

발 간 등 록 번 호	비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발 최종보고서
11-1613000-001918-01	

R&D
15CTAP-C0974438-01

비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발 최종보고서

2017. 09. 14.

주관연구기관 / (재)한국건설생활환경시험연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

15CTAP-
C0974438
-01

비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발 최종보고서

2017

국토교통과학기술진흥원
국토교통부



국립중앙도서관 출판예정도서목록(CIP)

비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴 모드 및 연속
지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발 [전자자료] : 최종
보고서 / 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원 [편]. -- [세
종] : 국토교통부 ; [안양] : 국토교통과학기술진흥원, 2017
전자책 책

참고문헌 수록

ISBN 979-11-957371-3-0 95540 : 비매품

내진 구조[耐震構造]

철근 콘크리트 구조[鐵筋—構造]

544.72-KDC6

693.852-DDC23

CIP2017023293

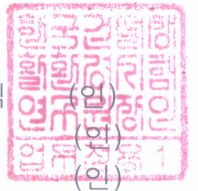
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발’(연구개발 기간 : 2015. 06.18 ~ 2017. 06. 17) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2017 . 09 . 14.

주관연구기관명 : (재)한국건설생활환경시험연구원 (대표자) 김 경 식
협동연구기관명 : (대표자)
참여기관명 : (대표자)



주관연구기관책임자: 천 주 현
협동연구기관책임자:
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C09 7438-01	해당 단계 연구 기간	2년	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야 창조형모험			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법 개발			
연구책임자	천주현	해당단계 참여 연구원 수	총: 5 명 내부: 5 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 5 명 내부: 5 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국건설생활환경시험연구원 첨단건설재료센터			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
[요약]				보고서 면수: 171 페이지	
■ 본 연구는 지진시 큰 피해가 발생할 것으로 예상되는 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드(휨항복후 전단파괴, 전단파괴) 및 조적채움벽을 기준으로 지진발생으로 인한 손상을 정량적으로 평가하고 손상정도에 따른 잔류내진성능 및 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기술을 개발하고자 하는 것임 ■ 정적실험, 정적 및 동적 연속실험, 동적실험과 비선형 지진응답해석을 통하여 비내진상세를 가지며 휨항복후 전단파괴 기동을 가지는 철근콘크리트 골조, 전단파괴 기동을 가지는 철근콘크리트 골조, 조적채움벽체를 가지는 철근콘크리트 골조에 대하여 지진시 잔류내진성능 및 연속지진에 대한 붕괴위험도를 평가하기 위한 손상도별 내진성능저감계수 및 붕괴위험지수를 제시하였음					

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	□ 본 연구는 지진시 큰 피해가 발생할 것으로 예상되는 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 파괴모드(휨항복후 전단파괴, 전단파괴)와 조적채움벽을 기준으로 지진발생으로 인한 손상을 정량적으로 평가하고 손상정도에 따라 잔류내진성능을 평가할 수 있는 기술과 이를 바탕으로 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기술을 개발하고자 하는 것임 □ [연구내용 1] 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 기동 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발 ■ 휨항복후 전단파괴하는 기동을 가지는 철근콘크리트 골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발 ■ 전단파괴 철근콘크리트 기동의 손상도 평가기법 제시 ■ 전단파괴 기동을 가지는 철근콘크리트 골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발 □ [연구내용 2] 비내진상세를 가지는 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발 ■ 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 손상도 평가기법 제시 ■ 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발 □ [연구내용 3] 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법 개발 ■ 기동 파괴형식에 따른 철근콘크리트 골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법 개발 ■ 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법 개발
연구개발성과	□ 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 기동 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가기법 ■ 휨항복후 전단파괴하는 기동을 가지는 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시 ■ 전단파괴 기동을 가지는 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시 □ 비내진상세를 가지는 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법 ■ 조적채움벽 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시 □ 비내진상세를 가지는 철근콘크리트 골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법 ■ 휨항복후 전단파괴하는 기동을 가지는 RC골조의 붕괴위험지수 제시 ■ 전단파괴 기동을 가지는 RC골조의 붕괴위험지수 제시 ■ 조적채움벽 RC골조의 붕괴위험지수 제시
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ (재난대비) 국민안전처에서 단계적으로 추진 중인 공공시설물의 내진보강사업에 활용하여 한정된 예산과 자원의 낭비 방지 □ (재난대비) 국토교통부 소관 성능기반 내진설계기준 제·개정에 활용 □ (재난대응) 지진발생시 시설물의 신속하고 정확한 긴급 위험도 평가에 활용
핵심어 (5개 이내)	비내진상세 연속지진 붕괴위험도 파괴모드 철근콘크리트

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	☐ The purpose of this study is to quantitatively evaluate the damage caused by earthquakes based on the failure modes (shear failure after yielding and shear failure) of reinforced concrete frames with non-seismic details, and to predict the residual seismic capacity and risk of collapse according to the degree of damage. ☐ Development of the residual seismic performance evaluation method for the degree of damage according to the type of column failure of reinforced concrete frame with non-seismic detail ■ Damage index and residual seismic performance : reinforced concrete frame with the shear failure column after yielding and shear failure column ☐ Development of the residual seismic capacity evaluation method for the damage degree of reinforced concrete masonry-infilled frame with non-seismic detail ■ Damage index and residual seismic performance : reinforced concrete frame with masonry infill wall ☐ Development of the risk of collapse reinforced concrete frame with non-seismic detail ■ Risk of collapse according to the multiple earthquakes based on the failure modes (shear failure after yielding and shear failure) and masonry infill of reinforced concrete frames				
Results	☐ Seismic performance reduction factor of the reinforced concrete frame with the shear failure column after yielding ☐ Seismic performance reduction factor of the reinforced concrete frame with the shear failure column ☐ Seismic performance reduction factor of the reinforced concrete frame with the masonry infill wall ☐ Collapse risk index of the reinforced concrete frame with the shear failure column after yielding ☐ Collapse risk index of the reinforced concrete frame with the shear failure column ☐ Collapse risk index of the reinforced concrete frame with the masonry infill wall				
Expected Contribution	☐ (Prevention) Preventing waste of limited budget and resources by applying to the earthquake-reinforcing project of public facilities ☐ (Preparedness) Applying to the establishment and revision of the performance-based seismic design standard ☐ (Response) Used to evaluate the rapid and accurate emergency risk of facilities in case of an earthquake				
Keywords	Non-seismic Detail	Consecutive Earthquakes	Collapse Hazard	Failure Mode	Reinforced Concrete

영문 목차

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1. Background and Objectives	1
2. Significance	1
3. Scope	4
CHAPTER 2 TECHNOLOGY REVIEW	5
1. Earthquake Damage Cases	5
2. Influence of Masonry Infill Wall	8
3. Residual Seismic Performance Evaluation	14
CHAPTER 3 R&D CONTENT AND ACHIEVEMENT	21
1. Tests of the RC Frames	21
2. Non-linear Seismic Analysis of the RC Frames	95
3. Evaluation of Residual Seismic Capacity and Collapse Risk	150
4. Research Achievement	159
CHAPTER 4 R&D GOAL ACHIEVEMENT AND CONTRIBUTION TO RELEVANT FIELD	160
1. Goal Achievement	160
2. Contribution to Relevant Field	161
CHAPTER 5 UTILIZATION PLAN OF R&D ACHIEVEMENT	162
CHAPTER 6 OVERSEAS SCIENCE AND TECHNOLOGY INFORMATION	163
CHAPTER 7 SECURITY RATING OF R&D ACHIEVEMENT	165
CHAPTER 8 RESEARCH FACILITIES AND EQUIPMENT REGISTERED IN NTIS	166
CHAPTER 9 IMPLEMENTATION OF SAFETY MEASURES IN LABORATORIES	167
CHAPTER 10 REPRESENTATIVE R&D ACHIEVEMENT	168
CHAPTER 11 OTHERS	169
CHAPTER 12 REFERENCES	170

< 목 차 >

제1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 목적	1
2. 연구개발 필요성	1
3. 연구개발 범위	4
제2장. 국내외 기술 개발 현황	5
1. 지진피해 사례 분석	5
2. 조적채움벽의 영향	8
3. 잔류내진성능평가	14
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	21
1. RC 골조의 내진성능 검증실험	21
2. RC 골조의 비선형 지진응답해석	95
3. RC 골조의 잔류내진성능 및 붕괴위험도 평가	150
4. 연구 성과	159
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	160
1. 목표 달성도	160
2. 관련 분야 기여도	161
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	162
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	163
제7장. 연구개발성과의 보안등급	165
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	166
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	167
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	168
제11장. 기타 사항	169
제12장. 참고 문헌	170

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 본 연구에서는 지진발생시 큰 피해발생이 예상되는 비내진상세를 가지는 저층 건축물을 대상으로 파괴형식에 따른 정량적 손상도 평가기법을 정립하고 손상정도에 따른 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법을 개발하고자 함
 - 비내진상세의 건축물의 전단파괴 등의 취성적인 파괴형태를 보일 수 있음
 - 비내진상세를 가지는 저층 건축물 중, 경찰서, 소방서 등 공공건축물과 학교건축물로 대표되는 RC 골조, 조적채움벽 RC 골조를 대상으로 함
 - 지진의 불확실성을 고려하여 실제 건축물에 작용하는 지진입력을 모사할 수 있는 진동대를 이용한 지진모의실험을 통하여 건축물의 동적거동을 평가하고자 함
 - 정적실험과 진동대 실험을 연속적으로 실시하여 여진으로 인한 붕괴위험성을 평가하고자 함
 - 진동대 실험으로 부족한 부분은 비선형 지진응답해석을 통하여 평가 및 보완함

2. 연구개발 필요성

- 최근 중국, 아이티, 일본, 네팔 등 전 세계적으로 대규모 지진이 발생하고 있으며, 이로 인하여 과거에는 볼 수 없었던 막대한 규모의 인명 및 재산 피해가 발생하고 있음

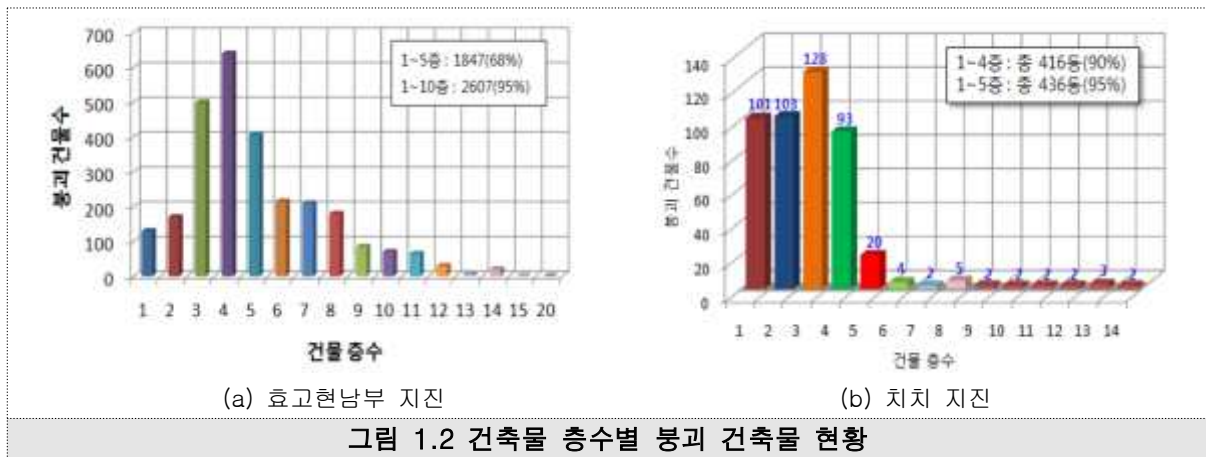


표 1.1 주요지진 피해사례

명 칭	지 역	발 생 일	규모 (M)	사망자 및 실종자수 (명)
네팔 지진	네팔	2015/04/25	7.9	7,250 (5.1.현재 사망자수)
동일본 지진	일본	2011/03/11	9.0	22,941
아이티 지진	아이티	2010/01/12	7.0	300,000
쓰촨성 지진	중국	2008/05/12	8.0	121,000
무자파라바드 지진	파키스탄	2005/10/08	7.6	86,000
수마트라 지진	인도네시아	2004/12/26	9.1	283,100
구자라트 지진	인도	2001/01/26	7.7	20,085
치치 지진	타이완	1999/09/21	7.6	2,100
이즈미트 지진	터키	1999/08/17	7.4	15,657
효고현남부 지진	일본	1995/01/17	7.2	6,432

□ 지진피해 규모의 증가는 지진규모의 증가보다는 급격한 도시화 및 산업화로 인한 밀집현상에 의한 것으로, 특히 지진발생 규모에 비하여 내진능력이 상당히 부족한 저층 건축물의 증가가 가장 큰 원인으로 여겨지고 있음

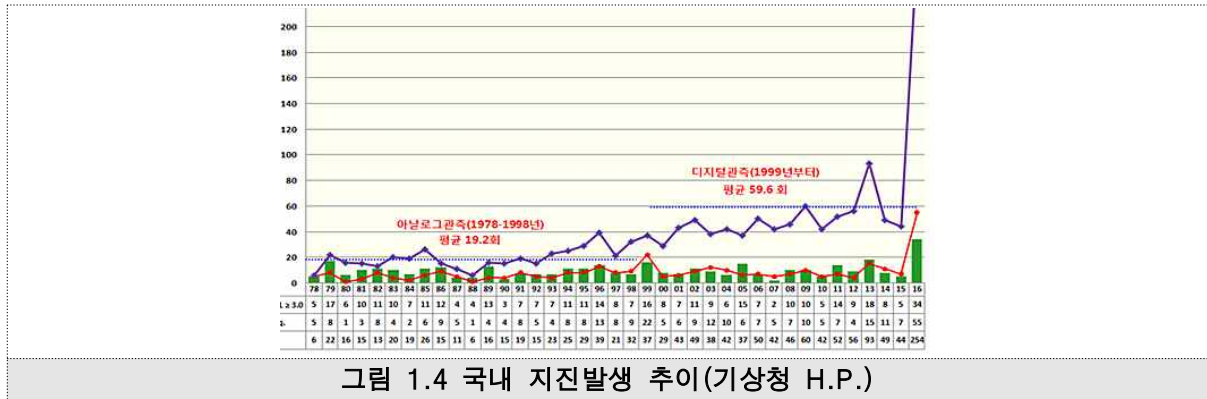
- 효고현남부 지진(일본, 1996) 당시 붕괴된 전체 건축물 수에 비하여 10층 이하 건축물 수는 약 95%, 5층 이하 저층 건축물 수는 약 68%를 차지하였음
- 치치 지진(타이완, 1999)에서도 전체 붕괴건축물 중 95%가 5층 이하 저층 건축물이었음



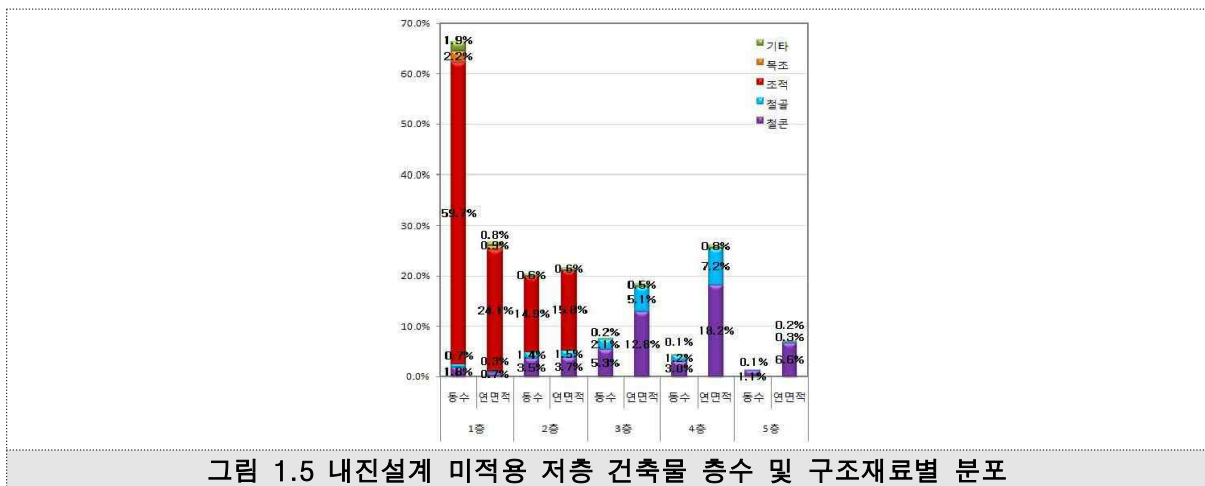
- 쓰촨성 지진(중국, 2008), 라퀼라 지진(이탈리아, 2009) 당시 조적조 또는 노후화된 중·저층 철근콘크리트조 건축물에 피해가 집중하여 발생하였음



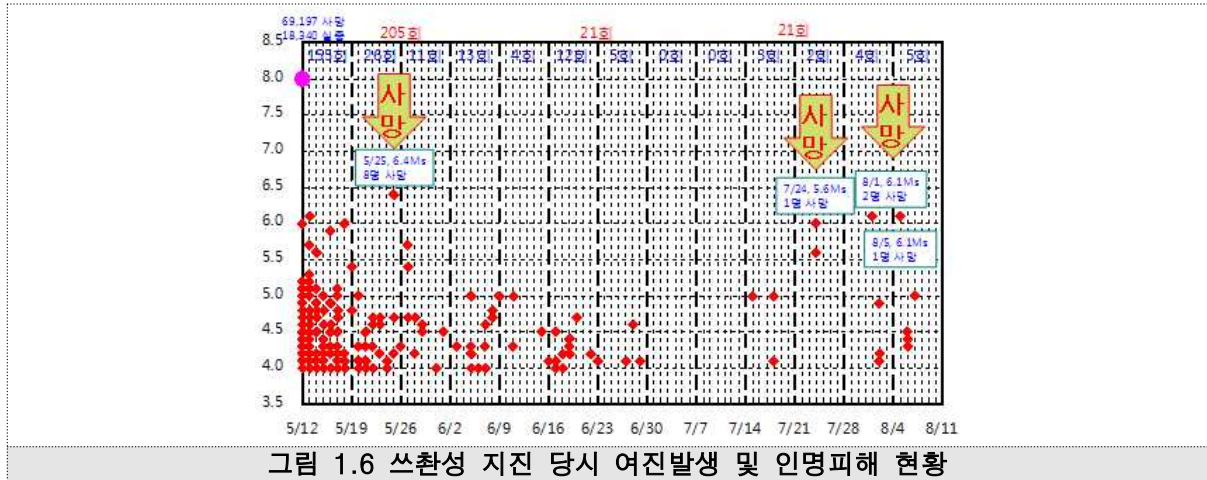
- 한반도에서도 1999년부터 매년 평균 59.6회의 지진이 발생하고 있으며, 2016년에는 경주지진(규모 5.8로 관측 이래 최대 규모)을 포함하여 규모 3.0이상의 지진이 34회 발생하는 등 국내 지진발생 빈도뿐만 아니라 규모가 증가하고 있어 대규모 지진발생 위험성이 증가하고 있는 실정임
- 1999년 부터 2016년까지 연평균 59.6회 지진이 발생하였으며 2016년에는 254회 지진발생



- 2013년 백령도 지진, 2016년도 경주 지진 등 중규모 이상의 지진을 포함하는 연속지진 발생빈도가 증가하고 있는 추세임
- 2016년 9월 경주지진 발생 이후, 578회 여진(규모 4.0 ~ 5.0 : 1회, 규모 3.0 ~ 4.0 : 20회, 규모 1.5 ~ 3.0 : 557회, 2017. 2. 3 기준)이 지속적으로 발생
- 2013년도 5월에는 백령도에서 전진, 본진 및 여진을 포함하여 총 16회 지진발생(최대 규모 4.9)
- 국내의 경우, 5층 이하 저층 건축물이 전체 건축물의 97.5%(660만동, 2010년 6월 기준)에 달하며, 이 중 97.5%는 내진설계가 실시되지 않아 지진발생시 큰 피해 발생이 우려됨.
- 내진설계가 실시되지 않은 건축물 중 1, 2층의 조적조 건축물이 74.6%로 가장 많이 분포하며, 1~5층의 철근콘크리트조 건축물이 17.8%로 그 다음으로 많이 분포하는 것으로 나타남



- 지진은 전진-본진-여진으로 연속하여 발생하며 가장 규모가 큰 본진으로 손상을 입지 않은 건축물도 여진으로 손상을 입거나 붕괴될 수 있으며, 이에 따라 2차 인명 및 재산 피해가 발생할 수 있음
- 건축물의 여진으로 인한 붕괴 위험성은 건축물의 구조형식, 지진거동(파괴형식) 등에 큰 영향을 받음
- 건축물의 지진에 대한 파괴형식은 취성적 파괴와 연성적 파괴로 나뉘어 수 있으며, 취성적으로 파괴되는 건축물의 경우, 건축물의 급격한 붕괴로 대피시간 확보가 어려움에 따라 인명 피해가 커질 수 있음



- 국내에서도 지진발생 빈도 및 규모가 증가하고 있으며, 연속지진이 발생하는 등 지진발생 위험성이 증가하고 있으며, 또한, 국내 건축물의 대부분을 차지하는 저층 건축물이 내진설계가 되어 있지 않아 대규모 지진발생 시 큰 피해가 발생할 것으로 예상됨

3. 연구개발 범위

- 본 연구에서는 지진발생시 큰 피해발생이 예상되는 비내진상세를 가지는 저층 건축물을 대상으로 파괴형식에 따른 정량적 손상도 평가기법을 정립하고 손상정도에 따른 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법을 개발하고자 하며, 이를 위하여 다음과 같은 내용의 연구개발을 수행함
- 비내진상세를 가지는 RC골조의 기둥 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가
 - 비내진상세를 가지는 조적채움벽 RC골조의 손상도별 잔류내진성능 평가
 - 비내진상세를 가지는 RC골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가

[비내진상세 RC골조의 손상정도에 따른 잔류내진성능 평가]

1. 기둥 파괴모드 : 휨항복후 전단파괴

- (해석) 실험결과 보완 및 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발

2. 기둥 파괴모드 : 전단파괴

- (실험) 정량적 손상도 평가기법 개발 및 잔류내진성능 평가
- (해석) 실험결과 보완 및 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발

3. 조적채움벽

- (분석) 국내·외 관련 연구 분석을 통한 내진거동평가
- (실험) 정량적 손상도 평가기법 개발 및 잔류내진성능 평가
- (해석) 실험결과 보완 및 손상도별 잔류내진성능 평가기법 개발



4. 비내진상세 RC골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가

- 기둥 파괴모드 및 조적채움벽에 의한 붕괴위험도 평가

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 지진피해 사례 분석

가. 국내

(1) 홍성 지진

- 1978년 10월 7일 충청남도 홍성군 홍성읍에서 발생한 M5.0 규모의 지진
- 홍성군청을 중심으로 반경 500 m 내에 피해가 집중하여 발생하였으며, 건축물의 경우, 대부분 조적조의 주택, 학교, 공공건물에 피해 발생
 - 건축물 피해 : 13동 반파, 41동 부분파손, 1,000여동 균열 발생
 - 조적조, 농촌주택, 토담집에 피해 집중



(2) 영월 지진

- 1996년 12월 13일 강원도 동쪽 약 20 km에서 발생한 M4.5 규모의 지진
- 조적벽체 균열, 철근콘크리트 골조와 조적벽체 경계면 균열, 마감재 균열 등의 피해 발생



(3) 오대산 지진

- 2007년 1월 20일 강원도 평창군 도암면-진부면 경계지역에서 발생한 M4.9 규모의 지진
- 노후 조적조 건축물의 벽체에 균열이 발생하였으며, 조적벽체와 지붕슬래브 간 분리 및 기와탈락, 유리창 파손 등의 피해 발생

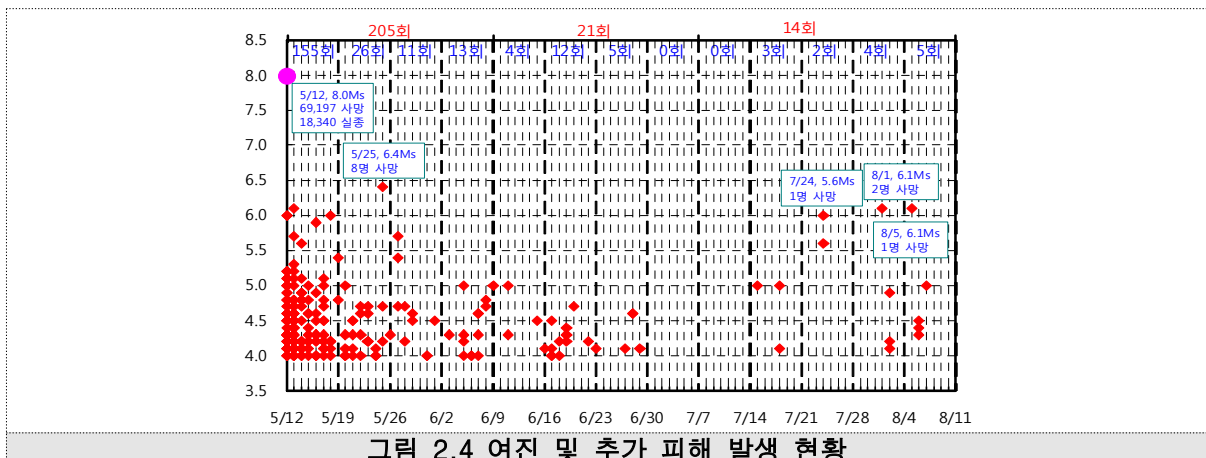
- 건축물 피해 : 벽체 균열이 대부분이며, 주로 조적 이음 부위에서 발생



나. 국외

(1) 쓰촨성 대지진(중국)

- 2008년 5월 12일 중국 청두 북서쪽 약 75 km 지역에 위치한 원찬현에서 발생한 M8.0 규모의 지진
 - M6.4규모의 여진을 포함하여 약 28,000여회의 여진이 발생하였으며, 이로 인한 추가 피해발생
- (피해현황) 인명피해 46만여명(사망 69,227명, 실종 17,824명, 부상 37만여명) 및 건물피해 450만동 등 재산피해 160조원
- 조적조 또는 노후화된 중·저층 철근콘크리트조 건축물에 피해 집중
 - 중·저층 학교건축물의 붕괴로 교사와 학생에게 많은 피해 발생
 - 무보강 조적조 및 조적조 건축물
 - 연성 구조부재 부족으로 큰 피해 발생
 - 조적벽체의 전단파괴, 중공 프리캐스트 콘크리트 슬래브의 정착불량으로 인한 탈락 등





(2) 라퀼라 지진(이탈리아)

- 2009년 4월 6일 이탈리아 라퀼라에서 발생한 M6.3 규모의 지진
 - 250여회 이상 여진이 발생하였으며, 이로 인한 추가 피해발생
- (피해현황) 인명피해 39,648명(사망 297명, 이재민 39,351명) 및 건물피해 1만여 동
- 조적조 또는 노후화된 중·저층 철근콘크리트 주거 건축물 및 문화재 건축물에 피해 집중
 - 문화재 건축물 : 대다수가 비보강 조적조로 건축물 붕괴, 지붕 및 벽체 등 주요 구조부에 손상 발생
 - 주거 건축물 : 대부분의 주거 건축물이 비보강 조적조 및 철근콘크리트조로 비보강 조적벽체의 사인장 균열발생, 구조체 탈락 및 건축물 붕괴 등의 피해 발생



(3) 크라이스트처치 지진(뉴질랜드)

- 2011년 2월 21일 뉴질랜드 크라이스트처치에서 발생한 M6.3 규모의 지진
- 저층 건축물의 경우, 조적조 건축물(문화재 건축물, 주택 등)에서 큰 피해 발생
 - 문화재 건축물 : 전파 혹은 대파의 큰 피해 발생
 - 주택 : 조적벽체의 면외방향 파괴 발생, 면내방향의 경우, 조적벽체에 큰 피해가 발생하였음에도 목조 혹은 철골조 프레임의 영향으로 붕괴는 거의 발생하지 않음



(a) 조적조 문화재



(b) 조적조 주택

그림 2.8 크라이스트처치 지진에 의한 조적조 건축물 피해 사례

2. 조적채움벽의 영향

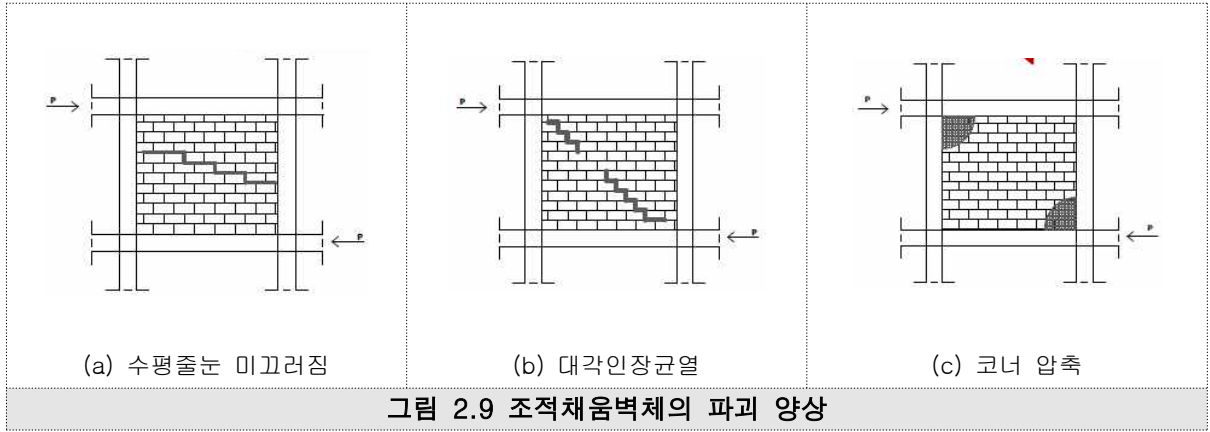
가. 국내외 기준

- 국내외 기준에서는 조적채움벽을 비구조요소로 간주하고 구조설계 시 조적채움벽의 지진에 대한 구조적 영향을 고려하지 않는 경우가 대부분임
 - 조적채움벽은 골조의 초기강성 및 강도를 증가시키는 효과가 있으나, 재료특성 변화, 취성적 파괴 모드 등으로 인하여 거동을 예측하기 어려움
 - 조적벽체가 골조뿐만 아니라 구조물 전체의 지진거동에 미치는 영향이 명확히 규명되지 않은 상태임

(1) FEMA 306

- 조적채움벽의 수평하중에 대한 거동
 - 수평줄눈 미끄러짐(Bed-Joint Sliding)
 - 형상비가 크고, 모르타르 강도가 조적개체보다 낮은 경우에 주로 발생
 - 변형능력의 한계가 없어 마찰에 의하여 지속적인 에너지 소비 가능
 - 대각인장균열(Diagonal Cracking)
 - 인장 변형률이 균열발생시 변형률보다 커지면 발생
 - 큰 수평하중을 받을 때 발생
 - 코너 압축(Corner Compression)
 - 압축력을 받는 코너부의 큰 응력 집중으로 발생
 - 기둥과 보의 강도, 강성이 클 경우, 모서리 부분의 압괴는 상대적으로 적은 범위에서 발생

- 기둥과 보의 강도, 강성이 작은 약한 골조의 경우, 압괴가 골조까지 확대될 수 있음
- 면외 파괴(Out-of-Plane Failure)
 - (하부층) 면내 전단력과 결합하여 조적벽의 면외 방향 파괴(탈락) 발생



□ 조적채움벽의 파괴모드를 고려하여 조적채움벽의 전단강도식 제시

- 미끄러짐 전단파괴(Sliding-Shear Failure)

$$V_{slide}^i = (\tau_0 + \sigma_y \tan \phi) L_i t_i = \mu N \quad (2.1)$$

여기서, V_{slide}^i : 미끄러짐 전단강도(lb), τ_0 : 모르타르 접착강도, σ_y : , ϕ : 조적조 수평줄눈의 미끄러짐 마찰각, L_i : 조적채움벽 길이(in), t_i : 조적채움벽 두께(in)

- 등가 대각스트럿 압축파괴(Compression Failure)

$$V_c = a t_i f'_{me90} \cos \theta \quad (2.2)$$

$$a = 0.175 (\lambda_1 h_c)^{-0.4} \gamma_i \quad (2.3)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_i \sin 2\theta}{4 E_{fe} I_c h_i} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_i}{L_i} \right) \quad (2.5)$$

여기서, V_c : 등가 대각스트럿 압축파괴 강도(lb), a : 등가스트럿 폭(lb), f'_{me90} : 프리즘 압축강도의 50%(psi), h_c : 보 중심에서의 기둥높이(in), γ_i : 조적채움벽 대각 길이(in), E_{me} : 조적채움벽 사용재료 탄성계수(in⁴), E_{fe} : 프레임 사용재료 탄성계수(in⁴), I_c : 기둥의 단면2차모멘트(in⁴), h_i : 조적채움벽 높이(in)

- 조적채움벽의 대각인장파괴(Diagonal Tension Failure of Panel)

$$V_{cr} = \frac{2\sqrt{2}t_i\sigma_{cr}}{\left(\frac{L_i}{h_i} + \frac{h_i}{L_i}\right)} \quad (2.6)$$

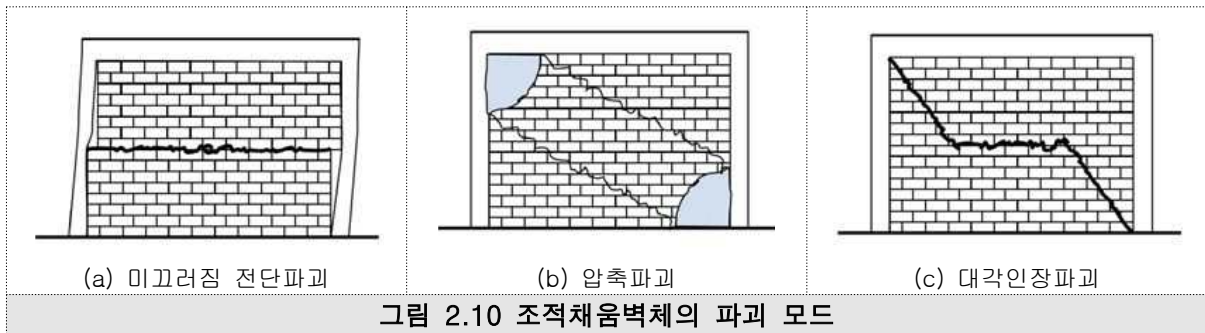
$$\sigma_{cr} = \frac{f'_{me90}}{20} \text{ (psi)} \quad (2.7)$$

여기서, V_{cr} : 대각인장 강도(lb)

- 조적채움벽의 일반적인 파괴(General Shear Failure of Panel)

$$V_{mf} = 0.3(A_{vh}2\sqrt{f'_{me}}) \quad (2.8)$$

여기서, V_{cr} : 반복하중에 의한 최종 전단강도(lb), A_{vh} : 조적채움벽 단면적(in²), f'_{me} : 프리즘 압축강도(psi)



나. 국내외 기존 문헌

(1) 국외

- 1950년대 후반 이후 조적채움벽 RC 골조에 대한 실험적 및 해석적 연구가 진행되어왔으나, 조적채움벽이 RC 골조의 내진취약성을 증가 혹은 감소시키는지 명확하게 규명된 것은 없는 실정임
 - 조적채움벽은 건축물의 성능에 유리 또는 불리하게 작용할 수 있음(P. Negro and a. Colombo, 1997; A. Hashemi and K. Mosalam, 2007)
 - 조적채움벽은 RC 골조의 횡저항능력을 향상시킬 수 있으나, 기둥의 취성파괴를 유발할 수도 있음. 특히, 채움벽이 강할 경우 주의 필요
 - (내진취약성 증가) 조적채움벽은 골조의 응답에 불리한 영향을 끼치며, 건축물의 붕괴를 유발할 수 있음
 - 조적채움벽은 구조물 전체에 규칙적으로 배치되고, 기둥의 전단파괴를 유발하지 않으면 구조 응답에 효과적일 수 있음(Dolsek and Fajfar Column, 2008)
- 조적채움벽은 골조의 강성을 증가시켜 변형을 제한하는 효과가 있음
 - 바람이나 규모가 작은 지진에는 효과적이거나, 규모가 큰 지진에 대해서는 부정적인 영향을 미칠 수 있음(M. Aliaari and A.M. Memari, 2005)

- 조적채움벽의 효과를 무시하는 것은 안전한 내진설계가 아닐 수 있음(A. Colombo et al, 1998)
 - 조적채움벽이 단순히 구조물의 수평 내력만 향상시킨다는 가정은 구조물의 에너지흡수능력을 과대평가하여 심각한 구조적 손상과 구조물 붕괴를 초래할 수 있음

[주요 실험적 연구]

- 실제 구조물의 2/3 크기의 3층 2경간 시험체를 대상으로 하여 조적채움벽 유무를 변수로 진동대 실험 실시한 결과, 시험체는 최종적으로 취성파괴 되었으나, 설계 수준의 지진동에 대하여 만족할 만한 성능을 보임(A. Stavridis et al, 2011)
 - 설계하중 수준의 지진에 대하여 경미한 균열이 발생하였으며, 설계 최대하중 보다 43% 큰 지진에 대하여 RC 기둥에 심각한 전단균열이 발생함



그림 2.11 시험체 형상

- 1층 1×2경간 시험체에 대한 진동대 실험 결과, 조적채움벽은 시험체 전체의 강도 및 연성에 중요한 역할을 하는 것으로 나타남(A. Hashemi et al, 2006)
 - (전체 거동) 조적채움벽에 의하여 골조의 강성 증가(3.8), 고유주기 감소(50%), 감쇠정수 증가(4, 5~12%), 흡수에너지 증가
 - (국부 거동) 조적채움벽은 인접 부재에 입력되는 하중의 크기를 증가시킴(조적채움벽은 다이아프램과 collector 부재에 입력되는 하중을 30% 증가시킴)으로써 서로 다른 부재간의 하중 경로와 분포를 변화시킴



그림 2.12 시험체 형상

- 실규모 3층 1×2경간 시험체에 대한 정적반복가력실험을 통하여 조적채움벽 효과를 확인함(S. Pujol et al, 2008)

- 조적채움벽에 의하여 강도(100%) 및 강성(500%) 증가
- 변형능력은 감소(50%)하지만 층간변형각 1.5% 까지 높은 내하력을 유지하는 것으로 나타남.



그림 2.13 시험체 형상

- 1/3스케일 1층 1경간 시험체의 정적반복가력실험을 통하여 개구부 형상, 조적채움재료의 압축강도 등에 따른 조적채움벽의 RC 골조와의 영향 평가(D. J. Kakaletsis et al, 2008)
- 변수 : 조적채움벽 유무, 조적채움벽 개구부 형상, 조적채움벽 압축강도
 - 개구부가 있는 조적채움벽도 RC 골조의 성능을 향상시킬 수 있음
 - 조적채움벽의 균열 수평 내력이 기둥의 허용 전단 내력보다 작으면 개구부 유무에 상관없이 골조의 취성적 파괴를 막을 수 있음
 - 압축강도가 큰 조적채움재료를 사용한 경우 성능(하중, 강성, 연성, 에너지흡수능력)이 더 향상됨.
 - 압축강도가 큰 재료일수록 균열이 더 잘 분산되므로 에너지흡수에 효과적임
 - 수평변위가 작은 경우, 개구부가 있는 시험체의 에너지흡수능력이 조적채움벽이 없는 시험체보다 크지만, 수평변위가 큰 경우, 조적채움벽에 없는 시험체와 비슷한 수준의 에너지흡수능력을 보임

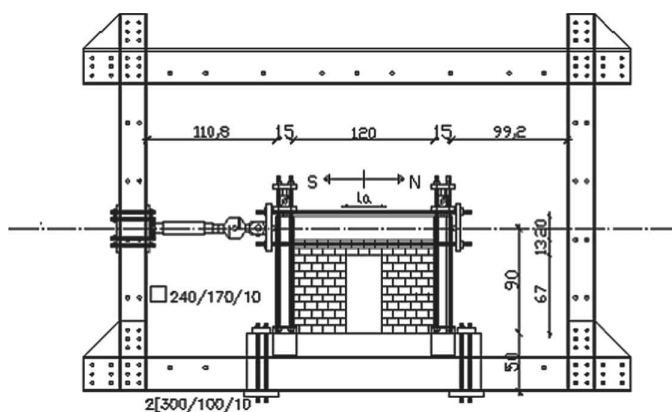
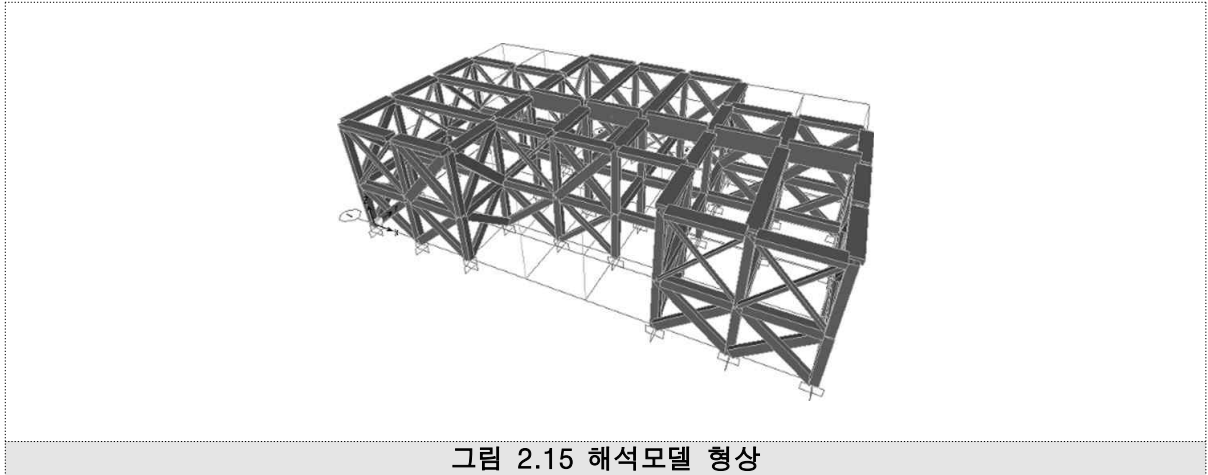


그림 2.14 시험체 형상

- 3층의 인접한 두 개의 건축물(RC 골조, 조적채움벽 RC 골조)의 진동 측정 결과, 조적채움벽 RC 골조 건축물이 RC 골조 건축물과 비교하여 주기가 짧고 강성이 약 7배 큰 것으로 나타남(Amar A. Chaker et al, 1999)

[주요 해석적 연구]

- 조적채움벽과 RC 골조의 상호작용을 N2 Method에 의하여 해석적으로 평가하였으며, 그 결과 강한 조적채움벽은 건축물의 예상 구조 반응을 변화시킬 수 있는 것으로 나타남(G. Uva et al, 2012)
 - N2 Method : 다자유도 및 1자유도 모델에 대한 비선형 정적응답 해석(pushover analysis) 실시
 - 조적채움벽이 전체 구조물 응답에 미치는 영향은 변수에 크게 좌우되기 때문에, 조적채움벽의 역학적 특성을 정확히 아는 것이 중요함



- 실제 건축물과 지진파를 이용하여 3차원 비선형 지진응답해석을 실시한 결과, 조적채움벽은 지진시 해당 건축물이 선형 거동에 머무를 수 있도록 중요한 역할을 한 것으로 나타남(H. Mostafaei, 2004)

(2) 국내

- (1988~2000년대 초반) 조적채움벽 효과에 대한 실험적 연구가 대부분으로 조적채움벽이 RC 골조의 강도를 증가시키는 것으로 나타남
 - 개구부 유무, 실험조건 등에 차이는 있으나, 조적채움벽 RC 골조의 수평 내력은 순수 RC 골조의 수평 내력 보다 커지는 것으로 나타남
 - 조적채움벽 개구부 주변에 철근콘크리트 인방으로 보강하였을 경우, 수평 내력뿐만 아니라 연성도 증가하는 것으로 나타남
- (2000년대 후반 이후) 국내 기존 문헌의 대부분은 등가 대각압축 스트럿 모델을 이용한 조적채움벽 RC 골조의 해석적 내진성능 평가관련 연구이며, 조적채움벽체는 구조물의 강도는 증가시키나 연성은 감소시키는 것으로 나타남
- 등가 대각압축 스트럿 모델을 이용하여 조적채움벽의 배치 형태와 개구부로 인한 비대칭 평면의 저층 철근콘크리트 건축물의 지진거동 양상을 평가한 결과, 조적채움벽에 의하여 설계 시 의도하지 않은 연약층이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 저층부 주요부재에 소성변형이 집중되고, 저층부의 부분적인 손상이 전체 시스템에 심각한 손상을 초래할 수 있는 것으로 나타남(고현, 2010)
- 비선형 정적해석을 통하여 학교 건축물에서의 조적채움벽의 영향을 평가한 결과, 조적채움벽은 구조물의 강도를 증가시키나 연성은 감소시키는 것으로 나타남(이상현 등, 2010)

- 조직채움벽은 힘의 전달메커니즘을 변화시켜 기둥에 전달되는 전단력과 휨모멘트는 감소하나 축력은 증가함

3. 잔류내진성능평가

가. 철근콘크리트

(1) 미국

□ SEAOC Vision 2000(SEDAC, 1995)

- 성능 매트릭스를 이용하여 각 하중 크기에 대하여 건축물의 성능레벨이 만족할 수 있는지 여부를 확인하며, 표 2.2와 같은 구조부재 및 비구조부재의 내진성능레벨에 따른 손상도 제시

표 2.2 SEAOC Vision 2000에서 제안하는 구조부재 및 층의 손상도

Performance level	항목별 성능 설명						
	건물 전체 손상도	허용 최대 층간 변형각	허용 잔류 층간 변형각	연직하중지지 부재의 손상도	수평하중지지부재의 손상도	보수	건물사용에 관한 영향
Fully Operational	무시할 수 있을 정도로 미소	<0.2%	무시할 수 있을 정도로 미소	무시할 수 있을 정도로 미소	- 무시할 수 있을 정도로 미소하며, 탄성범위 이내 - 강도나 강성이 현저하게 저하하지 않음	불필요	영향 없음
Operational	경미	<0.5%	무시할 수 있을 정도로 미소	무시할 수 있을 정도로 미소	- 경미한 손상으로 거의 탄성범위 이내 - 초기 강도나 강성은 기본적으로 유지 가능 - 구조부재에 미소한 균열이나 항복이 발생하지만 보수가능	건물소유주의 의향에 따름	연속 사용 가능
Life Safe	중정도	<1.5%	<0.5%	경미~중 정도의 손상이 발생하지만, 연직하중은 충분히 지지 가능	- 중 정도의 손상이 발생하여 잔존 강도나 강성이 저하하지만, 횡력지지기구는 기능	가능하지만, 건물 폐쇄 가능성 발생	단기간~무기한 사용 제한
Near Collapse	과대	<2.5%	<2.5%	중 정도~과대한 피해가 발생하지만, 연직하중은 지지가능	- 잔존 강도나 강성을 거의 기대할 수 없음 - 총붕괴는 발생하지 않지만, 큰 잔류변형 발생 - 2차 구조부재는 완전 파괴	보수는 거의 실제적이지 않음	잠재적으로는 영구 사용불능
Collapse	붕괴	>2.5%	>2.5%	부분적 혹은 전면적으로 연직하중 지지능력 상실	- 부분적 혹은 전체 붕괴 발생 - 경우에 따라서 주요 구조부재의 해체 필요	불가	영구 사용불능

□ Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Project(J. Moehle and G. G. Deierlien, 2004), ATC-58 Project(R. Hamburger et al, 2003)

- 그림 2.16과 같은 프로세스에 의하여 건축물의 내진성능을 확률적 수법에 의하여 평가 : 기존 및 신규 건축물 대상
- 건축물의 성능을 식(1)과 같은 의사결정변수(Decision Variable, DV)의 발생확률 v 에 의하여 산출

$$\nu(DV) = \iiint G\langle DV|DM\rangle |dG\langle DM|EDP\rangle|dG\langle EDP|IM\rangle d\lambda(IM) \quad (2.9)$$

여기서, IM (Intensiti Measure), EDP (Engineering Demand Parmmeter), DM (Damage Measure), DV (Dicision Variable)

- 표 2.3과 같이 건축물의 성능레벨에 따른 손상도 평가
- 부재 및 구조시스템 전체의 하중-변형 관계에 근거한 목표성능레벨과 내진보수성능지표 (보수비용, 사상자수, 사용불가능 일수)와의 관계 제시 (그림 2.17)
- ATC 58에서는 구조물의 손상을 확률변수로서 표시하여, 부재 및 구조물 전체 시스템에 대한 손상 지표 DI (식 2) 제안

$$DI = \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_u}\right)^x + \left(\frac{E_i}{E_u}\right)^y \leq 1.0 \quad (2.10)$$

여기서, Δ_i/Δ_u : 종국변형에 대한 최대소성변형, E_i/E_u : 소성영역의 반복에 의한 누적손상

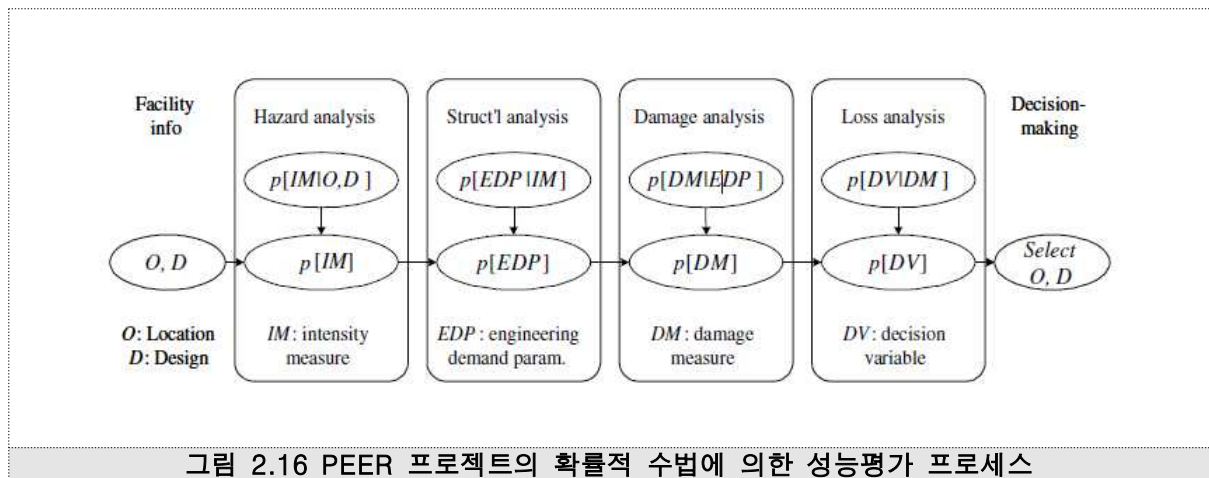
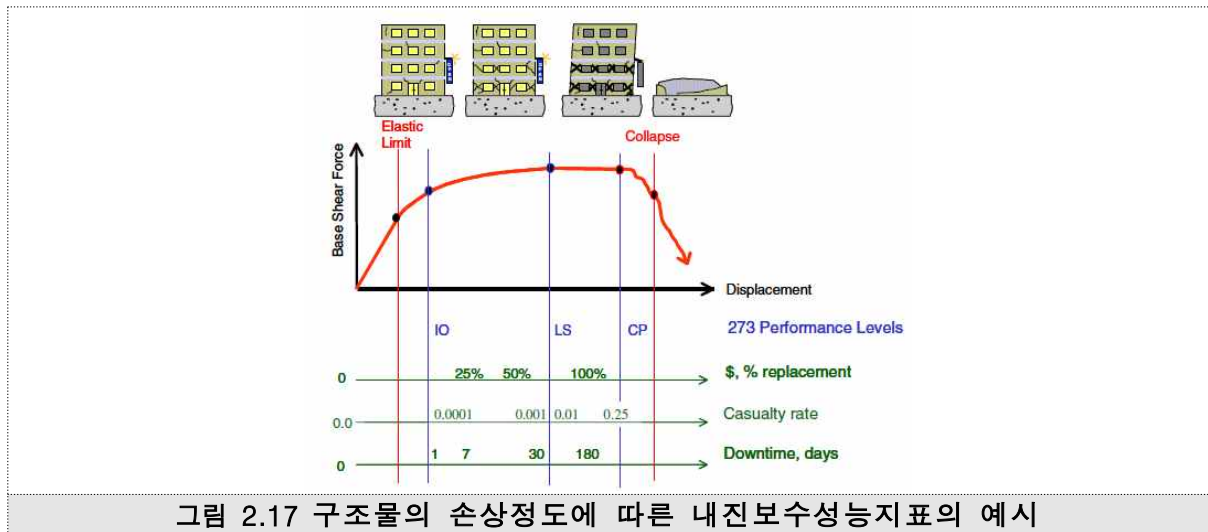


표 2.3. PEER에서 검토한 철근콘크리트 구조물의 DM의 예

Damage Measure	대안전성	대보수성	대사용성
휨균열	-	-	-
철근항복			
중대한 잔류 균열		에폭시 주입	
박락 시작			
중대한 박락	안전한계		
주근 좌굴 시작	경미~관대한 피해	부분적 부재 교환	기간 사용 불가
전단보강근 파단			
주근 파단			
내력 저하	심각한 피해	완전한 부재 교환	장기간 사용 불가



(2) 일본

□ 일본건축방재 협회의 손상도 판정 기준(日本防災協會, 2001)

- 구조부재요소에 속하는 기둥, 보, 외벽(표 2.4)와 접합부의 손상도에 따른 손상 내용 제시
- 손상 내용의 대상 : 균열 폭, 철근의 노출, 콘크리트의 탈락
- 잔존내진성능을 R = 건축물의 피해전후의 내진성능의 비율(그림 2.18)
- 건축물의 지진 피해 후의 내진성능 = 각 부재의 내력(내진진단기준에 의한 보유성능 기본지표 E_0)을 손상도에 따른 내진성능저감계수 η 에 의하여 저감(표 2.5)

표 2.4 구조부재의 손상도와 손상 내용 및 내진성능저감계수

손상도	손상 내용	내진성능저감계수 η	
		취성부재	연성부재
I	· 가까이 가지 않으면 확인할 수 없는 균열 · 균열 폭 약 0.2mm 이하	0.95	0.95
II	· 육안으로 확실하게 확인할 수 전단균열 · 전단균열 폭 0.2~0.5mm 정도 · 마감 몰탈의 박락은 발생해도 콘크리트는 박락하지 않음	0.6	0.75
III	· 전단균열 폭 0.5~2mm 정도	0.3	0.5
IV	· 전단균열 폭 2mm 이상 · 큰 전단어긋남 발생 · 콘크리트의 박락이 심하고 철근의 상당수가 노출	0	0.1
V	· 접합부 내부의 기둥 철근의 좌굴 혹은 후프근의 파단이 심하게 발생하고, 수평내력을 완전히 상실했을 뿐만 아니라 연직내력도 거의 상실하여 기둥의 축방향 변형이 발생 · 외벽에서는 샷시가 휘어지고 바닥은 침하	0	0

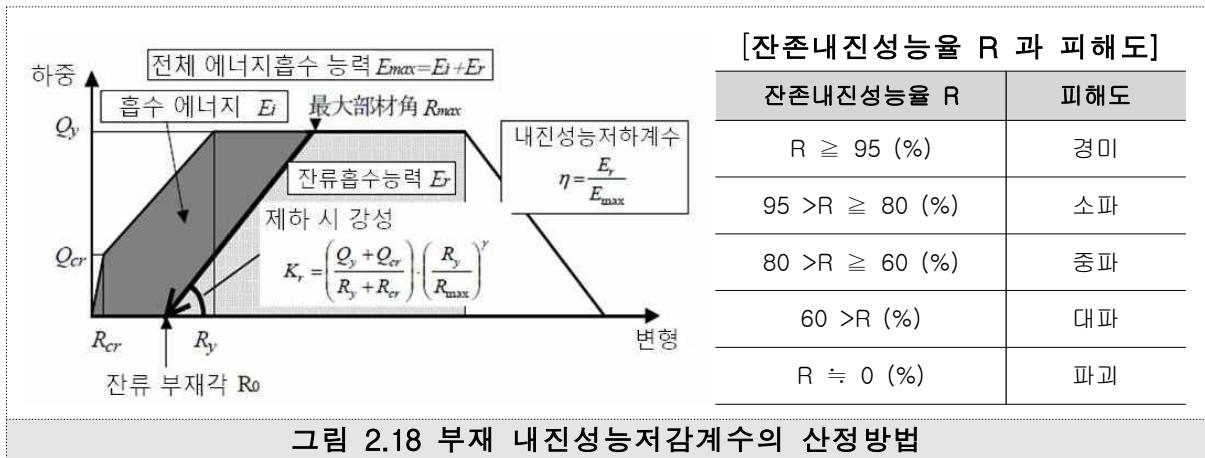


표 2.5 철근콘크리트 구조부재의 손상도와 내진성능저감계수

손상도	손상 내용	내진성능저감계수 η	
		취성부재	연성부재
I	균열 폭 0.2 mm이하	0.95	0.95
II	균열 폭 0.2 ~ 1 mm	0.6	0.75
III	균열 폭 1 ~ 2 mm	0.3	0.5
IV	균열 폭 2 mm 초과	0	0.1
V	철근파단, 압축변형 등	0	0

□ 일본건축학회의 내진성능평가지침(日本建築學會, 2004)

- 구조형식별 한계상태에 따른 층간변형각, 전체변형각 제시(표 2.6)
 - 부재의 손상정도에 따른 층의 한계상태 제시(표 2.7)
 - 휨항복 부재의 손상도 평가 :
 - 비선형 해석 등에 의한 부재의 응력, 변형 및 파괴형식에 의하여 결정
 - 인성부재 및 취성부재에 대하여 응답값*할증계수 < 한계값 임을 확인
- 예) 휨항복하는 보부재 : 보의 전단력*전단 할증계수 < 전단당도, 부착강도
 보선항복기구 : 기둥의 휨응력*휨 할증계수 < 휨강도
- 부재의 변형능력에 따른 손상도 판정 : 손상도에 따른 손상의 정도를 정의함으로서 보수에 대한 계획 수립(표 2.8 및 그림 2.19)
 - 기둥의 경우, 표 2.9와 같이 압축과 인장부분을 분리, 전단거동과 휨거동을 분리하여 평가

표 2.6 층의 한계상태와 변형과의 관계 예시

층의 한계상태	라멘 구조		벽식 구조	
	층간변형각	전체변형각	층간변형각	전체변형각
보수한계상태 I	1/100	1/120	1/150	1/180
보수한계상태 II	1/75	1/100	1/100	1/130
안전한계상태	1/50	1/67	1/75	1/100

표 2.7 부재의 손상정도에 따른 층의 한계상태

층의 한계상태	부재의 손상도				
	I	II	III	IV	(V)
사용한계상태	-	0%	0%	0%	
보수한계상태 I	-	a (30%)	b (20%)	0%	
보수한계상태 II	-	-	c (50%)	0%	
안전한계상태	-	-	-	-	(0%)

표 2.8 부재의 한계상태와 손상도 및 손상 내용의 관계

손상도	한계상태	부재상태	구체적 손상 내용			보수여부
			철근	콘크리트	잔류 균열 폭	
I	사용한계	연속사용가능	탄성	거의 탄성	0.2mm 정도 이하	불필요
II	보수한계 I	쉽게 보수 가능	약간 항복하는 정도	건전	0.2~1.0mm정도 (0.2~0.5mm)*	소규모 보수
III	보수한계 II	보수가능	좌굴하지 않음	코아 콘크리트는 건전	1~2mm정도 (0.5~1.0mm)*	대규모 보수
IV	안전한계	지진응답시의 응력 및 지진종료시의 연직하중에 의한 응력을 안정적으로 유지	파단되지 않음	코아 콘크리트에 압괴가 발생하지 않음		보수 곤란
(V)		내력저하	파단	코아 콘크리트 압괴		대상 외

* : 내력벽 및 보-기둥 접합부의 잔류 전단균열 폭

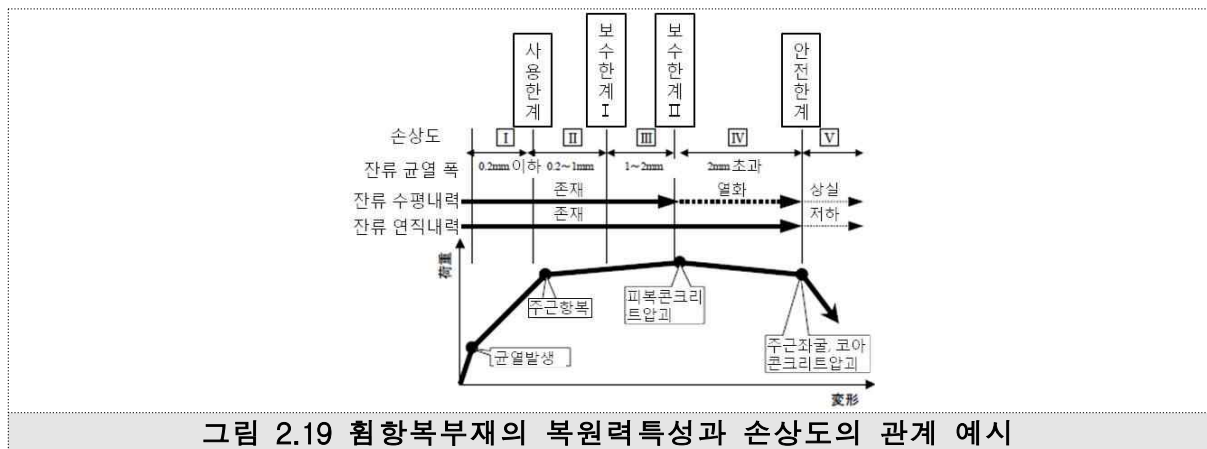


그림 2.19 휨항복부재의 복원력특성과 손상도의 관계 예시

표 2.9 철근콘크리트 부재의 성능레벨에 따른 손상도 및 손상 내용의 관계(휨항복부재)

손상도	성능레벨	부재상태	구체적 손상 내용			보수여부
			철근	콘크리트	잔류 균열 폭	
I	사용레벨	연속사용가능	탄성	거의 탄성	0.2mm 정도 이하	불필요
II	보수레벨 I	쉽게 보수 가능	약간 항복하는 정도	건전	0.2~1.0mm정도 (0.2~0.5mm)*	소규모 보수
III	보수레벨 II	보수가능	좌굴하지 않음	코아 콘크리트는 건전	1~2mm 정도 (0.5~1.0mm)*	대규모 보수
IV	안전레벨	지진응답시의 응력 및 지진종료시의 연직하중에 의한 응력을 안정적으로 유지	파단되지 않음	코아 콘크리트에 압괴가 발생하지 않음		보수 곤란
(V)		내력저하	파단	코아 콘크리트 압괴		대상 외

* : 내력벽 및 보-기둥 접합부의 잔류 전단균열 폭

나. 조적채움벽

- 조적채움벽 RC 골조에 대한 손상도 평가, 잔류내진성능평가와 관련된 연구는 국내외적으로 미비한 실정임
- 실험 및 해석결과를 바탕으로 조적채움벽 RC 골조의 손상도에 따른 정량적인 잔류내진성능평가 방법 제시(최호, 2015; 최호, 2009)
 - 손상도별 내진성능 잔존계수(잔존에너지 흡수능력 / 전에너지 흡수능력) 제시
 - 손상도 분류는 RC 부재의 기준 적용

표 2.10 손상도에 따른 내진성능 잔존계수 및 잔류균열폭

손상도	I	II	III	IV	V
내진성능 잔존계수	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0
잔류균열폭(mm, 기둥)	< 0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	> 1.0	-

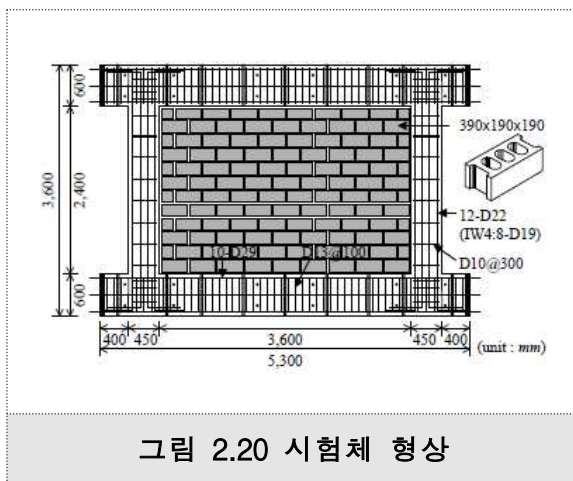


그림 2.20 시험체 형상

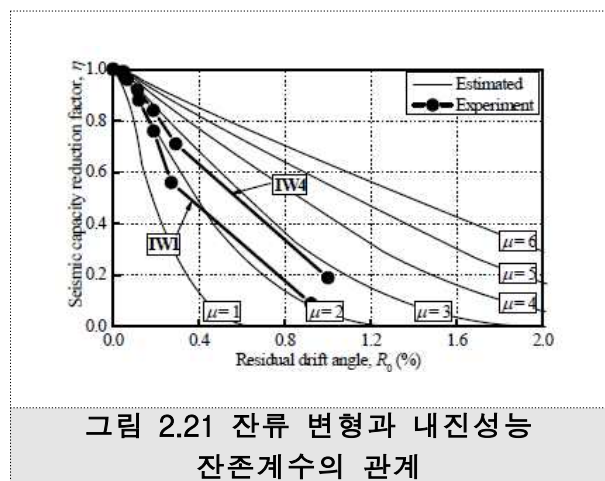


그림 2.21 잔류 변형과 내진성능 잔존계수의 관계

- Calvi는 조적채움벽의 손상상태에 따라 4개의 성능한계상태를 제시함

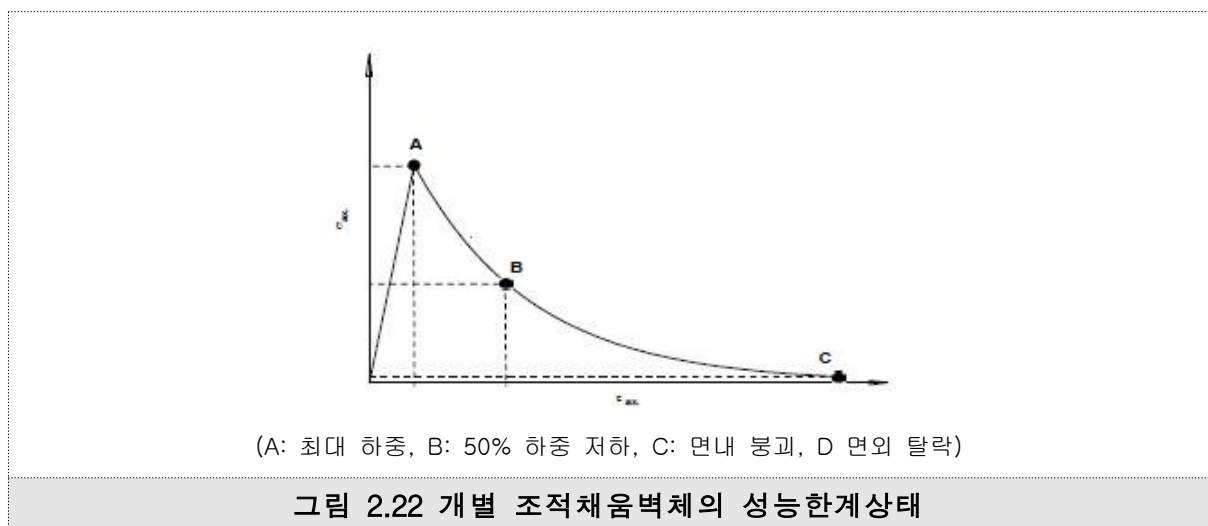


그림 2.22 개별 조적채움벽체의 성능한계상태

표 2.6 성능레벨에 따른 한계상태

성능레벨		한계상태
LS1	no damage-fully operational	no panel reaches point A or D
LS2	Light damage-operational	no panel reaches point B or D
LS3	Severe damage-life safe-repairable	no panel reaches point C or D and not more than 50% of the panels reaches point B
LS4	Very heavy damage-life danger	all other conditions

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. RC 골조의 내진성능 검증실험

가. 실험 계획

- 비내진상세를 가지는 RC 골조의 정량적 손상도 평가 및 손상정도에 따른 잔류내진성능 평가를 위한 실험으로 실험 변수는 표 3.1과 같음
- 시험체는 총 3개로 비내진상세로 설계된 5층 이하의 기존 저층 철근콘크리트 건축물의 1층 부분을 대상으로 한 1층 1경간 골조로 실험실 여건을 고려하여 최대한 실제 크기와 동일하게 제작
 - 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조 시험체 : 2개(동적가력, 정적 및 동적가력)
 - 조적채움벽 RC 골조 시험체 : 1개 (정적가력)

표 3.1 시험체 구성 및 실험변수

실험변수		시험체	
구조형식		전단파괴 기동을 가지는 RC 골조	조적채움벽 RC 골조
가력방법	정적		○ (RCMW)
	동적	○ (RCS0)	
	정적 및 동적	○ (RCS1)	

(1) 시험체 설계 및 제작

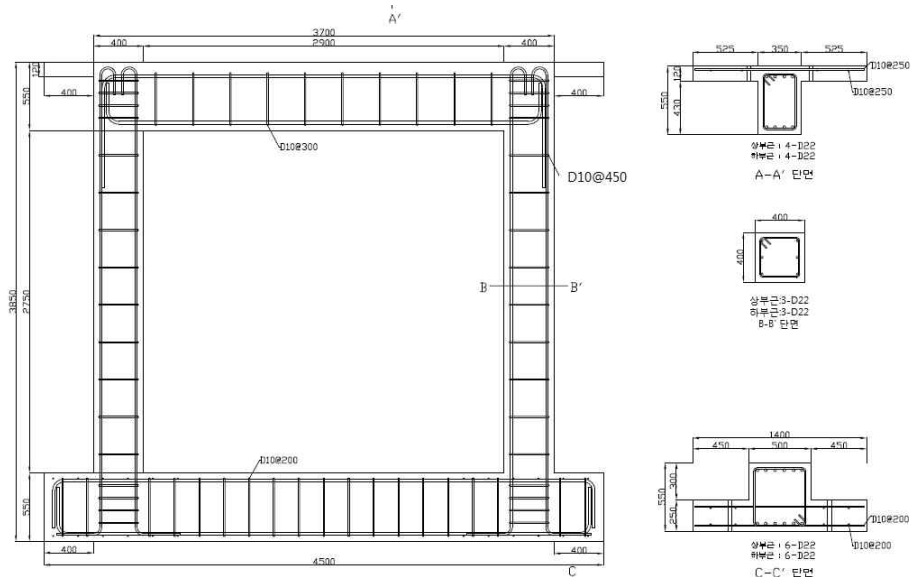
- 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조 및 조적채움벽 RC 골조의 상세 및 치수는 표 3.2 및 그림 3.1과 같음
 - 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조 시험체 RCM0.0 및 RCM1.0은 강보-약기동으로 기동에서 전단파괴가 발생하도록 계획(표 3.3 참조)하며, 전단파괴 기동은 450mm 간격, 90도 후크의 전단보 강근을 가지는 비내진상세로 설계
 - 조적채움벽 RC 골조 시험체 RCMW는 강보-약기동의 기동항복형 골조에 콘크리트 벽돌 1B 쌓기로 조적채움벽을 구성

표 3.2 시험체 부재 단면 치수

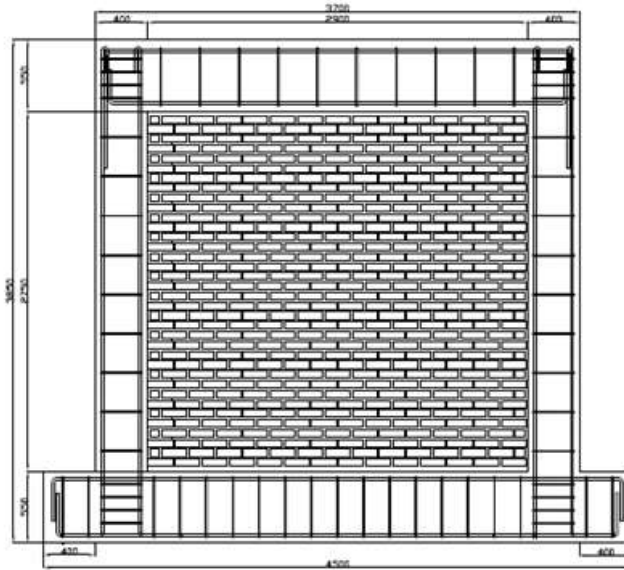
부재	기둥	보		기초보	
단면크기(B X D)	400 X 400 mm	350 X 550 mm		500 X 550mm	
주근	6-D16 ¹⁾ 6-D22 ²⁾	상부	4-D22	상부	4-D22
		하부	4-D22	하부	4-D22
		슬래브	D10@250	슬래브	D10@200
보강근	D10@300 ¹⁾ D10@450 ²⁾	D10@300		D10@100 (200)	
철근재질	SD400				
철근항복강도(MPa)	400				
콘크리트압축강도(MPa)	21				
축력(kN)	120	-			

*1) 시험체 RCMW

*2) 시험체 RCM0.0 및 RCM1.0



(a) RC 골조 시험체



(b) 조적채움벽 RC 골조 시험체

그림 3.1 시험체 상세

표 3.3 전단파괴 기둥을 가지는 시험체의 부재별 내력

부재		보	기둥
My (kNm)		311	99 (198)
Qy (kN)		214	72 (144)
Qs (kN)	KBC	242	197 (394)
	AIJ	226	149 (298)

*() 안은 기둥 2개의 계산 결과 의미

- 시험체 골조는 설계기준강도 21MPa의 콘크리트와 SD400 ($f_y = 400 \text{ MPa}$)의 철근을 사용하여 제작하였으며, 콘크리트 및 철근의 재료시험 결과는 표 3.4 및 표 3.5와 같음
 - 콘크리트는 ① 기초 보, ② 기둥과 상부 보 및 슬래브의 두 번으로 나눠서 수직 타설하며, 진동다짐기 및 강봉으로 충분히 다진 후 습윤양생 실시
- 조적채움벽 부분의 모르타르는 현장배합을 원칙으로 하며, 일일 쌓기 높이에 맞춰 2일에 나누어 조적공사 실시(그림 3.2 참조)



철근 조립 1



콘크리트 타설 1



철근 조립 1



콘크리트 타설 2



벽돌 쌓기 1



벽돌 쌓기 2



RC 골조 시험체



조적채움벽 RC 골조 시험체

그림 3.2 시험체 제작 과정

표 3.4 콘크리트 재료실험 결과

압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
30.8	25,575

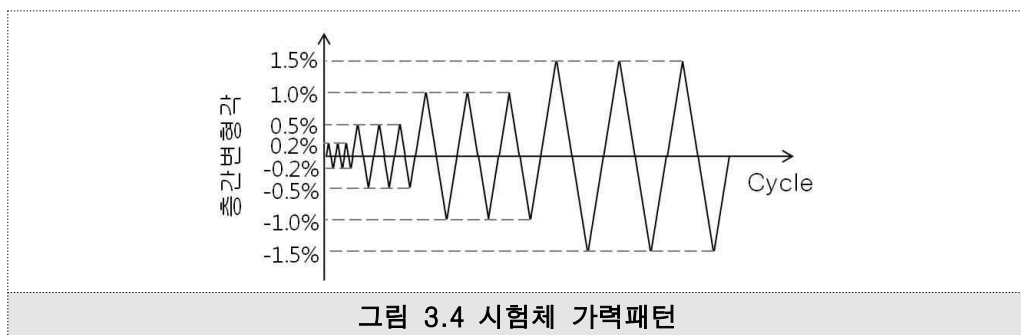
표 3.5 철근 재료실험 결과

규격	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
HD10	415.0	633.1	187,931
HD16	483.1	558.7	211,964
HD22	455.7	618.3	170,746

나. 가력 계획

(1) 정적가력

- 그림 3.3과 같이 1,000kN 액츄에이터를 이용하여 액츄에이터 중심위치에서의 변위제어에 의한 반복 가력 실시
 - 그림 3.4의 가력이력에 따라 0.2%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 3.0%의 주진폭별 3회 반복 가력



(2) 동적가력

- El-Centro NS 성분(PGA : 341gal, 그림 3.5 참조)을 입력지진파로 사용하며, 최대가속도를 기준으로 표 3.6과 같이 스케일을 10, 30, 70, 100, 130, 160, 190, 220, 250, 300%로 증가시키면서 시험체 주축 방향(보 축방향)으로 가진

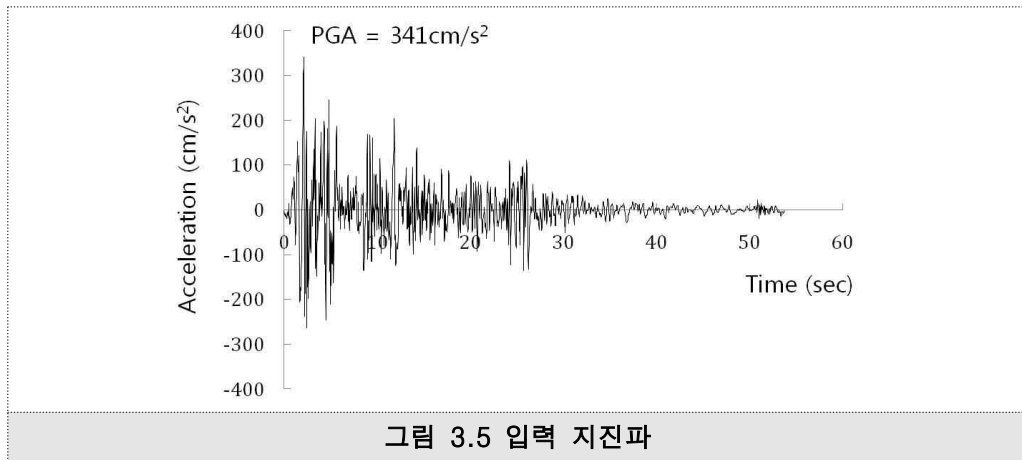


표 3.6 가진 프로그램

스텝	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
스케일 (%)	10	30	70	100	130	160	190	220	250	300
최대지반 가속도 (cm/s²)	34.1	102.3	238.7	341.0	443.3	545.6	647.9	750.2	852.5	1023.0

(3) 정적 및 동적가력

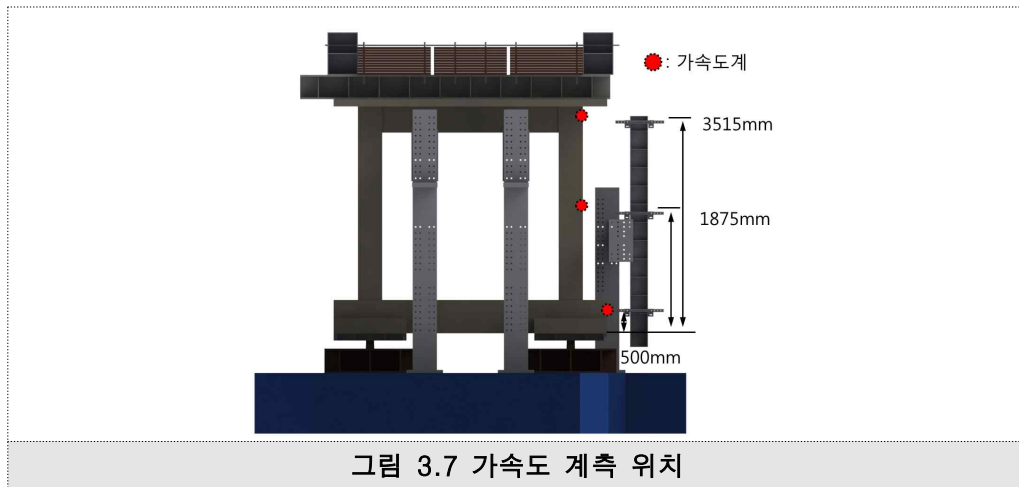
- ☐ 정적가력을 통하여 시험체에 목표 손상(손상도 II, 목표 층간변형각 1.0 %)을 유발한 후에 동적가력 실시

다. 계측 계획

(1) 하중 및 가속도

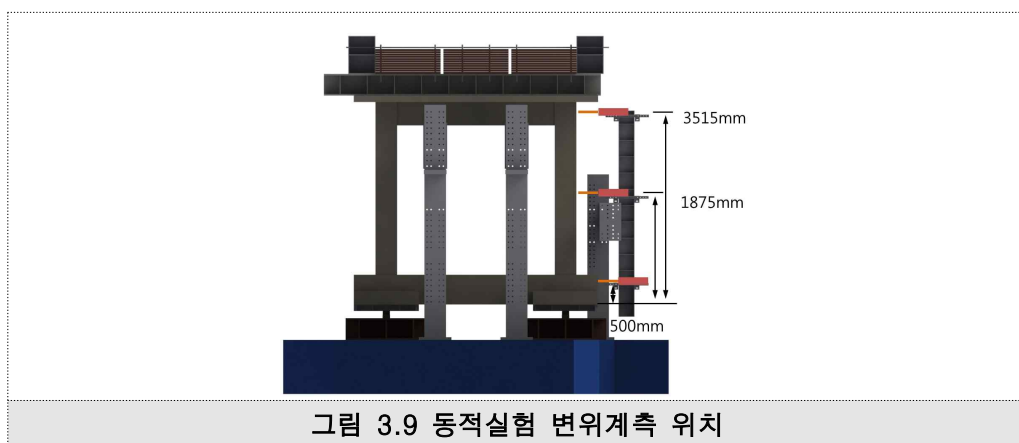
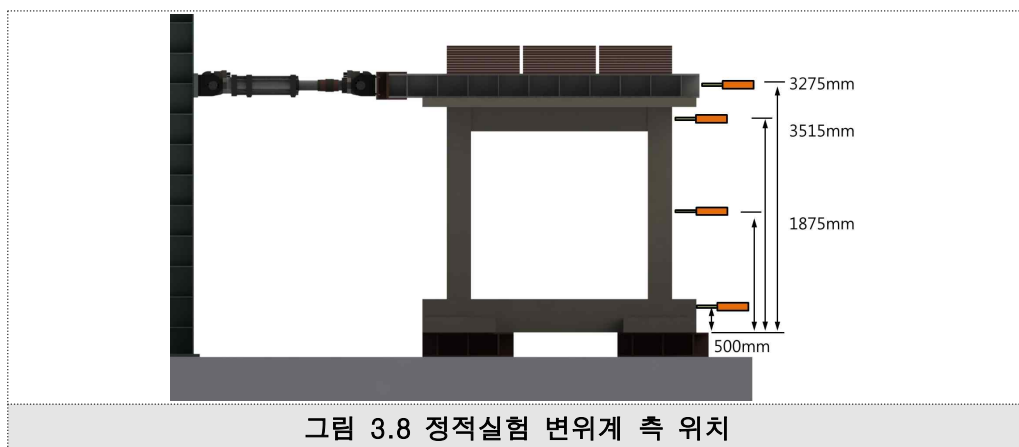
- ☐ 정적실험의 경우, 하중은 액추에이터 내장 로드셀로 측정
- ☐ 동적실험의 경우, 하중은 시험체 기둥 하부에 4개의 로드셀을 설치(그림 3.6)하여 직접 측정하며, 가속도는 보 단면중심, 기둥 중앙부 및 하부의 세 곳에 가속도계를 설치(그림 3.7)하여 측정





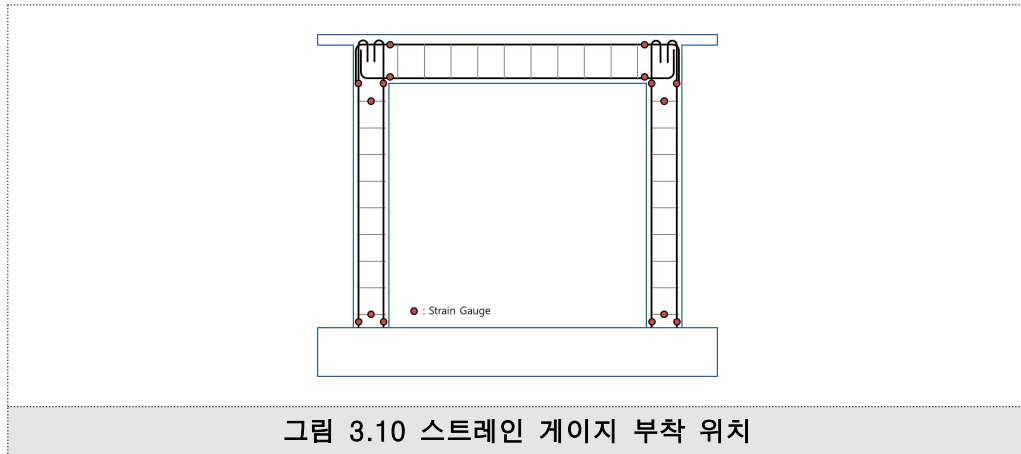
(2) 변위

- 정적실험 : 그림 3.8과 같이 액츄에이터 중심, 보 단면중심, 기둥 중앙부 및 하부에 4개의 LVDT를 설치하여 변위 측정
- 동적실험 : 그림 3.9와 같이 보 단면중심, 기둥 중앙부 및 하부에 4개의 LVDT를 설치하여 변위 측정



(3) 변형률

- 변형률은 그림 3.10과 같이 기둥 위험단면 위치의 주근 및 보강근과 보 위험단면 위치의 주근에 스트레인 게이지를 부착하여 측정



라. 정적실험 결과

(1) 균열 및 파괴 양상

[RCMW 시험체]

- 표 3.7 및 그림 3.11은 가력 스텝에 따른 시험체 손상발생 현황을, 그림 3.12는 시험체 최종 파괴 형상을 나타냄
- 가력에 의한 수평하중이 증가함에 따라 시험체에는 기둥 위험단면 위치에 휨균열 및 조적벽체에 슬라이딩 균열이 가장 먼저 발생하였으며, 다음으로 보 위험단면에 휨균열과 접합부 패널에 전단균열이 발생하였으며, 4스텝 2사이클 가력시 좌측 기둥 접합부 패널에서 기둥 상부까지 연결되어 발생한 전단균열의 폭이 크게 벌어지고 콘크리트가 탈락하여 철근이 드러남(그림 3.12 참조)에 따라 시험체의 내력이 최대내력의 약 40% 정도로 저하되면서 시험체가 최종적으로 파괴됨
 - 조적채움벽 RC 골조에 수평력이 작용하면 조적벽체가 RC 골조와 분리되면서 조적벽체에는 등가의 폭을 가지는 스트럿이 형성되면서 수평력에 저항하며, 이 스트럿에 의하여 RC 골조에는 압축력이 작용함
 - 이와 같은 압축력에 의하여 정방향 가력 시에는 좌측 기둥 상부에서 접합부로 이어지는 전단균열이 발생한 것으로 판단됨. 한편, 우측 기둥 상하부 콘크리트에는 인장 강도보다 작은 응력이 발생하여 접합부 및 기둥에 균열이 발생하지 않은 것으로 판단되며, 가력 크기가 증가함에 따라 RC 골조에 작용하는 힘이 증가하여 인장 강도 보다 큰 응력이 기둥 상하부에 작용함에 따라 정방향 가력 시에 기둥 상하부 및 접합부에 균열이 발생(4스텝 1사이클 가력 시)한 것으로 판단됨
 - 부방향 가력 시에는 동일하게 우측 기둥 상부에서 접합부로 이어지는 전단균열이 발생하였으며, 3스텝 1사이클 가력 시 좌측 기둥 상하부에 균열이 발생한 것으로 판단됨
- 1스텝 가력시부터 조적벽체와 RC 골조 사이에 균열이 발생하였으며, 3스텝 가력시에는 조적벽체와 RC 골조가 완전히 분리되었음
 - 조적벽체에는 하부에 발생한 슬라이딩 균열을 제외하고 전단균열 등의 균열이 거의 발생하지 않았으며, 이는 콘크리트 벽돌 간 시멘트 모르타르가 밀실하게 채워졌기 때문으로 판단됨
 - 가력 스텝이 증가함에 따라 조적벽체는 RC 골조에 의하여 슬라이딩 균열을 중심으로 강제 회전한 것으로 판단되며, 실험 종료 시점에 조적벽체 상부 코너 벽돌이 일부 탈락되었음

- 보와 슬래브 사이에는 초기 가력시부터(1스텝 가력 종료 후) 균열이 발생하였음
- 한편, 3스텝 1사이클 가력시 좌측 기둥 하부 위험단면 위치 주근이 처음으로 항복함

표 3.7 RCMW 시험체의 가력 스텝에 따른 손상발생 현황

가력스텝	손상발생 현황
1 Step	·좌측 및 우측 기둥 상·하부 위험단면 위치에 휨균열 발생 ·좌측 보단부 위험단면 위치에 휨균열 발생 ·보와 조적벽체 간 접촉면 균열 발생 ·좌측 기둥과 조적벽체 간 접촉면 균열 발생 ·하부 기초보와 조적벽체 접촉면 및 하부 벽체 간 슬라이딩 균열 발생
2 Step	·좌측 및 우측 기둥 전체로 휨균열이 분산되어 발생 ·우측 기둥과 조적벽체 간 접촉면 균열 발생 ·우측 보단부 위험단면 위치에 휨균열 발생 ·조적벽체 하부 슬라이딩 균열이 벌어지기 시작함
3 Step	·좌측 및 우측 기둥 접합부 패널에 전단균열 발생 ·보 좌측 단부에서 중앙부 방향으로 전단균열, 휨균열 발생 ·보 우측 단부에서 중앙부 방향으로 전단균열, 휨균열 발생 ·조적벽체 박리 (우측 상부) ·조적벽체와 좌측 기둥 하부 완전 분리(틈 사이로 반대편이 보일 정도) ·좌측 기둥 하부 주근 항복
4 Step	·좌측 기둥 접합부 패널 전단균열 증가 및 부착균열 발생 ·접합부에서 기둥으로 연결되어 발생한 전단균열의 폭이 크게 벌어짐 ·조적벽체와 우측 기둥 상부 완전 분리(틈 사이로 반대편이 보일 정도) ·조적벽체 좌측 상부 코너 벽돌 탈락

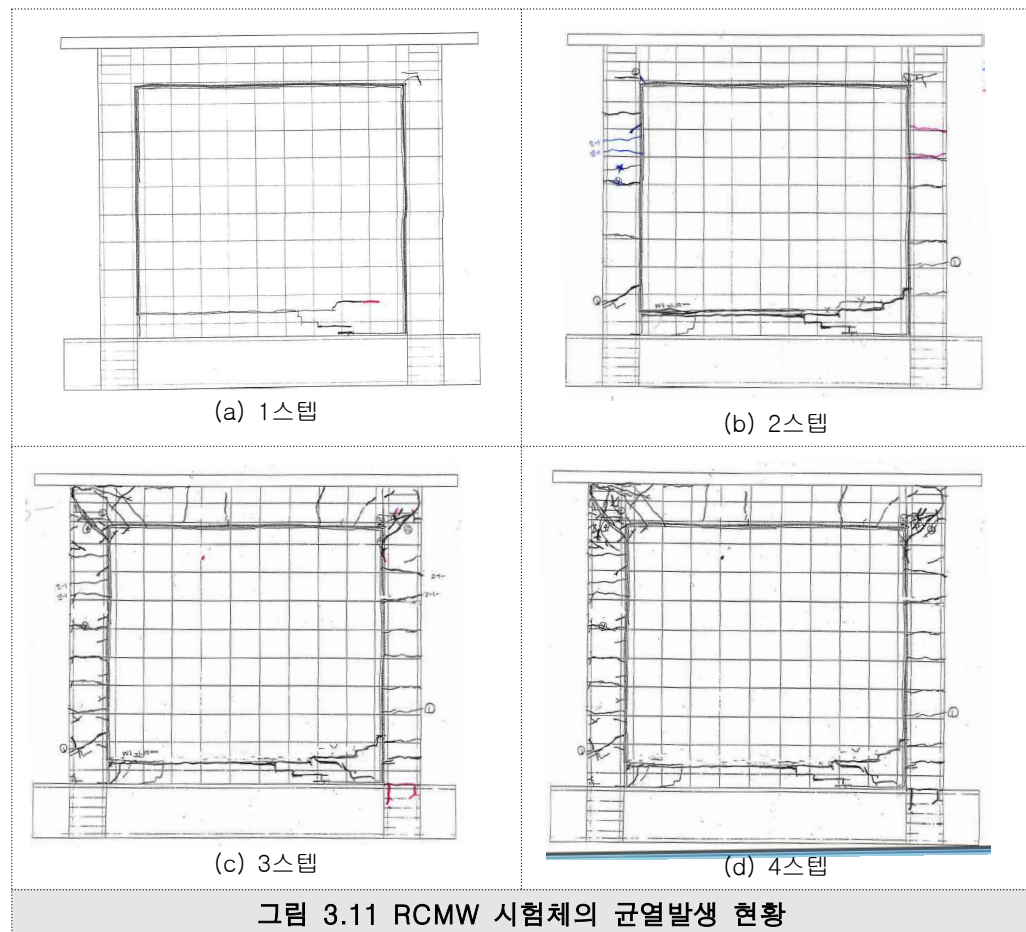
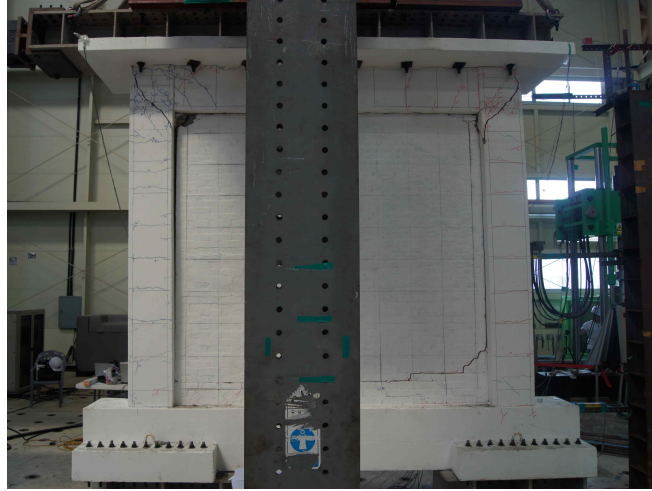
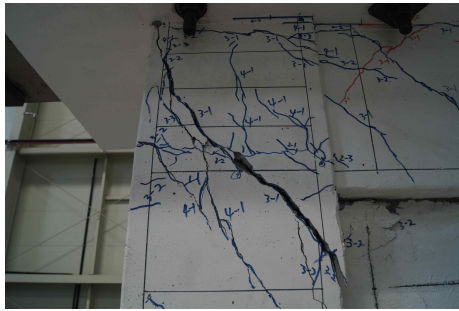


그림 3.11 RCMW 시험체의 균열발생 현황



(a) 시험체 전체



(b) 좌측 기둥 접합부 (관찰면)



(c) 좌측 기둥 접합부 (관찰면 뒷면)

그림 3.12 RCMW 시험체의 최종 파괴 형상

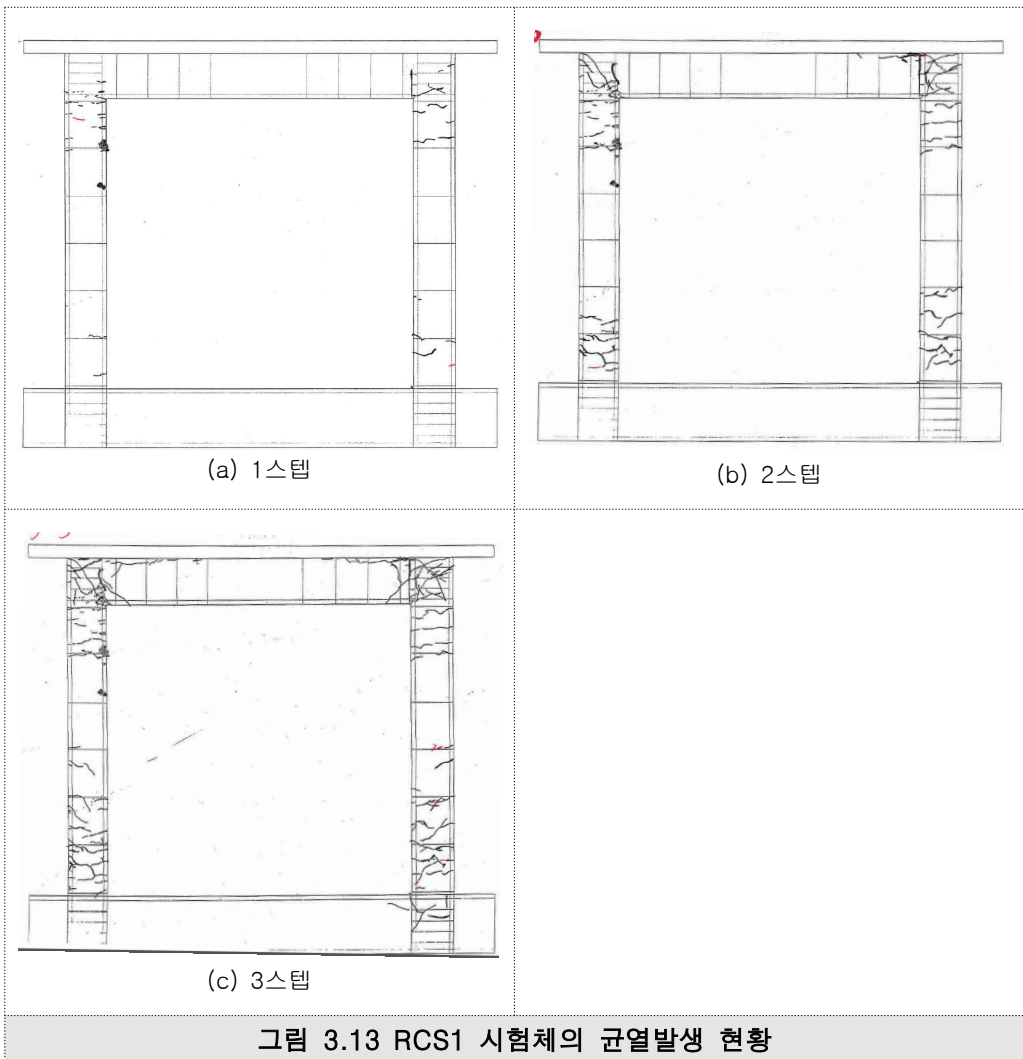
[RCS1 시험체]

- 표 3.8 및 그림 3.13은 가력 스텝에 따른 시험체 손상발생 현황을, 그림 3.14는 시험체 최종 파괴 형상을 나타냄
- 가력에 의한 수평하중이 증가함에 따라 시험체에는 기둥 위험단면 위치에 휨균열 및 보 우측 단부 위험단면 위치에 휨균열이 발생한 후, 접합부 패널에 전단균열이 발생하였으며, 다음으로 보 단부에 전단균열과 부착균열이 발생하였음
- 기둥 상부 및 하부에는 휨균열이, 접합부 패널에는 전단균열이, 보 단부에는 전단균열이 주로 발생

표 3.8 RCS1 시험체의 가력 스텝에 따른 손상발생 현황

가력스텝	손상발생 현황
1 Step	·좌측 및 우측 기둥 상부와 하부 위험단면 위치에 휨균열 발생 ·보 우측 단부 위험단면 위치에 휨균열 발생 ·좌측 및 우측 기둥 상부와 하부 위험단면 위치에서 D(기둥 폭)만큼 떨어진 구간 내에 휨균열 발생
2 Step	·좌측 및 우측 기둥 접합부 패널에 전단균열 발생 ·좌측 및 우측 기둥 상부와 하부 위험단면 위치에서 D(기둥 폭)만큼 떨어진 구간 내에 휨균열 증가 ·좌측 및 우측 기둥 하부 위험단면 위치에서 2D(기둥 폭)만큼 떨어진 구간까지 휨균열 발생 ·보 우측 단부(상부 주근) 부착균열 발생

3 Step	·좌측 및 우측 기둥 접합부 패널에 전단균열 증가 ·보 좌측 및 우측 단부 전단균열 발생 ·보 좌측 단부(상부 주근) 부착균열 발생 ·좌측 및 우측 기둥 하부 휨균열 증가
--------	--



(2) 하중-변위 관계

[RCMW 시험체]

- 그림 3.15는 시험체의 수평하중과 층간변형각 관계를 나타냄
- 정방향 가력 시에 비하여 부방향 가력 시 시험체 상부 보 중심위치에서의 변위가 적게 발생하였으며, 이는 액츄에이터의 시험체에 대한 가력 방향, 시험체 상부 보와 슬래브 사이 균열 등에 따른 것으로 판단됨
 - 액츄에이터 중심위치의 변위계에서 측정한 값도 정방향 가력 시 변위에 비하여 부방향 가력시의 변위가 적게 발생
 - 그림 3.16과 같이 액츄에이터 자체 정방향(미는 방향)과 부방향(당기는 방향) 가력 시 시험체에 변위 차이 발생 : 액츄에이터 중심위치에 설치한 변위계에 의한 변위와 액츄에이터 내장 변위계에 의한 변위 차이가 정방향 가력 시에는 4.59 mm (평균 1.93 mm) 이하인 반면에, 부방향 가력 시에는 가력 스텝 증가에 따라 1.84 ~ 9.85 mm 까지 발생
 - 액츄에이터 중심위치에 설치한 변위계와 보 중심위치에 설치한 변위계에서 측정한 변위의 차이는 정방향 가력 시와 부방향 가력시에 큰 차이를 보이지 않으며, 이는 보 상부와 슬래브 사이에 발생한 균열이 가력 증가에 따라 벌어지면서 발생한 것으로 판단됨
- 이력곡선은 에너지 흡수능력이 떨어지는 “역 S자 형태”: 가력에 따라 RC 골조와 조적벽체가 접촉하면서(RC 골조에 의하여 조적벽체가 밀리면서) 강성이 급격히 증가
- 조적벽체 하부 슬라이딩 균열 발생으로 강성이 저하하기 시작하였으며 기둥 전체에 휨균열이 분산되어 발생하면서 강성이 크게 저하됨
- 기둥 주근이 항복하고 조적벽체 상부 코너가 일부 탈락되면서 최대 내력에 도달한 후 내력이 급격히 저하됨

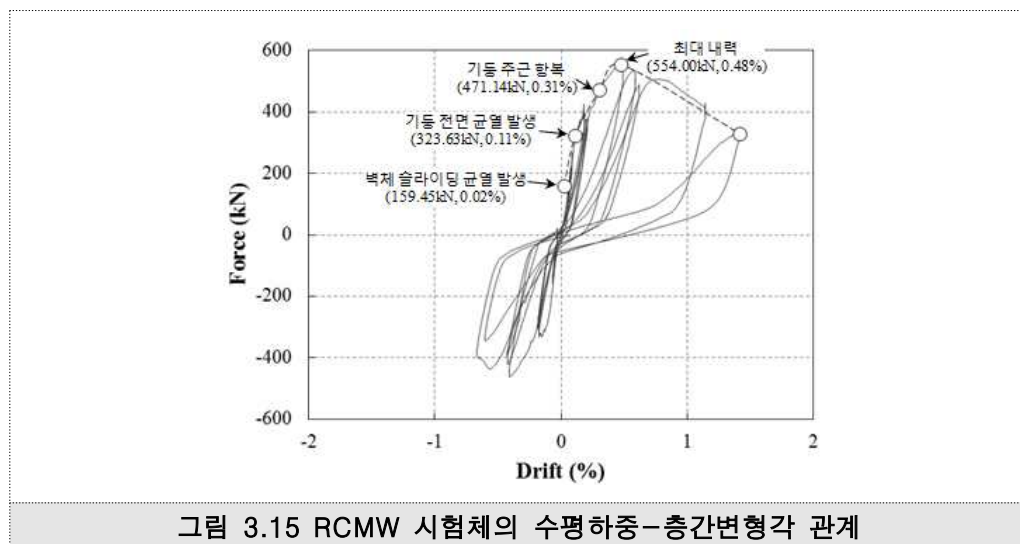


그림 3.15 RCMW 시험체의 수평하중-층간변형각 관계

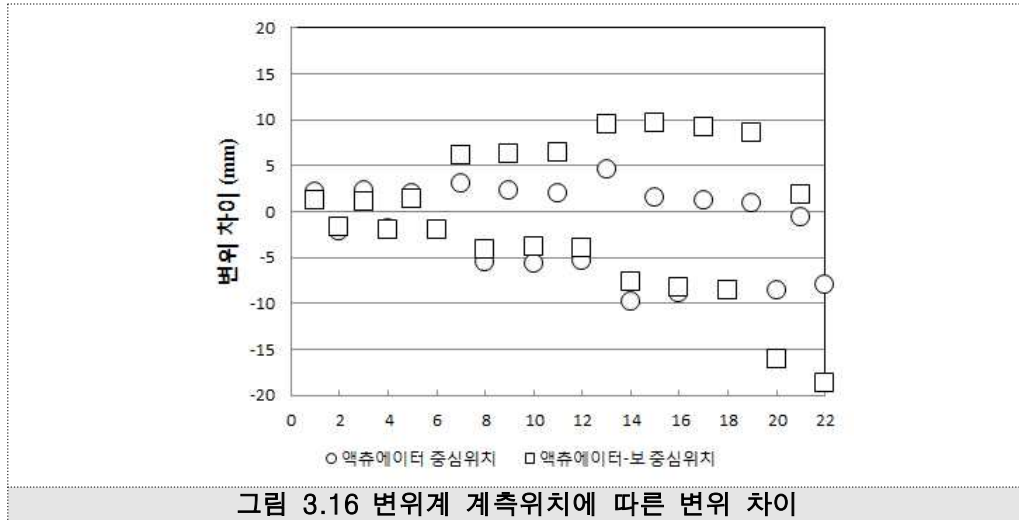


그림 3.16 변위계 측정위치에 따른 변위 차이

표 3.9 RCMW 시험체의 역학적 특성

초기강성 (N/mm)	벽체 균열		기둥 균열		주근항복		최대내력	
	하중(kN)	변형각(%)	하중(kN)	변형각(%)	하중(kN)	변형각(%)	하중(kN)	변형각(%)
176,790*	159.5	0.02	323.6	0.11	471.1	0.31	554.0	0.48

* 초기강성은 RCMW 사전테스트 값을 이용함

※ RCMW 시험체 가력 중 가력보와 시험체 사이에 체결된 볼트에서 밀림 현상이 발생하여 실험을 일시 중단하고 볼트를 다시 체결한 후 실험 다시 시작

[RCS1 시험체]

- 그림 3.17은 시험체의 수평하중과 층간변형각 관계를, 표 3.10은 시험체의 역학적 특성값을 나타냄
- 1스텝 가력 시 기둥 상·하부 및 보 단부에 휨균열이 발생하면서 강성이 저하하기 시작하였으며, 2스텝 가력 시 접합부에 발생한 전단균열로 강성이 크게 저하함

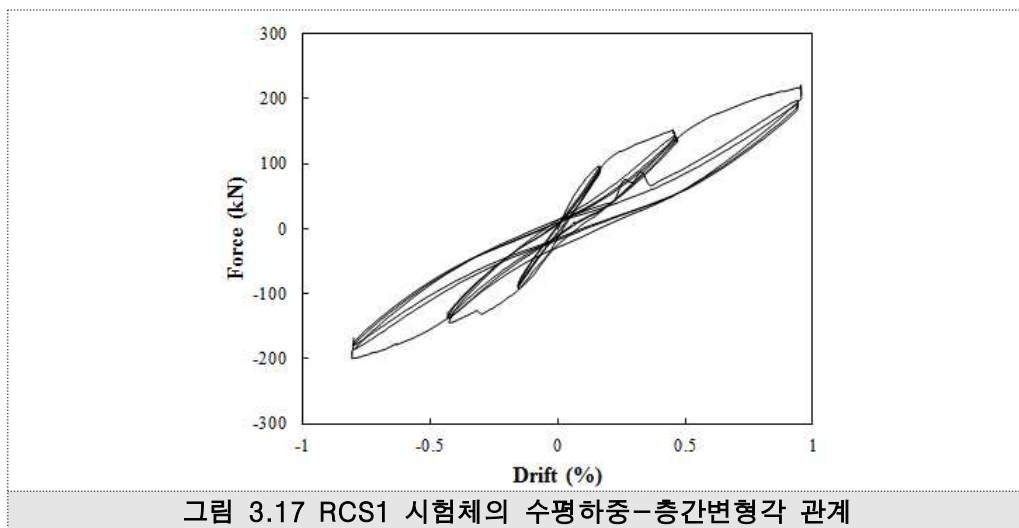


그림 3.17 RCS1 시험체의 수평하중-층간변형각 관계

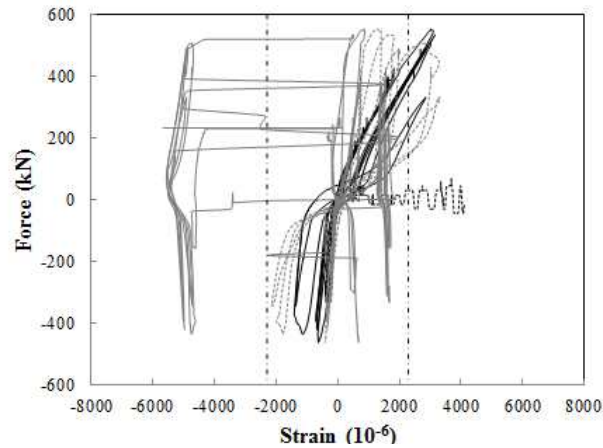
표 3.10 시험체 RCS1의 역학적 특성

초기강성 (N/mm)	휨균열		전단균열	
	하중(kN)	변형각(%)	하중(kN)	변형각(%)
19,993	96.49	0.16	150.98	0.45

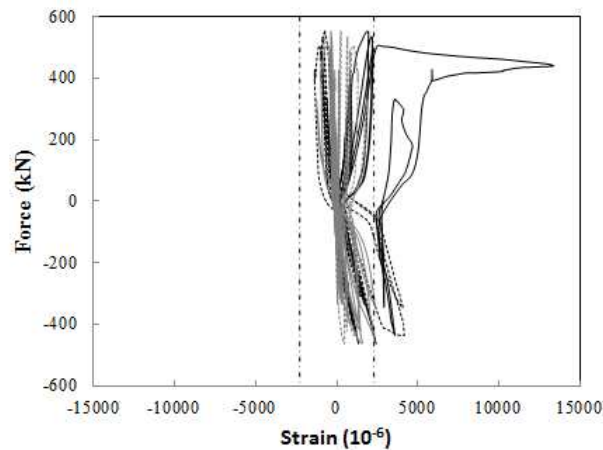
(3) 하중-변형률 관계

[RCMW 시험체]

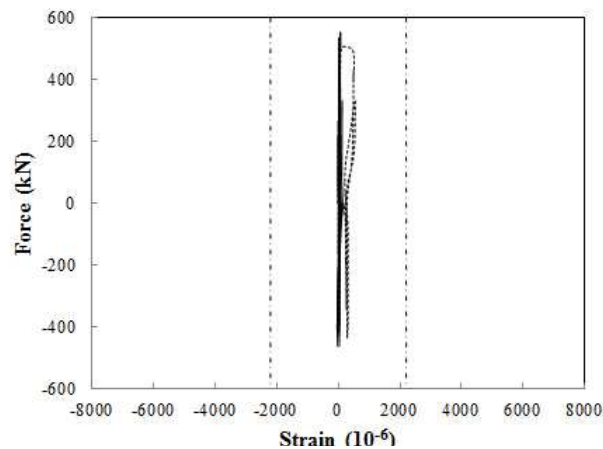
- ☐ 그림 3.18은 기둥 위험단면 위치의, 그림 3.19는 보 위험단면 위치의 스트레인 게이지에 의하여 측정된 수평하중과 철근 변형률 관계를 나타냄
- ☐ 좌측 기둥 및 우측 기둥의 상부와 하부 위험단면 위치 주근은 항복하였으나, 보강근은 실험 종료 시까지 항복하지 않음
- ☐ 보 좌측 및 우측 단부 위험단면 위치 주근은 실험 종료 시까지 항복하지 않음



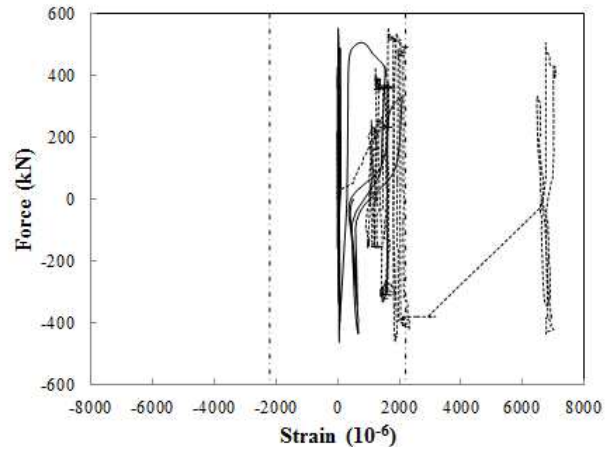
(a) 좌측 기둥 주근



(b) 우측 기둥 주근

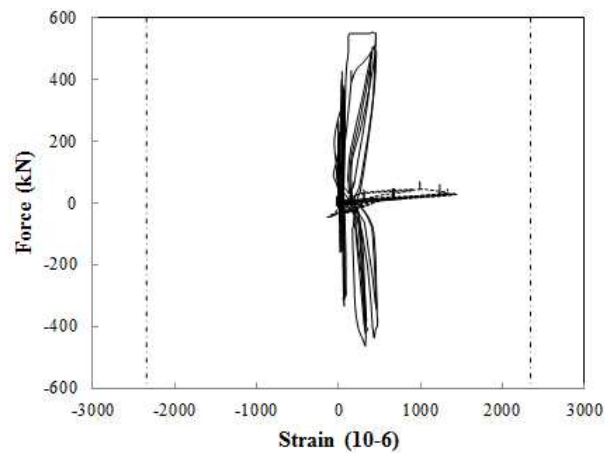


(c) 좌측 기둥 보강근

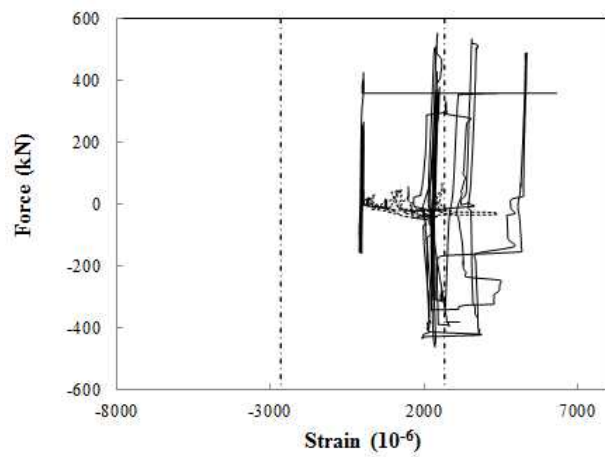


(d) 우측 기둥 보강근

그림 3.18 RCMW 시험체의 기둥 위험단면 위치 수평하중-변형률 관계



(a) 좌측 단부 주근

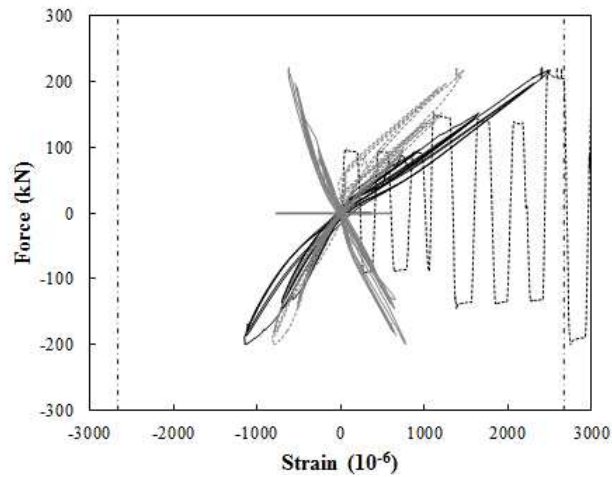


(b) 우측 단부 주근

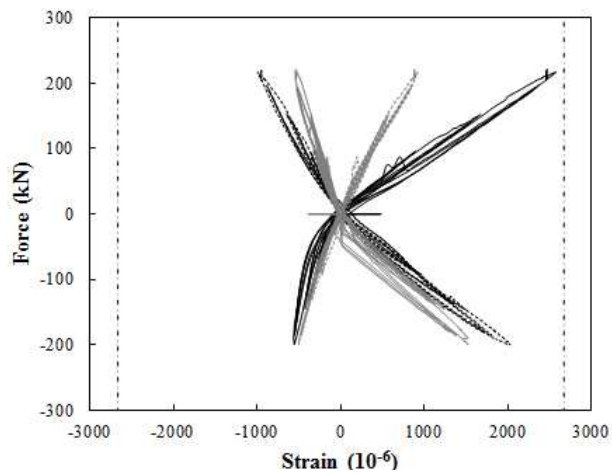
그림 3.19 RCMW 시험체의 보 위험단면 위치 수평하중-변형률 관계

[RCS1 시험체]

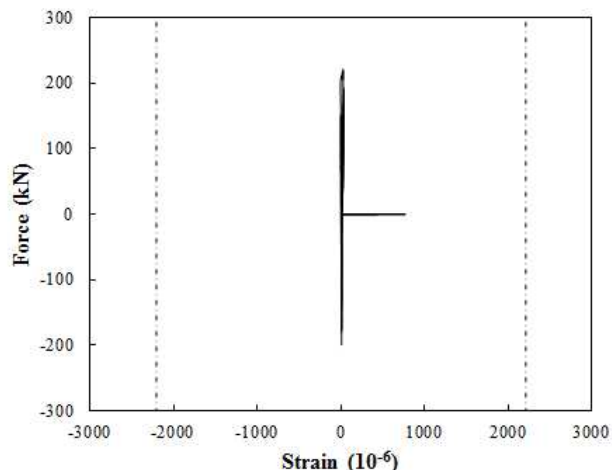
- 그림 3.20은 기둥 위험단면 위치의, 그림 3.21은 보 위험단면 위치의 스트레인 게이지에 의하여 측정된 수평하중과 철근 변형률 관계를 나타냄
- 실험 종료 시까지 좌측 및 우측 기둥의 상부와 하부 위험단면 위치 주근과 보강근은 항복하지 않음
 - 목표 손상(손상도 II)까지의 가력에 의하여 최대 경험 층간변형각은 0.94 % 였으며, 이 시점까지 부재 단부 주근 및 보강근은 항복하지 않음
- 실험 종료 시까지 보 좌측 및 우측 단부 위험단면 위치 주근은 항복하지 않음



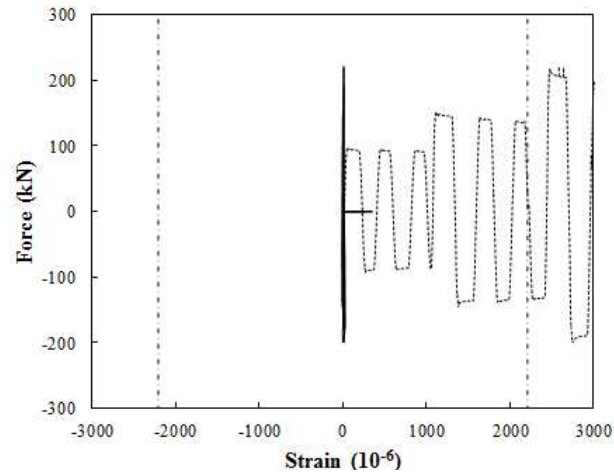
(a) 좌측 기둥 주근



(b) 우측 기둥 주근

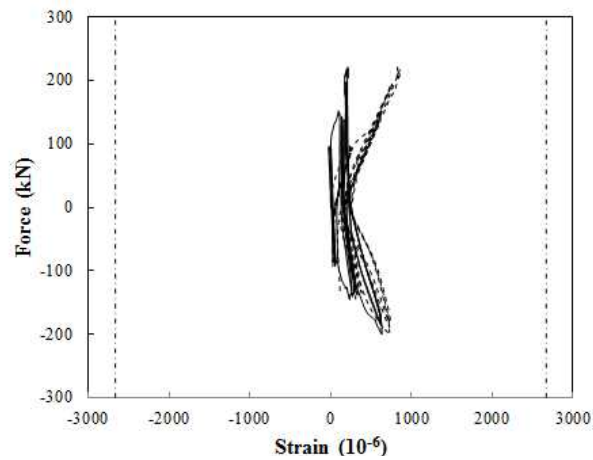


(c) 좌측 기둥 보강근

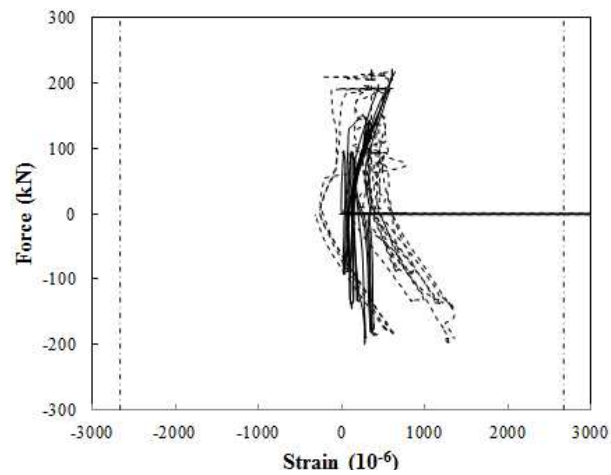


(d) 우측 기둥 보강근

그림 3.20 RCS1 시험체의 기둥 위험단면 위치 수평하중-변형률 관계



(a) 좌측 단부 주근



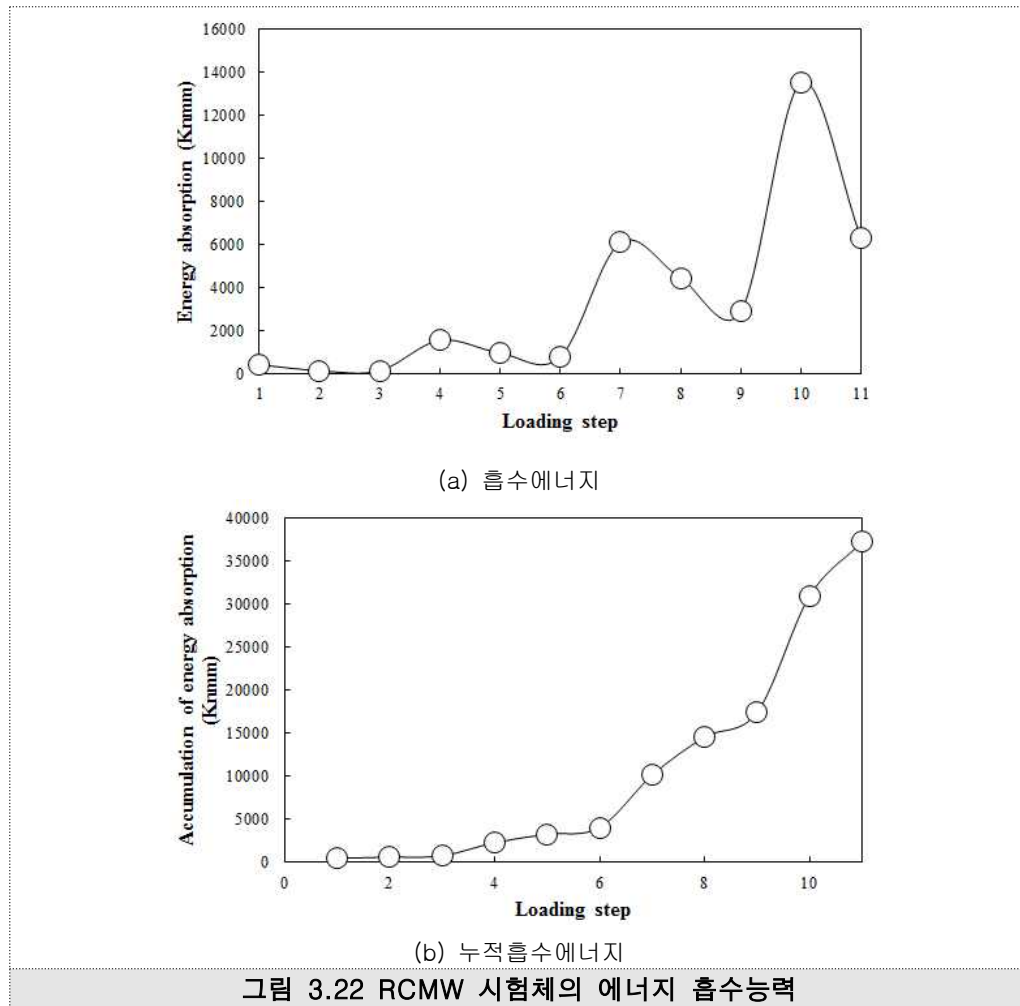
(b) 우측 단부 주근

그림 3.21 RCS1 시험체의 보 위험단면 위치 수평하중-변형률 관계

(4) 에너지 흡수능력

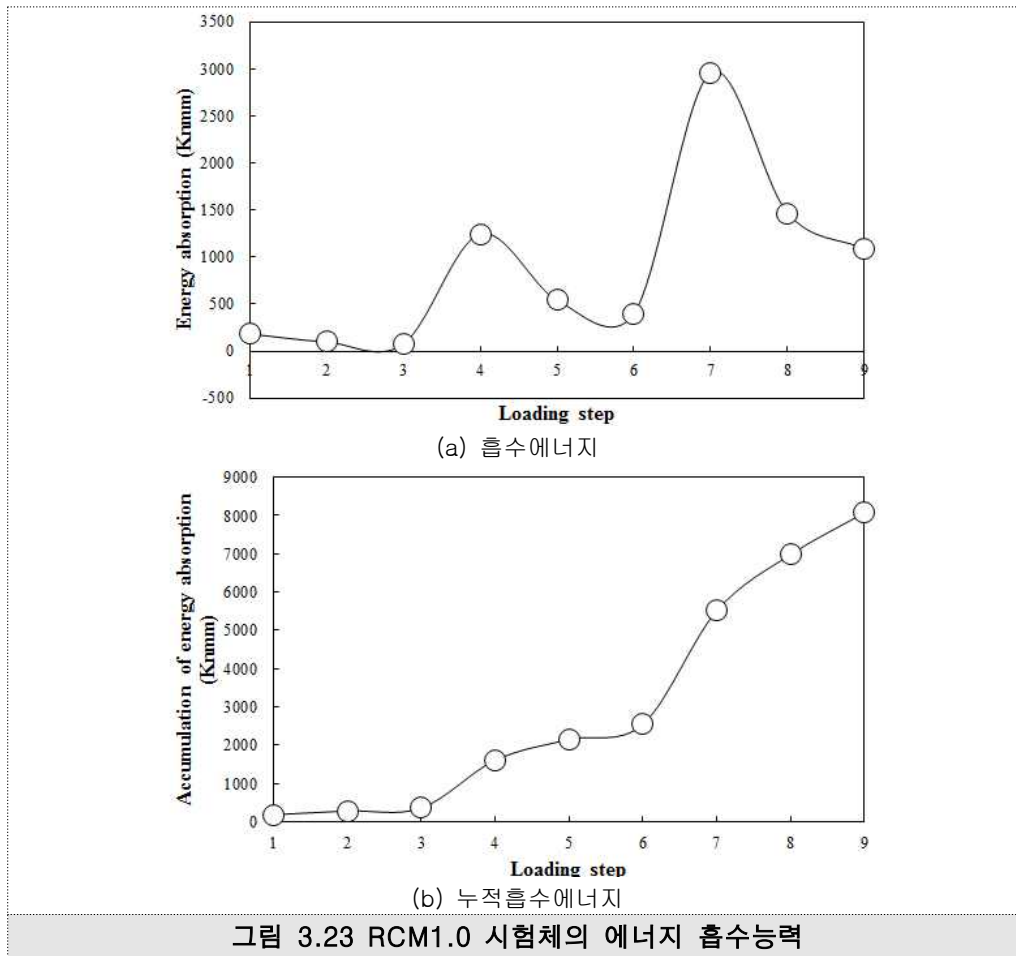
[RCMW 시험체]

- 그림 3.22는 시험체의 에너지 흡수능력을 나타냄
- 2스텝 1사이클 가력시 기둥 전반에 균열 발생 등으로 흡수에너지가 증가하였으며, 3스텝 1사이클 가력시 기둥 접합부 패널에 전단균열 발생, 보 단부 균열 발생, 기둥 주근 항복등 손상이 커지면서 흡수에너지가 급격히 증가
- 또한, 4스텝 1사이클 가력시 접합부 균열 폭 확대 및 균열 발생 증가, 조적벽체 상부 코너 벽돌 압괴 등 손상이 증가하면서 흡수에너지가 급격히 증가



[RCS1 시험체]

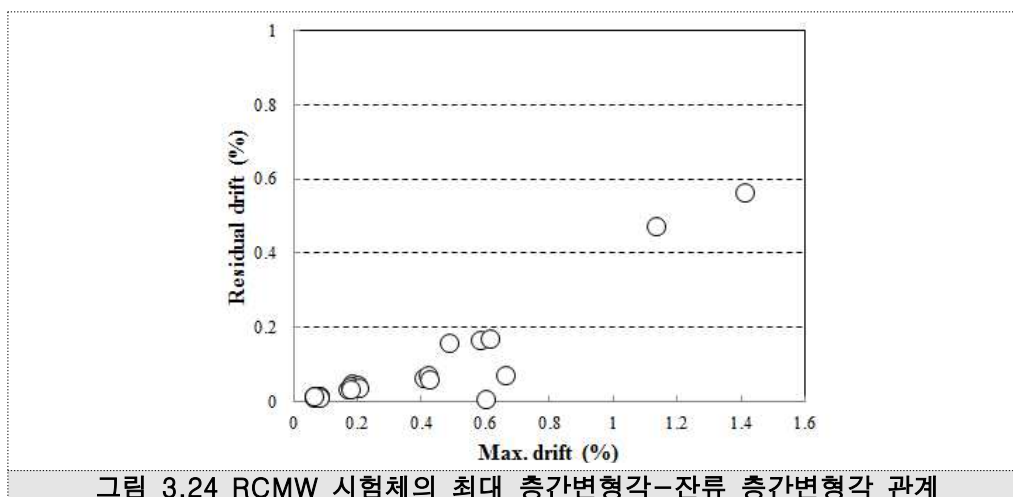
- 그림 3.23은 시험체의 에너지 흡수능력을 나타냄
- 2스텝 1사이클 가력시 좌우 접합부 패널 전단균열 발생 등 균열 증가로 흡수에너지가 크게 증가
- 3스텝 1사이클 가력시 보 좌우 단부 전단균열 발생 등 균열 증가로 흡수에너지가 크게 증가



(5) 잔류 변형

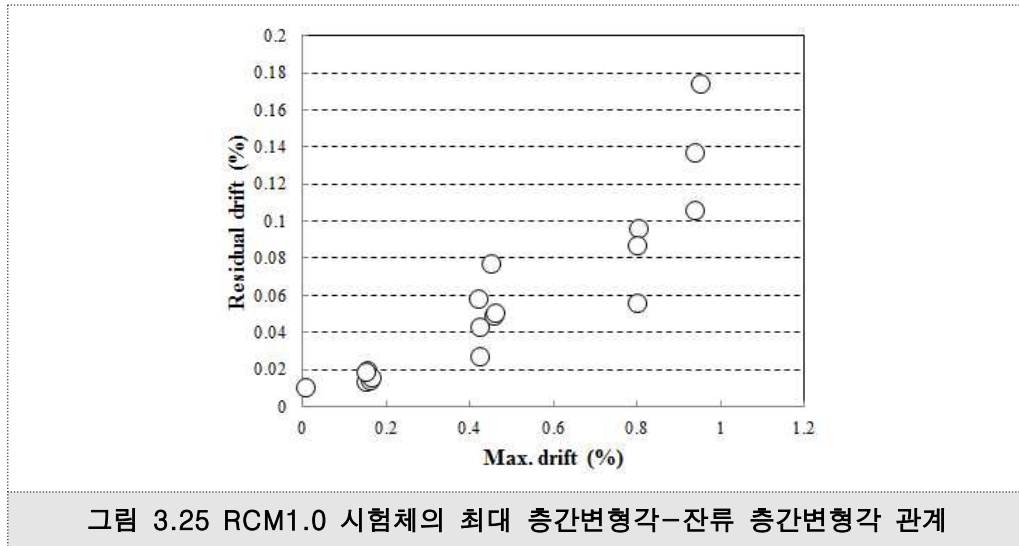
[RCMW 시험체]

- 그림 3.24는 시험체의 최대 층간변형각과 잔류 층간변형각과의 관계를 나타내며, 그림 중의 잔류 층간변형각은 하중제하시 하중이 '0'이 되는 시점의 층간변형각을 의미함
- 최대 층간변형각이 0.6% 보다 작은 경우, 잔류 층간변형각은 최대 층간변형각의 약 30% 이하로 나타난 반면, 최대 층간변형각이 0.6% 보다 큰 경우, 잔류 층간변형각은 최대 층간변형각의 약 40% 정도인 것으로 나타남



[RCS1 시험체]

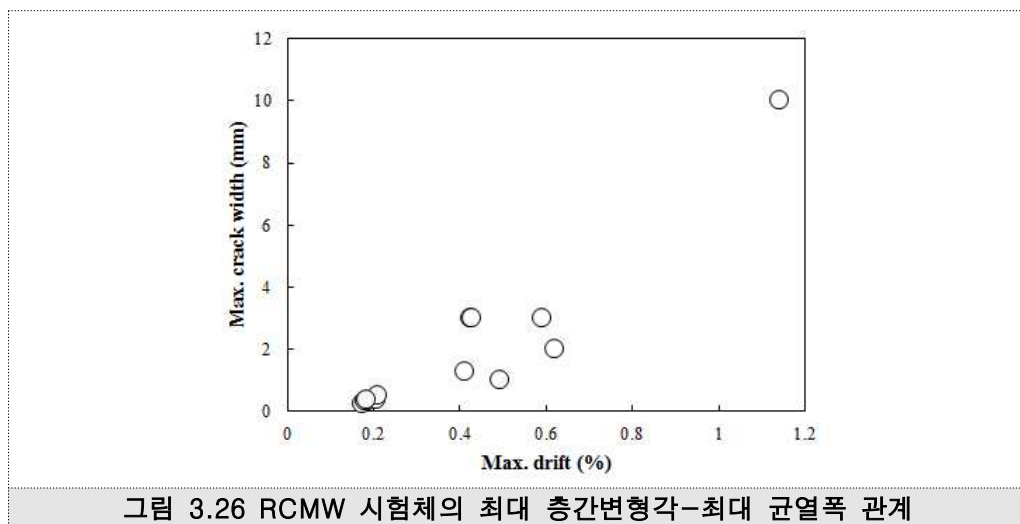
- 그림 3.24는 시험체의 최대 층간변형각과 잔류 층간변형각과의 관계를 나타냄
- 실험 종료 시까지 잔류 층간변형각은 최대 층간변형각의 1/5 미만으로 작게 발생



(6) 균열폭

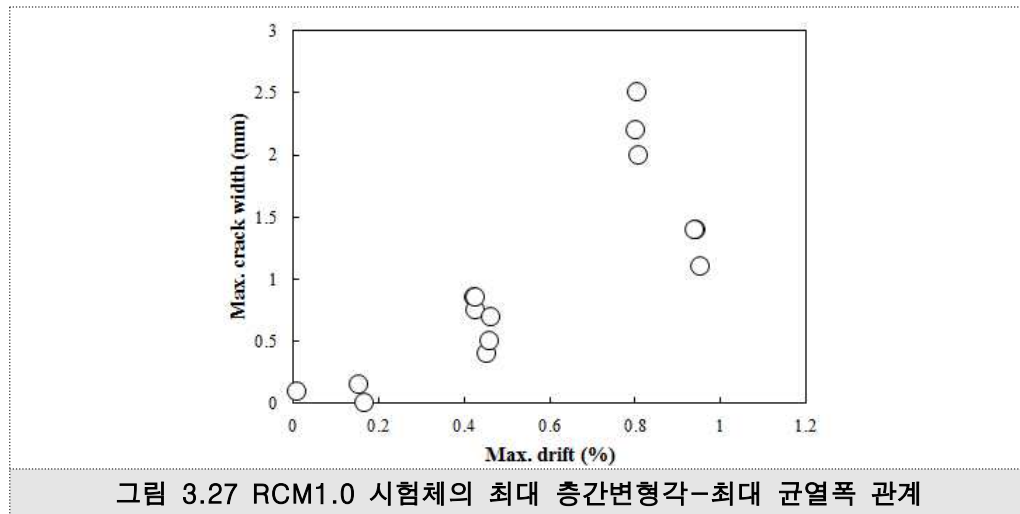
[RCMW 시험체]

- 그림 3.26은 시험체의 최대 층간변형각과 최대 균열폭과의 관계를 나타냄
- 최대 층간변형각이 증가할수록 최대 균열폭은 증가하는 경향을 보였으며, 최대내력에 도달한 이후 마지막 가력에서 최대 층간변형각의 급격하게 증가하면서 최대 균열폭도 큰 폭으로 증가하여 10 mm에 달함



[RCS1 시험체]

- 그림 3.27은 시험체의 최대 층간변형각과 최대 균열폭과의 관계를 나타냄
- 최대 층간변형각이 증가할수록 최대 균열폭은 증가하는 경향을 보였으며, 최대 균열폭은 2.5 mm 임



마. 동적실험 결과

- 표 3.11은 시험체의 가진스케일별 전단력, 응답 가속도 및 응답 변위의 최대값을 나타냄
 - 전단력은 시험체 기둥 하부에 설치한 4개 로드셀에서의 계측값의 합임
 - 응답 가속도 및 응답 변위는 시험체 보 단면 중심에 설치한 가속도계 및 LVDT에 의하여 측정된 값임
- 최대 전단력은 동적실험 전의 손상 유무에 따라 큰 차이를 보이지 않았음
- 최대 응답 가속도는 동적실험 전의 손상 유무에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, 가진스케일 160% 이후에는 동적실험 전에 손상을 발생시킨 시험체 RCS1에 더 큰 가속도 응답이 발생하였음
- 최대 응답 변위는 가진스케일이 작을수록 동적실험 전에 손상을 발생시킨 시험체 RCS1과 손상을 발생시키지 않은 시험체 RCS0 사이에 큰 차이가 발생하였으나, 가진스케일이 커질수록 그 차이는 줄어드는 것으로 나타남

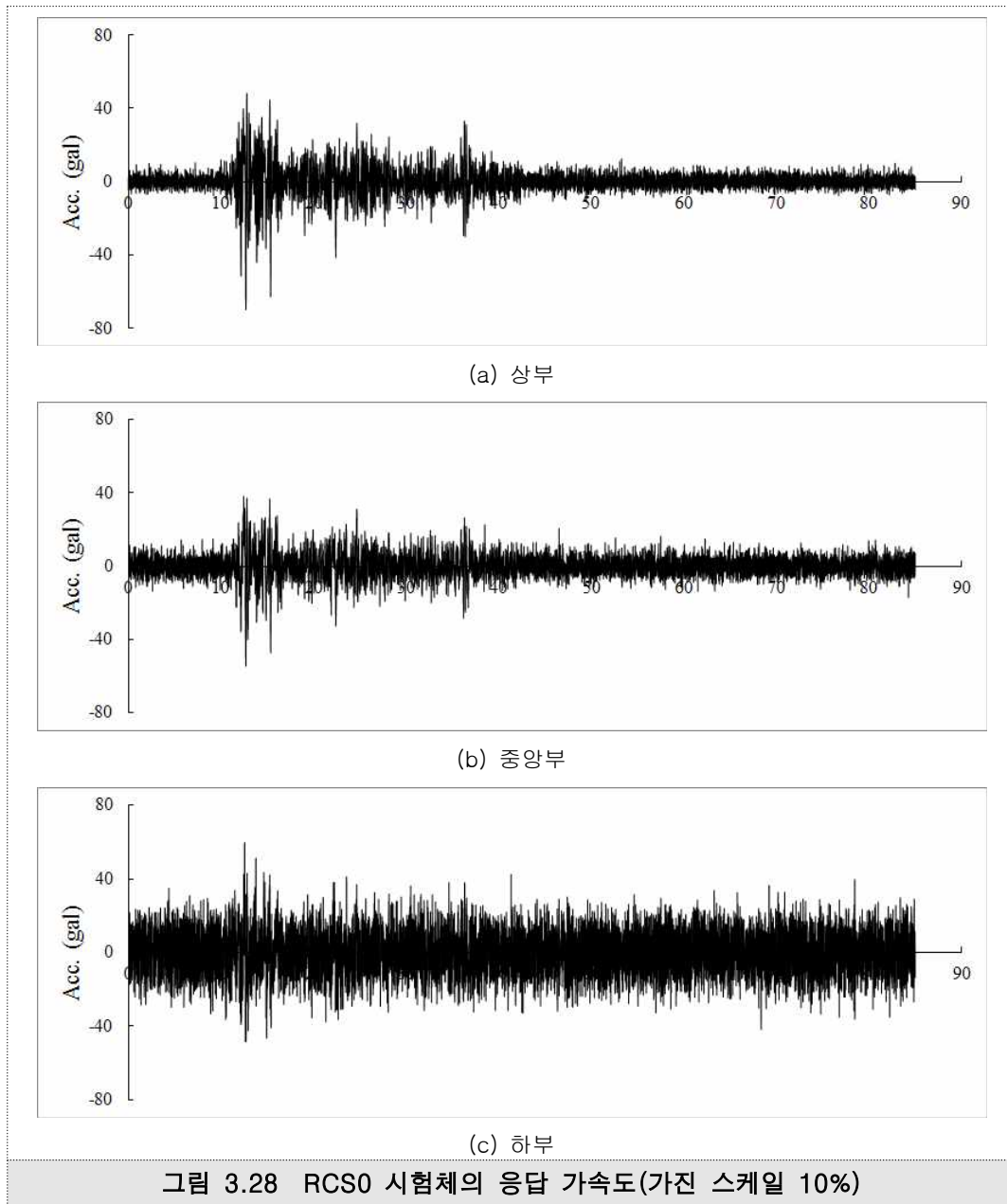
표 3.11 최대 응답값

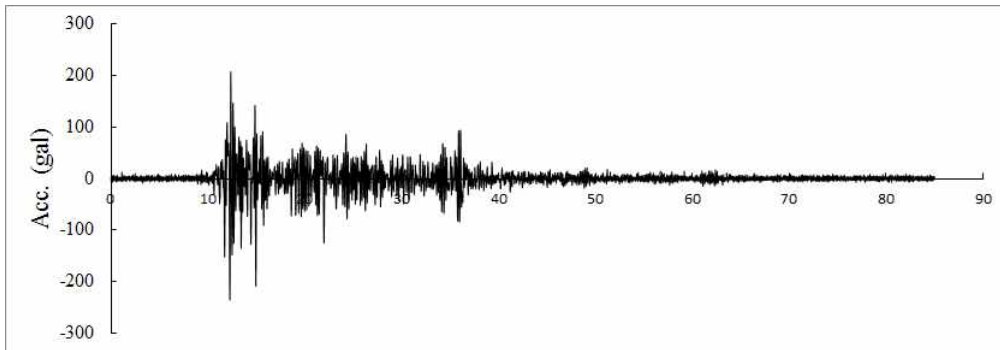
입력가속도 스케일 (%)	RCS0			RCS1		
	전단력 (kN)	가속도 (gal)	변위 (mm) (층간변위, mm)	전단력 (kN)	가속도 (gal)	변위 (mm) (층간변위, mm)
10	6.22	70.04	0.22 (0.19)	6.32	77.94	1.28 (1.28)
30	22.12	235.42	1.49 (1.59)	15.28	194.70	5.96 (5.93)
70	45.52	514.36	5.35 (5.55)	42.07	716.95	17.39 (17.77)
100	67.79	769.53	10.50 (10.16)	71.07	789.53	25.11 (24.87)
130	79.45	1,085.5	19.90 (19.51)	77.95	1,042.49	32.90 (33.24)
160	76.33	1,279.88	31.50 (29.98)	77.10	1,462.12	39.38 (38.51)
190	85.16	1,539.95	44.51 (41.88)	74.74	1,568.45	45.22 (43.30)
220	87.40	2,137.67	55.97 (52.73)	76.91	51,662.9	58.82 (56.42)
250	83.45	2,750.7	93.75 (89.19)			

(1) 응답 가속도

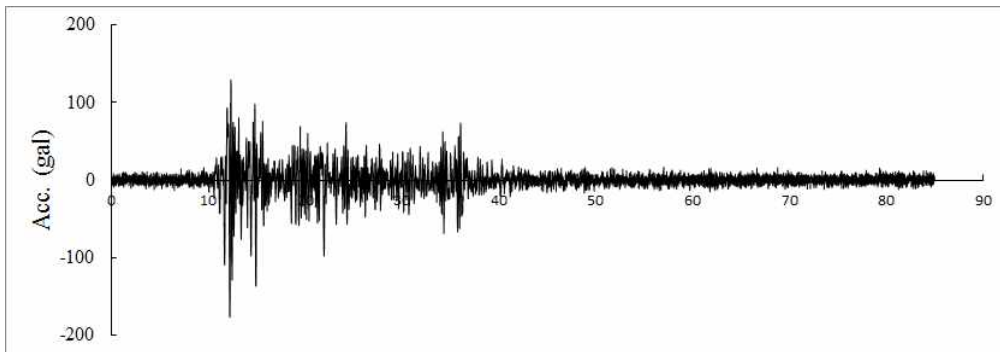
[RCS0 시험체]

- 그림 3.28 ~ 그림 3.36은 시험체 RCS0의 가진스케일에 따른 상부, 중앙부, 하부의 가속도 응답을 나타냄
- 가진스케일이 증가할수록 응답 가속도는 증가하였으며, 기둥 하부, 중앙부, 상부 순서로 응답 가속도가 크게 발생하였음

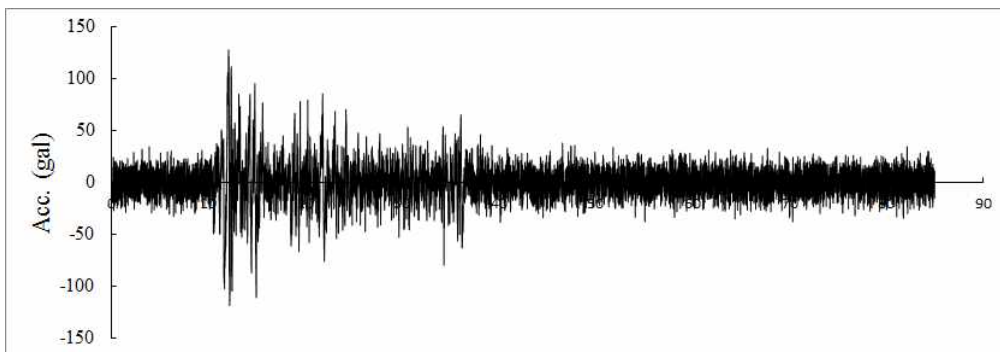




(a) 상부

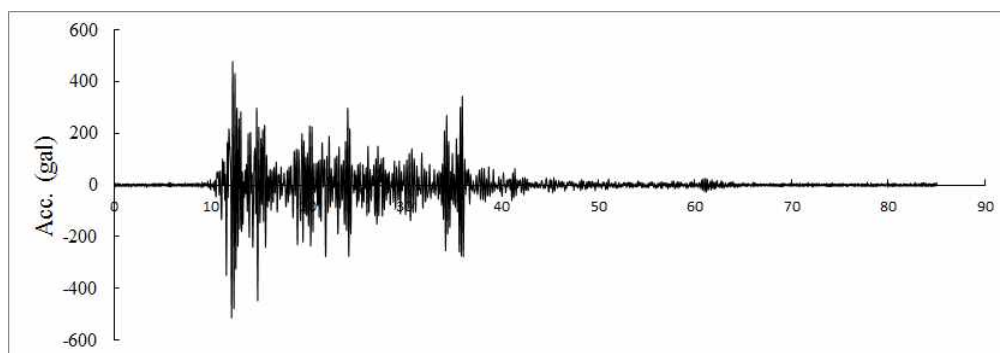


(b) 중앙부

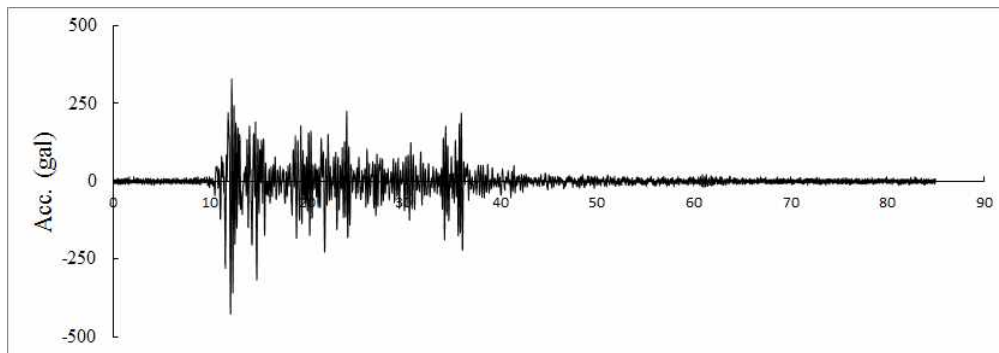


(c) 하부

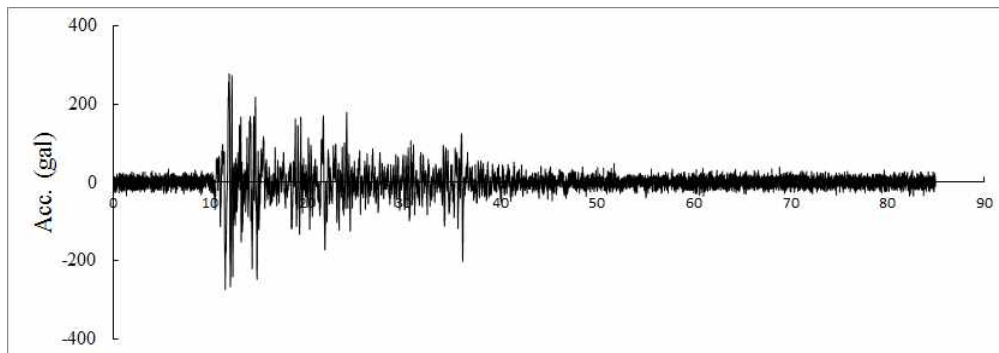
그림 3.29 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 30%)



(a) 상부

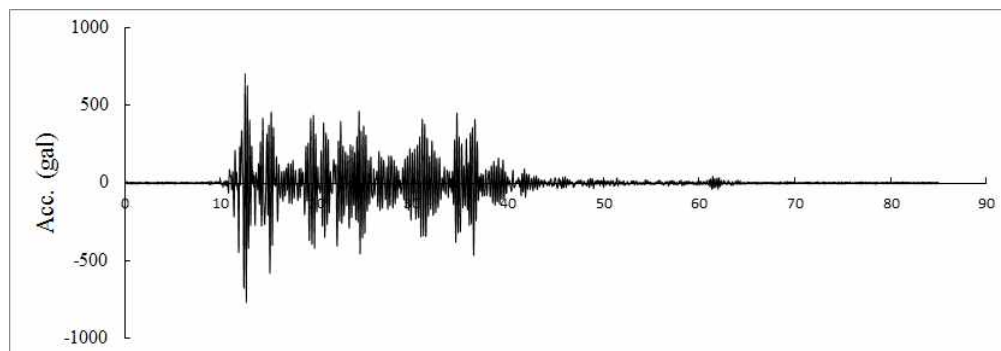


(b) 중앙부

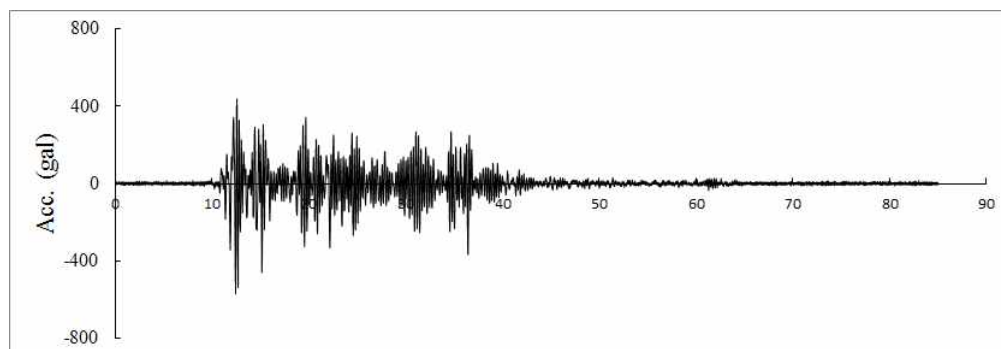


(c) 하부

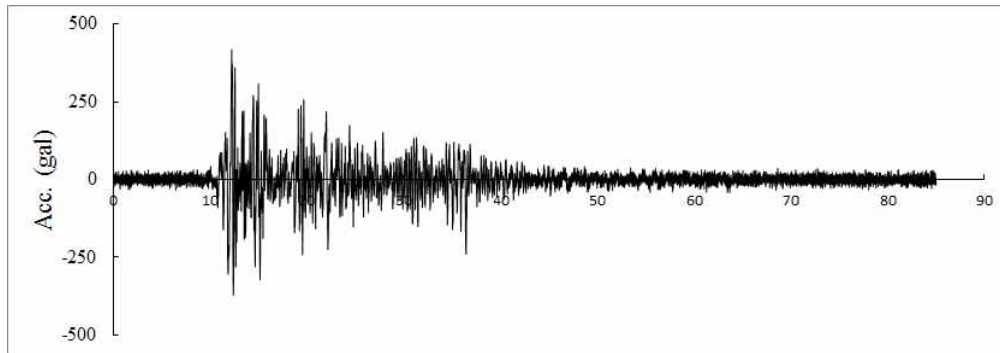
그림 3.30 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 70%)



(a) 상부

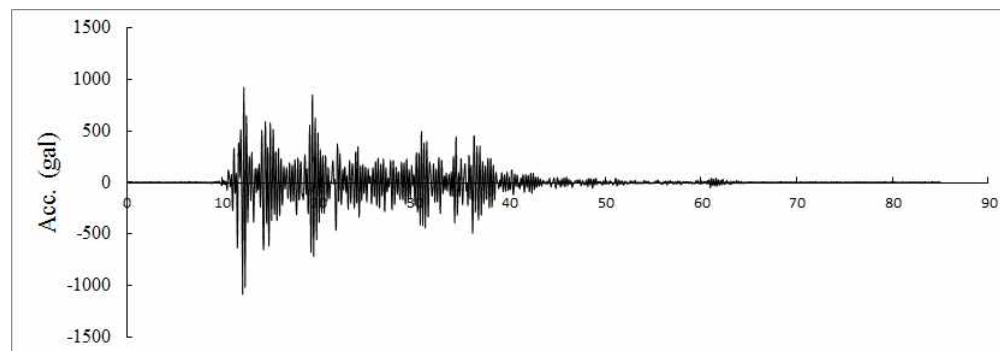


(b) 중앙부

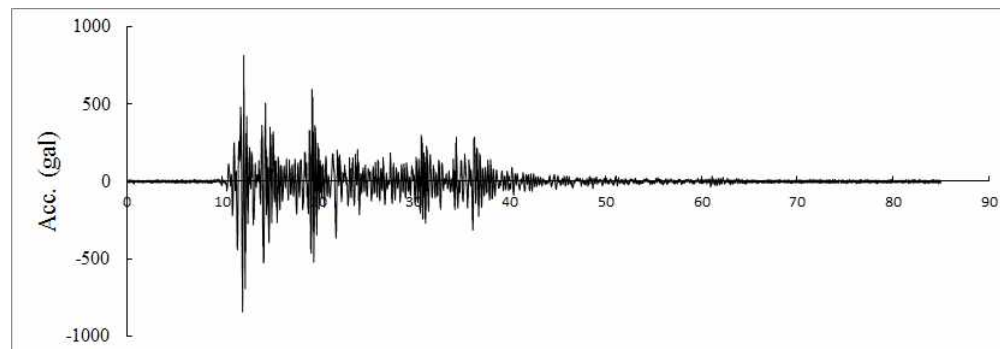


(c) 하부

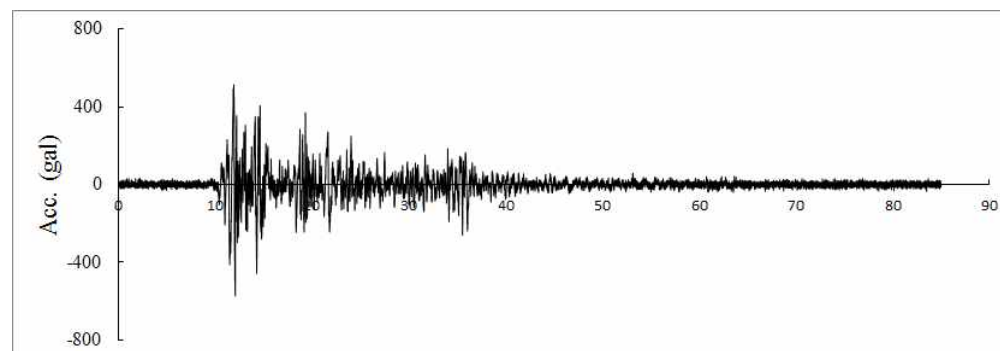
그림 3.31 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 100%)



(a) 상부

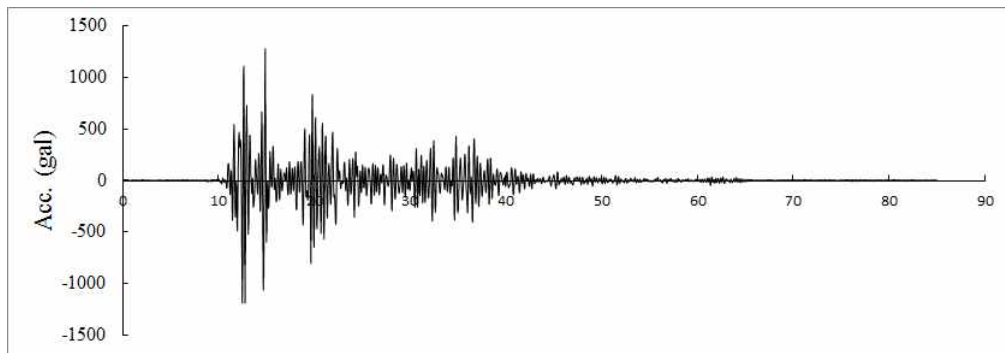


(b) 중앙부

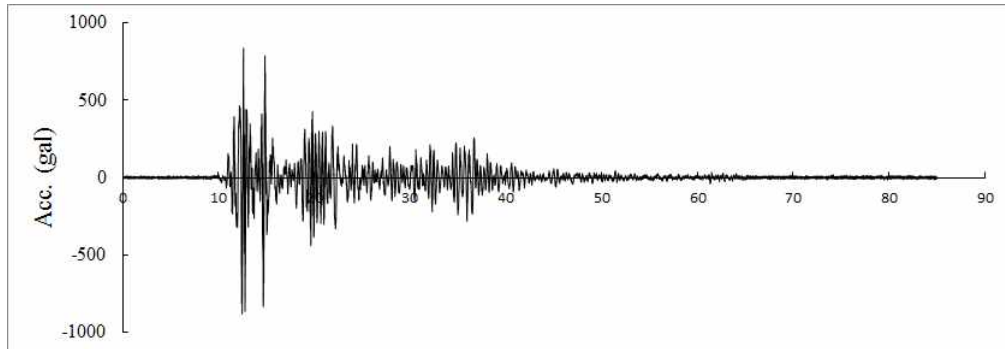


(c) 하부

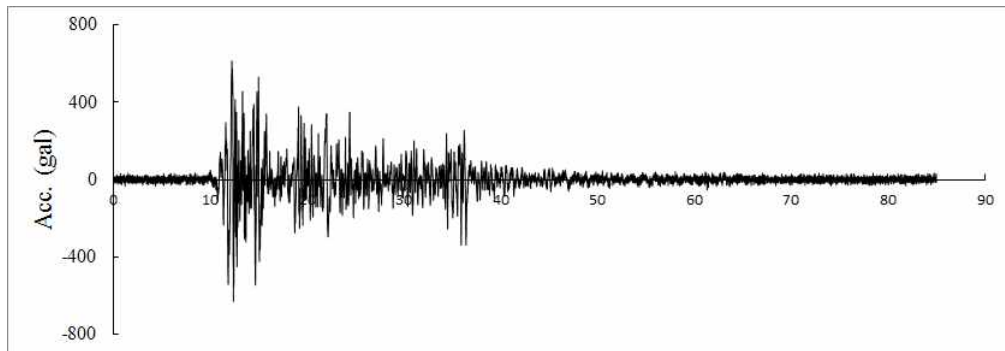
그림 3.32 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 130%)



(a) 상부

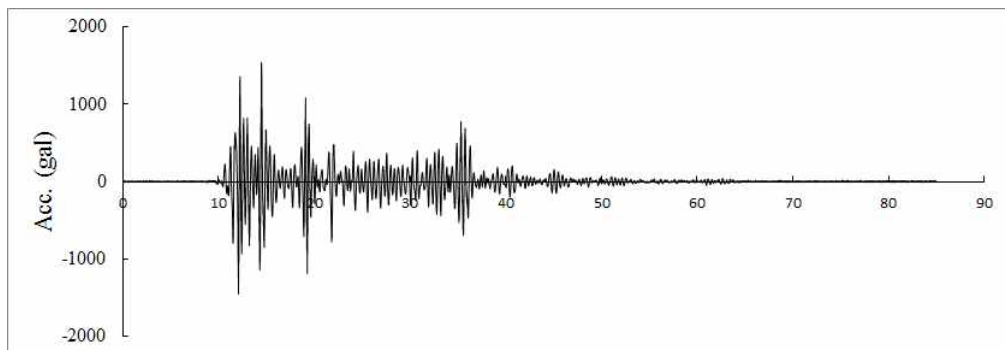


(b) 중앙부

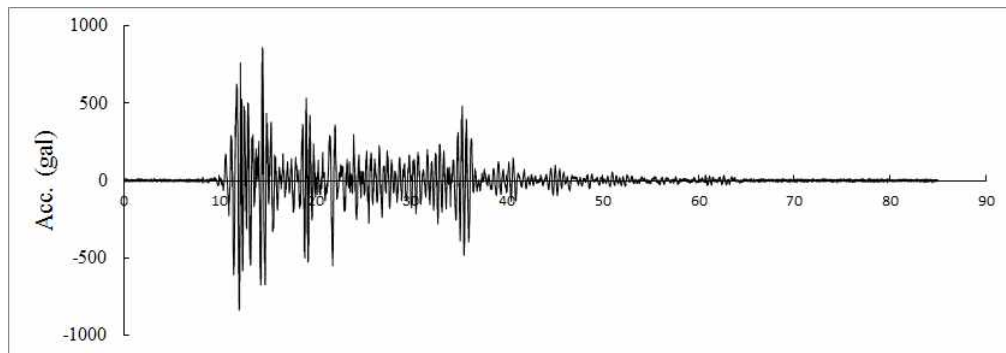


(c) 하부

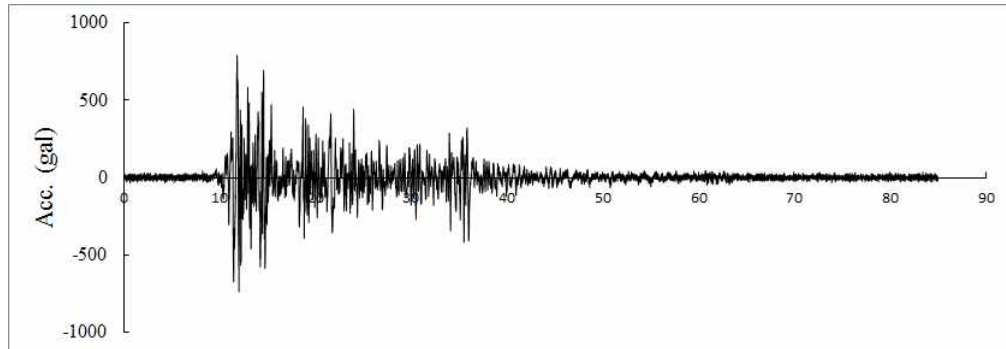
그림 3.33 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 160%)



(a) 상부

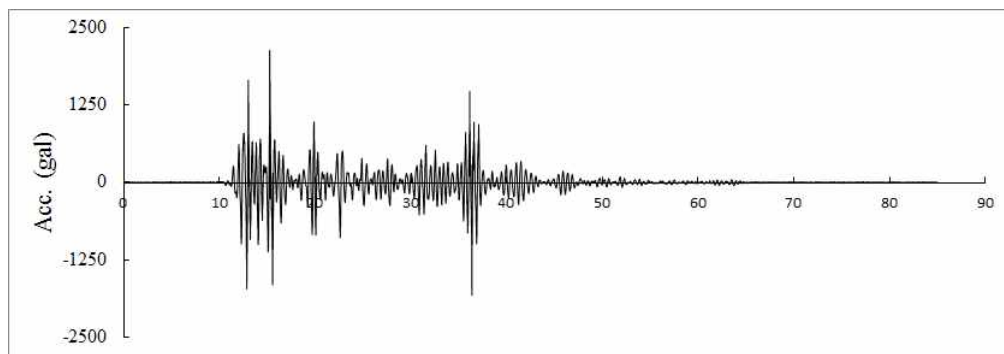


(b) 중앙부

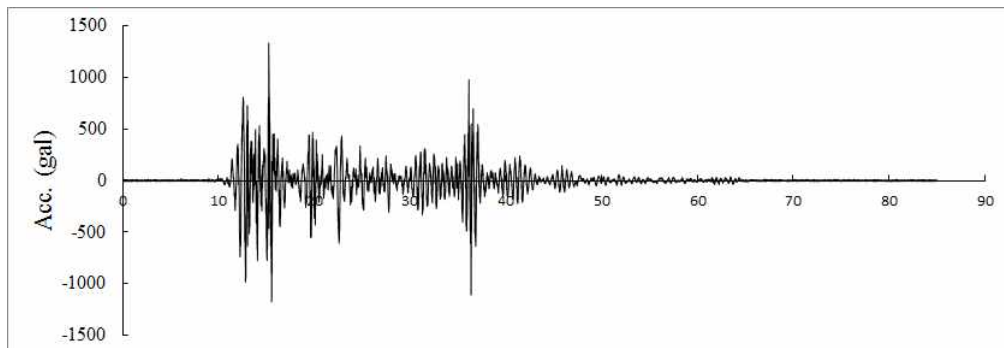


(c) 하부

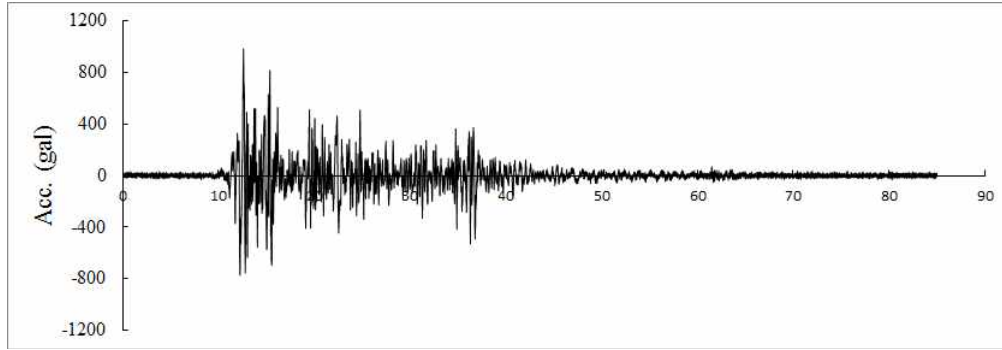
그림 3.34 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 190%)



(a) 상부

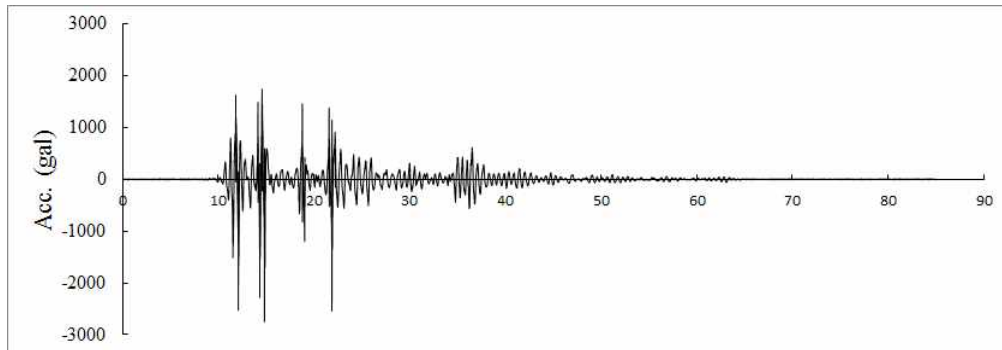


(b) 중앙부

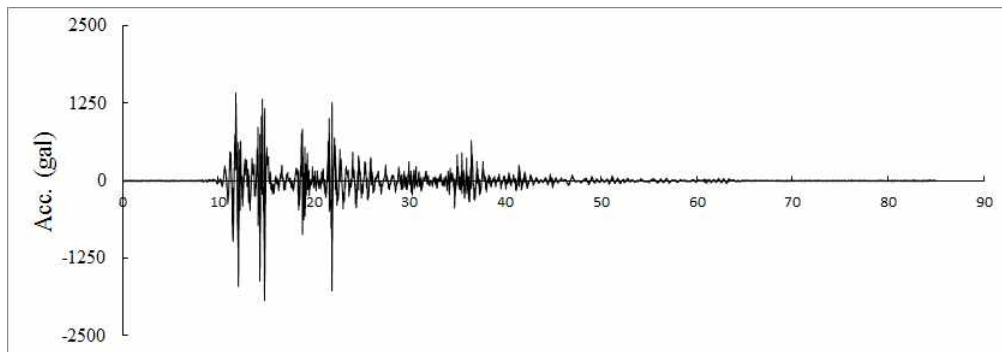


(c) 하부

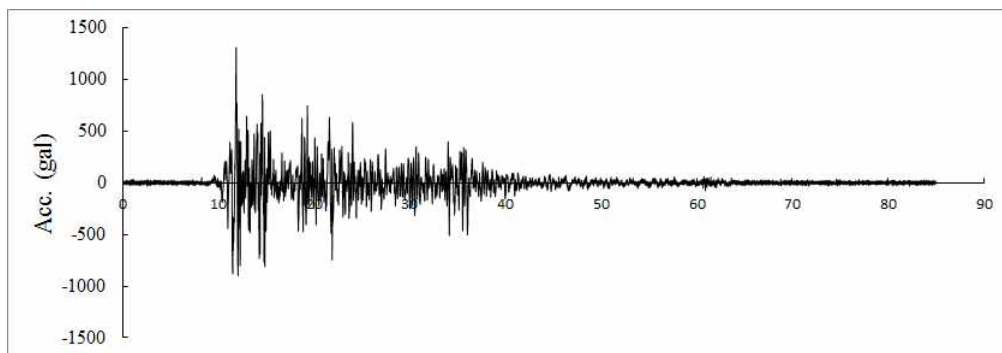
그림 3.35 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 220%)



(a) 상부



(b) 중앙부

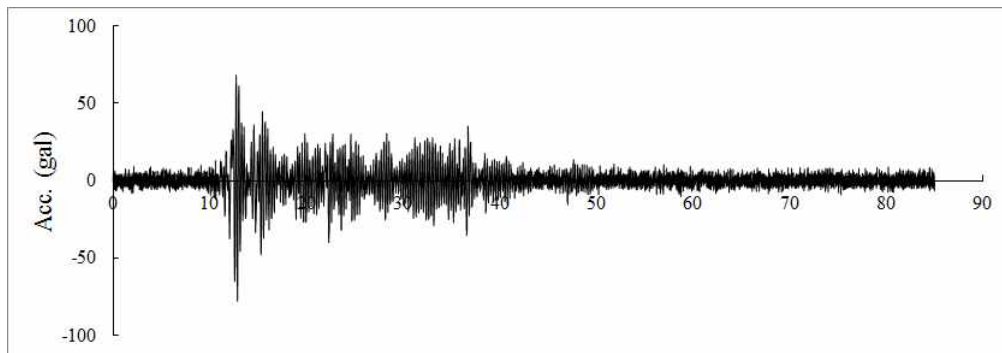


(c) 하부

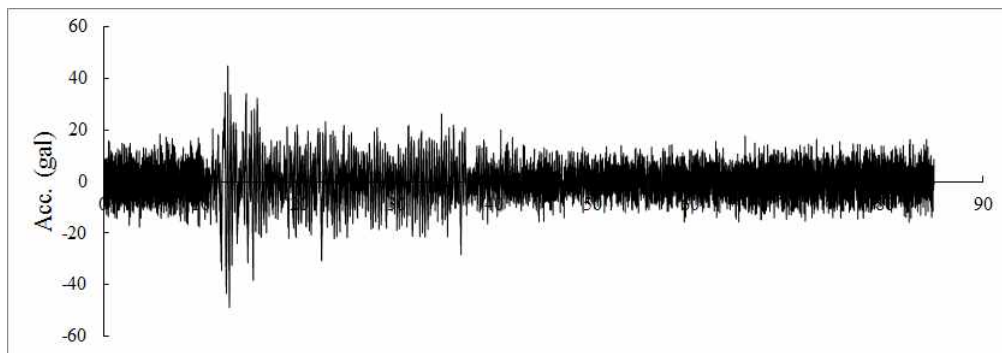
그림 3.36 RCS0 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 250%)

[RCS0 시험체]

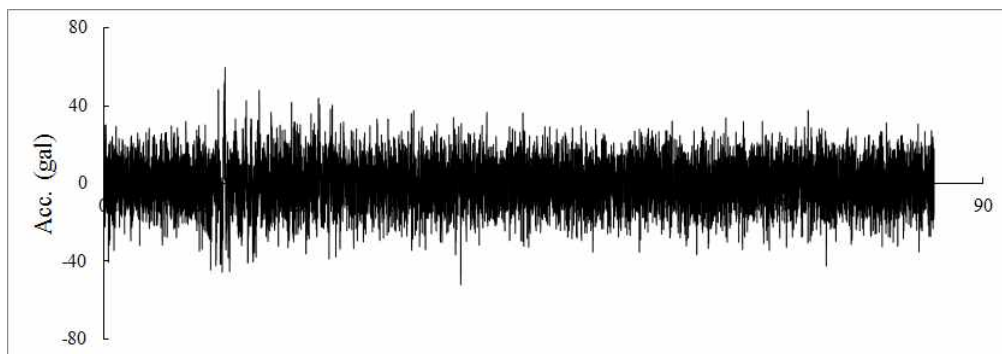
- 그림 3.37 ~ 그림 3.44는 시험체 RCS1의 가진스케일에 따른 상부, 중앙부, 하부의 가속도 응답을 나타냄
- 가진스케일이 증가할수록 응답 가속도는 증가하였으며, 기둥 하부, 중앙부, 상부 순서로 응답 가속도가 크게 발생하였음



(a) 상부

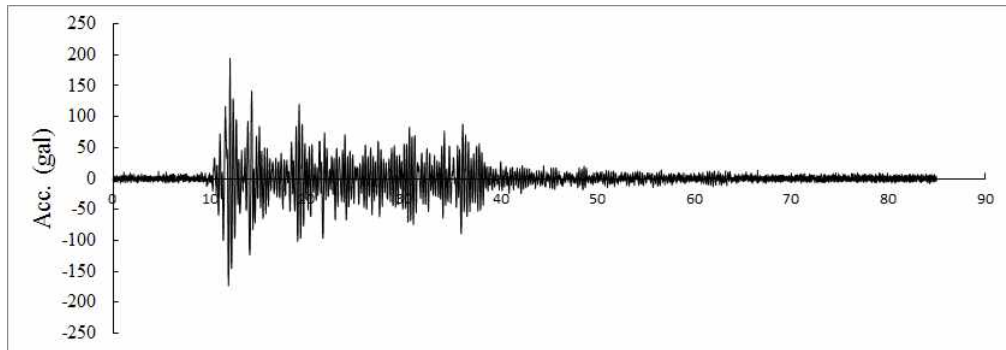


(b) 중앙부

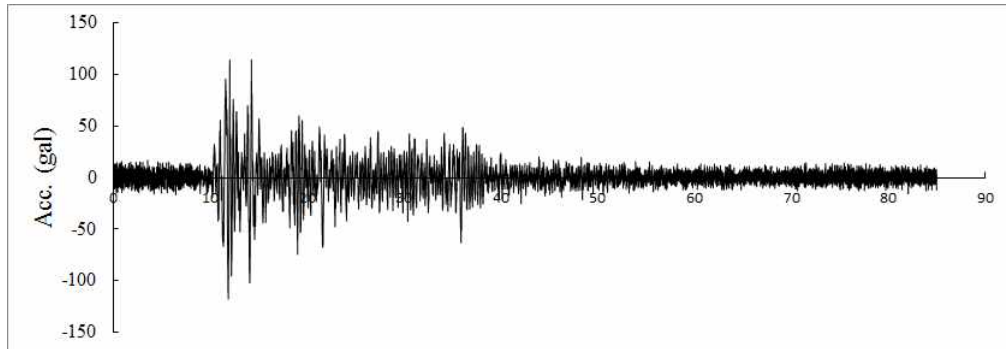


(c) 하부

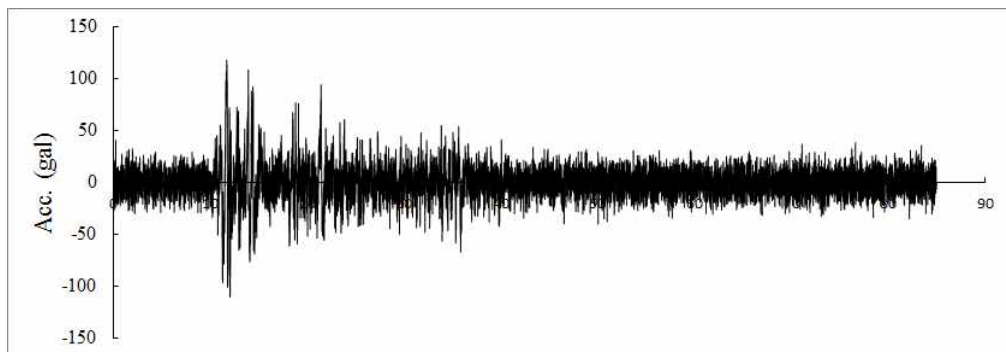
그림 3.37 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 10%)



(a) 상부

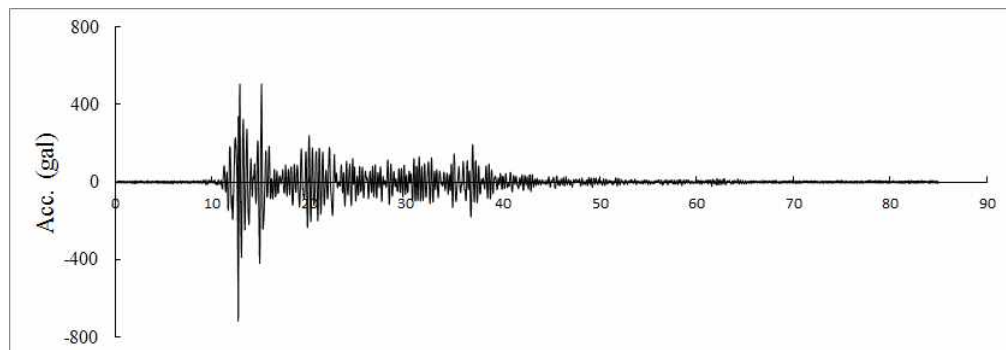


(b) 중앙부

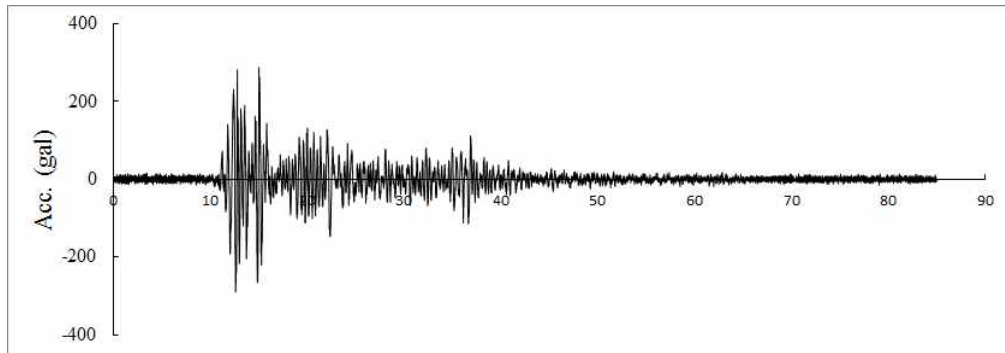


(c) 하부

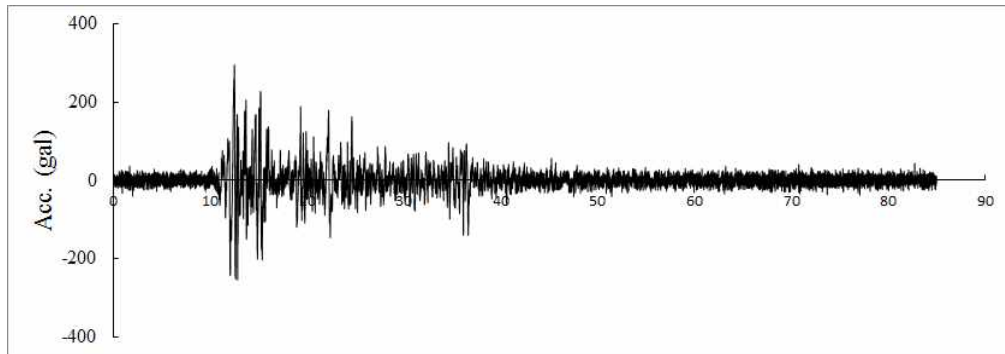
그림 3.38 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 30%)



(a) 상부

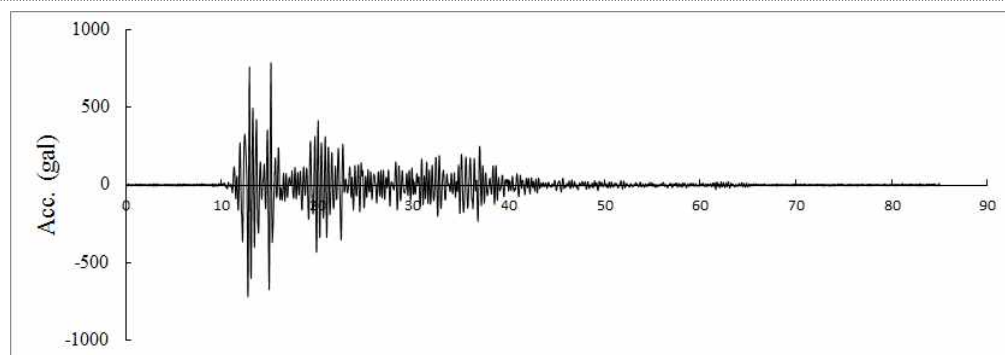


(b) 중앙부

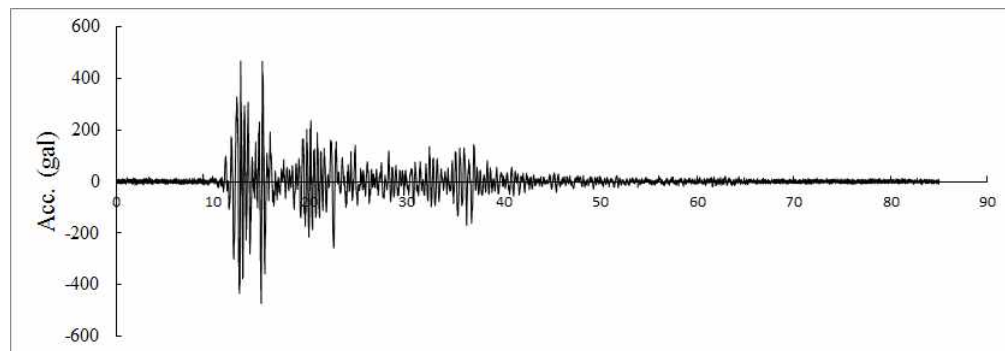


(c) 하부

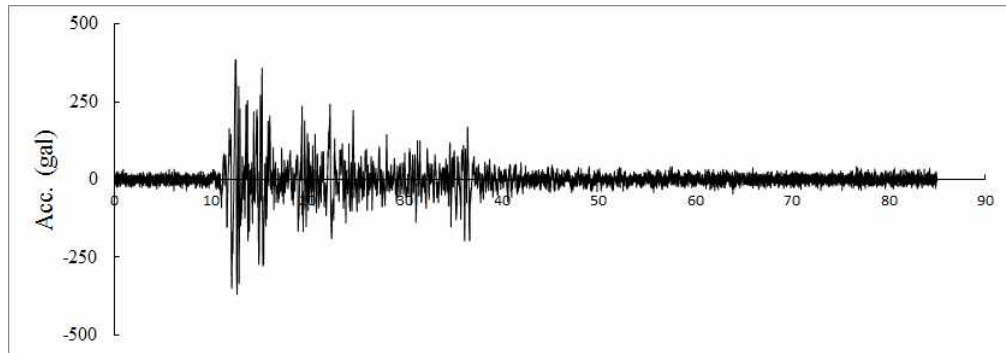
그림 3.39 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 70%)



(a) 상부

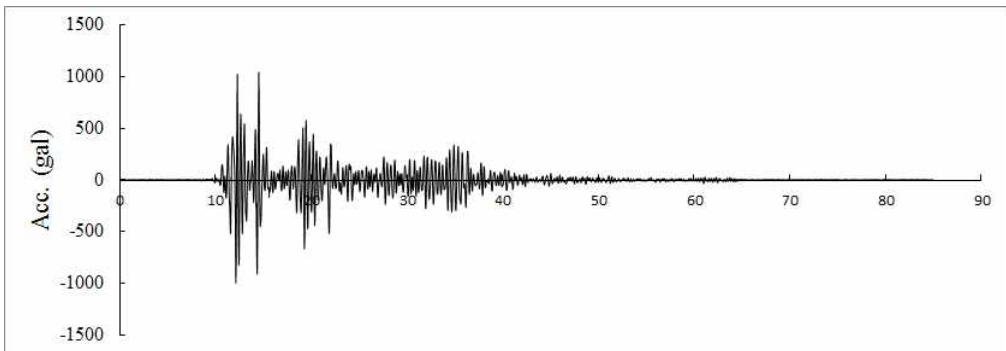


(b) 중앙부

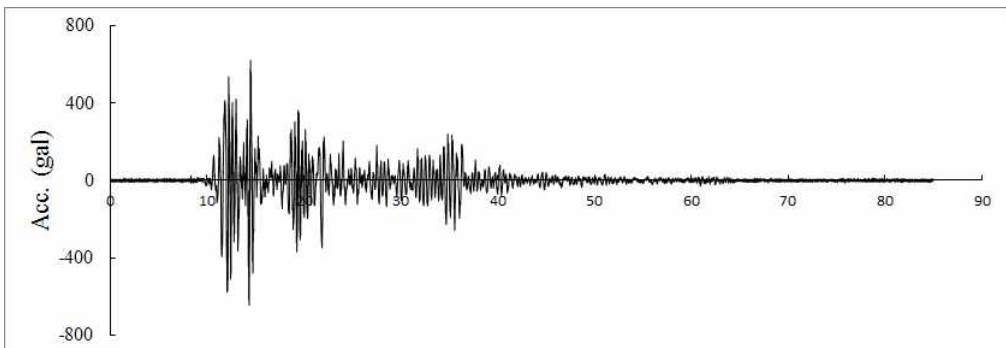


(c) 하부

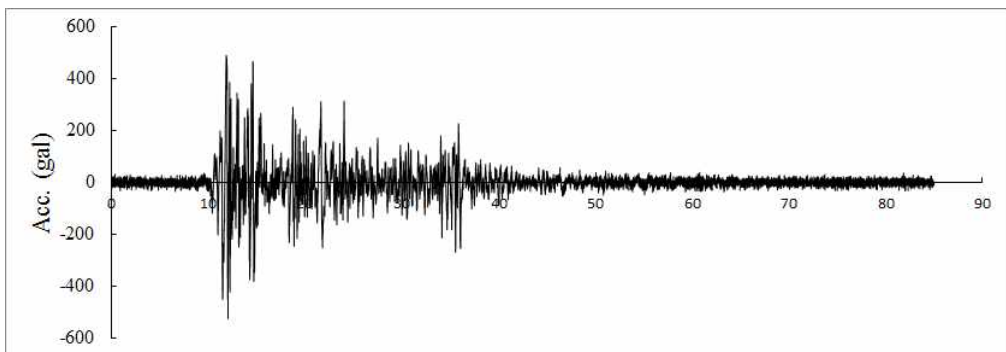
그림 3.40 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 100%)



(a) 상부

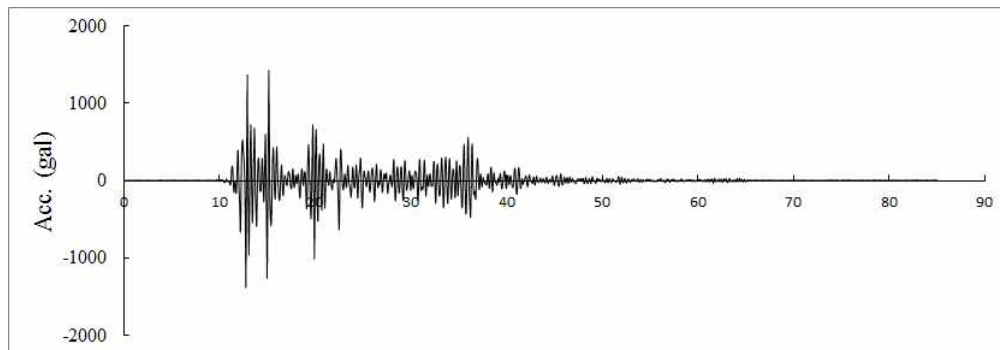


(b) 중앙부

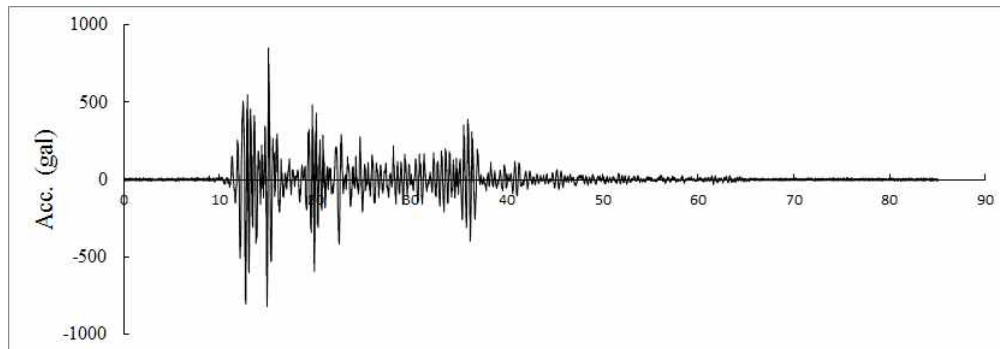


(c) 하부

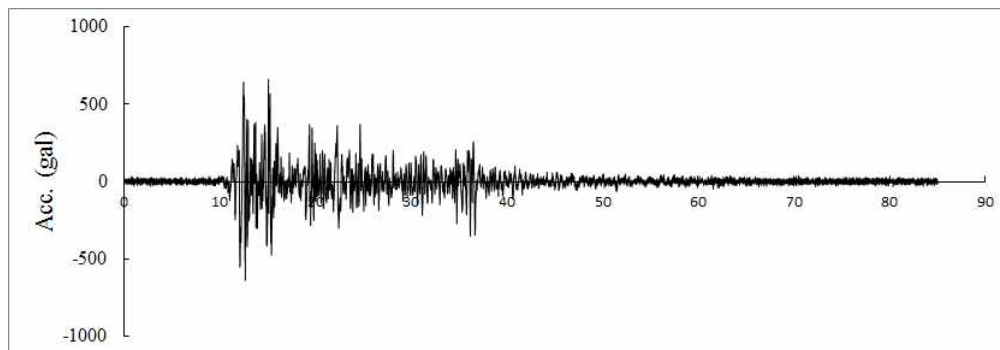
그림 3.41 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 130%)



(a) 상부

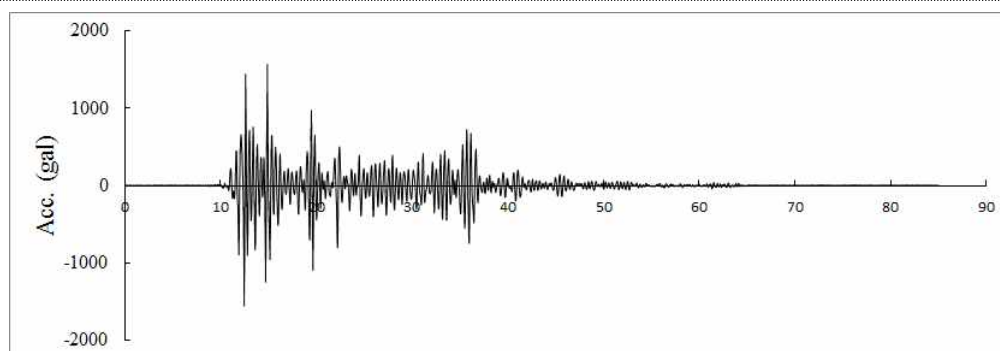


(b) 중앙부

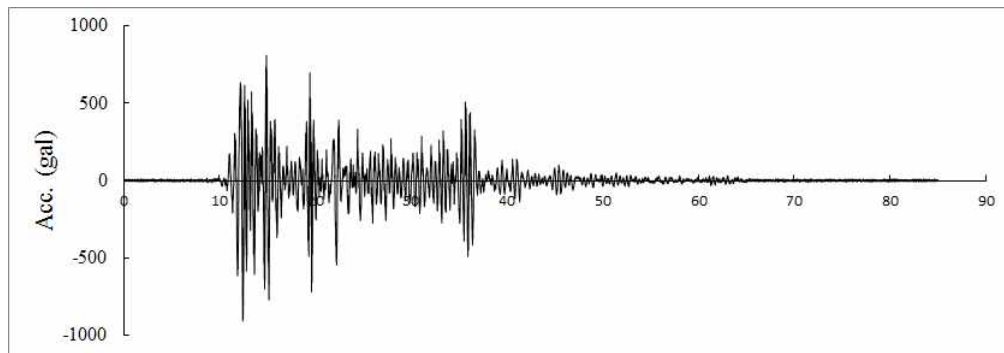


(c) 하부

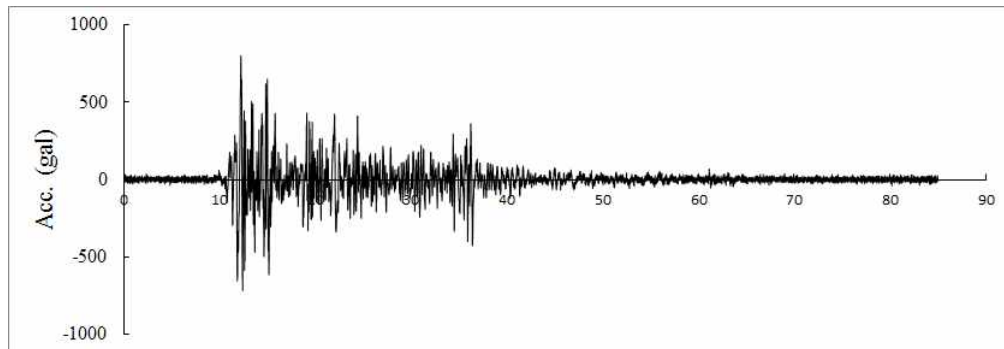
그림 3.42 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 160%)



(a) 상부

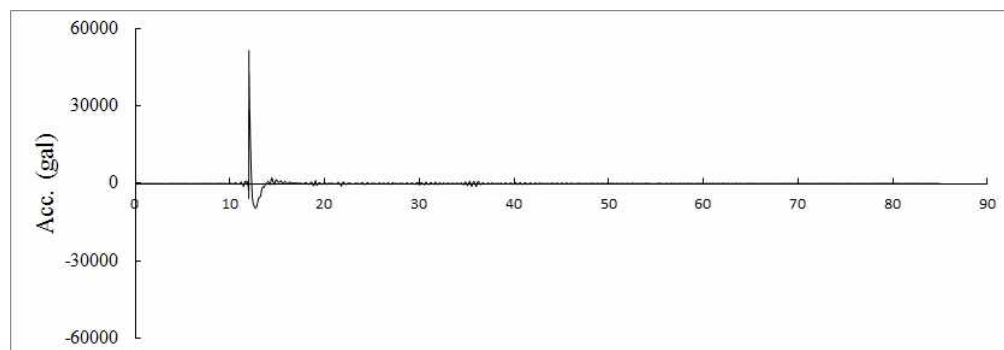


(b) 중앙부

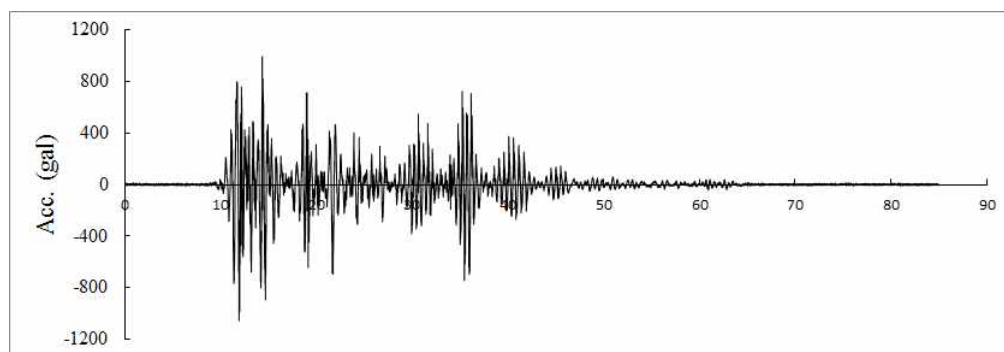


(c) 하부

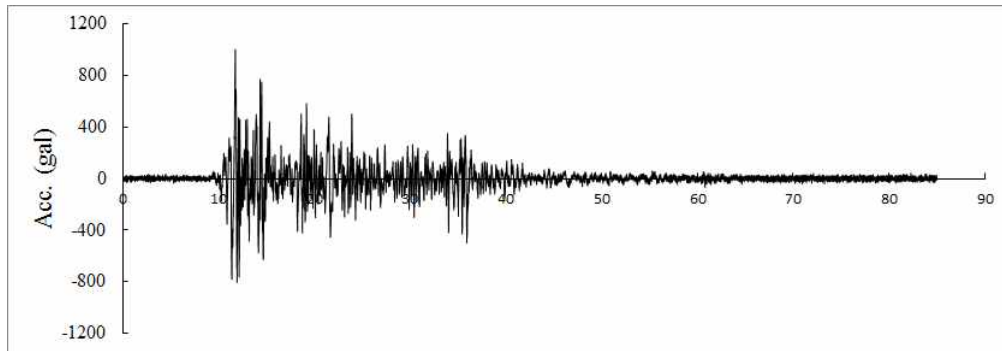
그림 3.43 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 190%)



(a) 상부



(b) 중앙부



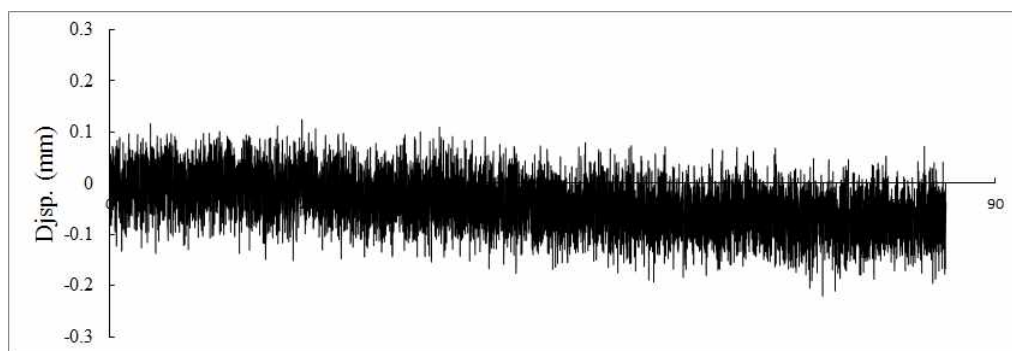
(c) 하부

그림 3.44 RCS1 시험체의 응답 가속도(가진 스케일 220%)

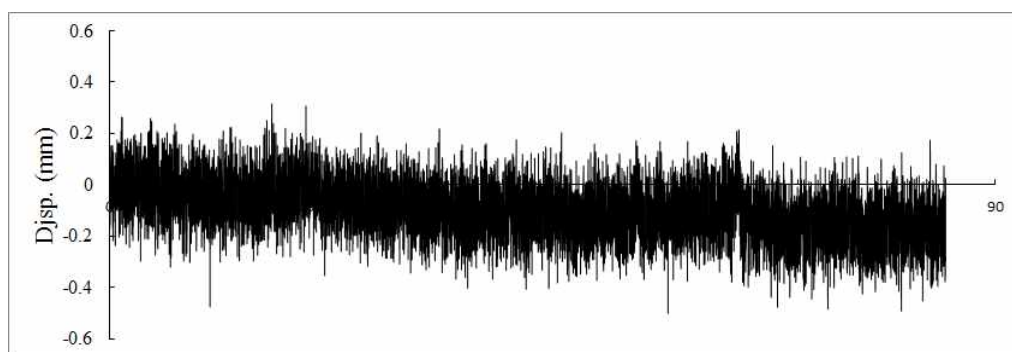
(3) 응답 변위

[RCS0 시험체]

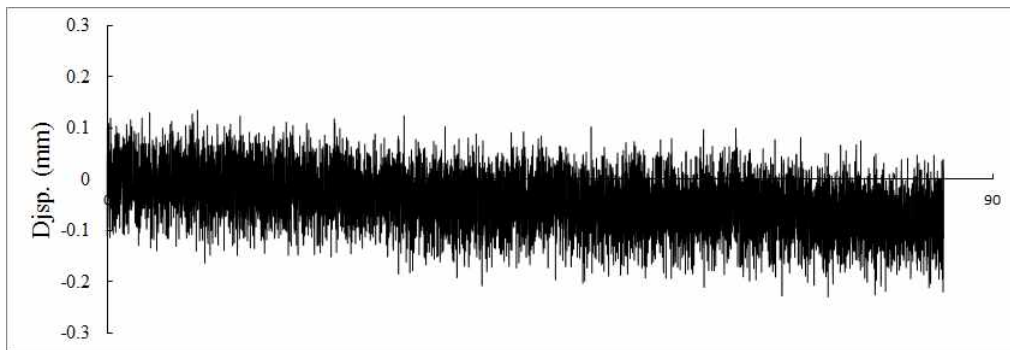
- 그림 3.45 ~ 그림 3.53은 시험체 RCS0의 가진스케일에 따른 상부, 중앙부, 하부의 변위 응답을 나타냄
- 가진스케일이 증가할수록 응답 변위는 증가하였으며, 기둥 하부, 중앙부, 상부 순서로 응답 변위가 크게 발생하였음



(a) 상부

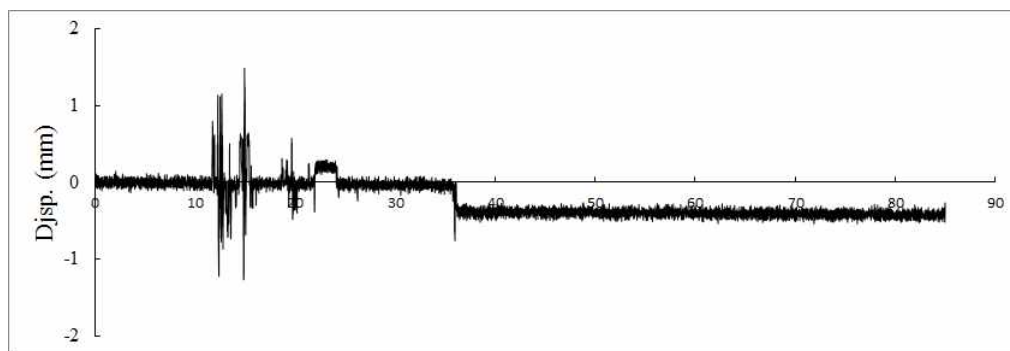


(b) 중앙부

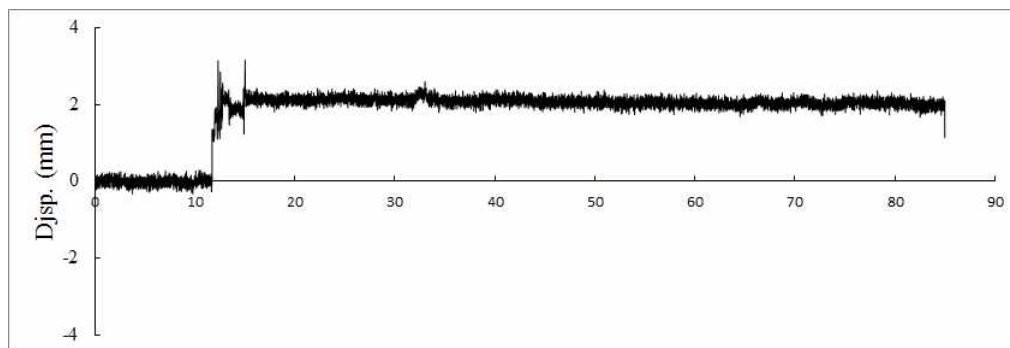


(c) 하부

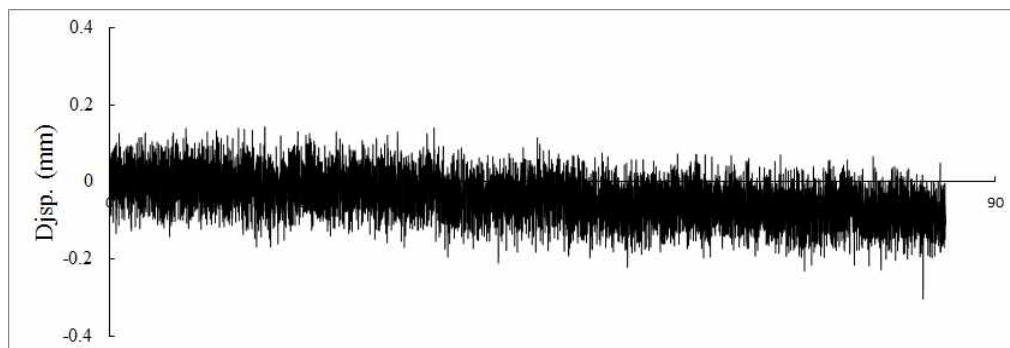
그림 3.45 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 10%)



(a) 상부

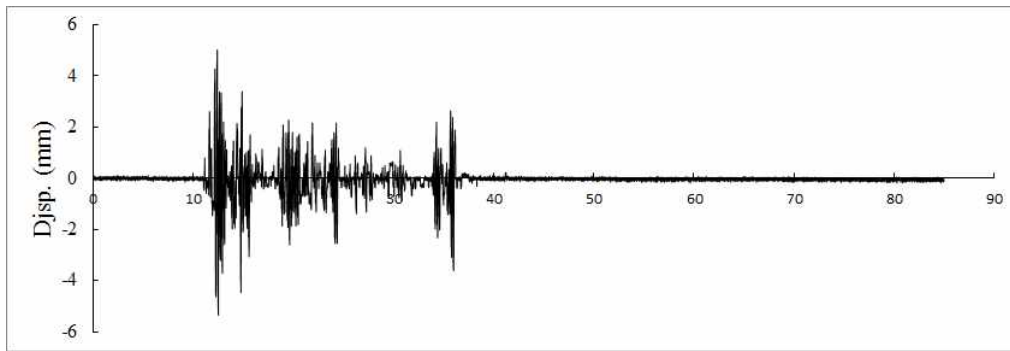


(b) 중앙부

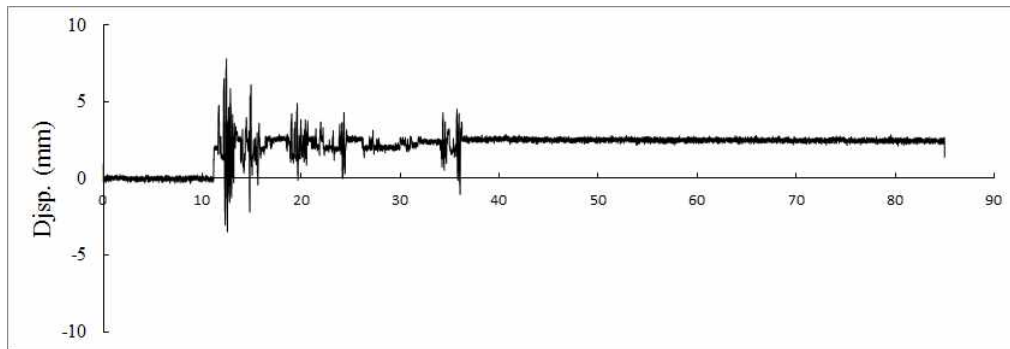


(c) 하부

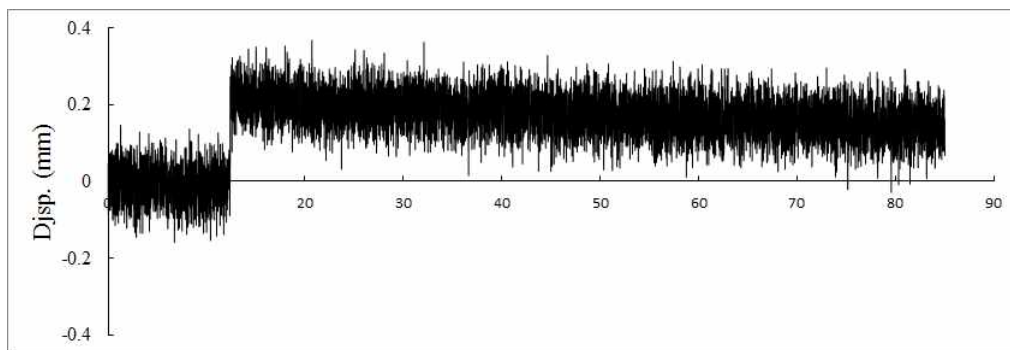
그림 3.46 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 30%)



(a) 상부

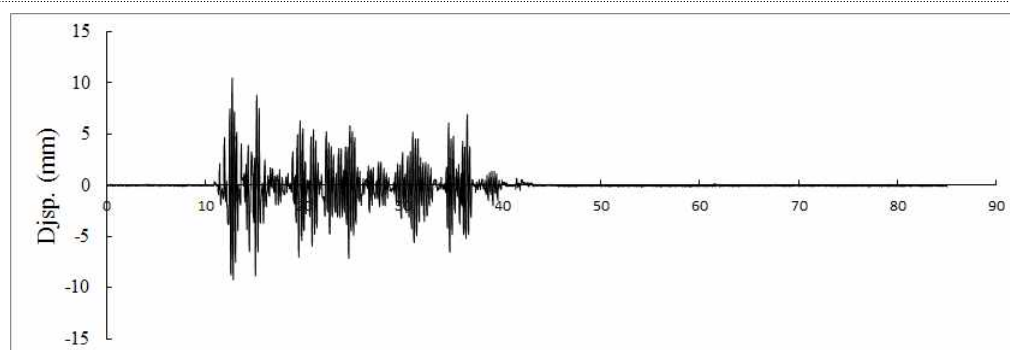


(b) 중앙부

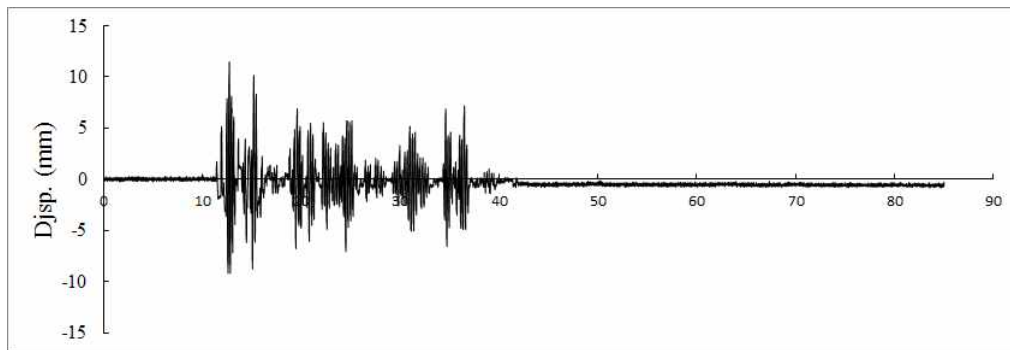


(c) 하부

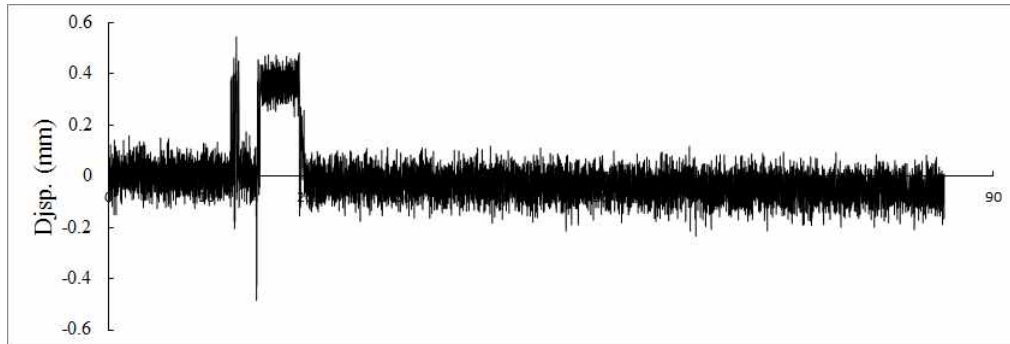
그림 3.47 RCS0 시험체의 응답 변위(RCS0, 가진 스케일 70%)



(a) 상부

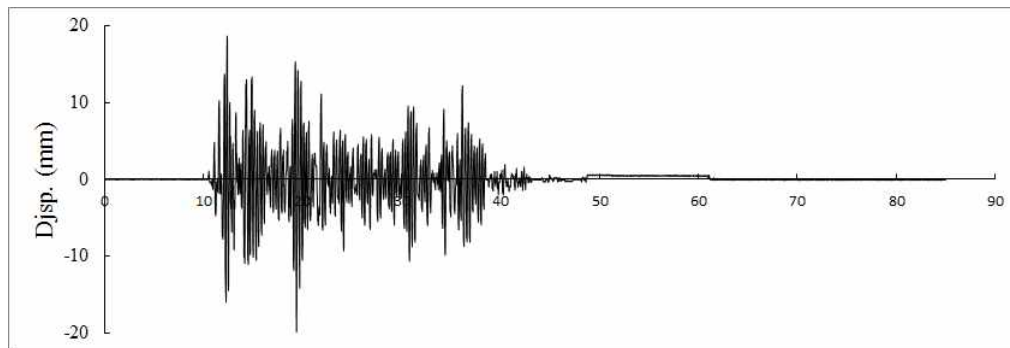


(b) 중앙부

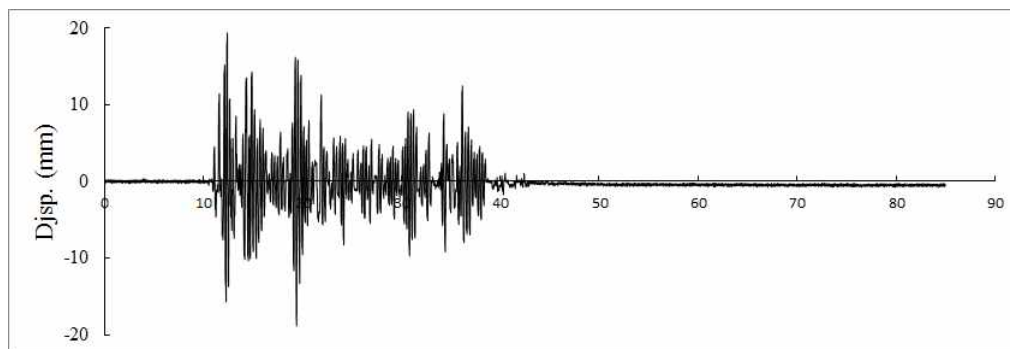


(c) 하부

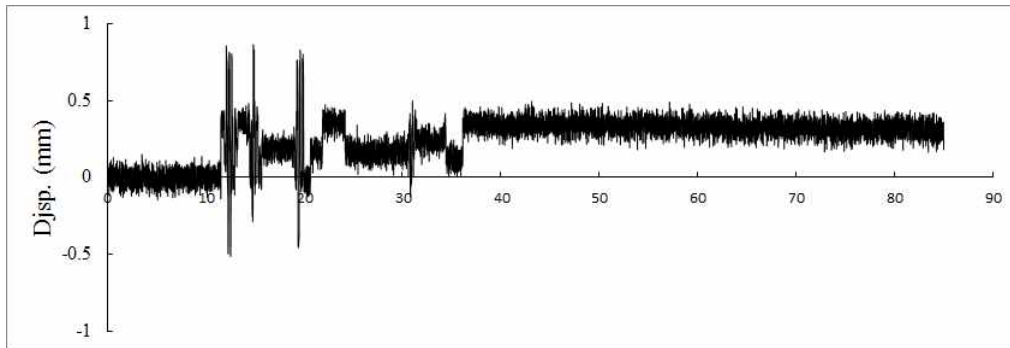
그림 3.48 RCS0 시험체의 응답 변위(RCS0, 가진 스케일 100%)



(a) 상부

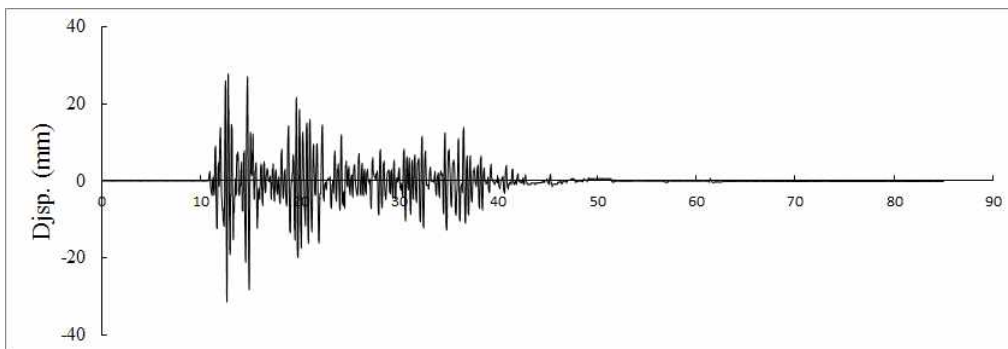


(b) 중앙부

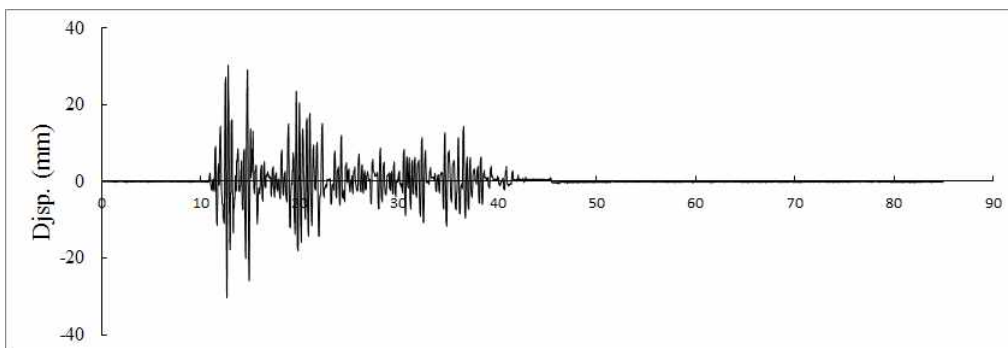


(c) 하부

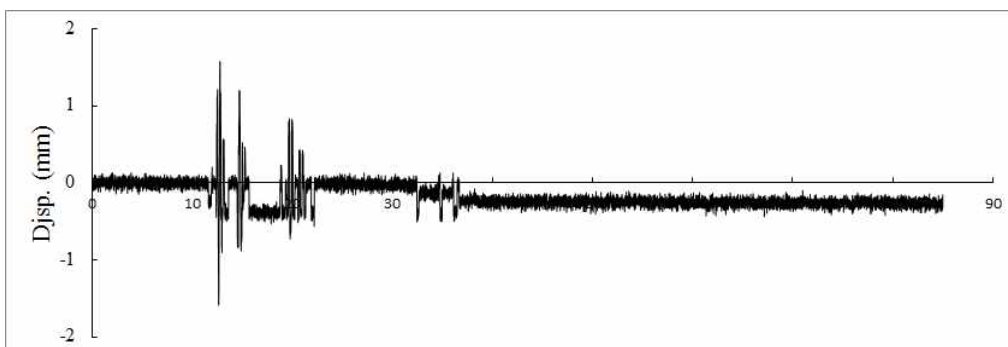
그림 3.49 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 130%)



(a) 상부

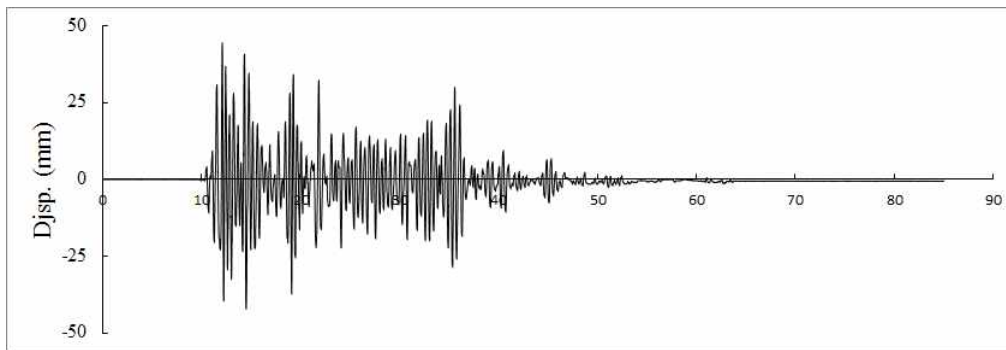


(b) 중앙부

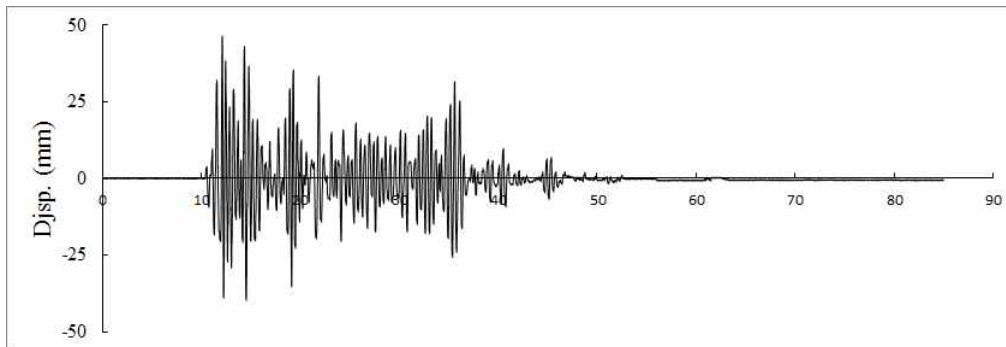


(c) 하부

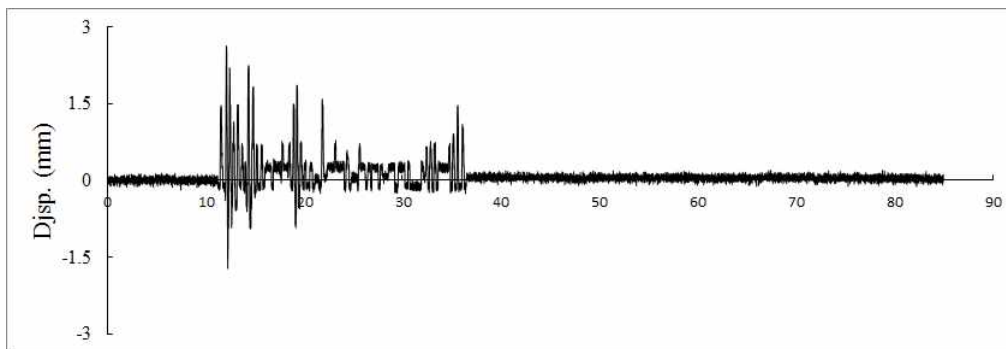
그림 3.50 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 160%)



(a) 상부

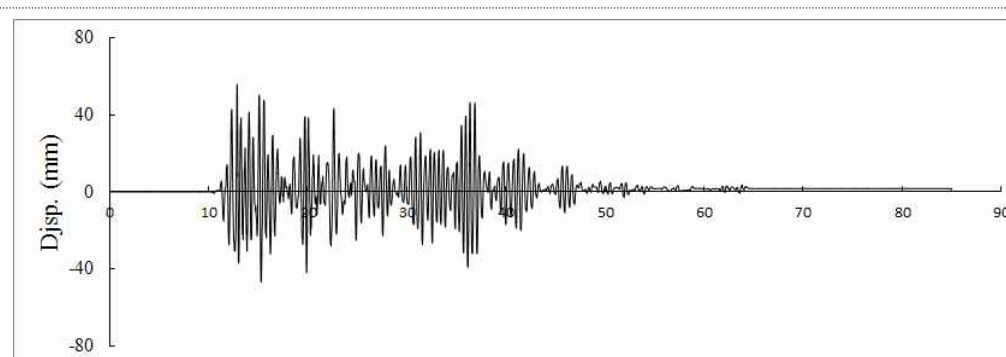


(b) 중앙부

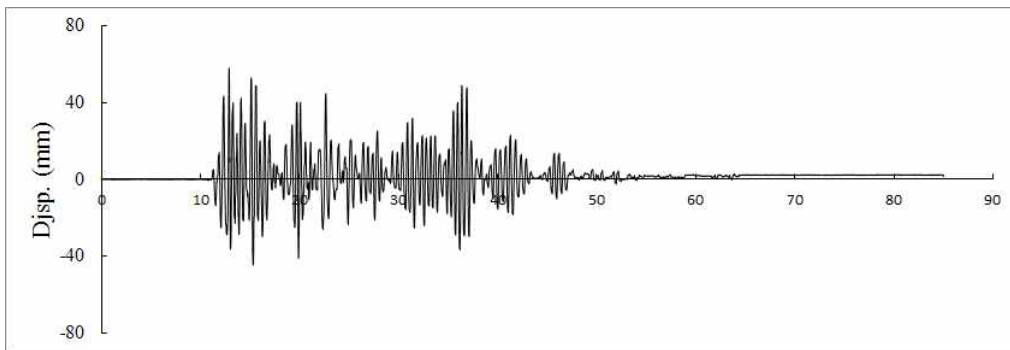


(c) 하부

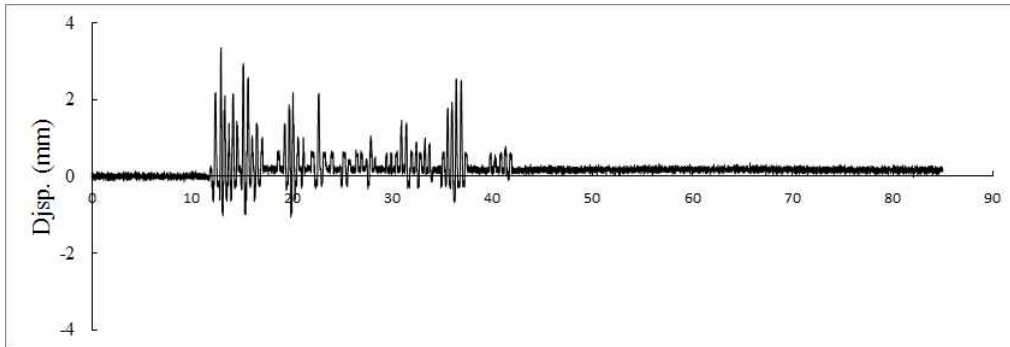
그림 3.51 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 190%)



(a) 상부

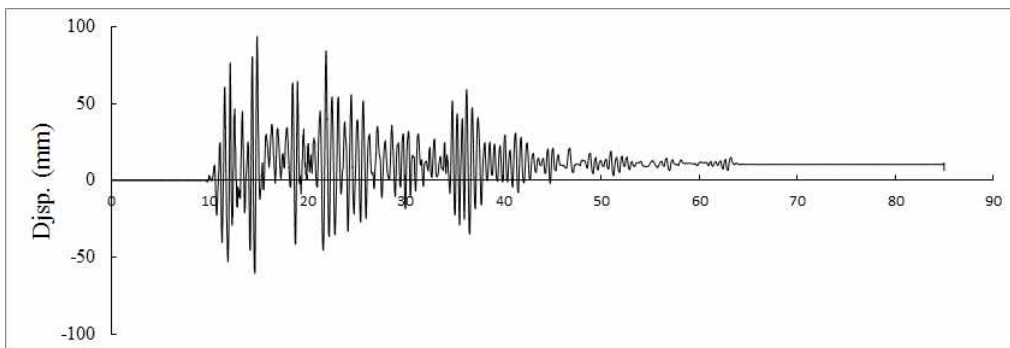


(b) 중앙부

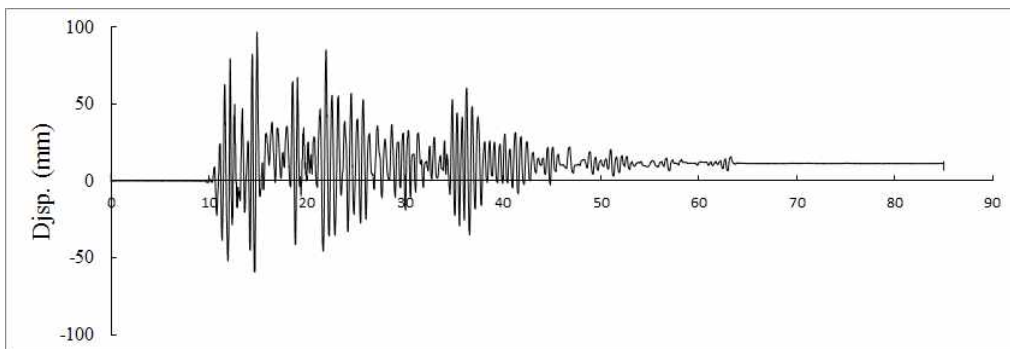


(c) 하부

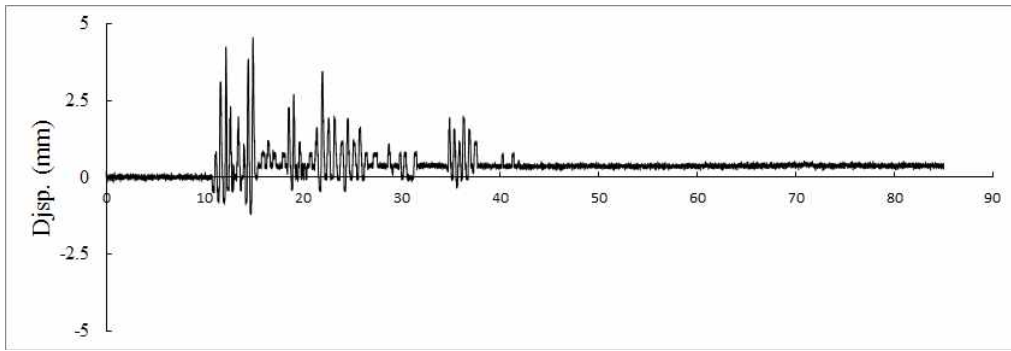
그림 3.52 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 220%)



(a) 상부



(b) 중앙부

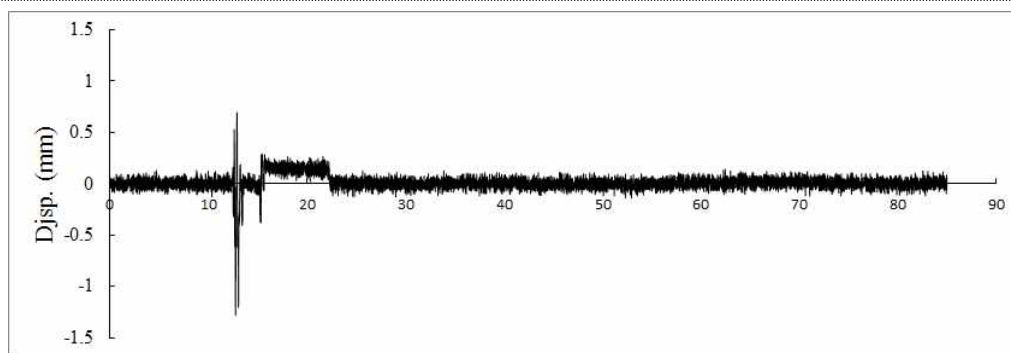


(c) 하부

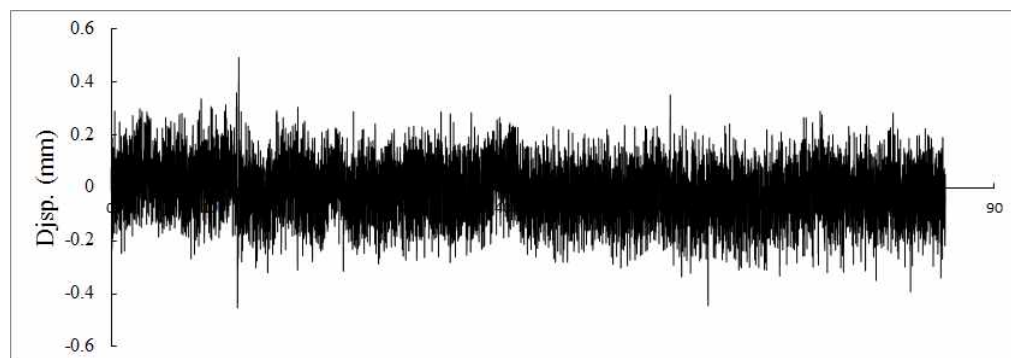
그림 3.53 RCS0 시험체의 응답 변위(가진 스케일 250%)

[RCS1 시험체]

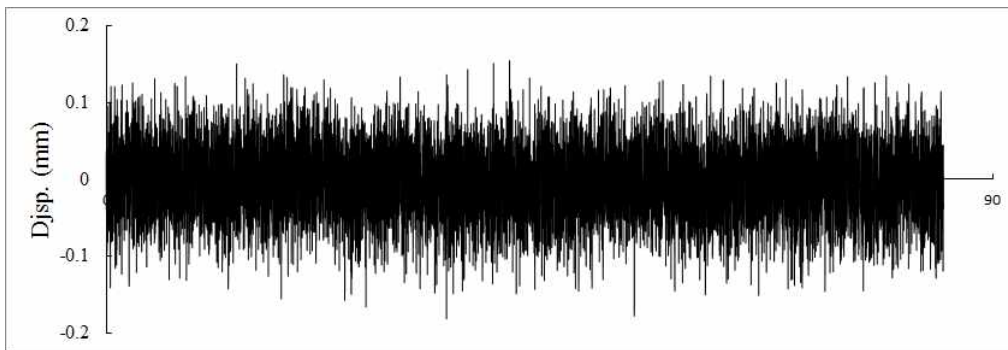
- 그림 3.54 ~ 그림 3.61은 시험체 RCS1의 가진스케일에 따른 상부, 중앙부, 하부의 변위 응답을 나타냄
- 가진스케일이 증가할수록 응답 변위는 증가하였으며, 기둥 하부, 중앙부, 상부 순서로 응답 변위가 크게 발생하였음



(a) 상부

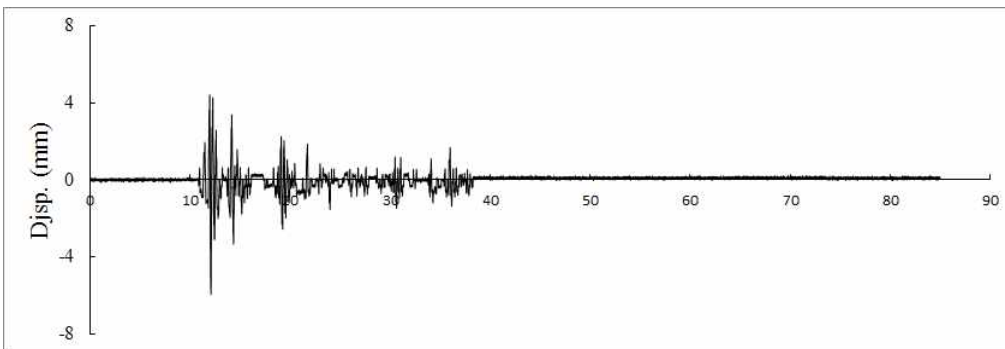


(b) 중앙부

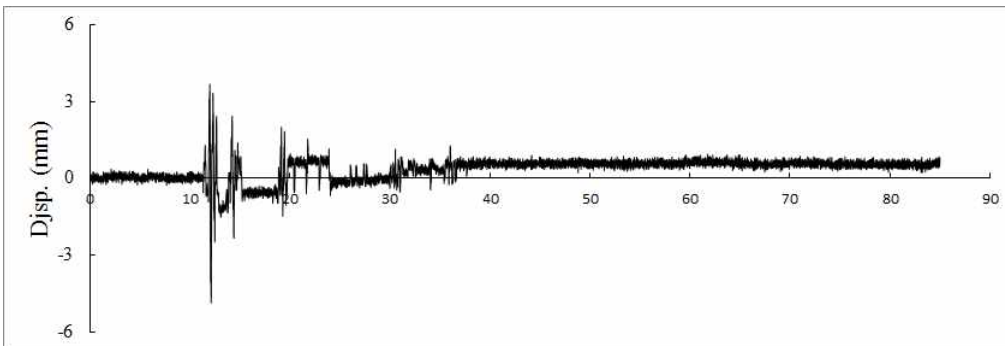


(c) 하부

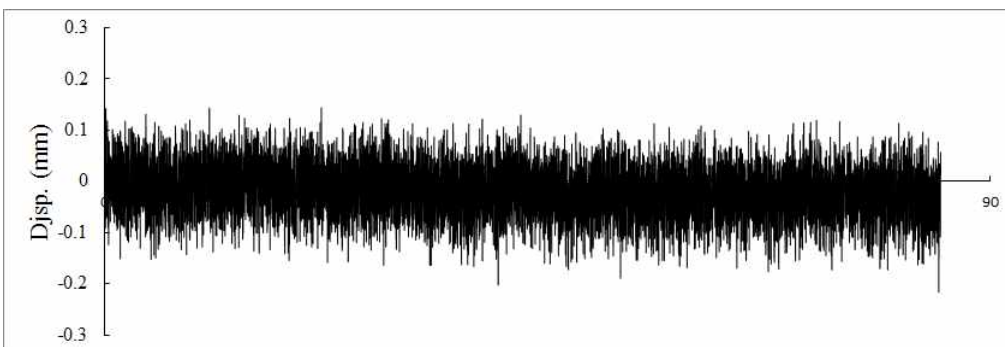
그림 3.54 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 10%)



(a) 상부

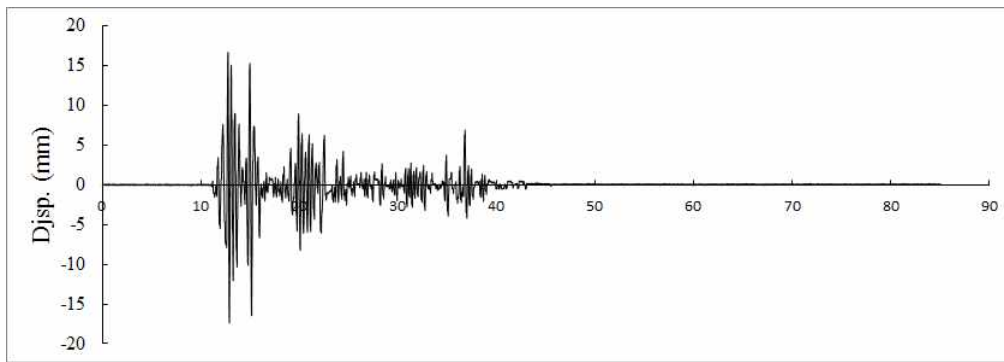


(b) 중앙부

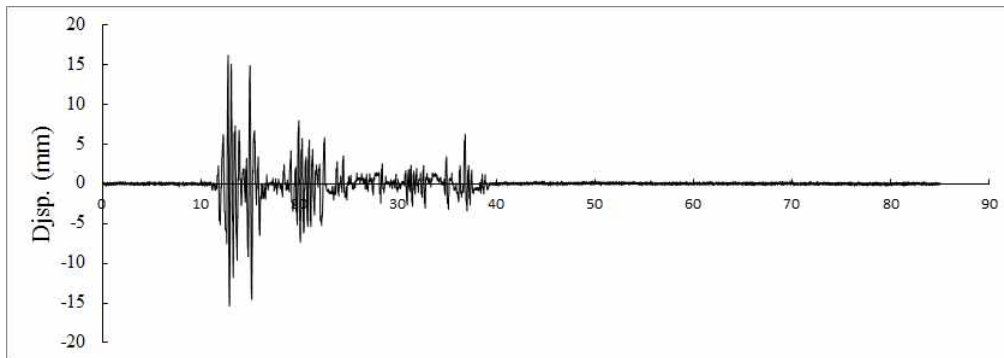


(c) 하부

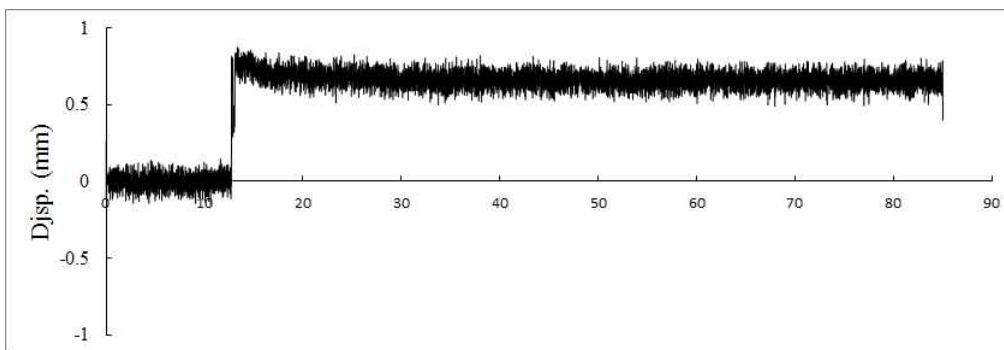
그림 3.55 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 30%)



(a) 상부

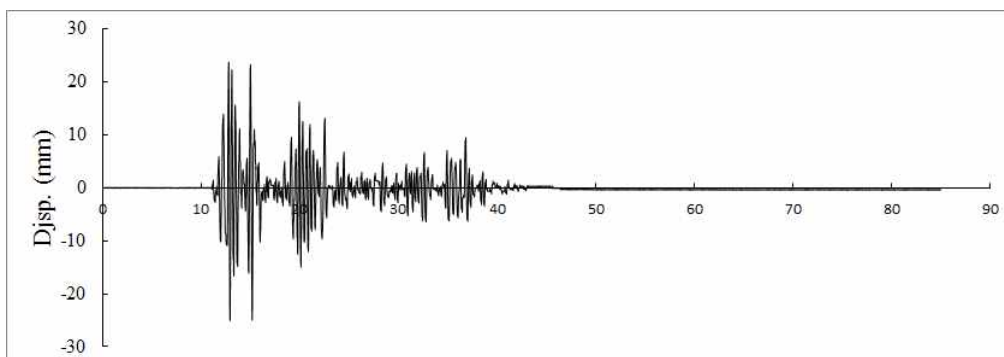


(b) 중앙부

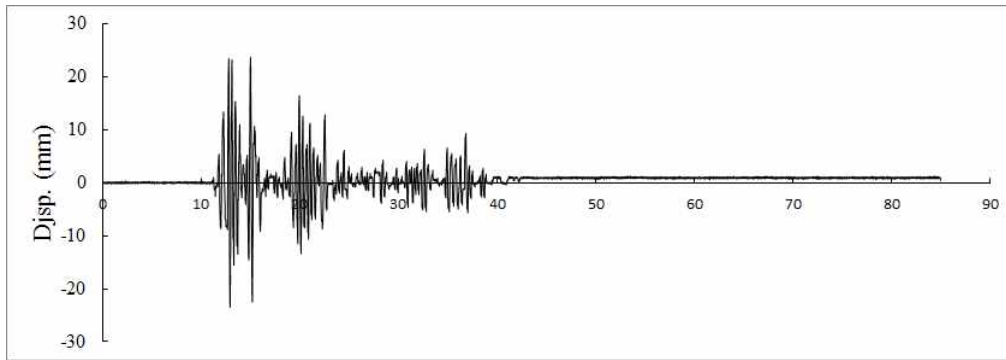


(c) 하부

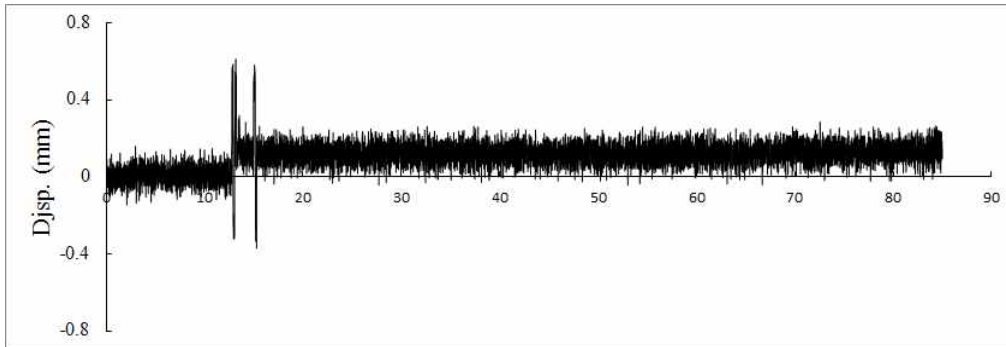
그림 3.56 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 70%)



(a) 상부

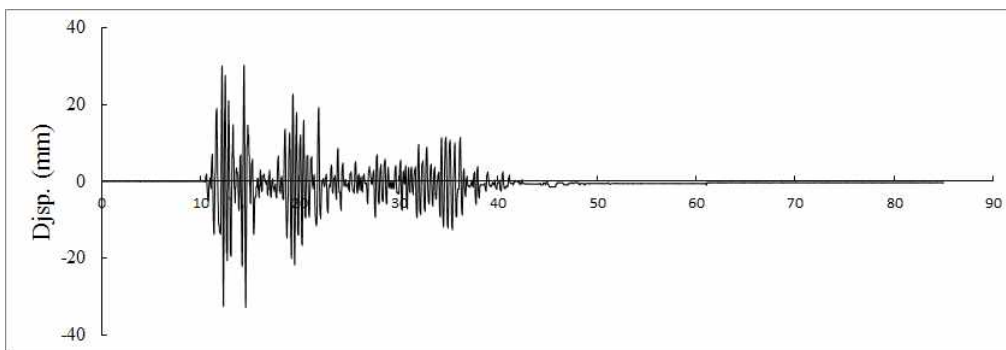


(b) 중앙부

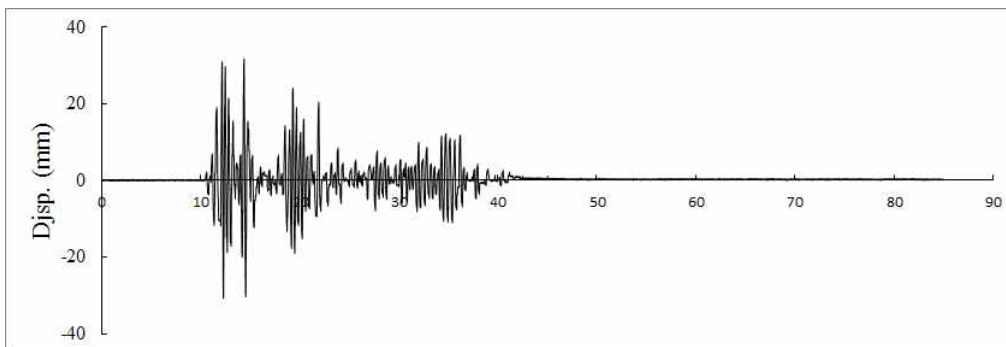


(c) 하부

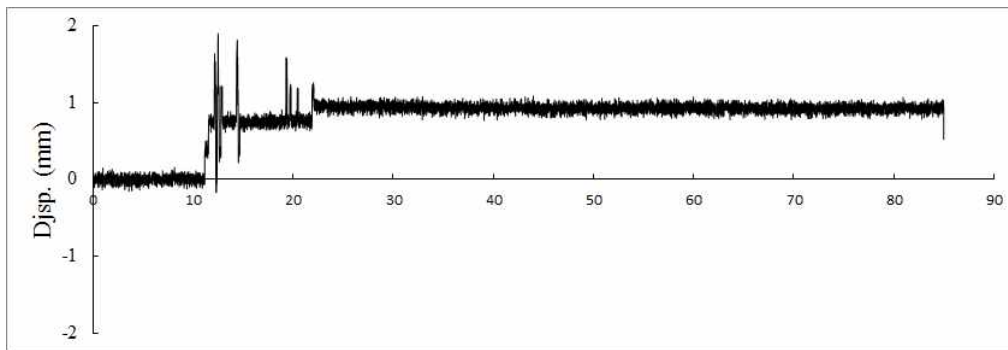
그림 3.57 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 100%)



(a) 상부

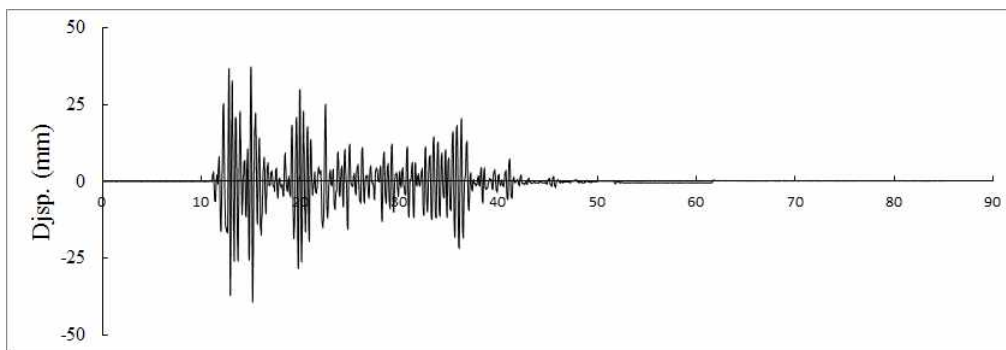


(b) 중앙부

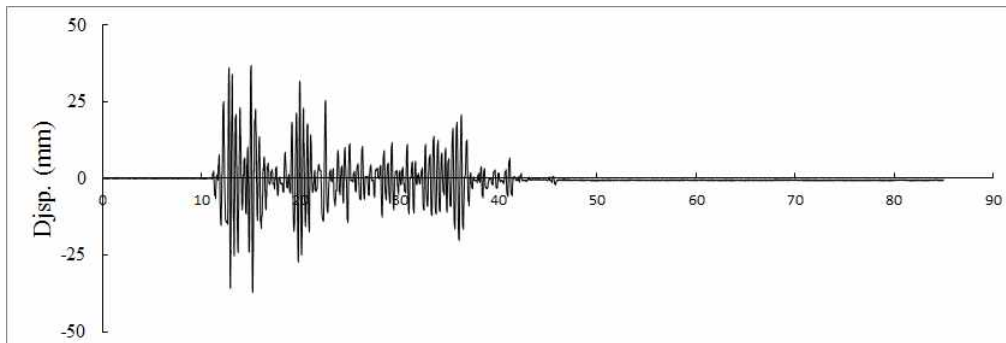


(c) 하부

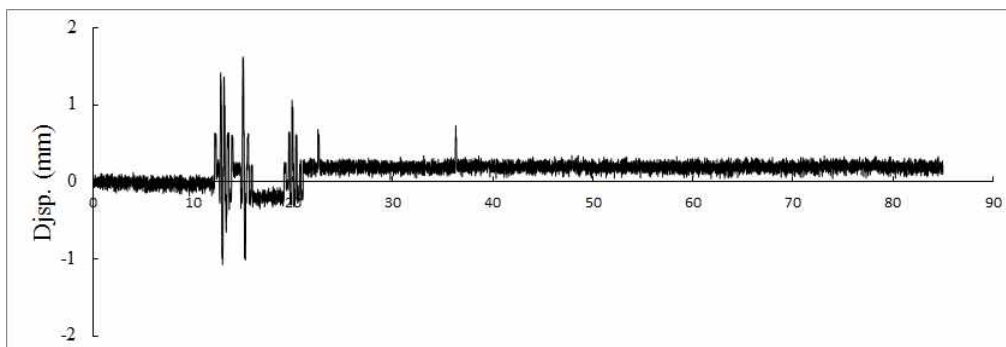
그림 3.58 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 130%)



(a) 상부

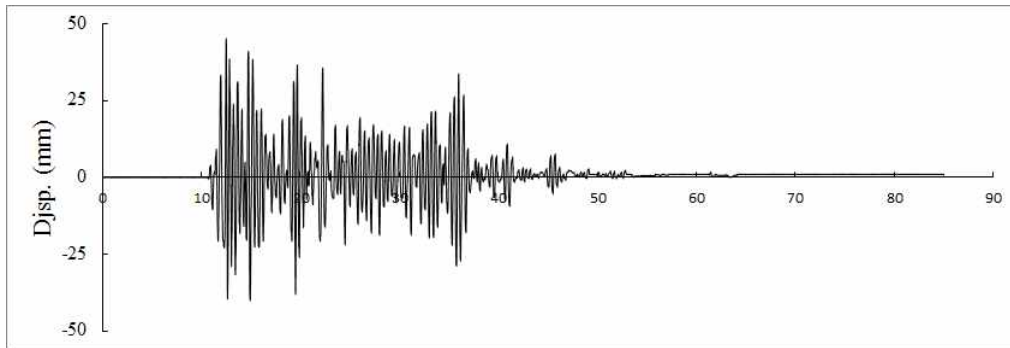


(b) 중앙부

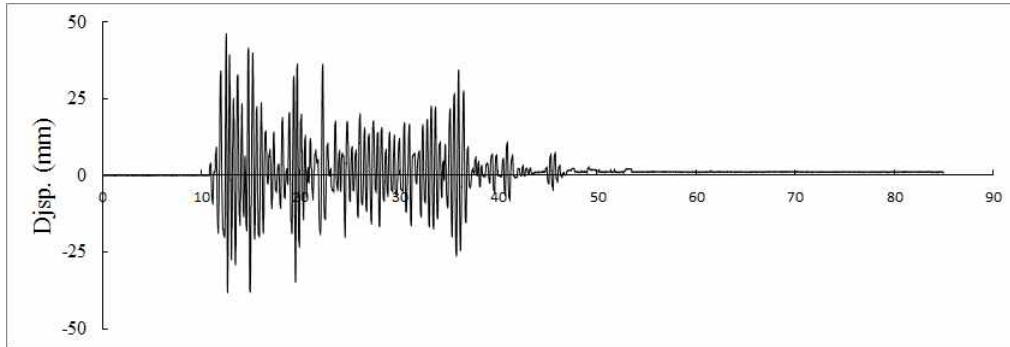


(c) 하부

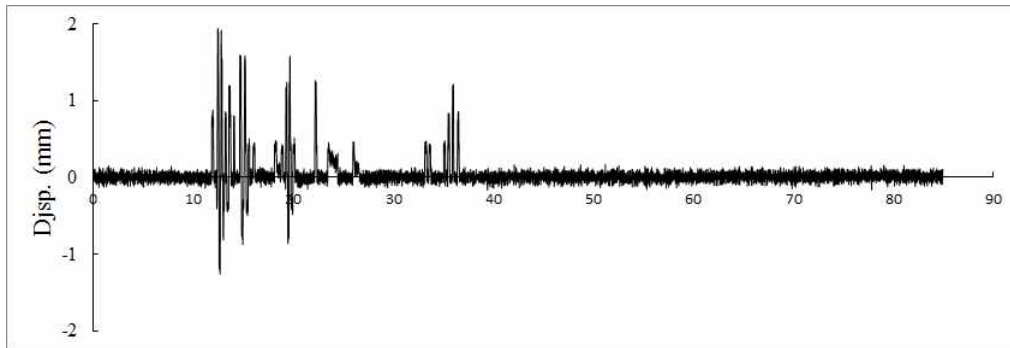
그림 3.59 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 160%)



(a) 상부

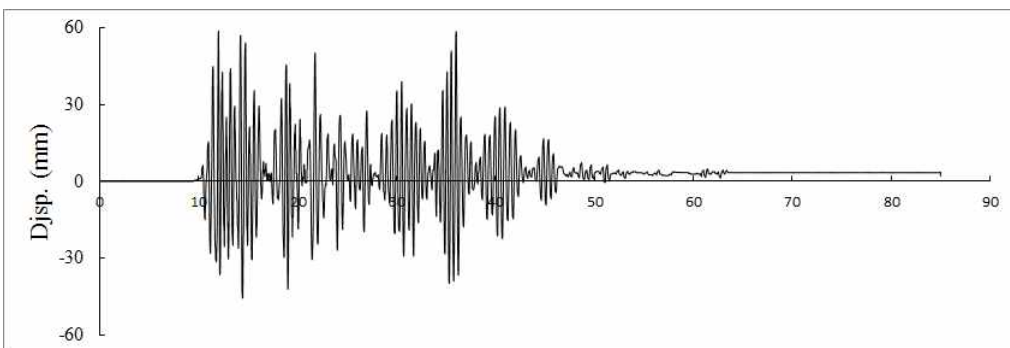


(b) 중앙부

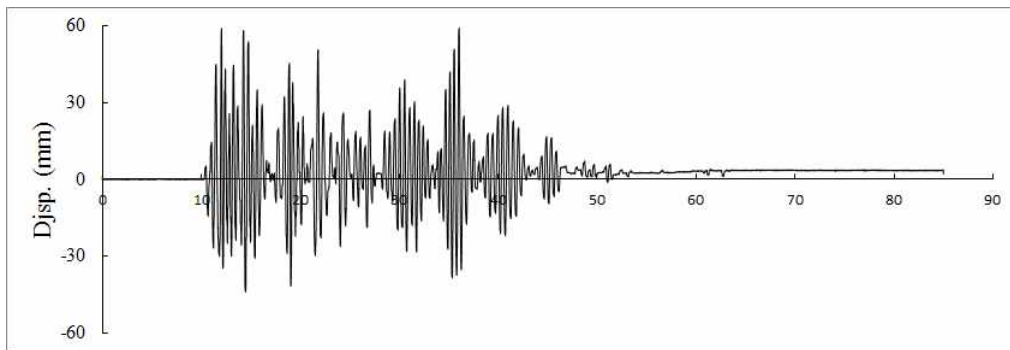


(c) 하부

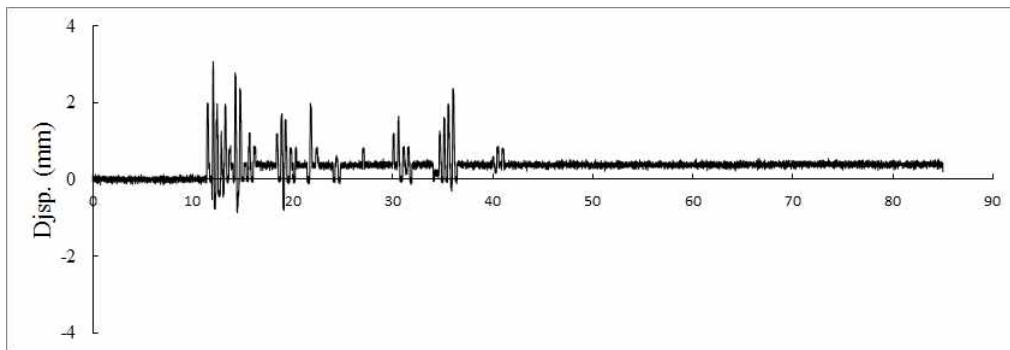
그림 3.60 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 190%)



(a) 상부



(b) 중앙부



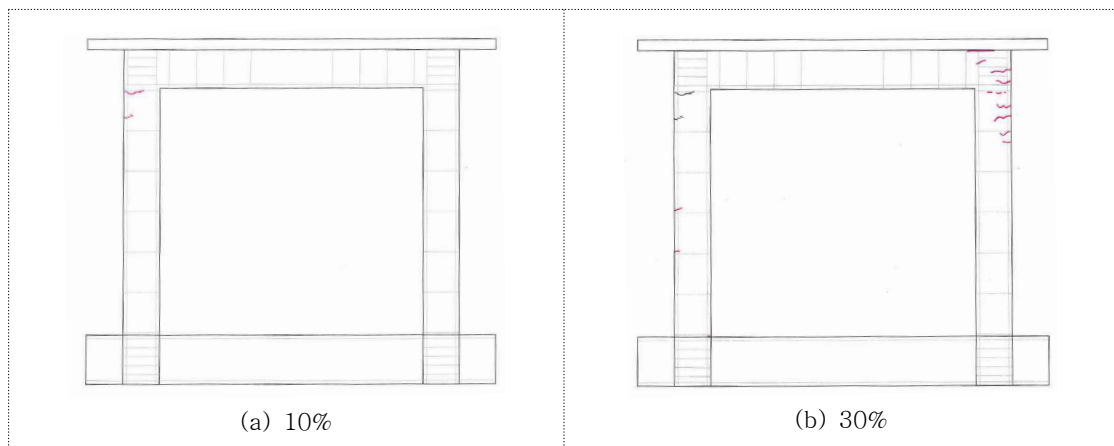
(c) 하부

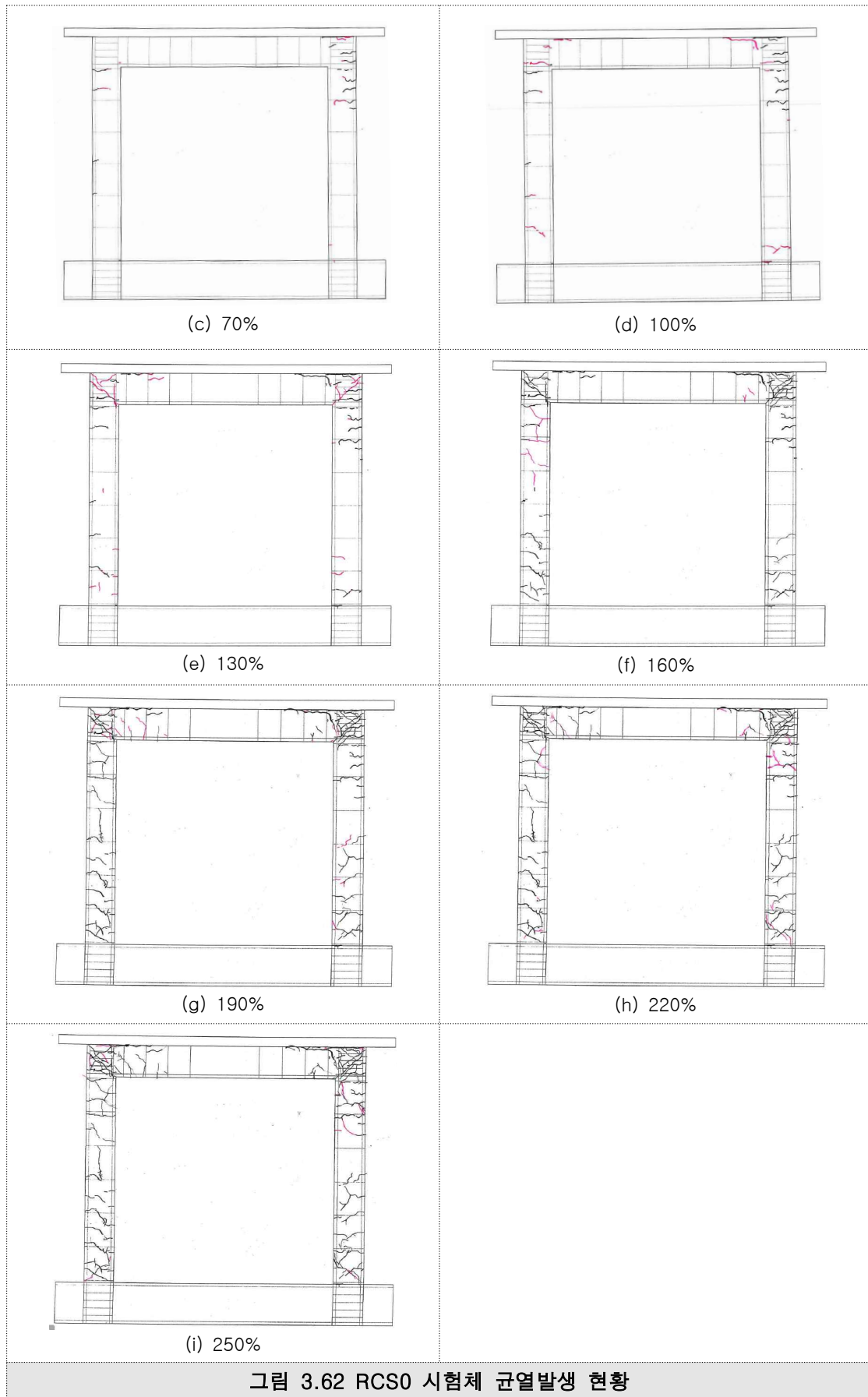
그림 3.61 RCS1 시험체의 응답 변위(가진 스케일 220%)

(4) 균열 및 파괴 양상

[RCS0 시험체]

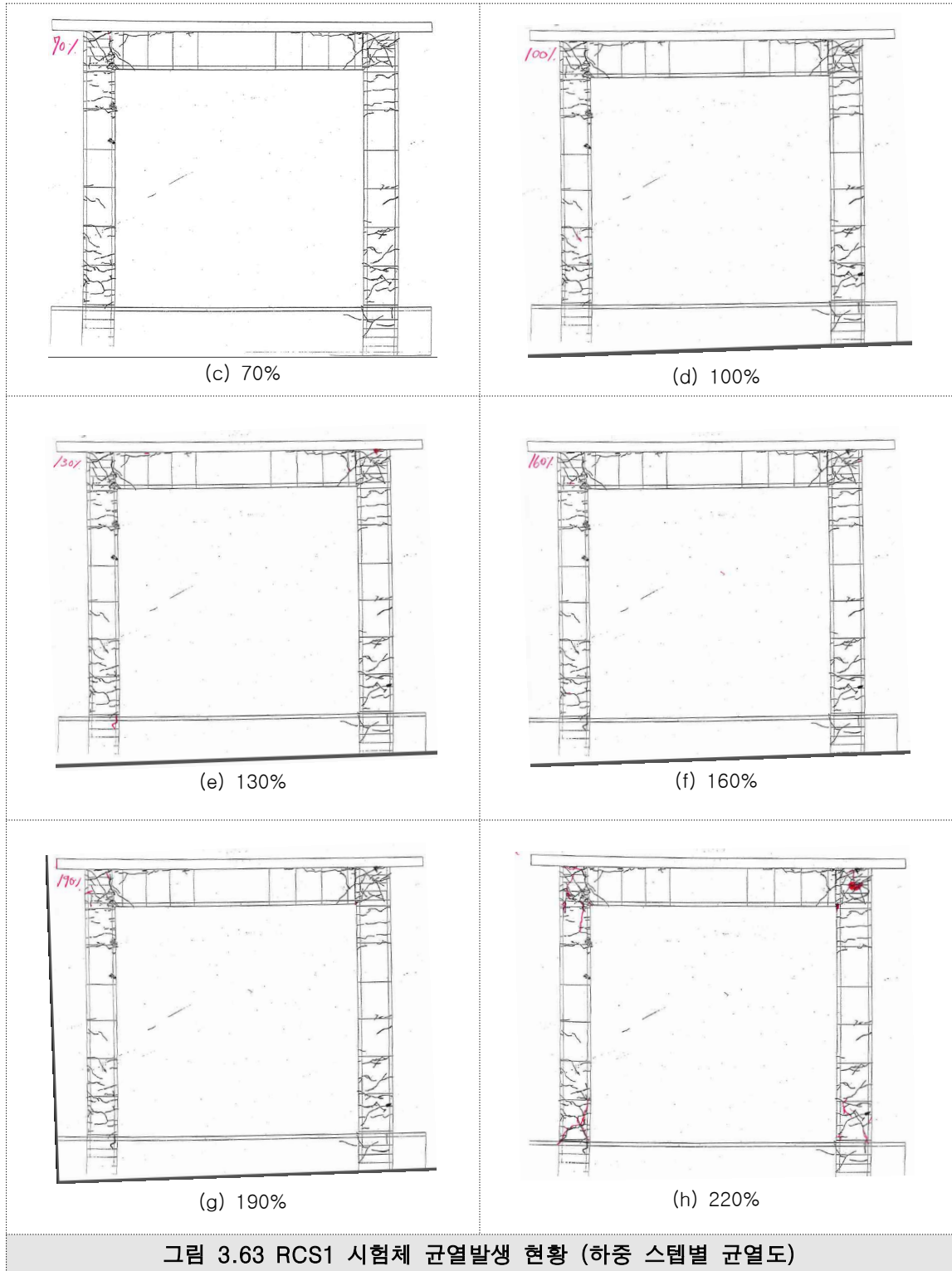
- 그림 3.62는 시험체 RCS0의 가진스케일 증가에 따라 발생한 균열 형상을 나타냄
- 가진스케일의 증가함에 따라 시험체에는 기둥 단부, 접합부, 보 단부 순으로 균열이 발생하였으며, 실험 종료 시에는 기둥 전체에 휨전단균열이, 접합부에는 전단균열이, 보 단부에는 휨전단 균열이 발생하였음





[RCS1 시험체]

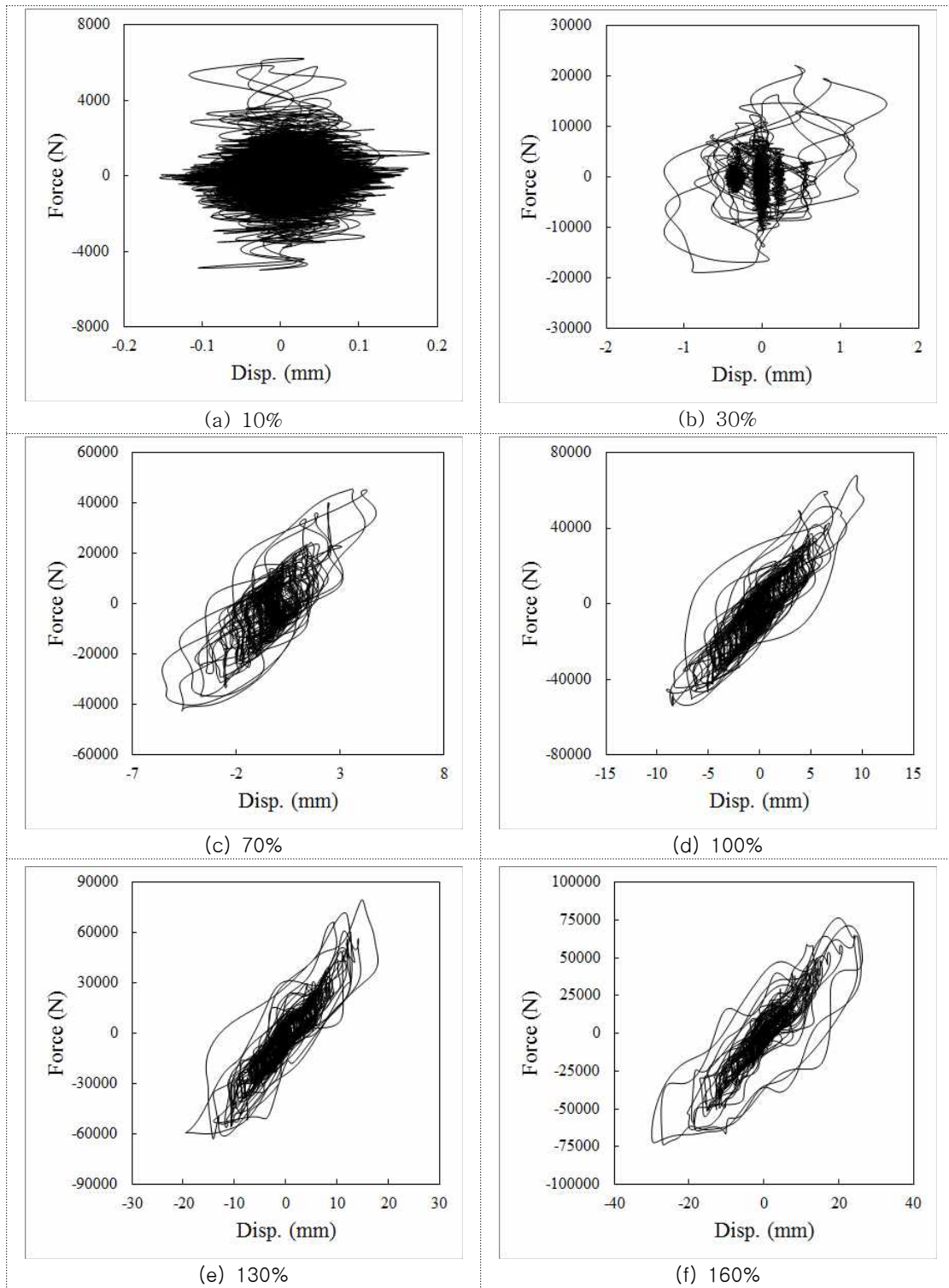
- 그림 3.63은 시험체 RCS1의 가진스케일 증가에 따라 발생한 균열 형상을 나타냄
- 동적실험으로 인하여 접합부 및 기둥 단부에만 일부 균열이 발생하거나 늘어난 정도로 정적실험 이후 손상은 크게 증가하지 않은 것으로 나타남

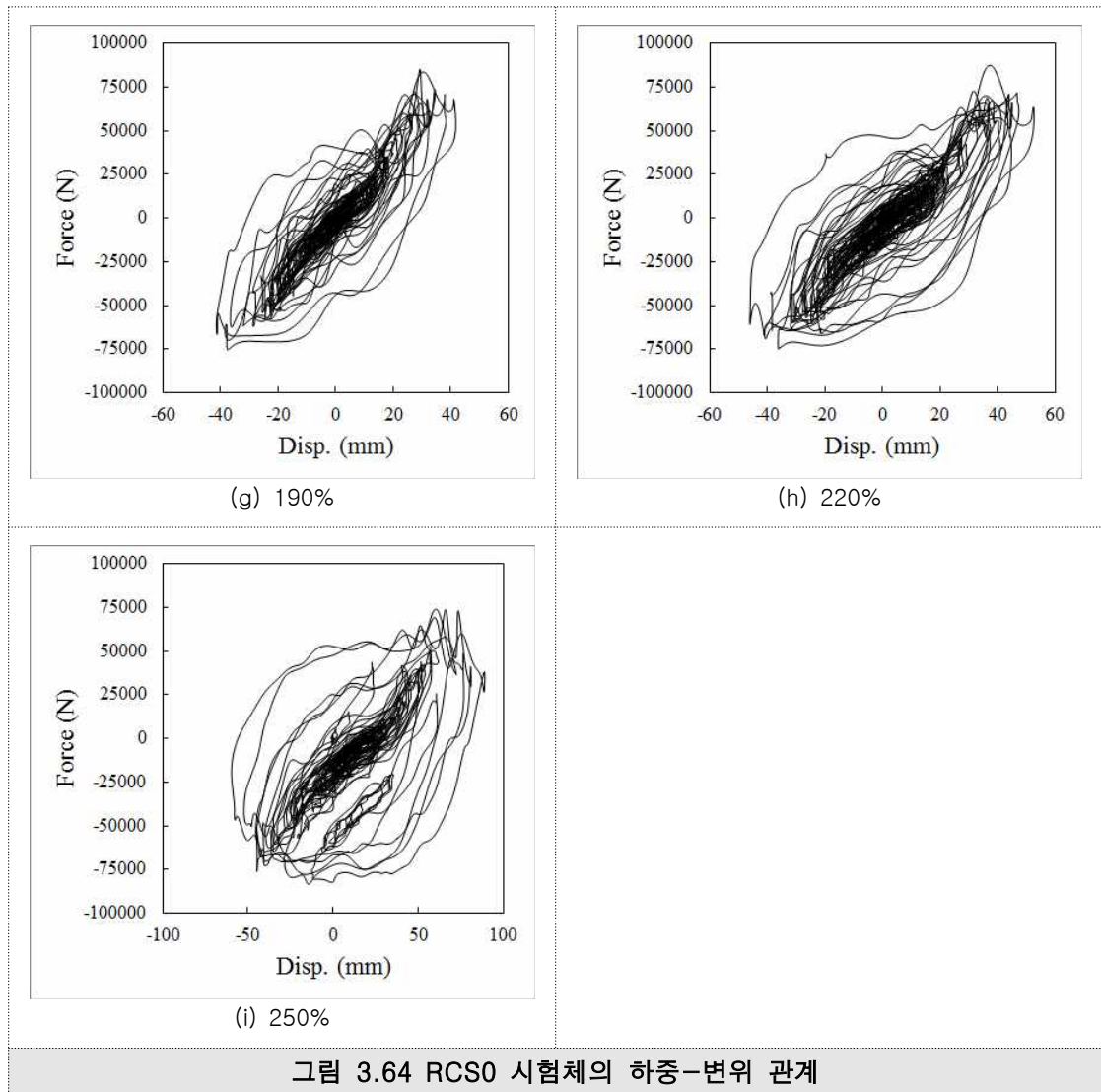


(5) 하중-변위 관계

[RCS0 시험체]

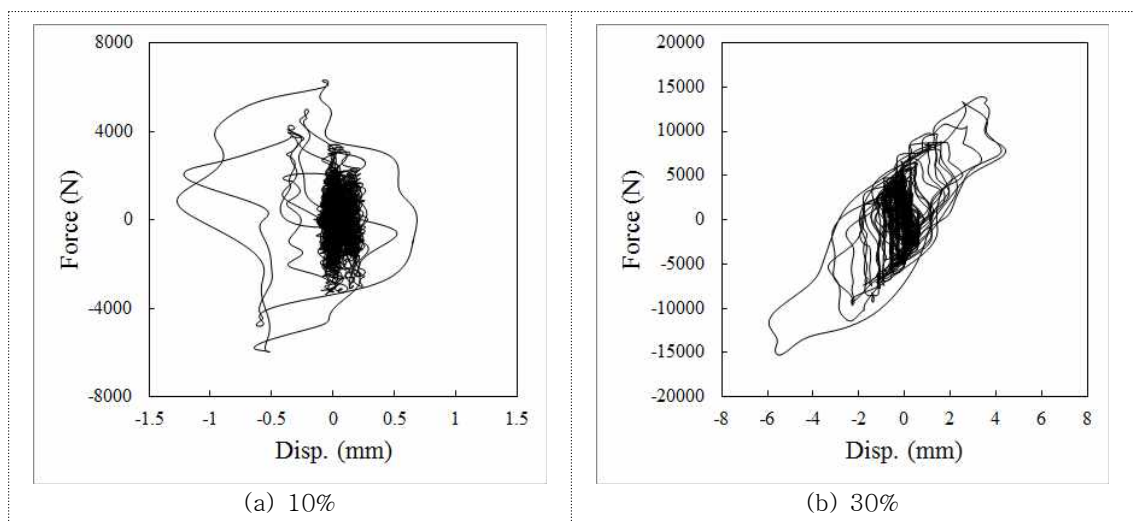
- 그림 3.64는 시험체 RCS0의 가진스케일별 전단력과 상부 변위의 관계를 나타냄
- 가진스케일 130% 이후 전단력과 상부 변위의 그래프는 전단력은 크게 증가하지 않고 변위가 증가하면서 에너지 흡수능력이 커지는 형태를 나타냄

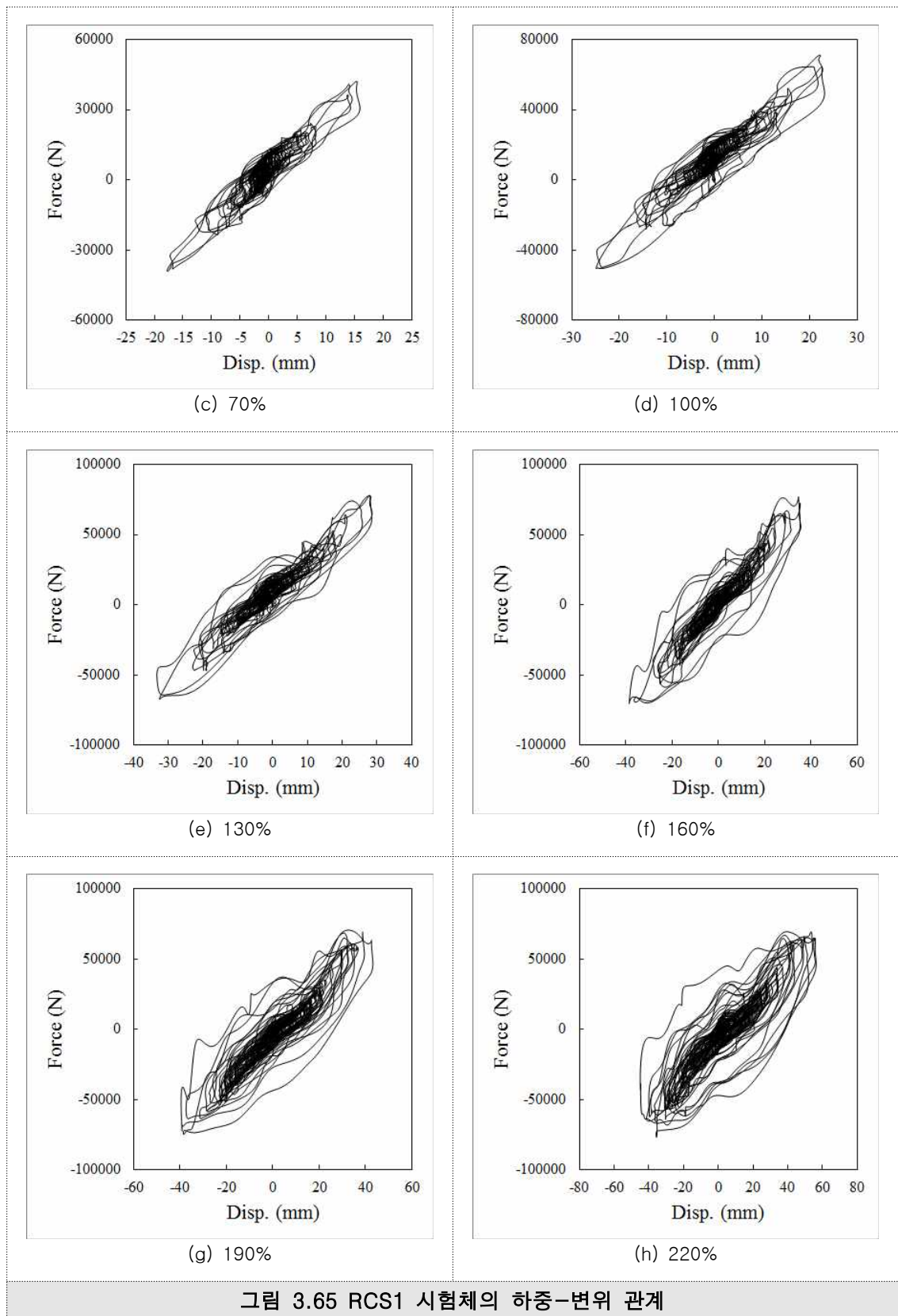




[RCS1 시험체]

- 그림 3.65는 시험체 RCS1의 가진스케일별 전단력과 상부 변위의 관계를 나타냄
- 가진스케일 130% 이후 전단력과 상부 변위의 그래프는 전단력은 크게 증가하지 않고 변위가 증가하면서 에너지 흡수능력이 커지는 형태를 나타냄



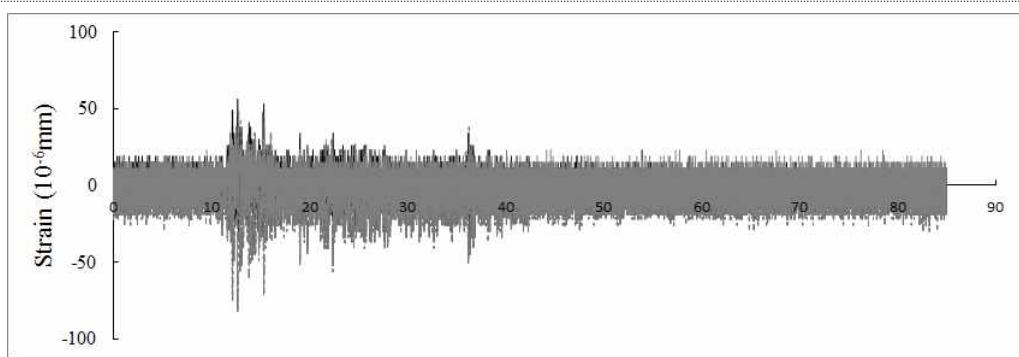


(6) 하중-변형률 관계

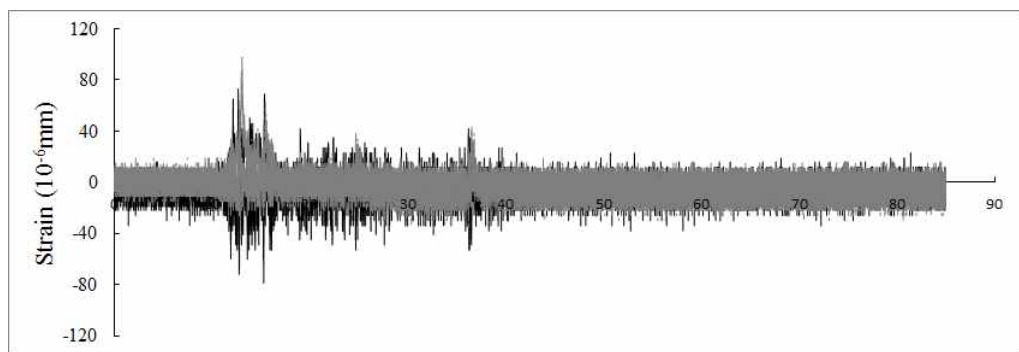
[RCS0 시험체]

- 그림 3.66 ~ 그림 3.74는 시험체 RCS0의 가진스케일별 기둥 및 보 위험단면에 설치한 스트레인의 변형률 시간이력을 나타냄

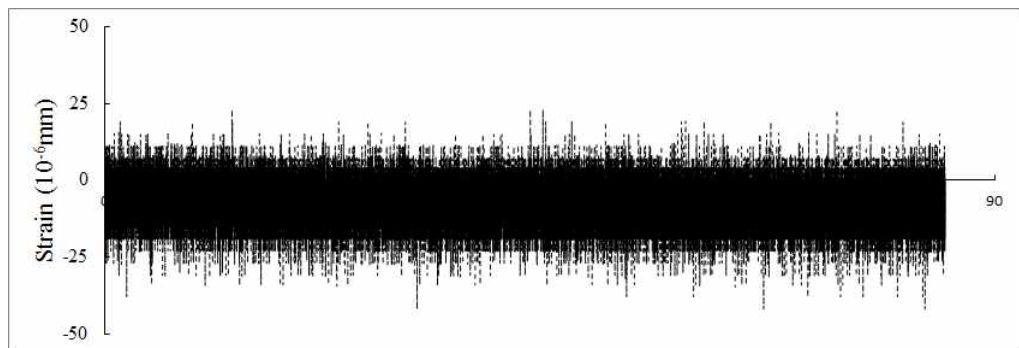
- 가진스케일 70%에 의한 가진 시 우측기둥 상부주근이 항복하였으며, 이후 가진스케일 130%에 의한 가진 시 좌측기둥 하부주근이 가진스케일 160%에 의한 가진 시 보 주근이 항복하였으며, 보강근은 실험 종료시까지 항복하지 않음



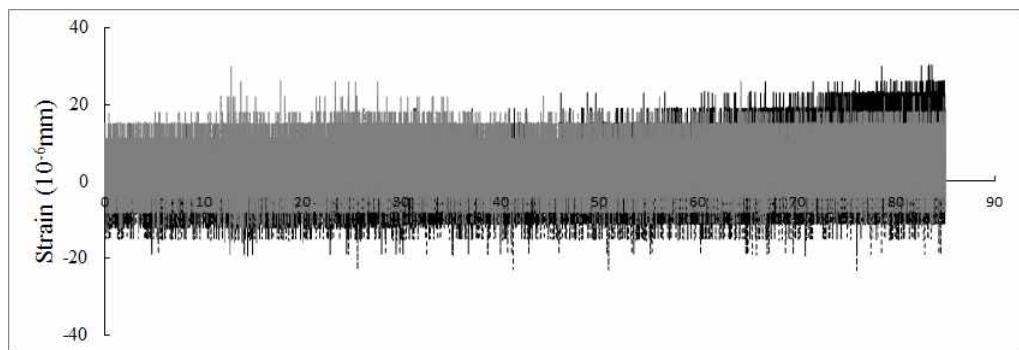
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

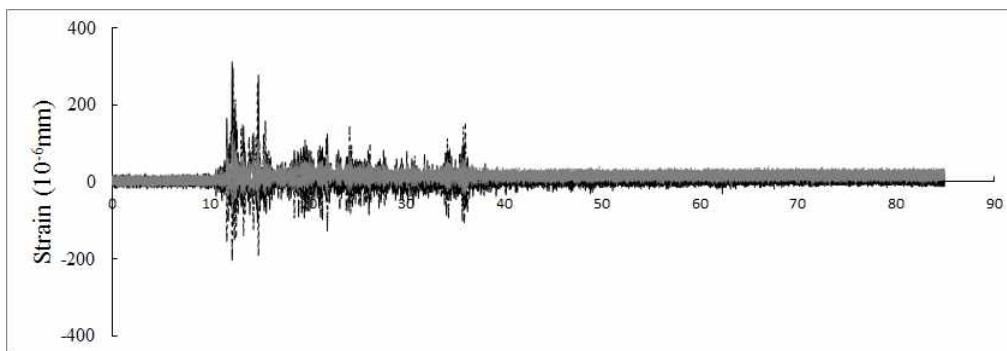


(c) 기둥 보강근

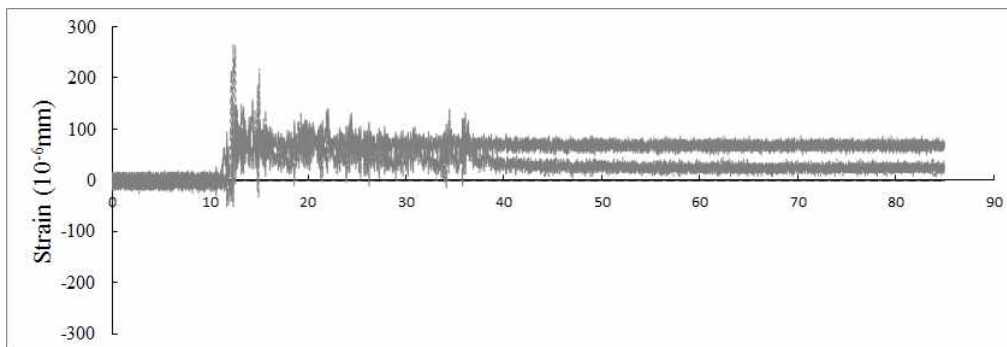


(d) 보 주근

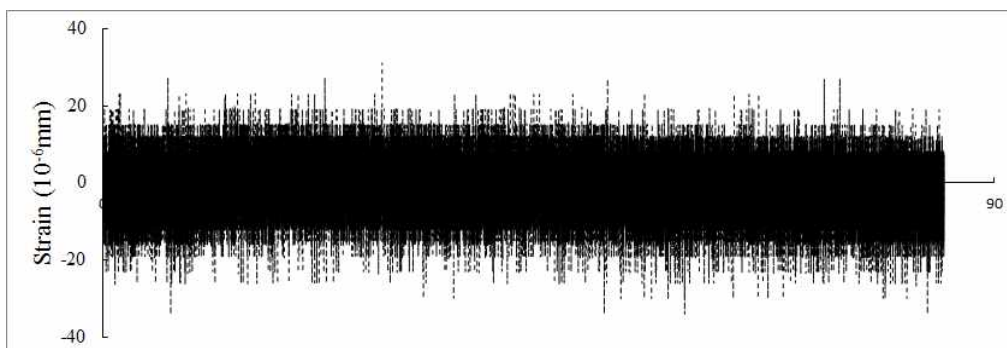
그림 3.66 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 10%)



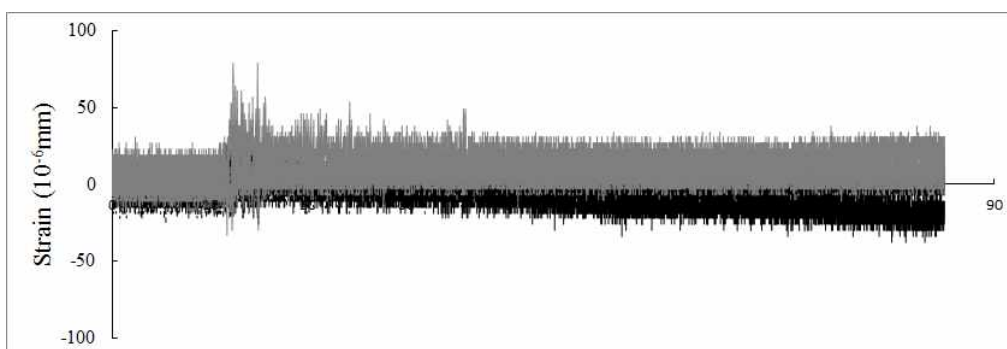
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

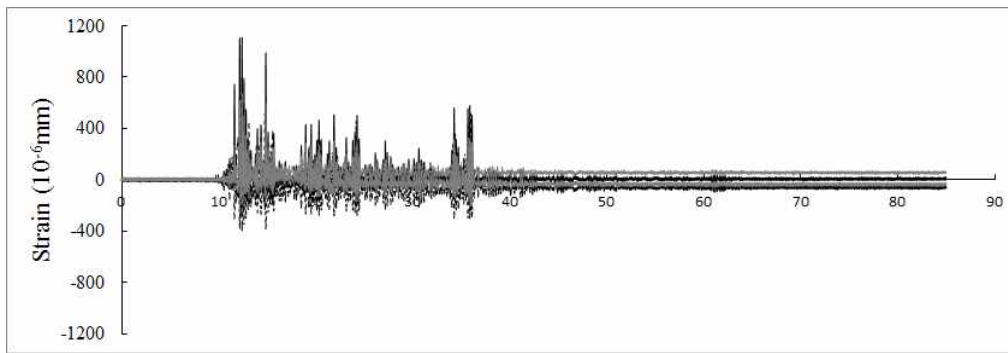


(c) 기둥 보강근

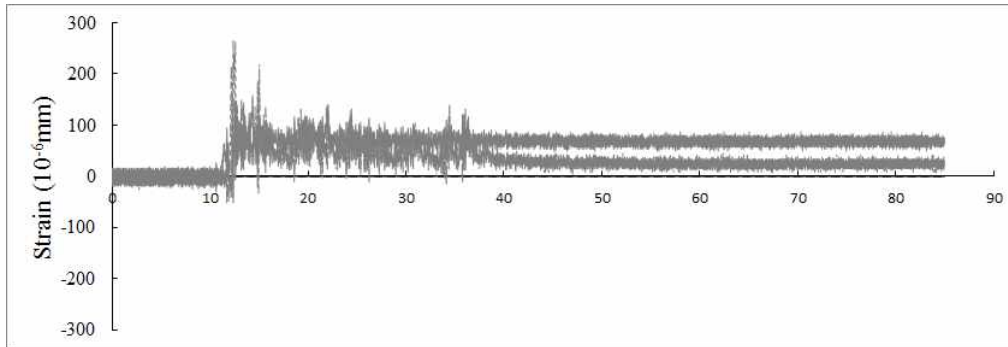


(d) 보 주근

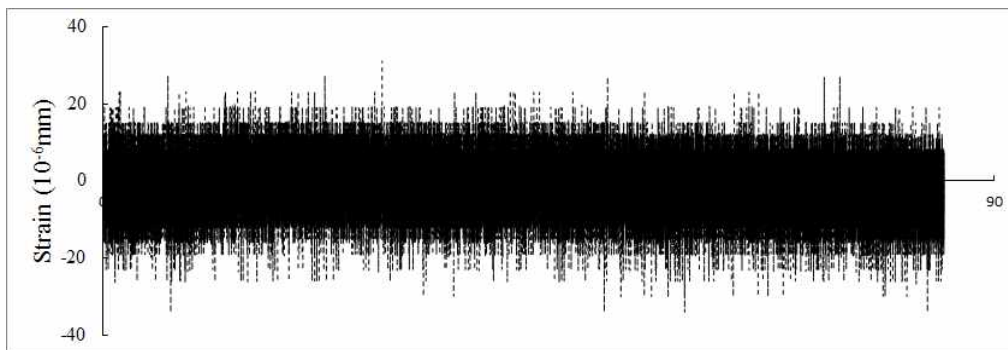
그림 3.67 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 30%)



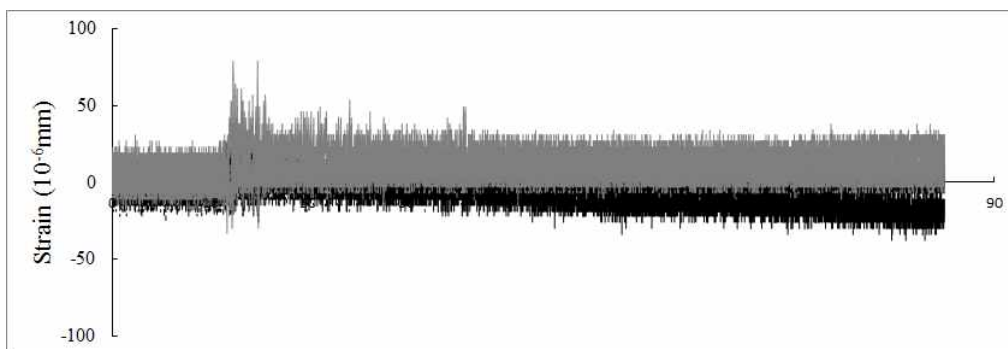
(a) 좌측기동 주근



(b) 우측기동 주근

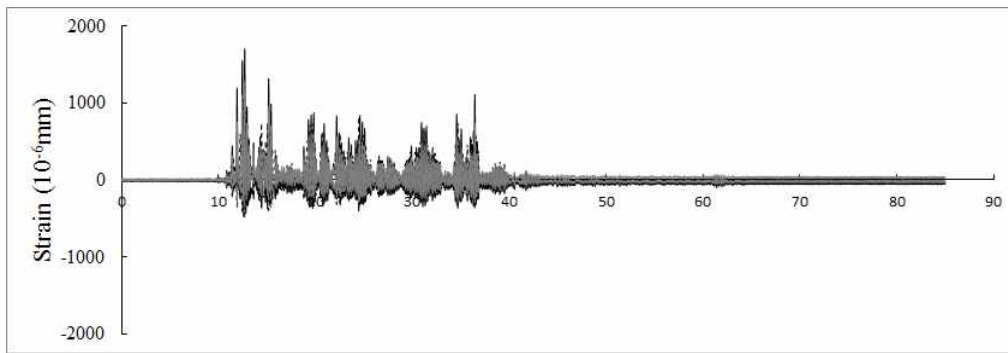


(c) 기동 보강근

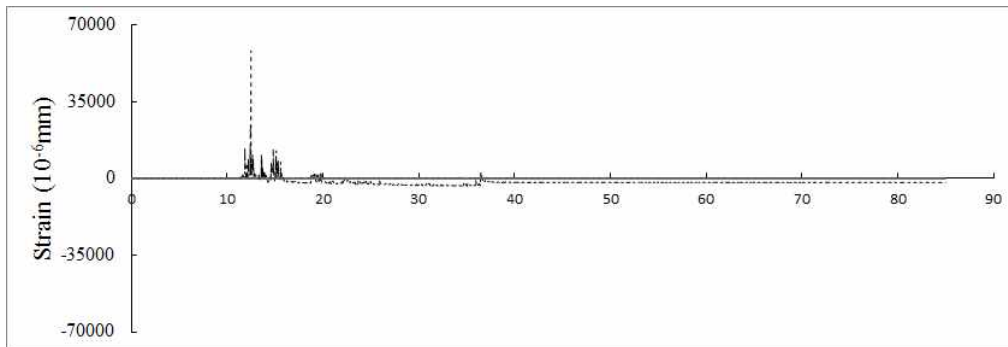


(d) 보 주근

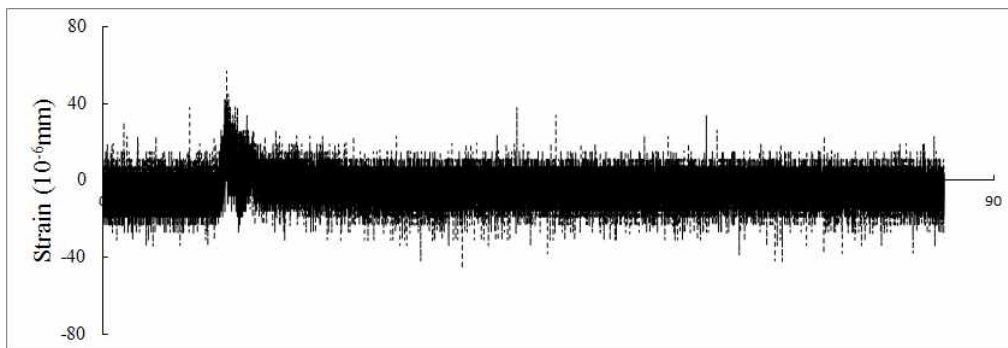
그림 3.68 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 70%)



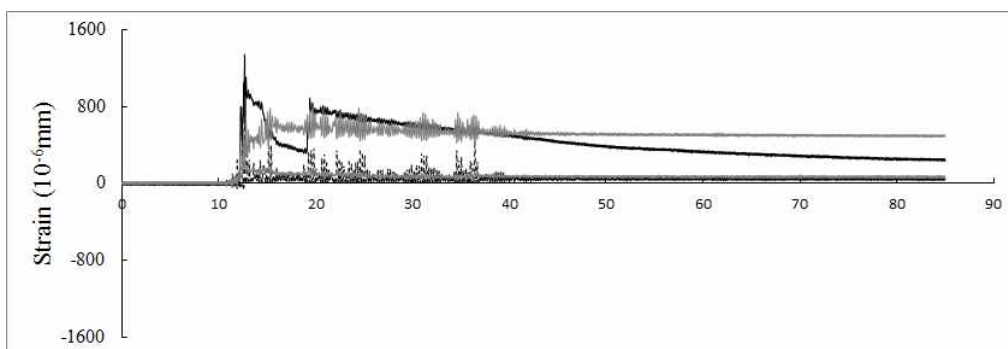
(a) 좌측기동 주근



(b) 우측기동 주근

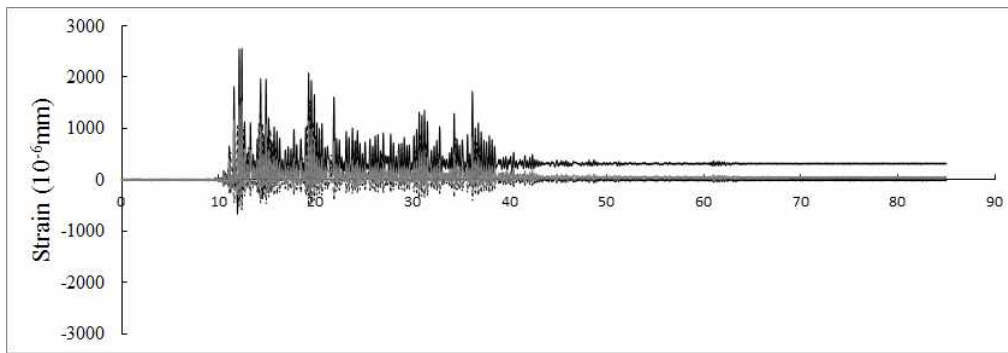


(c) 기동 보강근

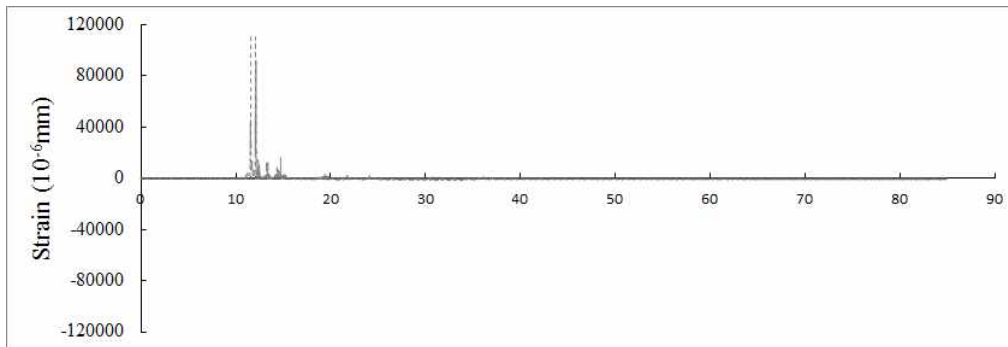


(d) 보 주근

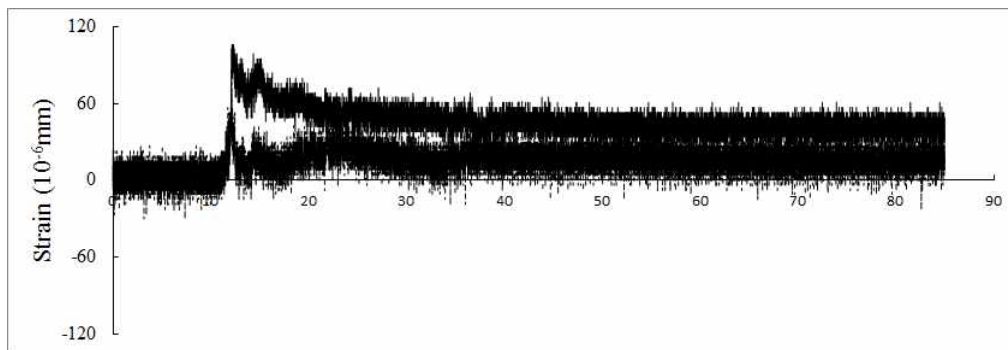
그림 3.69 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 100%)



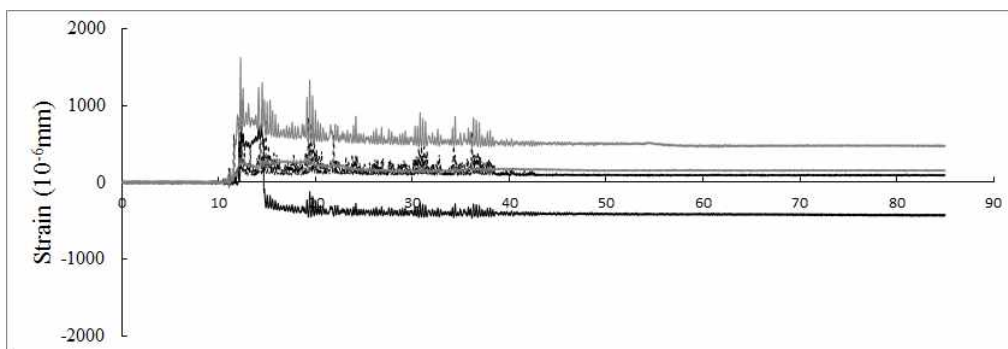
(a) 좌측기동 주근



(b) 우측기동 주근

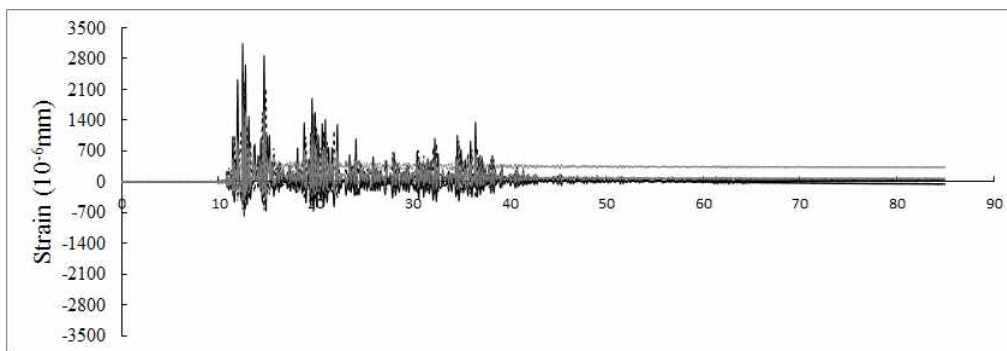


(c) 기동 보강근

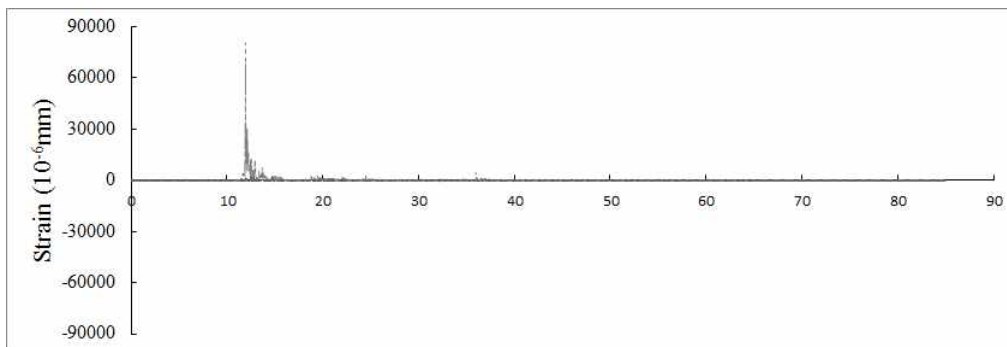


(d) 보 주근

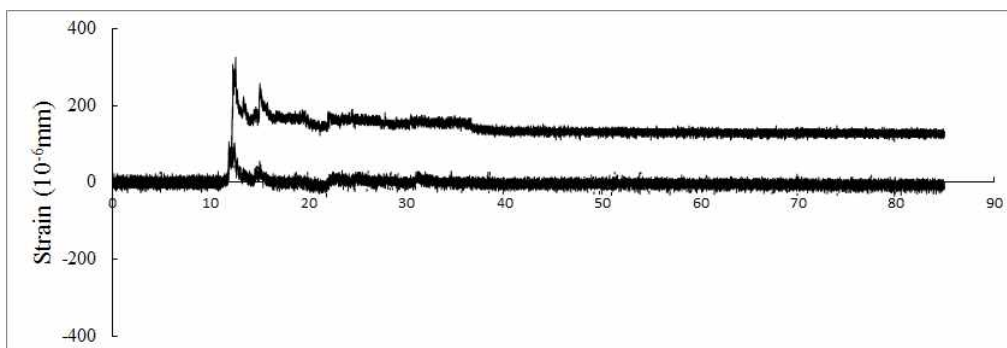
그림 3.70 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 130%)



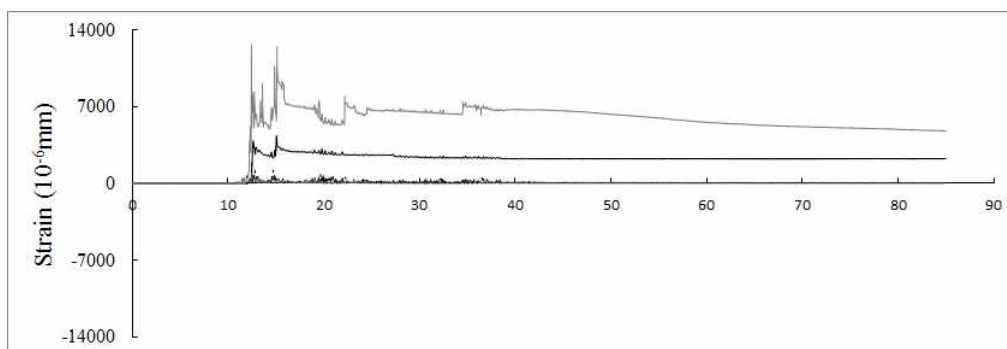
(a) 좌측기동 주근



(b) 우측기동 주근

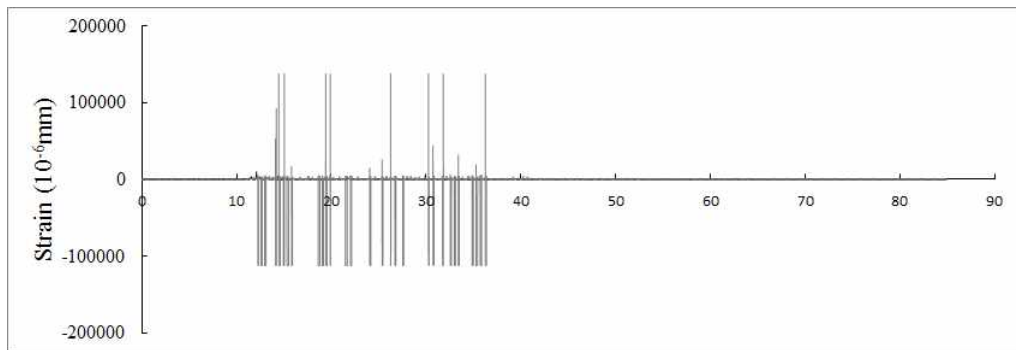


(c) 기동 보강근

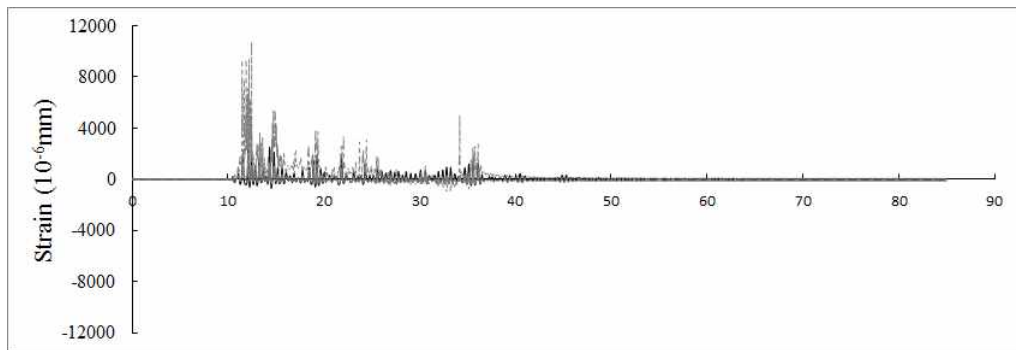


(d) 보 주근

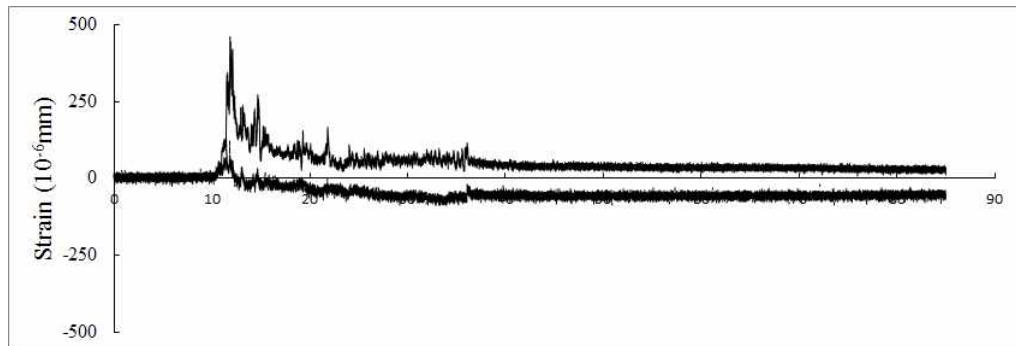
그림 3.71 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 160%)



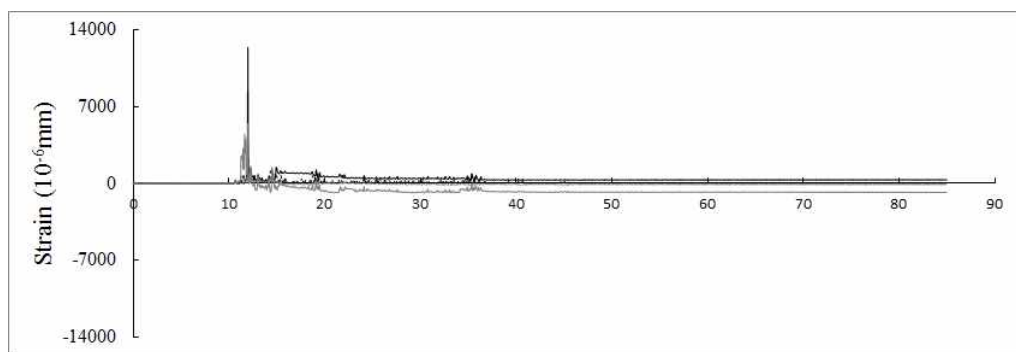
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

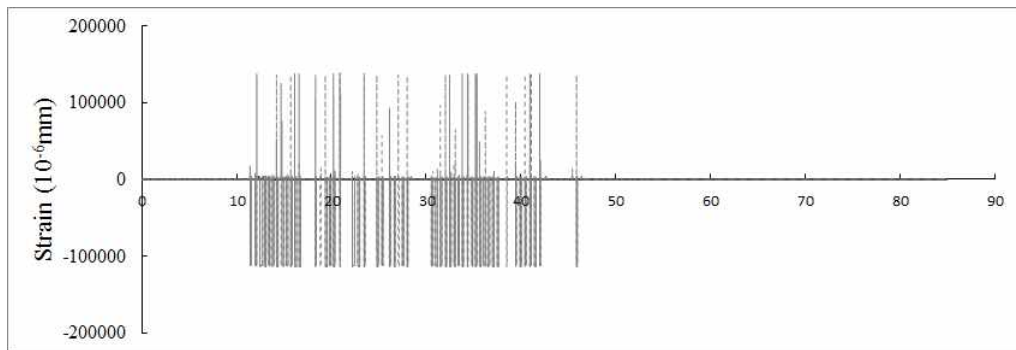


(c) 기둥 보강근

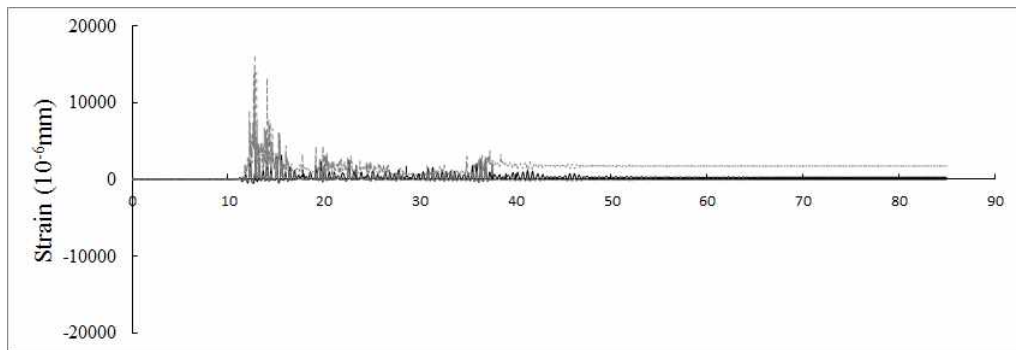


(d) 보 주근

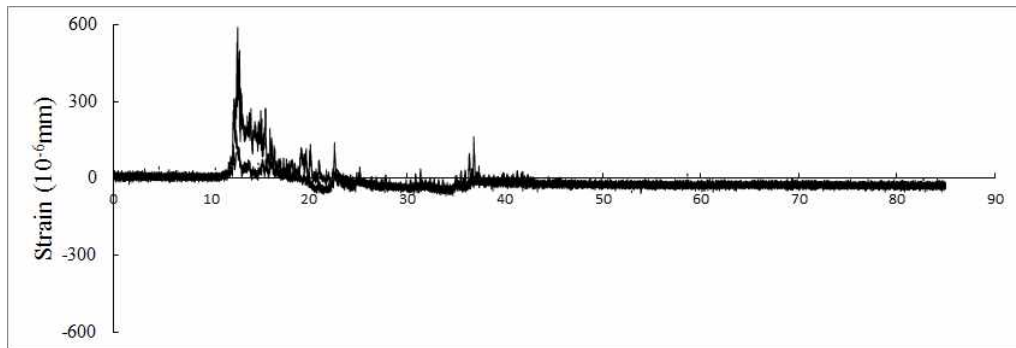
그림 3.72 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 190%)



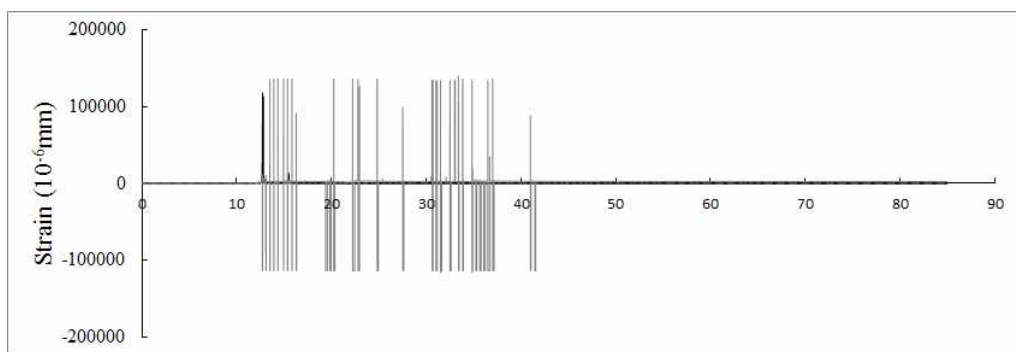
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

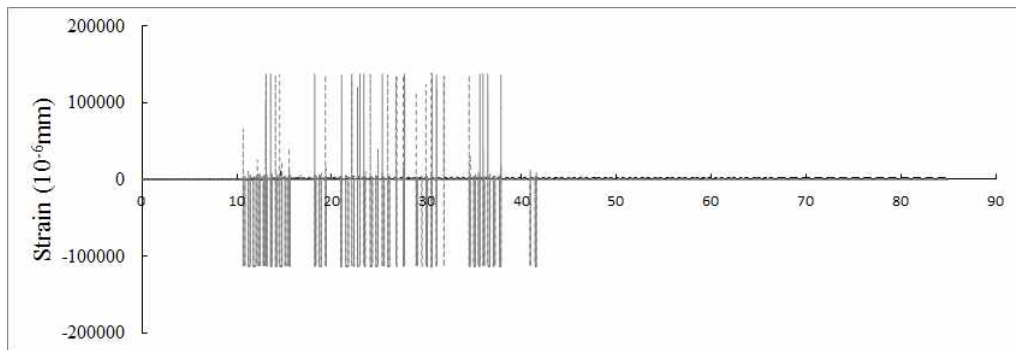


(c) 기둥 보강근

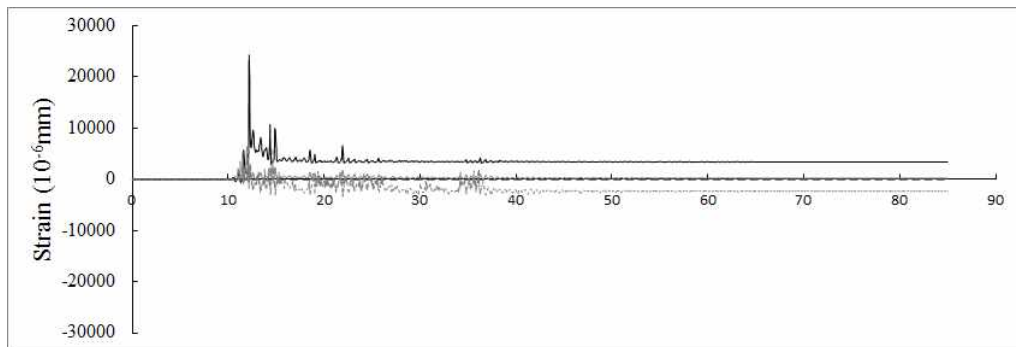


(d) 보 주근

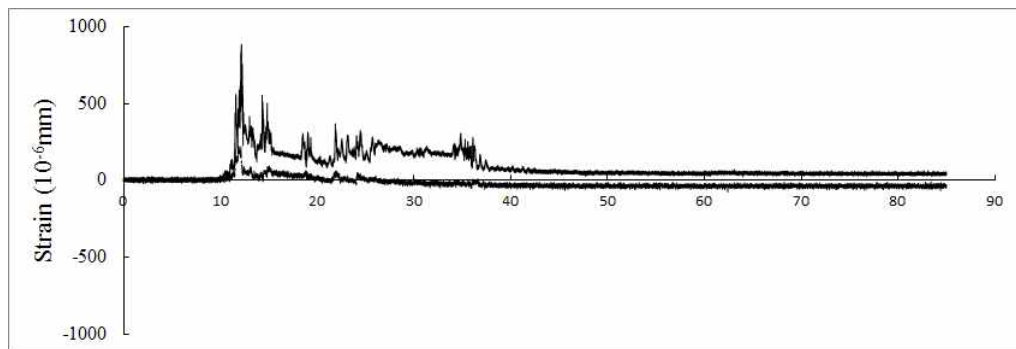
그림 3.73 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 220%)



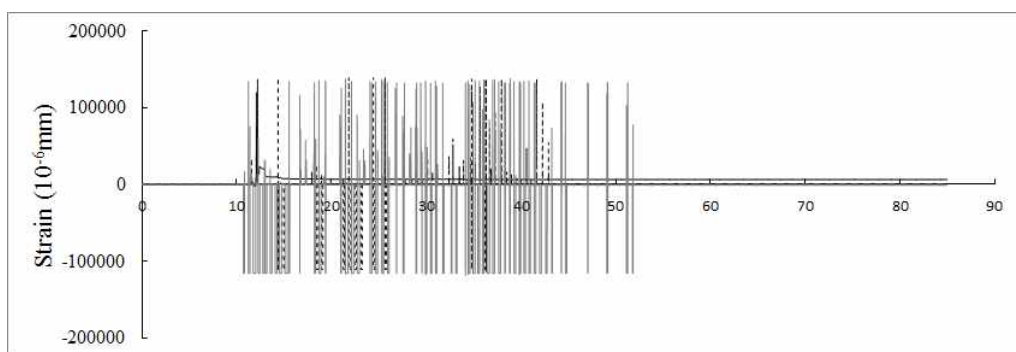
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근



(c) 기둥 보강근



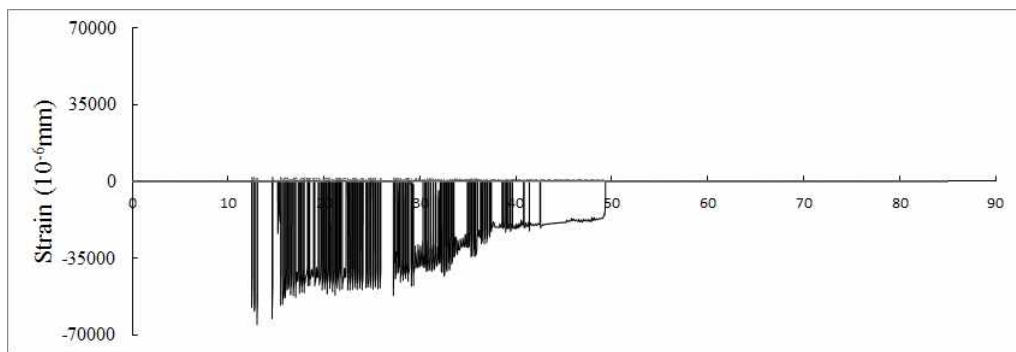
(d) 보 주근

그림 3.74 RCS0 시험체의 변형률(가진 스케일 250%)

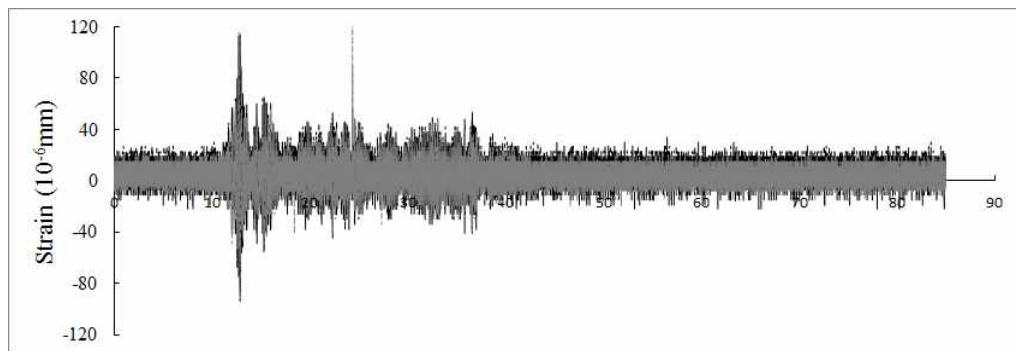
[RCS1 시험체]

- 그림 3.75 ~ 그림 3.82는 시험체 RCS1의 가진스케일별 기둥 및 보 위험단면에 설치한 스트레인의 변형률 시간이력을 나타냄

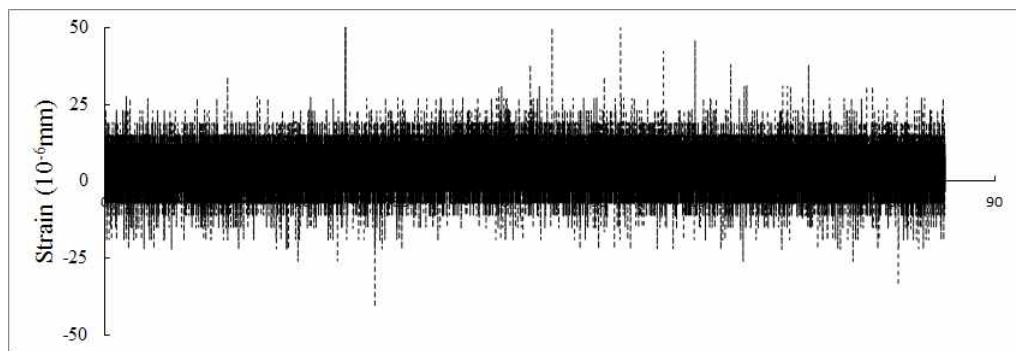
- 가진스케일 160%에 의한 가진 시 우측기둥 하부주근이 항복하였으며, 이후 가진스케일 190%에 의한 가진 시 보 주근이 항복하였으며, 기둥 보강근은 실험 종료시까지 항복하지 않음



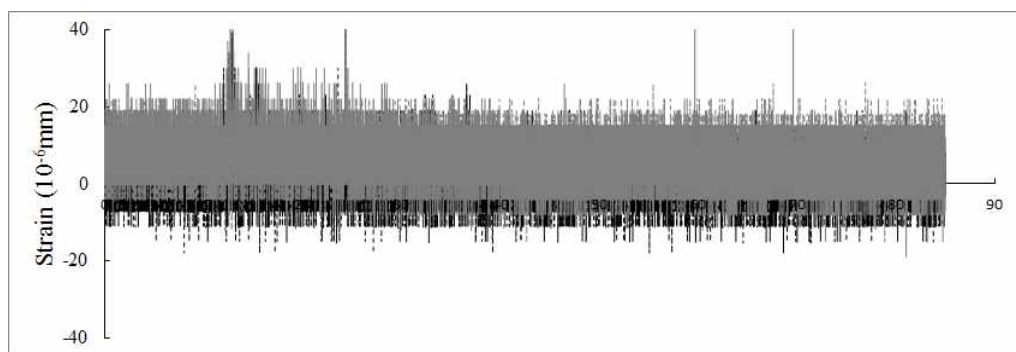
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

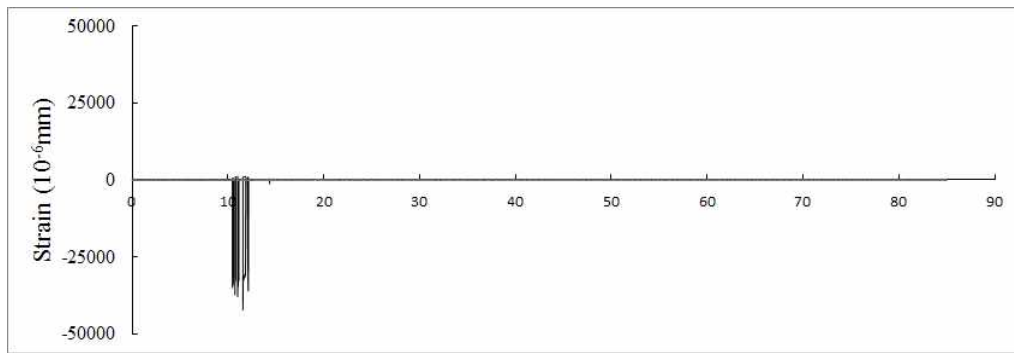


(c) 기둥 보강근

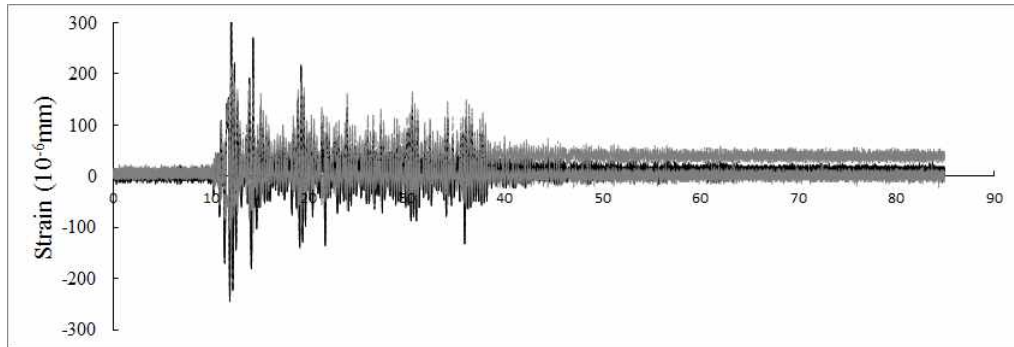


(d) 보 주근

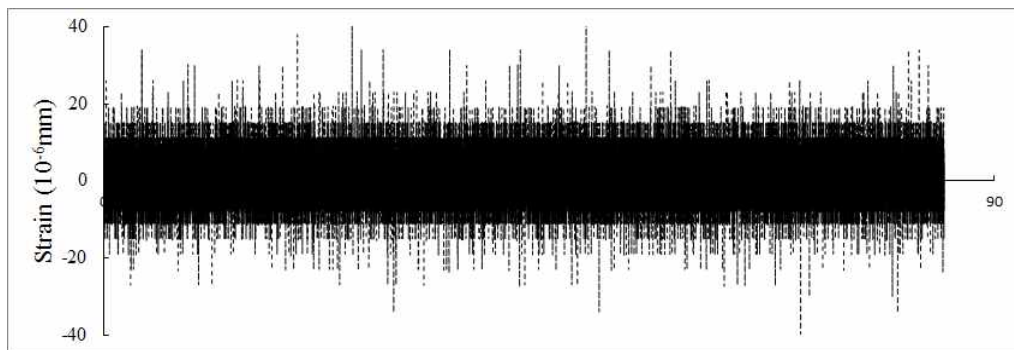
그림 3.75 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 10%)



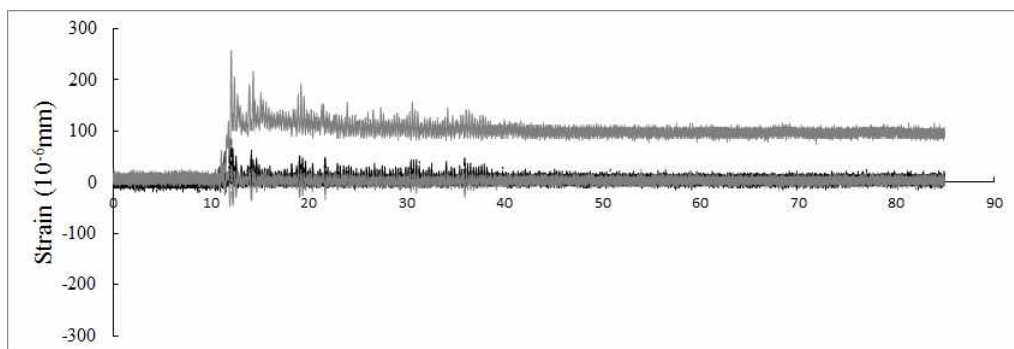
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

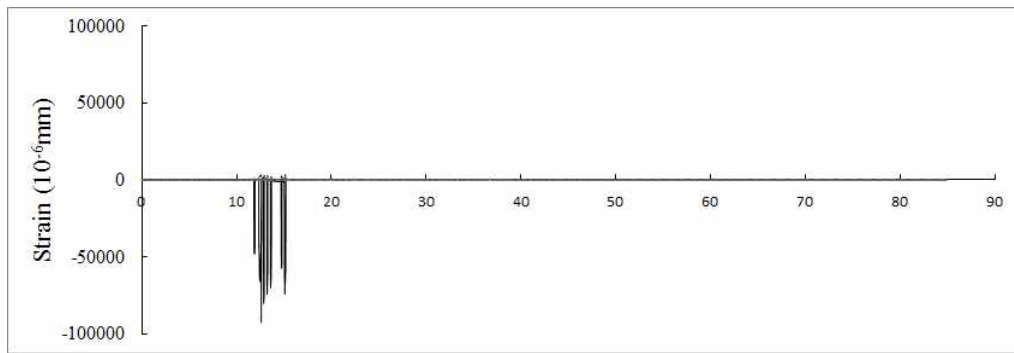


(c) 기둥 보강근

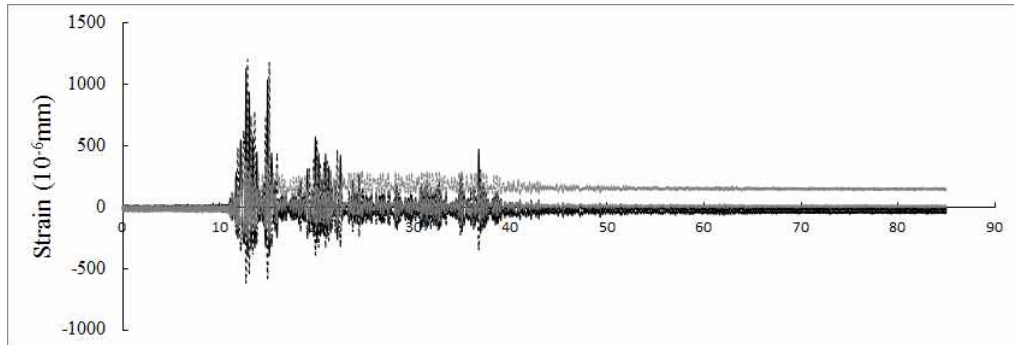


(d) 보 주근

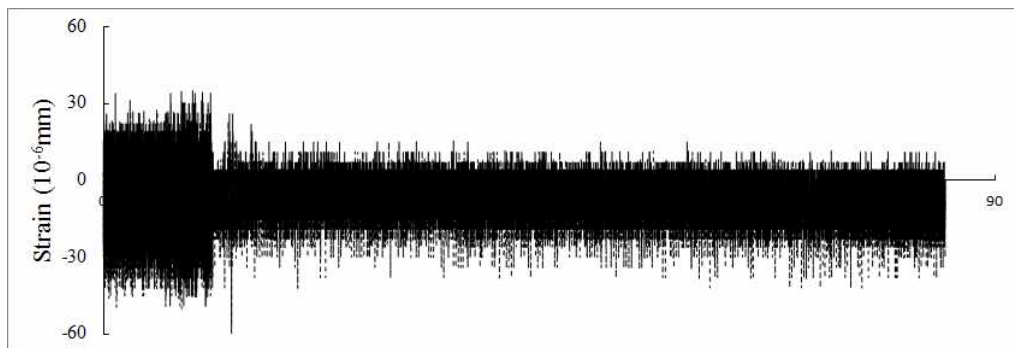
그림 3.76 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 30%)



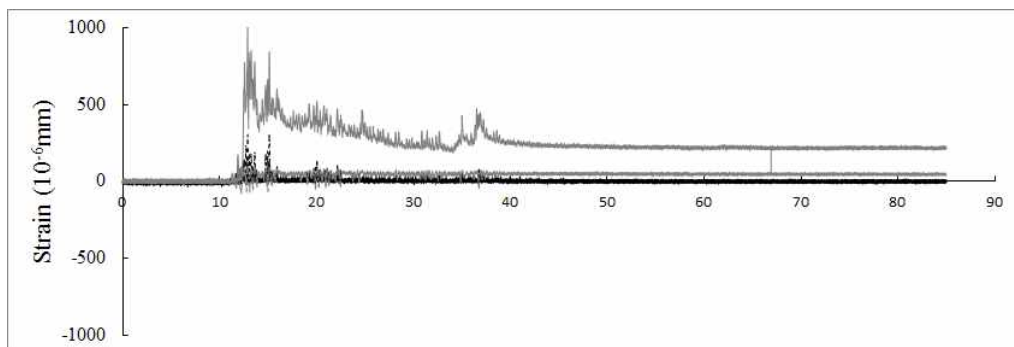
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

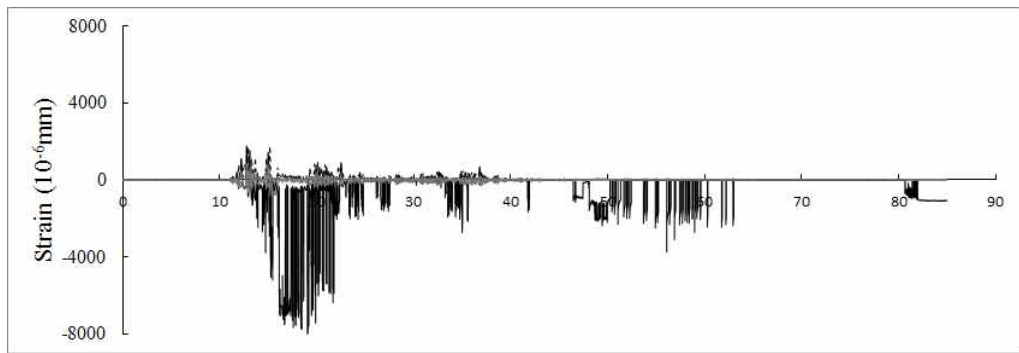


(c) 기둥 보강근

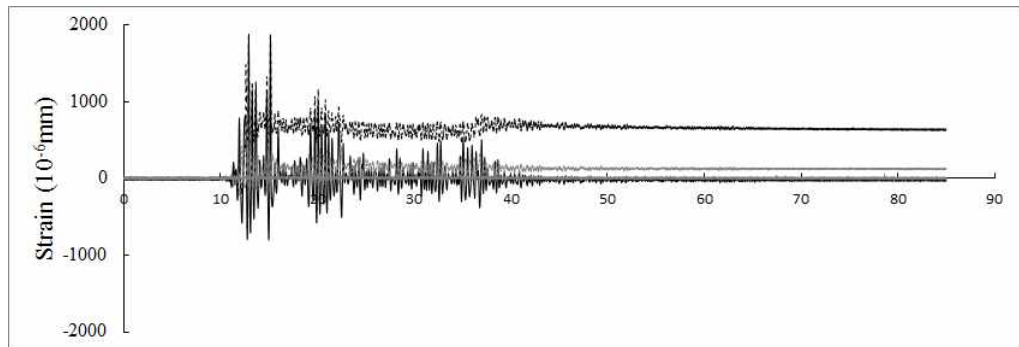


(d) 보 주근

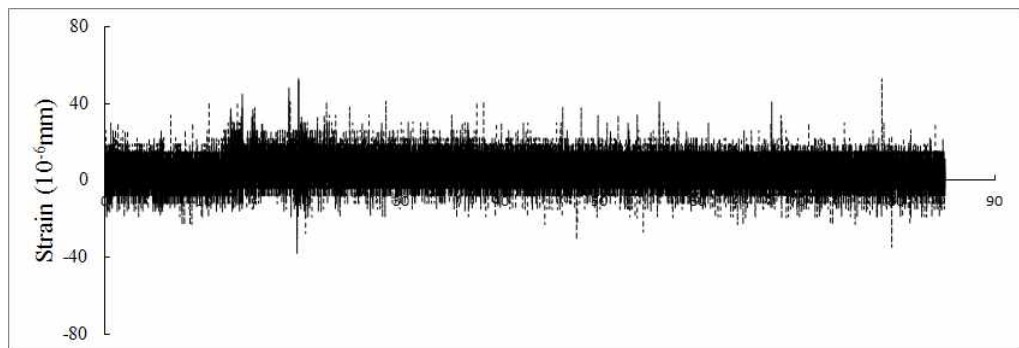
그림 3.77 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 70%)



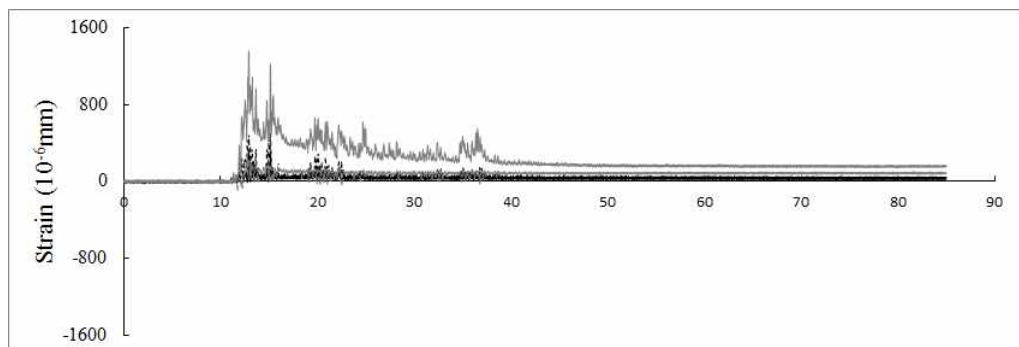
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

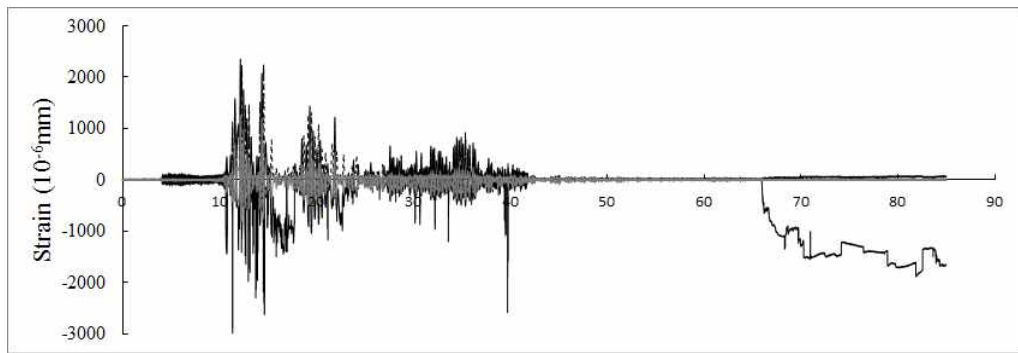


(c) 기둥 보강근

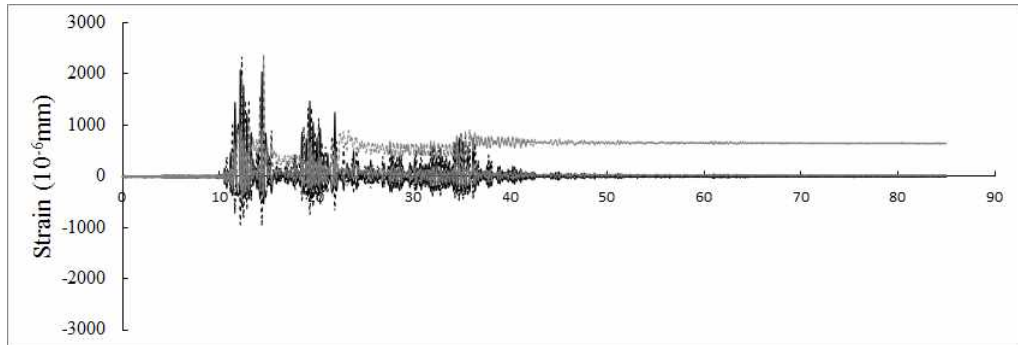


(d) 보 주근

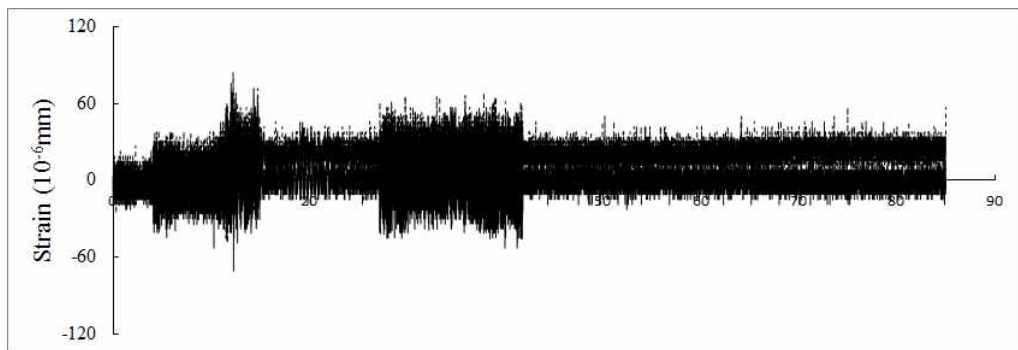
그림 3.78 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 100%)



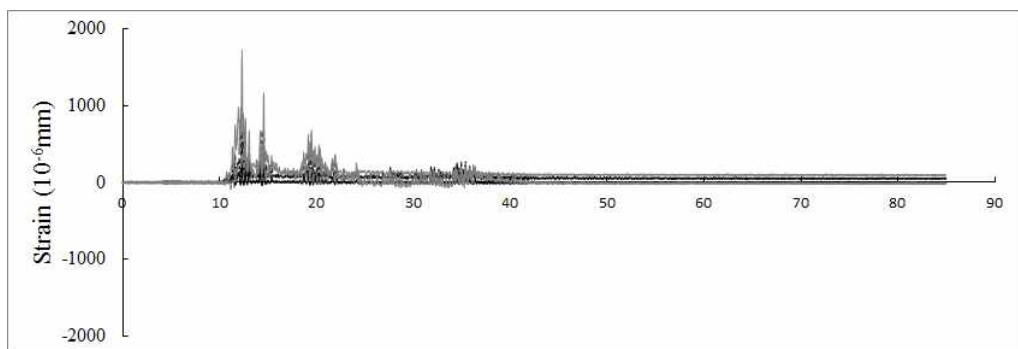
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

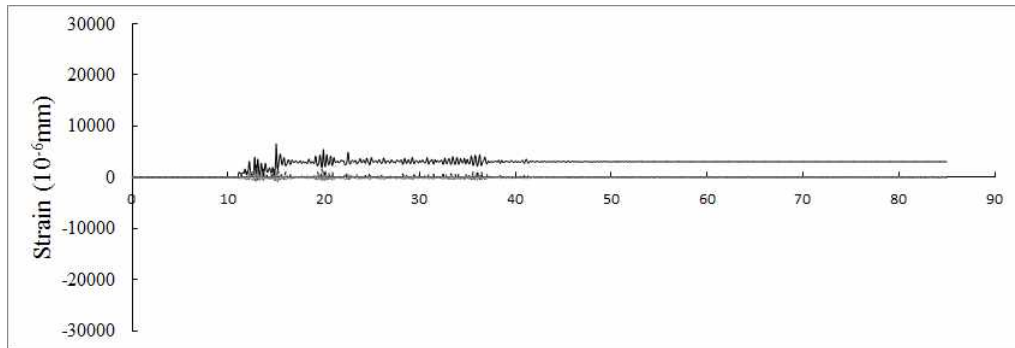


(c) 기둥 보강근

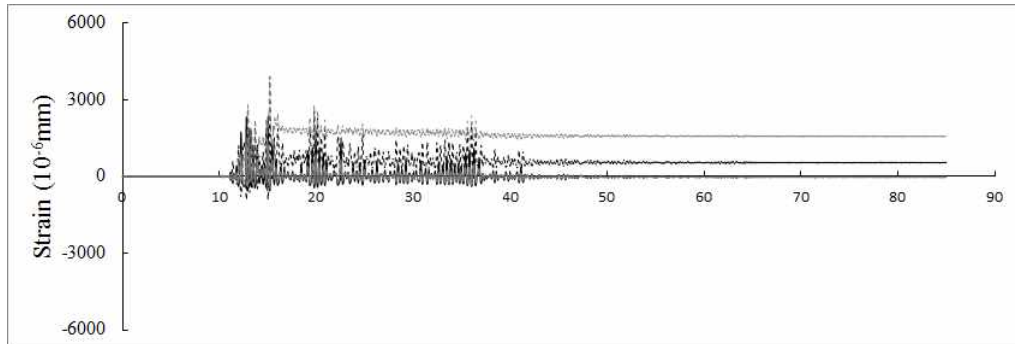


(d) 보 주근

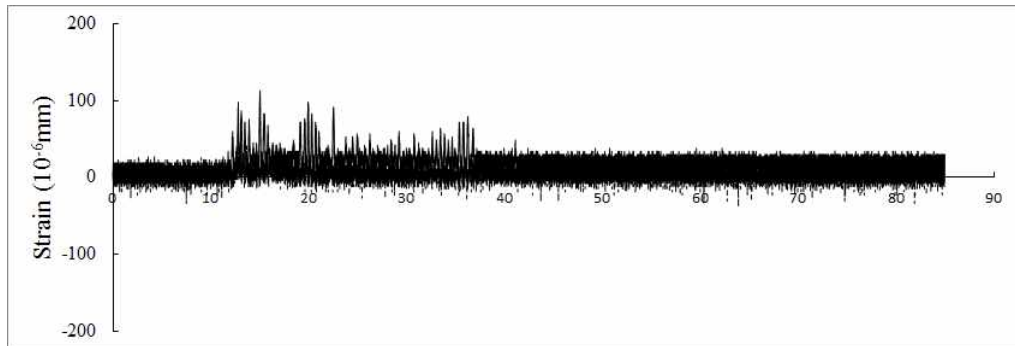
그림 3.79 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 130%)



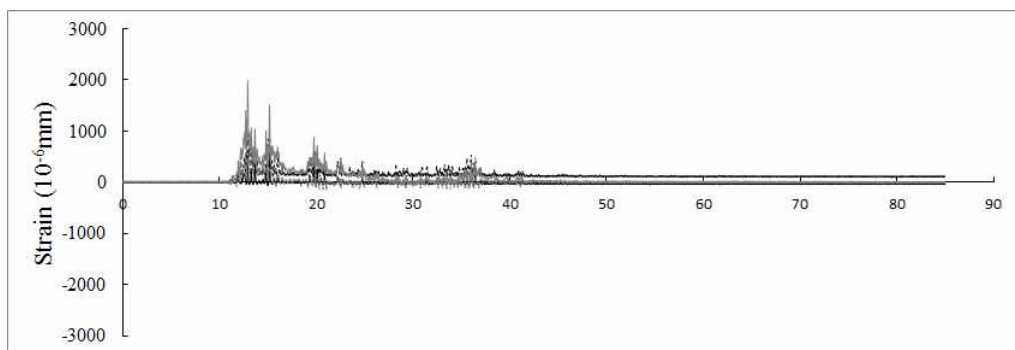
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

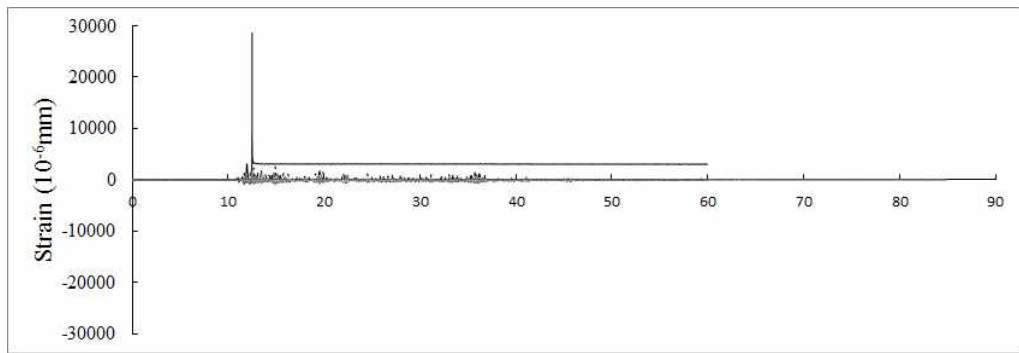


(c) 기둥 보강근

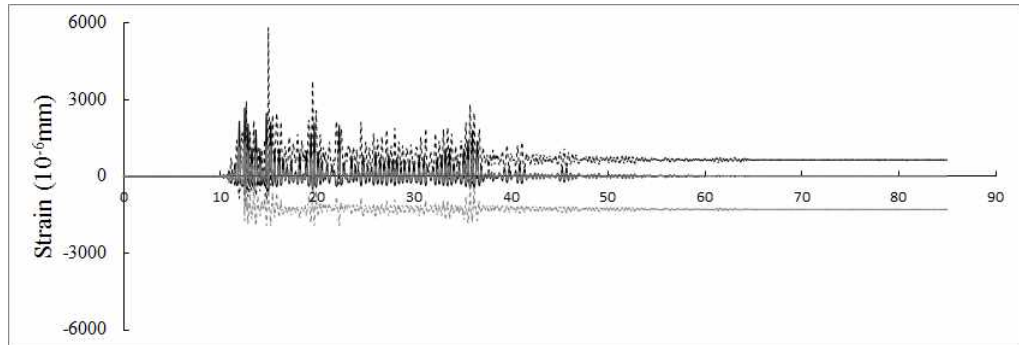


(d) 보 주근

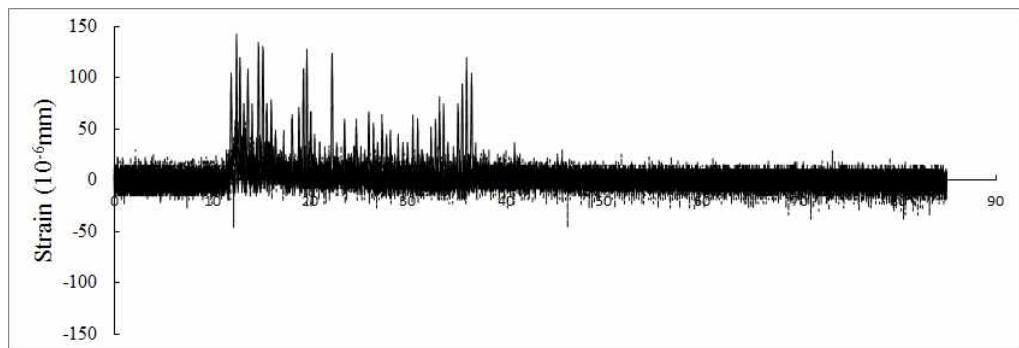
그림 3.80 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 160%)



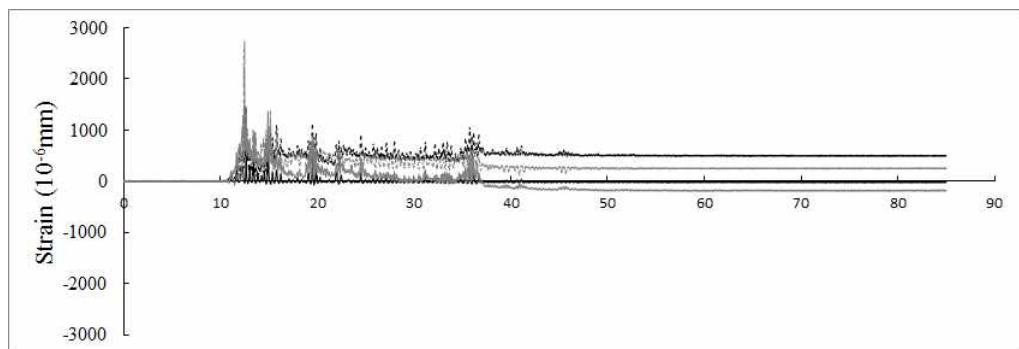
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근

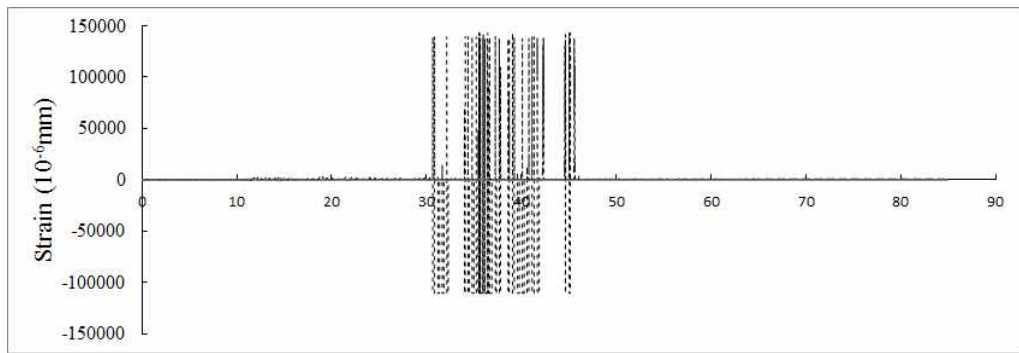


(c) 기둥 보강근

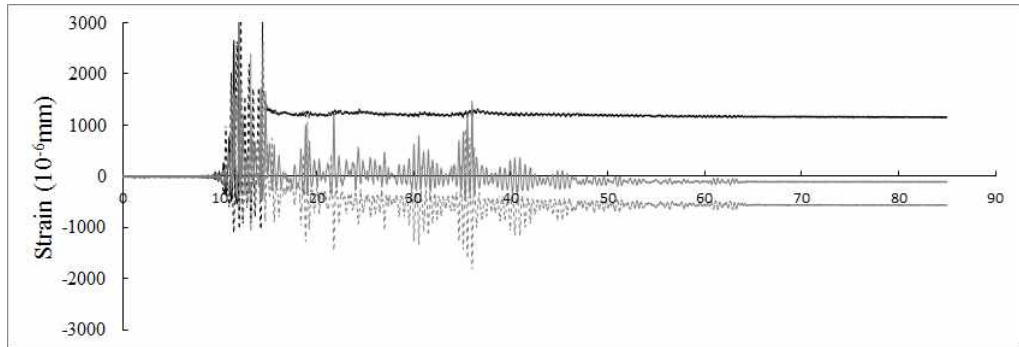


(d) 보 주근

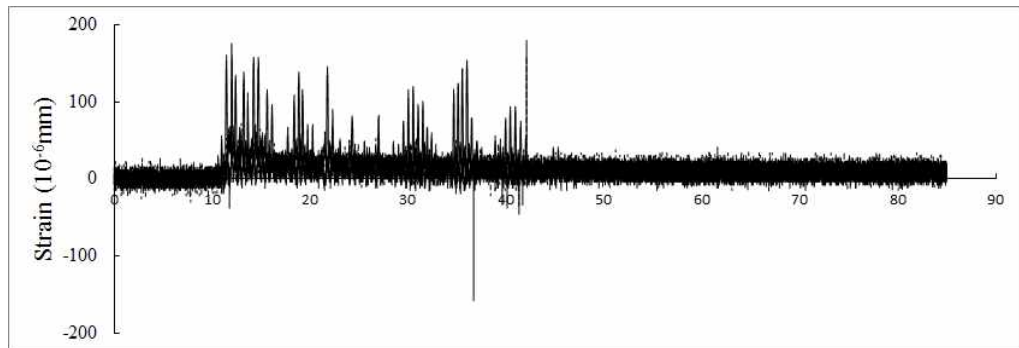
그림 3.81 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 190%)



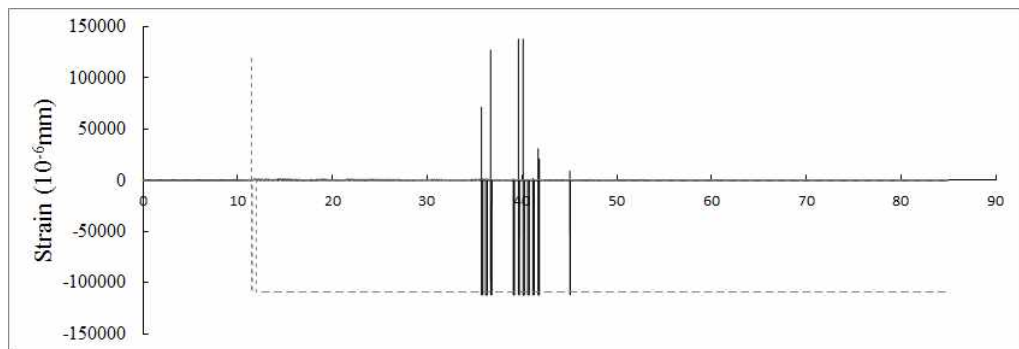
(a) 좌측기둥 주근



(b) 우측기둥 주근



(c) 기둥 보강근



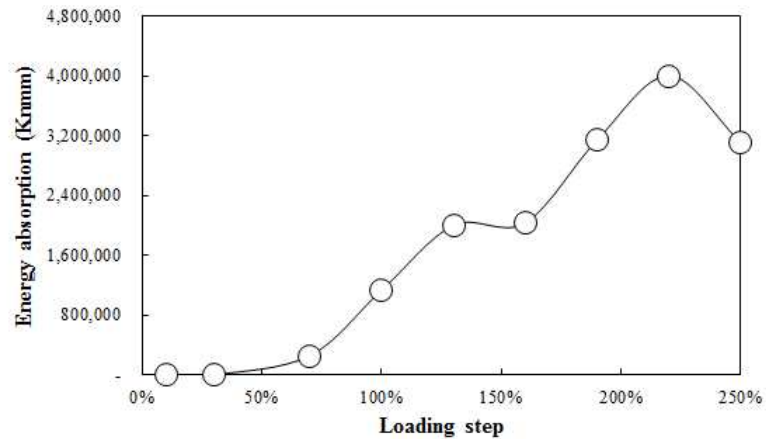
(d) 보 주근

그림 3.82 RCS1 시험체의 변형률(가진 스케일 220%)

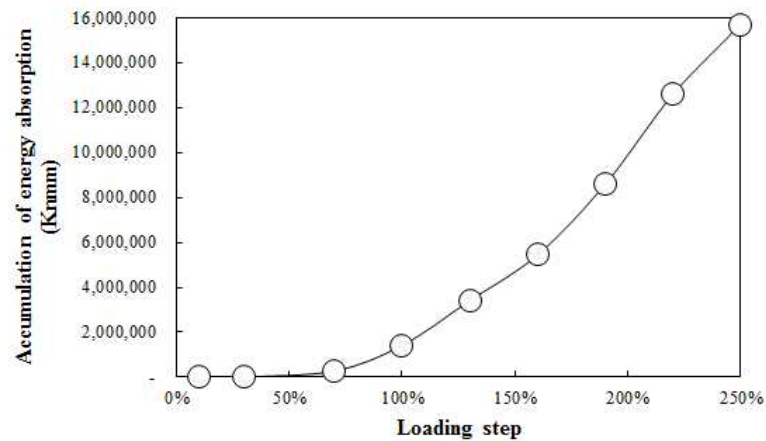
(7) 에너지 흡수능력

[RCS0 시험체]

- 그림 3.83은 시험체 RCS0의 가진스케일 증가에 따른 에너지 흡수능력을 나타냄
- 가진스케일 70%에 의한 가진 시 우측기둥의 주근 항복 등의 손상으로 흡수에너지가 증가하였으며, 가진스케일 160%에 의한 가진 시 흡수에너지가 약간 감소하였으나, 이후 가진스케일 증가에 따라 흡수에너지 증가
- 가진스케일 70%에 의한 가진 이후 누적흡수에너지는 직선적으로 증가



(a) 흡수에너지

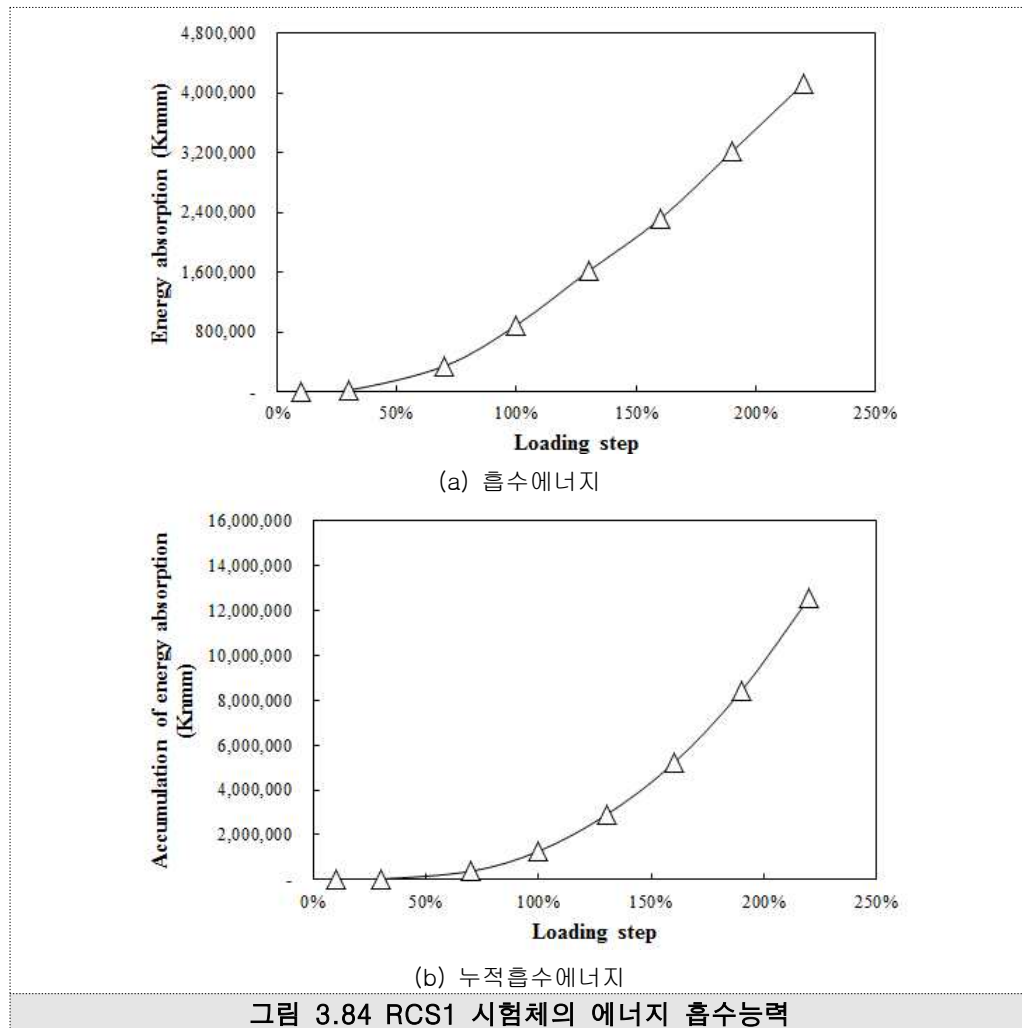


(b) 누적흡수에너지

그림 3.83 RCS0 시험체의 에너지 흡수능력

[RCS01시험체]

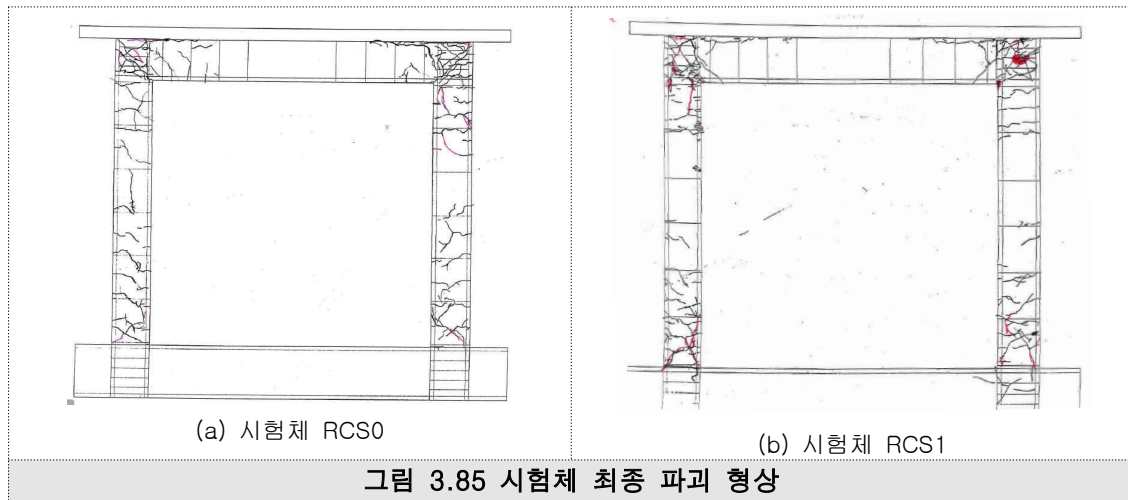
- 그림 3.84는 시험체 RCS1의 가진스케일 증가에 따른 에너지 흡수능력을 나타냄
- 가진스케일 70%에 의한 가진 이후 흡수에너지는 직선적으로, 누적흡수에너지는 곡선적으로 증가



마. 전단파괴 기동을 가지는 RC골조의 내진성능

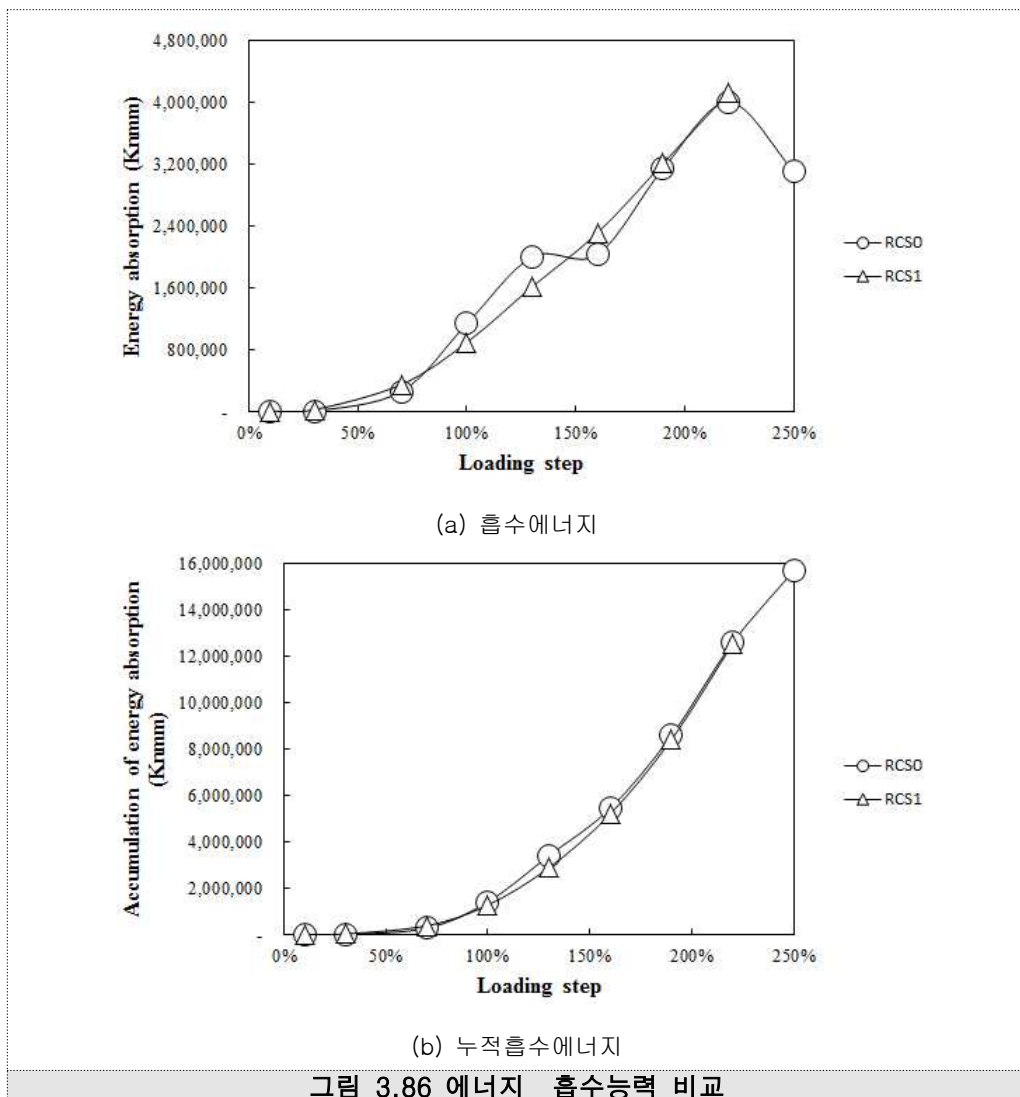
(1) 파괴 양상

- 그림 3.85는 동적실험 및 정적, 동적 연속실험에 의한 시험체의 최종파괴 형상을 나타냄
- 동적실험 전의 정적실험에 의한 손상유발은 RC 골조의 균열 등 손상발생에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단됨



(2) 에너지 흡수능력

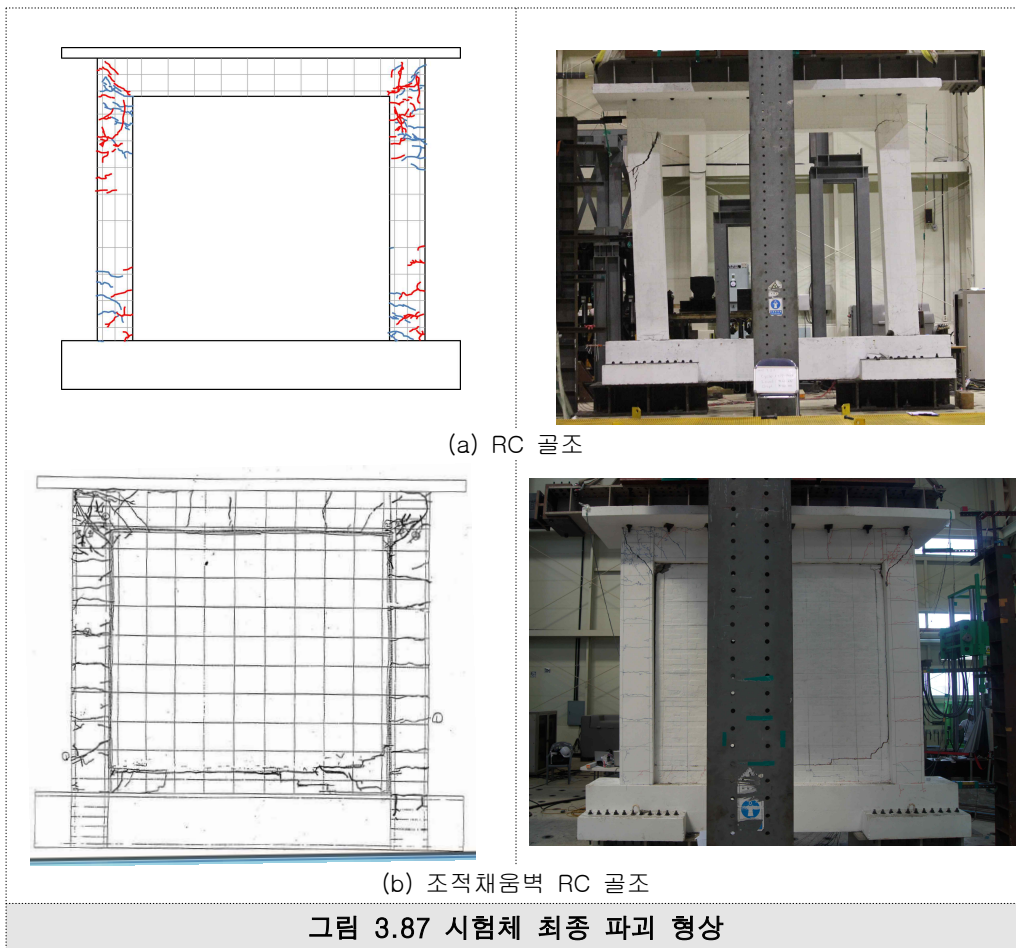
- 그림 3.86은 동적실험 및 정적, 동적 연속실험에 의한 시험체의 가진스케일 증가에 따른 흡수에너지와 누적흡수에너지를 나타냄
- 동일 가진스케일에서의 시험체 RCS0 및 시험체 RCS1의 흡수에너지와 누적흡수에너지 모두 유사한 것으로 나타남



바. 조적채움벽 RC골조의 내진성능

(1) 파괴 양상

- ☐ RC 골조의 경우, 기둥 상하부 및 접합부에 균열 등 손상이 집중하여 발생하였으며, 최종적으로 기둥 상부에 발생한 전단균열에 의하여 전단 파괴됨
- ☐ 조적채움벽 RC 골조의 경우, 기둥 전체에 휨균열이 균등하게 발생하였으며, 보 양단부에도 휨균열, 전단균열이 발생하였음
- ☐ 또한, 보-기둥 접합부에 발생한 전단균열이 벌어지고, 철근이 노출됨에 따라 최종적으로 파괴됨
- ☐ 조적벽체에 의하여 RC 골조에 작용하는 압축력으로 인하여, RC 골조 전체에 균열이 분산되어 발생하였으며, 최종 파괴가 기둥이 아닌 접합부에서 발생한 것으로 판단됨



(2) 구조적 특성

- ☐ 조적벽체로 인하여 초기강성 12.42배, 최대 내력 3.63배 증가
- ☐ 조적채움벽 RC 골조 : 조적벽으로 인하여 시험체 전체 초기강성이 크게 증가하면서 주근 항복 시 층간변형각이 감소하였으며, 최대 층간변형각 1.41%에 파괴되어 약 50% 정도로 변형능력 감소

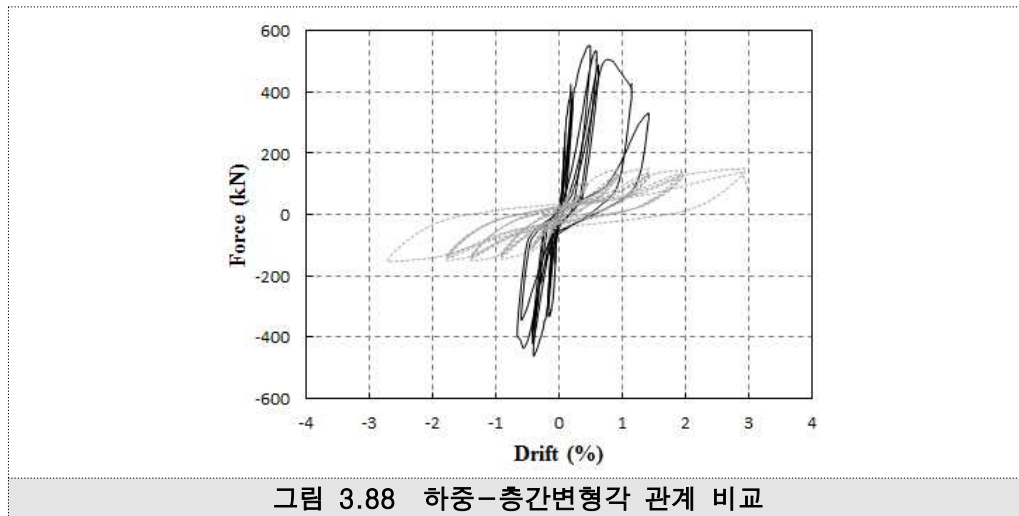
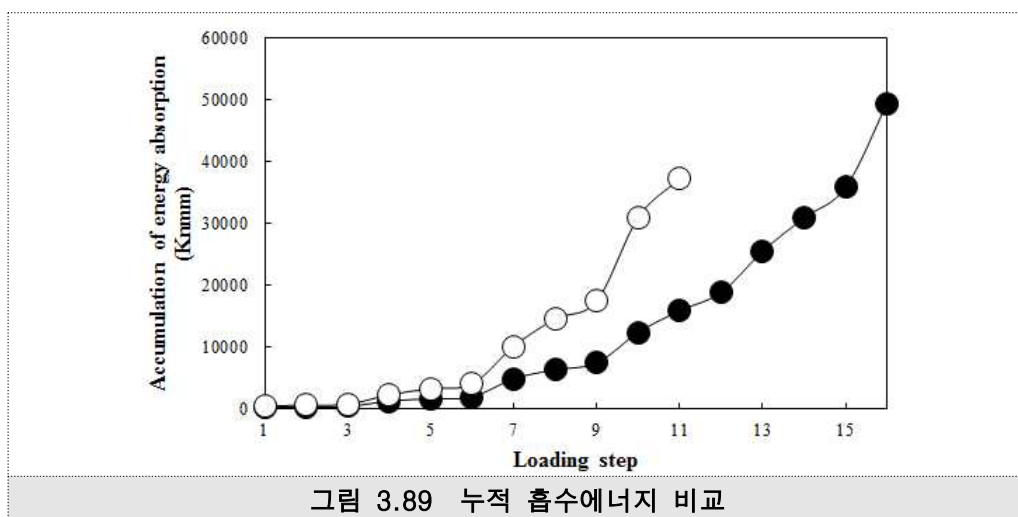


표 3.12 역학적 특성

시험체		RC 골조(A)	조적채움벽 RC 골조(B)	조적채움벽 효과(B/A)
초기강성 (kN/mm)		18.34	227.79	12.42
주근 항복	하중 (kN)	130.8	471.1	3.60
	변형각 (%)	0.65	0.31	0.48
최대 내력	하중 (kN)	152.6	554.0	3.63
	변형각 (%)	2.66	0.48	0.18

(3) 에너지 흡수능력

- 조적벽체로 인하여 가력 초기단계부터 기둥, 보, 프레임과 조적벽체 사이 및 슬래브와 보 사이에 발생한 균열로 동일 가력 스텝에서의 흡수에너지 및 누적흡수에너지는 조적채움벽 RC 골조 시험체가 더 큰 것으로 나타남
- 하지만, 최종 파괴 시까지 누적 흡수된 에너지는 RC 골조 시험체가 조적채움벽 RC 골조 시험체보다 큰 것으로 나타남
 - 단, 최종 파괴시점까지의 에너지 흡수능력은 RC 골조 시험체가 큰 것으로 판단되나, 시험체의 최종 파괴시점은 시험체의 파괴 양상에 따른 주관적 판단에 근거한 것으로 RC 골조 시험체가 반드시 조적채움벽 RC 골조 시험체보다 크다고 할 수는 없을 것으로 사료됨



2. RC 골조의 비선형 지진응답해석

가. 해석 개요

- 비내진상세를 가지는 RC 골조의 본진으로 인한 손상정도에 따른 잔류내진성능을 평가하기 위하여 해석 실시
 - 횡항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC 골조(RCMD 모델), 전단파괴 기둥을 가지는 RC 골조(RCMS 모델), 조적채움벽 RC 골조(RCMWD 모델)에 대하여 기존 및 3장의 실험결과를 바탕으로 실험을 실시하지 않은 손상도에 대해서도 해석을 통하여 잔류내진성능 평가
- 해석대상 구조물은 1층 1스팬의 RC 부분골조이며, 각 RC 골조에 대하여 본진에 의한 손상정도(표 3.13 참조)를 해석변수로 함
 - 기준 모델 : 본진에 의하여 손상이 발생하지 않은 모델 RCMD0.0, RCSD0.0, RCMWD0.0
- 가력 방법
 - 정적 지진응답해석으로 손상도별 한계중간변형각까지 가력하여 손상 모사
 - 이어서 동적 지진응답해석을 실시하여 손상도에 따른 잔류내진성능 검토

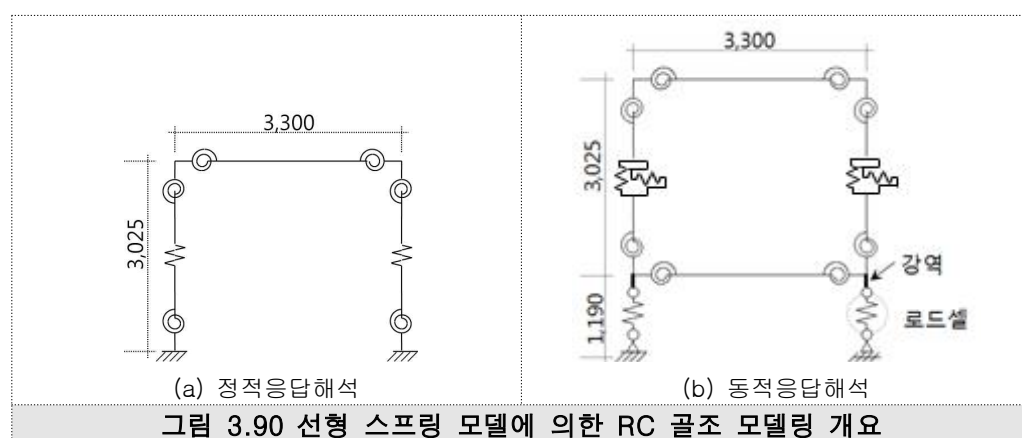
표 3.13 해석변수

손상도		무손상	손상도 I	손상도 II	손상도 III	손상도 IV
해석 모델명	횡항복후 전단파괴	RCMD0.0	RCMD0.5	RCMD1.0	RCMD1.5	RCMD2.0
	전단파괴	RCSD0.0	RCSD0.5	RCSD1.0	RCSD1.5	RCSD2.0
	조적채움벽	RCMWD0.0	RCMWD0.5	RCMWD1.0	RCMWD1.5	RCMWD2.0

나. 해석 모델

(1) RC 골조

- 해석대상 구조물은 그림 3.90과 같이 부재의 중앙과 양단에 비선형 거동을 모사하기 위한 스프링을 가지는 선형부재(선형스프링모델)로 모델화하였으며, 동적 지진응답해석의 경우, 진동대 실험시 시험체 하부에 설치한 로드셀까지 고려하여 모델화
 - 보길이 : 양측 기둥단면의 중심 간 거리
 - 기둥길이 : 기초보 상부면에서 보단면 중심까지의 거리
 - 로드셀 : 진동대 바닥면에서 기초보 상부면까지



□ 보부재

- 부재 양단부의 휨스프링으로 비선형 휨거동을 모사
- 휨스프링은 Tri-linear의 골격곡선을 가지며, 전단계 가진까지의 루프 최대점을 향하여 가력하는 것을 특징으로 하는 복원력특성모델(그림 3.92) 적용
- 골격곡선의 역학적 특성값은 다음 식(3.1)~(3.3)을 이용하여 산출하였으며, 그 결과는 표 3.14와 같음

$$\text{휨강성}(EI) = E_c \times (b \times \frac{D^3}{12}) \quad (3.1)$$

$$\text{균열 휨모멘트}(M_c) = 0.563 \sqrt{f_c} b D^2 \times \frac{1}{6} \quad (3.2)$$

$$\text{항복 휨모멘트}(M_y) = 0.5 a_g \sigma_y g_l D \quad (3.3)$$

여기서, E_c : 콘크리트 탄성계수, b : 부재 단면 폭, D : 부재 단면 높이, F_c : 콘크리트 압축강도, a_g : 주근 단면적, σ_y : 주근 항복강도, g_l : 응력 중심간 거리(0.8)

- 이력특성을 나타내는 계수로는 실험결과를 잘 모사할 수 있도록 표 3.15의 값을 적용

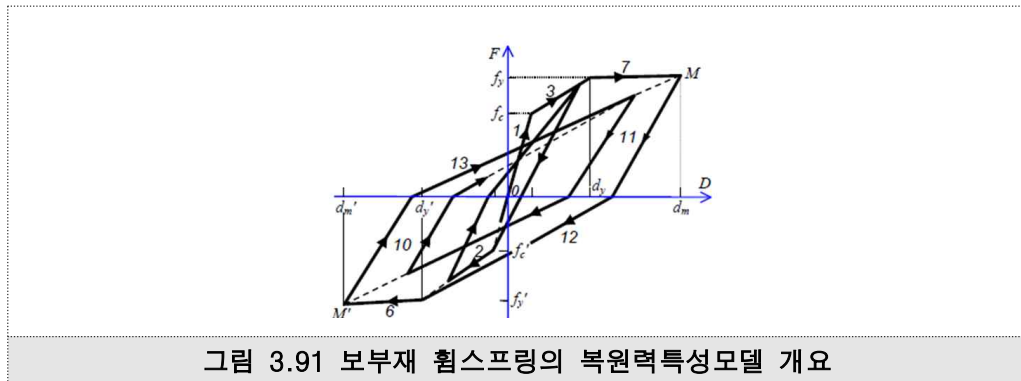


표 3.14 보부재 골격곡선의 역학적 특성

스프링	파괴형식	초기강성 (kNm2)	f_c (kNm)	f_y (kNm)
휨	휨항복후 전단파괴	2.47×10^5	69/132	333/348
	전단파괴	2.18×10^5	71/136	365/511
	조적채움벽	2.18×10^5	132/231	356/511

표 3.15 보부재 복원력특성모델의 각종 계수

스프링	파괴형식	계수								
		강성		강도저하		핀칭거동		제하거동		
		α	β	ε	μ	δ	λ	κ	θ	ζ
휨	휨항복후 전단파괴	0.2	0.001	-	-	-	-	-	0.7	1.0
	전단파괴	0.2	0.001	-	-	-	-	-	0.7	1.0
	조적채움벽	0.2	0.001	-	-	-	-	-	0.7	1.0

□ 기둥부재

- (휨항복후 전단파괴) 부재 양단부의 휨스프링으로 비선형 휨거동을, 부재 중앙부의 축스프링으로 비선형 축거동을 모사
- (전단파괴) 부재 양단부의 휨스프링으로 비선형 휨거동을, 부재 중앙부의 축스프링 및 전단스프링으로 각각 비선형 축거동 및 전단거동을 모사
- 휨스프링은 Tri-linear의 골격곡선을 가지며, 최대 강도(내력)이후의 강도저하와 핀칭현상을 고려할 수 있는 복원력특성모델(그림 3.91(a))을 적용하고, 골격곡선의 역학적 특성값은 다음 식 (3.4) ~ 식 (3.6)를 이용하여 산출한 표 4.4의 값을, 이력특성을 나타내는 계수는 실험결과를 제대로 모사할 수 있도록 표 4.5의 값을 적용

$$\text{휨강성}(EI) = E_c \times (b \times \frac{D^3}{12}) \quad (3.4)$$

$$\text{균열 모멘트}(M_c) = 0.563 \sqrt{f_c} b D^2 \times \frac{1}{6} + N \times \frac{D}{6} \quad (3.5)$$

$$\text{휨 모멘트}(M_y) = 0.5 a_g \sigma_y g_1 D + 0.5 N D (1 - \frac{N}{b D f_c}) \quad (3.6)$$

여기서, E_c : 콘크리트 탄성계수, b : 부재 단면 폭, D : 부재 단면 높이, f_c : 콘크리트 압축강도, N : 축력, a_g : 주근 단면적, σ_y : 주근 항복강도, g_1 : 응력 중심간 거리 (0.8)

- 축스프링은 압축측은 강성 저하가 없으며, 인장측은 인장강도이후에 강성이 저하하는 Bi-linear의 골격곡선을 가지는 복원력특성모델(그림 3.91(b))을 적용하고, 골격곡선의 역학적 특성값은 다음 식 (3.7) ~ 식 (3.8)을 이용하여 산출한 표 3.16의 값을, 이력특성을 나타내는 계수는 실험결과를 제대로 모사할 수 있도록 표 3.17의 값을 적용

$$\text{인장력}(N_t) = f_t b D \quad (3.7)$$

$$\text{압축력}(N_c) = 0.85 f_c b D \quad (3.8)$$

여기서, f_t : 콘크리트 인장강도

표 3.16 기둥부재 골격곡선의 역학적 특성

스프링	파괴형식	초기강성	f_c	f_y
휨	휨항복후 전단파괴	$1.69 \times 10^4 \text{ kNm}^2$	31 kNm	107 kNm
	전단파괴	$5.46 \times 10^4 \text{ kNm}^2$	38 kNm	191 kNm
	조적채움벽	$5.45 \times 10^4 \text{ kNm}^2$	38 kNm	96 kNm
축	휨항복후 전단파괴	$4.65 \times 10^6 \text{ kN}$	1,082 kN	3,696 kN
	전단파괴	$4.09 \times 10^6 \text{ kN}$	1,913 kN	5,408 kN
	조적채움벽	$4.09 \times 10^6 \text{ kN}$	1,913 kN	5,408 kN
전단	휨항복후 전단파괴	—	—	—
	전단파괴	$1.71 \times 10^6 \text{ kN}$	108 kN	127 kN
	조적채움벽	—	—	—

표 3.17 기둥부재 복원력특성모델의 각종 계수

스프링	파괴형식	계수										
		강성				강도저하		핀칭거동		제하거동		
		α		β		ε	μ	δ	λ	κ	θ	ζ
휨	휨항복후 전단파괴	0.1		0.001		0.05	0.2	0.3	0.5	0.001	1.0	0.1
	전단파괴	0.13		0.001		0.05	0.2	0.3	0.5	0.001	1.0	0.1
	조적채움벽											
축	휨항복후 전단파괴	0	0.5	0	0.001	—	—	—	—	—	—	—
	전단파괴	0	0.5	0	0.001	—	—	—	—	—	—	—
	조적채움벽	0	0.5	0	0.001	—	—	—	—	—	—	—
전단	휨항복후 전단파괴	—		—		—	—	—	—	—	—	—
	전단파괴	0.4		0.4		0.001	0.001	—	—	—	—	—
	조적채움벽	—		—		—	—	—	—	—	—	—

□ 보-기둥 접합부

- 실험으로 접합부에 상당한 균열이 발생하였기 때문에 보-기둥 접합부는 강역으로 가정하지 않음
- 접합부에 상당수의 균열이 발생하여 강역으로 보기 어려움.

□ 기초보

- 보부재와 동일하게 양단부에 휨스프링을 갖는 선형부재로 모델링
- 보부재와 동일한 복원력특성모델 적용
- 기초보-기둥 접합부는 강역으로 가정

□ 로드셀

- 부재 중앙부에 축스프링을 갖는 기둥 부재로 모델링
- 축스프링의 복원력특성모델은 인장강성과 압축강성이 다른 선형 복원력특성모델 적용
- 양단부는 핀지기로 가정

(2) 조적채움벽 RC 골조

- RC 골조는 (1)항과 동일하게 모델화(그림 3.92 참조)하였으며, 보 및 기둥 부재의 골격곡선의 역학적 특성 및 각종 계수는 각각 표 3.14와 표 3.16 및 표 3.15와 표 3.17의 값을 사용
- 조적채움벽체는 그림 3.92와 같이 부재 중심에 전단스프링을 가지는 전단요소로 모델화하였으며, 이 전단스프링을 통하여 조적채움벽체의 비선형 전단거동을 모사
 - 전단스프링은 Tri-linear의 골격곡선을 가지는 그림 3.91(a)의 복원력특성을 적용하고, 골격곡선의 역학적 특성값은 다음 식 (3.12) ~ 식 (3.14)를 이용하여 산출하였으며, 그 결과는 표 3.16과 같음. 또한, 이력특성을 나타내는 계수는 실험결과를 제대로 모사할 수 있도록 표 3.17의 값을 적용

$$\text{전단강성}(GA) = 0.4E \times (t \times l) \quad (3.12)$$

$$\text{전단강도}(V_u) = 90 \times t \times l + 0.45 \times \sigma_y \times t \times l \quad (3.13)$$

$$\text{수평항복강도}(V_c) = (V_u - \alpha K_0 \times U_m) / (1 - \alpha) \quad (3.14)$$

여기서, E : 조적채움벽체 탄성계수, t : 조적채움벽체 두께, l : 조적채움벽체 길이, σ_y : 축응력, U_m : 전단강도 시 변위, K_0 : 초기강성, a : 강성저하계수(0.13)

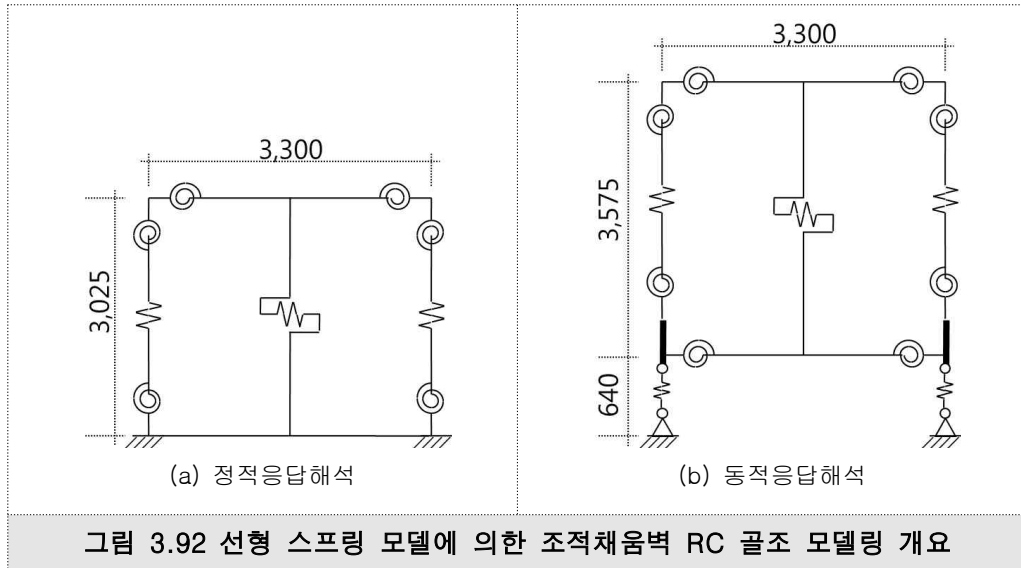


표 3.18 조적채움벽체 골격곡선의 역학적 특성

스프링	초기강성	f_c	f_y
전단	1.42×10^5 kN	184 kN	216 kN

표 3.19 조적채움벽체 복원력특성모델의 각종 계수

스프링	계수								
	강성		강도저하		핀칭거동		제하거동		
	α	β	ε	μ	δ	λ	κ	θ	ζ
전단	0.4	0.01	0.05	1.0	0.4	0.2	0.001	2.6	0.1

다. 해석 방법

- 무손상 모델에 대하여 동적 지진응답해석을, 손상 모델(손상도Ⅰ, 손상도Ⅱ, 손상도Ⅲ, 손상도Ⅳ)에 대하여 정적 및 동적 지진응답해석을 3차원 비선형 해석프로그램인 CANNY를 이용하여 실시

(1) 동적 지진응답해석

- 동적실험과 동일하게 El-Centro NS파(그림 3.93)를 입력파로 사용하여 표 3.20과 같이 입력파의 크기를 증가시키면서 연속적으로 해석 실시

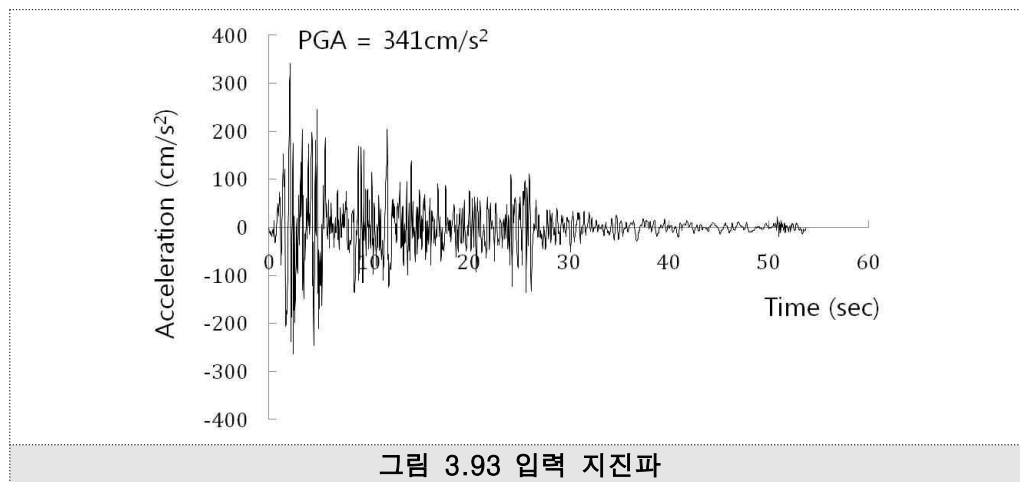
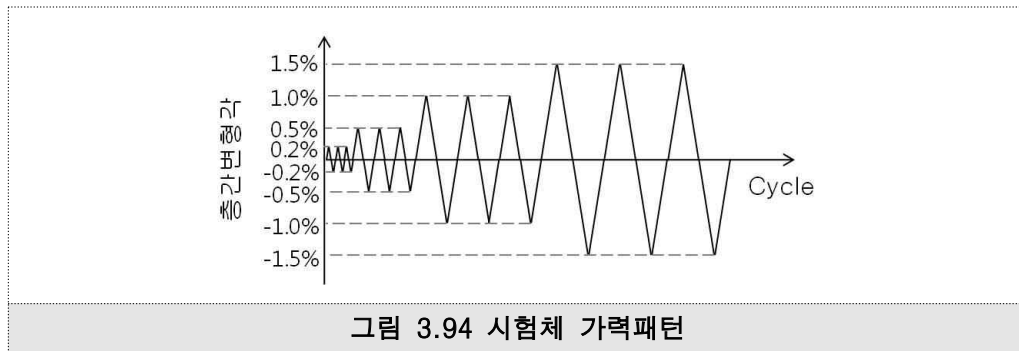


표 3.20 가진 프로그램

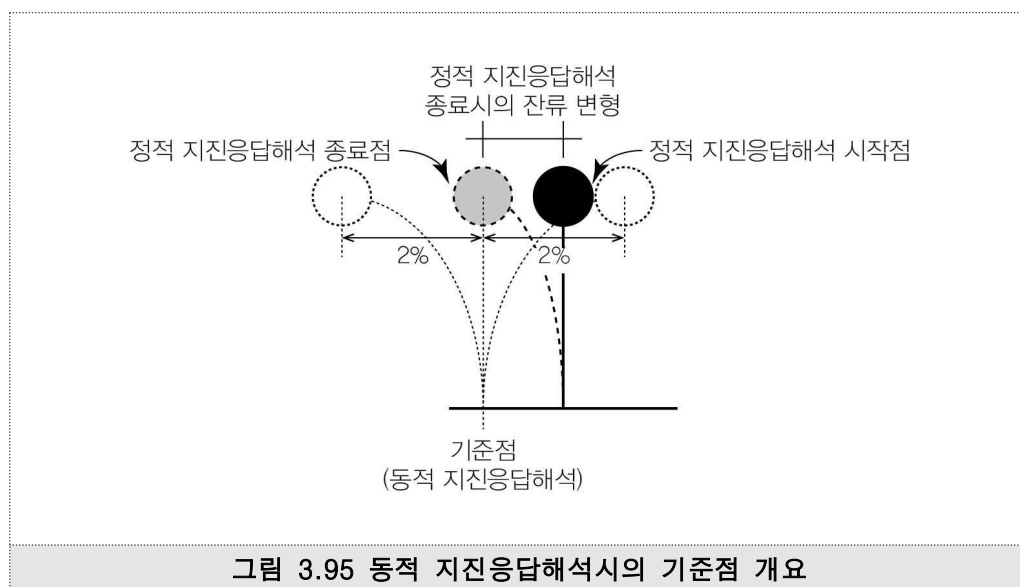
스텝	1	2	3	4	5	6	7	8	9
스케일 (%)	10	30	70	100	130	160	190	220	250
최대지반 가속도 (cm/s²)	34.1	102.3	238.7	341.0	443.3	545.6	647.9	750.2	852.5

(2) 정적 및 동적 지진응답해석

- 정적실험과 동일하게 그림 3.94의 가력패턴에 따라 표 3.13의 목표 손상도까지 정적 지진응답해석을 실시한 후에 (1)항과 동일하게 동적 지진응답해석 실시



- 정적 지진응답해석은 최종 가력의 제하시 하중이 '0'이 되는 시점에서 종료
- 정적 지진응답해석 종료 시점을 하중=0 혹은 변위=0의 어느 쪽으로 하느냐에 따라 해석결과에 차이가 존재하므로, 무손상 모델 RCMD0.0과 동일한 조건(하중=0, 변위=0)에서의 비교·검토를 위하여 동적 지진응답해석 시작 시점을 그림 3.95과 같이 정적 지진응답해석 종료 시의 잔류 변형 발생점을 기준점(하중=0)으로 고려함
 - 동적실험 시작 시, 모든 계측점은 '0'로 함.
 - 실제 지진에 따른 상태(지진 종료시의 잔류 변형)와는 다를 수 있음.



라. 해석방법 검증

(1) 동적 해석

[휨항복후 전단파괴]

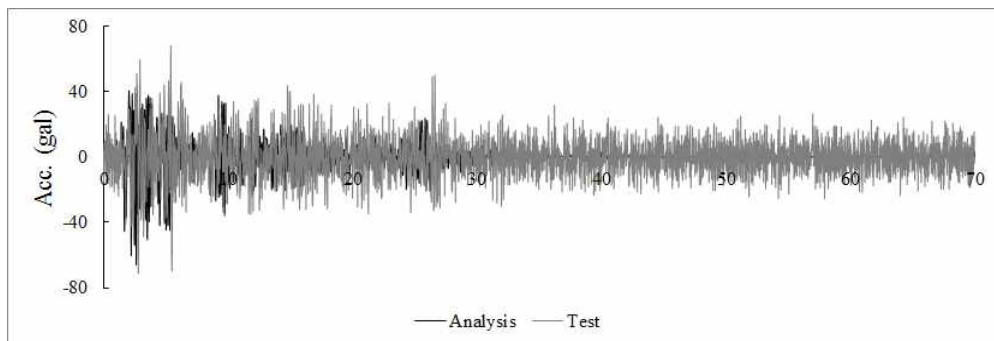
- 표 3.21 및 그림 3.96, 그림 3.97은 무손상 모델 RCMD0.0의 동적 지진응답해석에 의한 상부가속도 및 상부변위를 실험결과(시험체 RCM4)와 비교하여 나타낸 것임
- 상부가속도의 경우, 해석결과와 실험결과가 전반적으로 일치하는 것으로 나타난 반면에, 상부변위는 해석결과가 실험결과를 과소평가하는 것으로 나타났으나, 전반적으로 본 연구에 의한 해석모델 및 동

적 지진응답해석방법은 시험체의 거동을 모사하는데 유효할 것으로 판단됨

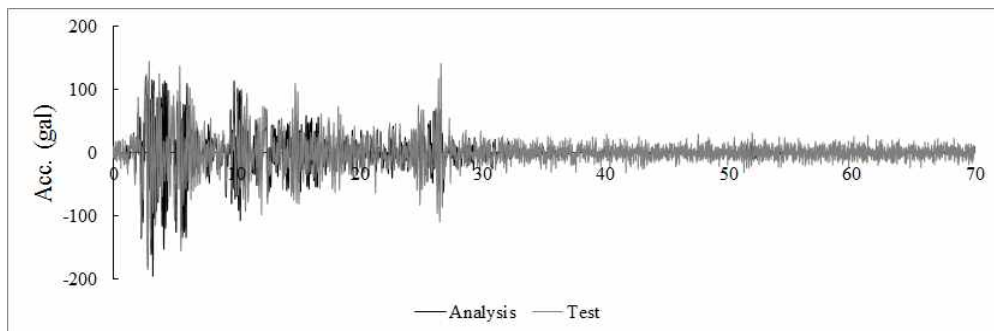
- 상부변위 시간이력 : 상대적으로 입력지진과의 크기가 클수록 실험결과와 해석결과가 유사한 경향을 보임. 한편, 해석의 경우, 기동 항복(160% 스케일에 의한 가진 시) 등으로 잔류 변위가 커지는 반면에 실험에서는 잔류 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타남
- 최대 상부변위 : 표 3.21와 같이 가진 스케일이 상대적으로 작은 범위에서는 실험결과에 의한 최대 상부변위가 해석결과에 의한 최대 상부변위 보다 큰 것으로 나타났으나, 가진 스케일이 커질수록 해석결과에 의한 최대 상부변위가 실험결과에 의한 최대 상부변위와 유사 혹은 커지는 것으로 나타남

표 3.21 실험결과와 해석결과의 최대 응답 비교(RCMD0.0)

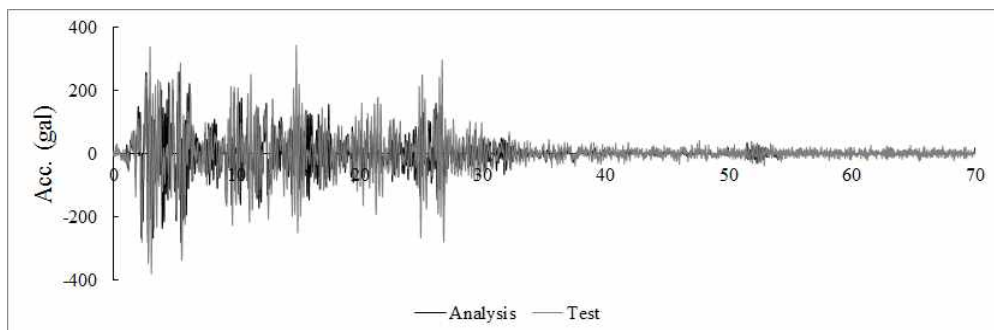
가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%
상부가속도 최대값(gal)	실험	71.4	185.6	380.7	556.2	723.6	864.2	1,017.5
	해석	65.9	195.3	284.5	405.6	612.7	738.8	815.2
상부변위 최대값(mm)	실험	0.77	2.48	6.87	11.28	13.68	15.70	33.44
	해석	0.32	0.95	2.46	7.08	14.96	19.89	22.89



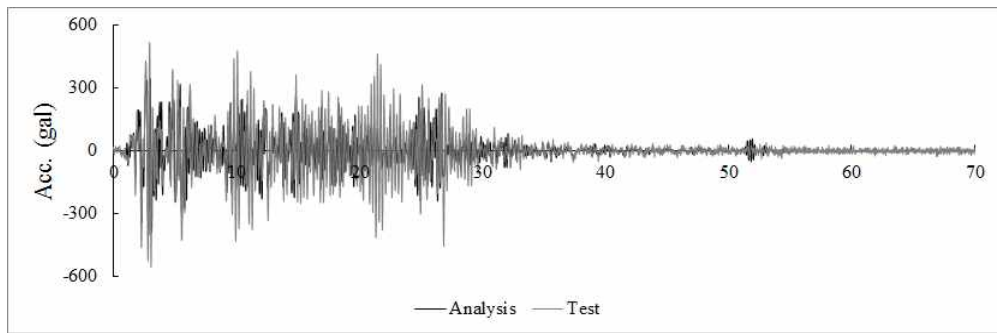
(a) 10%



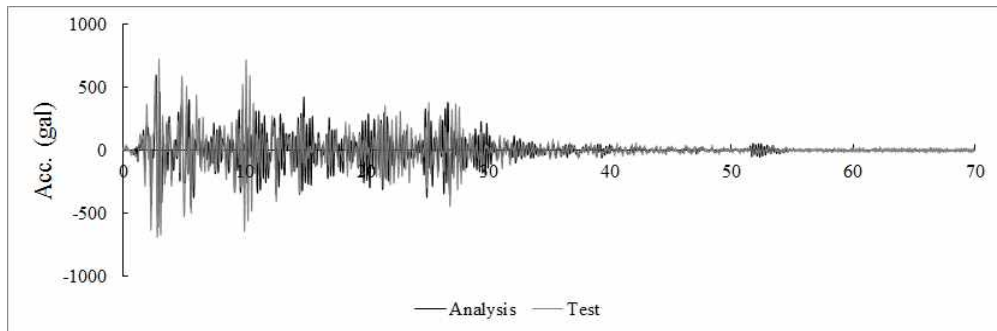
(b) 30%



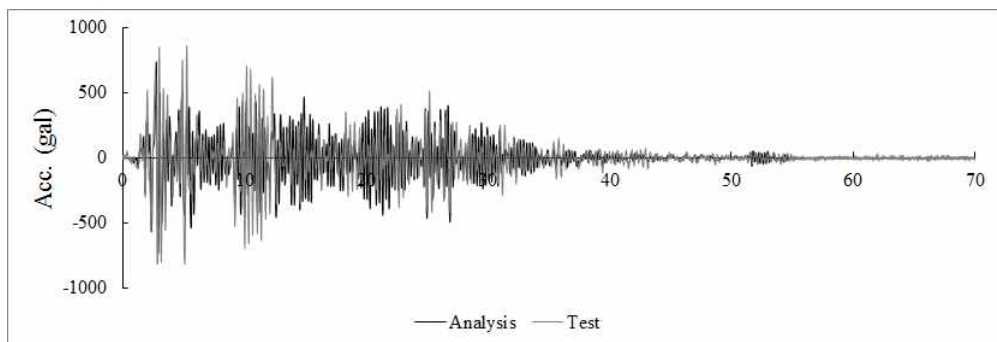
(c) 70%



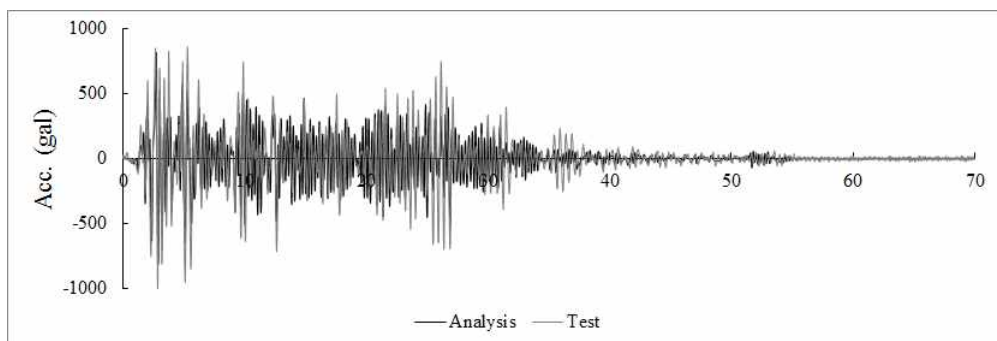
(d) 100%



(e) 130%

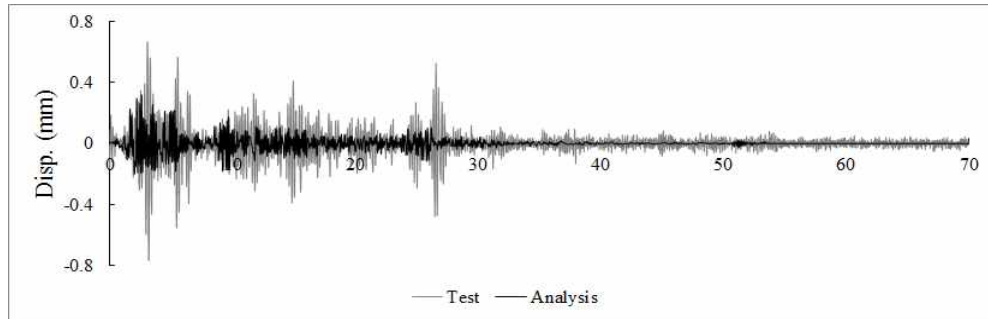


(f) 160%

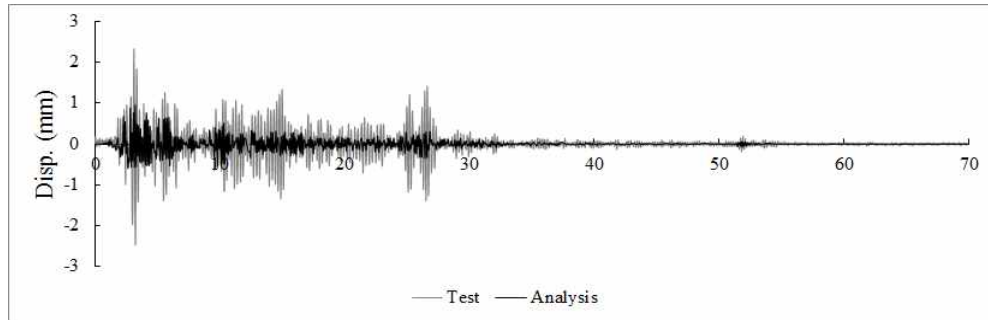


(g) 190%

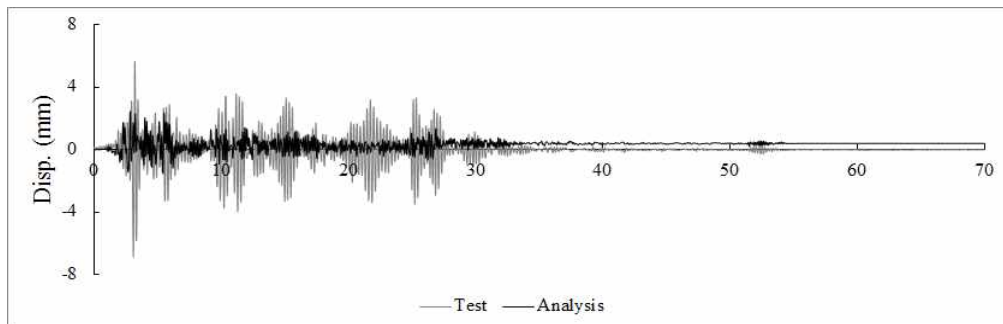
그림 3.96 상부가속도(RCMD0.0)



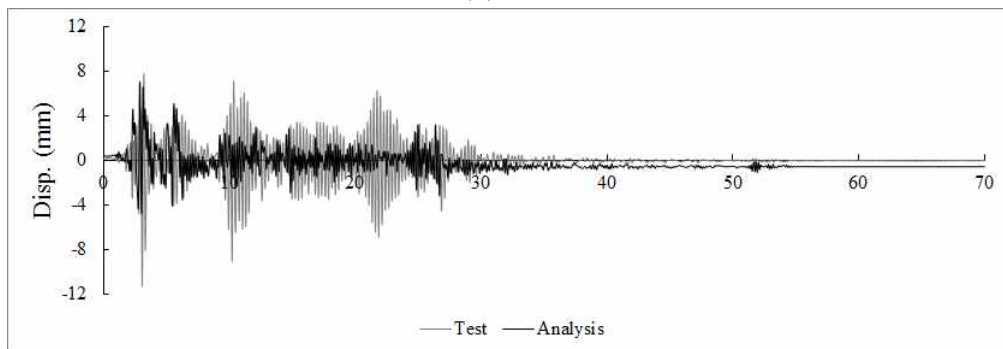
(a) 10%



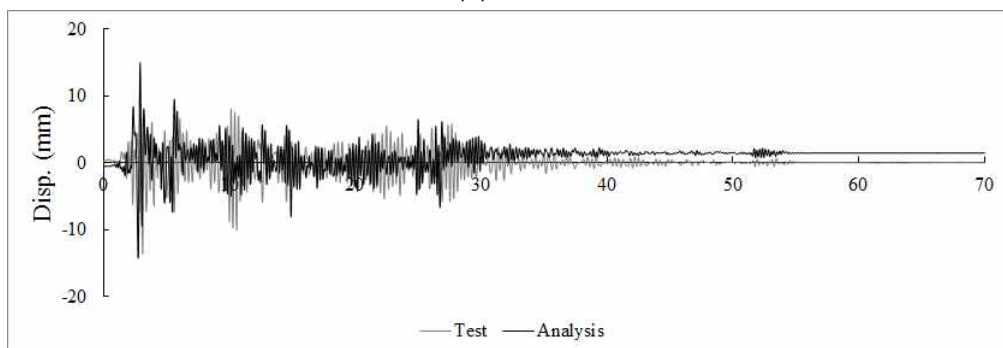
(b) 30%



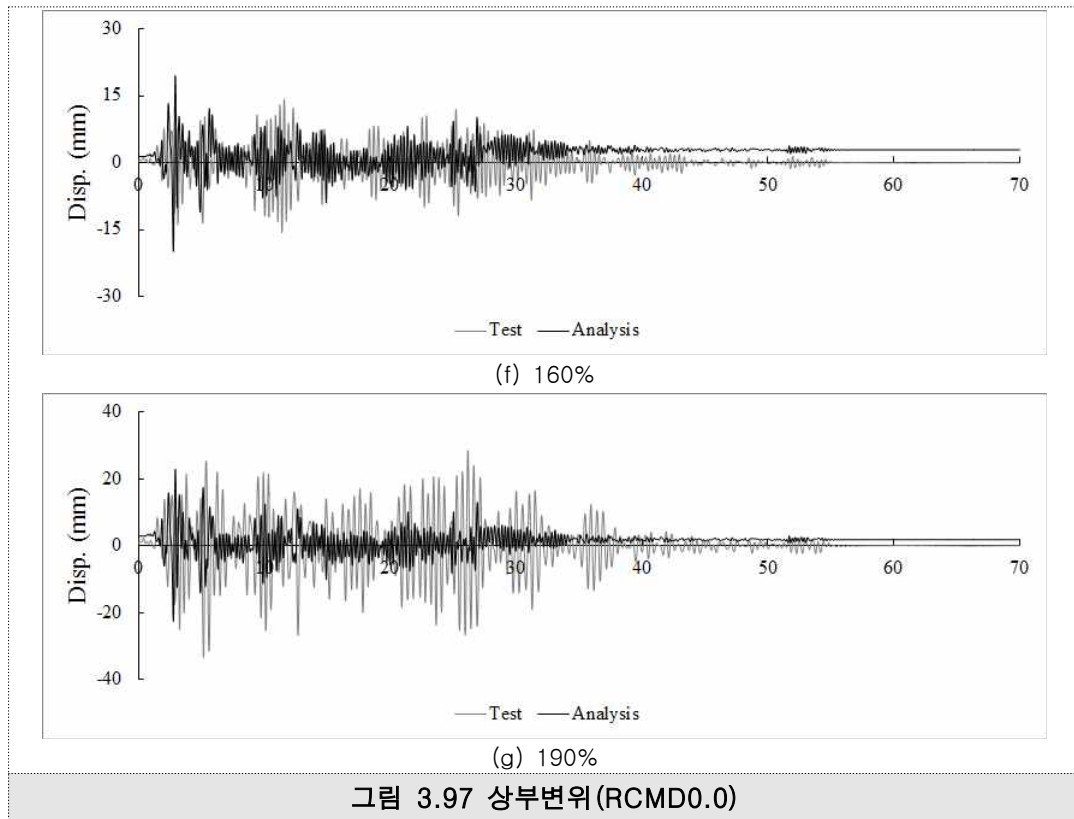
(c) 70%



(d) 100%



(e) 130%

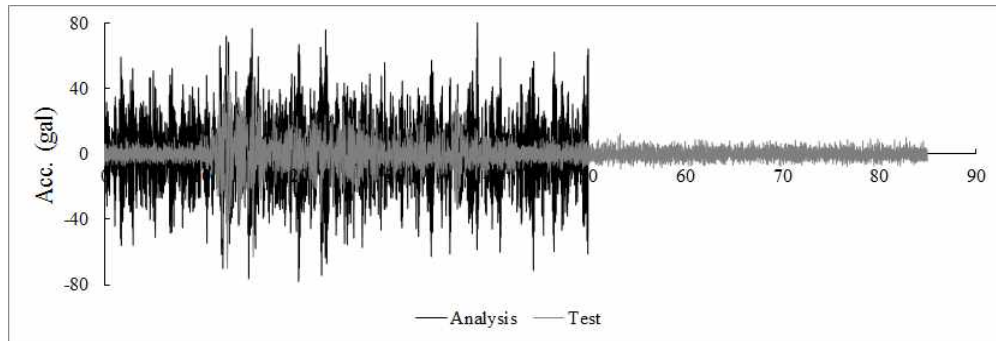


[전단파괴]

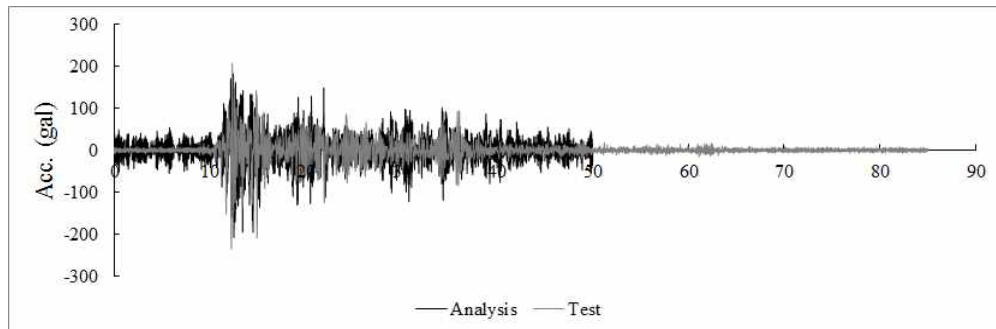
- 표 3.22 및 그림 3.98, 그림 3.99는 무손상 모델 RCSD0.0의 동적 지진응답해석에 의한 상부가속도 및 상부변위를 실험결과(시험체 RCS0)와 비교하여 나타낸 것임
- 상부가속도의 경우, 해석결과와 실험결과가 전반적으로 일치하는 것으로 나타난 반면에, 상부변위는 해석결과가 실험결과를 과소평가하는 것으로 나타났으나, 전반적으로 본 연구에 의한 해석모델 및 동적 지진응답해석방법은 시험체의 거동을 모사하는데 유효할 것으로 판단됨
- 최대 응답 : 표 3.22와 같이 전반적으로 실험결과가 해석결과보다 큰 것으로 나타났으며, 가진스케일이 커질수록 그 차이(가속도 : 최대 1.51배, 변위 : 최대 1.57배 (220%))가 커지는 것으로 나타남

표 3.22 실험결과와 해석결과의 최대 응답 비교(RCSD0.0)

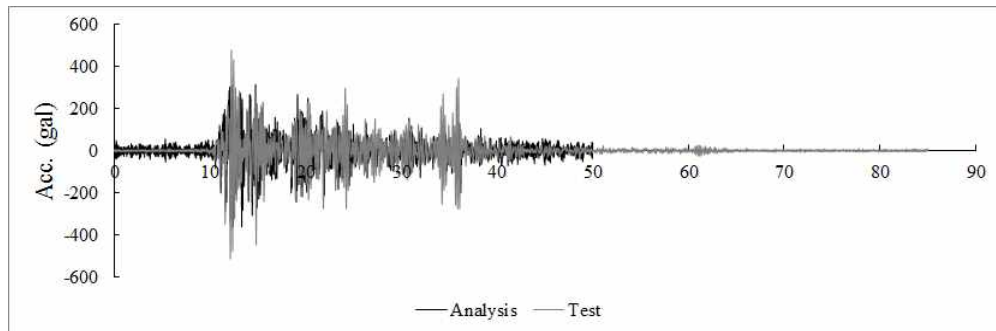
가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%	220%	250%
상부가속도 최대값(gal)	실험	70.0	235.4	514.4	769.5	1,085.5	1,279.9	1,539.9	2,137.7	2,750.7
	해석	82.5	208.1	363.0	606.6	821.8	1,016.5	1,207.6	1,412.9	1,354.7
상부변위 최대값(mm)	실험	0.22	1.49	5.35	10.50	19.90	31.50	44.51	55.97	93.75
	해석	0.44	1.24	3.95	11.08	16.84	22.22	28.33	37.89	137.84



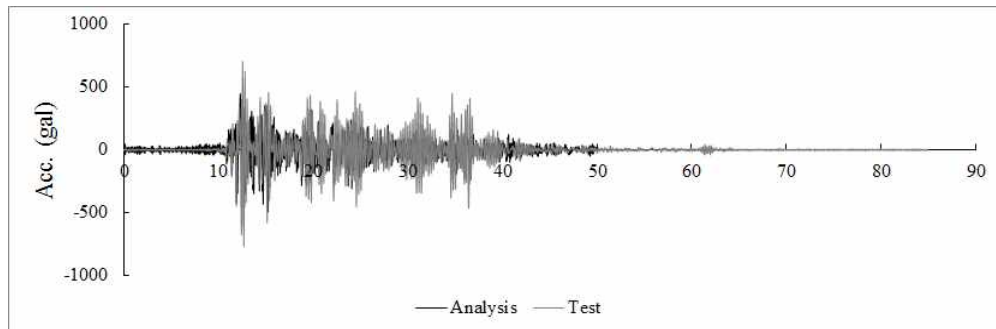
(a) 10%



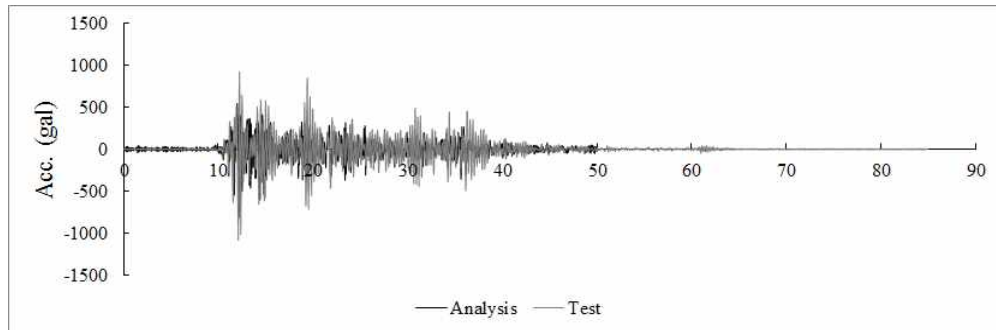
(b) 30%



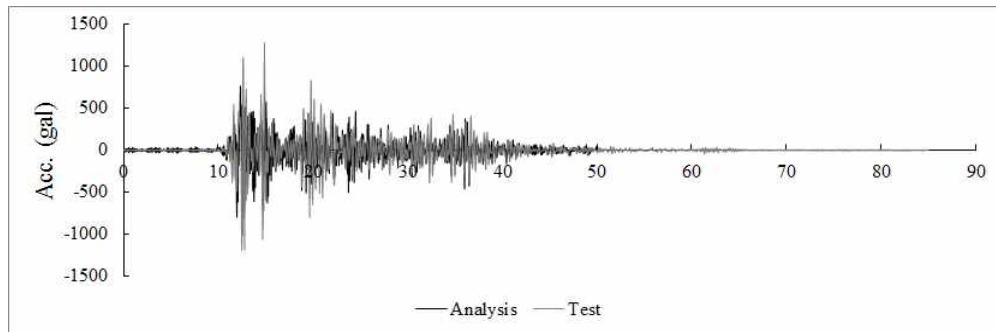
(c) 70%



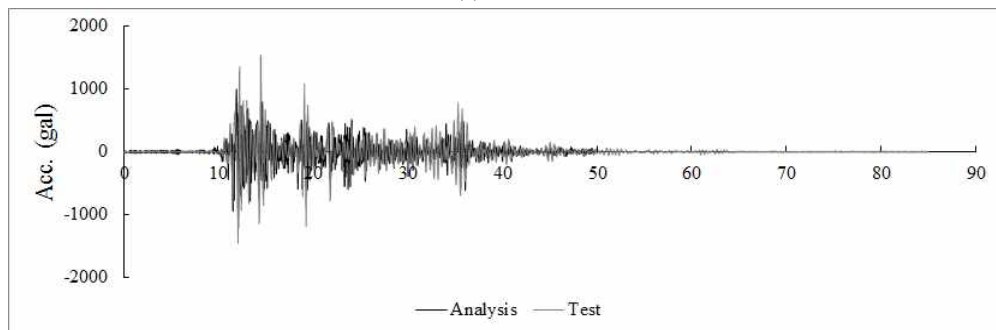
(d) 100%



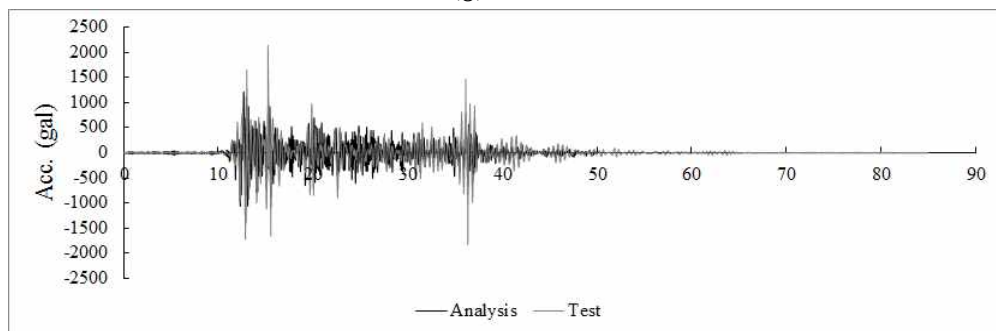
(e) 130%



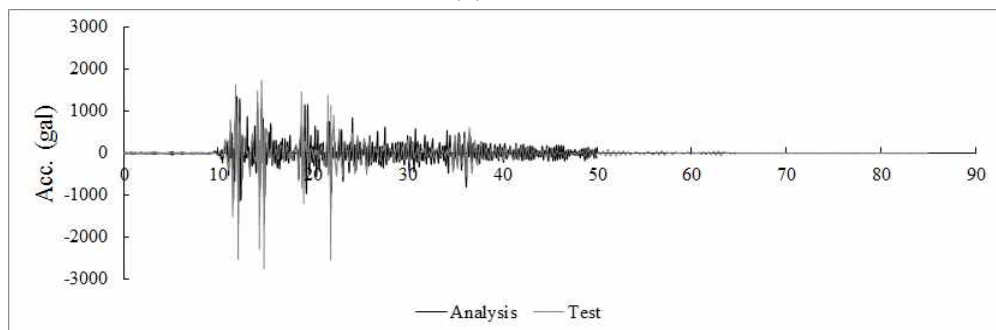
(f) 160%



(g) 190%

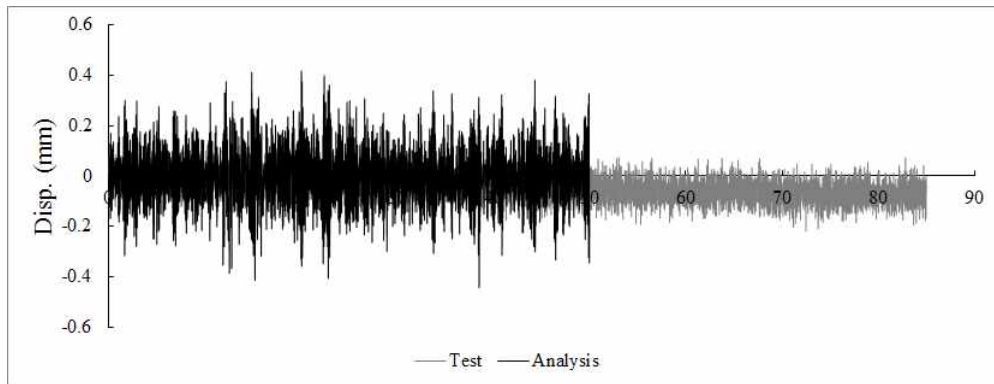


(h) 220%

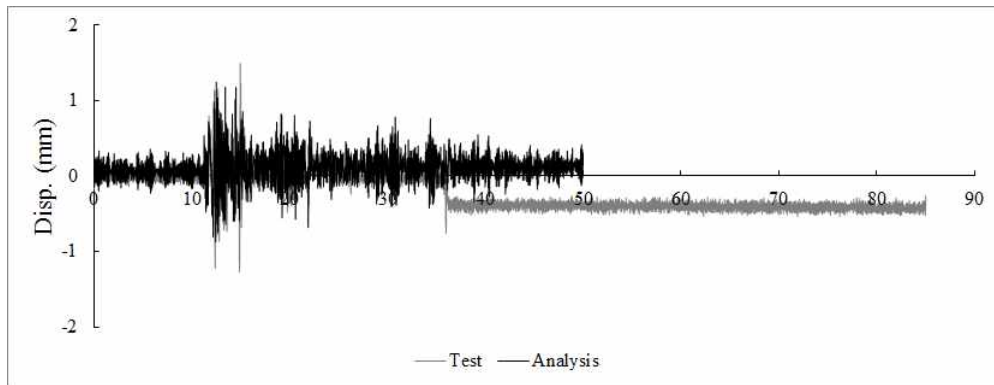


(i) 250%

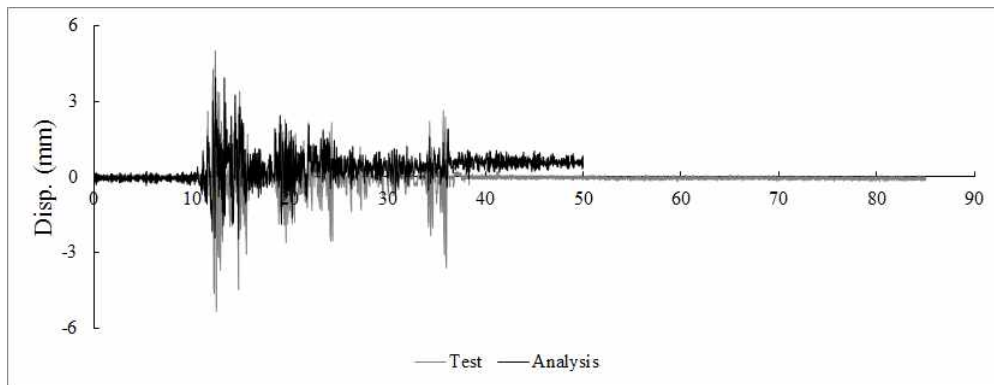
그림 3.98 상부가속도(RCSD0.0)



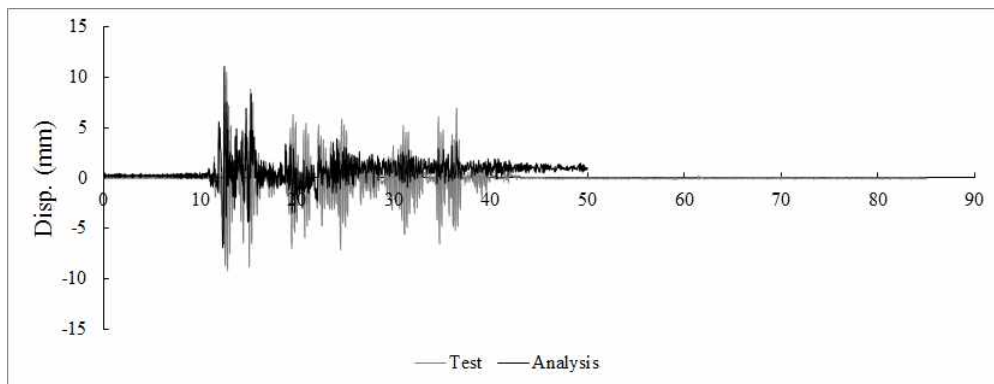
(a) 10%



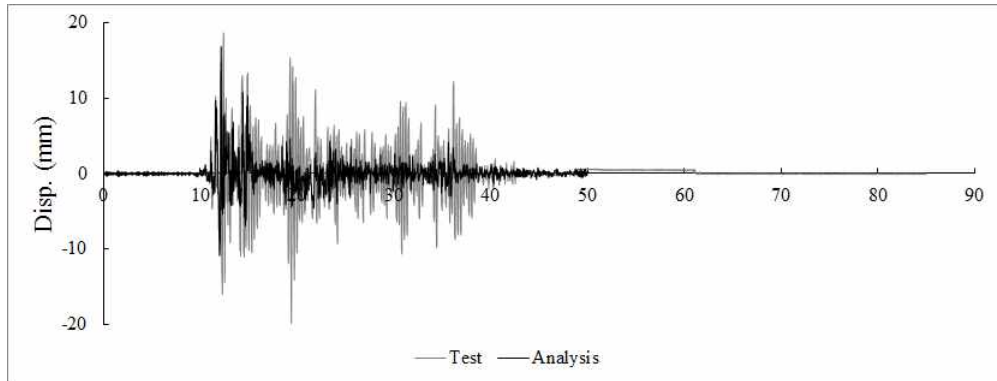
(b) 30%



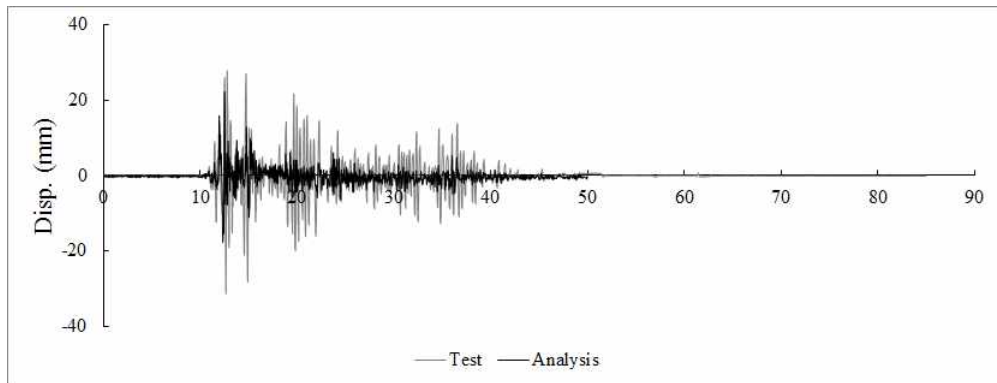
(c) 70%



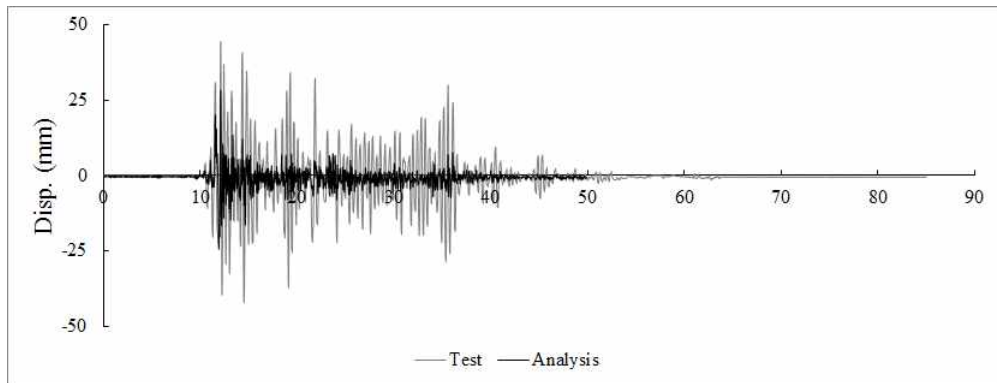
(d) 100%



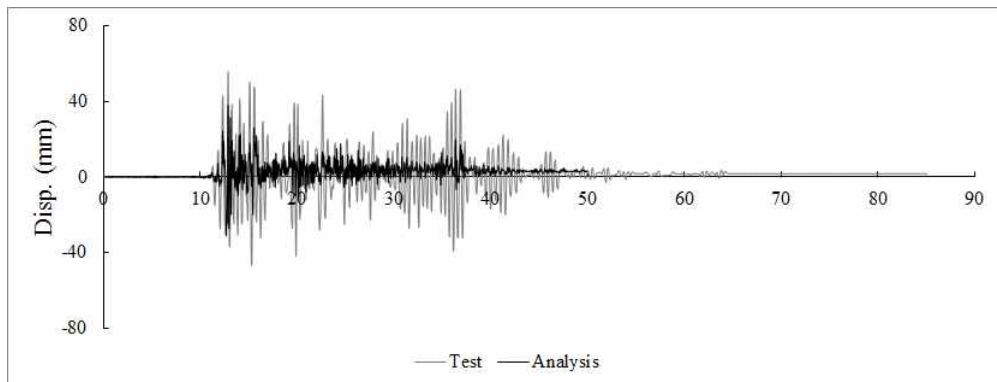
(e) 130%



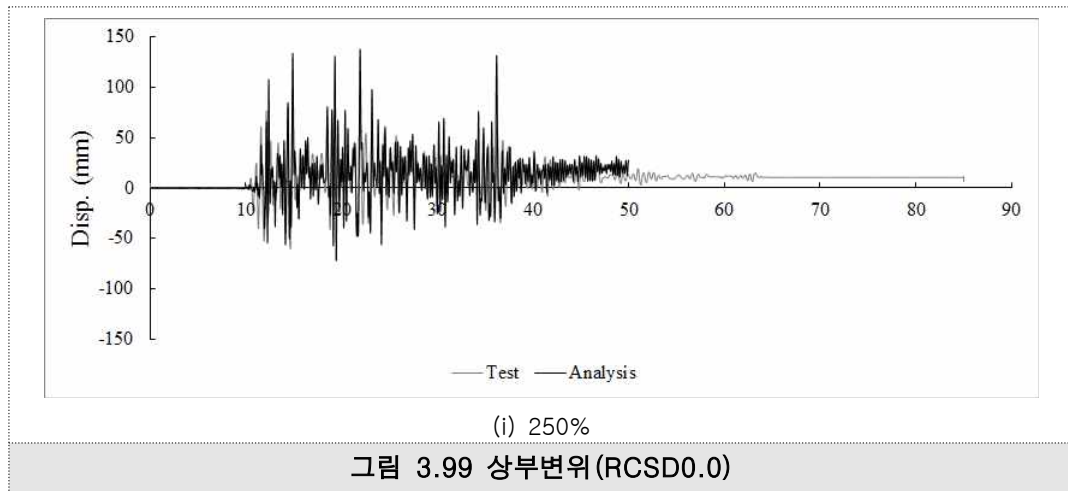
(f) 160%



(g) 190%



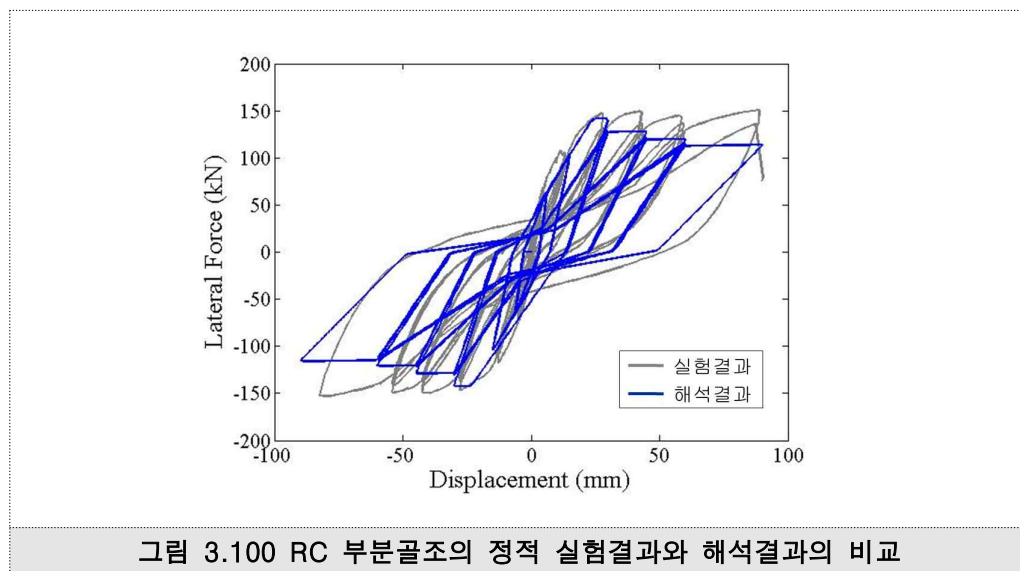
(h) 220%



(2) 정적 및 동적 해석

[침항복후 전단파괴]

- 그림 3.100은 RC 부분골조 시험체 RCM1의 정적 실험결과와 정적 지진응답해석결과에 의한 하중-변위관계를 나타낸 것으로, 실험결과와 해석결과는 전반적으로 좋은 대응을 보이는 것으로 나타나, 본 연구에 의한 정적 지진응답해석방법은 실제 RC 부분골조의 이력거동을 모사하는데 적절한 것으로 판단됨



- 표 3.23, 표 3.24 및 그림 3.101 ~ 그림 3.104는 각각 손상 모델인 RCMD1.0과 RCMD1.5의 정적 및 동적 지진응답해석에 의한 상부가속도 및 상부변위를 실험결과(시험체 RCM2 및 시험체 RCM3)와 비교하여 나타낸 것임
- 상부가속도의 경우, 해석결과와 실험결과가 전반적으로 일치하는 것으로 나타난 반면에, 상부변위는 해석결과가 실험결과를 과소평가하는 것으로 나타났으나, 전반적으로 본 연구에 의한 해석모델 및 해석방법은 시험체의 거동을 모사하는데 유효할 것으로 판단됨.
 - 상부변위 시간이력 : 가진 스케일 10%와 30%에 의한 상부변위의 경우, 정적해석에 의한 잔류 변위(13.31 mm, 층간변형각 0.44%)의 영향으로 해석 도중에 변위가 크게 이동하는 경향을 보

이지만, 이후 가진 스케일에서는 잔류 변위의 영향이 적어지면서 실험결과와 유사한 시간이력패턴을 보임

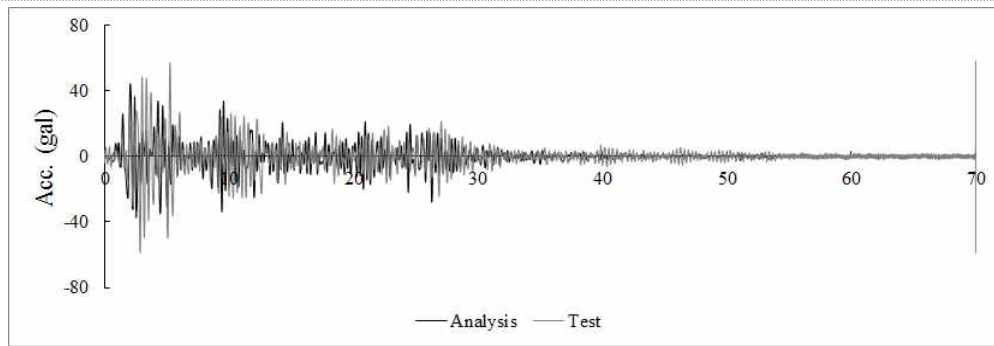
- 최대 상부변위(RCMD1.0) : 표 3.23과 같이 무손상인 경우와 달리, 가진 스케일이 상대적으로 작은 범위에서는 해석결과에 의한 최대 상부변위가 정적해석에 의한 잔류 변위의 영향으로 실험 결과에 의한 최대 상부변위보다 큰 것으로 나타났으나, 가진 스케일이 커짐에 따라 해석결과에 의한 최대 상부변위는 실험결과에 의한 최대 상부변위 보다 작은 것으로 나타남.
- 최대 상부변위(RCMD1.5) : 표 3.24와 같이 무손상인 경우와 달리, 가진 스케일이 상대적으로 작은 범위에서는 해석결과에 의한 최대 상부변위가 정적해석에 의한 잔류 변위의 영향으로 실험 결과에 의한 최대 상부변위보다 큰 것으로 나타난 반면, 가진 스케일이 커짐에 따라 해석결과에 의한 최대 상부변위는 손상 모델 RCMD1.0과 달리 실험결과에 의한 최대 상부변위와 유사 혹은 커지는 것으로 나타남

표 3.23 실험결과와 해석결과의 최대 응답 비교(RCMD1.0)

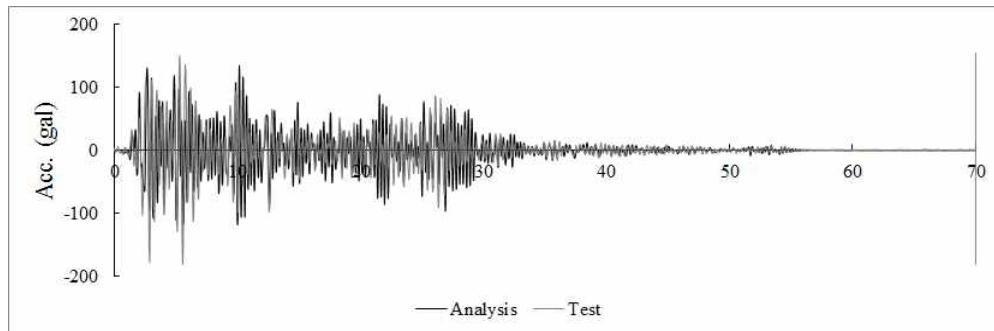
가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%
상부가속도 최대값(gal)	실험	58.7	181.3	592.1	784.30	916.4
	해석	70.4	134.7	305.2	460.2	642.3
상부변위 최대값(mm)	실험	2.13	8.23	21.95	30.77	40.52
	해석	3.95	11.51	10.64	16.94	25.50

표 3.24 실험결과와 해석결과의 최대 응답 비교(RCMD1.5)

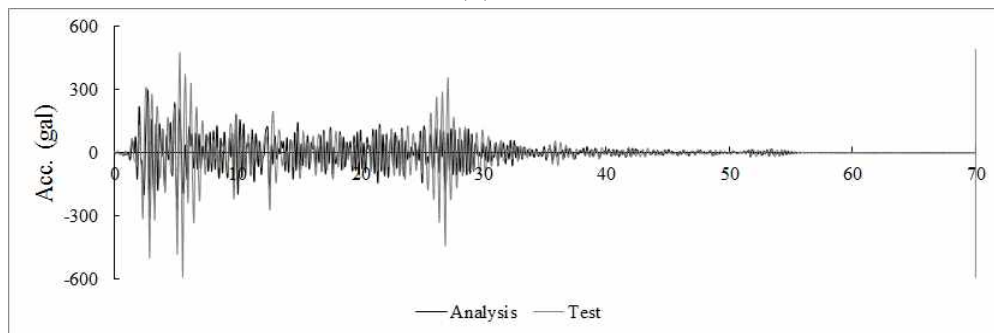
가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%
상부가속도 최대값(gal)	실험	57.7	206.7	535.4	737.1	796.3
	해석	112.9	171.5	353.5	588.5	686.3
상부변위 최대값(mm)	실험	2.56	14.05	31.18	40.12	50.62
	해석	7.32	17.94	19.95	36.17	57.42



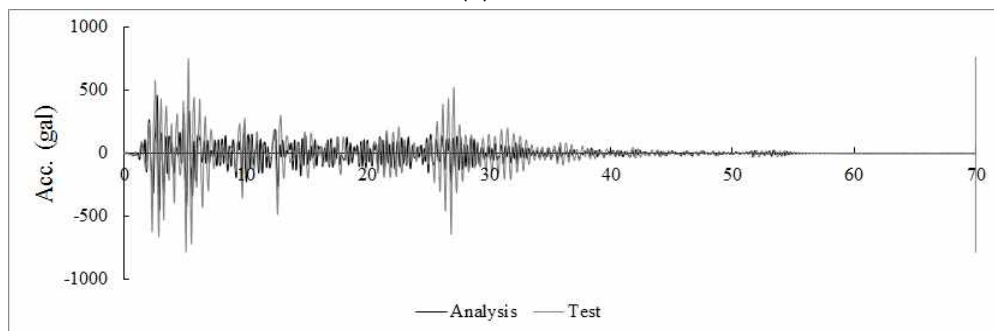
(a) 10%



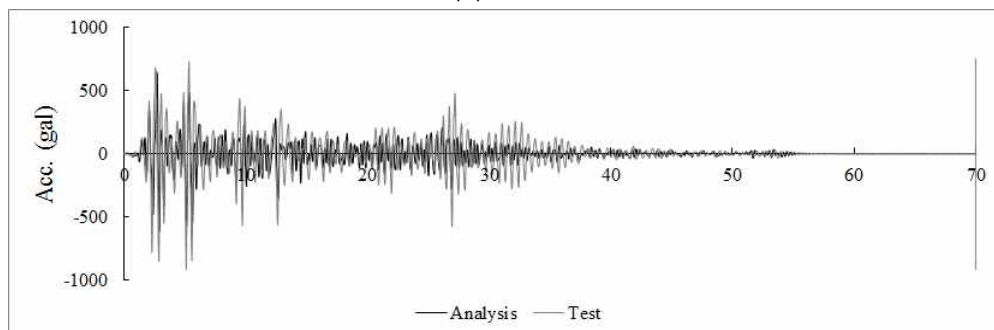
(b) 30%



(c) 70%

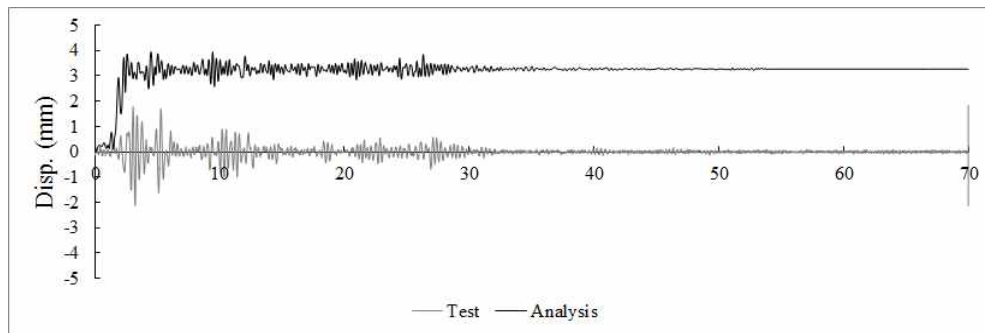


(d) 100%

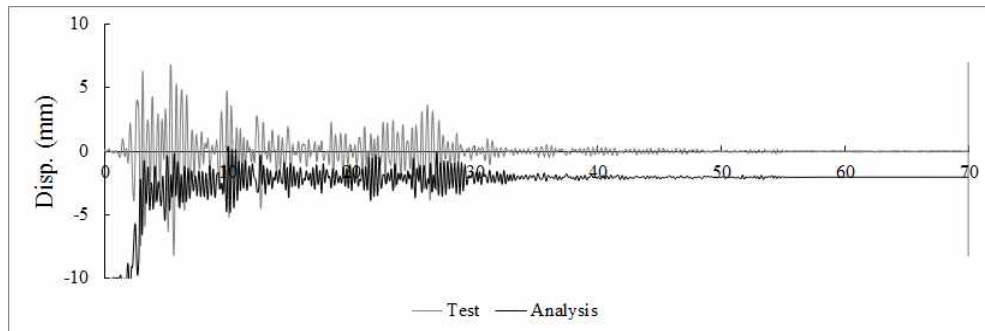


(e) 130%

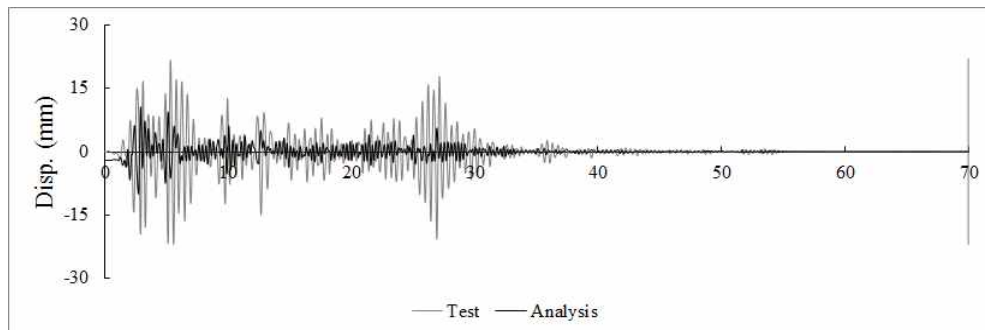
그림 3.101 상부가속도(RCMD1.0)



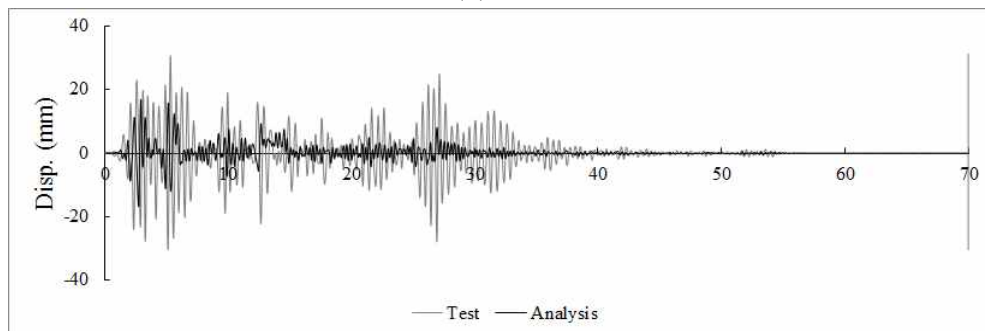
(a) 10%



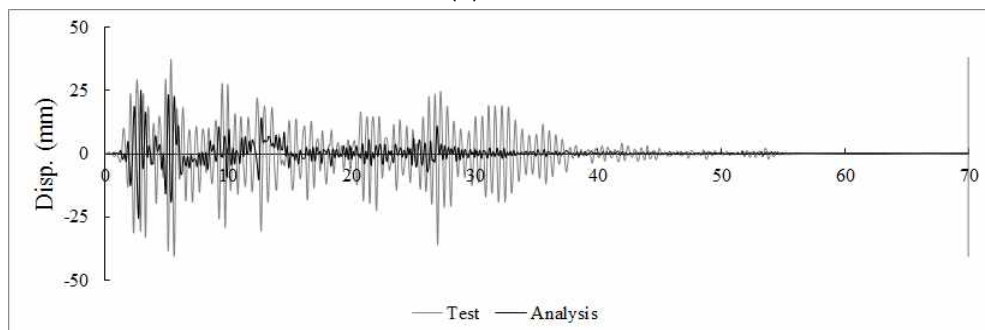
(b) 30%



(c) 70%

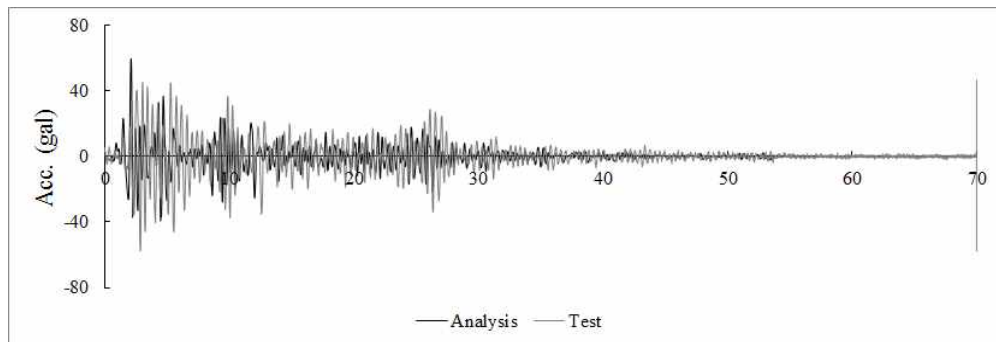


(d) 100%

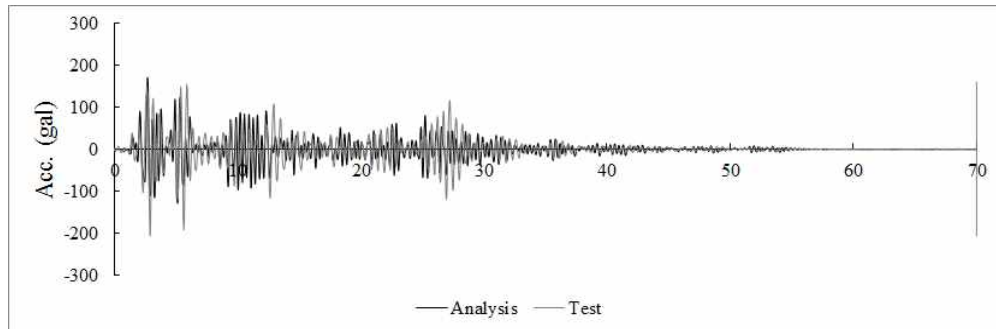


(e) 130%

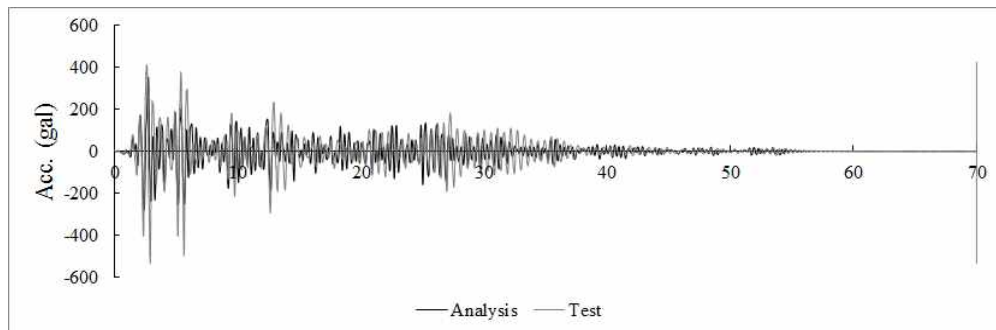
그림 3.102 상부변위(RCMD1.0)



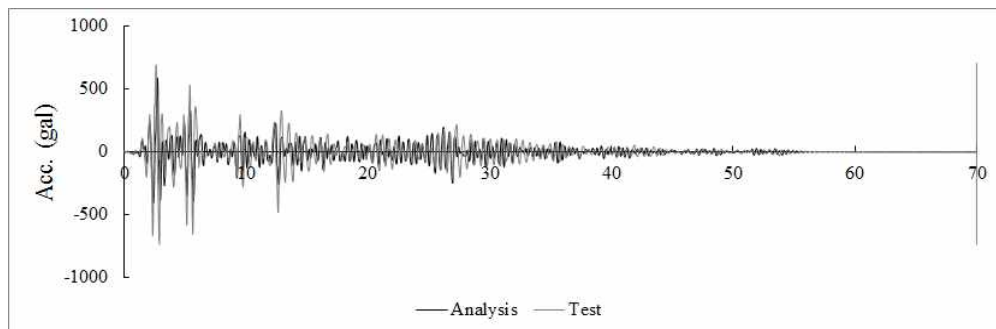
(a) 10%



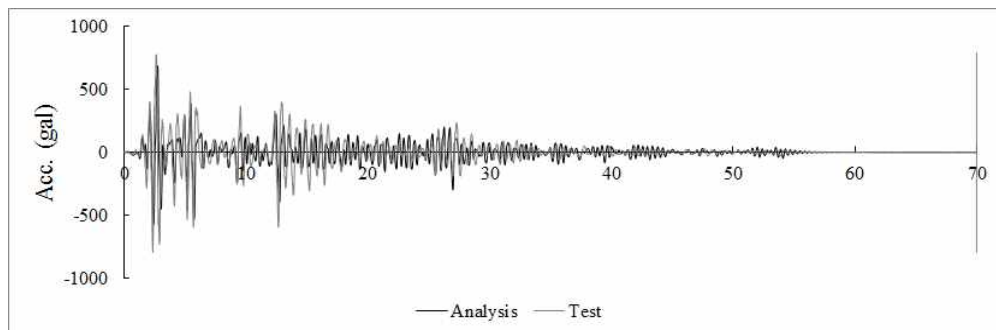
(b) 30%



(c) 70%

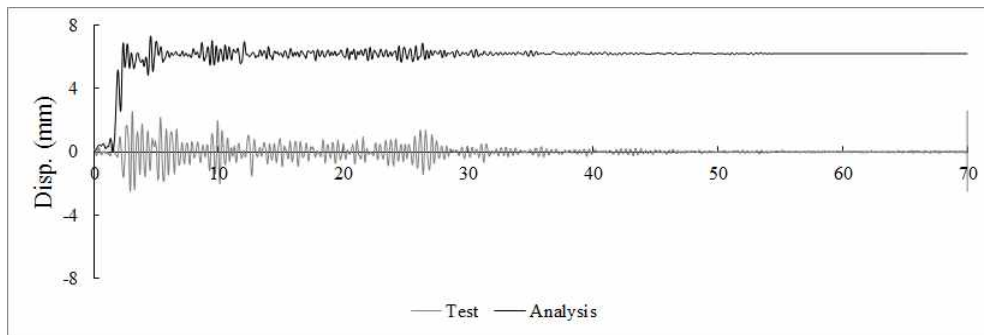


(d) 100%

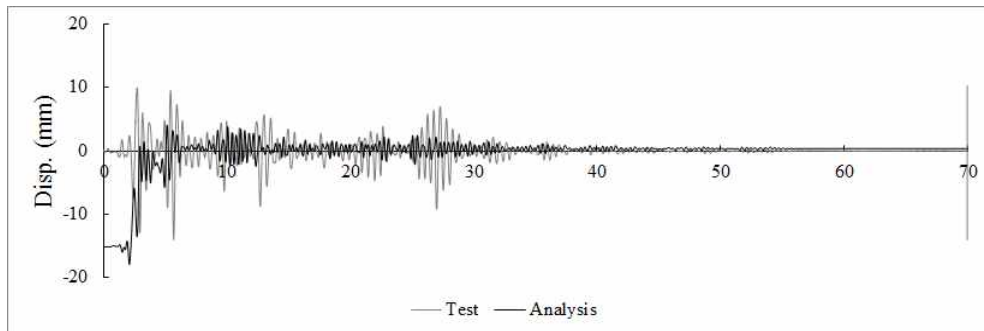


(e) 130%

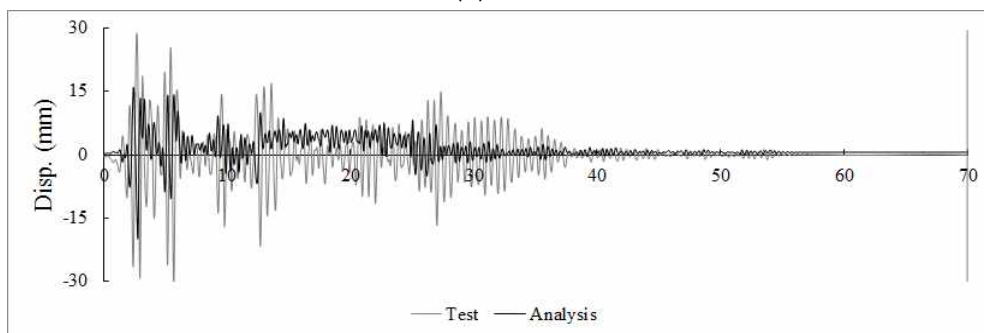
그림 3.103 상부가속도(RCMD1.5)



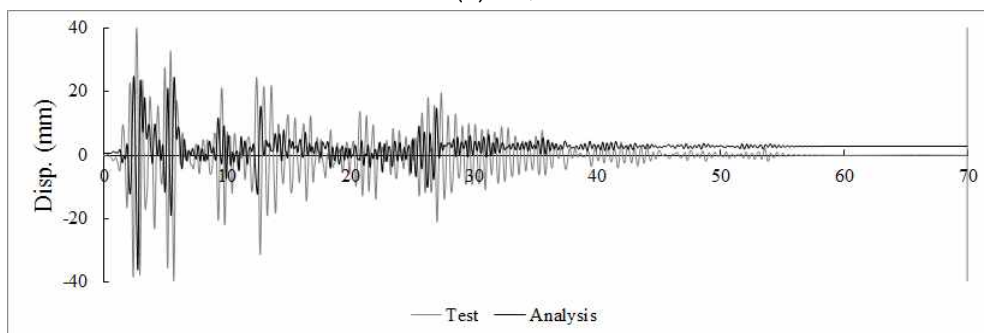
(a) 10%



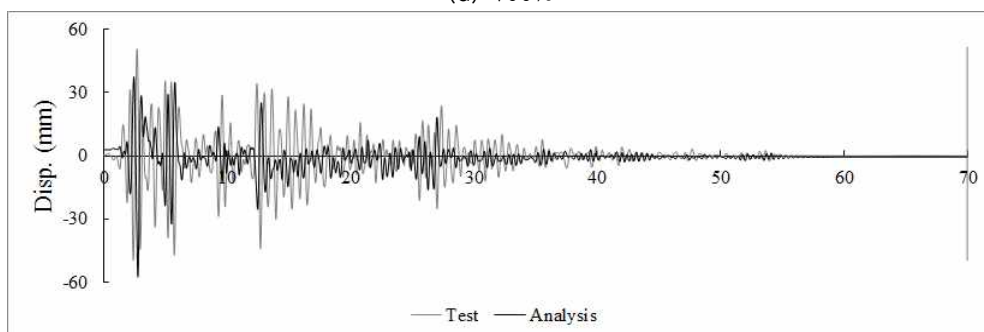
(b) 30%



(c) 70%



(d) 100%

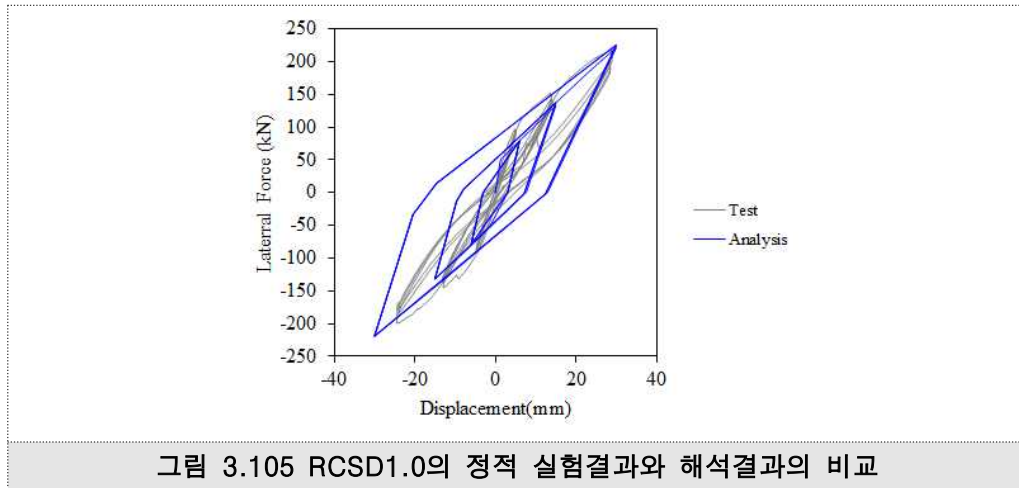


(e) 130%

그림 3.104 상부변위(RCMD1.5)

[전단파괴]

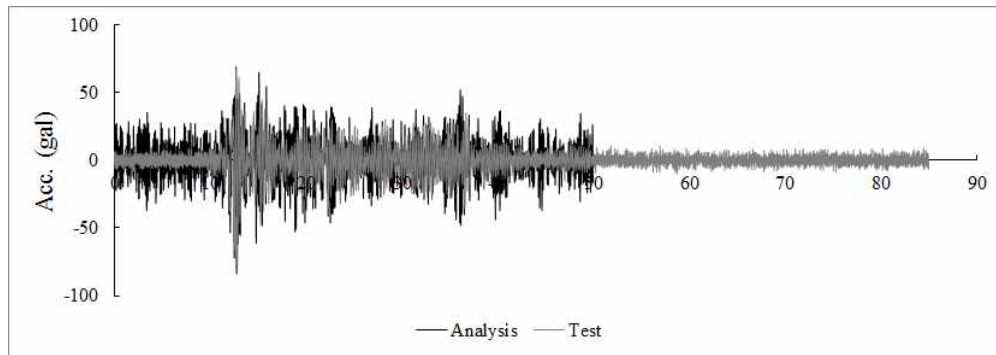
- 그림 3.105는 RC 부분골조 시험체 RCS1의 정적 실험결과와 정적 지진응답해석결과에 의한 하중-변위관계를 나타낸 것으로, 해석결과는 그림 3.91의 기동 휨스프링 복원력특성에 의한 영향으로 실험결과 보다 에너지흡수능력이 큰 형태를 보이고 있으나, 재하 및 제하 강성, 싸이클별 최대 하중 등이 전반적으로 좋은 대응을 보이는 것으로 나타나, 본 연구에 의한 해석모델 및 정적 지진응답해석방법은 실제 RC 부분골조의 이력거동을 모사하는데 적절한 것으로 판단됨



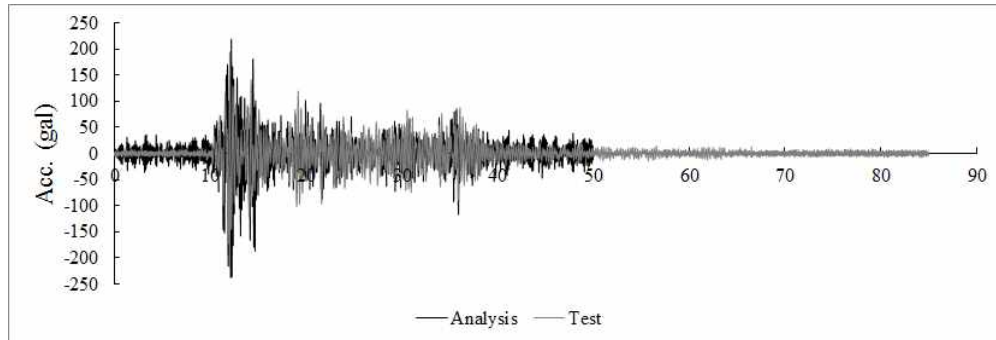
- 표 3.25 및 그림 3.106, 그림 3.107은 손상 모델인 RCSD1.0의 정적 및 동적 지진응답해석에 의한 상부가속도 및 상부변위를 실험결과(시험체 RCS1)와 비교하여 나타낸 것임
- 상부가속도의 경우, 해석결과에 의한 시간이력은 실험결과와 유사한 패턴을 보인 반면에, 상부변위는 해석결과가 실험결과를 과소평가하는 것으로 나타났으나, 전반적으로 본 연구에 의한 해석모델 및 해석방법은 시험체의 거동을 모사하는데 유효할 것으로 판단됨
 - 상부변위 시간이력 : 가진 스케일 10% ~ 70%에 의한 상부변위의 경우, 정적해석에 의한 잔류 변위에 의한 영향으로 해석 중간에 변위가 크게 이동하는 경향을 보임. 이후 가진 스케일에서는 잔류 변위의 영향이 적어지면서 실험결과와 유사한 시간이력패턴을 보임
 - 최대 응답 : 표 3.25와 같이 무손상인 경우와 달리, 가진 스케일이 상대적으로 작은 범위에서는 해석결과에 의한 최대 응답이 정적해석에 의한 잔류 변위의 영향으로 실험결과에 의한 최대 응답 보다 큰 것으로 나타났으나, 가진 스케일이 커짐에 따라 해석결과에 의한 최대 응답은 실험결과에 의한 최대 응답보다 작아지는 것으로 나타남

표 3.25 실험결과와 해석결과의 최대 응답 비교(RCSD1.0)

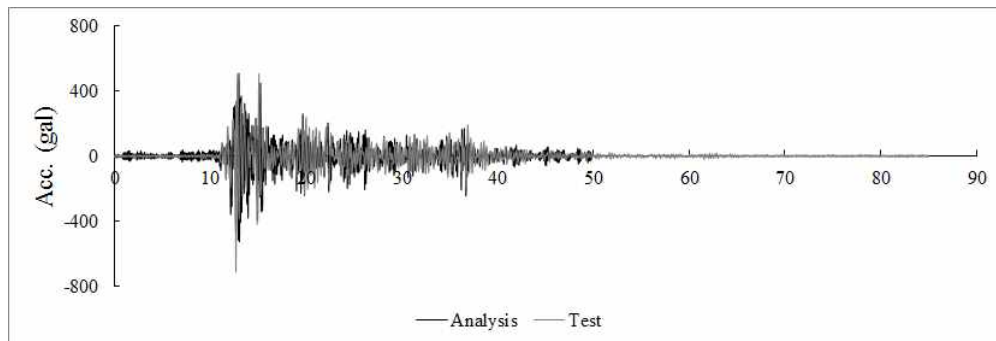
가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%	220%
상부가속도 최대값(gal)	실험	77.9	194.7	716.9	789.5	1,042.5	1,426.1	1,568.5	51,662.9
	해석	91.2	237.8	527.3	731.7	880.8	1,135.4	1,116.7	1,404.4
상부변위 최대값(mm)	실험	1.28	5.96	17.39	25.11	32.90	39.38	45.22	58.82
	해석	2.11	6.92	14.38	15.75	20.11	31.59	26.88	39.11



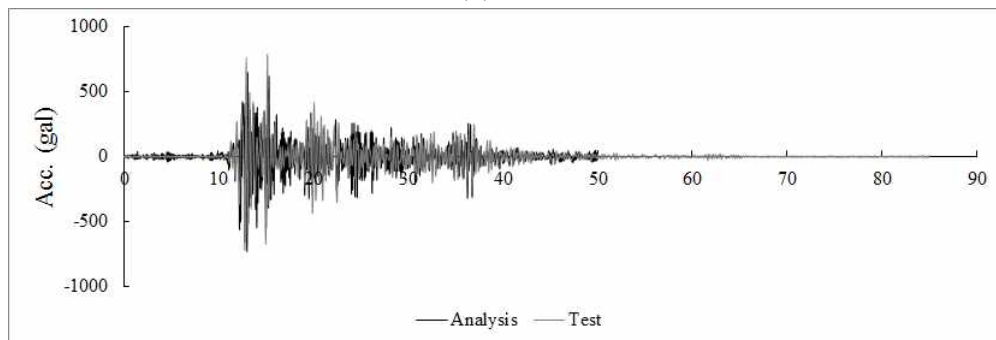
(a) 10%



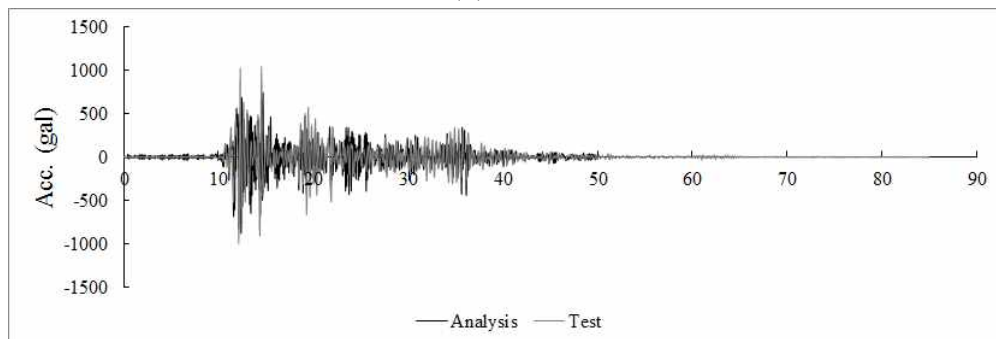
(b) 30%



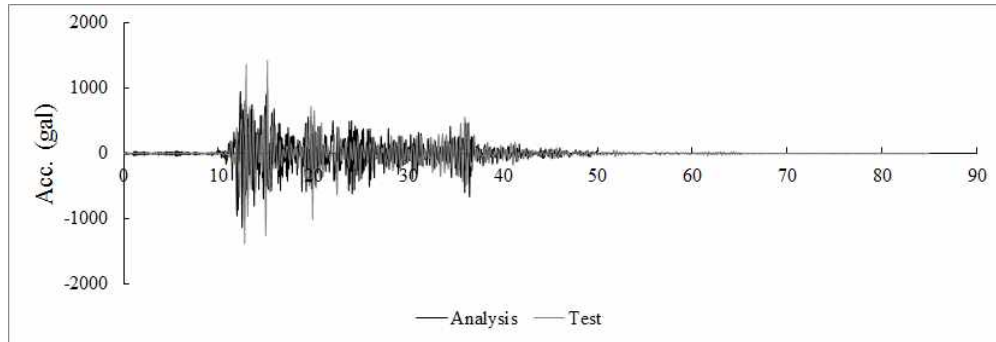
(c) 70%



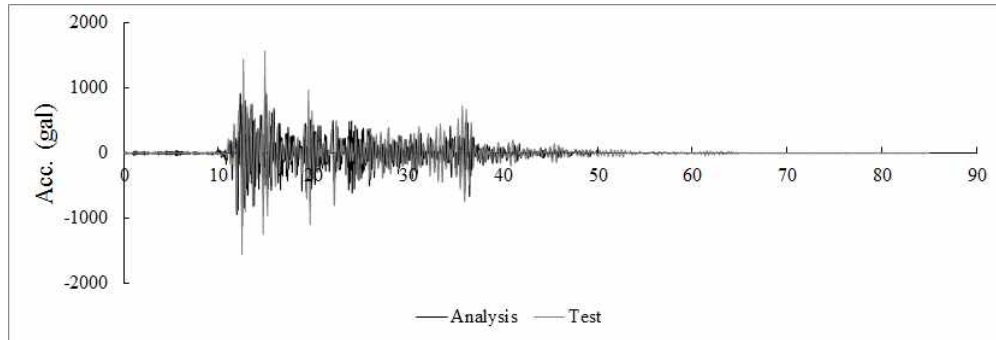
(d) 100%



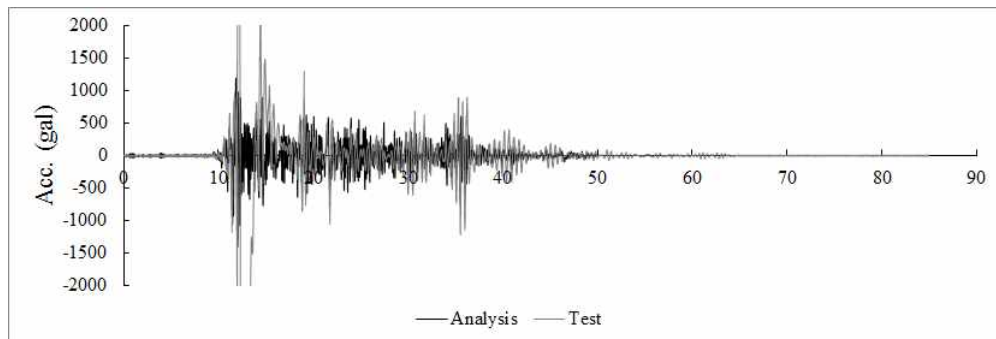
(e) 130%



(f) 160%

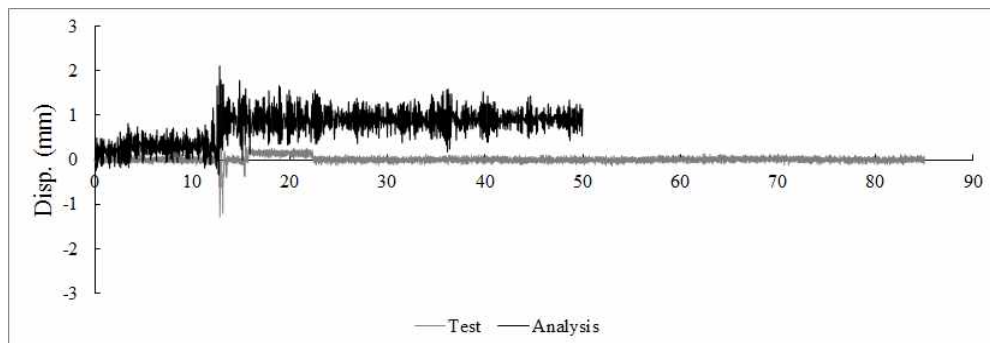


(g) 190%

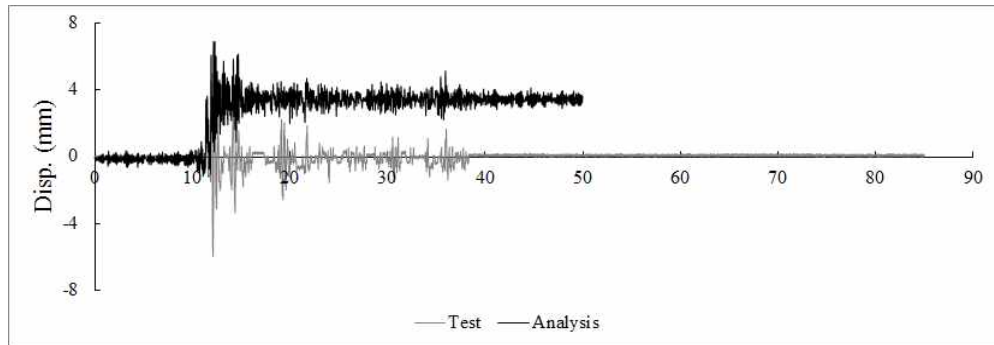


(h) 220%

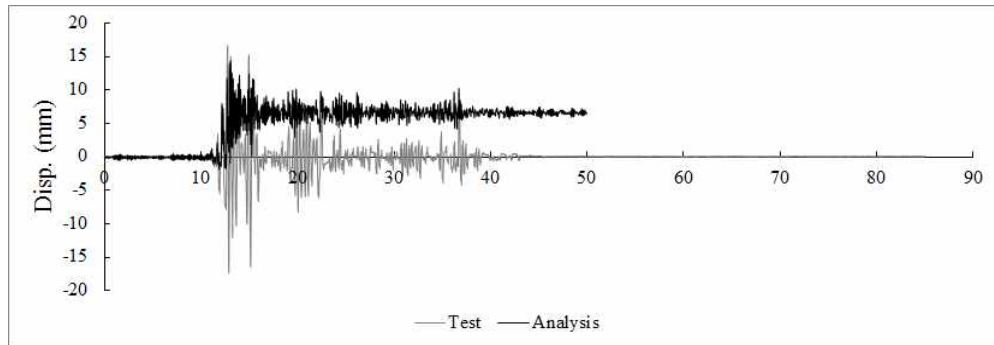
그림 3.106 상부가속도(RCSD1.0)



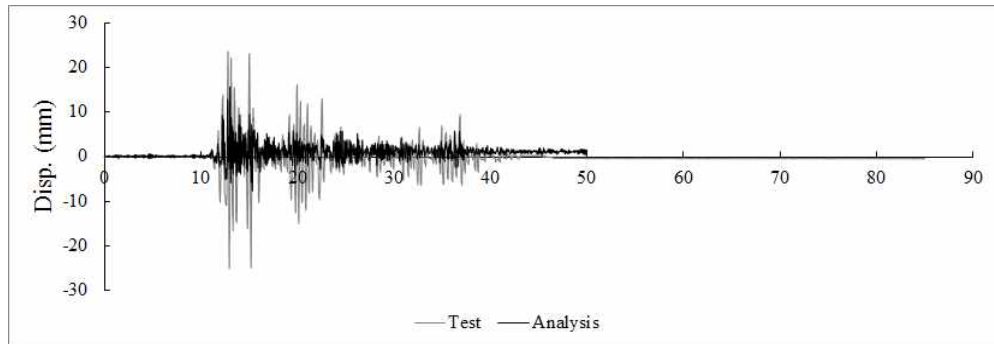
(a) 10%



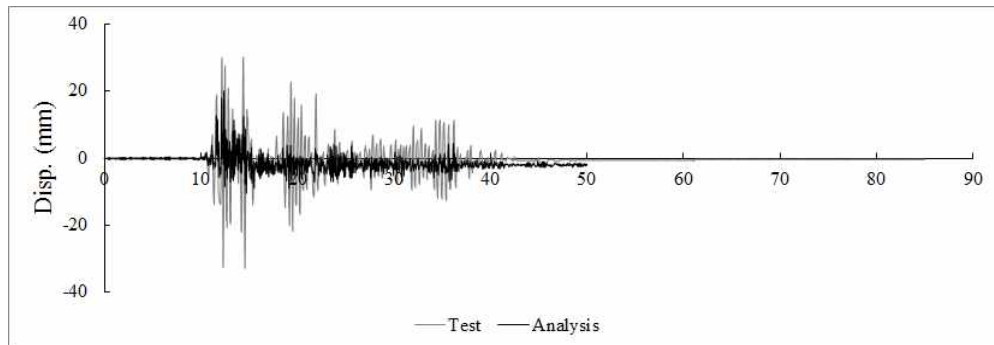
(b) 30%



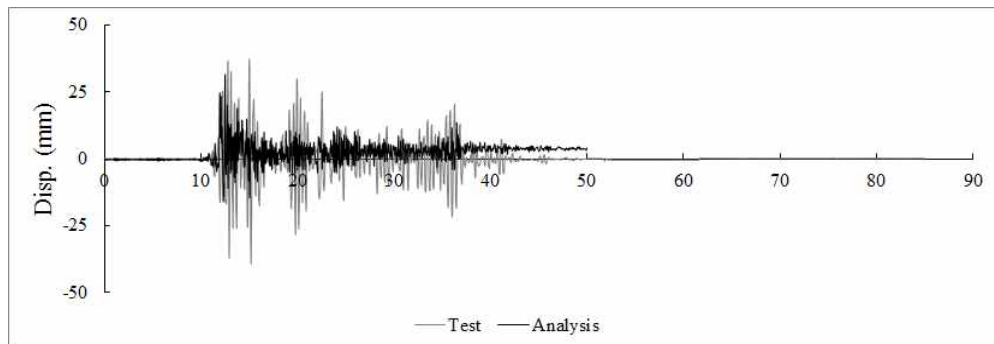
(c) 70%



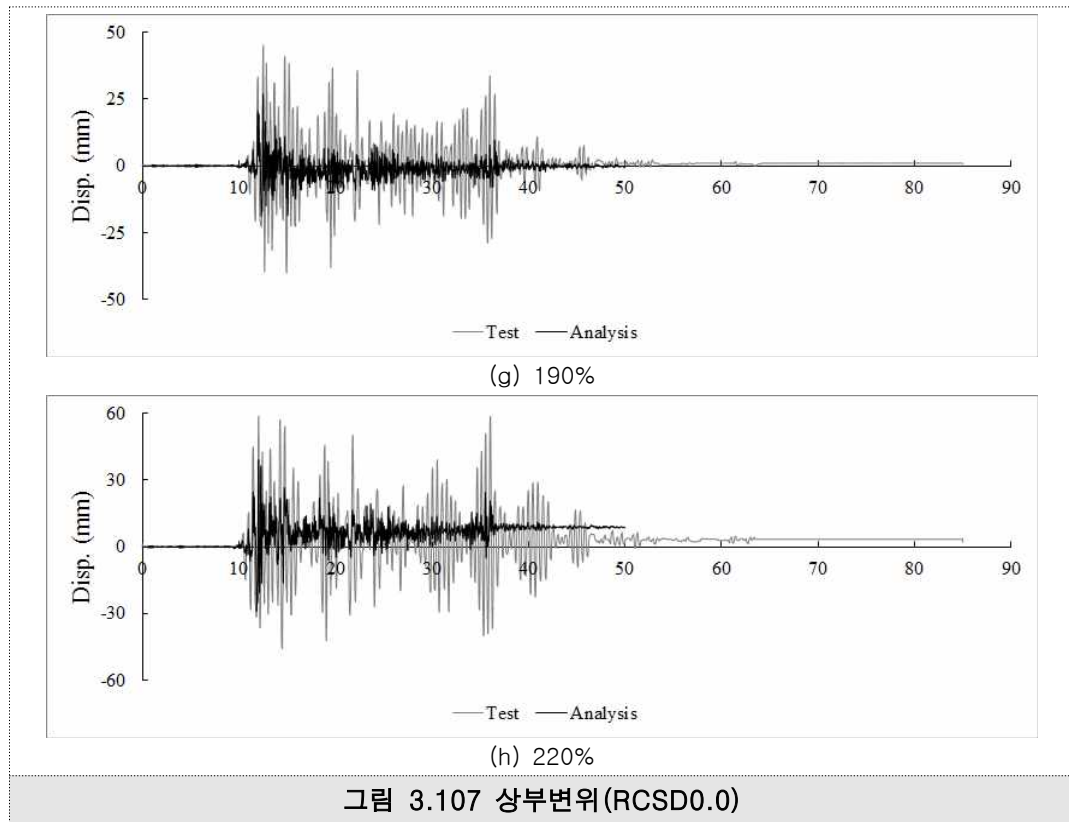
(d) 100%



(e) 130%

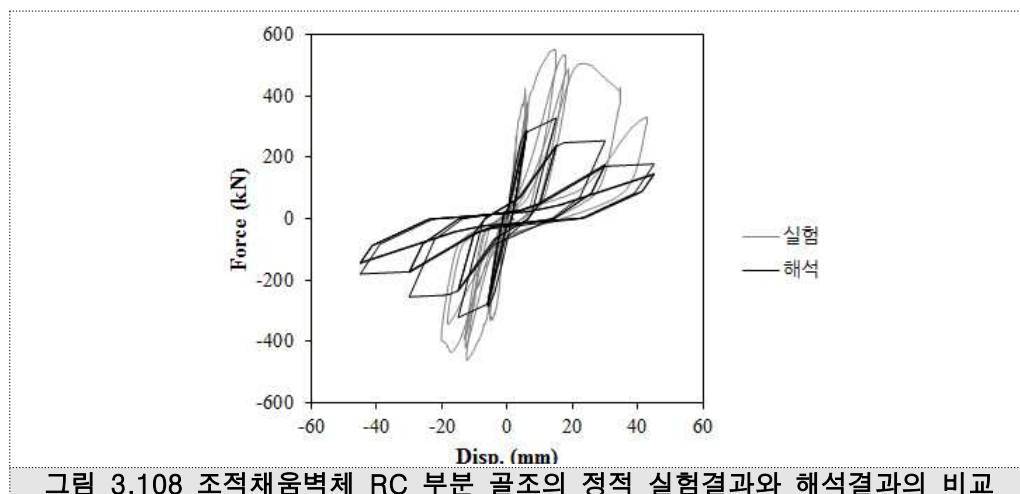


(f) 160%



[조적채움벽체(정적실험)]

- 그림 3.108은 RC 조적채움벽 부분골조 시험체 RCMW의 정적 실험결과와 정적 지진응답해석결과에 의한 하중-변위관계를 나타낸 것으로, 해석에 의한 골격곡선은 실험에 의한 골격곡선보다 작은 것으로 나타났으나, 해석에 의한 이력거동은 전반적으로 실험에 의한 이력거동과 좋은 대응을 보이는 것으로 나타나, 본 연구에 의한 정적 지진응답해석방법은 실제 RC 부분골조의 이력거동을 모사하는데 적절한 것으로 판단됨
- 실험의 경우, 조적채움벽체 제작 당시 벽체 사이에 몰탈을 밀실, 단단하게 채웠기 때문에 계산 결과보다 하중이 크게 발생한 것으로 판단되어짐
 - 또한, 조적채움벽체의 경우, 파괴형태, 시공방법 등 다양한 조건을 반영한 내력계산식이 부족한 실정으로 정확한 내력 예측이 어려운 실정임



마. 해석 결과

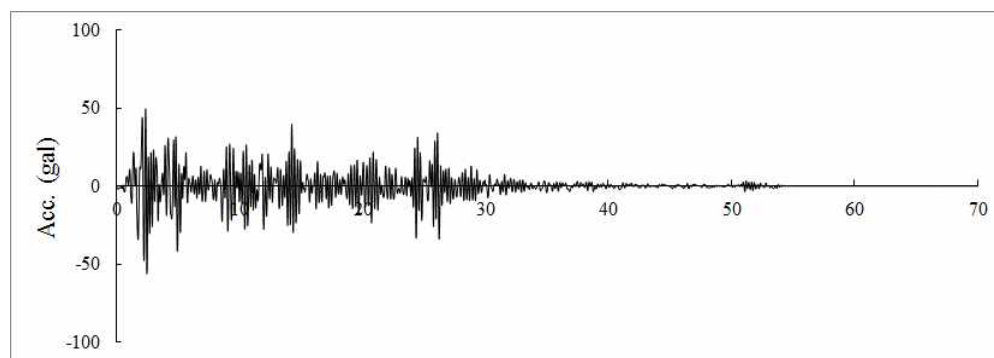
(1) 휨항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC 골조

- 표 3.26은 손상모델 RCMD0.5 및 RCMD2.0의 상부 최대 응답값을, 그림 3.109 및 그림 3.120은 손상모델 RCMD0.5 및 RCMD2.0의 상부 응답 가속도를, 그림 3.121 및 그림 3.122는 손상모델 RCMD0.5 및 RCMD2.0의 상부 응답 변위를 나타냄
- 가속도 응답 : 동적 지진응답해석 전 손상이 클수록 가진스케일이 작은 구간에서는 가속도 응답이 큰 반면, 가진스케일이 커질수록(가진스케일 130%) 가속도 응답은 작아지는 것으로 나타남
- 변위 응답 : 동적 지진응답해석 전 손상이 클수록 변위 응답은 커지며, 최대 응답값은 가진스케일에 상관없이 약 5배 정도 차이가 나는 것으로 나타남

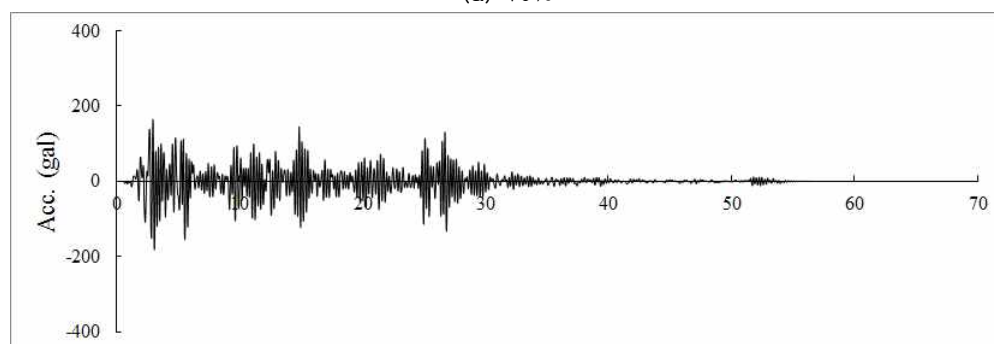
표 3.26 최대 응답값(RCMD 모델)

가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%
상부가속도 최대값(gal)	RCMD0.5	56.3	182.3	368.3	462.7	608.3	739.3	813.7
	RCMD2.0	155.2	210.4	390.6	597.0	641.6	614.6	572.9
상부변위 최대값(mm)	RCMD0.5	1.93	5.23	9.08	9.21	15.18	21.20	25.5
	RCMD2.0	10.10	29.28	33.49	58.13	83.42	110.35	124.43

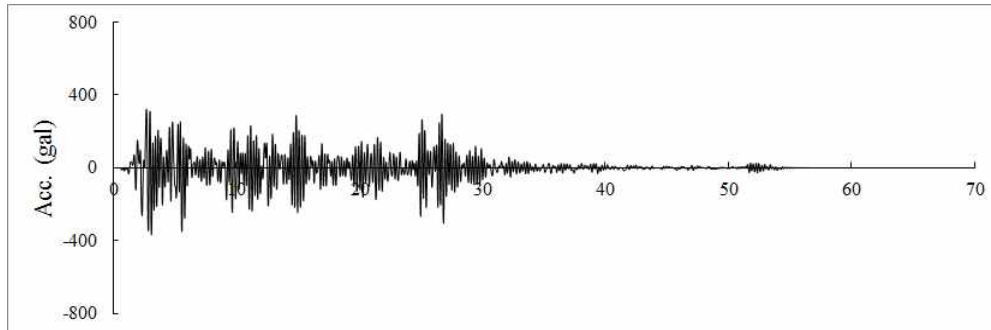
[가속도 응답]



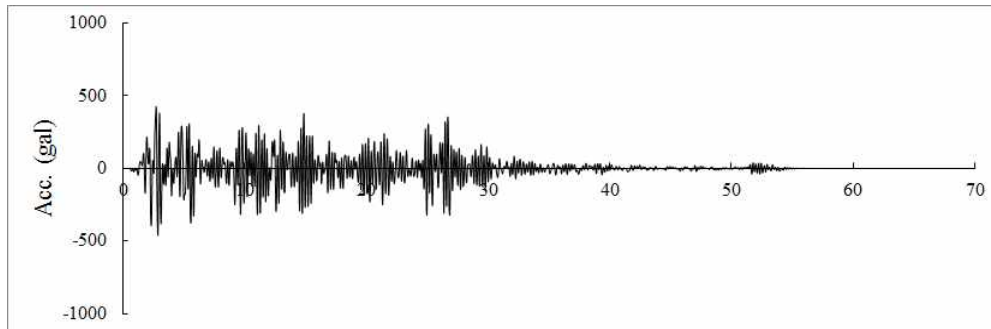
(a) 10%



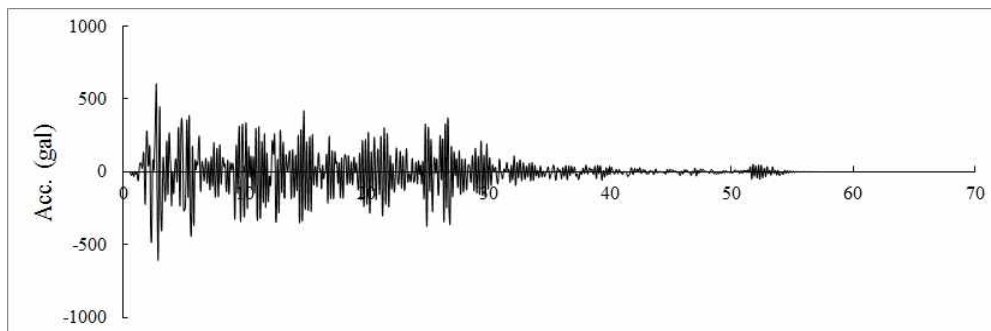
(b) 30%



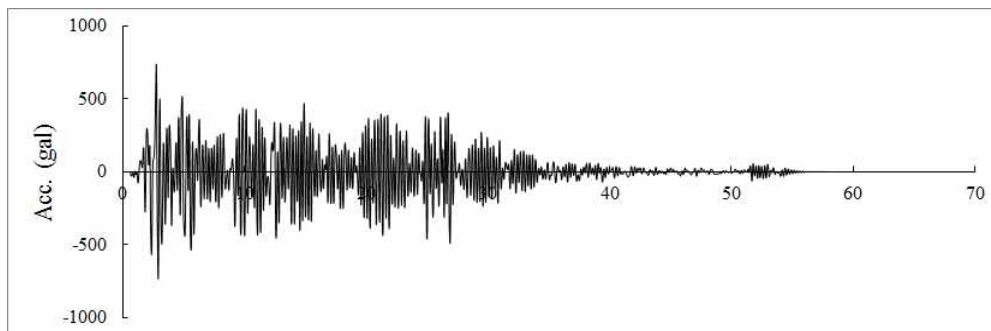
(c) 70%



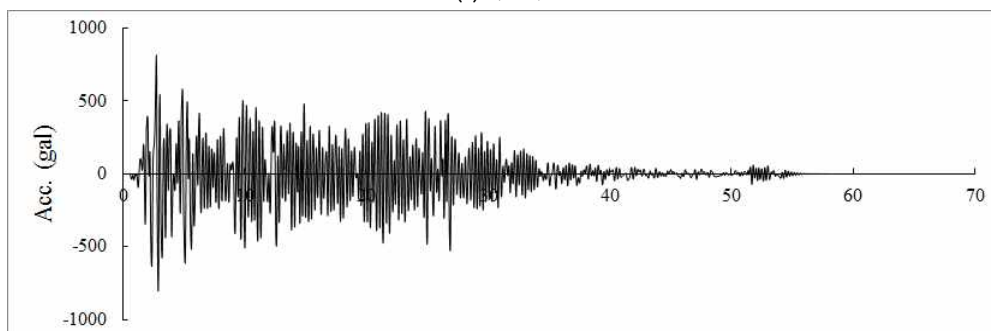
(d) 100%



(e) 130%

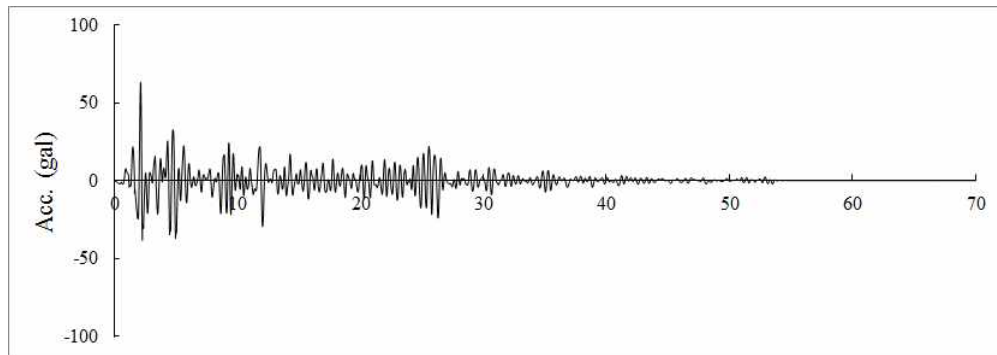


(f) 160%

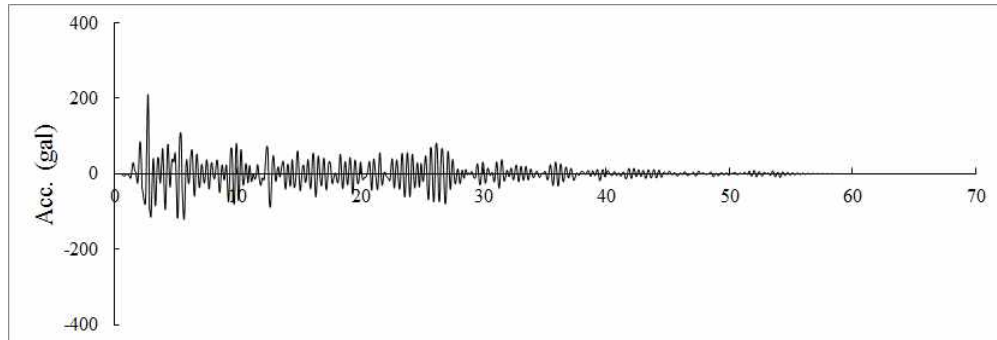


(g) 190%

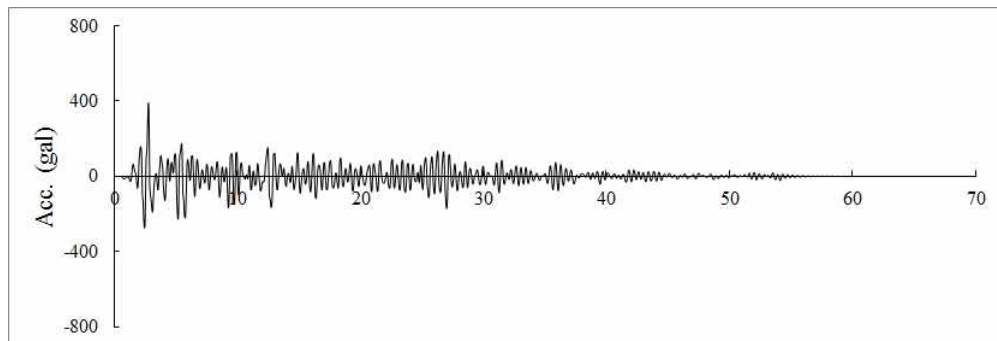
그림 3.109 상부가속도(RCMD0.5)



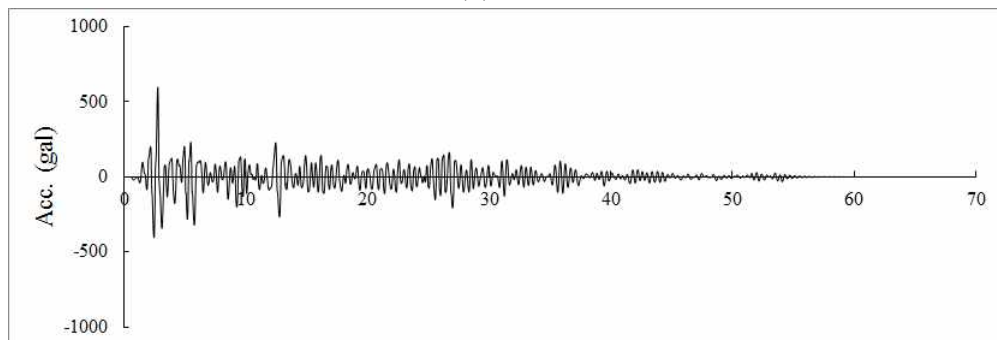
(a) 10%



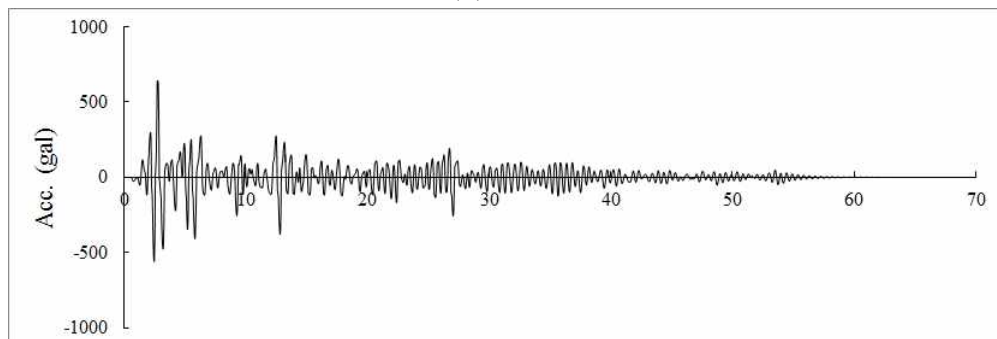
(b) 30%



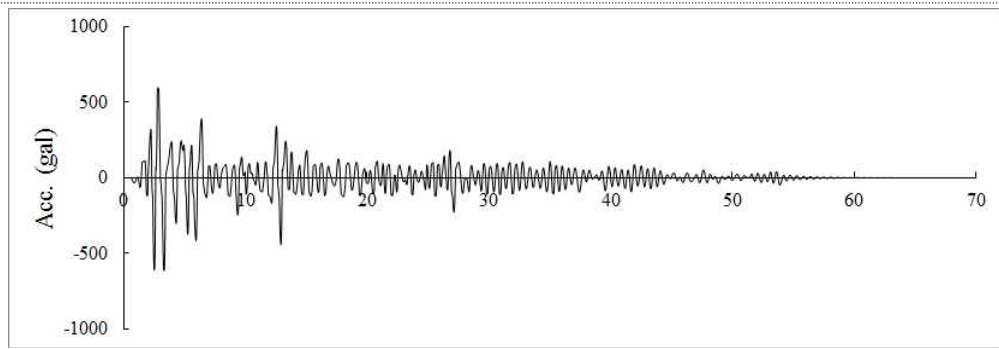
(c) 70%



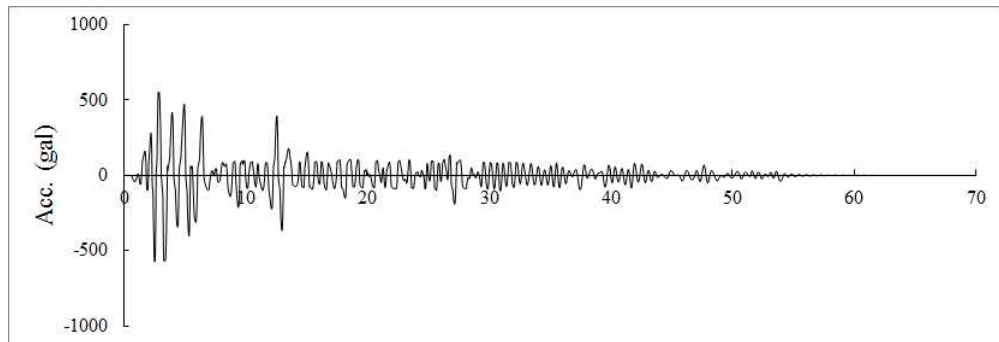
(d) 100%



(e) 130%



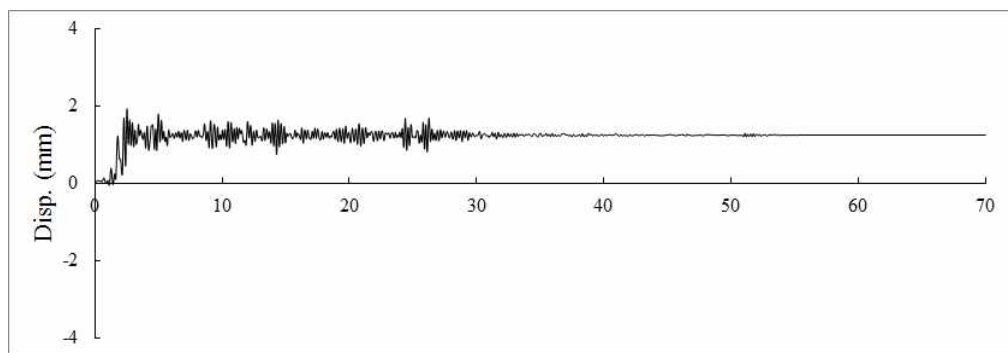
(f) 160%



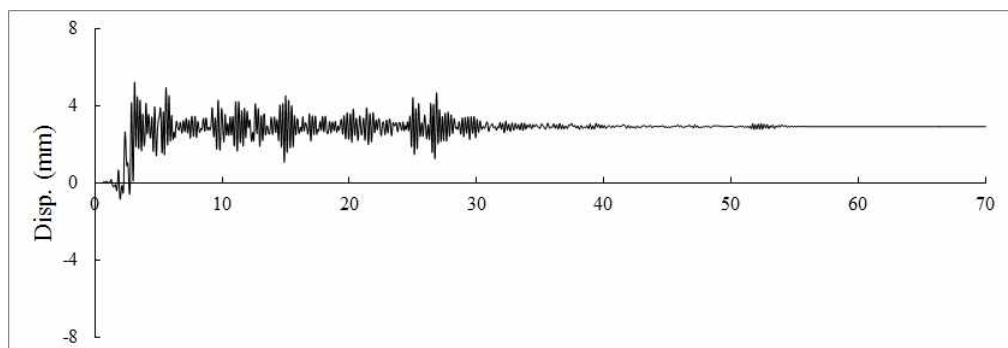
(g) 190%

그림 3.120 상부가속도(RCMD0.5)

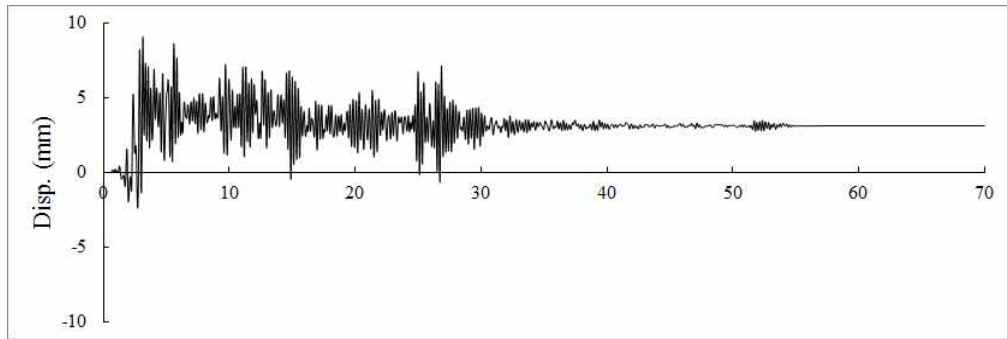
[변위 응답]



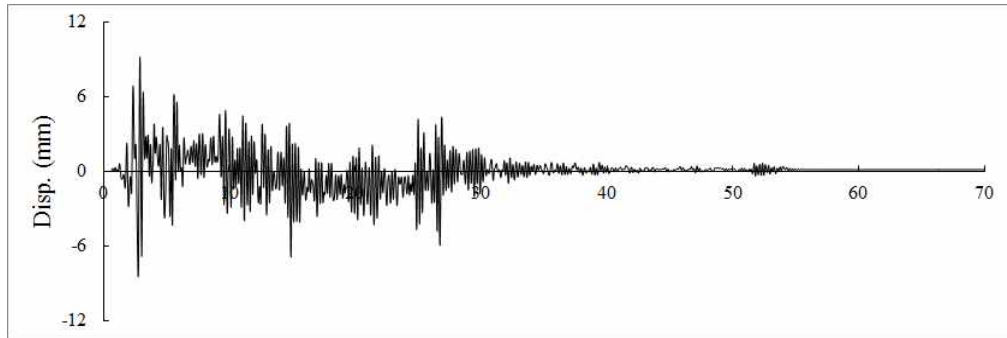
(a) 10%



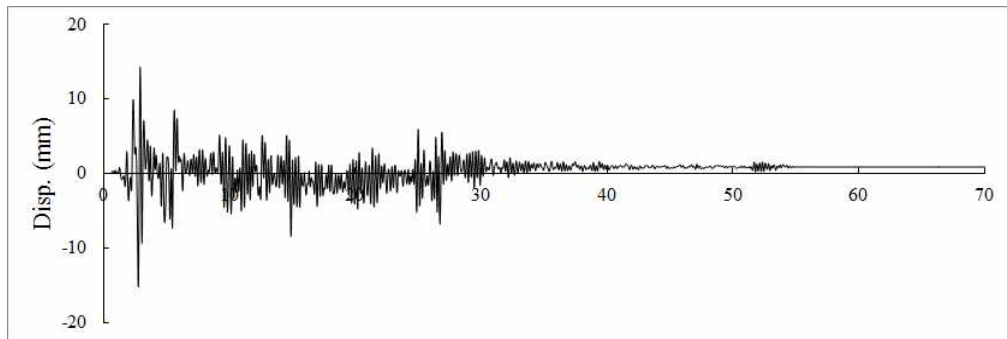
(b) 30%



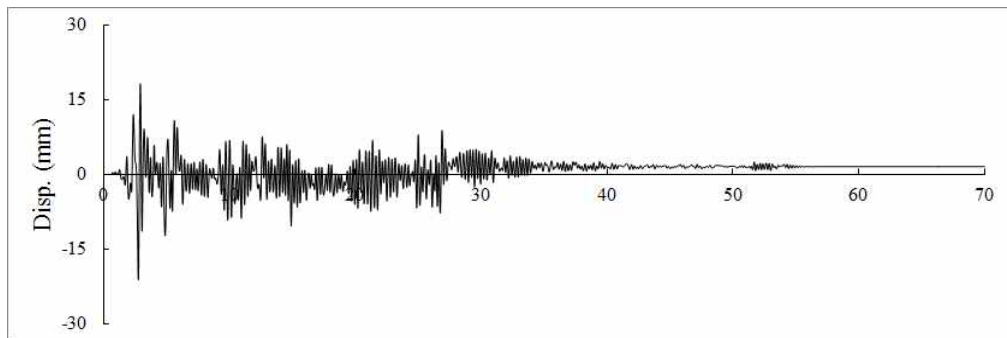
(c) 70%



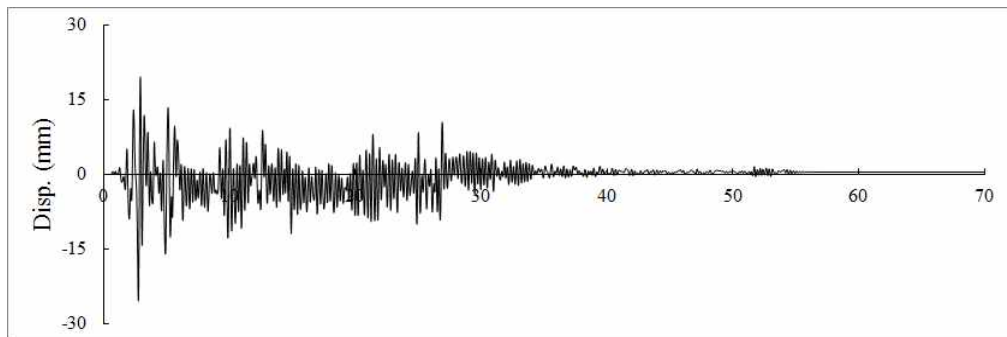
(d) 100%



(e) 130%

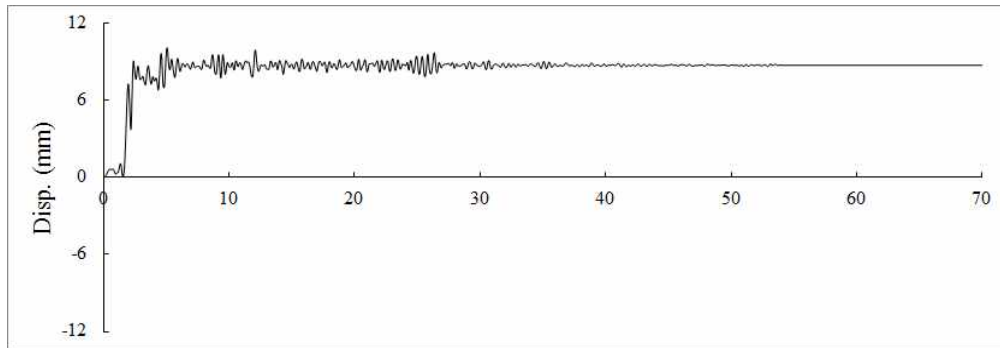


(f) 160%

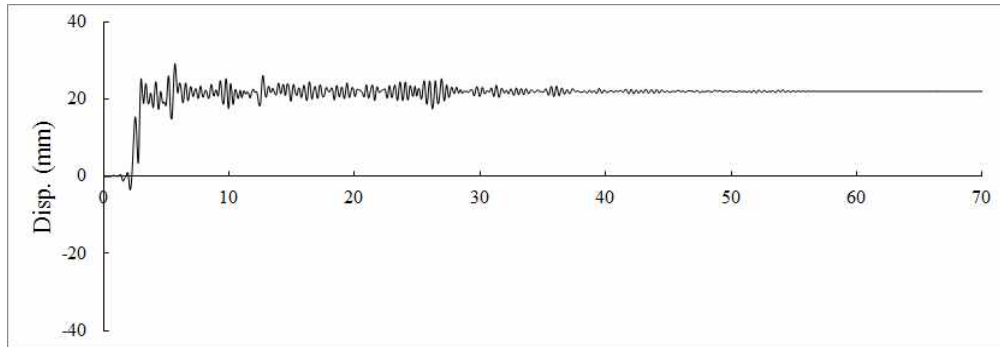


(g) 190%

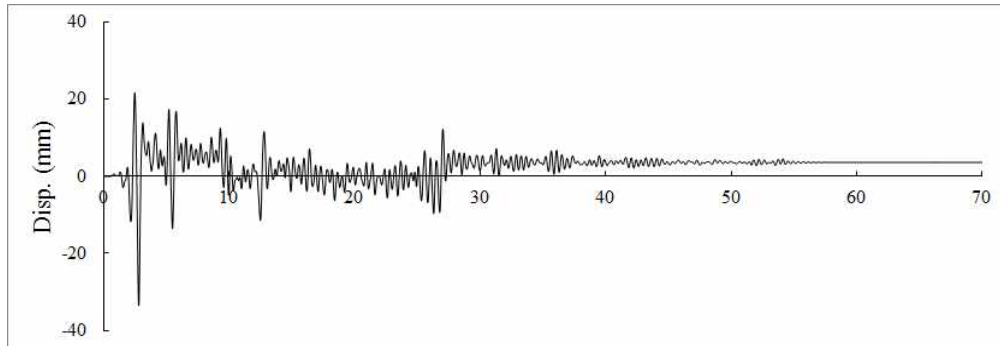
그림 3.121 상부변위(RCMD0.5)



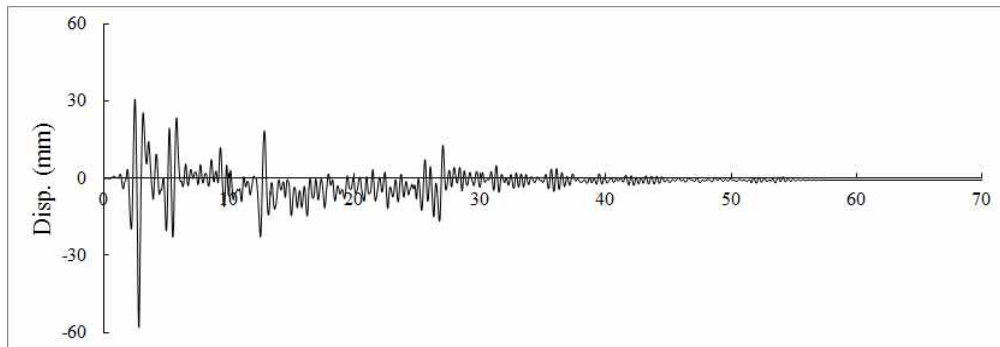
(a) 10%



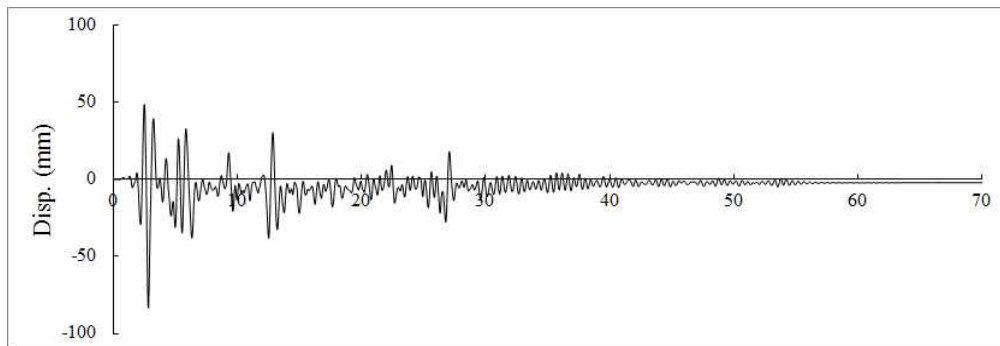
(b) 30%



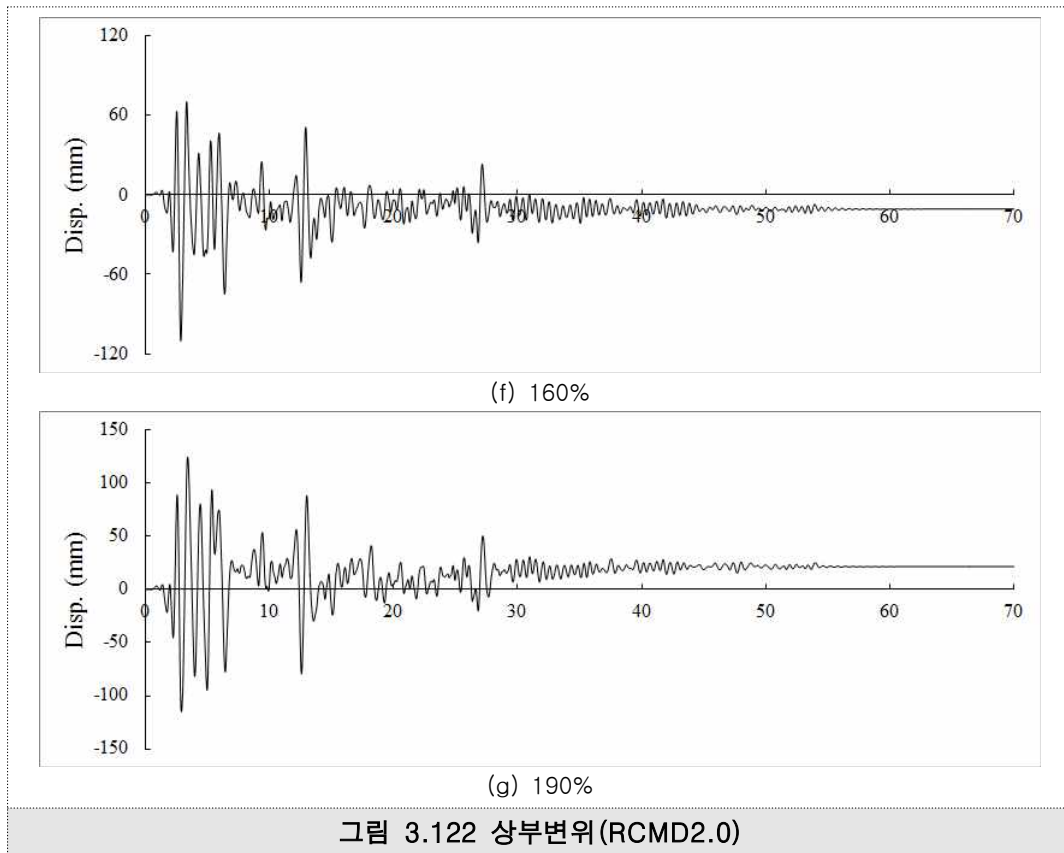
(c) 70%



(d) 100%



(e) 130%



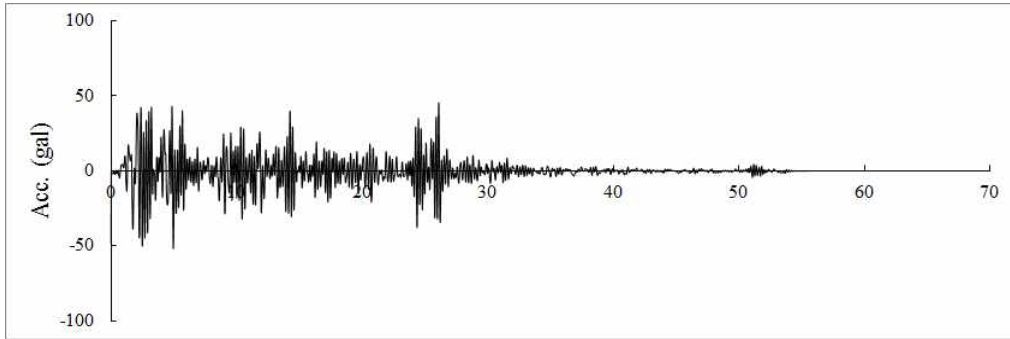
(2) 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조

- 표 3.27은 손상모델 RCSD0.5, RCSD1.5 및 RCSD2.0의 상부 최대 응답값을, 그림 3.123 ~ 그림 3.125는 손상모델 RCSD0.5, RCSD1.5 및 RCSD2.0의 상부 응답 가속도를, 그림 3.126 ~ 그림 3.128은 손상모델 RCSD0.5, RCSD1.5 및 RCSD2.0의 상부 응답 변위를 나타냄
- 가속도 응답 : 동적 지진응답해석 전 손상이 클수록 가진스케일이 상대적으로 큰 구간(가진스케일 130%)에서 가속도 응답은 커지는 것으로 나타남
- 변위 응답 : 동적 지진응답해석 전 손상이 클수록 변위 응답은 커지며, 모든 모델에서 가진스케일 100%에서 전 단계보다 변위 응답의 최대값이 일시적으로 작아지는 것으로 나타남
 - 변위 응답의 최대값은 RCSD1.5가 RCSD0.5의 약 2배, RCSD2.0이 RCSD1.5의 약 2배 정도 인 것으로 나타남

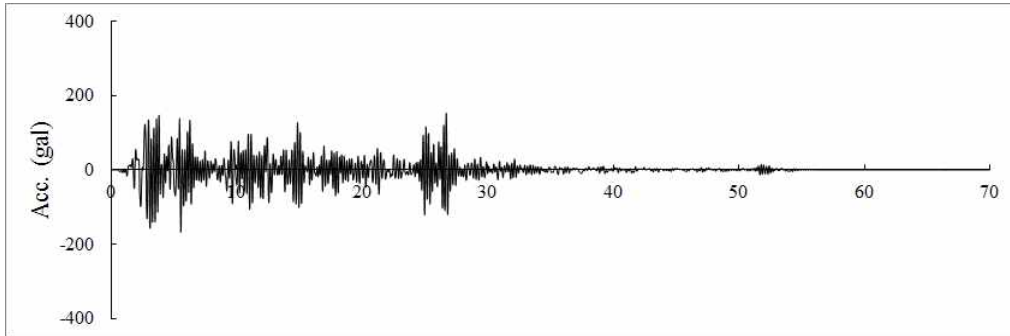
표 3.27 최대 응답값(RCSD 모델)

가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%	220%
상부가속도 최대값(gal)	RCSD0.5	51.8	167.7	373.4	442.5	526.7	696.7	889.9	1,003.0
	RCSD1.5	119.0	135.5	262.5	415.8	560.5	741.7	926.0	1,076.9
	RCSD2.0	166.5	148.3	298.8	414.1	632.7	859.9	1,083.7	1,007.8
상부변위 최대값(mm)	RCSD0.5	1.02	4.03	8.40	6.28	10.46	15.26	18.95	22.63
	RCSD1.5	4.00	9.38	16.71	12.65	18.93	26.90	34.85	46.75
	RCSD2.0	5.90	15.18	24.08	18.66	31.28	44.60	65.92	93.42

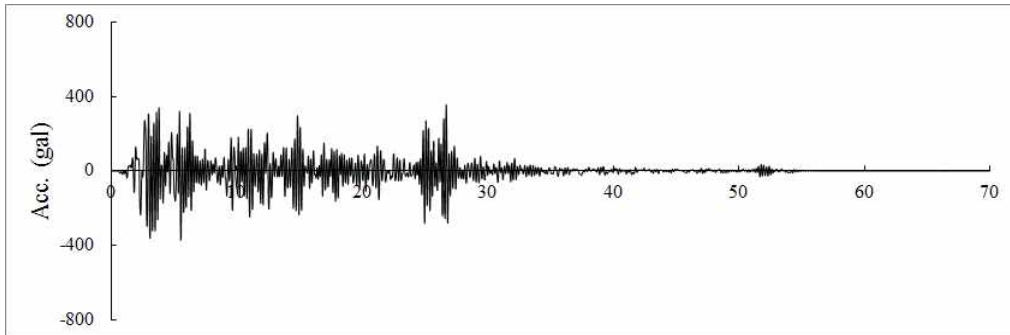
[가속도 응답]



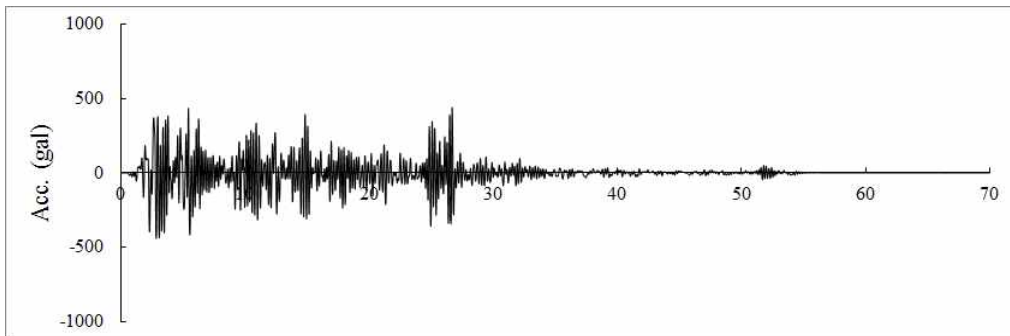
(a) 10%



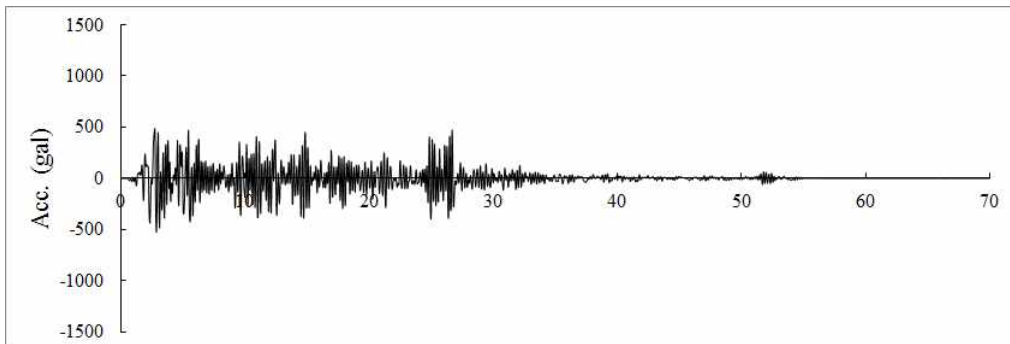
(b) 30%



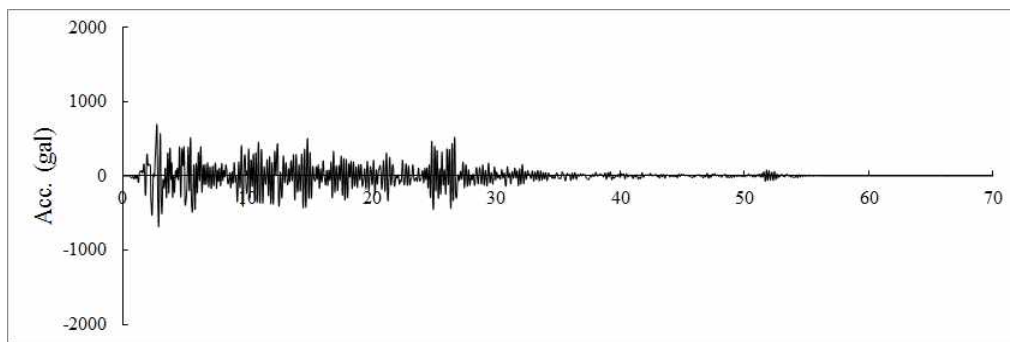
(c) 70%



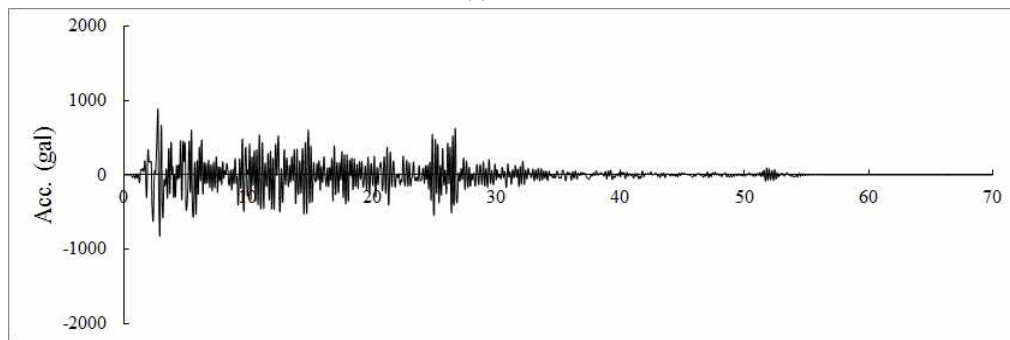
(d) 100%



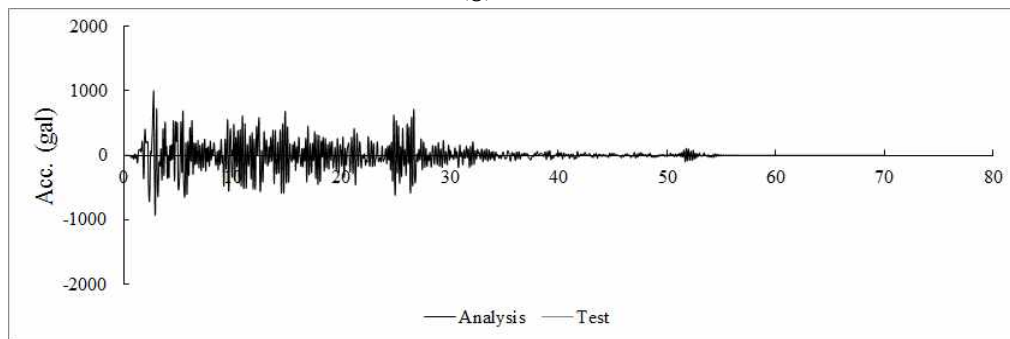
(e) 130%



(f) 160%

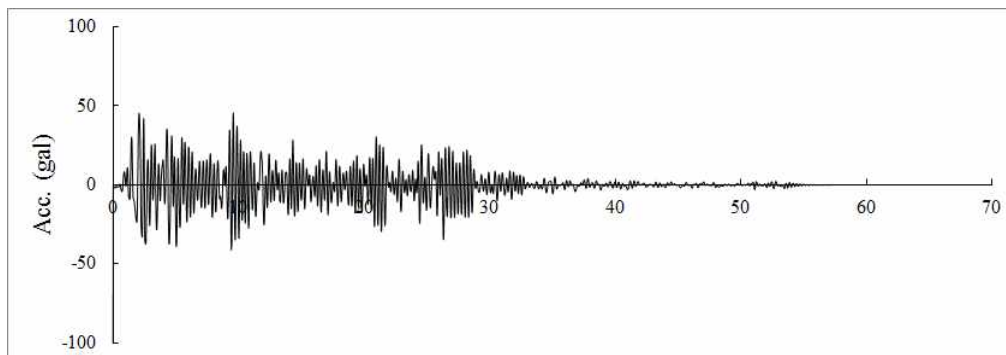


(g) 190%

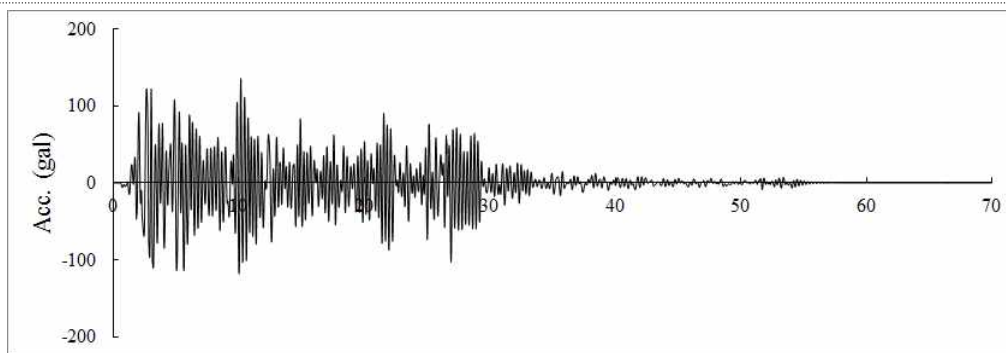


(h) 220%

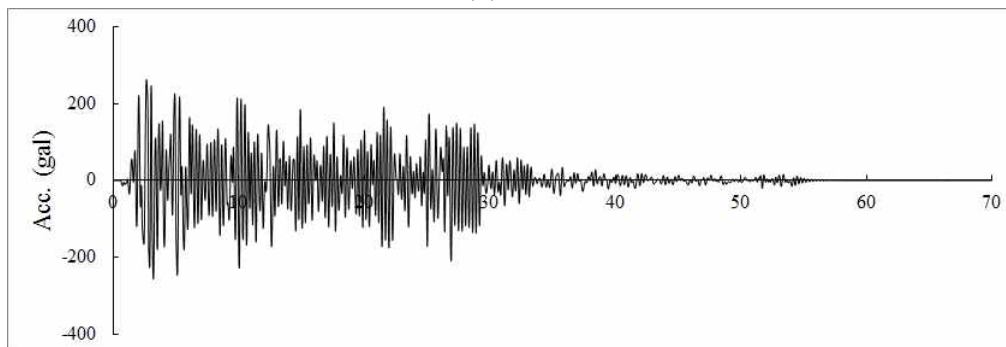
그림 3.123 상부가속도(RCSD0.5)



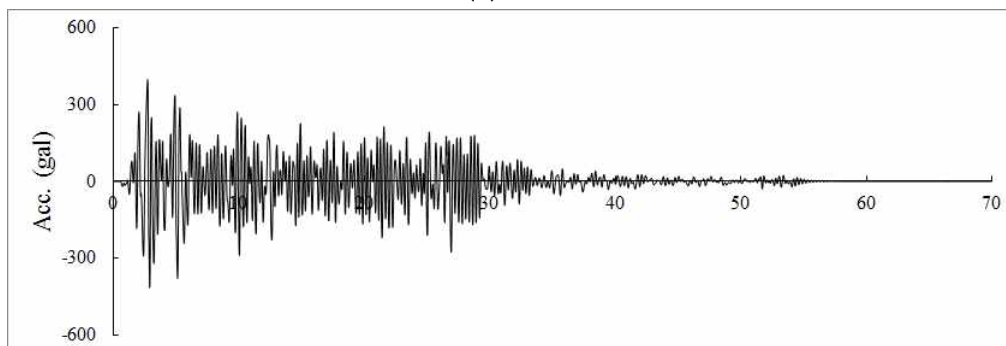
(a) 10%



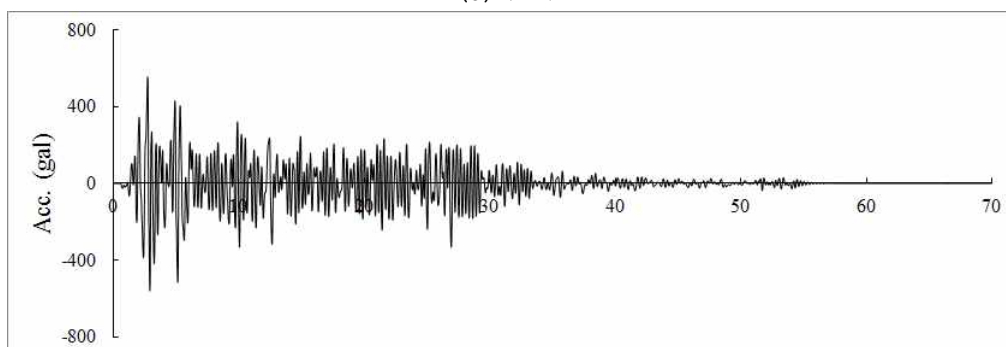
(b) 30%



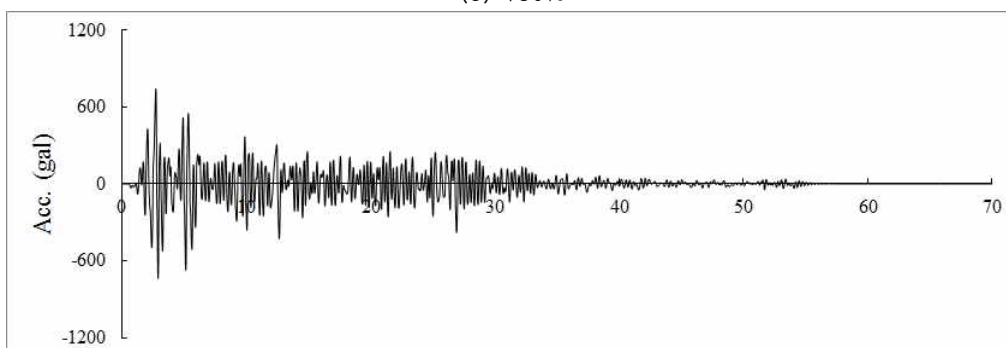
(c) 70%



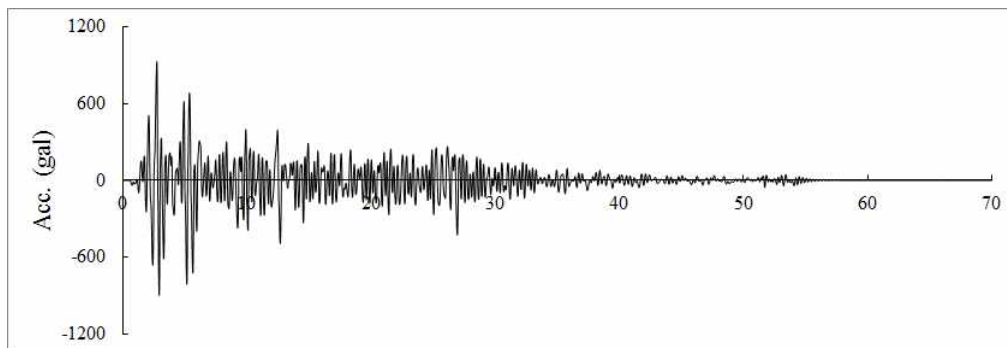
(d) 100%



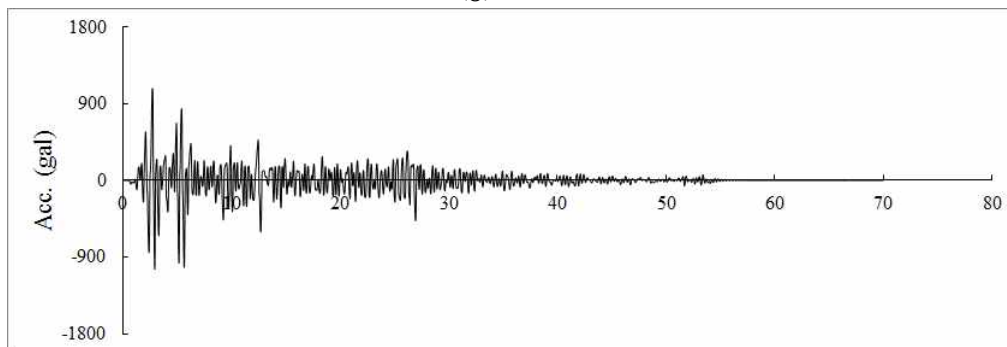
(e) 130%



(f) 160%

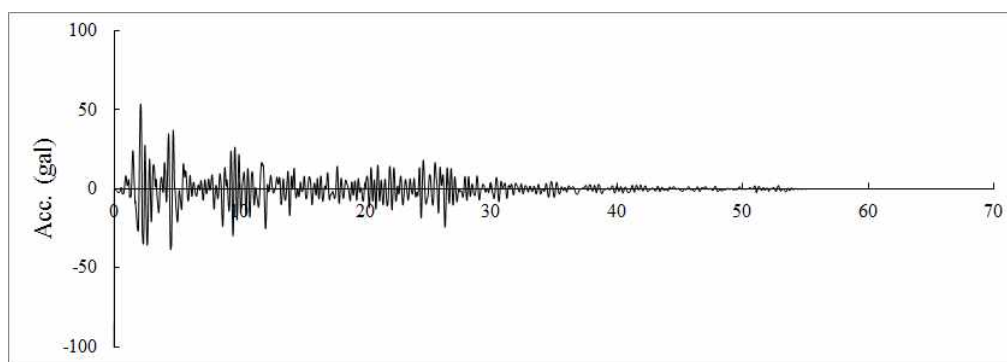


(g) 190%

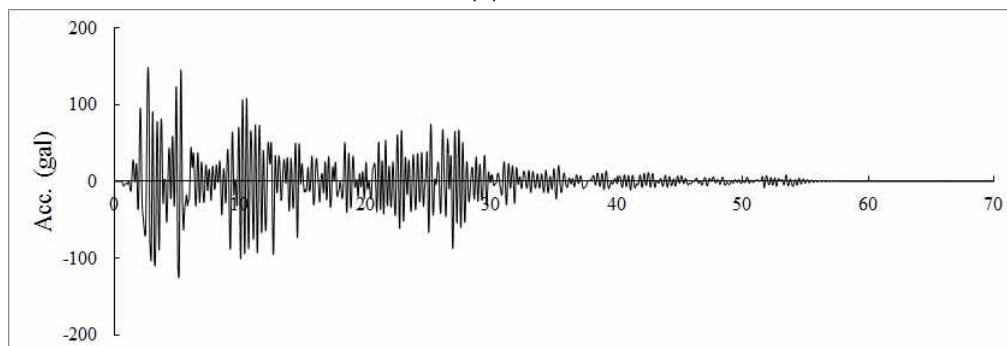


(h) 220%

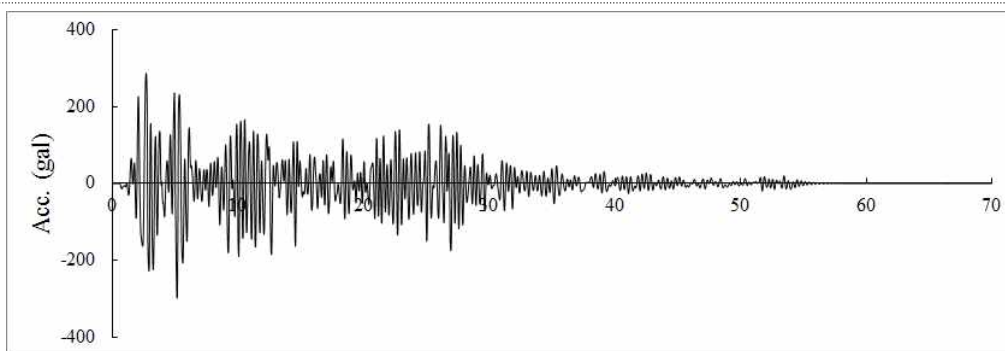
그림 3.124 상부가속도(RCSD1.5)



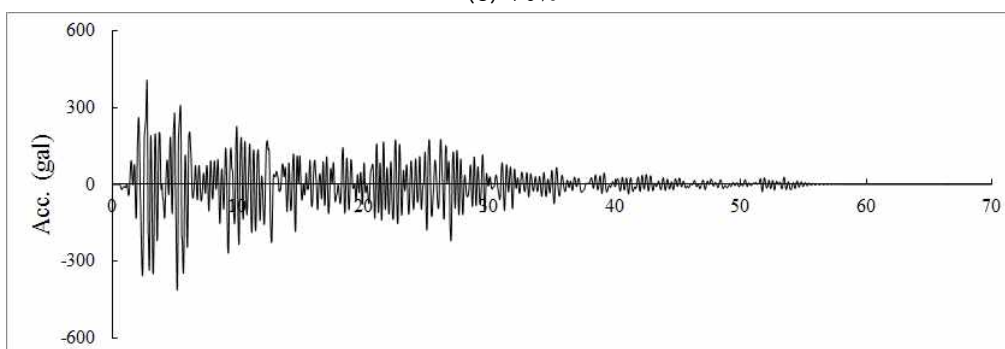
(a) 10%



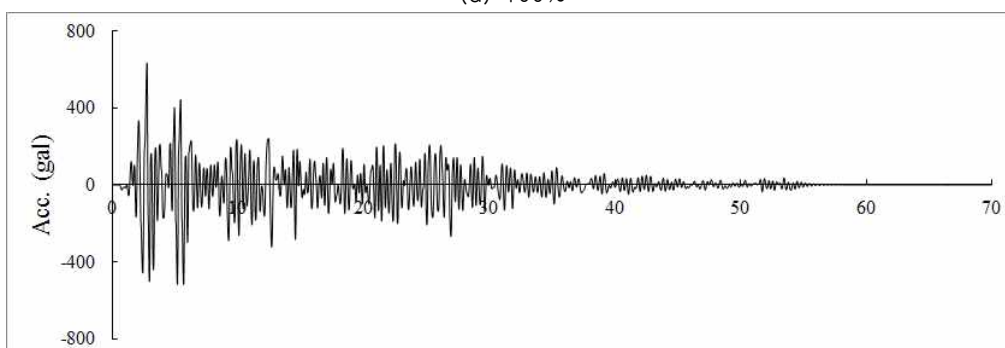
(b) 30%



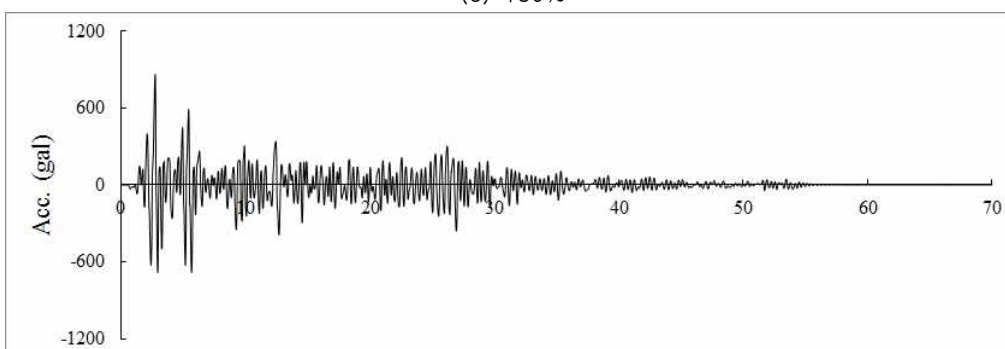
(c) 70%



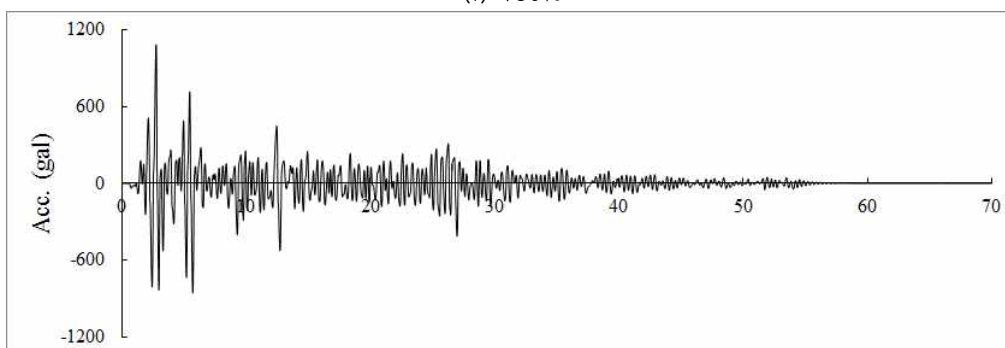
(d) 100%



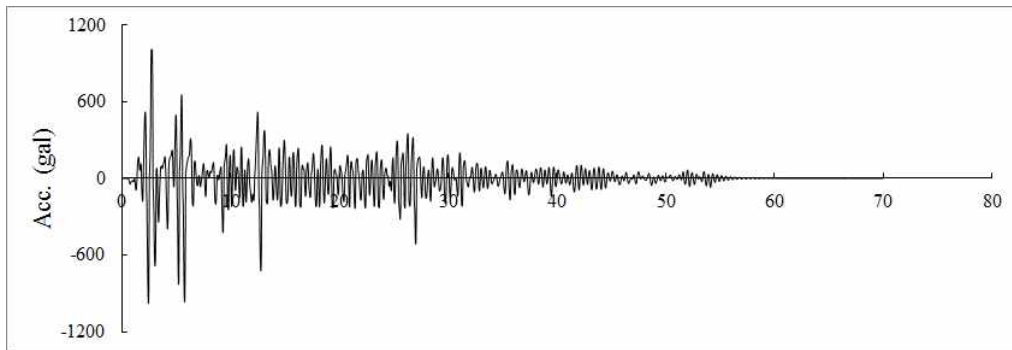
(e) 130%



(f) 160%



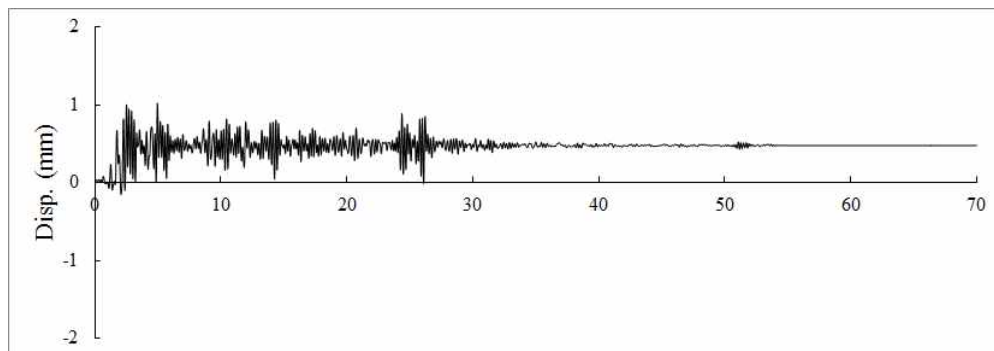
(g) 190%



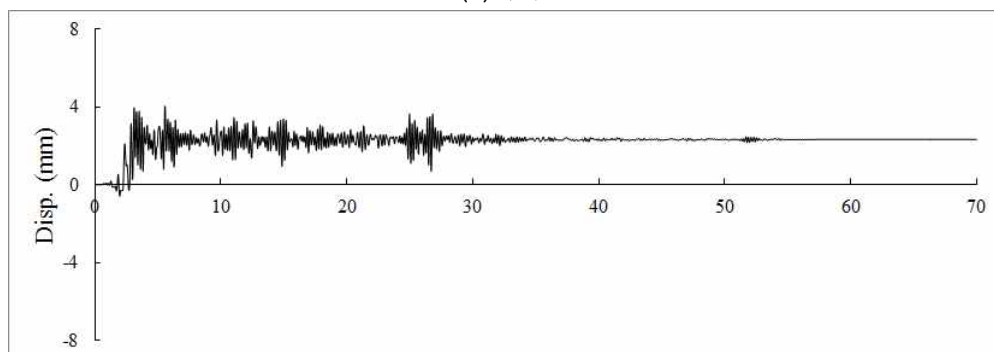
(h) 220%

그림 3.125 상부가속도(RCSD2.0)

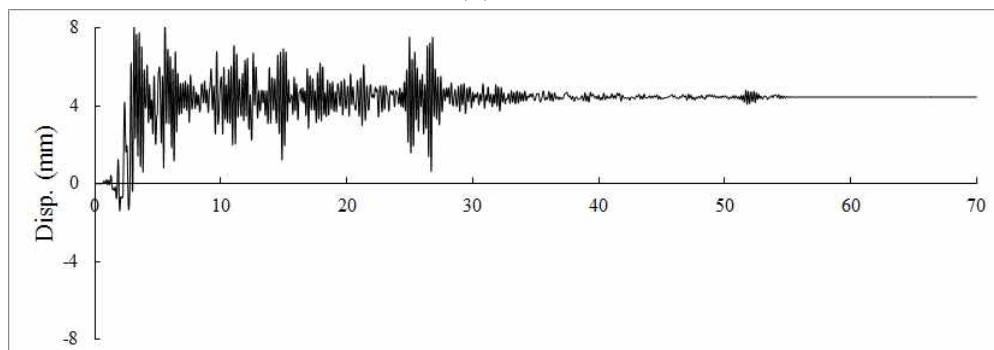
[변위 응답]



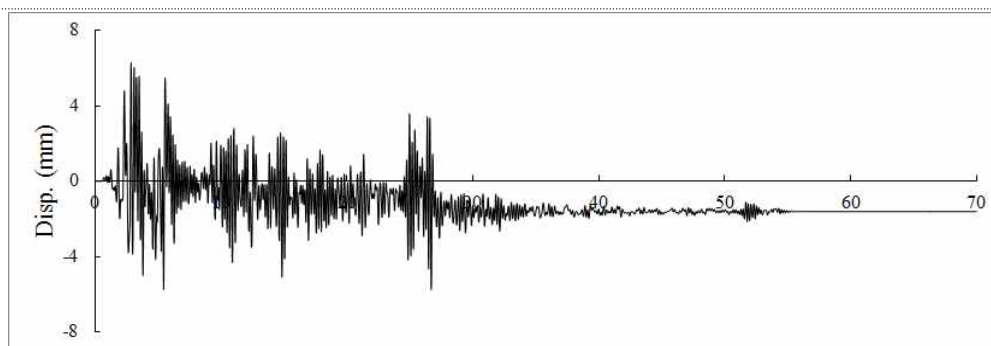
(a) 10%



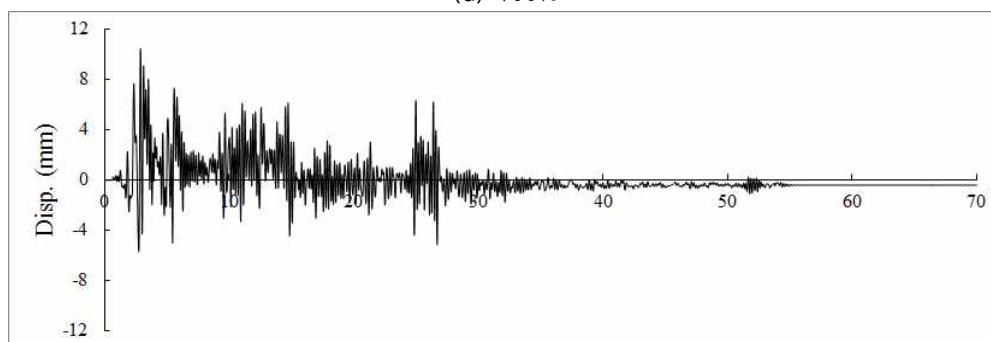
(b) 30%



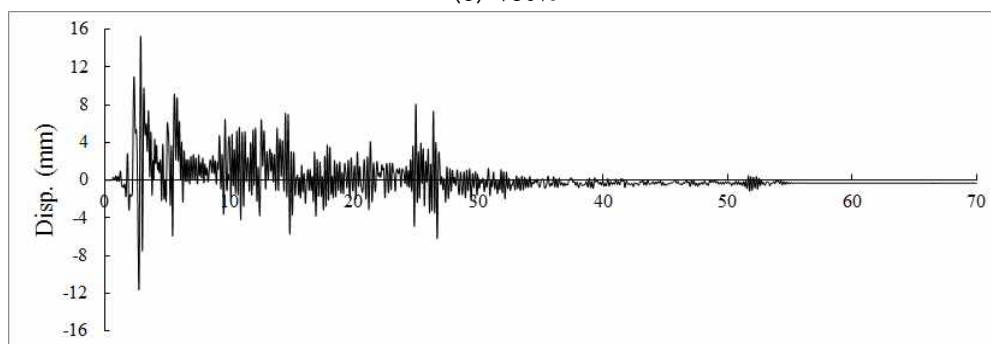
(c) 70%



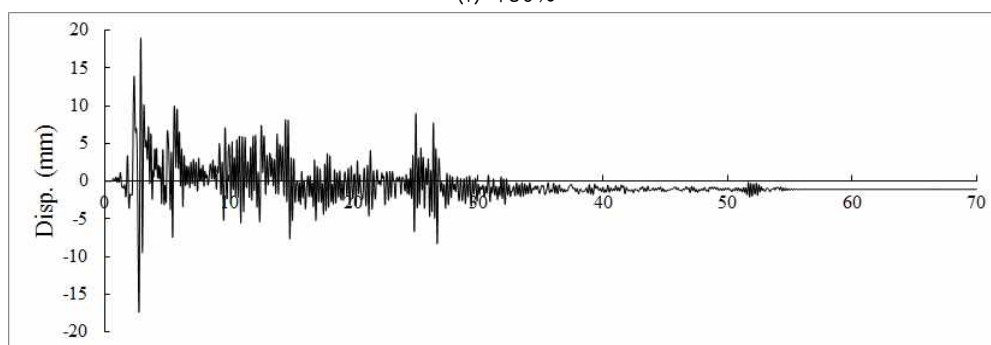
(d) 100%



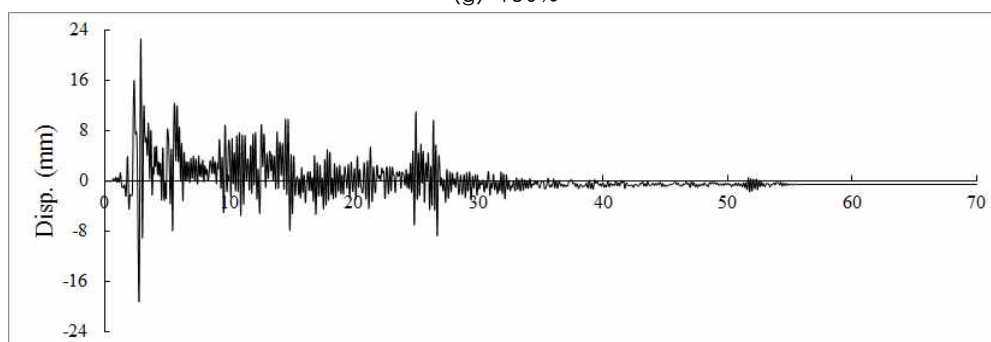
(e) 130%



(f) 160%

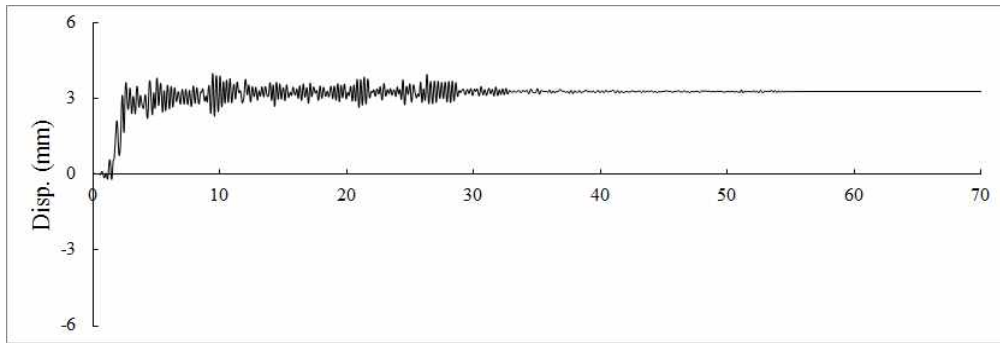


(g) 190%

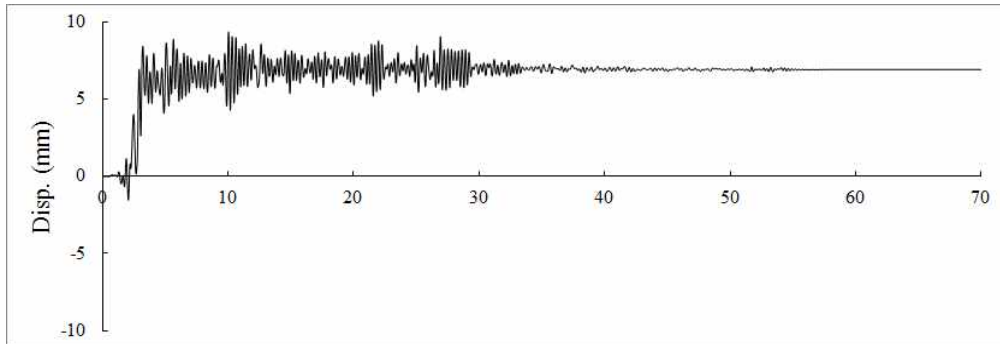


(h) 220%

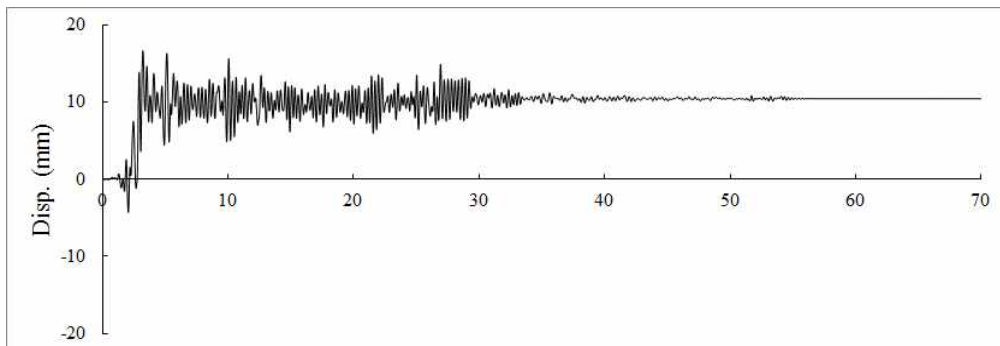
그림 3.126 상부변위(RCSD0.5)



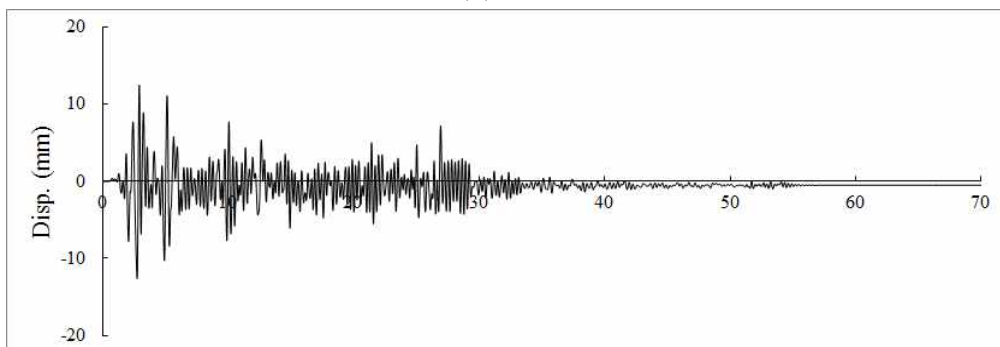
(a) 10%



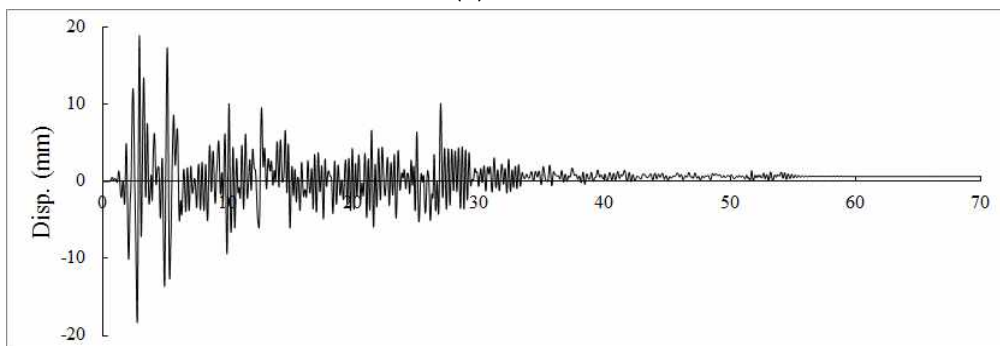
(b) 30%



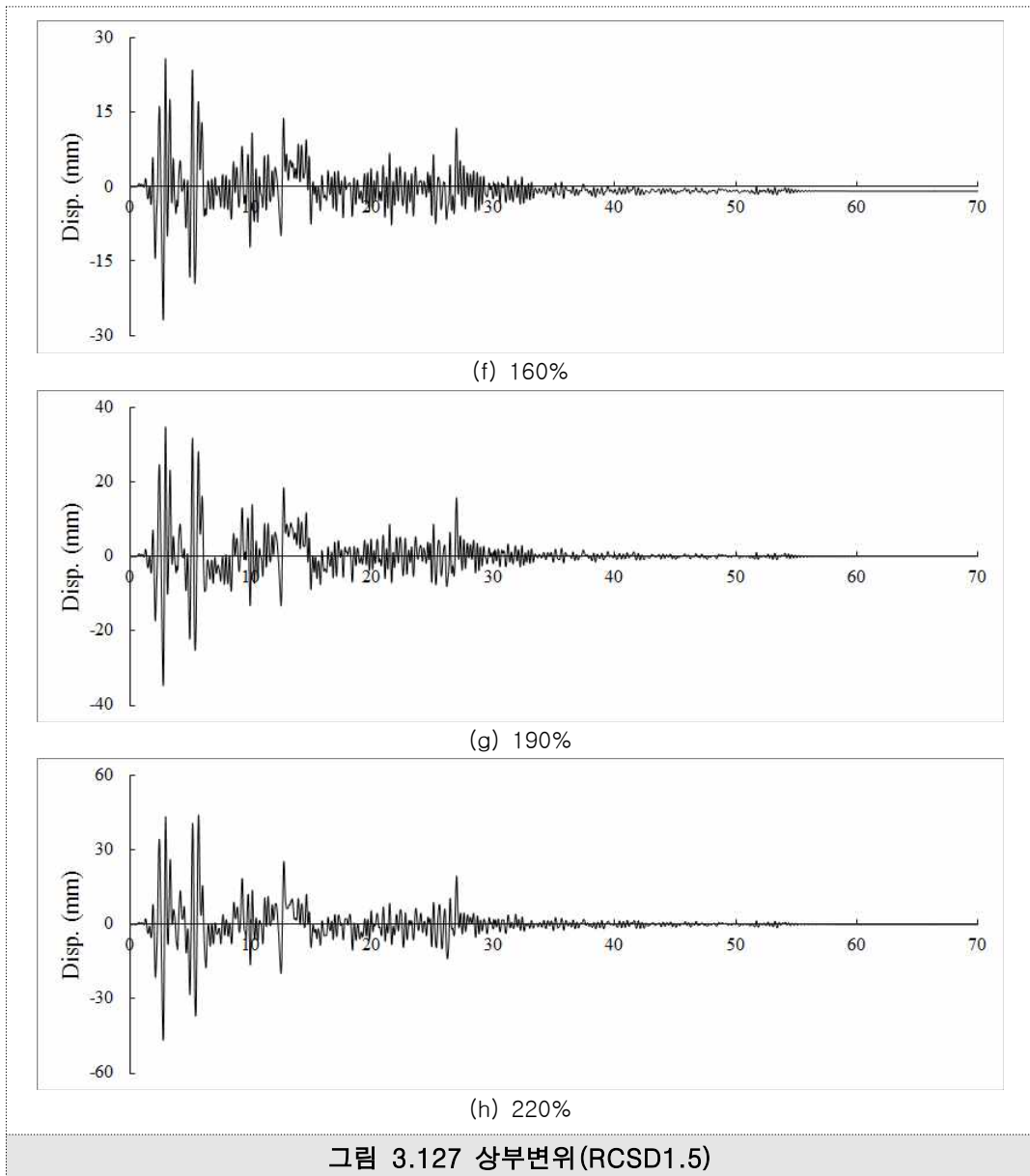
(c) 70%



(d) 100%



(e) 130%



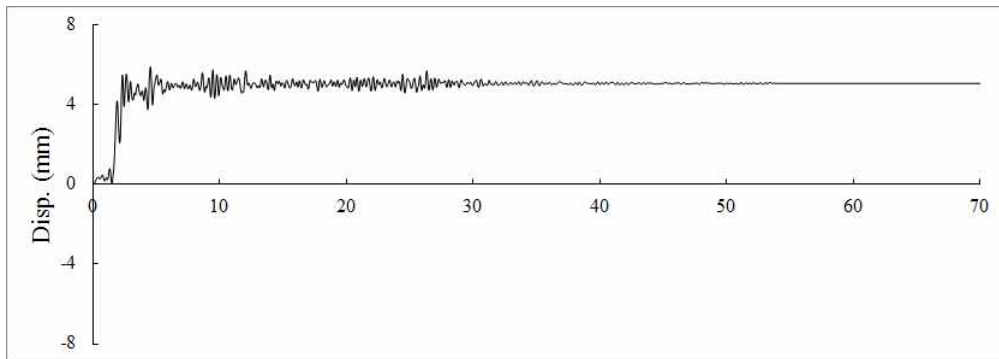
(3) 조적채움벽 RC 골조

- 표 3.28은 RCWD 모델의 상부 최대 응답값을, 그림 3.129 ~ 그림 3.132는 RCMWD 모델의 상부 응답 가속도를, 그림 3.133 ~ 그림 3.136은 RCMWD 모델의 상부 응답 변위를 나타냄
- 가속도 응답 : 동적 지진응답해석 전 손상이 클수록 동일 가진스케일에서의 가속도 응답은 커지는 것으로 나타났으며, 무손상 모델에 비하여 손상 모델의 경우, 가진스케일이 비교적 작은 구간(가진스케일 70% 이하)에서는 가속도 응답이 작은 것으로 나타났으나, 가진스케일이 큰 구간에서는 가속도 응답이 커지는 것으로 나타남
- 변위 응답 : 무손상 모델의 경우, 가진스케일 220% 종료 시까지 응답 변위가 작게 발생하는 것으로 나타난 반면, 손상 모델의 경우, 동적 지진응답해석 전 손상 정도에 따른 변위 응답이 크게 발생하는 것으로 나타남

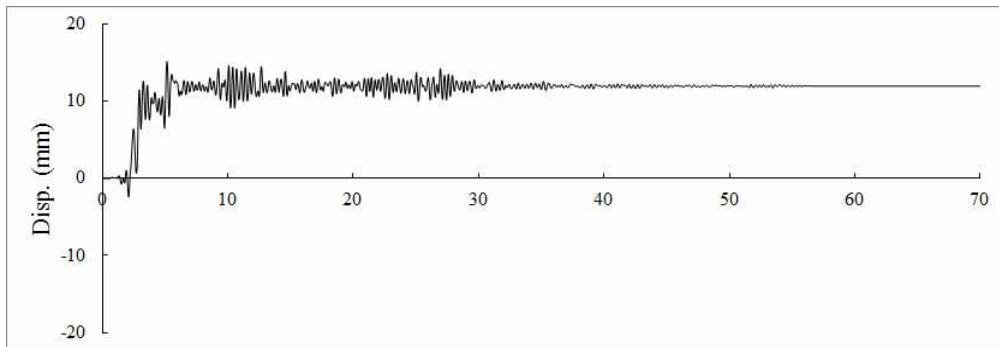
표 3.28 최대 응답값(RCMWD 모델)

가진스케일		10%	30%	70%	100%	130%	160%	190%	220%
상부가속도 최대값(gal)	RCMWD0.0	47.4	141.9	331.3	472.5	614.8	749.1	884.8	1,001.9
	RCMWD0.5	45.4	135.7	266.8	506.0	703.6	800.2	933.3	1,078.3
	RCMWD1.0	43.7	112.0	313.2	541.3	720.2	917.9	902.5	
	RCMWD1.5	46.4	189.3	451.1	730.1	847.5	838.2		
상부변위 최대값(mm)	RCMWD0.0	0.09	0.27	0.63	0.90	1.19	1.53	1.94	2.30
	RCMWD0.5	0.85	2.61	4.03	7.37	6.55	8.06	11.09	13.88
	RCMWD1.0	3.85	7.74	13.95	17.65	24.55	30.73	55.57	
	RCMWD1.5	5.27	21.06	25.16	41.57	54.29	90.89		

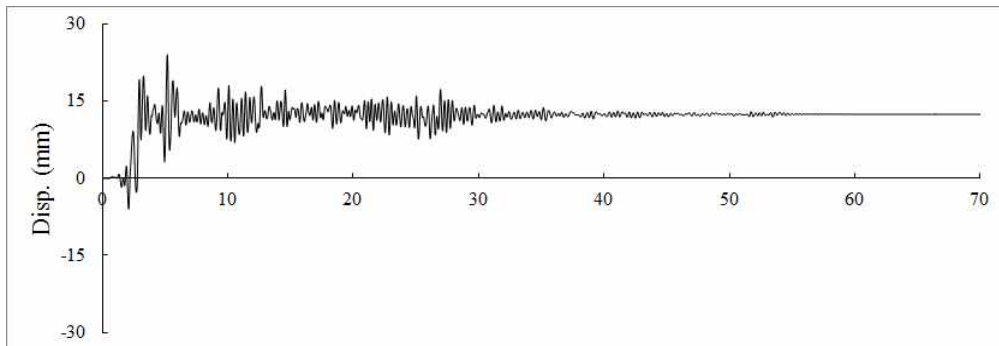
[가속도 응답]



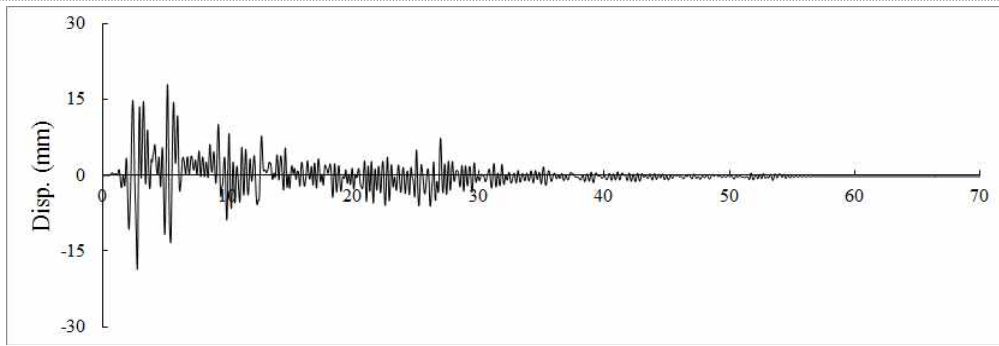
(a) 10%



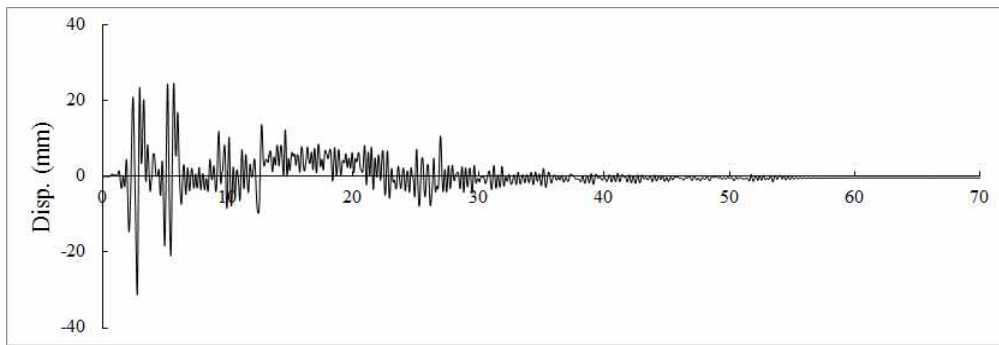
(b) 30%



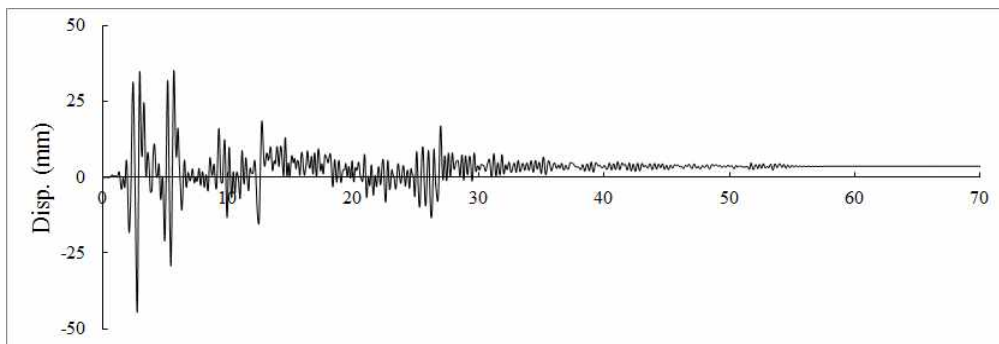
(c) 70%



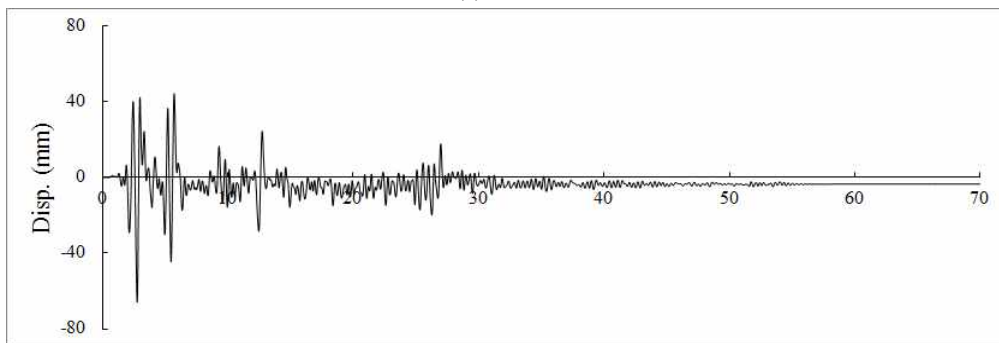
(d) 100%



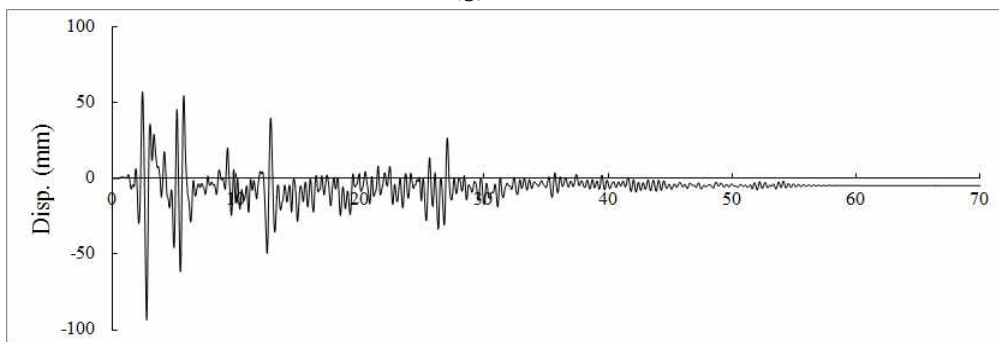
(e) 130%



(f) 160%

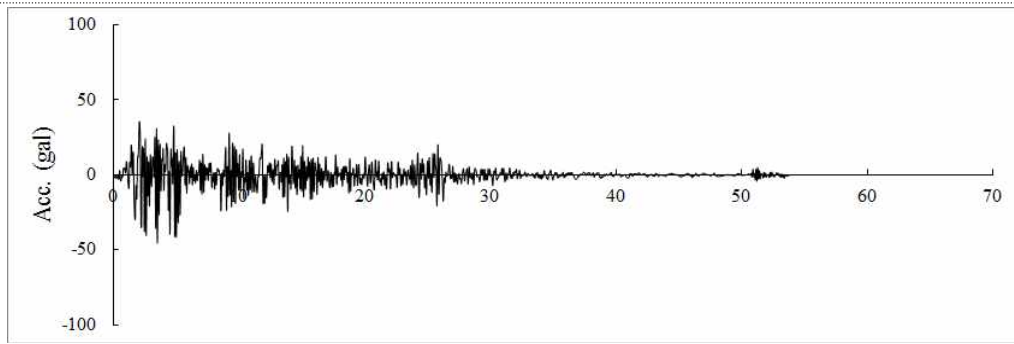


(g) 190%

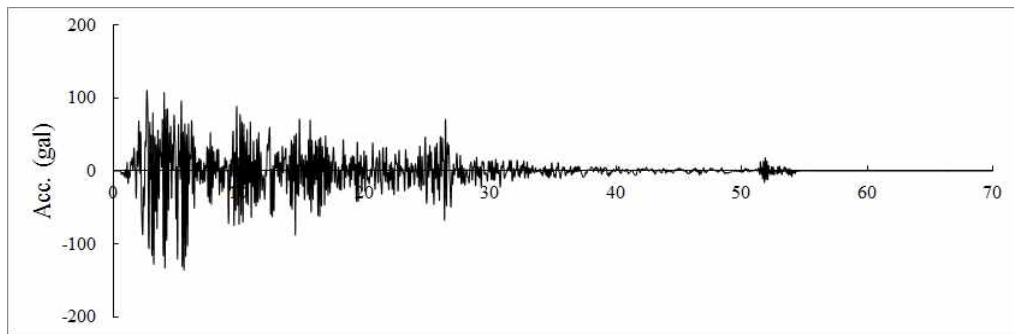


(h) 220%

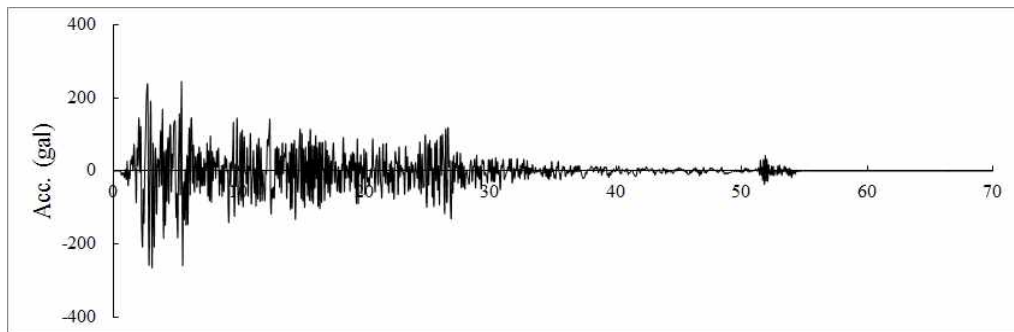
그림 3.128 상부변위(RCSD2.0)



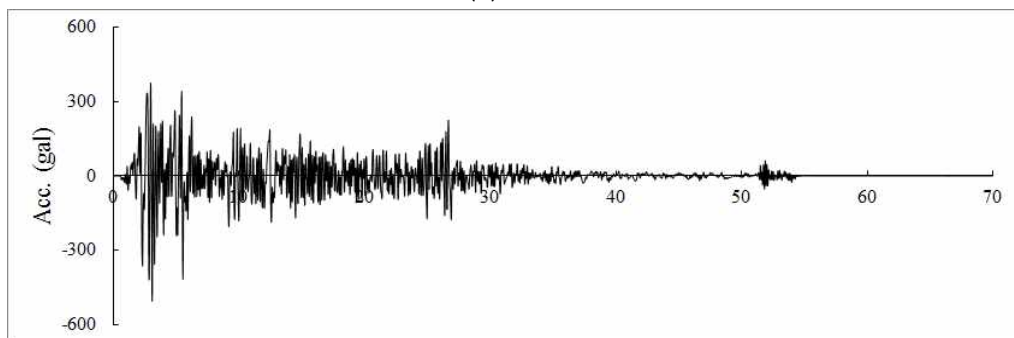
(a) 10%



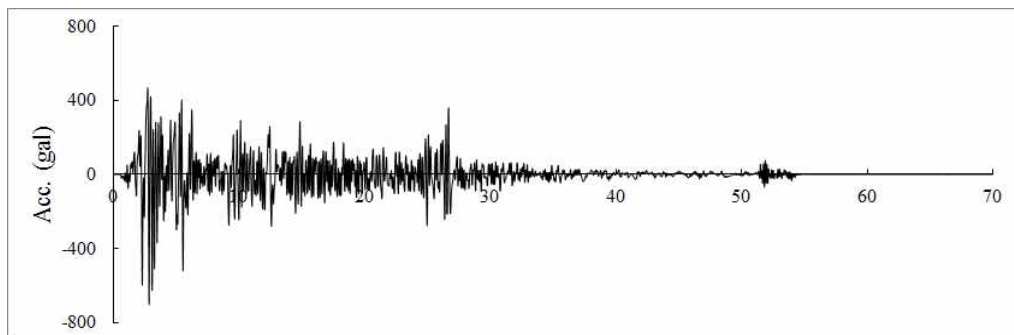
(b) 30%



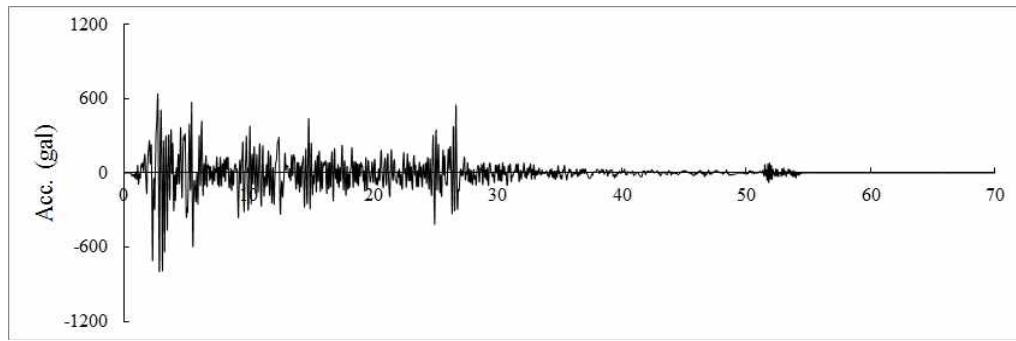
(c) 70%



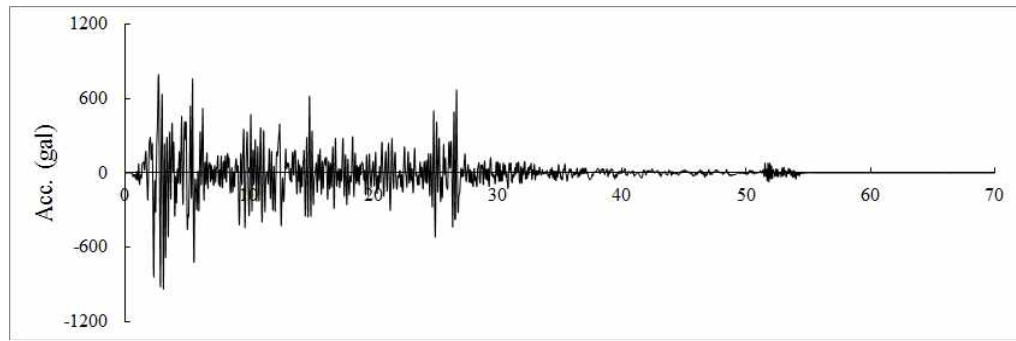
(d) 100%



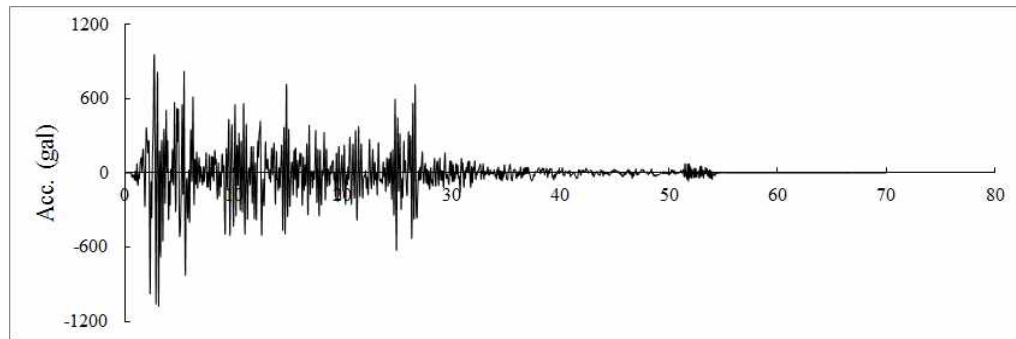
(e) 130%



(f) 160%

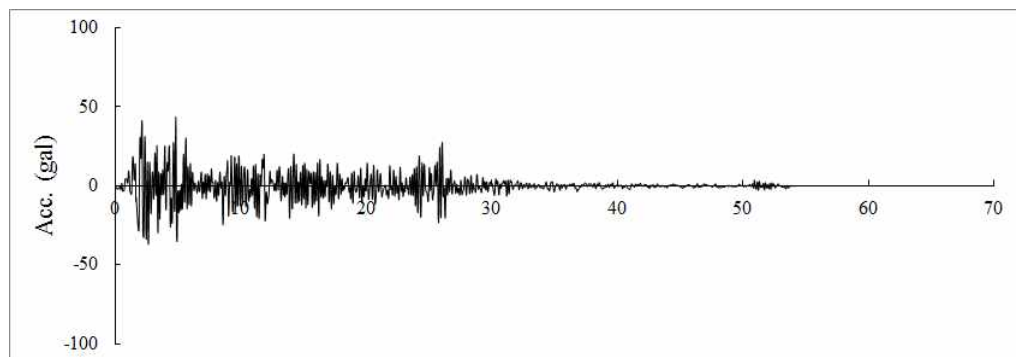


(g) 190%

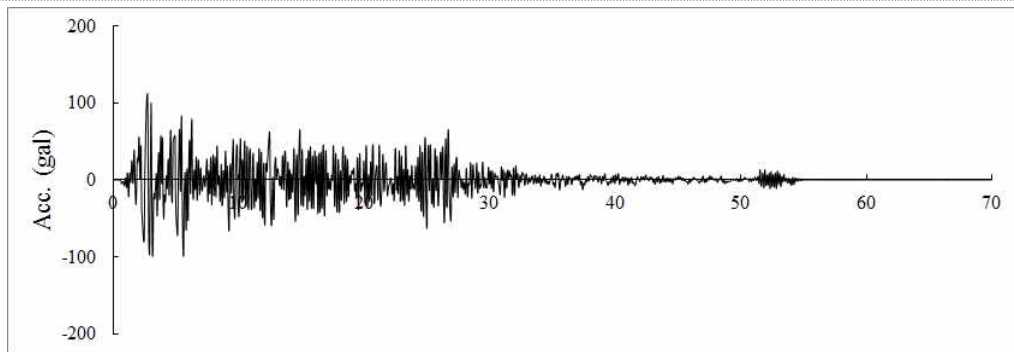


(h) 220%

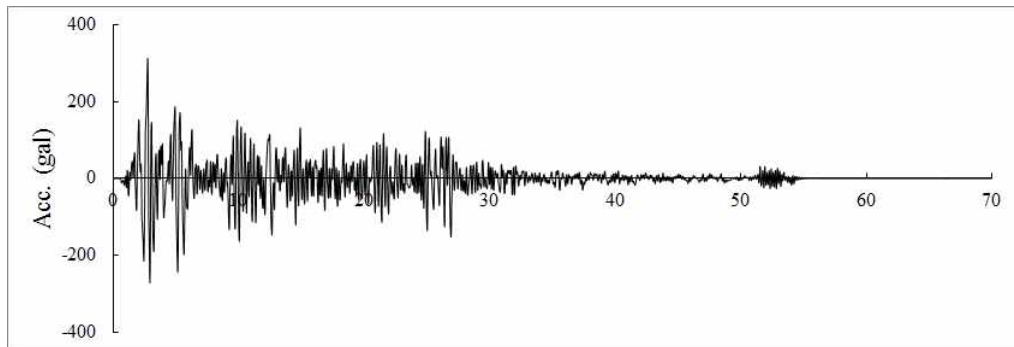
그림 3.130 상부가속도(RCMWD0.5)



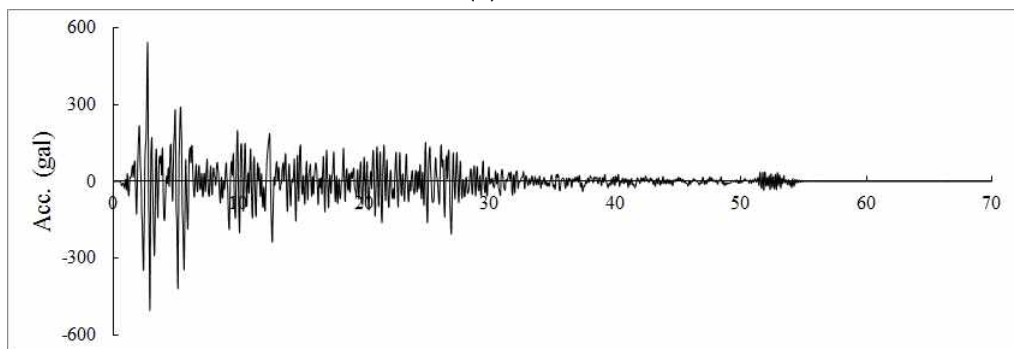
(a) 10%



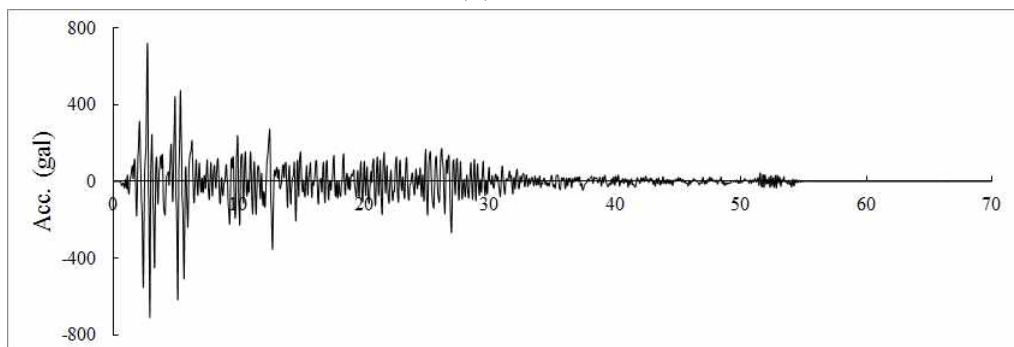
(b) 30%



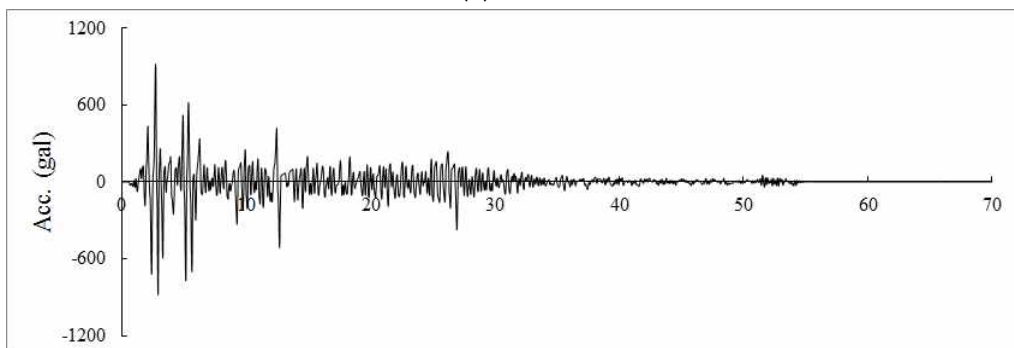
(c) 70%



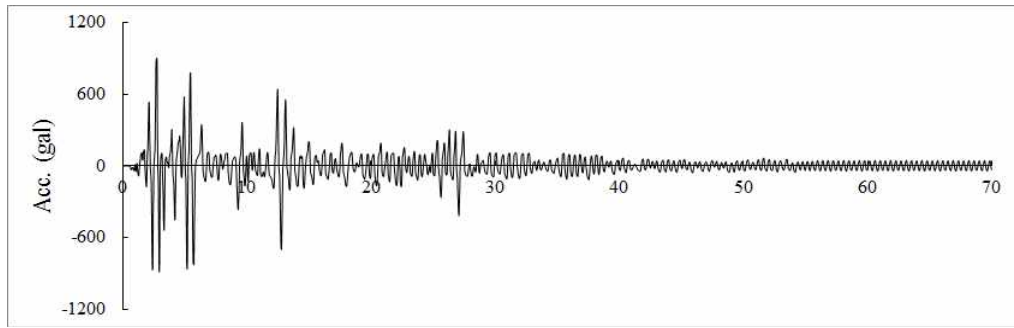
(d) 100%



(e) 130%

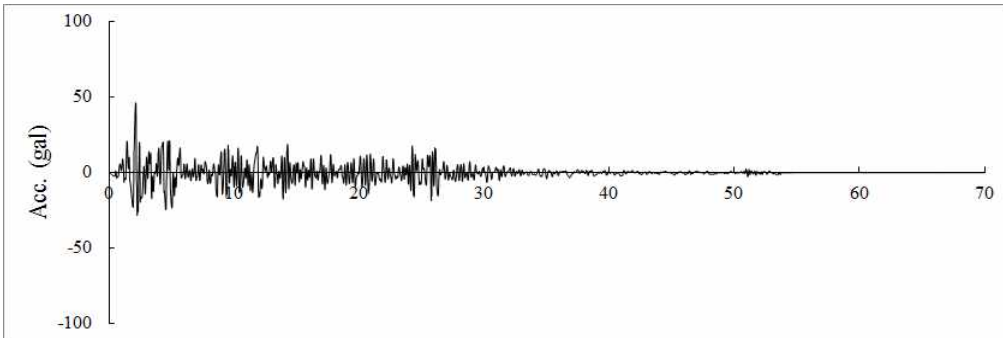


(f) 160%

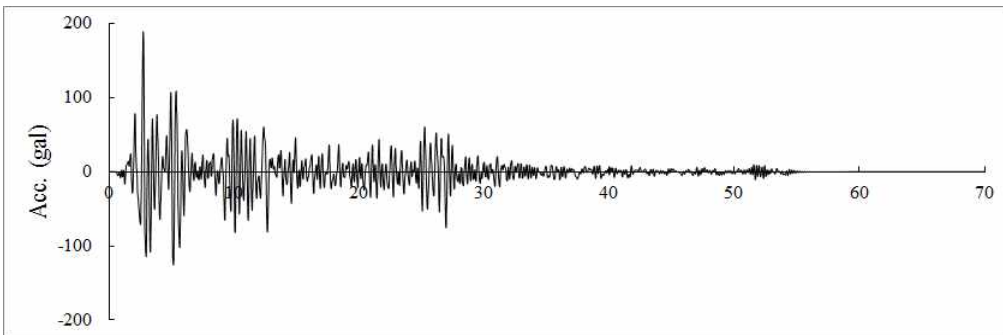


(g) 190%

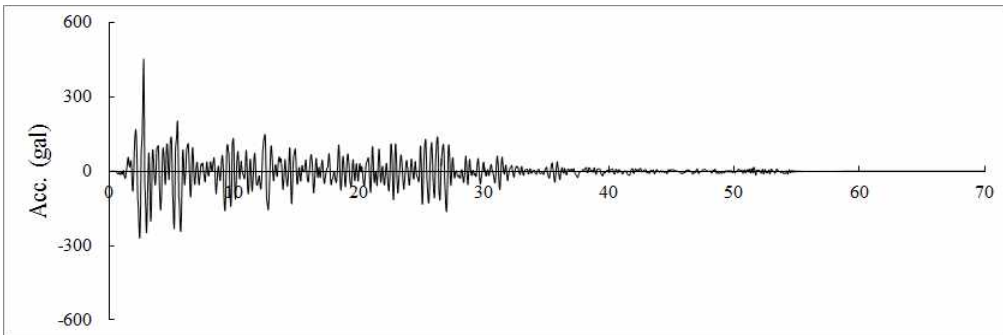
그림 3.131 상부가속도(RCMWD1.0)



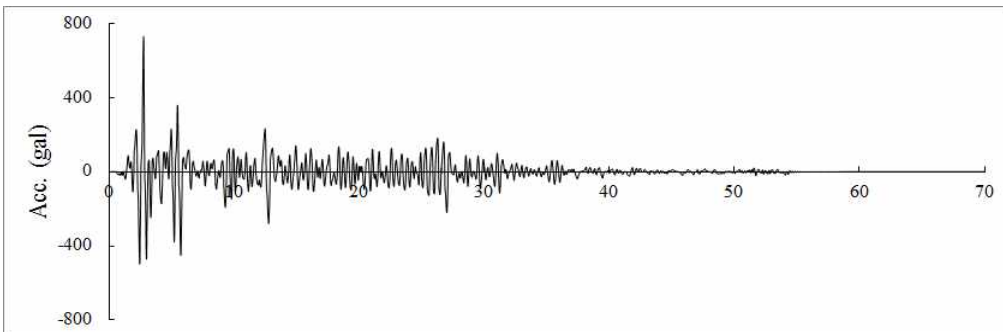
(a) 10%



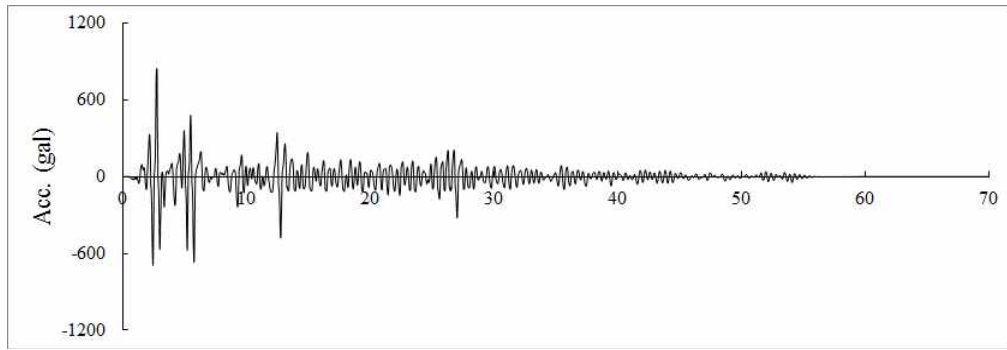
(b) 30%



(c) 70%



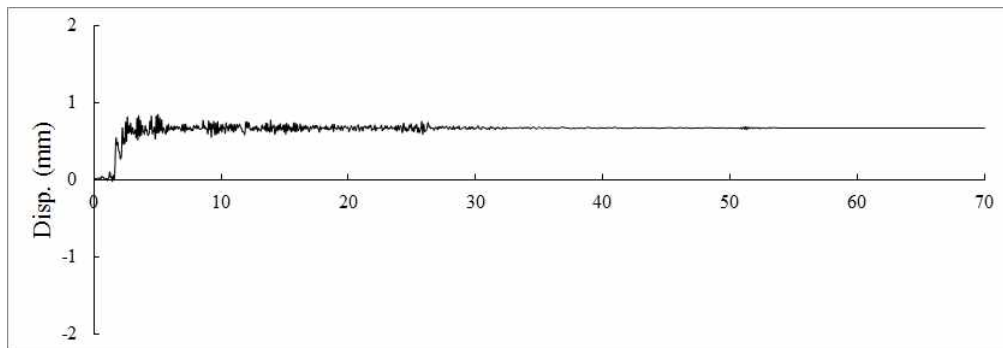
(d) 100%



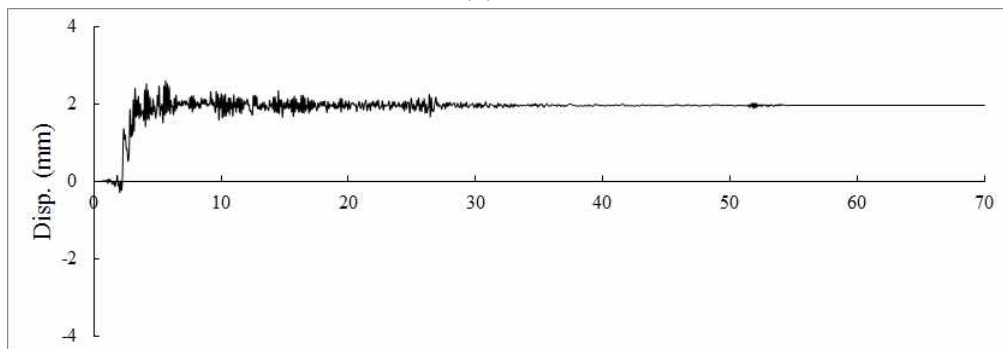
(e) 130%

그림 3.132 상부가속도(RCMWD1.5)

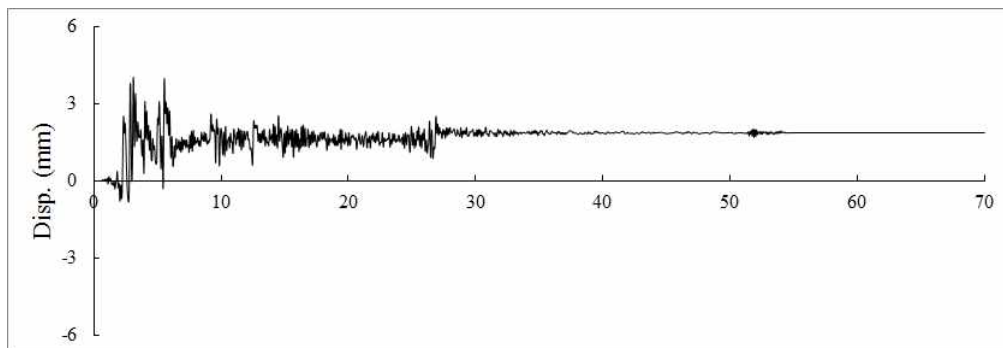
[변위 응답]



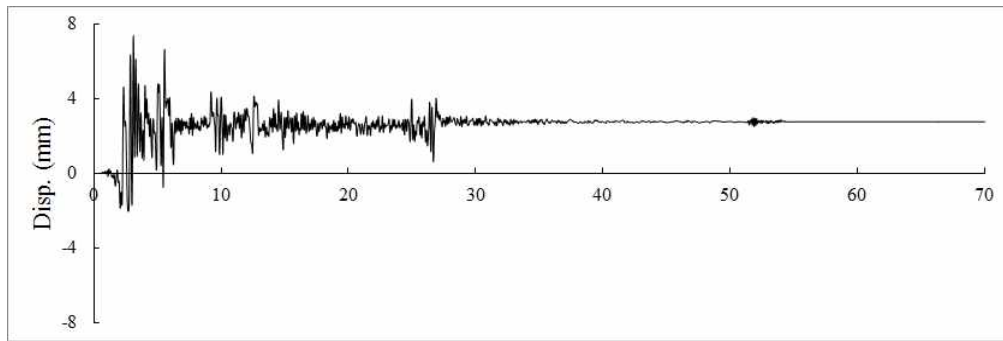
(a) 10%



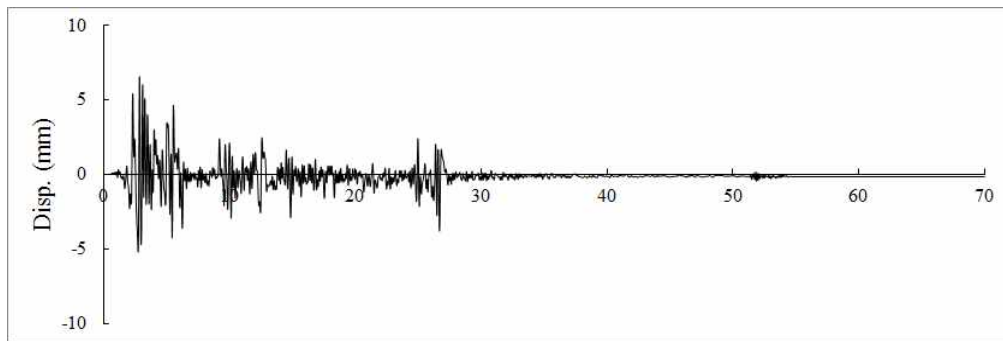
(b) 30%



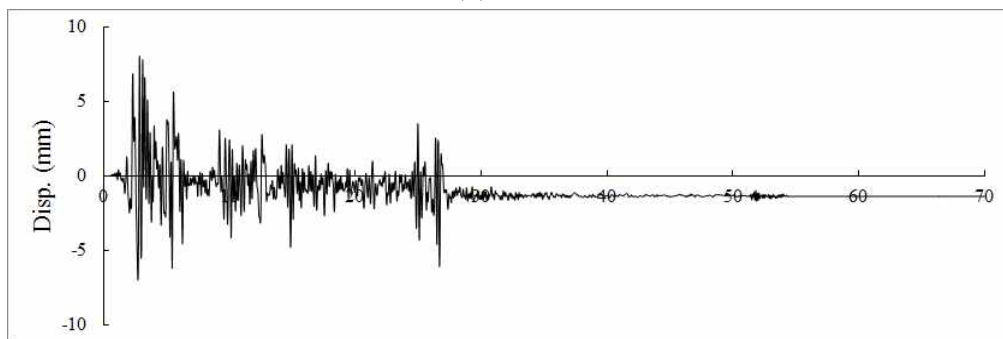
(c) 70%



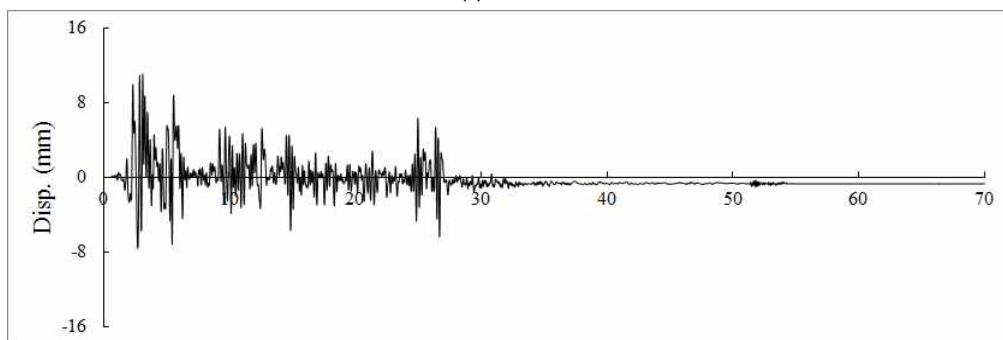
(d) 100%



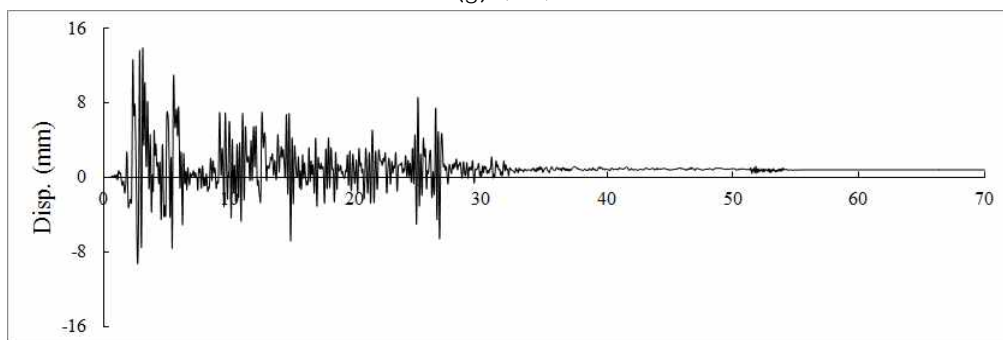
(e) 130%



(f) 160%

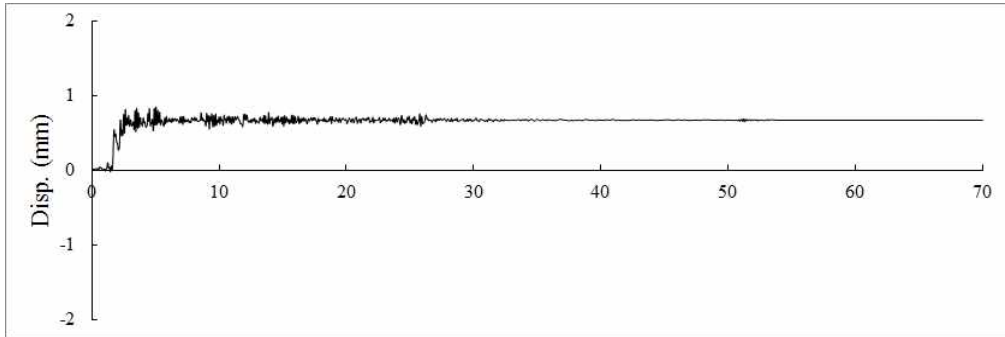


(g) 190%

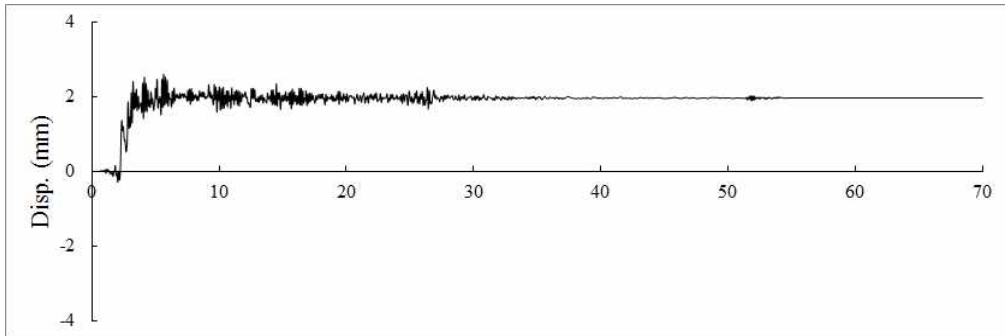


(h) 220%

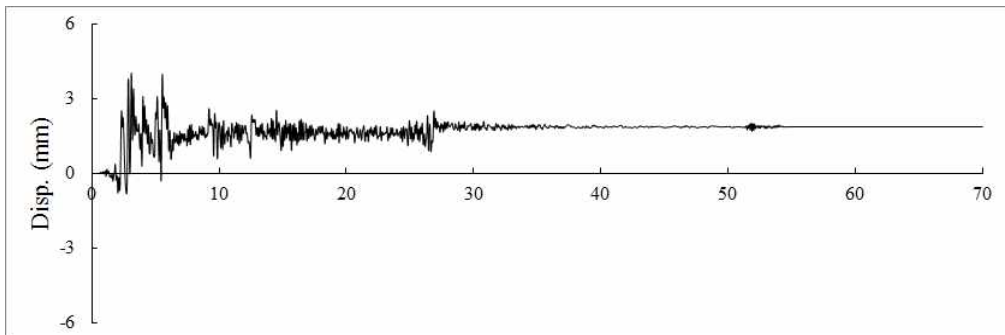
그림 3.133 상부변위(RCMWD0.0)



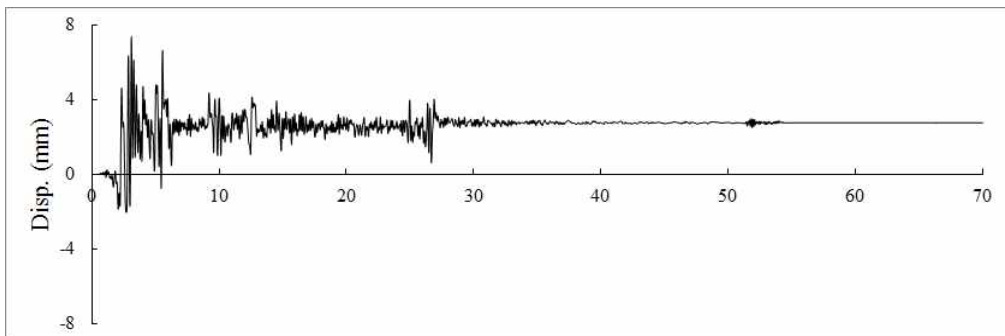
(a) 10%



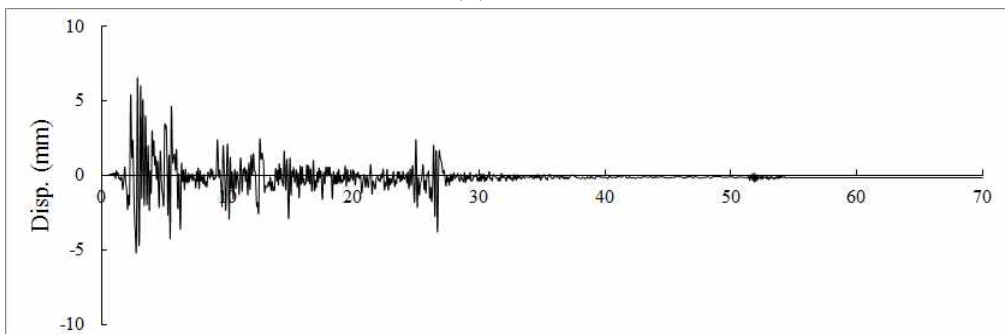
(b) 30%



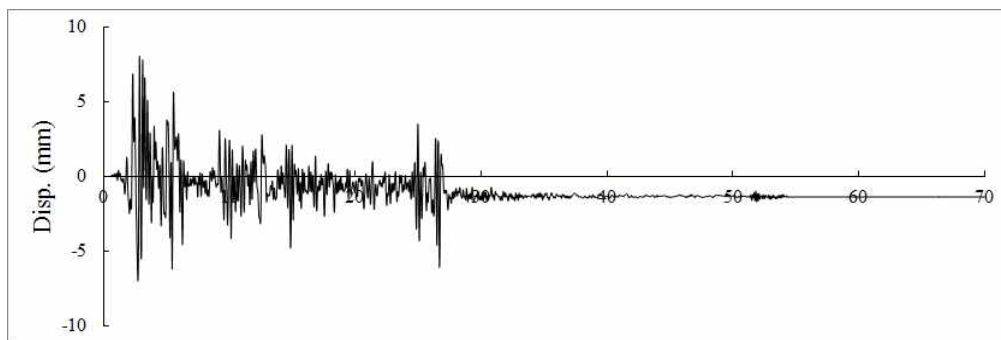
(c) 70%



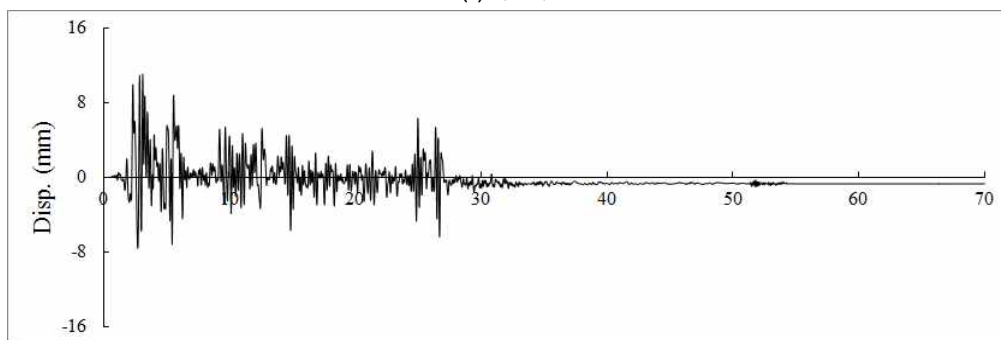
(d) 100%



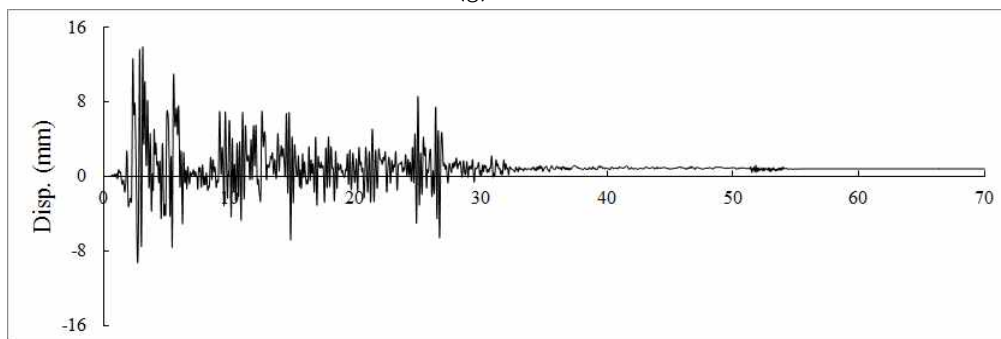
(e) 130%



(f) 160%

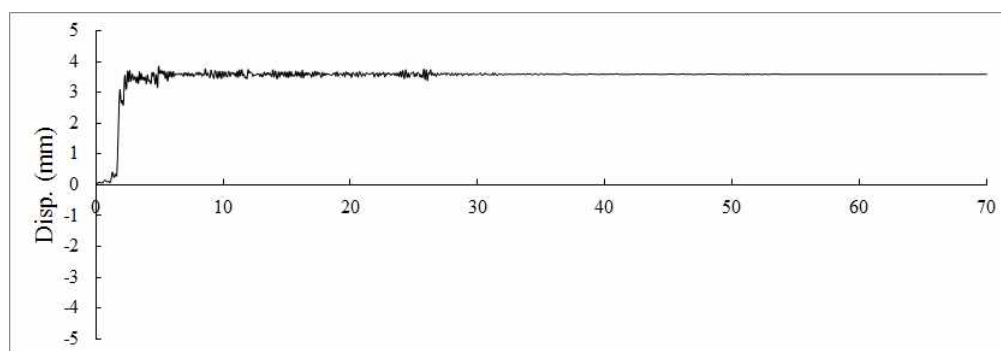


(g) 190%

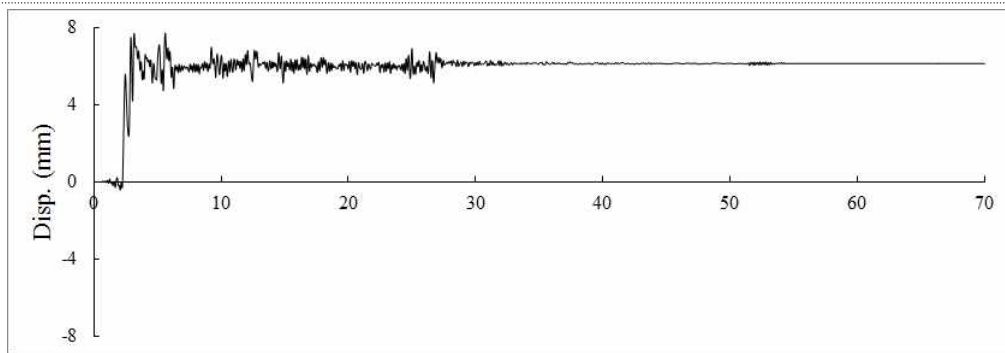


(h) 220%

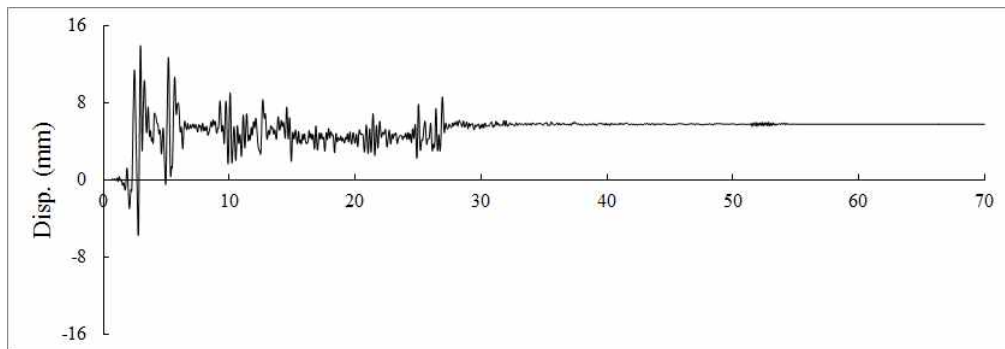
그림 3.134 상부변위(RCMWD0.5)



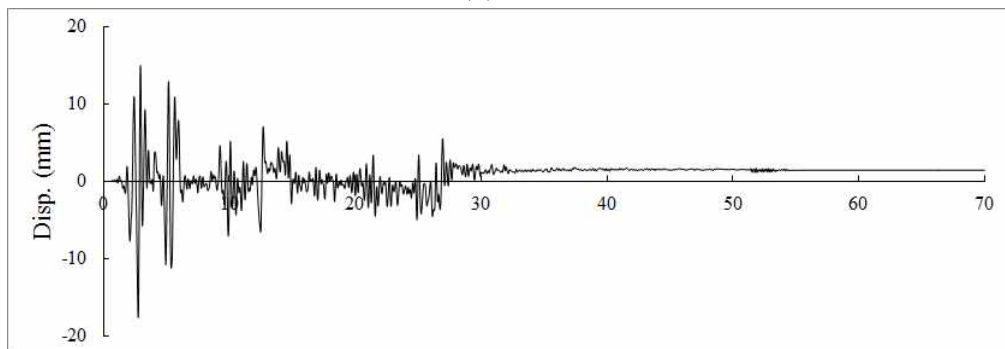
(a) 10%



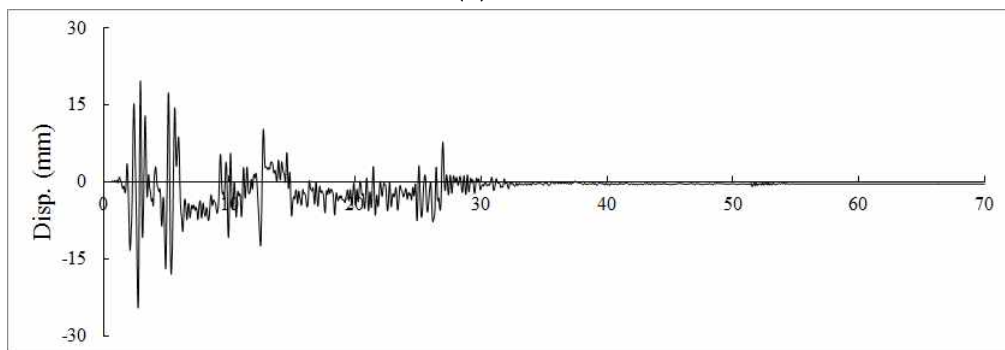
(b) 30%



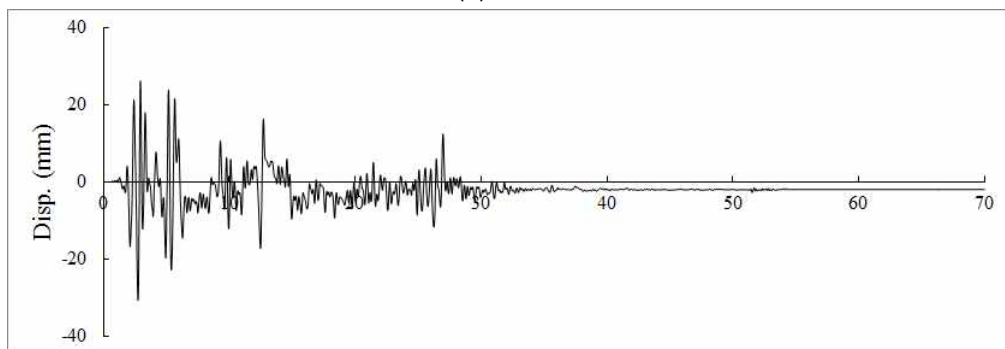
(c) 70%



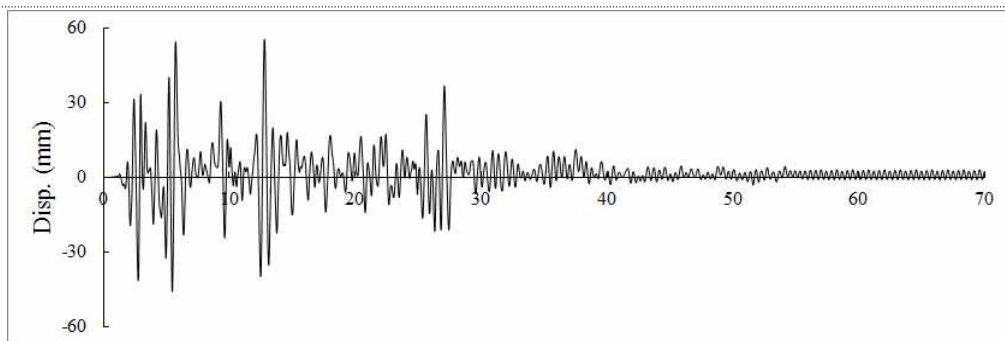
(d) 100%



(e) 130%

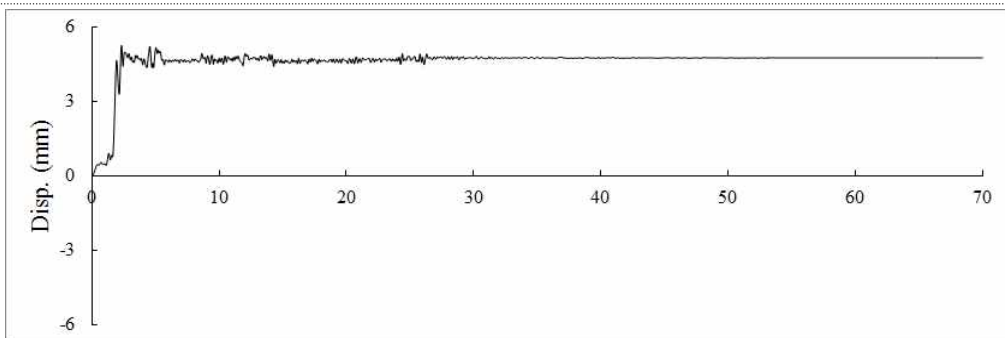


(f) 160%

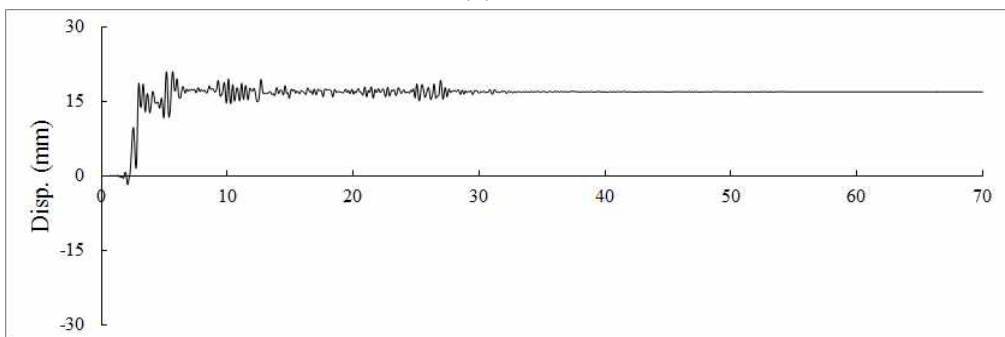


(g) 190%

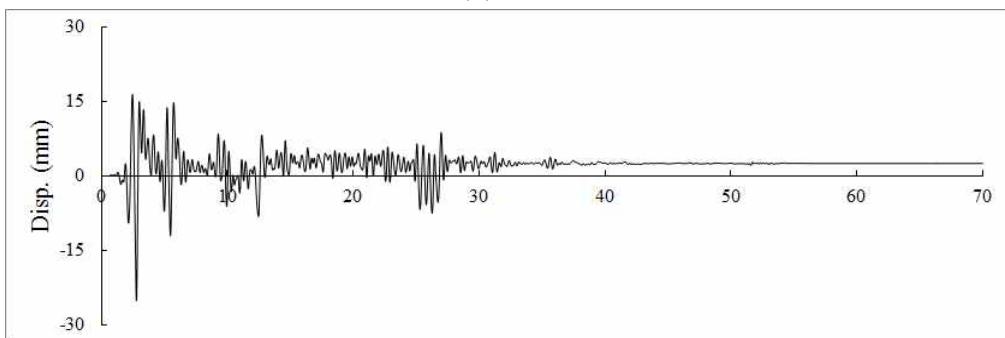
그림 3.135 상부변위(RCMWD1.0)



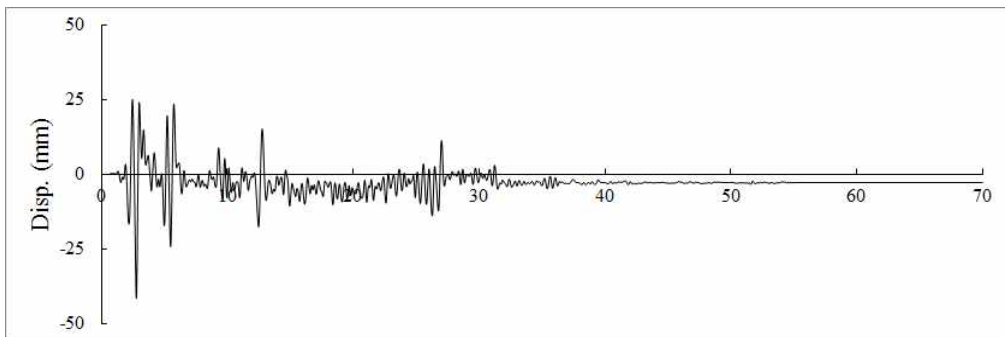
(a) 10%



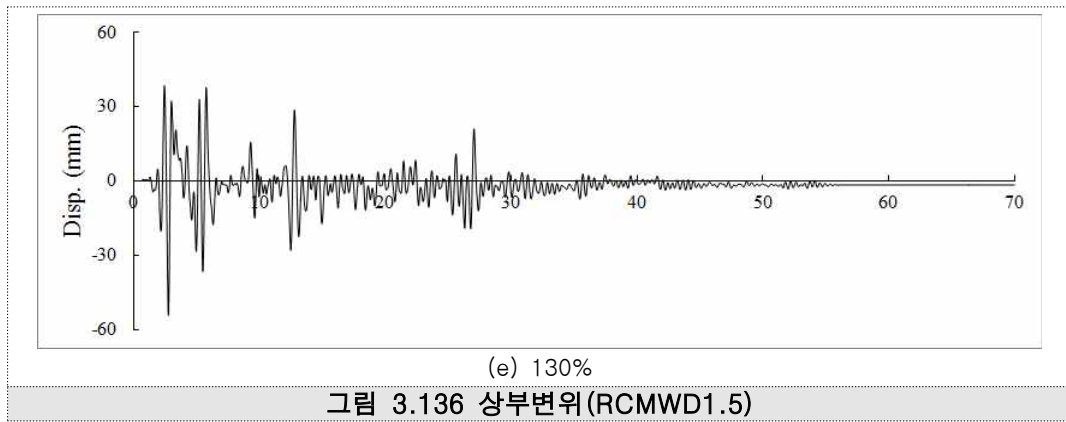
(b) 30%



(c) 70%



(d) 100%

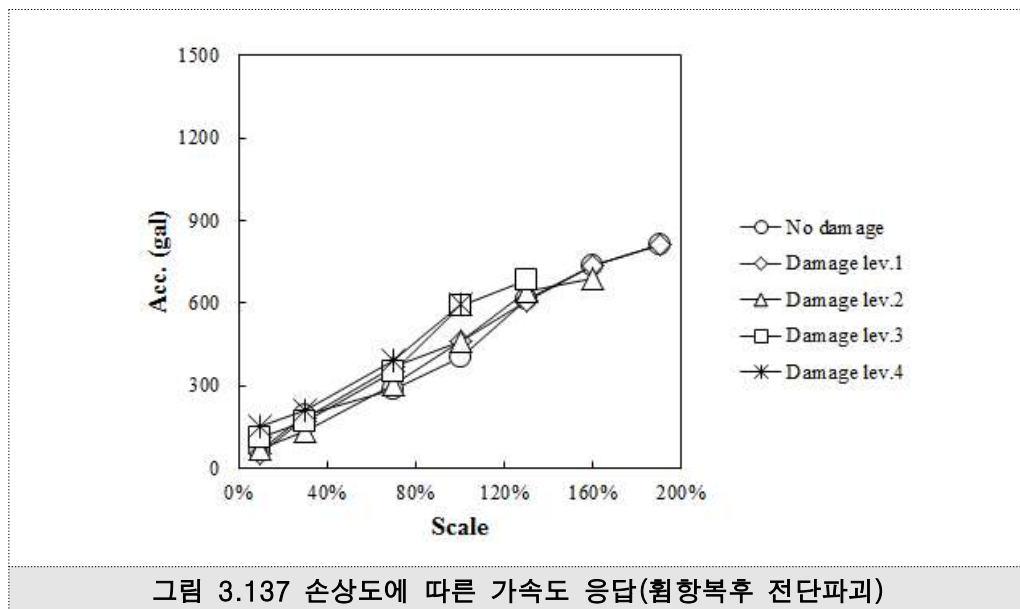


3. RC 골조의 잔류내진성능 및 붕괴위험도 평가

가. 손상도별 잔류내진성능 평가

(1) 휨항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC 골조

- ☐ 그림 3.137 ~ 그림 3.139은 비선형 지진응답해석 결과에 따른 휨항복후 전단파괴하는 RC 골조의 손상도별(정적 응답해석에 의한 해당 손상도 유발 후 동적 응답해석 실시) 최대응답값을 비교하여 나타낸 것임
- ☐ 손상도에 따른 가속도 응답은 거의 차이가 없는 것으로 나타난 반면에, 변위 응답은 손상도가 클수록 커지는 것으로 나타남
- ☐ 최종 누적흡수에너지는 손상도가 클수록 작아지는 것으로 나타남



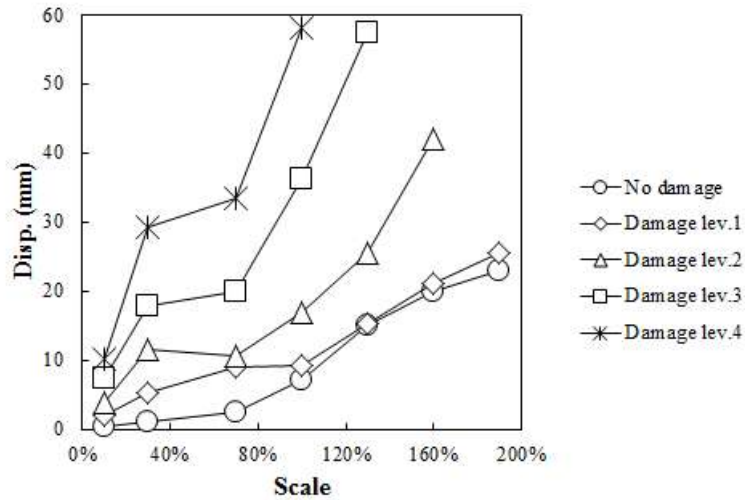


그림 3.138 손상도에 따른 변위 응답(휨항복후 전단파괴)

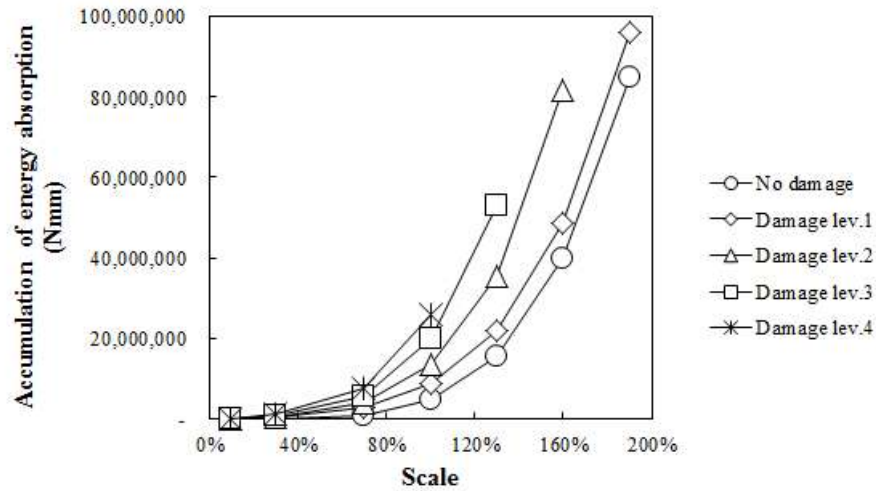


그림 3.139 손상도에 따른 누적흡수에너지(휨항복후 전단파괴)

- 그림 3.140 ~ 그림 3.142는 실험 및 해석결과에 의한 휨항복후 전단파괴하는 RC 골조의 내진성능저감계수를 나타냄
 - 내진성능저감계수 = 해당 손상도(동적실험의 경우, 가진스케일별)에 도달할 때까지의 누적흡수에너지 / 최종 누적흡수에너지의 비
 - 그림 중의 점선은 손상도 1~4를 나타냄
- 정적실험과 달리 동적실험에 의하여 동일 손상이 발생할 경우, 내진성능은 급격히 저하하는 것으로 나타났으며, 해석결과에 의한 내진성능저감계수는 정적실험결과에 의한 내진성능저감계수와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타남

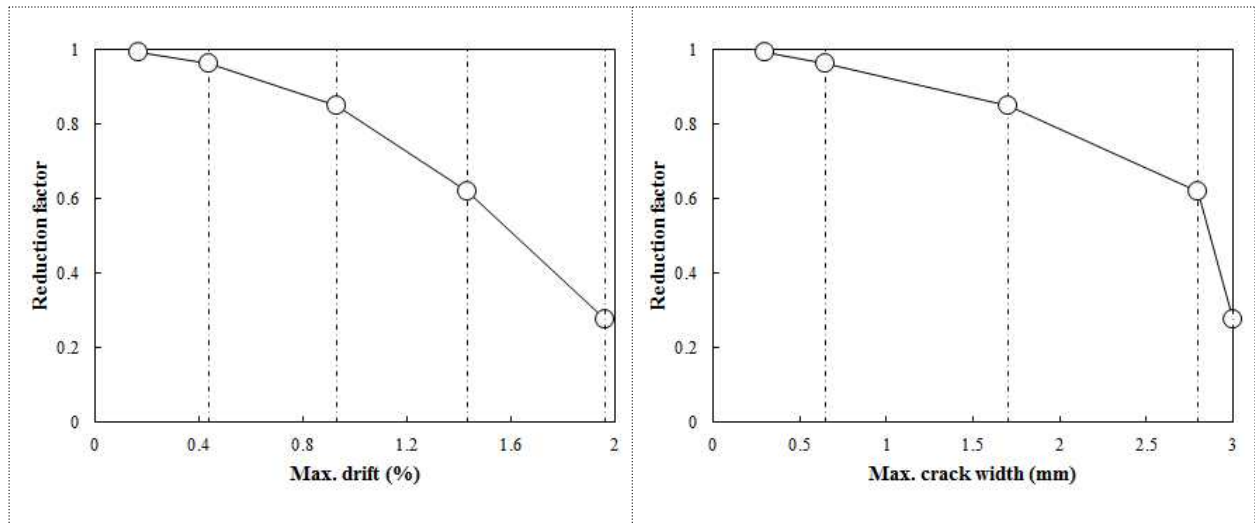


그림 3.140 정적실험에 의한 내진성능저감계수

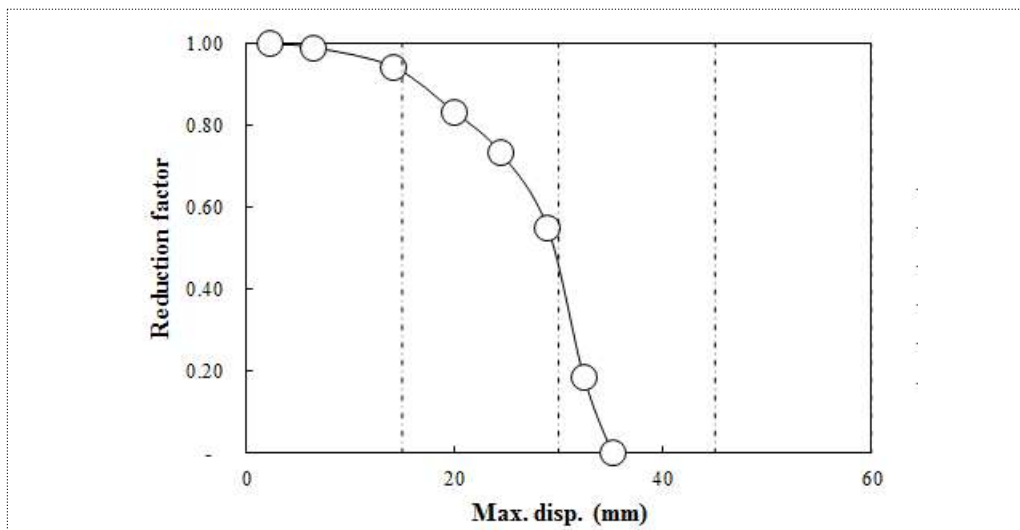


그림 3.141 동적실험결과에 의한 내진성능저감계수

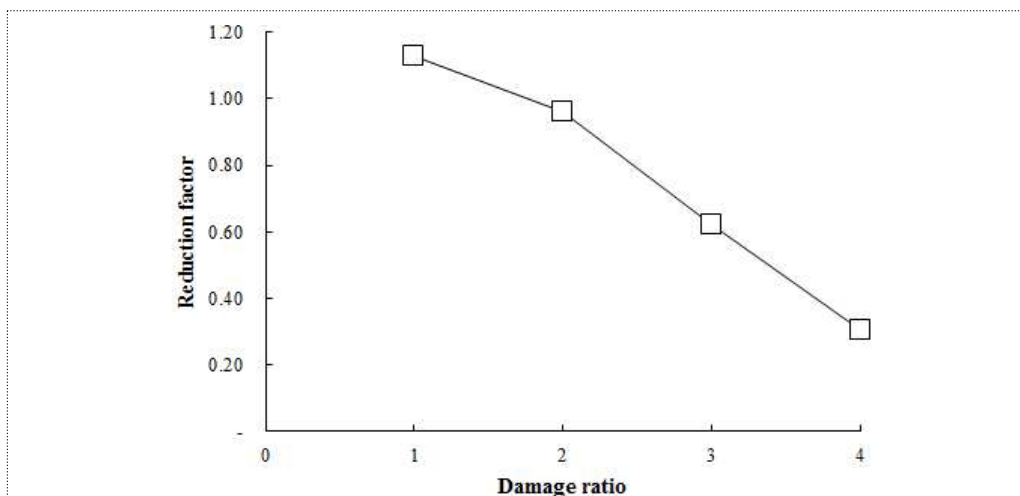


그림 3.142 비선형 지진응답해석결과에 의한 내진성능저감계수

(2) 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조

- 그림 3.143 ~ 그림 3.145는 비선형 지진응답해석 결과에 따른 전단파괴 RC 골조의 손상도별(정적 응답해석에 의한 해당 손상도 유발 후 동적 응답해석 실시) 최대응답값을 비교하여 나타낸 것임
- 손상도에 따른 가속도, 변위 응답 및 최종 누적흡수에너지는 손상도에 따라 뚜렷한 경향을 보이지 않음

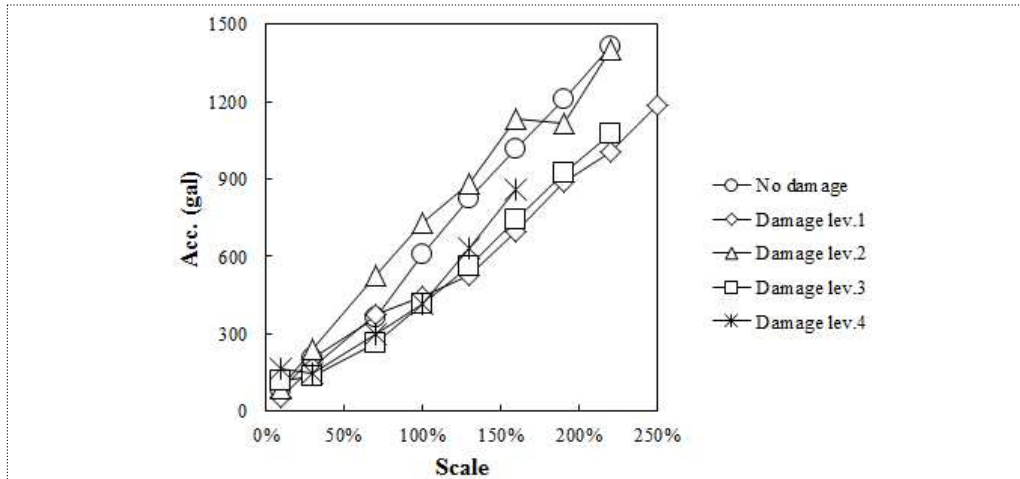


그림 3.143 손상도에 따른 가속도 응답(전단파괴)

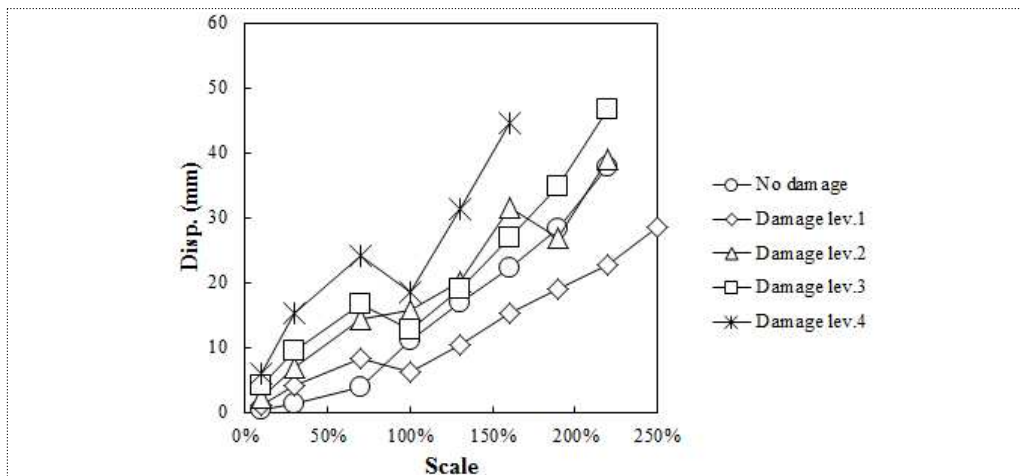


그림 3.144 손상도에 따른 변위 응답(전단파괴)

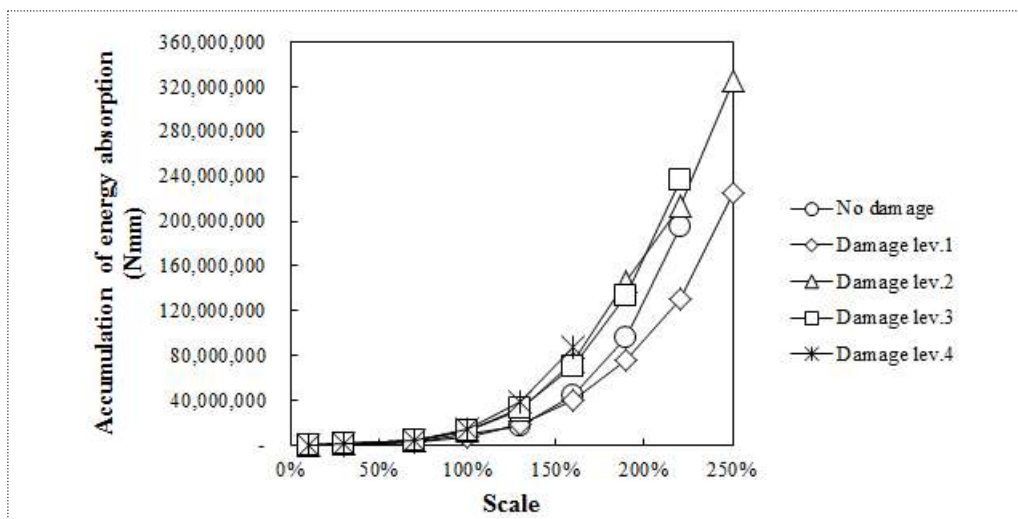
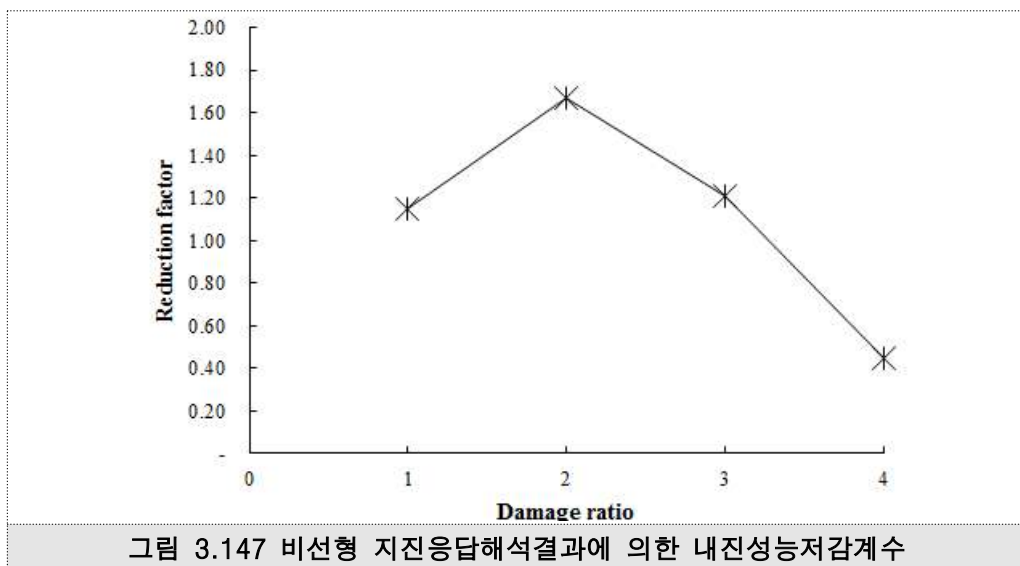
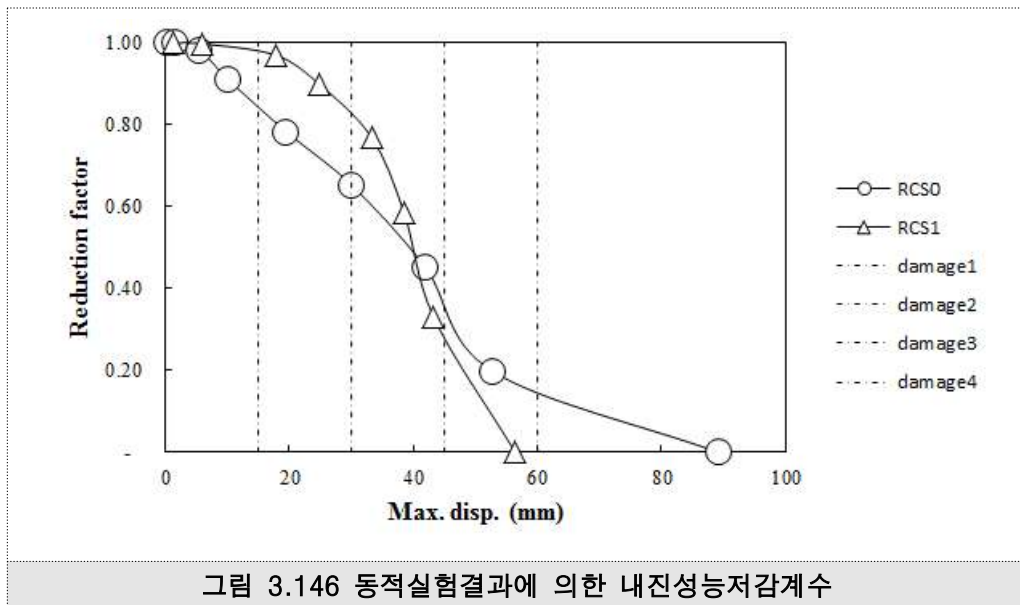


그림 3.145 손상도에 따른 누적흡수에너지(전단파괴)

- 그림 3.146 및 그림 3.147은 실험 및 해석결과에 의한 휨항복후 전단파괴하는 RC 골조의 내진성능저감계수를 나타냄
- 실험의 경우, 진동대 실험 전에 손상을 유발한 경우, 손상을 유발하지 않은 경우에 비하여 비교적 변위가 작은 구간에서는 손상에 따라 내진성능저하 폭이 작으나 변위가 큰 구간에서는 내진성능저하 폭이 커지는 것으로 나타남
- 해석의 경우, 손상도 1 ~ 손상도 3인 경우에 내진성능이 오히려 증가하는 경향을 보였으나 이는 해석 종료 시점(층간변형각 2% 이상의 변형이 발생한 경우)에서의 동일하지 않은 손상발생에 의한 영향이 반영된 것으로 판단됨



(3) 조적채움벽 RC 골조

- 그림 3.148 ~ 그림 3.150은 비선형 지진응답해석 결과에 따른 조적채움벽 RC 골조의 손상도별(정적 응답해석에 의한 해당 손상도 유발 후 동적 응답해석 실시) 최대응답값을 비교하여 나타낸 것임
- 손상도에 따른 가속도 응답은 거의 차이가 없는 것으로 나타난 반면에, 변위 응답은 손상도가 클수록

급격하게 커지는 것으로 나타남

- 최종 누적흡수에너지는 무손상인 경우에 비하여 정적응답해석을 통하여 손상을 유발시킨 경우에 커지는 것으로 나타났으며, 손상이 클수록 최종 누적흡수에너지는 작아지는 경향을 보임
 - 무손상인 경우에는 감쇠에 의한 흡수에너지가 가장 큰 반면에, 정적응답해석을 통하여 손상을 유발시킨 경우에는 손상에 의한 이력 흡수에너지가 가장 큰 것으로 나타남

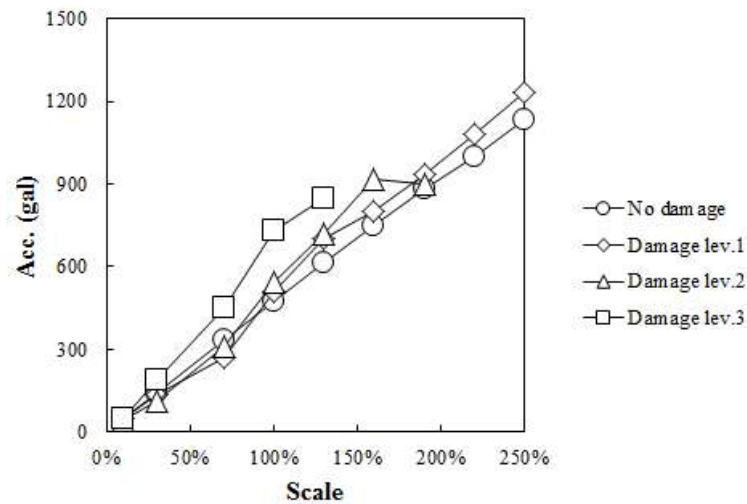


그림 3.148 손상도에 따른 가속도 응답(조적채움벽)

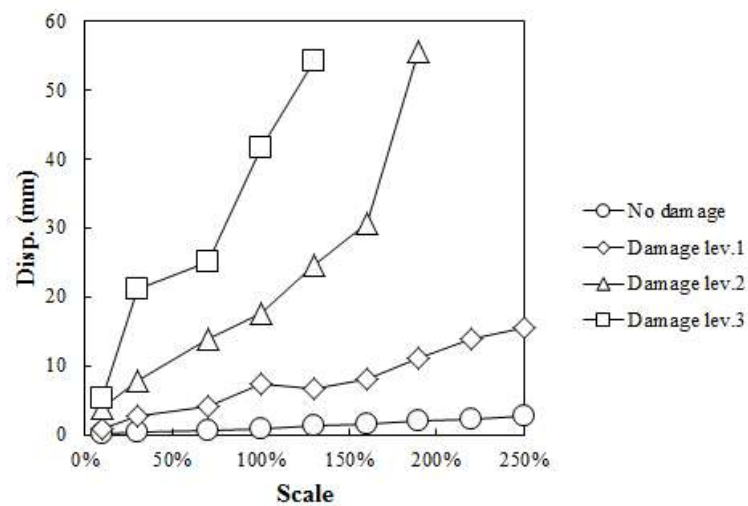
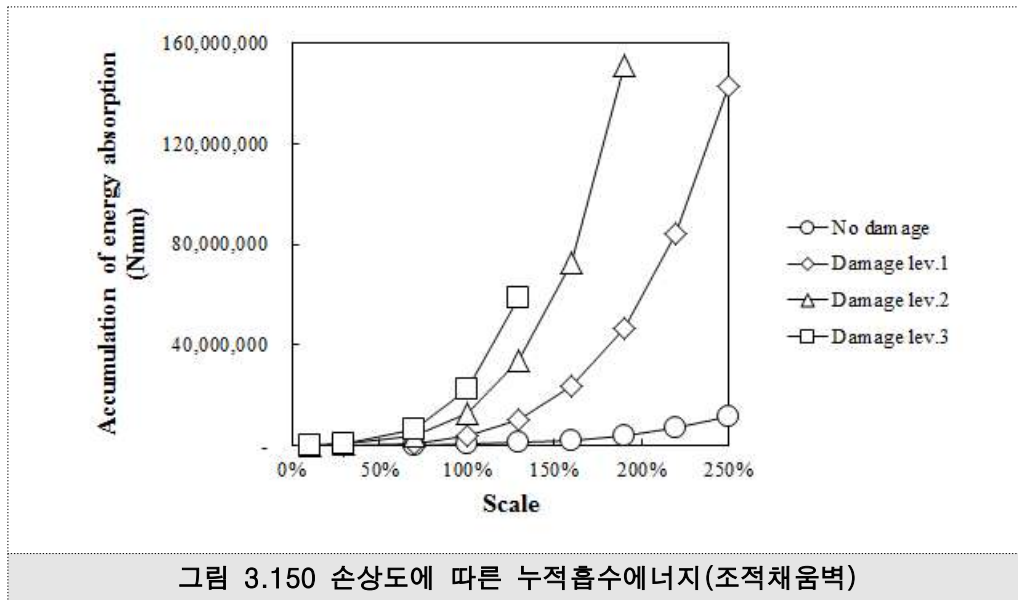
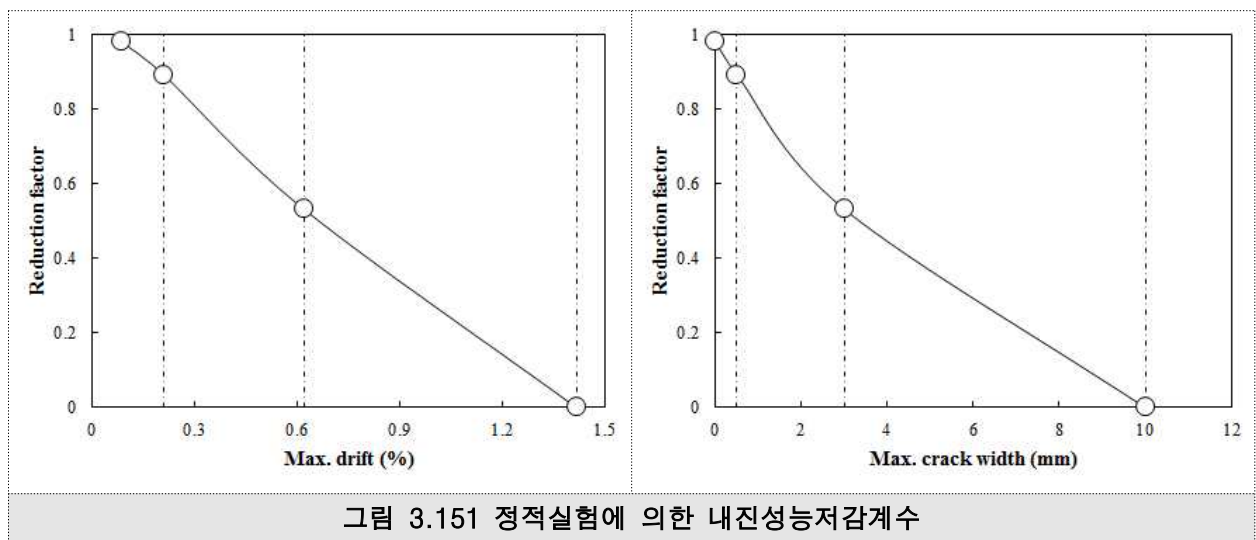


그림 3.149 손상도에 따른 변위 응답(조적채움벽)



- 그림 3.151은 실험 및 해석결과에 의한 휨항복후 전단파괴하는 RC 골조의 내진성능저감계수를 나타냄
 - 내진성능저감계수 = 해당 손상도(동적실험의 경우, 가진스케일별)에 도달할 때까지의 누적흡수에너지 / 최종 누적흡수에너지의 비
 - 그림 중의 점선은 손상도 1~4를 나타냄
- 정적실험과 달리 동적실험에 의하여 동일 손상이 발생할 경우, 내진성능은 급격히 저하하는 것으로 나타났으며, 해석결과에 의한 내진성능저감계수는 정적실험결과에 의한 내진성능저감계수와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타남



나. 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가

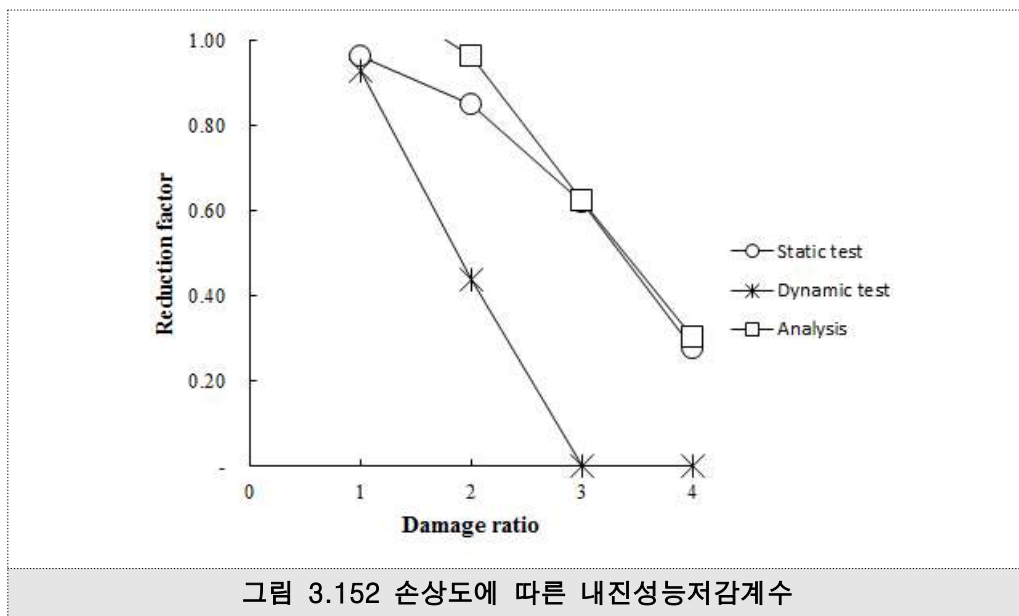
(1) 휨항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC 골조

- 표 3.29 및 그림 3.152는 휨항복후 전단파괴하는 RC 골조의 손상도에 따른 내진성능저감계수를 나타냄

- 정적실험 및 지진응답해석결과에 따른 손상도별 내진성능저감계수의 최소값을 기준으로 손상도별 내진성능저감계수를 제안하였으며, 이를 바탕으로 붕괴위험지수(1-내진성능저감계수)를 표 3.29에 제시함.

표 3.29 손상도에 따른 내진성능저감계수

손상도	최대 층간변형각 (%)	내진성능저감계수				붕괴위험지수
		정적실험	동적실험	지진응답해석	제안	
1	0.5	0.96	0.93	1.13	0.96	0.04
2	1.0	0.85	0.44	0.96	0.85	0.15
3	1.5	0.62	-	0.62	0.62	0.38
4	2.0	0.28	-	0.30	0.28	0.72

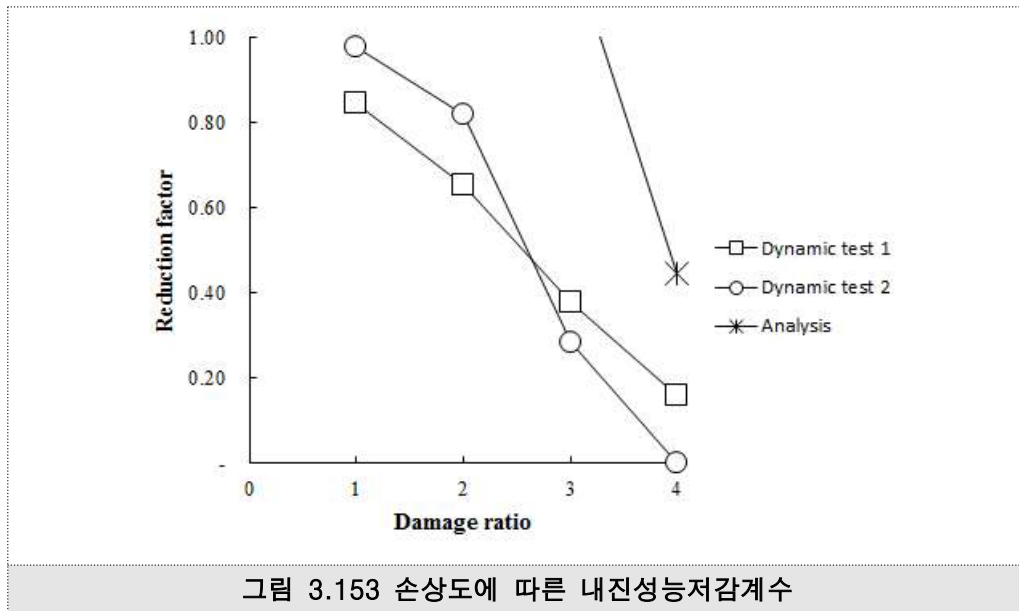


(2) 전단파괴 기동을 가지는 RC 골조

- 표 3.30 및 그림 3.153은 전단파괴 RC 골조의 손상도에 따른 내진성능저감계수를 나타냄
- 동적실험에 따른 손상도별 내진성능저감계수의 최소값을 기준으로 손상도별 내진성능저감계수를 제안하였으며, 이를 바탕으로 붕괴위험지수(1-내진성능저감계수)를 표 3.30에 제시함.

표 3.30 손상도에 따른 내진성능저감계수

손상도	최대 층간변형각 (%)	내진성능저감계수				붕괴위험지수
		동적실험		지진응답해석	제안	
1	0.5	0.84	0.98	1.15	0.84	0.16
2	1.0	0.65	0.82	1.67	0.65	0.35
3	1.5	0.38	0.29	1.21	0.29	0.71
4	2.0	0.16	-	0.44	0.16	0.84

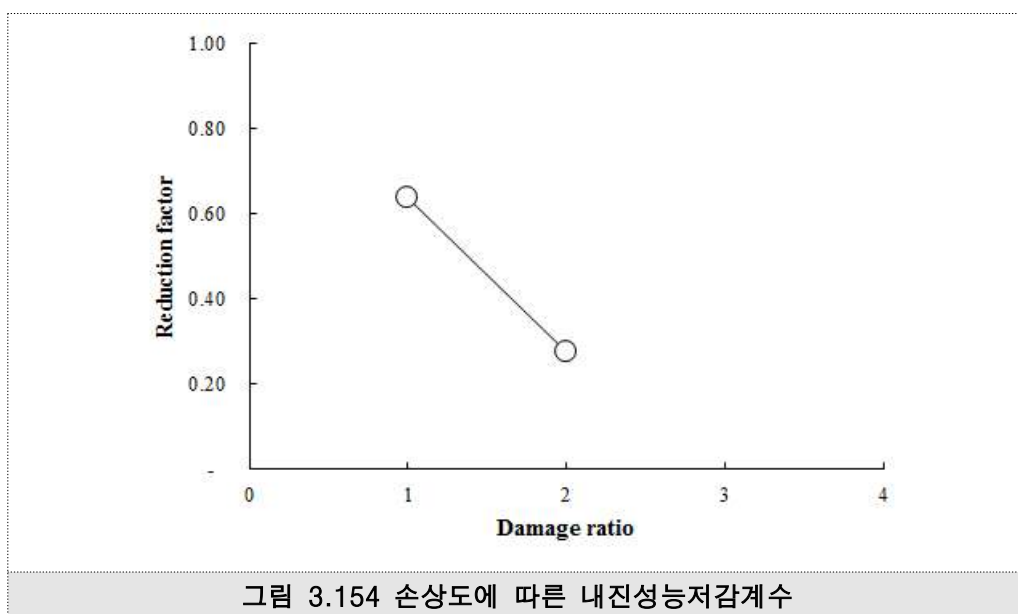


(3) 조적채움벽 RC 골조

- 표 3.31 및 그림 3.154는 조적채움벽 RC 골조의 손상도에 따른 내진성능저감계수를 나타냄
- 정적실험에 따른 손상도별 내진성능저감계수를 기준으로 손상도별 내진성능저감계수를 제안하였으며, 이를 바탕으로 붕괴위험지수(1-내진성능저감계수)를 표 3.31에 제시함.

표 3.31 손상도에 따른 내진성능저감계수

손상도	최대 층간변형각 (%)	내진성능저감계수			붕괴위험지수
		정적실험	지진응답해석	제안	
1	0.5	0.64	12.3	0.64	0.36
2	1.0	0.28	13.0	0.28	0.72
3	1.5	—	5.0	—	—



4. 연구 성과

가. 기술적 성과

- (1) 비내진상세를 가지는 RC골조의 기둥 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가기법
 - ☐ 휨항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시
 - ☐ 전단파괴 기둥을 가지는 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시
- (2) 비내진상세를 가지는 조적채움벽 RC골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법
 - ☐ 조적채움벽 RC골조의 손상도별 내진성능저감계수 제시
- (3) 비내진상세를 가지는 RC골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법
 - ☐ 휨항복후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC골조의 붕괴위험지수 제시
 - ☐ 전단파괴 기둥을 가지는 RC골조의 붕괴위험지수 제시
 - ☐ 조적채움벽 RC골조의 붕괴위험지수 제시

손상도	내진성능저감계수			붕괴위험지수		
	휨항복후 전단파괴	전단파괴	조적채움벽	휨항복후 전단파괴	전단파괴	조적채움벽
1	0.96	0.84	0.64	0.04	0.16	0.36
2	0.62	0.65	0.28	0.15	0.35	0.72
3	0.38	0.29	-	0.38	0.71	-
4	0.16	0.16	-	0.72	0.84	-

나. 연구 실적물

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	고강도 철근을 적용한 철근콘크리트 전단벽체의 내진성능평가를 위한 해석적 연구	한국구조물진단유지공학회 논문집	천주현	2	대한민국	한국구조물진단유지공학회	비SCI	2017.03
2	전단변형 효과가 고려된 보-기둥 섬유유한요소를 이용한 철근콘크리트 보의 비탄성 거동특성 평가	한국구조물진단유지공학회 논문집	천주현	3	대한민국	한국구조물진단유지공학회	비SCI	2017.05
3	진동대실험을 통한 비내진상세를 가지는 RC골조의 조적채움벽 유무에 따른 동적 거동 평가	한국구조물진단유지공학회 논문집	백은림	3	대한민국	한국구조물진단유지공학회	비SCI	2017.05
4	정적실험을 통한 조적조채움벽체가 비내진상세 RC골조의 내진성능에 미치는 영향평가	한국구조물진단유지공학회 논문집	김경민	3	대한민국	한국구조물진단유지공학회	비SCI	2017.05

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		질적 성과목표				양적 성과목표		가중치
					성과지표	목표치	검증 방법	달성 여부	성과지표	달성 여부	
1차 년도	A	비내진상세를 가지는 RC골조의 기둥 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가기법	A-1	휨항복 후 전단파괴하는 기둥을 가지는 RC골조의 잔류내진성능 평가기법	평가식	1건	보고서	○	논문 1건	○	20%
			A-2	전단파괴 기둥을 가지는 RC 골조의 잔류내진성능 평가기법	평가식	1건	보고서	○	논문 1건	○	20%
2차 년도	B	비내진상세를 가지는 조적채움벽 RC골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법	B-1	조적채움벽 RC골조의 잔류내진성능 평가기법	평가식	1건	보고서	○	논문 1건	○	30%
	C	비내진상세를 가지는 RC골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가기법	C-1	기둥 파괴모드 및 조적채움벽에 의한 RC골조의 붕괴위험도 평가	평가 기준	1건	보고서	○	논문 1건	○	30%
계						4건			4건		100%

2. 관련 분야 기여도

연번	핵심성과	주요 내용
1	비내진상세를 가지는 RC골조의 기동 파괴형식에 따른 손상도별 잔류내진성능 평가기법	- 비내진상세를 가지는 건축물의 손상정도에 따른 잔류내진성능평가에 대한 연구는 국내외적으로 거의 수행되지 않음 - 본 연구에서는 정적 및 동적실험, 비선형지진응답해석을 종합적으로 고려하여 비내진상세를 가지는 RC골조에 대하여 파괴형식(휨항복후 전단파괴, 전단파괴)에 따라 손상도별 잔류내진성능을 평가할 수 있는 내진성능저감계수를 제시함 - 본 연구개발성과를 활용하여 지진발생시 RC골조의 손상정도에 따라 남아있는 내진성능을 간편하게 예측하는 것이 가능할 것으로 판단됨
2	비내진상세를 가지는 조적채움벽 RC골조의 손상도별 잔류내진성능 평가기법	- 비내진상세를 가지는 건축물의 손상정도에 따른 잔류내진성능평가에 대한 연구는 국내외적으로 거의 수행되지 않았으며, 조적채움벽체의 골조와의 영향은 명확하게 규명되지 않은 실정임 - 본 연구에서는 정적 및 동적실험, 비선형지진응답해석을 종합적으로 고려하여 비내진상세를 가지는 조적채움벽 RC골조에 대하여 손상도별 잔류내진성능을 평가할 수 있는 내진성능저감계수를 제시함 - 본 연구개발성과를 활용하여 지진발생시 RC골조의 손상정도에 따라 남아있는 내진성능을 간편하게 예측하는 것이 가능할 것으로 판단됨
3	비내진상세를 가지는 RC골조의 연속지진에 대한 붕괴위험도 평가 기법	- 국외의 경우, 단기 및 장기적으로 연속적으로 발생하는 지진에 대한 구조물의 내진성능평가에 관한 연구 필요성이 제기되면서 관련연구가 시작되고 있는 단계이며, 국내의 경우, 연속지진에 대한 건축물의 내진성능저하에 관한 연구는 수행된 바 없음 - 본 연구에서는 비내진상세를 가지는 RC골조에 대하여 파괴형식(휨항복후 전단파괴, 전단파괴), 및 조적채움벽 존재에 따른 손상도별 잔류내진성능을 바탕으로 붕괴위험지수를 제시함 - 본 연구개발성과를 활용하여 지진발생시 RC골조의 손상정도에 따라 붕괴위험정도를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- (재난대비) 국민안전처에서 단계적으로 추진 중인 공공시설물의 내진보강사업에 활용하여 한정된 예산과 자원의 낭비 방지
 - 내진보강사업을 실시하여야 하는 정부부처 및 지방자치단체에서 내진보강대상 시설물의 정확한 보유 내진성능 평가를 통하여 내진보강 필요 유무 및 적정 내진보강기법 선정 가능
 - 학교시설 등 내진보강사업 대상 시설물의 적정 내진보강을 통한 지진안전 확보
 - 내진성능 평가를 통하여 내진보강이 필요하지 않을 수도 있으며, 이 경우, 내진보강공사 미실시에 따른 탄소배출 저감 효과 기대
 - 민간 건축물의 내진보강공사에 대한 적정 기준을 제시함으로써 부실공사 방지 및 국민 안전 확보
- (재난대비) 국토교통부 소관 성능기반 내진설계기준 제·개정에 활용
 - 철근콘크리트 건축물의 성능기반 내진설계방법 정립 및 기술 확보를 위한 기초자료로 활용
 - 정량적 손상도 평가에 근거한 성능기반 내진설계 기준 제시
- (재난대응) 지진발생시 신속하고 원활한 시설물의 위험도 평가 기술개발에 활용함으로써 2차 인명 및 재산피해 방지
 - 여진을 고려한 위험도 평가 기술을 적용함으로써 안전하고 정확한 시설물의 위험도 평가 기대
- (재난대응) 119구조대의 국제 지진피해 현장 대응 및 이에 필요한 기술 개발에 활용
 - 연속지진에 따른 건축물의 붕괴위험성에 관한 정보를 제공함으로써 국제 지진피해 현장에 파견되는 119구조대의 안전한 구조활동 가능
- 국제경쟁력을 갖춘 철근콘크리트 부재의 손상량 평가에 근거한 손상도 및 내진성능 평가 기술 확보를 통하여 건축물 전체의 정량적 내진성능 평가 기술 개발 연구에 활용
 - 본 연구의 최종성과물을 정량적인 손상도 평가를 바탕으로 한 신규 및 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능 평가 관련 연구에 활용함으로써 관련 분야의 국제적인 경쟁력 확보 가능
 - 건축물 전체의 손상도 및 내진성능 평가 기술 개발 연구에 활용
 - 국내 기존 노후 건축물의 성능열화에 의한 균열 등의 손상 상태에 따른 손상도 및 내진성능 평가 기법 개발 연구에 활용

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 조적채움벽의 골조 내진성능에의 영향

- 1950년대 후반 이후 조적채움벽 RC 골조에 대한 실험적 및 해석적 연구가 진행되어왔으나, 조적채움벽이 RC 골조의 내진취약성을 증가 혹은 감소시키는지 명확하게 규명된 것은 없는 실정임
 - 조적채움벽은 건축물의 성능에 유리 또는 불리하게 작용할 수 있음(Negro and Colombo, 1997; Hashemi and Mosalam, 2006)
 - 조적채움벽은 RC 골조의 횡저항능력을 향상시킬 수 있으나, 기둥의 취성파괴를 유발할 수도 있음. 특히, 채움벽이 강할 경우 주의 필요
 - (내진취약성 증가) 조적채움벽은 골조의 응답에 불리한 영향을 끼치며, 건축물의 붕괴를 유발할 수 있음
 - 조적채움벽은 구조물 전체에 규칙적으로 배치되고, 기둥의 전단파괴를 유발하지 않으면 구조 응답에 효과적일 수 있음(Dolsek and Fajfar Column, 2008)
- 조적채움벽은 골조의 강성을 증가시켜 변형을 제한하는 효과가 있음
 - 바람이나 규모가 작은 지진에는 효과적이거나, 규모가 큰 지진에 대해서는 부정적인 영향을 미칠 수 있음(M. Aliaari, 2005)
- 조적채움벽의 효과를 무시하는 것은 안전한 내진설계가 아닐 수 있음(A. Colombo, 1998)
 - 조적채움벽이 단순히 구조물의 수평 내력만 향상시킨다는 가정은 구조물의 에너지흡수능력을 과대평가하여 심각한 구조적 손상과 구조물 붕괴를 초래할 수 있음

[주요 실험적 연구]

- 실제 구조물의 2/3 크기의 3층 2경간 시험체를 대상으로 하여 조적채움벽 유무를 변수로 진동대 실험 실시한 결과, 시험체는 최종적으로 취성파괴 되었으나, 설계 수준의 지진동에 대하여 만족할 만한 성능을 보임(A. Stavridis et al, 2011)
 - 설계하중 수준의 지진에 대하여 경미한 균열이 발생하였으며, 설계 최대하중 보다 43% 큰 지진에 대하여 RC 기둥에 심각한 전단균열이 발생함
- 1층 1×2경간 시험체에 대한 진동대 실험 결과, 조적채움벽은 시험체 전체의 강도 및 연성에 중요한 역할을 하는 것으로 나타남(A. Hashemi et al, 2006)
 - (전체 거동) 조적채움벽에 의하여 골조의 강성 증가(3.8), 고유주기 감소(50%), 감쇠정수 증가(4, 5~12%), 흡수에너지 증가
 - (국부 거동) 조적채움벽은 인접 부재에 입력되는 하중의 크기를 증가시킴(조적채움벽은 다이아프램과 collector 부재에 입력되는 하중을 30% 증가시킴)으로써 서로 다른 부재간의 하중 경로와 분포를 변화시킴
- 실규모 3층 1×2경간 시험체에 대한 정적반복가력실험을 통하여 조적채움벽 효과를 확인함(S. Pujol et al, 2010)
 - 조적채움벽에 의하여 강도(100%) 및 강성(500%) 증가

- 변형능력은 감소(50%)하지만 층간변형각 1.5% 까지 높은 내하력을 유지하는 것으로 나타남.
- 1/3스케일 1층 1경간 시험체의 정적반복가력실험을 통하여 개구부 형상, 조적채움재료의 압축강도 등에 따른 조적채움벽의 RC 골조에의 영향 평가(D. J. Kakaletsis et al, 2008)
 - 변수 : 조적채움벽 유무, 조적채움벽 개구부 형상, 조적채움벽 압축강도
 - 개구부가 있는 조적채움벽도 RC 골조의 성능을 향상시킬 수 있음
 - 조적채움벽의 균열 수평 내력이 기둥의 허용 전단 내력보다 작으면 개구부 유무에 상관없이 골조의 취성적 파괴를 막을 수 있음
 - 압축강도가 큰 조적채움재료를 사용한 경우 성능(하중, 강성, 연성, 에너지흡수능력)이 더 향상됨.
 - 압축강도가 큰 재료일수록 균열이 더 잘 분산되므로 에너지흡수에 효과적임
 - 수평변위가 작은 경우, 개구부가 있는 시험체의 에너지흡수능력이 조적채움벽이 없는 시험체보다 크지만, 수평변위가 큰 경우, 조적채움벽에 없는 시험체와 비슷한 수준의 에너지흡수능력을 보임
- 3층의 인접한 두 개의 건축물(RC 골조, 조적채움벽 RC 골조)의 진동 측정 결과, 조적채움벽 RC 골조 건축물이 RC 골조 건축물과 비교하여 주기가 짧고 강성이 약 7배 큰 것으로 나타남(Amar A. Chaker et al, 1999)

[주요 해석적 연구]

- 조적채움벽과 RC 골조의 상호작용을 N2 Method에 의하여 해석적으로 평가하였으며, 그 결과 강한 조적채움벽은 건축물의 예상 구조 반응을 변화시킬 수 있는 것으로 나타남(G. Uva et al, 2012)
 - N2 Method : 다자유도 및 1자유도 모델에 대한 비선형 정적응답 해석(pushover analysis) 실시
 - 조적채움벽이 전체 구조물 응답에 미치는 영향은 변수에 크게 좌우되기 때문에, 조적채움벽의 역학적 특성을 정확히 아는 것이 중요함
- 실제 건축물과 지진파를 이용하여 3차원 비선형 지진응답해석을 실시한 결과, 조적채움벽은 지진시 해당 건축물이 선형 거동에 머무를 수 있도록 중요한 역할을 한 것으로 나타남(H. Mostafaei, 2004)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안	일반
	○

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

- 해당없음

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 본 연구의 실험은 한국건설생활환경시험연구원 및 부산대학교 소재 지진실험센터에서 실시하였으며,, 해당 시설은 모두 실험관련 전문 인력들이 상주해 있으면서, 실제적으로 실험을 총괄하여 관리 · 감독하여 안전하게 실험 실시
- 자체 안전관리규정에 따라 참여연구원의 교육훈련 및 건강검진을 매년 주기적으로 실시

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	고강도 철근을 적용한 철근콘크리트 전단벽체의 내진성능평가를 위한 해석적 연구	KCL	제1 저자	한국구조물 진단유지공 학회	-	2017.03	○	비SCI
2	논문	전단변형 효과가 고려된 보-기둥 섬유유한요소를 이용한 철근콘크리트 보의 비탄성 거동특성 평가	KCL	제1 저자	한국구조물 진단유지공 학회	-	2017.05	○	비SCI
3	논문	진동대실험을 통한 비내진상세를 가지는 RC골조의 조적채움벽 유무에 따른 동적 거동 평가	부산대 학교	교신 저자	한국구조물 진단유지공 학회	-	2017.05	○	비SCI
4	논문	정적실험을 통한 조적조 채움벽체가 비내진상세 RC골조의 내진성능에 미치는 영향평가	KCL	교신 저자	한국구조물 진단유지공 학회	-	2017.05	○	비SCI

제11장. 기타 사항

해당없음

제12장. 참고 문헌

- FEMA-306, "Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings," ATC, 1998.
- P. Negro and A. Colombo, "Irregularities Induced by Nonstructural Masonry Panels in Framed Buildings," *Engineering Structures*, 19(7), pp.576-585, 1997
- A. Hashemi and K. M. Mosalam, "Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Including Effects of Masonry Infill Walls," PEER Report 2007/100, 2007.
- Dolsek and Fajfar Column, "The Effect of Masonry Infills on the Seismic Response of a Four Storey Reinforced Concrete Frame - a Probabilistic Assessment," *Engineering Structures*, 30, pp. 1991-2001, 2008.
- M. Aliaari and A.M. Memari, "Analysis of Masonry Infilled Steel Frame with Seismic isolator Subframes," *Engineering Structures*, 27, pp.487-500, 2005.
- A. Colombo, P. Negro, and G. Verzeletti, "Certainties and Uncertainties", In *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France, pp.10, 1998.
- A. Stavridis, I. Koutromanos, and P.S. shing, "Shake-table Tests of a Three-story Reinforced Concrete Frame with Masonry infill Walls," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011.
- A. Hashemi and K.M. Mosalam, "Shake-table Experiment on Reinforced Concrete Structure Containing Masonry Infill Wall," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, pp.1827-1852, 2006.
- S. Pujol, A. Bemavent-climent, M.E. Rodriguez, and J.P. Smith-Pardo, "Masonry Infill Walls: An Effective Alternative for Seismic Strengthening of Low-rise Reinforced Concrete Building Structures," *the 14th WCEE*, pp.1-8, 2008.
- D. J. Kakaletsis and C.G. Karayannis, "Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames under Cycling Loading," *Journal of Earthquake Engineering*, 12, pp.197-221, 2008.
- Amar A. Chaker and A. Cherifati, "Influence of Masonry Infill Panels on the Vibration and Stiffness Characteristic of R/C Frame Buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, pp.1061-1065, 1999.
- G. Uva, F. Porco, and A. Fiore, "Appraisal of Masonry Infill Walls Effect in the Seismic Response of RC Framed Buildings: A Case Study," *Engineering Structures*, 34, pp.541-526, 2012.
- H. Mostafaei and T. Kabeyasawa, " Effect of Infill Masonry Walls on the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings Subjected to the 2003 Bam Earthquake

Strong Motion: A Case Study of Bam Telephone Center," Bull. Earthq. Res. Inst., 79, pp.133-156, 2004.

- 고현, "비내력 조적벽의 영향을 고려한 철근콘크리트모멘트골조의 내진성능 평가," 성균관대학교 박사 학위논문, 2010.
- 이상현 등, "조적 끼움벽 및 허리벽을 가지는 철근콘크리트 골조 내진성능평가," 2010 한국지진공학회 추계 워크샵, 2010.
- Structural Engineers Association of California (SEAOC), Vision 2000 Committee, "Vision 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings," Sacramento, CA, Apr. 1995.
- J. Moehle, G. G. Deierlien, "A Framework Methodology for Performance-Based Earthquake Engineering," 13th WCEE, Paper No.679, Aug. 2004.
- R. Hamburger, C. Rojahn, J. Moehle, R. Bachman, C. Comartin, A. Whittaker, "The ATC-58 Project: Development of Next-Generation Performance-Based Earthquake Engineering Design Criteria for Buildings," 13th WCEE, Paper No.1819, Aug. 2004.
- 日本防災協會, "震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針," 日本建築防災協會, 2001, 9.
- 日本建築學會, "鐵筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説," 日本建築學會, 2004.
- 최호, "지진피해를 입은 무보강 조적채움벽체를 갖는 RC 골조의 손상도 및 잔존내진성능의 평가," 대한건축학회논문집 구조계, 31(5), pp.45-52, 2015.
- 최호, "철근콘크리트 골조에 내장된 무보강 조적채움벽체의 잔류균열폭과 잔류변형의 상관관계," 대한건축학회논문집 구조계, 25(7), pp.55-62, 2009.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

