

Global Report

통합 지진 시뮬레이션을 통한 내진손실평가 프로그램

1. 서 론
2. 미가공 데이터
3. IES 입력 정보를 위한 데이터 결합 방법
4. 가상 지진 시뮬레이션
5. 결 론

1. 서 론

1.1 연구 배경

재난 저감 조치는 건축물이 급격히 증가하는 성장하는 도시의 지속적인 인명 보호를 위하여 중요하다. 추후 발생가능한 대규모 지진에 대한 경제적 손실을 저감하기 위하여 손상예측은 재난 저감 조치 구축과 사람들의 의식을 높이는 핵심 역할을 한다. 도심 지역의 신뢰성 있는 손상 예측을 위하여 IES(Integrated Earthquake Simulation)라는 고성능 컴퓨팅(HPC, High Performance Computing)을 통한 지진 시나리오에 대한 시뮬레이션 기술이 적용되었다. 여기서 IES는 사용자가 선택한 지진 시나리오에 대하여 단층 충돌부터 구조물 응답 까지 시뮬레이션 하여 도심 지역에 위치한 모든 건축물의 구조 손상을 예측하고, 표현해주는 가상 시나리오 시뮬레이션 프로그램이다. GIS(Geographic Information System) 데이터를 바탕으로, 수천 개 이상의 건축물을 건축물의 형태와 높이들을 나타낼 수 있는 다각형 모양으로 구현한다. CMD(Common Modelling Data)는 일종의 모델링 방법으로 건축물 설계 기준을 바탕으로 다각형 형상을 구조 모델로 변환시키는 기능을 하며, 해당 구조 모델에 대하여 비선형 구조해석을 수행하여 건축물의 구조적 손상을 예측한다. IES와 관련하여 전 세계에 지진 위험도를 평가하는 프로그램은 상당수 있다. 예를 들면 미국 연방재난국(FEMA, Federal Emergency Management Agency)의 HAZUS-MH 지진 모델이 대표적이며 이는 확률 기반 인명, 건축물, 중요 시설물의 손상 및 손실 평가 기능을 갖고 있다. TELES와 HAZ-Taiwan이라는 프로그램은 HAZUS의 지진 모델을 바탕으로 대만의 지진 조건 등을 고려하여 개발되었고, EQRM은 확률 기반의 지진 위험도를 분석하는 프로그램이다. OpenRISK는 Caltech, USGS, SCEC와 교토 대학에서 개발된 오픈소스형 위험도 분석 프로그램으로, 복합재난 위험도 분석이 가능하며, 단일 지역과 시설물에 대한 보수 비용, 피해자 산정 등에 활용된다. 그 외에도 SELEA, LNECLoss, PACT, MAEViz 등과 같은 추후 발생 가능한 지진 피해를 산정할 수 있는 프로그램이 많이 있다.

1.2 연구 목적

해당 연구는 IES와 연계하여 지진에 대한 도심 지역의 위험도 평가를 위하여 지진 손실 평가(SLA, Seismic Loss Assessment) 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 한다. 제안된 SLA-IES 프로그램은 지반 보링데이터와 GIS데이터를 바탕으로 IES 상에 지반 증폭 해석(Site Amplification Analysis)과 비선형 구조 해석과 같은 방법으로 효율적인 방법론을 활용하였다. 해당 연구는 일본의 센다이 지역을 대상으로 가상 지진 시나리오를 수행하였다. SLA-IES 프로그램에서 건축물의 구조 시스템을 나무(Wooden), 철골(Steel), 철골-철근콘크리트조(SRC), 철근콘크리트(RC)조로 분류하였으며, 용도는 개인용, 일반용, 사무용, 랜드마크용 건축물로 구분하였다. 건축물과 관련 구조 시스템, 층수, 준공년도 등은 IES의 입력 정보로 활용하기 위하여 다각형 형태의 모델과 정보를 결합하였다. IES상에서 다자유도(MDOF, Multi-Degree-Of-Freedom) 모델로 건축물의 비선형 해석을 수행하였으며, 지반 증폭 해석은 200gal 이상의 최대 지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)를 19996년부터 2016년 까지 관측한 38개의 관측소의 80개 시추공 데이터를 바탕으로 수행하였다.

2. 미가공 데이터

2.1 건축물 형태

GIS데이터는 센다이 도시 지역 중 Aoba ward 28km x 16km 지역 내에 위치한 101,193개의 건축물 형상을 포함하고 있고, Taihaku ward 35km x 15km 내에 위치한 75,839개의 건물 형상을 포함하고 있다. IES는 GIS의 미가공 데이터(건축물 형상 정보)를 바탕으로 구조 응답 해석을 위한 해석 모델링이 가능하다. 그림 1(a)는 센다이 역 주변의 센다이 도시의 시내에 위치한 건물 형상을 나타낸 것이며, 그림 1의 (b)는 GIS 패키지에 포함된 건물의 위치, 용도(ATYPE), 건물명(NAME), 층수(FLOOR), 층 면적(Shape Area) 등의 정보를 나타낸 것이다. 그러나 IES에서 구조해석을 수행하기 위해서는 각 건물의 구

조형식이 추가로 필요하다.



Location:	140.876218 38.256544 Decimal Degrees
Field	Value
FID	76966
Shape	Polygon
OID	0
LAYERCD	82
ATYPE	1363
JCODE	4101
ACODE	9
CCODE	1
GCODE	9
DCODE	04101000900010009
CHIBAN	1
NAME	仙台トラストタワー
FLOOR	37
TPOLYCD	0042410A0100010706000db0
ATTRCD	0042410A01000107000008A5
Shape_Leng	222.766076
Shape_Area	3039.335

(a) 센다이 역 주변 건물의 GIS 형상 데이터

(b) 센다이 트러스트 타워 건물의 특성 정보

그림 1. 센다이 역 주변 GIS 건물 형상 정보(예)

2.2 건축물 특성

건물 형상 정보 외에 건축물 해석에 필요한 건축물 특성 정보를 별도로 포함한다. 해당 정보는 건축물 이름, 위치, 주소, 용도, 층수, 구조시스템, 준공연도, 총 면적을 포함하고 있으며, 이 중 구조 해석을 위하여 구조시스템, 건축물 층수, 준공연도 정보 등을 바탕으로 구조 해석 모델이 구성되었다. GIS 정보는 모든 건축물의 층 정보를 포함하고 있지 않으므로, 층 정보가 없는 건축물에 대하여 개인 소유 건축물은 2층, 사무용 건축물은 2층~4층 그리고 랜드마크용 건축물은 정보를 포함하고 있는 다른 건축물과 비교하여 임의 정보를 적용하였다.

2.3 지반 보링 데이터

지반 보링 데이터는 지반의 증폭 효과를 고려하고, 표면 지면 운동을 결정하기 위하여 적용하였다. 그림 2는 센다이 도시에서 이용 가능한 920개의 천공 데이터 위치를 나타낸 것이다. 지반 천공 데이터 내에 다수의 건축물을 고려하기 위하여 지반 천공 데이터의 범위는 250m x 250m 단위로 설정하였으며, 해당 천공의 깊이는 1m에서 65m까지 다양하게 구성되었다. 지반 유형은 모래(S), 진흙(C), 자갈(G)로 분류되었으며, 해당 정보를 바탕으로 지반 모델은 선정된 지반 유형 및 SPT-N 값에 의해 도출되었다. SPT-N값을 바탕으로 전단파속도(V_s)는 두 개의 경험식(모래 : $V_s = 80N^{1/3}$, 진흙 : $V_s = 100N^{1/3}$)에 의해 산출되었다.

3. IES 입력 정보를 위한 데이터 결합 방법

3.1 건물 형상 및 특성

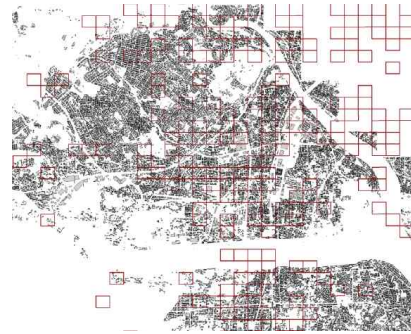
본 연구에서 적용한 IES 기반의 지진 손실 평가 프로그램과 관련하여 각 건물의 신뢰성 있는 해석 결과는 정확한 건축물 모델로부터 결과도출이 기대되었다. 따라서 건물 특성 정보는 건물 형상 정보와 결합하여 건물 형상, 건물 층수, 구조 시스템, 건물 용도, 건축 면적 그리고 준공연도를 포함되었다. 건물 특성 정보에서 건물 위치 또는 주소 정보는 건물 형상의 도심과 거의 일치시켰으며, 건물의 복잡한 형상에 의해 정확하지 않은 위치에 도심이 구성되지 않은 경우 건물의 용도와 층수를 포함한 다른 사용 가능한 정보와 함께 고려하여 재조정하였다.

3.2 건물과 지반 보링 데이터

구조 응답 해석과 마찬가지로 정확한 지반 모델을 바탕으로 지반 증폭 해석으로부터 건축물에 작용하는 신뢰성 있는 표면 파형을 예측하였다. 따라서 지층 정보, 지반 유형 그리고 SPT-N 값을 포함한 정확한 건축물-지반 데이터와 건축물의 데이터 정보와 결합하였다. 그림 4에 제시된 사각형 형태(250m x 250m 단위)의 좌표에서 지반 정보를 추출하고, 이를 좌표 내의 건축물 도심 위치와 결합하였다. 이러한 방식으로 지반과 건축물 정보가 결합되었으며, 해당 결합 정보를 바탕으로 같은 천공 위치에서 지반 증폭 해석을 위한 지층, 지반 유형 그리고 SPT-N 값을 바탕으로 다수의 건축물에 대한 정확한 지반 모델을 개발하였다.



(a) 건축물 형상 기반 위치 정보



(b) GIS 기반 지반 보링 정보

그림 3. 건축물-지반 정보 결합 (예)

4. 가상 지진 시뮬레이션

19,611개의 저층 목조 건축물이 지반 정보와 결합되었으며, 해당 건축물에 대하여 선형 지반 증폭 해석 및 비선형 구조 해석을 수행하였다. 토호쿠 지역에 15개의 지진 시나리오에 대하여 천공 데이터 중 80개의 입력 파형을 수집하였으며, 여기서 적용된 최대 지반가속도는 200gal 이상으로서 이는 미야기(Miyagi)현, 후쿠시마(Fukushima)현 그리고 이와테(Iwate)현에서 1996년부터 2016년까지의 최대 지반가속도보다 큰 값이다. 각 지진 시나리오에서 천공 파형으로부터 건축물 손상의 신뢰도 높은 예측을 위하여 모든 개별 건축물에 대한 표면 파형 세트를 산정하기 위한 지반 모델을 이용하여 각 천공의 파형에 대한 지반 증폭 해석을 수행하였다. 이후 개별 표면 파형 데이터와 함께 모든 건축물의 구조해석은 건축물의 층간 변위비를 산정하기 위하여 수행되었다.

4.1 지반 증폭 해석

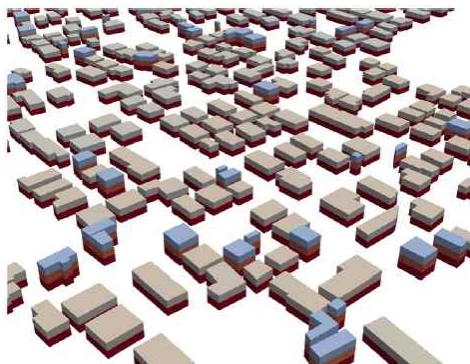
지반 증폭 해석은 표면 아래의 지반에서 지진 파형의 전달을 모사하기 위해 수행되었다. 균등하게 지반이 분포된 것으로 가정하여 IES에서 지반 관련 1차원 유한요소해석모델을 개발하였다. 표면 지반 운동은 기반암에서 동일한 입력 천공 파형 정보를 갖는 지반 모델에 대하여 다수의 건축물의 표면 지진 파형을 산정하고, 이후에 이를 구조해석에 적용하였다. 본 연구에서 1차원 유한요소해석 모델을 이용하여 선형 지반 증폭 해석은 천공 파형 정보와 천공 데이터를 바탕으로 개발된 지반 모델을 이용하여 수행하였다. 지반 보링 데이터의 활용으로 개별 건축물에 작용하는 표면 지반 운동과 조합하여 지반 증폭 효과를 고려하였다. 지반 증폭 해석을 통해 세 개의 요소(EW: 동서방향, NS: 남북방향, UD: 상하방향)의 입력 천공 파형에 대한 표면 가속도 세트를 얻을 수 있었다. 그림 5는 MYGH04에 기록된 지진시나리오로부터 시간 영역으로 관측된 표면 파형과 모델로 구현된 표면 파형을 비교한 것이다.

4.2 구조 응답 해석

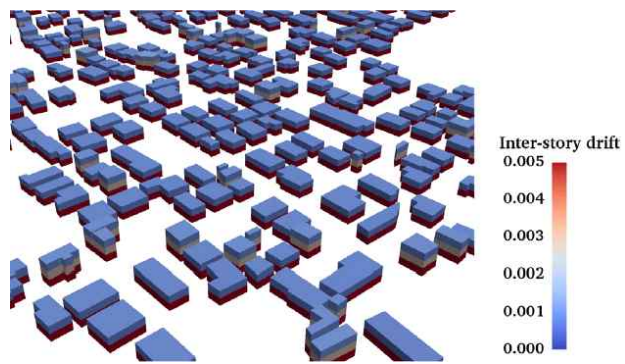
4.1절에서 언급된 방법으로 얻은 시간영역으로 구성된 표면 가속도 데이터 세트를 바탕으로 저층 목조 건축물에 대하여 표면 파형 효과를 고려한 각 건축물의 응답을 산정하기 위하여 비선형 구조 응답 해석을 수행하였다. 19,611건의 목조 건축물에 대하여 건축물 형상 및 위치 관련 GIS 데이터를 사용하여 구조해석모델을 구축하였다. 건축물 구조설계 기준을 바탕으로, 건축물 층수와 준공 년도를 포함한 건축

물 특성 정보로부터 얻을 수 있는 제한적인 정보와 건물 형상을 반영하여 각 건축물의 신뢰도 높은 구조해석 모델을 개발하였다. IES에서 다자유도 해석 모듈은 모든 구조 해석 모델의 해석에 활용되었다. 해당 연구에서 사용된 각 지진 시나리오는 약 180초로 설정되었으며, 시간 간격은 0.02초 그리고 전체 시간 스텝은 9000개로 구성하였다. 목조 건축물에 대하여 다수의 전단 스프링(MSS, Multiple Shear Spring) 모델을 다자유도 모델의 해석에 적용하였다. 해당 MSS모델은 20개의 탄소성 거동을 해석할 수 있으며, 층 강성의 비등방성을 고려하여 최대 층간 변위비를 산정할 수 있다. 국부적인 손상이 각 축방향의 응답에 영향을 미치므로, MSS 모델의 층 강성비에 따라 건축물의 보다 정확한 응답을 예측할 수 있다. 각 층의 질량점과 다수의 전단 스프링의 모델링은 두 개의 수평 방향에 동시에 적용한 지진 하중에 대하여 비선형 응답을 해석하는 것으로 활용할 수 있다. 그 결과, MSS 모델은 다른 축에서 발생된 국부 손상에 따른 강성 변화의 영향을 고려할 수 있다. 그러나 MSS 모델은 P-Delta 효과를 고려할 수 없지만, 건축물의 높이를 3층으로 제한하였기 때문에 해당 효과는 매우 미비할 것이다. 전단 스프링의 이력거동은 이선형-슬립(bilinear-slip) 유형으로 가정하였다.

지진시나리오에서 각각의 천공 파형에 대한 건축물 각층의 층간 변위비를 다자유도 모델의 해석을 통해 산정되었으며, 구조해석에서 도출된 최대 층간변위비 결과를 각 건축물의 손상 지수로서 선정하여, 각 지진 시나리오의 건축물 손상 수준 평가에 활용하였다. 그림 4는 2008년 이와타-미야기 내륙 지진과 2011년 동부 일본 대지진에 대한 저층 목조 건축물의 최대 층간변위비를 GIS 단위로 보여준다. 그림 4의 (a)는 2층 목조 건축물의 지붕에서 측정된 건축물 응답이 3층 목조 건축물의 응답에 비해 지배적인 것을 보여주는 반면에, 그림 4의 (b)는 2층 지붕에서 측정된 건축물의 응답이 3층 목조 건축물과 거의 유사한 것을 보여준다. 이는 일부 목조 건축물이 다양한 유형의 지진 파형에 민감하게 반응하는 것을 보여주지만 그 외의 목조 건축물은 특정 유형의 지진 파형에 민감한 것을 보여준다.



(a) 2008년 이와타-미야기 내륙 지진에 대한 5개의 파형 결과



(b) 2011년 동부 일본 대지진의 27의 파형 결과

그림 4. GIS 범위의 개별 건축물의 최대 층간변위비

4.2.1 손상 수준

최대 층간변위비를 바탕으로 손상 수준은 Level I (손상 없음), Level II (미세한 손상), Level III (보통 손상), Level IV (심각한 손상), Level V (붕괴)로 분류하였다. 최대 층간변위비를 바탕으로 결정된 손상 수준은 각 건축물의 보수 비용 산정에 활용된다. 해당 손상 평가는 구조 유형, 건축물 높이 그리고 내진 설계 수준에 따라 달라질 수 있다. 해당 연구에서 적용된 저층 목조 건축물의 층간변위비 기반의 손상 한계 및 보수 비용 비율은 표 1에 제시되어 있다.

표 1. 각 손상 수준에 대한 총간변위 및 보수 비용 비율

저층 목조 건축물	손상 수준				
	Level I 손상 없음	Level II 미세한 손상	Level III 보통 손상	Level IV 심각한 손상	Level V 붕괴
총간변위비 한계 값	-	1/300	1/100	1/30	1/15
보수 비용 비율	0.0	3.6	8.0	19.5	28.4

4.2.2 보수 비용

건축물의 손상 수준 정보를 실제 조사된 정보로부터 도출된 지진 손실 함수를 이용하여 구조요소와 비구조요소에 대한 지진 손실 예측을 위하여 전환하였다. 지진 손실 함수는 구조 골조와 접합부와 같은 구조 구성요소와 벽체, 클래딩, 개방형 골조와 같은 비구조 구성요소 그리고 배관, 기계와 같은 건물 내의 시설을 고려한다. 해당 연구에서 보수 비용은 건축물의 건설 비용과 지진 손실 함수로부터 산정된 보수 비용 비율을 바탕으로 보수 비용을 산정하였다.

4.2.3 지진 손실 평가 프로그램

지진 손실 평가 프로그램의 시제품은 IES와 연계하여 개발되었으며, 해당 툴은 미가공 데이터 사이의 결합, 입력정보 데이터 생성과 출력 데이터 전환 그리고 지진 손실 평가 기능을 포함하고 있다. 선처리 단계는 미가공 데이터의 결합과 이후 지반 증폭 해석과 구조 응답 해석을 위한 입력 데이터 생성에 활용되었고, 후처리 단계로 다자유도 응답 결과를 바탕으로 최대 총간변위비를 산출하였다. 이를 바탕으로 개별 건축물의 손상 수준을 GIS 단위로 표현하고, 손실 평가 등을 수행할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 지방 정부와 방재기구에 기여하기 위한 목적으로 센다이 도시를 대상으로 도심 지역의 위험도 평가를 위하여 지진 손실 평가 프로그램을 개발하였다. 미가공 데이터의 결합, 입력데이터 생성, 출력데이터 전환의 3단계에 걸친 과정을 IES와 연계하여 적용하였다. 개발된 SLA-IES 프로그램의 주요 장점은 제한된 지반 천공 데이터와 GIS 데이터를 바탕으로 개별 건축물에 대한 지반응답과 구조 응답을 동시에 평가 할 수 있다는 것이다. 센다이 도시에 위치한 저층 목조 건축물에 대하여 건축물 손상을 예측하고, 일본의 실제 보수비용 관련 조사 데이터를 바탕으로 구조와 비구조 요소의 지진 손실을 평가하였다. 다른 구조 시스템에 대한 손실 평가 방법은 과거 발생한 지진에 의한 수집된 조사 자료를 바탕으로 추가적으로 제시되어야 하며, 일부 지역의 미 확보된 지반 천공 데이터는 데이터 보간 방법으로 확보할 수 있으며, 이를 바탕으로 모든 건축물에 대한 구조해석을 수행할 수 있다.

<원문제목> A Prototype Seismic Loss Assessment Tool Using Integrated Earthquake Simulation
<원문출처> International Journal of Disaster Risk Reduction, ELSEVIER