

초고층 건물의 지반을 고려한 2D 및 3D 동적해석에 의한 거동 비교 연구

A Comparative Study on the Behavior of High-rise Buildings by 2D and 3D Dynamic Analysis with Considering the Ground

유 광 호[†] · 백 용¹⁾ · 김 승 진²⁾

Kwangho You · Yong Baek · Seungjin Kim

Received: July 12th, 2019; Revised: July 22nd, 2019; Accepted: September 17th, 2019

ABSTRACT : Recently, earthquakes have occurred in our country and seismic stability of high-rise buildings in large cities is being a growing interest and thus the related studies have been increased. Also the grounds are considered indirectly in most of seismic designs and analyses and seismic researches based on 3D dynamic analysis are insufficient. In this study, therefore, 2D and 3D dynamic analyses were performed based on the SSI complete model including grounds and the behavior was compared and analyzed. For dynamic modeling, linear time history analyses were performed by using MIDAS GTS NX. For this purpose, a high-rise building was assumed to be constructed on top of the bedrock and surrounded by a surface layer. A sensitivity analysis was performed with the selected parameters. The dynamic behavior was compared and analyzed in terms of horizontal displacements, drift ratios, bending stresses, and weak parts. In most cases, 2D dynamic behavior was calculated to be larger than 3D's and thus it shows more conservative results with increasing number and size of weak parts.

Keywords : High-rise building, 2D and 3D, Dynamic behavior, SSI

요 지 : 최근 우리나라에서도 지진이 발생하여 대도시의 초고층 건물의 내진안정성에 대한 관심이 높아져 이에 대한 연구가 증가하고 있다. 또한 대부분의 내진설계 및 해석은 지반을 간접적으로 고려하고 있고, 3D 동적해석을 이용한 내진해석 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지반을 포함한 SSI 연속체 모델에 기초한 2D 및 3D 동적해석을 수행하고 거동을 비교·분석하였다. 동적해석을 위해 지반범용해석 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 선형시간이력해석을 수행하였다. 이를 위해 초고층 건물이 기반암 위에 시공되고 표층에 묻혀있는 것으로 가정하고, 선정된 파라미터를 기준으로 민감도 분석을 수행하였다. 동적거동은 수평 변위, 층간변위비, 휨응력, 취약부를 이용하여 비교·분석하였다. 대부분의 경우, 2D 동적거동은 3D보다 크게 산출하여 더 보수적인 결과를 보였으며, 취약부의 수와 크기는 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 초고층 건물, 2D 및 3D, 동적거동, SSI

1. 서 론

2016년 9월 경주에서 규모 5.8에 해당하는 지진을 필두로 2017년 포항 등 대도시 인근에서 중진(中震)이 발생하였다. 특히 대도시에는 초고층 건물이 존재하고 있는 실정이므로 많은 분야에서 이에 대한 내진해석 연구가 수행되어왔다. 그 중 내진해석 시 SSI(Soil Structure Interaction) 동적해석 모델(PEER, 2017)에서 지반을 간접적으로 고려하는 건축 내진해석의 동적거동보다 지반을 직접 고려하는 경우가 더 합리적으로 나타났다(유광호와 김승진, 2018). 하지만 2D 해석을 수행하여 결과값이 과대하게 산출되는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 초고층 건물에 대한 3D

동적해석이 수행되지 않아 현실적인 건물 동적거동 파악이 미흡하였다.

따라서 본 연구에서는 지반을 고려하는 SSI 3D 동적해석 중 선형시간이력해석을 수행하고 2D 해석과 비교·분석을 실시하고자 하였다. 이를 위해 2D 및 3D 해석의 건물 지반부는 5층으로 기반암 위에 시공되고 주위에는 풍화토인 표층으로 묻힌 것으로 가정하였다. 이후 기반암 하단에 지진파를 입력하고 선정된 파라미터를 기준으로 민감도 분석을 수행하였다. 동적해석을 실시하기 위해 수치해석 프로그램으로는 지반분야 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX가 사용되었다.

입력지진파의 경우 1999년 터키에서 발생한 Kocaeli 지

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon (Corresponding Author : khyou@suwon.ac.kr)

1) Director, Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

진파를 이용하고 크기는 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당되는 최대 지반가속도인 0.154g와 0.22g를 산정하였다. 동적해석을 수행하기 위해 건물과 지반 전체 모델링으로 된 시스템의 고유치 해석을 수행하여 고유주기를 파악하고 동적해석 수행 후 발생하는 수평변위, 층간변위비, 휨응력, 허용 휨응력을 초과하는 취약부 위치 및 범위를 파악하였다.

2. 동적 안정성 평가 기준

2.1 층간변위비

변위는 건물의 거동을 나타내는 가장 직접적인 지표이다. 대부분의 건물은 구조체 이외에 벽체, 유리, 석재와 같은 마감재가 부착되어 있어 지진 시에 층간변위가 허용 기준보다 크게 되면, 마감재 등 비 구조요소에 피해가 발생하게 된다. 이로 인해 건물의 안정성에 영향을 미치게 되기 때문에 내진설계 시 층간변위가 일정한 값을 초과하지 않도록 규정하고 있다. 우리나라에서는 층간변위가 층고의 1.5%(내진 I등급 기준, 허용 최대 층간변위)를 넘지 않도록 권하고 있다(국토교통부, 2016a).

최대 층간변위비는 층 변위의 최대값을 해당 층 높이로 나눈 값이며 Eq. (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 δ_{n+1} 과 δ_n 은 각 층의 천정과 바닥의 수평변위이며 h 는 한 층 당 층고를 나타낸다. α 는 보정계수로 1차 모드로 예측한 건물에 대해 실제 다자유도 건축물의 최대 층간변위비평균값의 비율을 의미한다.

$$\text{최대 층간변위비} = \alpha \times \frac{\delta_{n+1} - \delta_n}{h} \quad (1)$$

여기서, $\alpha = \frac{\delta_{\max}^{MDOF}}{\delta_{\max}^{ESDOF}}$ 이다.

Eq. (1)의 층간변위비 보정계수 α 를 통해 1차 모드형상을 바탕으로 예측된 최대 수평변위에서 고차모드의 영향을 반영할 수 있게 해준다. 철근콘크리트 건물의 경우 α 는 1.05~1.2의 값을 갖는다.

한편, FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서는 철골가새골조에 지진발생 시 개략적인 지진피해 수준을 조기에 정확하게 추정하기 위해 손상정도와 허용 층간변위비를 Table 1과 같이 정의하였다. 각각의 손상도에 해당되는 구조적 피해양상은 ‘즉시거주’, ‘인명안전’, ‘붕괴방지’ 수준으로 정의된다.

Table 1. Allowable criteria of drift ratio for reinforced concrete frames (FEMA, 2000)

Level	Member's damage state	Maximum drift ratio
Immediate Occupancy (IO)	Flexural cracking in URM [*] walls due to out-of-plane inertial loading shall not be permitted as limited by the tensile stress requirements	0.5
Life Safety (LS)	Flexural cracking in URM walls due to out-of-plane inertial loading shall be permitted provided that cracked wall segments will remain stable during dynamic excitation	1.5
Collapse Prevention (CP)	Stability need not be checked for walls spanning vertically with a height-to-thickness ratio less than that given in criteria	2.0

URM^{*}: UnReinforced Masonry building

2.2 휨응력

건물이나 터널의 숏크리트 등을 모사하기 위해 사용된 구조부재의 파괴여부를 판단하기 위해 발생된 휨응력이 허용값을 초과했는지를 확인한다. 이를 위해 Fig. 1의 P(축력)-M(모멘트)상관도와 같이 구조부재에 발생하는 축력과 모멘트를 이용하여 휨응력을 산출한다.

구조부재의 설계기준강도가 σ_{ck} 일 때 허용 휨압축 및 인장응력은 Eq. (2)와 Eq. (3)을 이용해 구할 수 있다(유광호 등, 2005).

$$\text{허용 휨압축응력}(\sigma_{ca}) = 0.6\sigma_{ck} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\text{허용 휨인장응력}(\sigma_{ta}) = 0.63\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

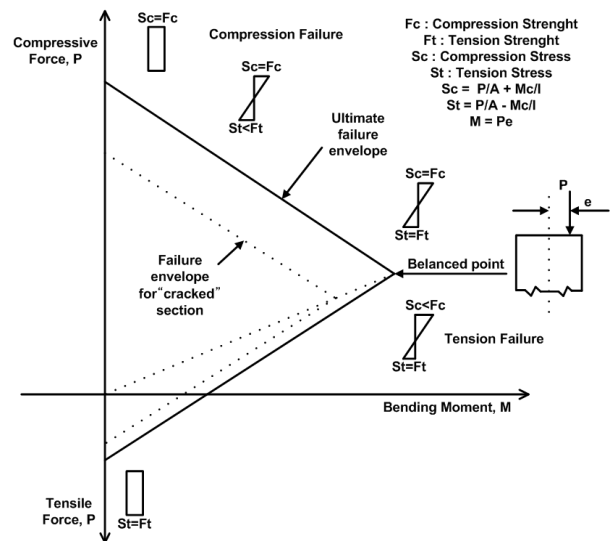


Fig. 1. Typical moment thrust diagram (Itasca Consulting Group, Inc., 2005)

3. 2D 및 3D 동적해석을 위한 수치모델링

3.1 요소망 생성 및 해석 영역 결정

본 연구에서는 지반 범용 해석 프로그램인 MIDAS GTS NX을 이용하여 2D 및 3D 해석 시 건물에 대해 연속체 모델을 고려한 초고층 건물의 동적거동을 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 2D 해석의 건물은 Fig. 1(a)와 같이 층수 62층(지하 5층) 초고층 건물과 기반암인 화강암 위에 설치되어 있는 것으로 하고, 지표면으로부터 22m 깊이로 풍화토층이 존재하고 건물의 지하부가 이 층에 묻혀있는 것으로 하였다.

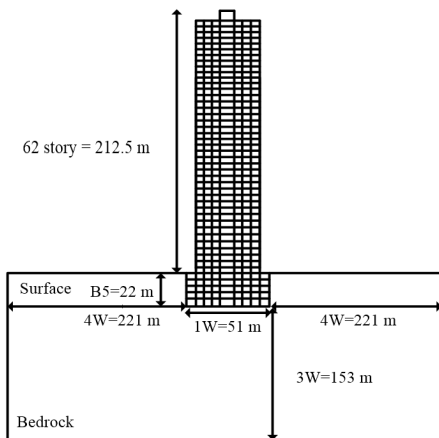
초고층 건물의 지상부 높이는 코어부 11.7m를 더한 212.5m로 하였으며 층고는 1~2층 7.2m, 2~3층 5.8m, 그 외의 경우 3.2m로 적용하였다. 또한 지하부의 층고는 지하 1층부터 각각 7.3, 4.1, 3.5, 3.5, 3.7m로 적용하였다. 건물 지하부 폭(width, W)은 총 51m로 내부 기둥은 5.4m 간격으로 4개를 코어부 기둥은 9m 간격으로, 좌·우 지하벽체로부터 지

상부와 연결된 지하부 기둥은 좌측 4.3m, 우측 6.1m 간격으로 설치하였다.

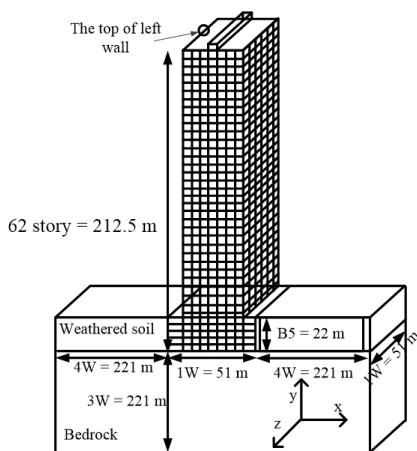
이를 바탕으로 3D 해석의 건물은 Fig. 1(b)와 같이 z 방향으로 건물 지하부 폭 만큼 추출(extrude)하였다. 3D 해석 모델링에서 y-z 평면의 기둥은 2m 간격으로 모델링하였다. 한편 건물 바닥과 지반이 일체화할 수 있도록 지반 요소망과 건물 기둥(ID)이 만나도록 하였다. 요소망의 요소크기는 해석 수행 속도를 향상시키기 위해 3m로 적용하였다. 해석 영역은 지반을 고려하는 SSI 연속체 모델로 지진파가 요소망 좌·우측 및 바닥에서 반사되어 건물에 미치지 않도록 건물 좌·우측 벽체를 기준으로 건물 폭의 4배, 건물 지하 바닥을 기준으로 건물 폭의 3배로 선정하였다. 또한 각 해석 영역 좌·우측 및 바닥에 변위 고정구속을 하였다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 지진파 규모, 지진파 종류, 지반조건에 대한 민감도 분석을 실시하고 2D 및 3D 초고층 건물에 대해 동적거동을 파악하고자 하였다. 이를 위해 민감도 분석을 수행하기 위해서 지진파 종류(단주기 (Short Period, SP), 장주기(Long Period, LP)) (2 가지) × 지진파 크기(Peak Ground Acceleration, PGA) (0.154g, 0.22g) (2 가지) × 지반조건(극경암(extremely hard rock), 경암(hard rock)) (2 가지) 총 8 경우를 선정하였다.

지진파의 경우 1999년 터키에서 발생한 Kocaeli 지진파 중 Kocaeli_arc000(단주기), Kocaeli_dzc180(장주기)를 각각 이용하였다. Fig. 3은 PGA 0.22g의 단주기와 장주기의 사용된 입력지진파로 가진시간이 60 초인 Kocaeli 파를 보여준다.



(a) 2D Analysis



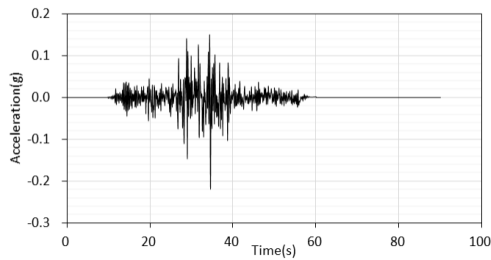
(b) 3D Analysis

Fig. 2. The analysis generals of a 62 story high-rise building

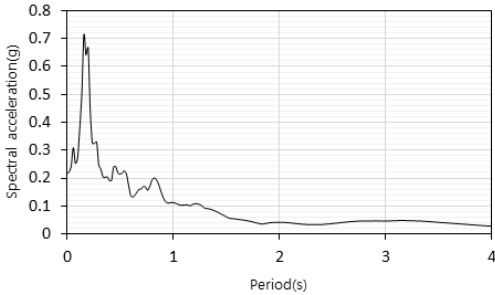
Table 2. Parameters used to dynamic analysis

Case	Ground type	Type of earthquake	PGA (g)
8 case	Extremely hard rock	Short period	0.154
			0.22
		Long period	0.154
			0.22
Hard rock	Short period	0.154	
		0.22	
	Long period	0.154	
		0.22	

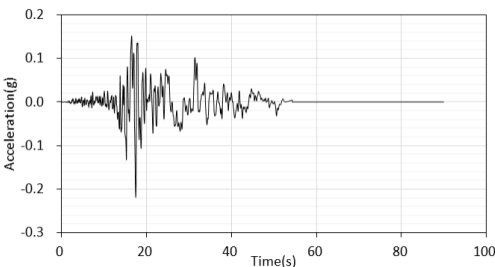
특히 Fig. 3(a), (c)는 각각 단, 장주기파의 가속도 이력을 보여주고, Fig. 3(b), (d)는 푸리에변환(Fast Fourier Transformation)을 통해 얻은 단, 장주기의 입력가속도 스펙트럼으로 탁월주기는 각각 0.3초, 0.8초임을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 보듯이 주기가 2초 이후에 가속도 값은 0.1g 이하로 떨어지는 단주기성을 보이는 반면 Fig. 3(d)의 경우 0.3g



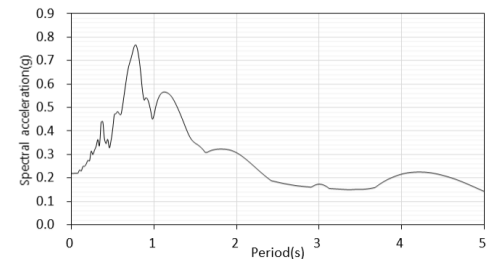
(a) Acceleration time history of short period



(b) Response spectrum of short period



(c) Acceleration time history of long period



(d) Response spectrum of long period

Fig. 3. Input seismic wave with PGA 0.22 g

근처로 발생하고, 주기가 커질수록 Fig. 3(b)보다 가속도 값이 크게 발생하여 장주기 특성을 보여준다.

3.2 적용 물성치 및 해석 조건

본 해석에 적용한 표층과 기반암은 서울특별시(2006)에서 제공한 자료를 참고하여 각각 풍화토와 극경암, 경암을 적용하였으며, 최종적으로 본 연구에 사용된 지반 물성치는 Table 3과 같다. 동적 물성치로 지반, 건물의 감쇠비는 0.05로 적용하여 Rayleigh 감쇠를 고려하였다. 그리고 축압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 한편, 동일한 재료나 서로 다른 재

Table 3. Ground properties

Ground type	Extremely hard rock	Hard rock	Weathered soil (surface)
Unit weight (kN/m^3)	27	26	19
Cohesion (MPa)	6	2	0.05
Friction angle ($^\circ$)	45	40	28
Elastic modulus (GPa)	14	4	0.03
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.32
Shear wave velocity (m/s)	1,500	800	77

료간의 접촉을 모사하기 위해 경계요소(interface element)를 사용하면 보다 자세하게 동적거동을 파악할 수 있으나, 본 연구에서는 김용민 등(2011)과 같이 단순히 지반과 건물이 일체로 거동하는 것으로 가정하였다.

동적해석에 적용된 초고층 건물은 동일한 beam, column 요소를 사용하여 슬래브, 벽체 그리고 기둥으로 모사되었다. 하부층과 상부층의 부재 단면의 크기는 같게 적용하고, Univ. of Suwon(2017)에서 제시한 물성치 및 부재 단면 크기를 참고하여 Table 4와 같이 적용하였다. 한편 구조요소를 비선형 해석 시 적용할 때 발생된 건물의 수평변위 및 층간변위비는 과대 산출될 것으로 판단하여 선형시간이력 해석을 적용하였다.

Table 4. Properties of building structural members

Member	Beam	Column
Unit weight (kN/m^3)	23.5	
Elastic modulus (GPa)	31.2	
Moment of inertia (m^4)	1.1	0.3
Section of area (m^2)	1	1.5

또한 건물의 자중을 고려하기 위해 철근콘크리트의 단위중량을 23.54kN/m^3 으로 적용하였으며 그 외의 활하중 및 사하중은 각각 66kN/m^2 , 146kN/m^2 으로 재하하였다. 본 연구에서 초고층 건물은 RC 건물로 가정하였다. 따라서 콘크리트 표준시방서(국토교통부, 2016b)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})가 40.0MPa 인 것을 참고하여 최대 허용 휨압축 및 인장응력을 각각 24.0 , 4.0MPa 로 적용하였다(유광호 등, 2005).

4. 동적해석에 의한 안정성 평가

4.1 고유치해석

동적해석을 수행하기 위해서는 감쇠비, 질량참여율이 높

은 순서인 1, 2차에 대한 고유주기가 필요하다. 따라서 지반을 고려한 2D 및 3D 해석의 건물-지반 시스템에 대해 고유치해석을 수행하였다. 이를 위해 기반암과 표층 좌·우측 및 바닥면에 지반반력계수 및 점성경계계수를 구하여야 한다. 이후 구해진 경계계수를 이용하여 기반암과 풍화토 좌·우측과 바닥면에 탄성경계를 적용하여 고유치해석을 수행하였다. 산출된 1, 2차에 해당되는 고유주기 및 모드형상을 Table 5와 같이 정리하였다.

Table 5. The results of eigenvalue analyses

Dimension	Mode shape	Extremely hard rock		Mode shape	Hard rock	
		Mass participation factor (%)	Natural period (sec)		Mass participation factor (%)	Natural period (sec)
2D	1	24.1	9.2	1	25.7	10.5
	2	7.9	2.3	2	14.1	0.5
3D	1	5.9	5.8	1	9.2	6.0
	4	3.4	1.1	4	3.6	1.1

먼저 건물만의 고유주기를 파악한 결과 3D 해석은 5.7초, 2D 해석은 6.7초로 나타나 유사한 고유주기를 갖는 것으로 판단하였다. 2D 초고층 건물의 경우 지반조건이 극경암일 때 1, 2차의 고유주기는 9.2초와 2.3초이고, 경암일 때 10.5초와 0.5초로 산출되었다. 마찬가지로 3D의 경우는 극경암일 때 5.8초와 1.1초이고, 경암일 때 6.0초와 0.3초로 산출되었다. 또한 초고층 건물과 지반의 복합시스템의 2D 해석 질량참여율은 3D의 경우보다 평균 약 227% 크게 나타났다. 한편 3D 해석의 경우 1차 고유주기는 모든 경우에서 2D보다 평균 약 47% 작게 발생하여 단주기성을 보였다. 1, 2차의 모드형상의 경우 2D 해석은 1, 2차 형상으로 나타났지만 3D는 1, 4차를 보였다. 이는 2D 해석은 평면변형을 조건이기 때문에 z 방향의 변형이 무시되어 x-y 평면에 나타나지 않는 반면, 3D 해석의 경우 반영되기 때문에 모드 형상이 4차까지 산출된 것으로 판단된다.

4.2 수평변위 및 층간변위비

지반-구조물 상호작용을 고려한 3D, 2D 동적거동 비교 분석을 수행하기 위해 해석 케이스별로 가진시간에 따른 최대 수평변위를 Table 6과 같이 정리하였다. 건물 수평변위의 경우 건물 지하 바닥면과 접하고 있는 지반의 수평변위를 제외한 순수 수평변위(이하 ‘최대 수평변위’)를 구하였다. 정확한 비교·분석을 위해 건물 수평변위는 3D 해석은 건물 좌측벽체 중 z 방향을 기준으로 중앙 부재에 대해 분석하였다.

Table 6. The comparison of maximum pure horizontal displacements

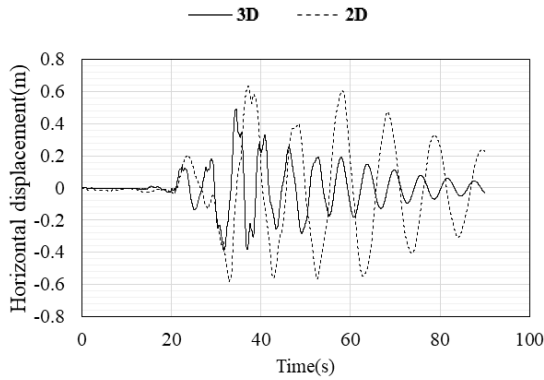
Analysis dimension	Ground conditions	Maximum horizontal pure displacement (cm)			
		Short period		Long period	
		0.154 g	0.22 g	0.154 g	0.22 g
2D	Extremely hard rock	52.6	73.8	207.3	295.4
	Hard rock	63.1	90.6	215.7	310.4
3D	Extremely hard rock	45.9 (12.7)	65.5 (11.2)	93.7 (54.8)	133.8 (54.7)
	Hard rock	49.2 (22.0)	70.2 (22.5)	113.3 (47.5)	161.9 (47.8)

3D 해석 초고층 건물의 최상단 좌측벽체 최대 수평변위는 단주기 지진파일 때 34초, 장주기 지진파 29초에서 발생한 반면 2D의 경우 35초(단, 장주기)일 때 발생하였다. 따라서 층간변위비, 휨응력 산출 시 2D 해석은 35초, 3D는 단, 장주기 각각 34, 29초에서 계산하였다. 참고로 결과 값 아래 ()안의 숫자는 2D 결과를 기준으로 3D 해석의 최대 수평변위값의 감소율(%)을 의미한다.

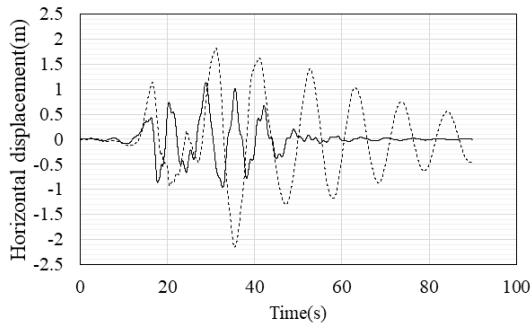
Table 6으로부터 3D 해석은 2D보다 최대 수평변위는 지반조건이 극경암과 경암이고 나머지 다른 파라미터의 영향을 평균적으로 고려할 때 각각 33.4와 35.0% 감소하였다. 마찬가지로 단주기와 장주기 조건인 경우 17.1과 51.2%, 지진파 크기가 0.154g 및 0.22g 일 때 34.2 및 34.1%로 감소하였다. 따라서 전체적으로 3D 해석이 2D보다 평균 34.2%로 감소하였다. 이는 허동수 등(2008)의 연구와 유사하게 z 방향으로 변위가 구속되는 2D의 평면변형을 조건보다 변위 발생이 가능한 3D 해석이 더 작은 수평변위를 발생시키기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 2D 및 3D 해석의 초고층 건물의 최대 수평변위는 지진파 크기가 0.154g에서 0.22g로 증가할 때 각각 42.6 및 42.8%, 지진파 종류가 단주기에서 장주기로 변하는 경우 270 및 117.3%, 지반이 극경암에서 경암으로 변할 때 13.0 및 14.1%로 증가하였다. 따라서 지진파 종류가 지진파 크기와 지반조건보다 건물 최대 수평변위에 더 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

한편 Fig. 4에서 보는 바와 같이 0.154g의 크기인 지진파가 작용하고 초고층 건물이 경암 지반에 시공될 때 지진파 종류(단주기, 장주기)별로 최상단 좌측 벽체의 수평변위력을 도시하였다. 단/장주기가 작용할 때 2D 및 3D 해석의 경우 0초부터 60초까지는 강제진동을 하였고, 가진이 종료되는 가진시간 60초 이후부터 자유진동 상태로 변환되어 감쇠되는 양상을 보였다. 또한 진폭은 3D보다 평균 약 50% 크게 발생하는 것으로 나타났다. 한편 단주기 지진파가 작



(a) Short period



(b) Long period

Fig. 4. The comparison between 2D and 3D analysis for pure horizontal displacement history curve (hard rock, 0.154 g)

용할 때 2D 및 3D 해석은 종료시간인 90초 이후에도 감쇠가 진행되었다. 반면 장주기 지진파가 작용할 때 3D 해석은 가진시간 60초 이후에 감쇠는 종료하였으나 2D의 경우 계속 발생하는 경향을 보였다.

지진 시 건물의 취약한 층과 동적 안정성을 판단하고자 좌측벽체 중 z 방향을 기준으로 중앙에서 1층 단위로 층간변위비 분포를 선정된 파라미터별로 Fig. 5, 6에 도시하고 Table 7에 최대 층간변위비를 산출하고 정리하였다. 이 때 2D 및 3D 해석의 초고층 건물은 각각 최대 수평변위가 발생하는 가진시간 단주기 35, 34초, 장주기 35, 29초일 때, 건물 수평변위를 사용하였다. 참고로 결과 값 아래 ()안의 숫자는 2D를 기준으로 3D 해석 시 최대 수평변위값의 감소율(%)을 의미한다.

Table 7에서 보듯이 3D 해석은 2D보다 초고층 건물의 최대 층간변위비의 경우 나머지 파라미터의 영향을 평균적으로 고려하면, 단/장주기 지진파 30.5/55.6%, PGA 0.154g 및 0.22g일 때 41.8 및 44.3%, 극경암과 경암 조건인 경우 43.2와 43.0% 감소하여 전체적으로 43.1% 적게 산출되었다. 또한 2D 및 3D 해석의 경우 지진파 크기가 0.154g에서 0.22g로 증가할 때 평균적으로 55.4% 및 48.4%, 지진파 종류가 단주기에서 장주기로 변하는 경우 272.2% 및 135.5%, 지반이 극경암에서 경암으로 변할 때 8.2% 및 12.7%로 증

Table 7. The comparison of maximum drift ratio (unit, %)

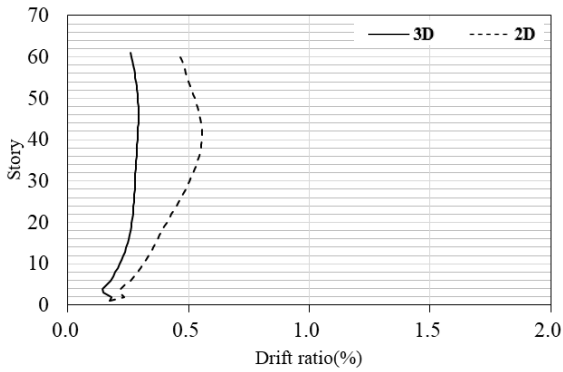
Analysis dimension	Ground conditions	PGA			
		0.154 g		0.22 g	
		Short period	Long period	Short period	Long period
2D	Extremely hard rock	0.28	1.16	0.40	1.66
	Hard rock	0.29	1.10	0.56	1.57
3D	Extremely hard rock	0.21 (25.0)	0.45 (61.2)	0.30 (25.0)	0.64 (61.4)
	Hard rock	0.20 (31.0)	0.55 (50.0)	0.33 (41.1)	0.79 (49.7)

가하였다. 최대 수평변위 분석결과와 동일하게 지진파 종류가 지진파 크기와 지반조건보다 건물 최대 층간변위비에 영향을 더 주는 것으로 나타났다.

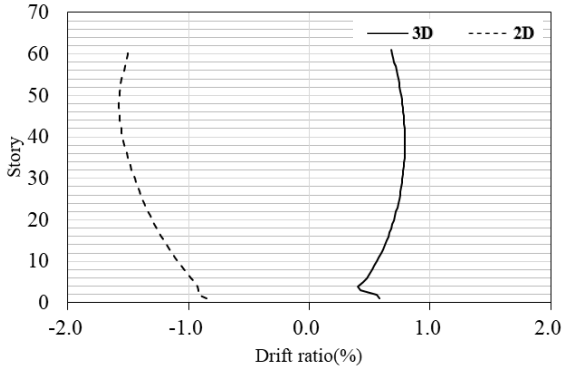
한편 단주기 지진파가 작용할 때 경암지반, PGA 0.22g 조건을 제외한 2D 및 3D 해석 모든 경우에서 최대 층간변위비는 '즉시거주(10)' 기준인 0.5% 미만으로 발생하여 안정한 것으로 나타났다. 반면, PGA 0.22g인 장주기 지진파가 가해질 때 3D 해석의 최대 층간변위비는 허용 기준인 '인명안전(LS)' 기준 1.5%를 초과하지 않았으나, 2D 해석의 경우에는 초과 발생하여 동적 안정성이 취약한 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 초고층 건물의 고유주기(6.7초)가 단주기 지진파(0.3초)보다 장주기 지진파의 고유주기(0.8초)에 근접하여 건물의 공진 가능성이 높았기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.

PGA가 0.22g일 때 경암 지반에 위치한 초고층 건물의 층간변위비 분포를 지진파 종류별로 Fig. 5와 같이 도시하였다. 그림에서 보듯이 초고층 건물 단주기 지진파가 작용할 때 2D 해석의 층간변위비 분포에서 최대값은 3D보다 0.2% 크게 발생하였으나 Fig. 5(b)와 같이 장주기 지진파일 때 1.0% 크게 나타났다. 이는 지진파가 장주기성을 띠게 되면 최대 수평변위가 및 층간변위비가 증가하고 결과적으로 최대 층간변위비의 차이가 커졌기 때문인 것으로 판단된다. 참고로 나머지 경우인 극경암 조건, PGA 0.154g일 때도 동일한 결과가 나타났다.

또한 Fig. 5(b)와 같이 층간변위비가 (-)부호를 나타내게 되는 것은 건물이 원점을 기준으로 좌측으로 변형되기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 변형 모드의 경우 2D 및 3D 해석 모두 2차 모드형상을 보였고 취약층은 35~45층인 중상부에서 발생하여 지상부 중상층은 다른 층에 비해 취약한 것으로 나타났다. 종합적으로 분석하면 지진파 종류가 지반 조건, 지진파 크기(PGA)보다 층간변위비값과 분포에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) Short period



(b) Long period

Fig. 5. The distributions of drift ratio by type of earthquake (hard rock, 0.22 g)

4.3 힘응력에 의한 건물의 취약부 판정

건물의 부재에 대해 Table 8과 같이 지진파 종류, 지반조건에 대해서 최대 힘응력을 산출하였다. Table 8에서 보는 바와 같이, 3D 초고층 건물에 단주기 지진파가 가해질 때 최대 힘응력은 허용 힘응력 24MPa 이내로 발생하여 압축에 대한 취약부가 발생하지 않았다. 반면, 장주기 지진파가 가해질 때 최대 힘응력은 모든 경우에서 허용 힘응력을 초과하여 건물 부재는 지진파가 장주기일수록 취약한 것으로 나타났다. 한편 최대 힘인장응력은 모든 경우에서 허용 힘인장응력인 -4MPa를 초과하여 건물 부재는 압축보다 인장에 취약한 것으로 나타났다.

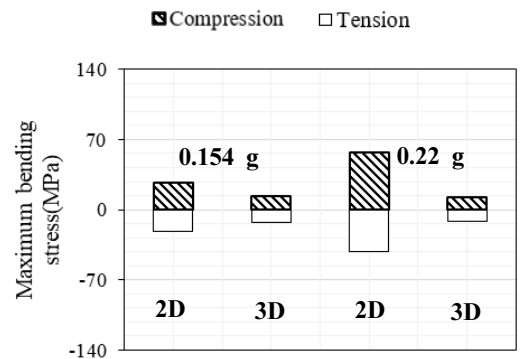
2D 및 3D 해석 간 최대 힘응축 및 인장응력을 파악하고

Table 8. The maximum bending stress of buildings (unit, MPa)

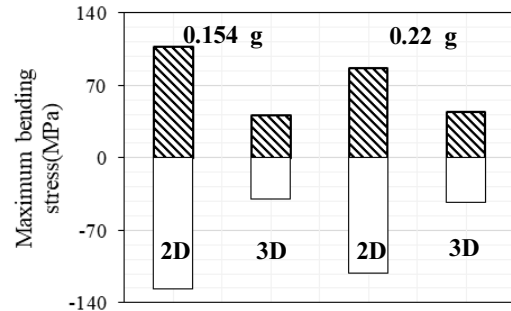
Ground type	Extremely hard rock				Hard rock				
	0.154		0.22		0.154		0.22		
PGA (g)									
Bending stress	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile	
2D	SP	26.4	-22.1	28.3	-28.0	57.2	-42.1	57.1	-43.0
	LP	106.9	-126.4	156.3	-177.4	86.5	-111.1	114.4	-150.6
3D	SP	13.6	-12.8	19.4	-18.2	12.5	-11.5	17.8	-16.5
	LP	41.0	-39.5	58.1	-56.4	44.8	-43.4	63.9	-62.0

자 Fig. 6과 같이 극경암 지반조건일 때 지진파 크기 및 종류 별로 최대 수평변위가 발생하는 가진시간에서의 초고층 건물 최대 힘응력을 도시하였다. Fig. 6에서 보듯이 하나의 파라미터를 기준으로 분석할 때 3D 해석은 2D보다 최대 힘응축응력은 평균적으로 단주기(SP)와 장주기(LP) 조건인 경우 39.3과 65.4%로 지진파 크기가 0.154g, 0.22g 일 때 55.2, 49.4%로 전체 평균 52.3% 감소하였다. 이는 2D 해석의 경우 초고층 건물에 평면변형률 조건이 적용되어 z 방향(해석단면의 앞·뒤 방향)의 변형이 구속된 반면, 3D 해석의 경우는 변형이 구속되지 않아 결과적으로 힘응력이 감소되었다고 판단된다.

한편 2D 해석의 최대 힘응력은 지진파 크기가 0.154g에서 0.22g로 증가할 때 23.8% 지진파 종류가 단주기에서 장주기로 변하는 경우 250%, 지반이 극경암에서 경암으로 변



(a) Short period



(b) Long period

Fig. 6. Maximum bending stresses of structural members by type of earthquake (extremely hard rock)

할 때 36.2%로 증가하였고, 참고로 3D 해석의 최대 휨응력의 경우 지진파 종류가 단주기에서 장주기로 변할 때 236% 증가하였다.

따라서 초고층 건물의 최대 휨응력은 2D 해석이 3D보다 전체적으로 55.0% 증가하여 보수적인 결과를 보였다. 또한 4.2절에서 분석된 최대 수평변위, 층간변위비 결과와 동일하게 지진파 종류가 지진파 크기와 지반조건보다 건물 최대 휨응력값의 더 영향을 많이 주는 것으로 판단된다.

최대 수평변위가 발생하는 가진시간 때 허용 휨응력을 초과한 건물의 취약부를 파악하고자 2D 및 3D 해석별 건물의 취약부 위치와 범위를 Fig. 7에서 Fig. 9까지 도시하였다. 3D 해석의 경우 건물의 좌·우측, 뒷면으로 나누었다. 건물의 취약부를 구별하기 위하여 지상부 기둥은 좌·우측으로부터 1, 2번 기둥으로, 코어부는 좌·우측으로 구분하였다. 지하부 기둥 또한 좌·우측으로부터 1, 2, 3 번 기둥으로, 코

어부는 좌·우측으로 나누었다. 취약부의 범위는 타원으로 표시하였고 휨압축 및 인장응력 값의 범례(legend)는 편의상 생략하였다.

극경암 지반에 시공된 초고층 건물에 지진파 크기가 0.154 g인 단주기 지진파가 가해질 때 최대 수평변위가 발생하는 가진시간의 휨압축응력 분포도를 Fig. 7과 같이 도시하였다. 그림에서 보듯이 2D 및 3D 해석 시 건물에서 발생된 휨압축응력은 허용 휨압축응력을 초과하지 않는 것으로 나타나 취약부는 발생하지 않았다.

한편 장주기 지진파가 가해질 때 건물 휨압축응력 분포에 의한 3D 해석의 건물 취약부는 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 지상 1층 우측 벽체, 기둥과 천정부에서 발생한 반면 2D의 경우 좌측 지하 5층부터 지상 58층 1, 2번 기둥, 벽체 및 천정부에서 취약부가 발생하여 2D 및 3D 해석의 초고층

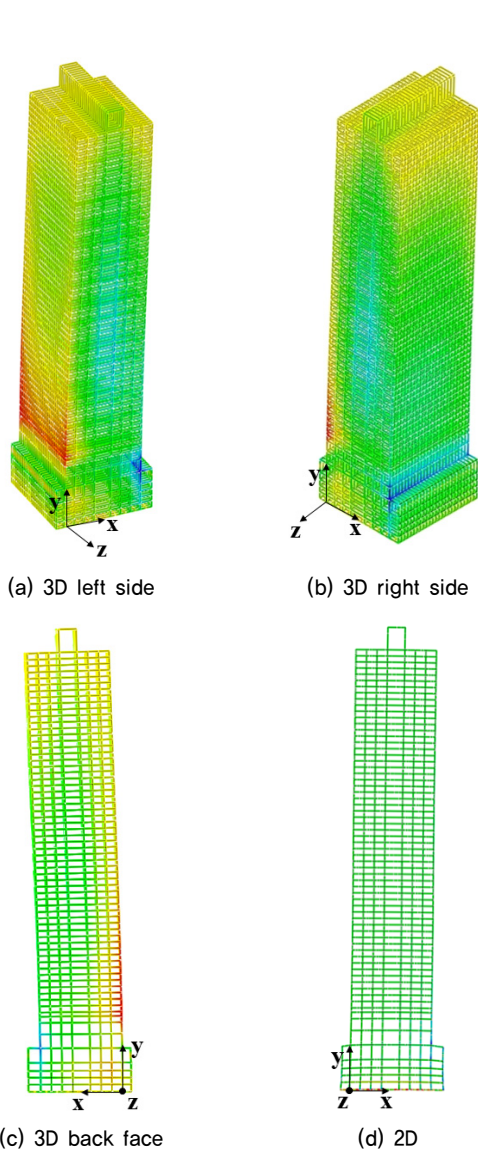


Fig. 7. Compressive bending stress distributions of high-rise buildings (extremely hard rock, short period, 0.154 g)

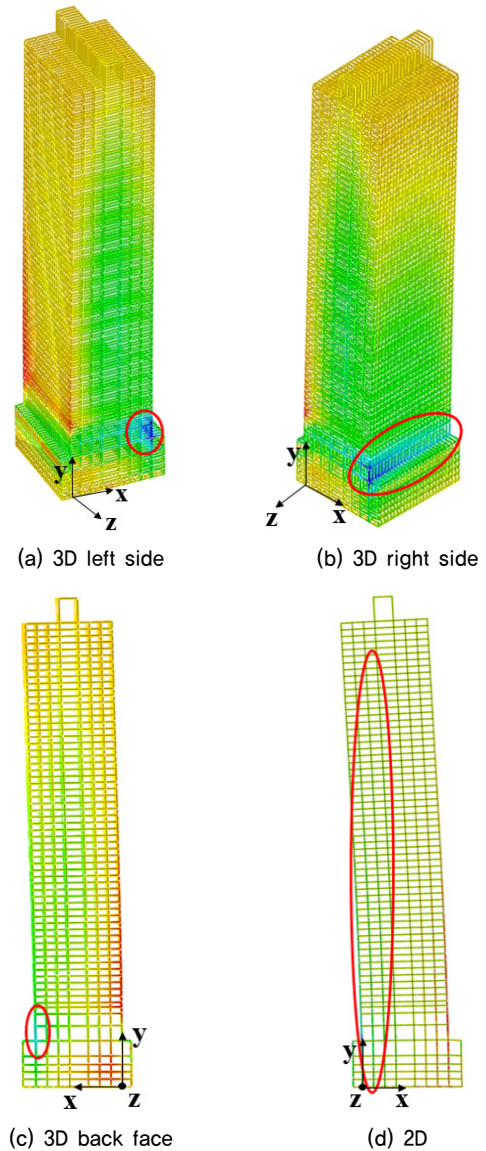


Fig. 8. Compressive bending stress distributions of high-rise buildings (extremely hard rock, long period, 0.154 g)

건물 취약부는 공통적으로 저층부에서 발생하였다.

이는 2D 및 3D 해석의 건물 지하 5층~지상 3층인 저층부의 부재 단면 크기가 상층부 동일하게 적용되었기 때문에 건물의 자중으로 인하여 저층부에서 취약한 결과를 보인 것으로 판단된다. 또한 2D 해석의 경우 휨응력이 과대 산출되었기 때문에 취약부 범위는 건물 지하부 및 지상부에서 각각 증가한 것으로 판단된다. 한편 최대 수평변위 및 층간변위비에서 분석된 것과 유사하게 장주기 지진파의 경우 상대적으로 초고층 건물의 고유주기(6.7초)와 장주기 지진파의 고유주기(0.8초)는 단주기 지진파(0.3초)보다 근접하게 되고 건물의 공진 가능성이 높아지기 때문에 2D 및 3D 해석의 초고층 건물의 취약부는 장주기 지진파에 취약한 것으로 보인다.

경암 지반조건에 시공된 초고층 건물에 크기가 0.22g인 단주기 지진파가 작용할 때 발생하는 휨인장응력에 대한 분

포를 Fig. 9와 같이 도시하였다. 3D 해석의 초고층 건물 취약부는 지하 4층~지상 45층의 좌측 1, 2번 기둥 및 좌측 벽체, 코어 좌·우측에서 발생하였고 Fig. 9(c)의 경우는 Fig. 9(a), (b)의 앞면과 동일하게 나타났다. 반면 2D 해석의 경우 지하 1층~지상 1층 우측 벽체 및 1, 2번 기둥을 제외한 모든 부재에서 취약부가 발생하고 3D보다 취약부 범위가 지하부 및 지상 상층부로 확대되었다. 따라서 초고층 건물의 휨응력에 의한 취약부 위치는 2D 및 3D 해석 모두 일치하였으나 범위는 2D 해석이 3D보다 지하부 및 지상부로 확대되는 경향을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진동 시 2D 및 3D 해석별 초고층 건물 동적거동과 취약부를 분석하고자 선정된 파라미터별로 비교·분석을 실시하였고 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 초고층 건물 최대 수평변위, 층간변위비, 휨응력을 기준으로 비교할 때 3D 해석이 2D보다 각각 평균 34%, 43%, 45% 적게 산출되고, 취약부 범위도 적게 산출되는 경향이 나타났다. 이는 평면변형률 조건의 2D 해석이 3D 해석보다 동적거동을 과대평가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 지진파 종류가 장주기일수록 초고층 건물의 최대 수평변위는 2D 및 3D 해석 각각 270% 및 117%, 최대 층간변위비의 경우 272% 및 135%, 건물 부재의 최대 휨응력은 250% 및 236%까지 증가하고, 취약부 범위도 확대되어 초고층 건물은 단주기 지진파보다 상대적으로 장주기 지진파에 더 취약한 것으로 나타났다. 이는 장주기 지진파의 고유주기(0.8초)가 단주기 지진파(0.3초)보다 초고층 건물의 고유주기(6.7초)에 근접하여 건물의 공진 가능성이 높았기 때문으로 판단된다.

종합적으로 판단하였을 때 지진 시 초고층 건물에서 발생된 동적거동에 의해 지진파 종류가 지반조건, 지진파 크기보다 건물에 더 영향을 주는 것으로 확인되었다. 또한 2D 해석이 3D보다 동적거동을 보수적으로 평가함을 알 수 있었으며, 향후 실무에서 내진설계 시 참고하면 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국

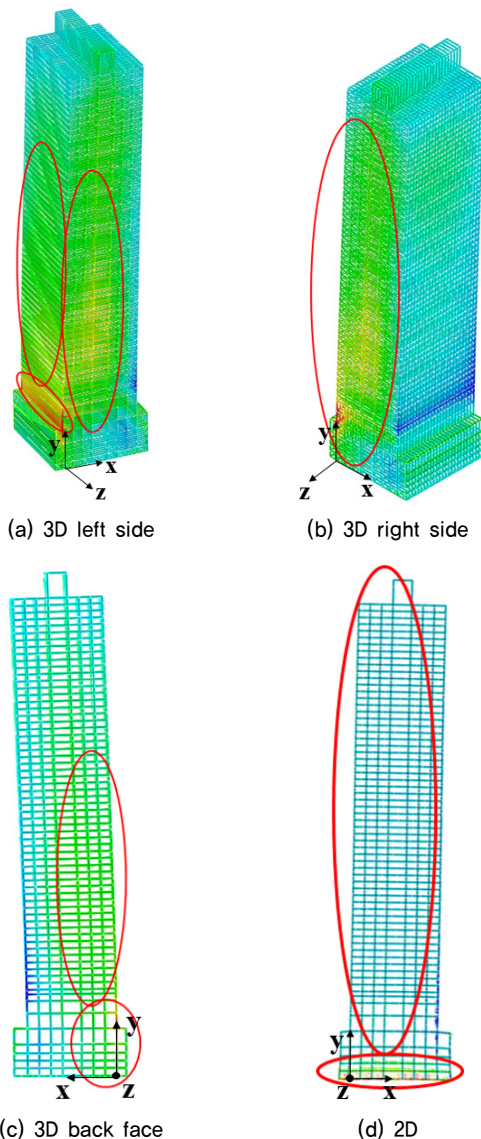


Fig. 9. Tensile bending stress distributions of high-rise buildings (hard rock, short period, 0.22 g)

가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT)
의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. 국토교통부 (2016a), 건축구조기준, 937p.
2. 국토교통부 (2016b), 콘크리트 표준시방서, 384p.
3. 서울특별시 (2006), 지반조사편람, 141p.
4. 김용민, 정상섭, 김경열, 이용희 (2011), “다층지반에서의 수직구동적 거동 분석”, 대한토목학회 논문집, 제 31권 제 4C호, pp. 109~116.
5. 유광호, 김승진 (2018), “연속체 모델과 지하구조물 고정단 모델의 비교를 통한 SSI 해석의 타당성 연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제 20권, 제 5호, pp. 757~772.
6. 유광호, 박연준, 김재권, 홍근영, 이현구 (2005), “지보재 파괴를 고려한 터널의 안전율의 수치 해석적 산정연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제 7권, 제 1호, pp. 37~49.
7. 허동수, 최동석, 이우동, 염경선 (2008), “투과성잡재 주변의 파동장 해석을 위한 2-D 및 3-D 수치계산의 비교”, 한국해양·해양공학학회논문집, 제 20권, 제 4호, pp. 363~371.
8. FEMA (2000), Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, ASCE, Washington, D.C., 518p.
9. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
10. PEER (2017), Tall building initiative guidelines for performance-based seismic design of tall buildings, University of California, Berkeley, 147p.
11. University of Suwon (2017), Development of a behavior prediction model by interaction of underground complex facilities for ground vibration, The 2016 Commission research Report of Multi-Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 130p.