{ds,i} \times RCS_{ds,i} \tag{3.9}$$

비구조재의 경우, 크게 가속도민감 비구조재와 변위민감 비구조재로 구분하여 수리비용을 계산한다. 계산방법은 구조재에 대한 수리비용 산출방식과 비슷하게 진행한다. 각 damage state에 대한 가속도민감 비구조재의 수리비용($CNSA_i$)과 변위민감 비구조재에 대한 수리비용($CNSD_i$)는 각각 식 (3.10), 식 (3.11)을 이용하여 계산한다.

$$CNSA_i = \sum_{ds=2}^{5} CNSA_{ds,i} \tag{3.10}$$

$$CNSD_i = \sum_{ds=2}^{5} CNSD_{ds,i} \tag{3.11}$$

본 연구에서는 학교건축물의 HAZUS를 이용한 손실함수를 도출하기 위해, 내진설계가 되지 않은 조적채움벽이 있는 철근콘크리트건축물(pre-code, C3M)에 대해 손실함수를 위의 식을 이용하여 도출하였다. 도출된 손실함수는 <그림 3.16>의 점으로 표현하였으며, <그림 3.16>의 실선은 최우도법을 이용하여 HAZUS 손실함수를 flitting한 손실함수를 나타낸다.



<그림 3.16> HAZUS로 도출된 학교건축물의 손실함수

다. 손실함수의 업데이트를 위한 베이지안 방법론 및 적용

Bayesian updating method는 이용가능한 정보가 항상 제한되어 있고 주관적 판단이 필요한 공학문제에 있어서 모수(θ)를 추정하는데 사용된다. 만약 실제 관측된 데이터와 같은 추가적인 정보가 있다면, 모수는 식 (3.12)로 표현되는 Bayes's Theorem을 이용해 수정(update)될 수 있다.

$$f'(\theta)=\frac{P(\epsilon|\theta)f'(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty}P(\epsilon|\theta)f'(\theta)d\theta} \tag{3.12}$$

여기서 $f'(\theta)$는 사전확률밀도함수(prior probability density function), $f''(\theta)$는 사후확률밀도함수(posterior probability density function), $P(\varepsilon|\theta)$는 모수가 θ 일때 실제 데이터 ε가 관측될 조건부 확률이나 가능성을 나타내는 우도함수(likelihood function)이다. 일반적으로 우도함수는 $L(\theta)$로 나타낸다.

보통 실제 데이터 ε는 관측치 x1, x2, ….. xn의 조합이므로, 이 관측치가 모집단 X로부터 을 수 있는 무작위 표본이라 가정한다면 관측치는 어떠한 확률밀도함수(probability density function, PDF)인 $f_X(x)$로 나타낼 수 있다. 또한 분포의 매개변수를 θ 라고 한다면, 실제데이터에 ε가 관측될 확률인 $P(\varepsilon|\theta)$는 식 (3.13)로 정의할 수 있다.

$$P(\epsilon|\theta)=\prod_{i=1}^{n}f_X(x_i|\theta)dx \tag{3.13}$$

또한 만약 사전확률밀도함수가 $f'(\theta)$ 하면, 식 (3.13)에 따라 사후확률밀도함수는 아래의 식 (3.14)으로 정의할 수 있다.

$$f''(\theta)=\frac{\left[\prod_{i=1}^{n}f_X(x_i|\theta)dx\right]f'(\theta)d\theta}{\int_{-\infty}^{\infty}\left[\prod_{i=1}^{n}f_X(x_i|\theta)dx\right]f'(\theta)d\theta}=kL(\theta)f'(\theta) \tag{3.14}$$

여기서 k는 정규화 계수, $L(\theta)$는 우도함수로 각각 식 (3.15), 식 (3.16)로 정의된다.

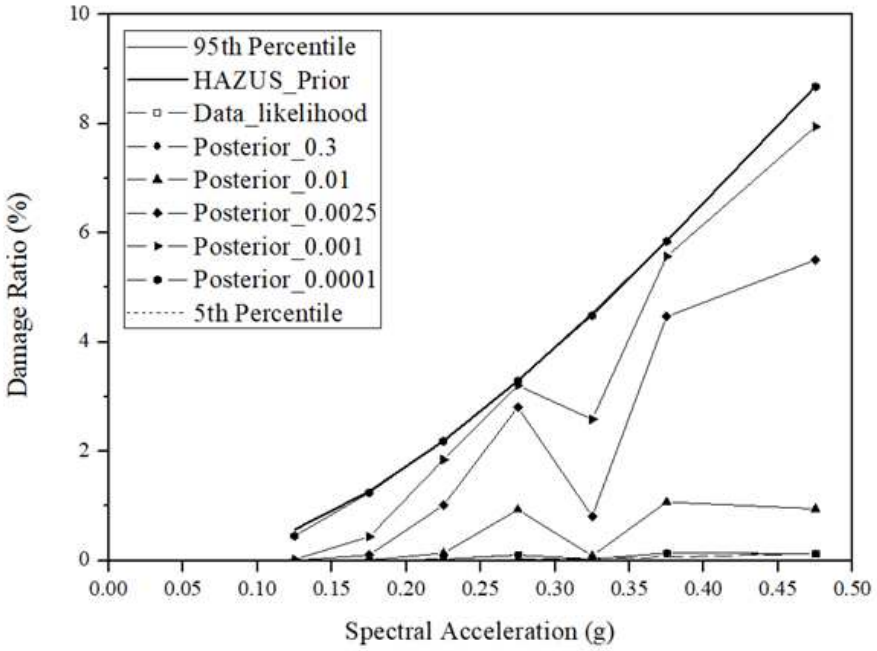
$$k=\left[\int_{-\infty}^{\infty}\prod_{i=1}^{n}f_X(x_i|\theta)f'(\theta)d\theta\right]^{-1} \tag{3.15}$$

$$L(\theta)=\prod_{i=1}^{n} f_X(x_i|\theta) \tag{3.16}$$

Bayesian updating method를 이용하여 손실함수를 업데이트하기 위해서는 학교건축물의 지진강도에 따른 damage ratio의 분포를 통계적으로 추정하여야 한다. USGS에서 경주진에 의한 지진강도를 알 수 있는 총 건축물의 개수는 5034개이지만, 이 중 스펙트럴가속도가 0.10g미만인 학교건축물 4080개는 피해가 거의 없다고 판단할 수 있으므로 제외하였다. 스펙트럴가속도가 0.1g이상인 학교건축물 총 954개와 손실데이터가 있는 학교건축물 18개를 이용하여, 지진의 강도를 0.1g간격으로 나누어 정규분포를 이용한 damage ratio의 중앙값(median), 표준편차(sigma), 공분산(Cov)을 <표 2.30>에 정리하였다.

<표 3.10> 학교건축물의 지진강도에 따른 damage ratio의 정규분포 계수

Sa (g)	Median loss (%)	Sigma	COV
0.1	0.317	0.00002	0.00702
0.2	1.651	0.00033	0.01998
0.3	3.738	0.00093	0.02477
0.4	6.256	0.00169	0.02699
0.5	8.995	0.00253	0.02808



<그림 3.17> 베이지안 업데이팅 방법이 적용된 손실함수

<그림 3.17>은 베이지안 업데이팅을 적용된 손실함수(posterior function)을 나타낸 것이다. 해당그림에서 posterior 뒤의 숫자의 의미는 prior function인 HAZUS손실함수의 불확실성(표준편차)을 의미하며, HAZUS손실함수의 불확실성이 실제 데이터의 불확실성보다 충분히 낮다면, HAZUS의 손실함수와 유사하게 손실함수가 업데이트 되는 것을 알 수 있다.

4절. 결론

지진 피해규모를 고려한 사용자기반 내진성능지수 개발을 수행한 연구결과는 다음과 같다.

- 국내에서는 지진에 의한 구조재 및 비구조재의 손상에 따른 손실을 평가하는 연구는 수행되지 않았다. 건축물 내진성능평가 진행시, 단순히 피해규모를 예측하여 내진성능에 반영하는 것이 아닌, 실제 내진성능평가의 결과를 사용하는 정부, 보험회사, 엔지니어의 사용자에 따라 내진성능평가의 중요요소를 반영하여 결과에 포함시킬 수 있는 사용자 중심의 내진성능평가 기법에 대한 연구가 필요하다

- 요소정보 분류체계에 따른 지진취약도에 대해 구조재 1058건, 비구조재 985건에 대한 DB구축과 실제 경주지진 피해사례 조사를 통한 손실에 대해 총 71건의 DB를 구축하였다. 본 연구에서는 건축물의 지역단위의 지진손실을 평가하는 것이 목적이 아닌 건축물 각각의 지진손실을 평가하는 것이 최종 목적이므로, FEMA P-58에서 사용하는 요소정보 분류체계를 사용하여 발전시키는 방향이 더 적합하다고 판단된다. 또한 건축물 레벨에서의 분류체계에 따른 구조요소의 지진손상을 대표하는 지진취약도를, 본 연구에서 제시하는 방식과 비교하여 분석하는데 사용될 수 있으므로, 두 방식 모두 구성하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

- 주요시설물 중 내진설계가 되지 않은 80년대 “학교교사 표준 설계도”에 구조물을 대상으로 경주지진에 대한 HAZUS와 FEMA P58을 적용한 지진손실평가를 수행하였다. FEMA P58의 경우, 실제 지진손실액보다 약 2.38배 높게 학교건축물의 지진손실을 평가하였고, HAZUS의 경우, 실제 지진손실액보다 약 4.1배 높게 지진손실을 평가하였다. 추후 연구를 통해 여러케이스에 대한 지진손실평가과정을 이용하여 Bayesian update기법을 적용한 지진손실통가의 업데이트 과정이 필요하다고 사료된다.

- 또한, 건축물의 내진성능지수를 사용자에 따라, 안전(safety), 수리비용(repair cost), 복구기간(downtime) 등으로 구분하여 평가하는 USRC나 REDi rating system이 후보군이 될 수 있다. 본 연구에서는 건축물의 지진취약도부터 지진손실까지 도출하여 지진손실기반 내진성능지수를 평가하는 프레임웍을 제시하였고, 학교건축물을 대상으로 수리비용을 대체비용으로 나눈 손상률(damage ratio)을 통해 내진성능을 평가하였다.

2018 국토교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종보고서【부록 1】

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

요소정보 지진취약도 데이터베이스

2019. 02. 07.

▪ 주관연구기관 / 연세대학교
▪ 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
▪ 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

부록 1. 요소정보 지진취약도 데이터베이스

[HAZUS]

❍ Structural Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.80	3.84	0.81	12.80	0.85	32.00	0.97
W2	732	549	2.18	0.81	6.58	0.88	21.95	0.90	54.86	0.83
S1L	732	549	3.30	0.80	6.58	0.76	16.46	0.69	43.89	0.72
S1M	1829	1372	5.49	0.65	10.97	0.66	27.43	0.67	73.15	0.74
S1H	4755	2852	8.56	0.64	17.12	0.64	42.80	0.65	114.12	0.67
S2L	732	549	2.74	0.81	5.49	0.89	16.46	0.94	43.89	0.83
S2M	1829	1372	4.57	0.67	9.14	0.67	27.43	0.68	73.15	0.79
S2H	4755	2852	7.14	0.63	14.27	0.63	42.80	0.64	114.12	0.71
S3	457	343	1.37	0.81	2.74	0.82	8.23	0.91	24.00	0.90
S4L	732	549	2.18	0.89	4.39	0.89	13.16	0.98	38.40	0.87
S4M	1829	1372	3.66	0.77	7.32	0.72	21.95	0.70	64.01	0.89
S4H	4755	2852	5.72	0.64	11.40	0.66	34.24	0.69	99.85	0.77
C1L	610	457	2.29	0.81	4.57	0.84	13.72	0.86	36.58	0.81
C1M	1524	1143	3.81	0.68	7.62	0.67	22.86	0.68	60.96	0.81
C1H	3658	2195	5.49	0.66	10.97	0.64	32.92	0.67	87.78	0.78
C2L	610	457	1.83	0.81	4.57	0.84	13.72	0.93	36.58	0.92
C2M	1524	1143	3.05	0.74	7.62	0.77	22.86	0.68	60.96	0.77
C2H	3658	2195	4.39	0.68	10.97	0.65	32.92	0.66	87.78	0.75
PC1	457	343	1.37	0.76	2.74	0.86	8.23	0.88	24.00	0.99
PC2L	610	457	1.83	0.84	3.66	0.88	10.97	0.98	32.00	0.94
PC2M	1524	1143	3.05	0.77	6.10	0.81	18.29	0.70	53.34	0.82
PC2H	3658	2195	4.39	0.64	8.79	0.66	26.34	0.68	76.81	0.81
RM1L	610	457	1.83	0.84	3.66	0.86	10.97	0.92	32.00	1.01
RM1M	1524	1143	3.05	0.71	6.10	0.81	18.29	0.76	53.34	0.75
RM2L	610	457	1.83	0.80	3.66	0.81	10.97	0.91	32.00	0.98
RM2M	1524	1143	3.05	0.71	6.10	0.79	18.29	0.70	53.34	0.73
RM2H	3658	2195	4.39	0.66	8.79	0.65	26.34	0.66	76.81	0.72
MH	305	305	1.22	0.91	2.44	1.00	7.32	1.03	21.34	0.92

❍ Structural Fragility Curve Parameters - Moderate-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.84	3.18	0.86	9.80	0.89	24.00	1.04
W2	732	549	2.18	0.89	5.44	0.95	16.81	0.95	41.15	0.92
S1L	732	549	3.30	0.80	5.69	0.75	12.90	0.74	32.92	0.88
S1M	1829	1372	5.49	0.65	9.50	0.68	21.49	0.69	54.86	0.87
S1H	4755	2852	8.56	0.64	14.81	0.64	33.55	0.71	85.60	0.83
S2L	732	549	2.74	0.93	4.75	0.92	12.80	0.93	32.00	0.93
S2M	1829	1372	4.57	0.70	7.92	0.69	21.34	0.69	85.60	0.89
S2H	4755	2852	7.14	0.66	12.37	0.64	33.27	0.69	18.01	0.80
S3	457	343	1.37	0.88	2.39	0.92	6.40	0.97	28.80	0.89
S4L	732	549	2.18	0.96	3.81	1.00	10.26	1.03	48.01	0.92
S4M	1829	1372	3.66	0.75	6.35	0.72	17.09	0.72	74.88	0.94
S4H	4755	2852	5.72	0.66	9.91	0.67	26.67	0.70	27.43	0.90
C1L	610	457	2.29	0.89	3.96	0.90	10.67	0.90	45.72	0.89
C1M	1524	1143	3.81	0.70	6.60	0.70	17.78	0.70	65.84	0.89
C1H	3658	2195	5.49	0.66	9.50	0.66	25.60	0.76	27.43	0.91
C2L	610	457	1.83	0.91	3.86	0.97	10.59	1.03	45.72	0.87
C2M	1524	1143	3.05	0.81	6.43	0.77	17.65	0.73	65.84	0.91
C2H	3658	2195	4.39	0.66	9.25	0.68	25.40	0.70	18.01	0.87
PC1	457	343	1.37	0.89	2.39	0.92	6.40	0.97	24.00	1.04
PC2L	610	457	1.83	0.96	3.18	1.00	8.56	1.03	40.01	0.88
PC2M	1524	1143	3.05	0.82	5.28	0.79	14.25	0.75	57.61	0.93
PC2H	3658	2195	4.39	0.68	7.62	0.69	20.52	0.77	24.00	0.89
RM1L	610	457	1.83	0.96	3.18	0.99	8.56	1.05	40.01	0.94
RM1M	1524	1143	3.05	0.81	5.28	0.82	14.25	0.80	57.61	0.89
RM2L	610	457	1.83	0.91	3.18	0.96	8.56	1.02	24.00	0.93
RM2M	1524	1143	3.05	0.81	5.28	0.80	14.25	0.75	40.01	0.88
RM2H	3658	2195	4.39	0.67	7.62	0.69	20.52	0.70	57.61	0.86
MH	305	305	1.22	0.91	2.44	1.00	7.32	1.03	21.34	0.92

○ Structural Fragility Curve Parameters - Low-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.93	3.18	0.98	9.80	1.02	24.00	0.99
W2	732	549	2.18	0.97	5.44	0.90	16.81	0.89	41.15	0.99
S1L	732	549	3.30	0.77	5.26	0.78	11.13	0.78	27.43	0.96
S1M	1829	1372	5.49	0.68	8.74	0.78	18.54	0.85	45.72	0.98
S1H	4755	2852	8.56	0.66	13.64	0.70	28.91	0.76	71.32	0.92
S2L	732	549	2.74	0.96	4.39	0.89	10.97	0.86	27.43	0.98
S2M	1829	1372	4.57	0.70	7.32	0.73	18.29	0.85	45.72	0.98
S2H	4755	2852	7.14	0.66	11.40	0.67	28.52	0.74	71.32	0.92
S3	457	343	1.37	0.98	2.21	0.99	5.51	1.01	15.01	0.90
S4L	732	549	2.18	1.05	3.51	0.98	8.81	0.89	24.00	0.98
S4M	1829	1372	3.66	0.76	5.87	0.78	14.68	0.90	40.01	0.99
S4H	4755	2852	5.72	0.70	9.14	0.75	22.89	0.90	62.41	0.98
S5L	732	549	1.65	1.11	3.30	1.04	8.23	0.99	19.20	0.95
S5M	1829	1372	2.74	0.77	5.49	0.79	13.72	0.87	32.00	0.98
S5H	4755	2852	4.27	0.70	8.56	0.73	21.39	0.89	49.94	0.97
C1L	610	457	2.29	0.95	3.66	0.91	9.14	0.85	22.86	0.97
C1M	1524	1143	3.81	0.70	6.10	0.74	15.24	0.86	38.10	0.98
C1H	3658	2195	5.49	0.70	8.79	0.81	21.95	0.89	54.86	0.98
C2L	610	457	1.83	1.04	3.48	1.02	9.02	0.99	22.86	0.95
C2M	1524	1143	3.05	0.82	5.82	0.81	15.04	0.81	38.10	0.99
C2H	3658	2195	4.39	0.68	8.38	0.73	21.67	0.84	54.86	0.95
C3L	610	457	1.37	1.09	2.74	1.07	6.86	1.08	16.00	0.91
C3M	1524	1143	2.29	0.85	4.57	0.83	11.43	0.76	26.67	0.98
C3H	3658	2195	3.30	0.71	6.58	0.74	16.46	0.90	38.40	0.97
PC1	457	343	1.37	1.00	2.21	1.05	5.51	1.12	15.01	0.89
PC2L	610	457	1.83	1.08	2.92	1.03	7.34	0.98	20.02	0.96
PC2M	1524	1143	3.05	0.81	4.88	0.79	12.22	0.84	33.32	0.99
PC2H	3658	2195	4.39	0.71	7.04	0.75	17.60	0.89	48.01	0.98

○ Structural Fragility Curve Parameters - Pre-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.02	1.01	2.54	1.05	7.85	1.07	19.20	1.06
W2	732	549	1.75	1.04	4.34	0.97	13.44	0.90	32.92	0.99
S1L	732	549	2.64	0.85	4.19	0.82	8.89	0.80	21.95	0.95
S1M	1829	1372	4.39	0.70	7.01	0.75	14.83	0.81	36.58	0.98
S1H	4755	2852	6.86	0.69	10.92	0.71	23.14	0.85	57.05	0.93
S2L	732	549	2.18	1.01	3.51	0.96	8.79	0.88	21.95	0.98
S2M	1829	1372	3.66	0.73	5.84	0.75	14.63	0.80	36.58	0.98
S2H	4755	2852	5.72	0.70	9.12	0.70	22.83	0.84	57.05	0.91
S3	457	343	1.09	1.06	1.75	1.03	4.39	1.07	12.01	0.89
S4L	732	549	1.75	1.11	2.82	1.03	7.04	0.99	19.20	0.98
S4M	1829	1372	2.92	0.81	4.70	0.80	11.73	0.94	32.00	1.00
S4H	4755	2852	4.57	0.73	7.32	0.75	18.31	0.90	49.94	0.97
C1L	610	457	1.32	1.20	2.64	1.11	6.58	1.08	15.37	0.95
C1M	1524	1143	2.18	0.85	4.39	0.83	10.97	0.94	25.60	0.99
C1H	3658	2195	3.43	0.72	6.86	0.75	17.12	0.92	39.93	0.96
C2L	610	457	1.83	0.98	2.92	0.94	7.32	0.90	18.29	0.97
C2M	1524	1143	3.05	0.73	4.88	0.77	12.19	0.83	30.48	0.98
C2H	3658	2195	4.39	0.71	7.01	0.80	17.55	0.94	43.89	1.01
PC1	457	343	1.47	1.11	2.79	1.09	7.21	1.07	18.29	0.93
PC2L	610	457	2.44	0.86	4.65	0.83	12.04	0.80	30.48	0.98
PC2M	1524	1143	3.51	0.73	6.71	0.75	17.32	0.92	43.89	0.97
PC2H	3658	2195	1.09	1.19	2.18	1.15	5.49	1.15	12.80	0.92
RM1L	610	457	1.83	0.90	3.66	0.86	9.14	0.90	21.34	0.96
RM1M	1524	1143	2.64	0.73	5.26	0.75	13.16	0.90	30.73	0.95
RM2L	610	457	1.09	1.14	1.75	1.14	4.39	1.17	12.01	0.98
RM2M	1524	1143	1.47	1.14	2.34	1.10	5.87	1.10	16.00	0.93
RM2H	3658	2195	2.44	0.87	3.91	0.83	9.78	0.91	26.67	1.00
MH	305	305	3.51	0.74	5.61	0.75	14.10	0.91	38.40	0.96

○ Equivalent-PGA Structural Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Equivalent-PGA (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.26	0.64	0.55	0.64	1.28	0.64	2.01	0.64
W2	288	216	0.26	0.64	0.56	0.64	1.15	0.64	2.08	0.64
S1L	288	216	0.19	0.64	0.31	0.64	0.64	0.64	1.49	0.64
S1M	720	540	0.14	0.64	0.26	0.64	0.62	0.64	1.43	0.64
S1H	1872	1123	0.1	0.64	0.21	0.64	0.52	0.64	1.31	0.64
S2L	288	216	0.24	0.64	0.41	0.64	0.76	0.64	1.46	0.64
S2M	720	540	0.14	0.64	0.27	0.64	0.73	0.64	1.62	0.64
S2H	1872	1123	0.11	0.64	0.22	0.64	0.65	0.64	1.6	0.64
S3	180	135	0.15	0.64	0.26	0.64	0.54	0.64	1	0.64
S4L	288	216	0.24	0.64	0.39	0.64	0.71	0.64	1.33	0.64
S4M	720	540	0.16	0.64	0.28	0.64	0.73	0.64	1.56	0.64
S4H	1872	1123	0.13	0.64	0.25	0.64	0.69	0.64	1.63	0.64
C1L	240	180	0.21	0.64	0.35	0.64	0.7	0.64	1.37	0.64
C1M	600	450	0.15	0.64	0.27	0.64	0.73	0.64	1.61	0.64
C1H	1440	864	0.11	0.64	0.22	0.64	0.62	0.64	1.35	0.64
C2L	240	180	0.24	0.64	0.45	0.64	0.9	0.64	1.55	0.64
C2M	600	450	0.17	0.64	0.36	0.64	0.87	0.64	1.95	0.64
C2H	1440	864	0.12	0.64	0.29	0.64	0.82	0.64	1.87	0.64
PC1	180	135	0.2	0.64	0.35	0.64	0.72	0.64	1.25	0.64
PC2L	240	180	0.24	0.64	0.36	0.64	0.69	0.64	1.23	0.64
PC2M	600	450	0.17	0.64	0.29	0.64	0.67	0.64	1.51	0.64
PC2H	1440	864	0.12	0.64	0.23	0.64	0.63	0.64	1.49	0.64
RM1L	240	180	0.3	0.64	0.46	0.64	0.93	0.64	1.57	0.64
RM1M	600	450	0.2	0.64	0.37	0.64	0.81	0.64	1.9	0.64
RM2L	240	180	0.26	0.64	0.42	0.64	0.87	0.64	1.49	0.64
RM2M	600	450	0.17	0.64	0.33	0.64	0.75	0.64	1.83	0.64
RM2H	1440	864	0.12	0.64	0.24	0.64	0.67	0.64	1.78	0.64
MH	120	120	0.11	0.64	0.18	0.64	0.31	0.64	0.6	0.64

○ Equivalent-PGA Structural Fragility Curve Parameters - Moderate-Code Seismic Design Level

Building Properties			Equivalent-PGA (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.24	0.64	0.43	0.64	0.91	0.64	1.34	0.64
W2	288	216	0.2	0.64	0.35	0.64	0.64	0.64	1.13	0.64
S1L	288	216	0.15	0.64	0.22	0.64	0.42	0.64	0.8	0.64
S1M	720	540	0.13	0.64	0.21	0.64	0.44	0.64	0.82	0.64
S1H	1872	1123	0.1	0.64	0.18	0.64	0.39	0.64	0.78	0.64
S2L	288	216	0.2	0.64	0.26	0.64	0.46	0.64	0.84	0.64
S2M	720	540	0.14	0.64	0.22	0.64	0.53	0.64	0.97	0.64
S2H	1872	1123	0.11	0.64	0.19	0.64	0.49	0.64	1.02	0.64
S3	180	135	0.13	0.64	0.19	0.64	0.33	0.64	0.6	0.64
S4L	288	216	0.19	0.64	0.26	0.64	0.41	0.64	0.78	0.64
S4M	720	540	0.14	0.64	0.22	0.64	0.51	0.64	0.92	0.64
S4H	1872	1123	0.12	0.64	0.21	0.64	0.51	0.64	0.97	0.64
C1L	240	180	0.16	0.64	0.23	0.64	0.41	0.64	0.77	0.64
C1M	600	450	0.13	0.64	0.21	0.64	0.49	0.64	0.89	0.64
C1H	1440	864	0.11	0.64	0.18	0.64	0.41	0.64	0.74	0.64
C2L	240	180	0.18	0.64	0.3	0.64	0.49	0.64	0.87	0.64
C2M	600	450	0.15	0.64	0.26	0.64	0.55	0.64	1.02	0.64
C2H	1440	864	0.12	0.64	0.23	0.64	0.57	0.64	1.07	0.64
PC1	180	135	0.18	0.64	0.24	0.64	0.44	0.64	0.71	0.64
PC2L	240	180	0.18	0.64	0.25	0.64	0.4	0.64	0.74	0.64
PC2M	600	450	0.15	0.64	0.21	0.64	0.45	0.64	0.86	0.64
PC2H	1440	864	0.12	0.64	0.19	0.64	0.46	0.64	0.9	0.64
RM1L	240	180	0.22	0.64	0.3	0.64	0.5	0.64	0.85	0.64
RM1M	600	450	0.18	0.64	0.26	0.64	0.51	0.64	1.03	0.64
RM2L	240	180	0.2	0.64	0.28	0.64	0.47	0.64	0.81	0.64
RM2M	600	450	0.16	0.64	0.23	0.64	0.48	0.64	0.99	0.64
RM2H	1440	864	0.12	0.64	0.2	0.64	0.48	0.64	1.01	0.64
MH	120	120	0.11	0.64	0.18	0.64	0.31	0.64	0.6	0.64

○ Equivalent-PGA Structural Fragility Curve Parameters - Low-Code Seismic Design Level

Building Properties			Equivalent-PGA (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.2	0.64	0.34	0.64	0.61	0.64	0.95	0.64
W2	288	216	0.14	0.64	0.23	0.64	0.48	0.64	0.75	0.64
S1L	288	216	0.12	0.64	0.17	0.64	0.3	0.64	0.48	0.64
S1M	720	540	0.12	0.64	0.18	0.64	0.29	0.64	0.49	0.64
S1H	1872	1123	0.1	0.64	0.15	0.64	0.28	0.64	0.48	0.64
S2L	288	216	0.13	0.64	0.17	0.64	0.3	0.64	0.5	0.64
S2M	720	540	0.12	0.64	0.18	0.64	0.35	0.64	0.58	0.64
S2H	1872	1123	0.11	0.64	0.17	0.64	0.36	0.64	0.63	0.64
S3	180	135	0.1	0.64	0.13	0.64	0.2	0.64	0.38	0.64
S4L	288	216	0.13	0.64	0.16	0.64	0.26	0.64	0.46	0.64
S4M	720	540	0.12	0.64	0.17	0.64	0.31	0.64	0.54	0.64
S4H	1872	1123	0.12	0.64	0.17	0.64	0.33	0.64	0.59	0.64
C1L	240	180	0.13	0.64	0.17	0.64	0.28	0.64	0.45	0.64
C1M	600	450	0.11	0.64	0.18	0.64	0.34	0.64	0.53	0.64
C1H	1440	864	0.1	0.64	0.18	0.64	0.35	0.64	0.58	0.64
C2L	240	180	0.12	0.64	0.15	0.64	0.27	0.64	0.45	0.64
C2M	600	450	0.12	0.64	0.17	0.64	0.32	0.64	0.54	0.64
C2H	1440	864	0.1	0.64	0.15	0.64	0.27	0.64	0.44	0.64
PC1	180	135	0.14	0.64	0.19	0.64	0.3	0.64	0.52	0.64
PC2L	240	180	0.12	0.64	0.19	0.64	0.38	0.64	0.63	0.64
PC2M	600	450	0.11	0.64	0.19	0.64	0.38	0.64	0.65	0.64
PC2H	1440	864	0.12	0.64	0.17	0.64	0.26	0.64	0.44	0.64
RM1L	240	180	0.11	0.64	0.17	0.64	0.32	0.64	0.51	0.64
RM1M	600	450	0.09	0.64	0.16	0.64	0.33	0.64	0.53	0.64
RM2L	240	180	0.13	0.64	0.17	0.64	0.25	0.64	0.45	0.64
RM2M	600	450	0.13	0.64	0.15	0.64	0.24	0.64	0.44	0.64
RM2H	1440	864	0.11	0.64	0.16	0.64	0.31	0.64	0.52	0.64
MH	120	120	0.11	0.64	0.16	0.64	0.31	0.64	0.55	0.64

○ Equivalent-PGA Structural Fragility Curve Parameters - Pre-Code Seismic Design Level

Building Properties			Equivalent-PGA (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.18	0.64	0.29	0.64	0.51	0.64	0.77	0.64
W2	288	216	0.12	0.64	0.19	0.64	0.37	0.64	0.6	0.64
S1L	288	216	0.09	0.64	0.13	0.64	0.22	0.64	0.38	0.64
S1M	720	540	0.09	0.64	0.14	0.64	0.23	0.64	0.39	0.64
S1H	1872	1123	0.08	0.64	0.12	0.64	0.22	0.64	0.38	0.64
S2L	288	216	0.11	0.64	0.14	0.64	0.23	0.64	0.39	0.64
S2M	720	540	0.1	0.64	0.14	0.64	0.28	0.64	0.47	0.64
S2H	1872	1123	0.09	0.64	0.13	0.64	0.29	0.64	0.5	0.64
S3	180	135	0.08	0.64	0.1	0.64	0.16	0.64	0.3	0.64
S4L	288	216	0.1	0.64	0.13	0.64	0.2	0.64	0.36	0.64
S4M	720	540	0.09	0.64	0.13	0.64	0.25	0.64	0.43	0.64
S4H	1872	1123	0.09	0.64	0.14	0.64	0.27	0.64	0.47	0.64
C1L	240	180	0.11	0.64	0.14	0.64	0.22	0.64	0.37	0.64
C1M	600	450	0.09	0.64	0.14	0.64	0.28	0.64	0.43	0.64
C1H	1440	864	0.08	0.64	0.14	0.64	0.29	0.64	0.46	0.64
C2L	240	180	0.1	0.64	0.12	0.64	0.21	0.64	0.36	0.64
C2M	600	450	0.09	0.64	0.13	0.64	0.26	0.64	0.43	0.64
C2H	1440	864	0.08	0.64	0.12	0.64	0.21	0.64	0.35	0.64
PC1	180	135	0.11	0.64	0.15	0.64	0.24	0.64	0.42	0.64
PC2L	240	180	0.1	0.64	0.15	0.64	0.3	0.64	0.5	0.64
PC2M	600	450	0.09	0.64	0.15	0.64	0.31	0.64	0.52	0.64
PC2H	1440	864	0.1	0.64	0.14	0.64	0.21	0.64	0.35	0.64
RM1L	240	180	0.09	0.64	0.14	0.64	0.25	0.64	0.41	0.64
RM1M	600	450	0.08	0.64	0.13	0.64	0.27	0.64	0.43	0.64
RM2L	240	180	0.11	0.64	0.14	0.64	0.21	0.64	0.35	0.64
RM2M	600	450	0.1	0.64	0.13	0.64	0.19	0.64	0.35	0.64
RM2H	1440	864	0.09	0.64	0.13	0.64	0.24	0.64	0.42	0.64
MH	120	120	0.09	0.64	0.13	0.64	0.25	0.64	0.43	0.64

○ Nonstructural Drift-Sensitive Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.85	2.57	0.88	8.00	0.88	16.00	0.94
W2	732	549	2.18	0.87	4.39	0.89	13.72	0.96	27.43	0.94
S1L	732	549	2.18	0.81	4.39	0.85	13.72	0.77	27.43	0.77
S1M	1829	1372	5.49	0.71	10.97	0.72	34.29	0.72	68.58	0.80
S1H	4755	2852	11.40	0.72	22.83	0.71	71.32	0.74	142.65	0.77
S2L	732	549	2.18	0.84	4.39	0.90	13.72	0.97	27.43	0.92
S2M	1829	1372	5.49	0.71	10.97	0.74	34.29	0.74	68.58	0.84
S2H	4755	2852	11.40	0.71	22.83	0.71	71.32	0.72	142.65	0.78
S3	457	343	1.37	0.86	2.74	0.88	8.59	0.98	17.15	0.98
S4L	732	549	2.18	0.93	4.39	0.94	13.72	1.01	27.43	0.99
S4M	1829	1372	5.49	0.80	10.97	0.76	34.29	0.76	68.58	0.93
S4H	4755	2852	11.40	0.72	22.83	0.72	71.32	0.79	142.65	0.91
C1L	610	457	1.83	0.84	3.66	0.88	11.43	0.90	22.86	0.88
C1M	1524	1143	4.57	0.72	9.14	0.73	28.58	0.74	57.15	0.84
C1H	3658	2195	8.79	0.71	17.55	0.71	54.86	0.78	109.73	0.88
C2L	610	457	1.83	0.87	3.66	0.88	11.43	0.97	22.86	0.99
C2M	1524	1143	4.57	0.84	9.14	0.82	28.58	0.74	57.15	0.81
C2H	3658	2195	8.79	0.71	17.55	0.72	54.86	0.74	109.73	0.85
PC1	457	343	1.37	0.82	2.74	0.91	8.59	0.95	17.15	1.03
PC2L	610	457	1.83	0.89	3.66	0.93	11.43	1.03	22.86	1.04
PC2M	1524	1143	4.57	0.87	9.14	0.83	28.58	0.77	57.15	0.89
PC2H	3658	2195	8.79	0.73	17.55	0.73	54.86	0.77	109.73	0.89
RM1L	610	457	1.83	0.89	3.66	0.91	11.43	0.97	22.86	1.06
RM1M	1524	1143	4.57	0.81	9.14	0.86	28.58	0.80	57.15	0.81
RM2L	610	457	1.83	0.85	3.66	0.87	11.43	0.95	22.86	1.03
RM2M	1524	1143	4.57	0.82	9.14	0.84	28.58	0.76	57.15	0.80
RM2H	3658	2195	8.79	0.71	17.55	0.73	54.86	0.73	109.73	0.85
MH	305	305	1.22	0.96	2.44	1.05	7.62	1.07	15.24	0.93

❍ Nonstructural Drift-Sensitive Fragility Curve Parameters - Moderate-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.89	2.57	0.91	8.00	0.90	16.00	1.04
W2	732	549	2.18	0.94	4.39	0.99	13.72	1.00	27.43	0.90
S1L	732	549	2.18	0.84	4.39	0.83	13.72	0.79	27.43	0.87
S1M	1829	1372	5.49	0.71	10.97	0.74	34.29	0.85	68.58	0.95
S1H	4755	2852	11.40	0.71	22.83	0.74	71.32	0.84	142.65	0.95
S2L	732	549	2.18	0.93	4.39	0.99	13.72	0.96	27.43	0.92
S2M	1829	1372	5.49	0.74	10.97	0.74	34.29	0.85	68.58	0.96
S2H	4755	2852	11.40	0.72	22.83	0.73	71.32	0.80	142.65	0.94
S3	457	343	1.37	0.93	2.74	0.98	8.59	1.01	17.15	0.94
S4L	732	549	2.18	1.00	4.39	1.06	13.72	0.99	27.43	0.96
S4M	1829	1372	5.49	0.77	10.97	0.80	34.29	0.95	68.58	1.04
S4H	4755	2852	11.40	0.73	22.83	0.82	71.32	0.93	142.65	1.01
C1L	610	457	1.83	0.93	3.66	0.96	11.43	0.94	22.86	0.88
C1M	1524	1143	4.57	0.77	9.14	0.76	28.58	0.87	57.15	0.98
C1H	3658	2195	8.79	0.74	17.55	0.80	54.86	0.94	109.73	1.03
C2L	610	457	1.83	0.96	3.66	1.00	11.43	1.06	22.86	0.95
C2M	1524	1143	4.57	0.84	9.14	0.81	28.58	0.83	57.15	0.98
C2H	3658	2195	8.79	0.73	17.55	0.76	54.86	0.89	109.73	0.99
PC1	457	343	1.37	0.94	2.74	0.99	8.59	1.05	17.15	1.08
PC2L	610	457	1.83	1.00	3.66	1.06	11.43	1.07	22.86	0.93
PC2M	1524	1143	4.57	0.85	9.14	0.83	28.58	0.92	57.15	1.00
PC2H	3658	2195	8.79	0.74	17.55	0.79	54.86	0.93	109.73	1.02
RM1L	610	457	1.83	1.00	3.66	1.06	11.43	1.12	22.86	1.01
RM1M	1524	1143	4.57	0.88	9.14	0.85	28.58	0.84	57.15	0.98
RM2L	610	457	1.83	0.96	3.66	1.02	11.43	1.10	22.86	0.99
RM2M	1524	1143	4.57	0.88	9.14	0.83	28.58	0.81	57.15	0.98
RM2H	3658	2195	8.79	0.73	17.55	0.76	54.86	0.88	109.73	0.99
MH	305	305	1.22	0.96	2.44	1.05	7.62	1.07	15.24	0.93

○ Nonstructural Drift-Sensitive Fragility Curve Parameters – Low-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	0.98	2.57	0.99	8.00	1.02	16.00	1.09
W2	732	549	2.18	1.01	4.39	0.97	13.72	0.93	27.43	1.03
S1L	732	549	2.18	0.86	4.39	0.84	13.72	0.88	27.43	1.00
S1M	1829	1372	5.49	0.74	10.97	0.89	34.29	0.99	68.58	1.05
S1H	4755	2852	11.40	0.75	22.83	0.87	71.32	0.97	142.65	1.04
S2L	732	549	2.18	1.01	4.39	0.94	13.72	0.94	27.43	1.03
S2M	1829	1372	5.49	0.77	10.97	0.87	34.29	0.99	68.58	1.05
S2H	4755	2852	11.40	0.74	22.83	0.86	71.32	0.97	142.65	1.05
S3	457	343	1.37	1.03	2.74	1.02	8.59	0.96	17.15	0.99
S4L	732	549	2.18	1.09	4.39	0.99	13.72	0.96	27.43	1.03
S4M	1829	1372	5.49	0.83	10.97	0.95	34.29	1.04	68.58	1.07
S4H	4755	2852	11.40	0.84	22.83	0.95	71.32	1.05	142.65	1.07
C1L	610	457	2.18	1.14	4.39	1.04	13.72	0.98	27.43	1.01
C1M	1524	1143	5.49	0.84	10.97	0.95	34.29	1.03	68.58	1.07
C1H	3658	2195	11.40	0.84	22.83	0.95	71.32	1.03	142.65	1.06
C2L	610	457	1.83	0.99	3.66	0.96	11.43	0.90	22.86	1.01
C2M	1524	1143	4.57	0.79	9.14	0.88	28.58	0.99	57.15	1.06
C2H	3658	2195	8.79	0.87	17.55	0.96	54.86	1.02	109.73	1.06
PC1	457	343	1.83	1.08	3.66	1.05	11.43	0.95	22.86	0.99
PC2L	610	457	4.57	0.84	9.14	0.87	28.58	1.00	57.15	1.06
PC2M	1524	1143	8.79	0.79	17.55	0.93	54.86	0.99	109.73	1.07
PC2H	3658	2195	1.83	1.13	3.66	1.08	11.43	0.95	22.86	1.00
RM1L	610	457	4.57	0.88	9.14	0.92	28.58	1.00	57.15	1.06
RM1M	1524	1143	8.79	0.83	17.55	0.96	54.86	1.02	109.73	1.06
RM2L	610	457	1.37	1.05	2.74	1.10	8.59	1.10	17.15	0.93
RM2M	1524	1143	1.83	1.12	3.66	1.04	11.43	0.93	22.86	1.02
RM2H	3658	2195	4.57	0.86	9.14	0.93	28.58	1.02	57.15	1.07
MH	305	305	8.79	0.83	17.55	0.94	54.86	1.04	109.73	1.07

○ Nonstructural Drift-Sensitive Fragility Curve Parameters - Pre-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Displacement (cm)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	427	320	1.27	1.07	2.57	1.11	8.00	1.11	16.00	1.14
W2	732	549	2.18	1.06	4.39	1.00	13.72	0.93	27.43	1.01
S1L	732	549	2.18	0.90	4.39	0.87	13.72	0.91	27.43	1.02
S1M	1829	1372	5.49	0.80	10.97	0.92	34.29	0.99	68.58	1.06
S1H	4755	2852	11.40	0.79	22.83	0.89	71.32	1.00	142.65	1.07
S2L	732	549	2.18	1.06	4.39	0.97	13.72	0.96	27.43	1.04
S2M	1829	1372	5.49	0.80	10.97	0.90	34.29	1.02	68.58	1.06
S2H	4755	2852	11.40	0.79	22.83	0.89	71.32	0.99	142.65	1.06
S3	457	343	1.37	1.11	2.74	1.05	8.59	0.96	17.15	1.00
S4L	732	549	2.18	1.12	4.39	1.00	13.72	0.99	27.43	1.05
S4M	1829	1372	5.49	0.86	10.97	0.99	34.29	1.06	68.58	1.10
S4H	4755	2852	11.40	0.88	22.83	0.99	71.32	1.07	142.65	1.09
C1L	610	457	2.18	1.18	4.39	1.06	13.72	0.98	27.43	1.03
C1M	1524	1143	5.49	0.86	10.97	0.99	34.29	1.05	68.58	1.09
C1H	3658	2195	11.40	0.88	22.83	0.91	71.32	1.05	142.65	1.09
C2L	610	457	1.83	1.02	3.66	0.98	11.43	0.93	22.86	1.03
C2M	1524	1143	4.57	0.81	9.14	0.91	28.58	1.02	57.15	1.06
C2H	3658	2195	8.79	0.90	17.55	0.99	54.86	1.05	109.73	1.10
PC1	457	343	1.83	1.14	3.66	1.08	11.43	0.97	22.86	1.00
PC2L	610	457	4.57	0.88	9.14	0.90	28.58	1.03	57.15	1.07
PC2M	1524	1143	8.79	0.83	17.55	0.97	54.86	1.05	109.73	1.07
PC2H	3658	2195	1.83	1.19	3.66	1.11	11.43	0.99	22.86	1.02
RM1L	610	457	4.57	0.92	9.14	0.95	28.58	1.03	57.15	1.09
RM1M	1524	1143	8.79	0.86	17.55	0.90	54.86	1.04	109.73	1.09
RM2L	610	457	1.37	1.18	2.74	1.16	8.59	1.12	17.15	0.95
RM2M	1524	1143	1.83	1.16	3.66	1.06	11.43	0.96	22.86	1.02
RM2H	3658	2195	4.57	0.87	9.14	0.95	28.58	1.04	57.15	1.07
MH	305	305	8.79	0.87	17.55	0.99	54.86	1.06	109.73	1.08

❍ Nonstructural Acceleration-Sensitive Fragility Curve Parameters - High-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Acceleration (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.3	0.73	0.6	0.68	1.2	0.68	2.4	0.68
W2	288	216	0.3	0.7	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.68
S1L	288	216	0.3	0.67	0.6	0.67	1.2	0.68	2.4	0.67
S1M	720	540	0.3	0.67	0.6	0.68	1.2	0.67	2.4	0.67
S1H	1872	1123	0.3	0.68	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.67
S2L	288	216	0.3	0.67	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.67
S2M	720	540	0.3	0.69	0.6	0.66	1.2	0.66	2.4	0.66
S2H	1872	1123	0.3	0.68	0.6	0.66	1.2	0.65	2.4	0.65
S3	180	135	0.3	0.68	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.67
S4L	288	216	0.3	0.68	0.6	0.68	1.2	0.67	2.4	0.67
S4M	720	540	0.3	0.67	0.6	0.65	1.2	0.66	2.4	0.66
S4H	1872	1123	0.3	0.67	0.6	0.66	1.2	0.65	2.4	0.65
C1L	240	180	0.3	0.68	0.6	0.68	1.2	0.67	2.4	0.67
C1M	600	450	0.3	0.68	0.6	0.68	1.2	0.66	2.4	0.66
C1H	1440	864	0.3	0.66	0.6	0.66	1.2	0.66	2.4	0.66
C2L	240	180	0.3	0.69	0.6	0.67	1.2	0.66	2.4	0.64
C2M	600	450	0.3	0.7	0.6	0.65	1.2	0.65	2.4	0.65
C2H	1440	864	0.3	0.68	0.6	0.66	1.2	0.65	2.4	0.65
PC1	180	135	0.3	0.74	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.64
PC2L	240	180	0.3	0.68	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.67
PC2M	600	450	0.3	0.68	0.6	0.65	1.2	0.66	2.4	0.66
PC2H	1440	864	0.3	0.67	0.6	0.65	1.2	0.65	2.4	0.65
RM1L	240	180	0.3	0.7	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.63
RM1M	600	450	0.3	0.72	0.6	0.66	1.2	0.65	2.4	0.65
RM2L	240	180	0.3	0.7	0.6	0.66	1.2	0.67	2.4	0.64
RM2M	600	450	0.3	0.72	0.6	0.65	1.2	0.65	2.4	0.65
RM2H	1440	864	0.3	0.7	0.6	0.65	1.2	0.65	2.4	0.65
MH	120	120	0.3	0.65	0.6	0.67	1.2	0.67	2.4	0.67

❍ Nonstructural Acceleration-Sensitive Fragility Curve Parameters - Moderate-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Acceleration (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.25	0.73	0.5	0.68	1	0.67	2	0.64
W2	288	216	0.25	0.68	0.5	0.67	1	0.68	2	0.68
S1L	288	216	0.25	0.67	0.5	0.66	1	0.67	2	0.67
S1M	720	540	0.25	0.66	0.5	0.67	1	0.67	2	0.67
S1H	1872	1123	0.25	0.66	0.5	0.68	1	0.68	2	0.68
S2L	288	216	0.25	0.66	0.5	0.66	1	0.68	2	0.68
S2M	720	540	0.25	0.66	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
S2H	1872	1123	0.25	0.65	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
S3	180	135	0.25	0.67	0.5	0.66	1	0.65	2	0.65
S4L	288	216	0.25	0.66	0.5	0.66	1	0.66	2	0.66
S4M	720	540	0.25	0.65	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
S4H	1872	1123	0.25	0.65	0.5	0.66	1	0.66	2	0.66
C1L	240	180	0.25	0.67	0.5	0.66	1	0.66	2	0.66
C1M	600	450	0.25	0.66	0.5	0.65	1	0.63	2	0.63
C1H	1440	864	0.25	0.65	0.5	0.67	1	0.67	2	0.67
C2L	240	180	0.25	0.68	0.5	0.66	1	0.68	2	0.68
C2M	600	450	0.25	0.67	0.5	0.64	1	0.67	2	0.67
C2H	1440	864	0.25	0.66	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
PC1	180	135	0.25	0.68	0.5	0.67	1	0.66	2	0.66
PC2L	240	180	0.25	0.66	0.5	0.66	1	0.65	2	0.65
PC2M	600	450	0.25	0.65	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
PC2H	1440	864	0.25	0.64	0.5	0.65	1	0.65	2	0.65
RM1L	240	180	0.25	0.68	0.5	0.67	1	0.67	2	0.67
RM1M	600	450	0.25	0.67	0.5	0.64	1	0.67	2	0.67
RM2L	240	180	0.25	0.68	0.5	0.66	1	0.67	2	0.67
RM2M	600	450	0.25	0.67	0.5	0.64	1	0.67	2	0.67
RM2H	1440	864	0.25	0.66	0.5	0.64	1	0.64	2	0.64
MH	120	120	0.25	0.65	0.5	0.67	1	0.67	2	0.67

❍ Nonstructural Acceleration-Sensitive Fragility Curve Parameters - Low-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Acceleration (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.2	0.71	0.4	0.68	0.8	0.66	1.6	0.66
W2	288	216	0.2	0.67	0.4	0.67	0.8	0.7	1.6	0.7
S1L	288	216	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S1M	720	540	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S1H	1872	1123	0.2	0.67	0.4	0.65	0.8	0.65	1.6	0.65
S2L	288	216	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S2M	720	540	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S2H	1872	1123	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S3	180	135	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4L	288	216	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4M	720	540	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4H	1872	1123	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C1L	240	180	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.67	1.6	0.67
C1M	600	450	0.2	0.64	0.4	0.68	0.8	0.67	1.6	0.67
C1H	1440	864	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2L	240	180	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2H	1440	864	0.2	0.67	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
PC1	180	135	0.2	0.66	0.4	0.67	0.8	0.66	1.6	0.66
PC2L	240	180	0.2	0.64	0.4	0.66	0.8	0.65	1.6	0.65
PC2M	600	450	0.2	0.64	0.4	0.66	0.8	0.66	1.6	0.66
PC2H	1440	864	0.2	0.65	0.4	0.67	0.8	0.66	1.6	0.66
RM1L	240	180	0.2	0.64	0.4	0.67	0.8	0.66	1.6	0.66
RM1M	600	450	0.2	0.64	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
RM2L	240	180	0.2	0.66	0.4	0.66	0.8	0.66	1.6	0.66
RM2M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
RM2H	1440	864	0.2	0.64	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
MH	120	120	0.2	0.64	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67

❍ Nonstructural Acceleration-Sensitive Fragility Curve Parameters - Pre-Code Seismic Design Level

Building Properties			Spectral Acceleration (g)							
Type	Height		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	168	126	0.2	0.72	0.4	0.7	0.8	0.67	1.6	0.67
W2	288	216	0.2	0.66	0.4	0.67	0.8	0.65	1.6	0.65
S1L	288	216	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S1M	720	540	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S1H	1872	1123	0.2	0.68	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S2L	288	216	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S2M	720	540	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S2H	1872	1123	0.2	0.65	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
S3	180	135	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4L	288	216	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4M	720	540	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
S4H	1872	1123	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C1L	240	180	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C1M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C1H	1440	864	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2L	240	180	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2M	600	450	0.2	0.66	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
C2H	1440	864	0.2	0.68	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
PC1	180	135	0.2	0.65	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
PC2L	240	180	0.2	0.64	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
PC2M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
PC2H	1440	864	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
RM1L	240	180	0.2	0.64	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
RM1M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67
RM2L	240	180	0.2	0.67	0.4	0.66	0.8	0.66	1.6	0.66
RM2M	600	450	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
RM2H	1440	864	0.2	0.65	0.4	0.68	0.8	0.68	1.6	0.68
MH	120	120	0.2	0.66	0.4	0.67	0.8	0.67	1.6	0.67

[SYNER-G]

Construction material	Height	Region	Intensity Measure	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.003	0.001	0.004	0.001	0.009	0.003	0.013	0.005
Masonry	4	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.006	0.001	0.008	0.002	0.012	0.004	0.016	0.006
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.003	0.001	0.004	0.001	0.013	0.005	0.019	0.008
Masonry	4	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.006	0.001	0.008	0.002	0.017	0.006	0.023	0.009
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.228	0.027						
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.228	0.027						
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.003	0.001	0.004	0.001	0.012	0.005	0.017	0.007
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.003	0.001	0.004	0.001	0.012	0.005	0.017	0.007
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.228	0.027						
Masonry	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Slovenia, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.228	0.027						
Reinforced Concrete	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.016	0.004	0.022	0.008	0.045	0.02	0.13	0.077
Reinforced Concrete	5	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.03	0.008	0.041	0.015	0.063	0.027	0.15	0.085
Reinforced Concrete	8	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.044	0.012	0.062	0.022	0.083	0.032	0.168	0.089
Reinforced Concrete	2	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.016	0.004	0.021	0.006	0.039	0.017	0.059	0.028
Reinforced Concrete	5	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.03	0.008	0.039	0.013	0.057	0.022	0.076	0.034
Reinforced Concrete	8	Euro-Mediterranean Regions (Greek, Italy, Turkey)	Sd(TLS)(m)	0.03	0.008	0.039	0.013	0.057	0.022	0.076	0.034
Masonry		Italy	Sd(TLS)(m)	0.002	0.002	0.004	0.003	0.011	0.012	0.019	0.022
Masonry	1,2	Italy	Sd(TLS)(m)	0.012	0.012	0.03	0.047	0.036	0.034		
Masonry	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.15	2	2.31	4.02	4.33	7.53	10.11	17.58
Masonry	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.04	3.55	4.19	7.3	8.09	14.07	18.87	32.82
Masonry	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.66	4.62	5.66	9.85	11.27	19.59	26.29	45.72
Masonry	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3	5.22	6.7	11.65	13.87	24.11	32.35	56.27
Masonry	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.85	3.37	6.77	8.01	14.71	17.39	34.33	40.58
Masonry	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.71	4.39	9.66	11.41	22.29	26.35	52.02	61.48
Masonry	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.94	7.02	15.45	18.27	35.67	42.16	82.23	98.38
Masonry	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.25	1.79	2.51	3.59	5.02	7.18	11.72	16.76
Masonry	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.24	3.22	4.52	6.46	9.13	13.05	21.27	30.4
Masonry	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.55	2.86	5.19	5.82	10.6	11.89	24.67	27.67
Masonry	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.94	3.3	6.06	6.79	12.55	14.08	29.14	32.68
Masonry	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.72	4.17	7.79	8.73	16.44	18.44	38.08	42.72
Masonry	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.05	5.66	10.82	12.13	23.44	26.29	54.09	60.68
Masonry	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.08	9.06	17.31	19.42	37.51	42.07	86.55	97.08
Masonry	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.23	1.71	2.47	3.43	5.75	8	14.39	20.01
Masonry	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.21	3.08	4.52	6.29	10.44	14.52	25.98	36.13
Reinforced Concrete	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.52	3.9	9.13	10.12	15.47	17.15	38.69	42.87
Reinforced Concrete	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.71	3.21	8.88	7.69	17.26	14.94	43.16	37.34

Construction material	Height	Region	Intensity Measure	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
Reinforced Concrete	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	4.87	4.21	11.42	9.88	24.37	21.09	60.93	52.71
Reinforced Concrete	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.58	4.83	13.96	12.08	30.46	26.36	76.16	65.89
Reinforced Concrete	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.94	7.73	22.34	19.33	48.74	42.17	121.86	105.43
Masonry	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	2.94	3.79	7.03	9.97	16.48	25.28	32.25	47.95
Masonry	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	2.2	2.84	5.47	7.75	13.19	20.23	25.8	38.36
Masonry	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	3.83	3.05	9.58	7.62	19.16	15.24	44.58	49
Masonry	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	3.36	2.67	7.89	6.74	17.37	18.18	36.37	49.19
Masonry	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.25	1.79	2.51	3.59	5.02	7.18	11.72	16.76
Masonry	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.24	3.2	4.52	6.46	9.13	13.05	21.27	30.4
Masonry	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.55	2.86	5.19	5.82	10.6	11.89	24.67	27.67
Masonry	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.94	3.3	6.06	6.79	12.55	14.08	29.14	32.68
Masonry	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.72	4.17	7.79	8.73	16.44	18.44	38.08	42.72
Masonry	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.05	5.66	10.82	12.13	23.44	26.29	54.09	60.68
Masonry	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.08	9.06	17.31	19.42	37.51	42.07	86.55	97.08
Reinforced Concrete	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.43	1.58	3.58	3.97	5.73	6.35	13.25	14.69
Reinforced Concrete	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.58	2.86	6.45	7.14	10.6	11.75	24.79	27.47
Reinforced Concrete	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.44	3.81	8.6	9.53	14.61	16.19	34.6	38.34
Reinforced Concrete	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.55	3.07	8.25	7.14	15.74	13.62	37.83	32.73
Reinforced Concrete	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	4.57	3.95	9.52	8.24	21.33	18.45	52.17	45.14
Reinforced Concrete	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.07	4.39	11.42	9.88	25.39	21.96	63.47	54.91
Reinforced Concrete	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.12	7.03	18.28	15.81	40.62	35.14	101.55	87.86
Reinforced Concrete	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.43	1.59	3.58	3.97	5.73	6.35	14.33	15.88
Reinforced Concrete	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.61	2.89	6.8	7.54	10.89	12.07	27.22	30.16
Reinforced Concrete	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.52	3.9	9.13	10.12	15.47	17.15	38.69	42.87
Reinforced Concrete	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.71	3.21	8.88	7.69	17.26	14.94	43.16	37.34
Reinforced Concrete	5	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	4.87	4.21	11.42	9.88	24.37	21.09	60.93	52.71
Reinforced Concrete	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.58	4.83	13.96	12.08	30.46	26.36	76.16	65.89
Reinforced Concrete	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.94	7.73	22.34	19.33	48.74	42.17	121.86	105.43
Reinforced Concrete	High Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	11.19	8.27	27.98	20.67	48.05	42.49	108.93	123.67
Reinforced Concrete	High Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	8.62	6.86	24.99	24.06	40.12	44.1	90.92	115.47
Reinforced Concrete	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	3.34	3.67	6.75	7.54	16.87	18.84	33.43	36.75
Reinforced Concrete	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	2.83	3.42	5.45	6.18	12.92	13.3	28.81	36.01
Reinforced Concrete	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	5.75	4.57	14.37	11.43	28.75	22.86	66.87	73.49
Reinforced Concrete	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	5.03	4	11.83	10.11	26.05	27.26	54.55	69.28
Reinforced Concrete	High Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	11.19	8.27	27.98	20.67	48.05	42.49	108.93	123.67

Construction material	Height	Region	Intensity Measure	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
Reinforced Concrete	High Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	8.62	6.86	24.99	24.06	40.12	44.1	90.92	115.47
Reinforced Concrete	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	3.34	3.67	6.75	7.54	16.87	18.84	33.43	36.75
Reinforced Concrete	Low Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	2.83	3.42	5.45	6.18	12.92	13.3	28.81	36.01
Reinforced Concrete	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	5.75	4.57	10.07	8.01	23	18.29	55.66	61.18
Reinforced Concrete	Mid Rise	Istanbul - Turkey	Sd(TLS)(cm)	4.32	3.43	8.88	7.58	19.54	20.45	48.56	61.66
Reinforced Concrete	1	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	1.46	1.69	3.66	4.22	5.86	6.76	13.55	15.64
Reinforced Concrete	2	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	2.64	3.04	6.59	7.61	10.85	12.51	25.36	29.26
Reinforced Concrete	3	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.51	4.06	8.79	10.15	14.95	17.25	35.39	40.84
Reinforced Concrete	4	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	3.76	3.68	8.73	8.55	16.66	16.31	40.04	39.21
Reinforced Concrete	5~7	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	4.83	4.73	10.08	9.87	22.57	22.1	55.22	54.08
Reinforced Concrete	8~15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	5.37	5.26	12.09	11.84	26.87	26.31	67.18	65.79
Reinforced Concrete	>15	Lisbon - Portugal	Sd(TLS)(cm)	8.59	8.42	19.35	18.95	42.99	42.1	107.49	105.26
Masonry	4	Italy	Sd(TLS)(m)	0.004	0.001	0.009	0.003	0.022	0.005	0.036	0.007
Reinforced Concrete	High Rise	Italy	Sd(TLS)(cm)	8.52	4.674	15.435	7.938	20.603	11.875	43.991	25.106
Reinforced Concrete	Low Rise	Italy	Sd(TLS)(cm)	4.91	2.956	6.066	2.828	8.874	5.55	13.526	7.436
Reinforced Concrete	Mid Rise	Italy	Sd(TLS)(cm)	6.589	3.926	11.599	6.194	18.288	9.606	38.044	21.087
Masonry	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.509	0.178	0.76	0.351	1.264	0.899	2.589	2.536
Masonry	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.163	0.07	0.436	0.299	1.207	1.659	3.704	8.04
Masonry	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.332	0.127	0.578	0.308	1.166	1.067	2.759	3.559
Masonry	High Rise	Barcelona - Spain	Sd(TLS)(cm)	0.481	0.148	0.84	0.609	2.075	1.505	3.224	2.338
Masonry	Mid Rise	Barcelona - Spain	Sd(TLS)(cm)	0.477	0.198	0.714	0.38	1.589	1.381	3.718	2.956
Reinforced Concrete	High Rise	FYROM	Sd(TLS)(cm)	2.189	1.063	3.358	1.139	4.466	1.37	9.178	3.014
Reinforced Concrete	Mid Rise	FYROM	Sd(TLS)(cm)	0.793	0.423	1.381	0.591	1.819	0.758	3.326	1.385
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	8.016	3.339	13.19	7.029	19	12.507	41.932	33.343
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	4.434	3.215	10.002	8.691	16.518	17.003	42.947	51.995
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	9.659	7.004	23.687	20.582	40.097	41.274	107.029	129.579
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.692	0.502	1.523	1.324	2.511	2.585	6.501	7.87
Reinforced Concrete	High Rise	Barcelona - Spain	Sd(TLS)(cm)	1.383	0.395	1.971	0.584	2.744	0.96	5.179	2.453
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	4.235	1.764	5.087	2.711	6.069	3.995	9.454	7.518
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.729	0.528	1.629	1.416	2.684	2.762	6.941	8.402
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	3.545	2.57	8.412	7.309	14.092	14.506	37.247	45.094
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	14.415	10.452	28.628	24.876	45.622	46.961	113.107	136.937
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	1.074	0.779	2.384	2.072	3.918	4.033	10.144	12.281
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.13	0.054	0.215	0.115	0.311	0.205	0.677	0.538

Construction material	Height	Region	Intensity Measure	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.778	0.564	1.749	1.519	2.885	2.969	7.506	9.087
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.247	0.179	0.543	0.472	0.889	0.915	2.308	2.794
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.119	0.049	0.147	0.078	0.179	0.118	0.268	0.213
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.259	0.188	0.569	0.495	0.947	0.975	2.449	2.965
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.618	0.448	1.47	1.278	2.468	2.541	6.517	7.889
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.173	0.125	0.384	0.334	0.631	0.65	1.617	1.956
Reinforced Concrete	Mid Rise	FYROM	Sd(TLS)(cm)	2.833	1.509	4.354	1.962	5.681	2.56	12.004	6.542
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	2.285	0.952	3.75	1.998	5.411	3.562	11.946	9.499
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	1.951	1.415	4.398	3.822	7.262	7.475	18.89	22.87
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.42	0.304	0.94	0.817	1.549	1.595	4.004	4.848
Reinforced Concrete	Mid Rise	Barcelona - Spain	Sd(TLS)(cm)	1.029	0.294	1.515	0.564	2.652	1.413	6.155	4.132
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	1.809	0.754	2.175	1.159	2.598	1.71	4.037	3.21
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.444	0.322	0.994	0.863	1.636	1.684	4.239	5.133
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	1.556	1.128	3.696	3.212	6.199	6.381	16.378	19.828
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.469	0.34	1.033	0.898	1.693	1.742	4.381	5.304
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	2.211	1.603	4.822	4.19	7.878	8.11	20.24	24.505
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.642	0.465	1.722	1.496	2.999	3.087	8.196	9.923
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.581	0.421	1.298	1.128	2.124	2.186	5.512	6.672
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.618	0.448	1.378	1.197	2.253	2.319	5.841	7.072
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	1.742	1.263	4.014	3.488	6.673	6.869	17.509	21.197
Reinforced Concrete	High Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.494	0.358	1.099	0.955	1.808	1.861	4.664	5.646
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.049	0.036	0.106	0.092	0.172	0.177	0.439	0.532
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.037	0.027	0.079	0.069	0.129	0.133	0.345	0.418
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.037	0.027	0.093	0.081	0.143	0.148	0.393	0.475
Reinforced Concrete	Low Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.012	0.009	0.039	0.034	0.072	0.074	0.173	0.209
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.667	0.484	1.457	1.266	2.382	2.452	6.124	7.414
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.308	0.224	0.702	0.61	1.148	1.181	2.967	3.593
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.296	0.215	0.649	0.564	1.076	1.108	2.779	3.365
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.531	0.385	1.219	1.059	2.023	2.083	5.292	6.407
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.568	0.412	1.351	1.174	2.267	2.334	6.029	7.3
Reinforced Concrete	Mid Rise	Europe	Sd(TLS)(cm)	0.148	0.107	0.318	0.276	0.516	0.532	1.35	1.635
Reinforced Concrete		Europe	Sd(TLS)(m)	0.012	0.008	0.024	0.02	0.036	0.033	0.048	0.047
Reinforced Concrete	Low Rise	Kosovo	Sd(TLS)(cm)	1.02	0.379	1.625	0.858	4.398	4.717	12.271	15.97
Reinforced Concrete	13	Bucharest - Romania	Sd(TLS)(cm)	4.94	3.395	9.891	8.063	29.281	22.484	85.328	84.706

Construction material	Height	Region	Intensity Measure	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
Reinforced Concrete	8	Spain	Sd(TLS)(cm)	0.096	0.029	0.132	0.03	0.164	0.035	0.225	0.065

[FEMA P-58]

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1031.001	Bolted shear tab gravity connections	Story Drift Ratio	Unit less	0.04	0.4	0.04	0.4	0.08	0.4	0.11	0.4		
B1031.011a	Steel Column Base Plates, Column W < 150 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.04	0.4	0.04	0.4	0.07	0.4	0.1	0.4		
B1031.011b	Steel Column Base Plates, Column 150 plf < W < 300 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.04	0.4	0.04	0.4	0.07	0.4	0.1	0.4		
B1031.011c	Steel Column Base Plates, Column W > 300 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.04	0.4	0.04	0.4	0.07	0.4	0.1	0.4		
B1031.021a	Welded column splices, Column W < 150 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.02	0.4	0.05	0.4				
B1031.021b	Welded column splices, Column 150 plf < W < 300 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.02	0.4	0.05	0.4				
B1031.021c	Welded column splices, Column W > 300 plf	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.02	0.4	0.05	0.4				
B1033.001a	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.001b	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.001c	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.002a	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.002b	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.002c	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.003a	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.003b	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, X Brace, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.003c	Special Concentric Braced Frame w WF braces, balanced design criteria, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0058	0.65	0.0142	0.5	0.0283	0.25		
B1033.011a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.011b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.011c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.012a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.012b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.012c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.013a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.013b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.013c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, balanced design criteria, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.45	0.0092	0.3	0.0167	0.15	0.0223	0.15		
B1033.021a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.021b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.021c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.022a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.022b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, Single Diagonal Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.022c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.023a	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.023b	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.023c	Special Concentric Braced Frame w HSS braces, tapered gusset plates & design to AISC minimum standard, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0037	0.3	0.0075	0.25	0.0145	0.25	0.0199	0.35		
B1033.031a	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				
B1033.031b	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				
B1033.031c	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				
B1033.032a	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.032b	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Single Diagonal Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				
B1033.032c	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0074	0.3	0.0121	0.25	0.0152	0.35				
B1033.033a	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0038	0.3	0.0075	0.55	0.0145	0.25	0.0185	0.35		
B1033.033b	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0038	0.3	0.0075	0.55	0.0145	0.25	0.0185	0.35		
B1033.033c	Special Concentric Braced Frame, design to AISC minimum standards, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0038	0.3	0.0075	0.55	0.0145	0.25	0.0185	0.35		
B1033.041a	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.041b	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.041c	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.042a	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.042b	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Single Diagonal Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.042c	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.043a	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.043b	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.043c	Special Concentric Braced Frame w double angle braces, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00256	0.3	0.0048	0.3	0.0112	0.3				
B1033.051a	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.051b	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Chevron Brace, Brace w, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.051c	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.052a	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.052b	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Single Diagonal Brace, Brace w, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.052c	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.053a	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.053b	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, X Brace, Brace w, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.053c	Ordinary Concentric Braced Frame w compact braces, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.0178	0.3				
B1033.061a	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.061b	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Chevron Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.061c	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.062a	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.062b	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Single Diagonal Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.062c	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.063a	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.063b	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.063c	Ordinary Concentric Braced Frame, braces design to ductile slenderness limits, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.00159	0.7	0.01	0.3	0.01776	0.3				
B1033.071a	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Chevron Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.071b	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Chevron Brace, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.071c	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Chevron Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.072a	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Single Diagonal Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.072b	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Single Diagonal Brace, 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.072c	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, Single Diagonal Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.073a	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, X Brace, Brace w < 40 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.073b	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, X Brace, Brace 41 PLF < w < 99 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.073c	Braced frame, design for factored loads, no additional seismic detailing, X Brace, Brace w > 100 PLF	Story Drift Ratio	Unit less	0.0042	0.25								
B1033.101a	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Chevron Brace, Weight of brace < 40 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1033.101b	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Chevron brace, Weight of brace > 41 plf and < 99 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								
B1033.101c	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Chevron Brace, Weight of brace > 100 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								
B1033.111a	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Single Diagonal Brace, Weight of brace < 40 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								
B1033.111b	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Single Diagonal brace, Weight of brace > 41 plf and < 99 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								
B1033.111c	Steel Buckling Restrained Brace (BRB), Single Diagonal Brace, Weight of brace > 100 plf.	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4								
B1035.001	Post-Northridge RBS connection with welded web, beam one side of column only, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.002	Post-Northridge RBS connection with welded web, beam one side of column only, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.011	Post-Northridge RBS connection with welded web, beams both sides of column, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.012	Post-Northridge RBS connection with welded web, beams both sides of column, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.021	Post-Northridge welded steel moment connection other than RBS, beam one side, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.022	Post-Northridge welded steel moment connection other than RBS, beam one side, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1035.031	Post-Northridge welded steel moment connection other than RBS, beams both sides, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.032	Post-Northridge welded steel moment connection other than RBS, beams both sides, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.3	0.04	0.3	0.05	0.3				
B1035.041	Pre-Northridge WUF-B beam-column joint, beam one side of column, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.4	0.017	0.4	0.025	0.4	0.025	0.4	0.03	0.4
B1035.042	Pre-Northridge WUF-B beam-column joint, beam one side of column, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.4	0.017	0.4	0.025	0.4	0.025	0.4	0.03	0.4
B1035.051	Pre-Northridge WUF-B beam-column joint, beam both sides of column, beam depth <= W27	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.4	0.017	0.4	0.025	0.4	0.025	0.4	0.03	0.4
B1035.052	Pre-Northridge WUF-B beam-column joint, beam both sides of column, beam depth >= W30	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.4	0.017	0.4	0.025	0.4	0.025	0.4	0.03	0.4
B1035.061a	EBF Shear Link, no floor beams, link w < 100 PLF	Link Rotation Angle	Radians	0.04	0.3	0.06	0.3	0.08	0.3				
B1035.061b	EBF Shear Link, no floor beams, link w < 200 PLF	Link Rotation Angle	Radians	0.04	0.3	0.06	0.3	0.08	0.3				
B1035.062a	EBF Shear Link, with floor beams, link w < 100 PLF	Link Rotation Angle	Radians	0.04	0.3	0.06	0.3	0.08	0.3				
B1035.062b	EBF Shear Link, with floor beams, link w < 200 PLF	Link Rotation Angle	Radians	0.04	0.3	0.06	0.3	0.08	0.3				
B1041.001a	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		
B1041.001b	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		
B1041.002a	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		
B1041.002b	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.003a	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		
B1041.003b	ACI 318 SMF , Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.0275	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3		
B1041.011a	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		
B1041.011b	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		
B1041.012a	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		
B1041.012b	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		
B1041.013a	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		
B1041.013b	MF with SMF-conforming beam and column flexural and confinement reinforcement but weak joints , Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.04	0.3	0.04	0.3		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.021a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.021b	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.022a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.022b	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.023a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.023b	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.025	0.3	0.035	0.3	0.035	0.3		
B1041.031a	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.031b	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.032a	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.032b	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.033a	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.033b	ACI 318 OMF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.041a	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.041b	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.042a	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.042b	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.043a	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.043b	ACI 318 OMF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.051a	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				
B1041.051b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				
B1041.052a	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				
B1041.052b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				
B1041.053a	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.053b	ACI 318 OMF with weak beams and weak joints, beam flexural or shear response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.02	0.4	0.03	0.4				
B1041.061a	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.061b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.062a	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.062b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.063a	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.063b	ACI 318 OMF with weak columns, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.071a	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.071b	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.072a	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.072b	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.073a	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.073b	ACI 318 OMF weak columns w/ high axial load, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.081a	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.081b	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.082a	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.082b	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.083a	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.083b	Non-conforming MF with weak joints and beam flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0175	0.4	0.0225	0.4	0.0322	0.4				
B1041.091a	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.091b	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.092a	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.092b	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.093a	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.093b	Non-conforming MF with weak joints and column flexural response, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0175	0.4	0.02	0.4				
B1041.101a	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.101b	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.102a	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.102b	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.103a	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.103b	Non-conforming MF, weak beams and strong joints, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.111a	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.111b	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.112a	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.112b	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.113a	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.113b	Non-conforming MF, weak columns, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4	0.025	0.4				
B1041.121a	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.121b	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.122a	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.122b	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.123a	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.123b	Non-conforming MF, weak columns and strong joints, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.4	0.005	0.5						
B1041.131a	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						
B1041.131b	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						
B1041.132a	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1041.132b	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 24" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						
B1041.133a	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						
B1041.133b	Non-conforming MF with inadequate development of reinforcing, Conc Col & Bm = 36" x 36", Beam both sides	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.02	0.4						
B1044.001	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8" or less thick single curtain up to 15' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.002	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8" or less thick single curtain 16' high to 24' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.003	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8" or less thick single curtain 25' high to 40' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.011	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8"-16" double curtain; with heights of up to 15'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.012	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8"-16" double curtain; with heights of 16' to 24'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.013	Rectangular low aspect ratio concrete walls 8"-16" double curtain; with heights of 24' to 40'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.021	Rectangular low aspect ratio concrete walls 18"-24" thick with double curtain and heights up to 15'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.022	Rectangular low aspect ratio concrete walls 18"-24" thick with double curtain and heights 16' - 24'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1044.023	Rectangular low aspect ratio concrete walls 18"-24" thick with double curtain and heights 25' - 40'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0055	0.36	0.0109	0.3	0.013	0.36				
B1044.031	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, less than 8" thick up to 15' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.032	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, less than 8" thick, 16' to 24' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.033	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, less than 8" thick, 25' to 40' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.041	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 8" to 16" thick up to 15' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.042	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 8" to 16" thick, 16' to 24' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.043	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 8" to 16" thick, 25' to 40' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.051	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 17" to 24" thick" up to 15' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.052	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 17" to 24" thick, 16' to 24' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.053	Low-rise reinforced concrete walls with return flanges, 17" to 24" thick, 25' to 40' high	Story Drift Ratio	Unit less	0.0076	0.35	0.0134	0.45						
B1044.061	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, less than 8" thick, height <15'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.062	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, less than 8" thick, height between 16'-24'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1044.063	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, less than 8" thick, height between 24'-40'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.071	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 8" to 16" thick, height <15'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.072	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 8" to 16" thick, height between 16'-24'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.073	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 8" to 16" thick, height between 24'-40'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.081	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 17"-24" thick, height <15'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.082	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 17"-24" thick, height between 16'-24'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.083	Low rise reinforced concrete walls with boundary columns, 17"-24" thick, height between 24'-40'	Story Drift Ratio	Unit less	0.0033	0.35	0.0087	0.2						
B1044.091	Slender Concrete Wall, 12" thick, 12' high, 15' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.092	Slender Concrete Wall, 12" thick, 12' high, 20' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.093	Slender Concrete Wall, 12" thick, 12' high, 30' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.101	Slender Concrete Wall, 18" thick, 12' high, 15' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.102	Slender Concrete Wall, 18" thick, 12' high, 20' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.103	Slender Concrete Wall, 18" thick, 12' high, 30' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.111	Slender Concrete Wall, 30" thick, 12' high, 15' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.112	Slender Concrete Wall, 30" thick, 12' high, 20' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				
B1044.113	Slender Concrete Wall, 30" thick, 12' high, 30' long	Effective Drift	Unit less	0.0093	0.5	0.0128	0.35	0.0186	0.45				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1049.001a	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing 0<Vg/Vo<.2, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.025	0.25	0.04	0.25						
B1049.001b	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing 0<Vg/Vo<.2, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.025	0.25	0.04	0.25						
B1049.002a	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing .2<Vg/Vo<.4, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.035	0.4						
B1049.002b	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing .2<Vg/Vo<.4, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.02	0.4	0.035	0.4						
B1049.003a	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing .4<Vg/Vo<.6, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.012	0.4	0.016	0.4						
B1049.003b	Reinforced concrete flat slabs- columns without shear reinforcing .4<Vg/Vo<.6, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.012	0.4	0.016	0.4						
B1049.011	Reinforced concrete flat slabs- columns with shear reinforcing 0.2<Vg/Vo<0.4	Story Drift Ratio	Unit less	0.03	0.4	0.048	0.4						
B1049.012	Reinforced concrete flat slabs- columns with shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<.6	Story Drift Ratio	Unit less	0.022	0.4	0.03	0.4						
B1049.021a	Post-tensioned concrete flat slabs- columns without shear reinforcing 0.2<Vg/Vo<.0.4, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.018	0.4	0.03	0.4						
B1049.021b	Post-tensioned concrete flat slabs- columns without shear reinforcing 0.2<Vg/Vo<.0.4, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.018	0.4	0.03	0.4						
B1049.022a	Post-tensioned concrete flat slabs- columns without shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<.0.6, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.013	0.5	0.019	0.55						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1049.022b	Post-tensioned concrete flat slabs-columns without shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<.0.6, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.013	0.5	0.019	0.55						
B1049.031	Post-tensioned concrete flat slabs-columns with shear reinforcing 0<Vg/Vo<.0.4	Story Drift Ratio	Unit less	0.028	0.5	0.04	0.5						
B1049.032	Post-tensioned concrete flat slabs-columns with shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<.0.6	Story Drift Ratio	Unit less	0.023	0.5	0.032	0.5						
B1049.041a	Reinforced concrete flat slabs drop panel or drop capital-columns without shear reinforcing 0<Vg/Vo<0.4, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.025	0.5	0.042	0.5						
B1049.041b	Reinforced concrete flat slabs drop panel or drop capital-columns without shear reinforcing 0<Vg/Vo<0.4, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.025	0.5	0.042	0.5						
B1049.042a	Reinforced concrete flat slabs drop panel or drop capital-columns without shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<0.6, no continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.5	0.023	0.5						
B1049.042b	Reinforced concrete flat slabs drop panel or drop capital-columns without shear reinforcing 0.4<Vg/Vo<0.6, with continuity reinf	Story Drift Ratio	Unit less	0.017	0.5	0.023	0.5						
B1042.001a	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam < 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0179	0.38	0.0352	0.44	0.0543	0.95				
B1042.001b	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam < 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0203	0.39	0.0394	0.35	0.0602	1				
B1042.002a	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam < 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0428	0.74				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1042.002b	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam < 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0407	0.75				
B1042.011a	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam > 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0179	0.38	0.0352	0.44	0.0543	0.95				
B1042.011b	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam > 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0203	0.39	0.0394	0.35	0.0602	1				
B1042.012a	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam > 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0428	0.74				
B1042.012b	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam > 16" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0407	0.75				
B1042.021a	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam > 24" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0179	0.38	0.0352	0.44	0.0543	0.95				
B1042.021b	Concrete link beam, diagonally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam > 24" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0203	0.39	0.0394	0.35	0.0602	1				
B1042.022a	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 1.0 and 2.0, beam > 24" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0428	0.74				
B1042.022b	Concrete link beam, conventionally reinforced, aspect ratio between 2.0 and 4.0, beam > 24" wide and depth < 30"	Link Beam Chord Rotation	Radians	0.0137	0.21	0.0264	0.33	0.0407	0.75				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1051.001	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 4" to 6"' thick, up to 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						
B1051.002	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 4" to 6"' thick, greater than 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						
B1051.003	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 4" to 6" thick, flexure dominated up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1051.004	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 4" to 6" thick, flexure dominated greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1051.011	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 8" to 12"' thick, up to 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						
B1051.012	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 8" to 12"' thick, greater than 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						
B1051.013	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 8" to 12" thick, flexure dominated up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1051.014	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 8" to 12" thick, flexure dominated greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1051.021	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated, 16" thick, up to 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1051.022	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, shear dominated,16"' thick, greater than 12 foot tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.86	0.0033	0.77						
B1051.023	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 16" thick, flexure dominated up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1051.024	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, 16" thick, flexure dominated greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0018	0.73	0.0051	0.65	0.0086	0.56				
B1052.001	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 8" or 12" thick, shear dominated, up t o12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0036	0.59	0.0059	0.51						
B1052.002	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 8" or 12" thick, shear dominated, greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0036	0.59	0.0059	0.51						
B1052.003	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 8" to 12" thick, flexure dominated up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0031	0.47	0.009	0.4	0.0151	0.32				
B1052.004	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 8" to 12" thick, flexure dominated greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0031	0.47	0.009	0.4	0.0151	0.32				
B1052.011	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 16" thick, shear dominated, up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0036	0.59	0.0059	0.51						
B1052.012	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 16" thick, shear dominated, greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0036	0.59	0.0059	0.51						
B1052.013	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 16" thick, flexure dominated up to 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0031	0.47	0.009	0.4	0.0151	0.32				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B1052.014	Special reinforced masonry walls with fully grouted cells, 16" thick, flexure dominated greater than 12' tall	Story Drift Ratio	Unit less	0.0031	0.47	0.009	0.4	0.0151	0.32				
B1061.001a	Cold formed steel walls with wood structural panel sheathing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.004	0.4	0.0226	0.3	0.0267	0.25				
B1061.001b	Cold formed steel walls with wood structural panel sheathing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.004	0.4	0.0226	0.3	0.0267	0.25				
B1061.011a	Cold formed steel walls with flat strap X-bracing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.0139	0.25	0.0179	0.25						
B1061.011b	Cold formed steel walls with flat strap X-bracing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0139	0.25	0.0179	0.25						
B1061.021a	Cold formed steel walls with 22 or 31 mil steel sheathing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.019	0.25	0.0253	0.25						
B1061.021b	Cold formed steel walls with 22 or 31 mil steel sheathing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.019	0.25	0.0253	0.25						
B1071.001	Light framed wood walls with structural panel sheathing, gypsum wallboard no hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.01	0.4	0.0175	0.4	0.025	0.4				
B1071.012	Light framed wood walls with structural panel sheathing, stucco, hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.44	0.0052	0.3	0.0252	0.16				
B1071.011	Light framed wood walls with structural panel sheathing, stucco no hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.0017	0.5	0.0035	0.4	0.017	0.4				
B1071.002	Light framed wood walls with structural panel sheathing, gypsum wallboard and hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0262	0.19	0.0369	0.2				
B1071.031	Wood walls with diagonal let-in bracing	Story Drift Ratio	Unit less	0.01	0.4								
B1071.041	Exterior Wall - Type: Gypsum with wood studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.6	0.0071	0.45	0.012	0.45				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2011.001a	Exterior Wall - Cold formed steel walls with wood structural panel sheathing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.004	0.4	0.0226	0.3	0.0267	0.25				
B2011.001b	Exterior Wall - Cold formed steel walls with wood structural panel sheathing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.004	0.4	0.0226	0.3	0.0267	0.25				
B2011.011a	Exterior Wall - Cold formed steel walls with flat strap X-bracing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.0139	0.25	0.0179	0.25						
B2011.011b	Exterior Wall - Cold formed steel walls with flat strap X-bracing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.0139	0.25	0.0179	0.25						
B2011.021a	Exterior Wall - Cold formed steel walls with 22 or 31 mil steel sheathing, interior - gypsum board	Story Drift Ratio	Unit less	0.019	0.25	0.0253	0.25						
B2011.021b	Exterior Wall - Cold formed steel walls with 22 or 31 mil steel sheathing, exterior - stucco one side	Story Drift Ratio	Unit less	0.019	0.25	0.0253	0.25						
B2011.101	Exterior Wall - Light framed wood walls with structural panel sheathing, gypsum wallboard no hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.01	0.4	0.0175	0.4	0.025	0.4				
B2011.102	Exterior Wall - Light framed wood walls with structural panel sheathing, stucco, hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.0025	0.44	0.0052	0.3	0.0252	0.16				
B2011.111	Exterior Wall - Light framed wood walls with structural panel sheathing, stucco no hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.0017	0.5	0.0035	0.4	0.017	0.4				
B2011.121	Exterior Wall - Light framed wood walls with structural panel sheathing, gypsum wallboard and hold-downs	Story Drift Ratio	Unit less	0.015	0.4	0.0262	0.19	0.0369	0.2				
B2011.131	Exterior Wall - Wood walls with diagonal let-in bracing	Story Drift Ratio	Unit less	0.01	0.4								
B2011.201a	Precast Concrete Panels 4.5 inches thick - in plane deformation	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2011.201b	Precast Concrete Panels 4.5 inches thick - out of plane deformation	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
B2022.001	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	Story Drift Ratio	Unit less	0.0338	0.4	0.0383	0.4						
B2022.002	Curtain Walls - Generic Midrise Stick-Built Curtain wall, Config: Insulating Glass Units (dual pane), Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	Story Drift Ratio	Unit less	0.021	0.45	0.024	0.45						
B2022.011	Midrise stick-built curtain wall, Config: Asymmetric insulating glass units (dual-pane, unequal-thickness IGU), Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) inner AN / 1/2 in. (13 mm) outer AN LAM (0.030 PVB) IGU; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.026	0.25	0.0268	0.25	0.0339	0.25				
B2022.021	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN LAM (0.030 PVB); glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0156	0.35	0.0561	0.3						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.022	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN laminated, 2-sided SSG, Center Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.023	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN laminated, 2-sided SSG, Outside Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.031	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0138	0.25	0.0219	0.3						
B2022.032	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0 in. (0 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0088	0.25	0.0108	0.25						
B2022.033	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.13 in. (3 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0084	0.25	0.0107	0.35						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.034	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.25 in. (6 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0147	0.25	0.0164	0.25						
B2022.035	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 2:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0181	0.25	0.0212	0.25						
B2022.036	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1:2 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.022	0.3	0.0257	0.25						
B2022.037	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic, 2-sided SSG, Center Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.038	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic, 2-sided SSG, Outside Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.039	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.040	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 2:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.041	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1:2 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.051	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1/4 in. (6 mm) FT monolithic, 2-sided SSG, Center Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.052	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1/4 in. (6 mm) FT monolithic, 2-sided SSG, Outside Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.053	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1/4 in. (6 mm) FT monolithic, Seamed Edge; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.054	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1/4 in. (6 mm) FT monolithic, Polished Edge; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.061	Midrise stick-built curtain wall, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Heat strengthened, Details: 1/4 in. (6 mm) HS monolithic; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User						
B2022.071	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) inner AN / 1/4 in. (6 mm) outer AN LAM (0.030 PVB) IGU; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.027	0.3	0.0276	0.3	0.0303	0.3				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.072	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) inner AN / 1/4 in. (6 mm) outer AN LAM (0.060 PVB) IGU; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0262	0.3	0.0266	0.3	0.0299	0.3				
B2022.081	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1 in. (25 mm) AN insulating glass unit (IGU) [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes]; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0234	0.3	0.031	0.3						
B2022.082	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1 in. (25 mm) AN IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes]; glass-frame clearance = 0.25 in. (6 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0142	0.25	0.0221	0.25						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.083	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1 in. (25 mm) AN IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], 2-sided SSG, Center Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
B2022.084	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1 in. (25 mm) AN IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], 2-sided SSG, Outside Panel; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
B2022.091	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes]; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2022.101	Midrise stick-built curtain wall, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Heat strengthened, Details: 1 in. (25 mm) HS IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes]; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
B2022.201	Curtain Walls - Unitized curtain wall (also generic unitized curtain wall), Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1-1/4 in. (32 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], 4-sided SSG, VHBTM SGTTM; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = Varies sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
B2023.001	Generic Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	Story Drift Ratio	Unit less	0.029	0.5	0.0473	0.25	0.07	0.25				
B2023.002	Generic Storefront, Config: IGU, Lamination: Unknown, Glass Type: Unknown, Details: Aspect ratio = 6:5, Other details Unknown	Story Drift Ratio	Unit less	0.0423	0.3	0.059	0.25	0.0665	0.35				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2023.011	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN LAM (0.030 PVB); glass-frame clearance = 0.41 in. (10 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.029	0.5	0.0567	0.3	0.08	0.3				
B2023.021	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1/4 in. (6 mm) AN monolithic; glass-frame clearance = 0.41 in. (10 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0303	0.5	0.0413	0.3	0.051	0.3				
B2023.031	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 3/8 in. (10 mm) FT monolithic, Planar Specimen; glass-frame clearance = 0.5 in. (13 mm); aspect ratio = 1.93:1 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.032	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 3/8 in. (10 mm) FT monolithic, Corner Cond. Specimen, in-plane; glass-frame clearance = 0.5 in. (13 mm); aspect ratio = 1.93:1 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.033	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 3/8 in. (10 mm) FT monolithic, Corner Cond. Specimen, combined; glass-frame clearance = 0.5 in. (13 mm); aspect ratio = 1.93:1 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2023.034	Storefront, Config: Monolithic, Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 3/8 in. (10 mm) FT monolithic, Corner Cond. Specimen, Short side; glass-frame clearance = 0.5 in. (13 mm); aspect ratio = 2.72:1 sealant = wet	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.041	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Annealed, Details: 1 in. (25 mm) AN IGU; glass-frame clearance = 0.59 in. (15 mm); aspect ratio = 6:5 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	0.0423	0.3	0.059	0.25	0.0665	0.25				
B2023.051	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Planar Specimen; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.89:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.052	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, in-plane; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.89:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2023.053	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, combined; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.89:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.054	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, Short side; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 2.83:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.055	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Planar Specimen; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.88:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B2023.056	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, in-plane; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.88:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.057	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, combined; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 1.88:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B2023.058	Storefront, Config: Symmetric insulating glass units (dual-pane, equal-thickness IGU), Lamination: Not laminated, Glass Type: Full tempered, Details: 1 in. (25 mm) FT IGU [1/4 in. (6 mm) inner and outer panes], Corner Cond. Specimen, Short side; glass-frame clearance = 0.43 in. (11 mm); aspect ratio = 2.82:1 sealant = dry	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User								
B3011.011	Concrete tile roof, tiles secured and compliant with UBC94	Peak Floor Acceleration	g	1.1	0.4	1.4	0.4						
B3011.012	Clay tile roof, tiles secured and compliant with UBC94	Peak Floor Acceleration	g	1.4	0.3	1.7	0.3						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
B3011.013	Concrete tile roof, unsecured tiles	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4	0.7	0.4						
B3011.014	Clay tile roof, unsecured tiles	Peak Floor Acceleration	g	0.4	0.3	0.5	0.3						
B3031.001a	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 5 ft, replace with masonry	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3031.001b	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 10 ft, replace with masonry	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3031.001c	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 15 ft, replace with masonry	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3031.002a	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 5 ft, replace with framing	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3031.002b	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 10 ft, replace with framing	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3031.002c	Masonry Chimney - unreinforced, non industrial, above roof 15 ft, replace with framing	Peak Floor Acceleration	g	0.35	0.6	0.5	0.6						
B3041.001	Masonry Parapet - unreinforced, unbraced	Peak Floor Acceleration	g	0.2	0.6	0.4	0.6						
C1011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.005	0.40	0.01	0.30	0.021	0.20				
C1011.001b	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Partial Height, Fixed Below, Lateral Braced Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.01	0.30	0.013	0.30	0.018	0.30				
C1011.001c	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above with returns	Story Drift Ratio	Unit less	0.004	0.45	0.011	0.35	0.019	0.25				
C1011.001d	Wall Partition, Type: Gypsum with metal studs, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/o returns (friction connections)	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.60	0.0095	0.45						
C1011.011a	Wall Partition, Type: Gypsum with wood studs, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.60	0.0071	0.45	0.0071	0.45				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
C2011.001a	Prefabricated steel stair with steel treads and landings with seismic joints that accommodate drift.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.001b	Prefabricated steel stair with steel treads and landings with no seismic joint.	Story Drift Ratio	Unit less	0.005	0.6	0.017	0.6	0.028	0.45				
C2011.011a	Non-monolithic precast concrete stair assembly with concrete stringers and treads with seismic joints that accommodate drift.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.011b	Non-monolithic precast concrete stair assembly with concrete stringers and treads with no seismic joint.	Story Drift Ratio	Unit less	0.005	0.6	0.017	0.6	0.028	0.45				
C2011.021a	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with seismic joints that accommodate drift - replace in kind if replacement is required.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.021b	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with no seismic joints - replace in kind if replacement is required.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.021c	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with seismic joints that accommodate drift - replace with prefabricated steel stair if replacement is required.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.021d	Monolithic cast-in-place and precast concrete stairs with no seismic joints - replace with prefabricated steel stair if replacement is required.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
C2011.031a	Hybrid stair assembly with steel stringers and concrete treads and landings with seismic joints that accommodate drift.	Story Drift Ratio	Unit less	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
C2011.031b	Hybrid stair assembly with steel stringers and concrete treads and landings with no seismic joints.	Story Drift Ratio	Unit less	0.005	0.6	0.017	0.6	0.028	0.45				
C3011.001a	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.6								
C3011.001b	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Partial Height, Fixed Below, Lateral Braced Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0064	0.3								
C3011.001c	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/ returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.7								
C3011.001d	Wall Partition, Type: Gypsum + Wallpaper, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/o returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.7								
C3011.002a	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.6	0.0071	0.45						
C3011.002b	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Partial Height, Fixed Below, Lateral Braced Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0064	0.3	0.011	0.3						
C3011.002c	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/ returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.7	0.005	0.4						
C3011.002d	Wall Partition, Type: Gypsum + Ceramic Tile, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/o returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.7	0.0093	0.45						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
C3011.003a	Wall Partition, Type: High End Marble or Wood Panel, Full Height, Fixed Below, Fixed Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0021	0.6	0.0071	0.45						
C3011.003b	Wall Partition, Type: High End Marble or Wood Panel, Partial Height, Fixed Below, Lateral Braced Above	Story Drift Ratio	Unit less	0.0064	0.3	0.011	0.3						
C3011.003c	Wall Partition, Type: High End Marble or Wood Panel, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/ returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.002	0.7	0.005	0.4						
C3011.003d	Wall Partition, Type: High End Marble or Wood Panel, Full Height, Fixed Below, Slip Track Above w/o returns (friction connection)	Story Drift Ratio	Unit less	0.0035	0.7	0.0093	0.45						
C3021.001a	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Office - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001b	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Office - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001c	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Laboratory - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001d	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Laboratory - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001e	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Hospital - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001f	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Hospital - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001g	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - School - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001h	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - School - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
C3021.001i	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Apartments - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001j	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Apartments - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001k	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Retail - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001l	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Retail - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001m	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Warehouse - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001n	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Warehouse - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001o	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Hospitality - Dry	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3021.001p	Generic Floor Covering - Flooding of floor caused by failure of pipe - Hospitality - Humid	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
C3027.001	Raised Access Floor, non seismically rated.	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.5								
C3027.002	Raised Access Floor, seismically rated.	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
C3032.001a	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A < 250, Vert support only	Peak Floor Acceleration	g	1.17	0.25	1.58	0.25	1.82	0.25				
C3032.001b	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): 250 < A < 1000, Vert support only	Peak Floor Acceleration	g	1.01	0.25	1.45	0.25	1.69	0.25				
C3032.001c	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): 1000 < A < 2500, Vert support only	Peak Floor Acceleration	g	0.7	0.25	1.2	0.25	1.43	0.25				
C3032.001d	Suspended Ceiling, SDC A,B,C, Area (A): A > 2500, Vert support only	Peak Floor Acceleration	g	0.56	0.25	1.08	0.25	1.31	0.25				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
C3032.003a	Suspended Ceiling, SDC D,E (Ip=1.0), Area (A): A < 250, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.6	0.3	1.95	0.3	2.07	0.3				
C3032.003b	Suspended Ceiling, SDC D,E (Ip=1.0), Area (A): 250 < A < 1000, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.47	0.3	1.88	0.3	2.03	0.3				
C3032.003c	Suspended Ceiling, SDC D,E (Ip=1.0), Area (A): 1000 < A < 2500, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.21	0.30	1.75	0.30	1.95	0.30				
C3032.003d	Suspended Ceiling, SDC D,E (Ip=1.0), Area (A): A > 2500, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.09	0.30	1.69	0.30	1.91	0.30				
C3032.004a	Suspended Ceiling, SDC D,E,F (Ip=1.5), Area (A): A < 250, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.92	0.30	2.34	0.30	2.48	0.30				
C3032.004b	Suspended Ceiling, SDC D,E,F (Ip=1.5), Area (A): 250 < A < 1000, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.76	0.30	2.26	0.30	2.44	0.30				
C3032.004c	Suspended Ceiling, SDC D,E,F (Ip=1.5), Area (A): 1000 < A < 2500, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.45	0.30	2.1	0.30	2.34	0.30				
C3032.004d	Suspended Ceiling, SDC D,E,F (Ip=1.5), Area (A): A > 2500, Vert & Lat support	Peak Floor Acceleration	g	1.31	0.30	2.03	0.30	2.29	0.30				
C3034.001	Independent Pendant Lighting - non seismic	Peak Floor Acceleration	g	0.6	0.40								
C3034.002	Independent Pendant Lighting - seismically rated	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.40								
D1014.011	Traction Elevator – Applies to most California Installations 1976 or later, most western states installations 1982 or later and most other U.S installations 1998 or later.	Peak Floor Acceleration	g	0.39	0.45	0.39	0.45	0.39	0.45	0.39	0.45		
D1014.012	Traction Elevator – Applies to most California Installations prior to 1976, most western states installations prior to 1982 and most other U.S installations prior to 1998.	Peak Floor Acceleration	g	0.31	0.45	0.31	0.45	0.31	0.45	0.31	0.45		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D1014.021	Hydraulic Elevator − Applies to most California Installations 1976 or later, most western states installations postdating 1982 and most U.S installations postdating 1998.	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3		
D1014.022	Hydraulic Elevator − Applies to most California Installations prior to 1976, most western states installations prior to 1982 and most U.S installations prior to 1998.	Peak Floor Acceleration	g	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		
D2061.023a	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2061.023b	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D2061.024a	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2061.024b	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3031.011a	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.2	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.011b	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.2	0.4								
D3031.011c	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.2	0.4								
D3031.011d	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.2	0.4								
D3031.012a	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.012b	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.43	0.6								
D3031.012c	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.012d	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.012e	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.43	0.6								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.012f	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.012g	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.012h	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.43	0.6								
D3031.012i	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.012j	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.012k	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.43	0.6								
D3031.012l	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.013a	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.013b	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.72	0.2								
D3031.013c	Chiller - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.013d	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.013e	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.72	0.2								
D3031.013f	Chiller - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.013g	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.013h	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.72	0.2								
D3031.013i	Chiller - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.013j	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.013k	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.72	0.2								
D3031.013l	Chiller - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.021a	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.021b	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4								
D3031.021c	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4								
D3031.021d	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4								
D3031.022a	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.022b	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.97	0.6								
D3031.022c	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.022d	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.022e	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.97	0.6								
D3031.022f	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.022g	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.022h	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.97	0.6								
D3031.022i	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.022j	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.022k	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.97	0.6								
D3031.022l	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.023a	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.023b	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.52	0.4								
D3031.023c	Cooling Tower - Capacity: < 100 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.023d	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.023e	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.52	0.4								
D3031.023f	Cooling Tower - Capacity: 100 to <350 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.023g	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3031.023h	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.52	0.4								
D3031.023i	Cooling Tower - Capacity: 350 to <750 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3031.023j	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3031.023k	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.52	0.4								
D3031.023l	Cooling Tower - Capacity: 750 to <1000 Ton - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3032.011a	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.45	0.25	0.45						
D3032.011b	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.45	0.25	0.45						
D3032.011c	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.45	0.25	0.45						
D3032.011d	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.45	0.25	0.45						
D3032.012a	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3032.012b	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.47	0.2	0.47	0.2						
D3032.012c	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.012d	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3032.012e	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.47	0.2	0.47	0.2						
D3032.012f	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.012g	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3032.012h	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.47	0.2	0.47	0.2						
D3032.012i	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.012j	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3032.012k	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.47	0.2	0.47	0.2						
D3032.012l	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.013a	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3032.013b	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.84	0.6	1.84	0.6						
D3032.013c	Compressor - Capacity: Small non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.013d	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3032.013e	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.84	0.6	1.84	0.6						
D3032.013f	Compressor - Capacity: Large non medical air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.013g	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3032.013h	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.84	0.6	1.84	0.6						
D3032.013i	Compressor - Capacity: Small medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3032.013j	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3032.013k	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.84	0.6	1.84	0.6						
D3032.013l	Compressor - Capacity: Large medical quality air supply - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3041.001a	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported and vibration isolators, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.92	0.5	2.4	0.5						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3041.001b	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported and vibration isolators, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.92	0.5	2.4	0.5						
D3041.001c	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported and vibration isolators, SDC D, E, F	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	2.6	0.4						
D3041.001d	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported and vibration isolators, SDC D, E, F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	2.6	0.4						
D3041.002a	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported but not on vibration isolators, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4								
D3041.002b	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported but not on vibration isolators, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4								
D3041.002c	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported but not on vibration isolators, SDC D, E, F	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4								
D3041.002d	HVAC Fan In Line Fan, Fan independently supported but not on vibration isolators, SDC D, E, F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4								
D3041.011a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.011b	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.011c	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.011d	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3041.012a	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.012b	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.012c	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	3.75	0.4	4.5	0.4						
D3041.012d	HVAC Galvanized Sheet Metal Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	3.75	0.4	4.5	0.4						
D3041.021a	HVAC Stainless Steel Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.021b	HVAC Stainless Steel Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.021c	HVAC Stainless Steel Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.021d	HVAC Stainless Steel Ducting less than 6 sq. ft in cross sectional area, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.022a	HVAC Stainless Steel Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.022b	HVAC Stainless Steel Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D3041.022c	HVAC Stainless Steel Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	3.75	0.4	4.5	0.4						
D3041.022d	HVAC Stainless Steel Ducting - 6 sq. ft cross sectional area or greater, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	3.75	0.4	4.5	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3041.031a	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.3	0.4								
D3041.031b	HVAC Drops / Diffusers in suspended ceilings - No independent safety wires, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.3	0.4								
D3041.032a	HVAC Drops / Diffusers without ceilings - supported by ducting only - No independent safety wires, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D3041.032b	HVAC Drops / Diffusers without ceilings - supported by ducting only - No independent safety wires, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D3041.032c	HVAC Drops / Diffusers without ceilings - supported by ducting only - No independent safety wires, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D3041.032d	HVAC Drops / Diffusers without ceilings - supported by ducting only - No independent safety wires, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D3041.041a	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4								
D3041.041b	Variable Air Volume (VAV) box with in-line coil, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4								
D3041.101a	HVAC Fan - Capacity: all - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.5	0.4								
D3041.102a	HVAC Fan - Capacity: all - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3041.102b	HVAC Fan - Capacity: all - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1	0.6								
D3041.102c	HVAC Fan - Capacity: all - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3041.103a	HVAC Fan - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3041.103b	HVAC Fan - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	4.8	0.6								
D3041.103c	HVAC Fan - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D3052.011a	Air Handling Unit - Capacity: <5000 CFM - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.4	0.25	0.4						
D3052.011b	Air Handling Unit - Capacity: 5000 to <10000 CFM - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.4	0.25	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3052.011c	Air Handling Unit - Capacity: 10000 to <25000 CFM - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.4	0.25	0.4						
D3052.011d	Air Handling Unit - Capacity: 25000 to <40000 CFM - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.4	0.25	0.4						
D3052.013a	Air Handling Unit - Capacity: <5000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3052.013b	Air Handling Unit - Capacity: <5000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.54	0.6	1.54	0.6						
D3052.013c	Air Handling Unit - Capacity: <5000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3052.013d	Air Handling Unit - Capacity: 5000 to <10000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3052.013e	Air Handling Unit - Capacity: 5000 to <10000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.54	0.6	1.54	0.6						
D3052.013f	Air Handling Unit - Capacity: 5000 to <10000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3052.013g	Air Handling Unit - Capacity: 10000 to <25000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3052.013h	Air Handling Unit - Capacity: 10000 to <25000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.54	0.6	1.54	0.6						
D3052.013i	Air Handling Unit - Capacity: 10000 to <25000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3052.013j	Air Handling Unit - Capacity: 25000 to <40000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D3052.013k	Air Handling Unit - Capacity: 25000 to <40000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.54	0.6	1.54	0.6						
D3052.013l	Air Handling Unit - Capacity: 25000 to <40000 CFM - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D3067.011a	Control Panel - Capacity: all - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.69	0.4								
D3067.012a	Control Panel - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D3067.012b	Control Panel - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3	0.4								
D3067.012c	Control Panel - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D4011.021a	Fire Sprinkler Water Piping - Horizontal Mains and Branches - Old Style Victaulic - Thin Wall Steel - No bracing, SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.1	0.4	2.4	0.5						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D4011.022a	Fire Sprinkler Water Piping - Horizontal Mains and Branches - Old Style Victaulic - Thin Wall Steel - No bracing, SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.1	0.4	2.4	0.5						
D4011.023a	Fire Sprinkler Water Piping - Horizontal Mains and Branches - Old Style Victaulic - Thin Wall Steel - Poorly designed bracing, SDC D, E, or F , PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						
D4011.024a	Fire Sprinkler Water Piping - Horizontal Mains and Branches - Old Style Victaulic - Thin Wall Steel - with designed bracing, SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4	3.4	0.4						
D4011.031a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	0.75	0.4	0.95	0.4						
D4011.032a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	0.75	0.4	0.95	0.4						
D4011.033a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	0.95	0.4								
D4011.034a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.3	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D4011.041a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile HARD ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	0.55	0.4	0.95	0.4						
D4011.042a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into unbraced lay-in tile HARD ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	0.55	0.4	0.95	0.4						
D4011.053a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into braced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D4011.054a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into braced lay-in tile SOFT ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.9	0.4	3	0.4						
D4011.063a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into braced lay-in tile HARD ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	0.55	0.4	1.3	0.4						
D4011.064a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - Dropping into braced lay-in tile HARD ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	1.1	0.4	2.25	0.4						
D4011.071a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - No Ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC A or B	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D4011.072a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - No Ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC C	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D4011.073a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - No Ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F	Peak Floor Acceleration	g	2.6	0.4	3	0.4						
D4011.074a	Fire Sprinkler Drop Standard Threaded Steel - No Ceiling - 6 ft. long drop maximum, SDC D, E, or F (OSHPD or sim)	Peak Floor Acceleration	g	3.75	0.4	4.5	0.4						
D5011.011a	Transformer/primary service - Capacity: <100 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.01	0.6								
D5011.011b	Transformer/primary service - Capacity: 100 to <350 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.01	0.6								
D5011.011c	Transformer/primary service - Capacity: 350 to <750 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.01	0.6								
D5011.011d	Transformer/primary service - Capacity: 750 to 1500 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.01	0.6								
D5011.013a	Transformer/primary service - Capacity: <100 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5011.013b	Transformer/primary service - Capacity: <100 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.5								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5011.013c	Transformer/primary service - Capacity: <100 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5011.013d	Transformer/primary service - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5011.013e	Transformer/primary service - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.5								
D5011.013f	Transformer/primary service - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5011.013g	Transformer/primary service - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5011.013h	Transformer/primary service - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.5								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5011.013i	Transformer/primary service - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5011.013j	Transformer/primary service - Capacity: 750 to 1500 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5011.013k	Transformer/primary service - Capacity: 750 to 1500 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.5								
D5011.013l	Transformer/primary service - Capacity: 750 to 1500 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.013a	Motor Control Center - Capacity: all - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.73	0.45								
D5012.013b	Motor Control Center - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.013c	Motor Control Center - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.5	0.4								
D5012.013d	Motor Control Center - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.021a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.28	0.4								
D5012.021b	Low Voltage Switchgear - Capacity: 350 to <750 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.28	0.4								
D5012.021c	Low Voltage Switchgear - Capacity: 750 to <1200 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.28	0.4								
D5012.021d	Low Voltage Switchgear - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.28	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.023a	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.023b	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.4	0.4								
D5012.023c	Low Voltage Switchgear - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.023d	Low Voltage Switchgear - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.023e	Low Voltage Switchgear - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.4	0.4								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.023f	Low Voltage Switchgear - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.023g	Low Voltage Switchgear - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.023h	Low Voltage Switchgear - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.4	0.4								
D5012.023i	Low Voltage Switchgear - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.023j	Low Voltage Switchgear - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.023k	Low Voltage Switchgear - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.4	0.4								
D5012.023l	Low Voltage Switchgear - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.031a	Distribution Panel - Capacity: 100 to <350 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.16	0.45								
D5012.031b	Distribution Panel - Capacity: 350 to <750 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.16	0.45								
D5012.031c	Distribution Panel - Capacity: 750 to <1200 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.16	0.45								
D5012.031d	Distribution Panel - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.16	0.45								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.033a	Distribution Panel - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.033b	Distribution Panel - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.4								
D5012.033c	Distribution Panel - Capacity: 100 to <350 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.033d	Distribution Panel - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.033e	Distribution Panel - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.4								
D5012.033f	Distribution Panel - Capacity: 350 to <750 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5012.033g	Distribution Panel - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.033h	Distribution Panel - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.4								
D5012.033i	Distribution Panel - Capacity: 750 to <1200 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				
D5012.033j	Distribution Panel - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5012.033k	Distribution Panel - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	3.05	0.4								
D5012.033l	Distribution Panel - Capacity: 1200 to 2000 Amp - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User				

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.011a	Battery Rack - Capacity: all - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.11	0.6	1.11	0.6	1.11	0.6				
D5092.013a	Battery Rack - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.013b	Battery Rack - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.32	0.2	2.32	0.2	2.32	0.2				
D5092.013c	Battery Rack - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.021a	Battery Charger - Capacity: all - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.07	0.4	1.07	0.4						
D5092.023a	Battery Charger - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.023b	Battery Charger - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2.7	0.6	2.7	0.6						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.023c	Battery Charger - Capacity: all - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User		
D5092.031a	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4		
D5092.031b	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4		
D5092.031c	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4		
D5092.031d	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Unanchored equipment that is not vibration isolated - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4	0.9	0.4		
D5092.032a	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.032b	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.032c	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.032d	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.032e	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4		
D5092.032f	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.032g	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.032h	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.032i	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.032j	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.032k	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4	1.07	0.4		
D5092.032l	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Vibration isolated equipment that is not snubbed or restrained - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.033a	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.033b	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.033c	Diesel generator - Capacity: 100 to <350 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.033d	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.033e	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2		
D5092.033f	Diesel generator - Capacity: 350 to <750 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.033g	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.033h	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2		

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D5092.033i	Diesel generator - Capacity: 750 to 1200 kVA - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
D5092.033j	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Anchorage fragility only	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User						
D5092.033k	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Equipment fragility only	Peak Floor Acceleration	g	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2		
D5092.033l	Diesel generator - Capacity: 1200 to 2000 kVa - Equipment that is either hard anchored or is vibration isolated with seismic snubbers/restraints - Combined anchorage/isolator & equipment fragility	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User	By User
E2022.001	Modular office work stations.	Peak Floor Acceleration	g	1	0.4								
E2022.010	Unsecured fragile objects on shelves, unknown restraint	Peak Floor Acceleration	g	0.4	0.6								
E2022.011	Fragile contents secured by museum putty, Velcro or other weak but sticky stuff	Peak Floor Acceleration	g	1	0.5								
E2022.012	Fragile contents on shelves in storage cabinets with latches	Peak Floor Acceleration	g	0.6	0.6								
E2022.013	Unsecured fragile objects on shelves, low friction surface	Peak Floor Acceleration	g	0.25	0.5								
E2022.020	Home entertainment equipment, unknown installation	Peak Floor Acceleration	g	0.8	0.45								
E2022.021	Electronic equipment on wall mount brackets	Peak Floor Acceleration	g	2.5	0.5								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
E2022.022	Desktop electronics including computers, monitors, stereos, etc on a slip resistant surface	Peak Floor Acceleration	g	1	0.5								
E2022.023	Desktop electronics including computers, monitors, stereos, etc, smooth surface	Peak Floor Acceleration	g	0.4	0.5								
E2022.102a	Bookcase, 2 shelves, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.724	0.5								
E2022.102b	Bookcase, 2 shelves, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.103a	Bookcase, 3 shelves, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.493	0.5								
E2022.103b	Bookcase, 3 shelves, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.104a	Bookcase, 4 shelves, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.361	0.5								
E2022.104b	Bookcase, 4 shelves, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.105a	Bookcase, 5 shelves, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.29	0.5								
E2022.105b	Bookcase, 5 shelves, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.106a	Bookcase, 6 shelves, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.251	0.5								
E2022.106b	Bookcase, 6 shelves, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.112a	Vertical Filing Cabinet, 2 drawer, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	1.229	0.5								
E2022.112b	Vertical Filing Cabinet, 2 drawer, anchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	By User	By User								
E2022.114a	Vertical Filing Cabinet, 4 drawer, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.498	0.5								
E2022.114b	Vertical Filing Cabinet, 4 drawer, anchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	By User	By User								
E2022.124a	Lateral Filing Cabinet, 2 drawer, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.688	0.5								
E2022.124b	Lateral Filing Cabinet, 2 drawer, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
E2022.125a	Lateral Filing Cabinet, 4 drawer, unanchored laterally	Peak Floor Velocity	meter /sec	0.526	0.5								
E2022.125b	Lateral Filing Cabinet, 4 drawer, anchored laterally	Peak Floor Acceleration	g	By User	By User								
F1012.001	Storage racks designed and installed before 2007, big box retail (12' to 15' tall)	Peak Floor Acceleration	g	0.42	0.4	0.42	0.4						
D2021.011a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2021.011b	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						
D2021.012a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						
D2021.012b	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						
D2021.013a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2021.013b	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D2021.014a	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2021.014b	Cold or Hot Potable - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4								
D2021.021a	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						
D2021.022a	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.6	0.4						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2021.023a	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC D,E,F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2021.023b	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC D,E,F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D2021.024a	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC D,E,F (OSPHD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	0.4	4.1	0.4						
D2021.024b	Cold or Hot Potable Water Piping (dia > 2.5 inches), SDC D,E,F (OSPHD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	0.4	2.25	0.4						
D2022.011a	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2022.011b	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2022.012a	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2022.012b	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2022.013a	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2022.013b	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2022.014a	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2022.014b	Heating hot Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								
D2022.021a	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						
D2022.022a	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						
D2022.023a	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User	4.1	By User						
D2022.023b	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.25	By User						
D2022.024a	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User	4.1	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2022.024b	Heating hot Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.25	By User						
D2031.011b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/flexible couplings, SDC A,B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2031.012b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/flexible couplings, SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2031.013b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/flexible couplings, SDC D,E,F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2031.014b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/flexible couplings, SDC D,E,F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								
D2031.021a	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC A,B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2031.021b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC A,B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2031.022a	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User								
D2031.022b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2031.023a	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC D,E,F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2031.023b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC D,E,F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2031.024a	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC D,E,F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								
D2031.024b	Sanitary Waste Piping - Cast Iron w/bell and spigot couplings, SDC D,E,F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2051.011a	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2051.011b	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2051.012a	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2051.012b	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2051.013a	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2051.013b	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2051.014a	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2051.014b	Chilled Water Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								
D2051.021a	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						
D2051.021b	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC A or B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2051.022a	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						
D2051.023a	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User	4.1	By User						
D2051.023b	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.25	By User						
D2051.024a	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User	4.1	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2051.024b	Chilled Water Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.25	By User						
D2061.011a	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2061.011b	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC A or B, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2061.012a	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2061.012b	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC C, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.2	By User	2.4	By User						
D2061.013a	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						
D2061.013b	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F, BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	2.25	By User								
D2061.014a	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	0.55	By User	1.1	By User						

NISTIR Classification	Component Name	Demand Parameter	Unit	DS 1		DS2		DS3		DS4		DS5	
				Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD	Mean	stD
D2061.014b	Steam Piping - Small Diameter Threaded Steel - (2.5 inches in diameter or less), SDC D, E, or F (OSHPD or sim), BRACING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	3	By User								
D2061.021a	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC A or B, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						
D2061.022a	Steam Piping - Large Diameter Welded Steel - (greater than 2.5 inches in diameter), SDC C, PIPING FRAGILITY	Peak Floor Acceleration	g	1.5	By User	2.6	By User						

2018 국토교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종보고서【부록 2】

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

경주지진 지진손실 데이터베이스

2019. 02. 07.

▪ 주관연구기관 / 연세대학교
▪ 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
▪ 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

부록 2. 경주지진 지진손실 데이터베이스

※개인정보보호법 관련하여 건축물 위치, 용도 및 손실을 제외하고 피해도만 정리

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
1	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
2	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
3	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
4	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
5	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
6	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
7	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
8	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
9	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
10	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
11	2016년 9월 12일	-	-	소규모 피해
12	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
13	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
14	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
15	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
16	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
17	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
18	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
19	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
20	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
21	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
22	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
23	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
24	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
25	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
26	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
27	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
28	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
29	2016년 9월 12일	-	-	경미한 피해
30	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
31	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
32	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
33	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
34	2016년 9월 12일	-	-	무 피해
35	2016년 9월 12일	-	-	무 피해

2018 국토교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종보고서【부록 3】

과 제 번 호
18CTAP-C129738-02

포항지진 지진손실 데이터베이스

2019. 02. 07.

▪ 주관연구기관 / 연세대학교
▪ 공동연구기관 / (주)쓰리디구조엔지니어링
▪ 위탁연구기관 / 현대해상화재보험(주)

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

부록 3. 포항지진 지진손실 데이터베이스

※개인정보보호법 관련하여 건축물 위치, 용도 및 손실을 제외하고 피해도만 정리

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
1	2017년 11월 15일	-	-	무피해
2	2017년 11월 15일	-	-	무피해
3	2017년 11월 15일	-	-	무피해
4	2017년 11월 15일	-	-	무피해
5	2017년 11월 15일	-	-	무피해
6	2017년 11월 15일	-	-	무피해
7	2017년 11월 15일	-	-	무피해
8	2017년 11월 15일	-	-	무피해
9	2017년 11월 15일	-	-	무피해
10	2017년 11월 15일	-	-	무피해
11	2017년 11월 15일	-	-	무피해
12	2017년 11월 15일	-	-	무피해
13	2017년 11월 15일	-	-	무피해
14	2017년 11월 15일	-	-	무피해
15	2017년 11월 15일	-	-	무피해
16	2017년 11월 15일	-	-	무피해
17	2017년 11월 15일	-	-	무피해
18	2017년 11월 15일	-	-	무피해
19	2017년 11월 15일	-	-	무피해
20	2017년 11월 15일	-	-	무피해
21	2017년 11월 15일	-	-	무피해
22	2017년 11월 15일	-	-	무피해
23	2017년 11월 15일	-	-	무피해

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
24	2017년 11월 15일	-	-	무피해
25	2017년 11월 15일	-	-	무피해
26	2017년 11월 15일	-	-	무피해
27	2017년 11월 15일	-	-	무피해
28	2017년 11월 15일	-	-	무피해
29	2017년 11월 15일	-	-	무피해
30	2017년 11월 15일	-	-	무피해
31	2017년 11월 15일	-	-	무피해
32	2017년 11월 15일	-	-	무피해
33	2017년 11월 15일	-	-	무피해
34	2017년 11월 15일	-	-	무피해
35	2017년 11월 15일	-	-	무피해
36	2017년 11월 15일	-	-	무피해
37	2017년 11월 15일	-	-	무피해
38	2017년 11월 15일	-	-	무피해
39	2017년 11월 15일	-	-	무피해
40	2017년 11월 15일	-	-	무피해
41	2017년 11월 15일	-	-	무피해
42	2017년 11월 15일	-	-	무피해
43	2017년 11월 15일	-	-	경미한 피해
44	2017년 11월 15일	-	-	경미한 피해
45	2017년	-	-	경미한 피해
46	2017년	-	-	경미한 피해

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
47	2017년	-	-	경미한 피해
48	2017년	-	-	경미한 피해
49	2017년	-	-	경미한 피해
50	2017년	-	-	경미한 피해
51	2017년	-	-	경미한 피해
52	2017년	-	-	경미한 피해
53	2017년	-	-	경미한 피해
54	2017년	-	-	경미한 피해
55	2017년	-	-	소규모 피해
56	2017년	-	-	소규모 피해
57	2017년	-	-	소규모 피해
58	2017년	-	-	소규모 피해
59	2017년	-	-	소규모 피해
60	2017년	-	-	소규모 피해
61	2017년	-	-	소규모 피해
62	2017년	-	-	소규모 피해
63	2017년	-	-	소규모 피해
64	2017년	-	-	소규모 피해
65	2017년	-	-	소규모 피해
66	2017년	-	-	소규모 피해
67	2017년	-	-	소규모 피해
68	2017년	-	-	소규모 피해
69	2017년	-	-	소규모 피해
70	2017년	-	-	중규모 피해

건물번호	사고일	사고장소	구조/용도	피해도
71	2017년	-	-	중규모 피해
72	2017년	-	-	중규모 피해
73	2017년	-	-	중규모 피해
74	2017년	-	-	중규모 피해
75	2017년	-	-	중규모 피해
76	2017년	-	-	중규모 피해
77	2017년	-	-	중규모 피해
78	2017년	-	-	대규모 피해
79	2017년	-	-	대규모 피해
80	2017년	-	-	대규모 피해
81	2017년	-	-	대규모 피해
82	2017년	-	-	대규모 피해
83	2017년	-	-	대규모 피해
84	2017년	-	-	대규모 피해
85	2017년	-	-	대규모 피해
86	2017년	-	-	대규모 피해
87	2017년	-	-	대규모 피해
88	2017년	-	-	대규모 피해
89	2017년	-	-	대규모 피해
90	2017년	-	-	대규모 피해
91	2017년	-	-	대규모 피해
92	2017년	-	-	대규모 피해
93	2017년	-	-	대규모 피해