

SSI를 이용한 건물과 인접지하구조물의 내진 안정성에 대한 기초 수치해석 연구

유광호^{1*} · 김영진²

¹정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 교수

²학생회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 석사과정

A preliminary numerical analysis study on the seismic stability of a building and underground structure by using SSI

Kwang-Ho You^{1*} · Young-Jin Kim²

¹Professor, School of Civil Environment Energy Engineering, University of Suwon

²Graduated Student, School of Civil Environment Energy Engineering, University of Suwon

*Corresponding Author : Kwang-Ho You, khyou@suwon.ac.kr

Abstract

Up to now, most of studies on seismic analysis have been limited to analyze buildings and underground structures individually so that the interaction between them could not be analyzed effectively. Thus, in this study, a dynamic analysis was conducted for soil-structure interaction with a complex underground facility composed of a building and an adjacent underground structure constructed on a surface soil and the bed rock ground conditions. Seismic stability was analyzed based on interstory drift ratio and bending stress of structure members. As a result, an underground structure has more effect on a high-rise building than a low-rise building. However the above structures were proved to be favorable for seismic stability. On the other hand, tensile bending stresses exceeded the allowable value at the underground part of the building and the adjacent underground structure so that it turned out that the underground part could be weaker than the above part. Therefore, it is inferred that above and underground structures should be analyzed simultaneously for better prediction of their interaction behavior during seismic analyses because there exist various structures around buildings in big cities.

Keywords: Dynamic analysis, SSI, High-rise building, Adjacent underground structure

초 록

현재까지 대부분의 내진해석 연구는 지상과 지하구조물을 개별적으로 분석하는 데 제한되어왔기 때문에 그 상호작용이 효과적으로 분석되지 못했다. 따라서 본 연구에서는

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(1)23-38(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.023>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received November 23, 2017

Revised December 19, 2017

Accepted December 26, 2017



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

기반암과 표층으로 이루어진 지반에 건물과 인접지하구조물이 설치되는 복합지하시설물을 대상으로 지반과 구조물을 동시에 고려한 동적해석(SSI)을 수행하였다. 내진안정성이 층간변위비와 구조부재의 휨응력에 근거하여 분석되었다. 그 결과, 초고층건물이 저층건물보다 인접지하구조물의 영향을 더 많이 받지만, 지상구조물은 내진안정성이 양호한 것으로 나타났다. 반면, 건물의 지하부와 인접지하구조물에서 발생한 휨인장응력이 허용값을 초과하여 지상부보다는 지하구조물이 더 취약할 수 있다고 나타났다. 따라서 대도시에서의 건물은 주변에 다양한 구조물이 존재하기 때문에 내진 해석 시 지상 및 지하구조물을 동시에 고려해야 상호거동을 정확히 예측할 수 있다고 판단된다.

주요어: 동적해석, SSI, 초고층건물, 인접지하구조물

1. 서론

최근 도심지의 건축물은 한정된 부지로 인해 점차 고층화되고 있으며, 서울 국제금융센터, 잠실 롯데월드타워 등과 같이 다양한 초고층건물 주변에는 대형 쇼핑몰, 지하철 역사 등과 같은 인접지하구조물이 시공되어 있다. 그리고 최근 912 경주지진으로 인하여 지진에 대한 대책 수립이 요구되는 실정이다. 경주지진은 국지적으로 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)의 크기가 400 gal을 넘었던 지진임에도 불구하고 대부분 저층 및 비내진건물의 비구조적 피해가 주를 이루었다(Lee, 2017). 따라서 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지역이 아니므로 저층건물 뿐 만 아니라 초고층건물, 더 나아가 인접지하구조물에 대한 내진 안정성 분석을 수행하여 실제 지진동 발생 시의 피해를 최소화시킬 필요가 있다.

Choi et al. (2009)은 내진해석 프로그램인 SAUS를 이용하여 지반조건, 지하구조물의 단면 형상비, 내진등급을 파라미터로 하여 지하구조물에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 단면 형상비는 내진 안정성에 영향을 주지 못했지만, 지하구조물의 체적과 지반조건은 주요한 매개변수로 분석되었다. 또한 Youn et al. (2012)은 횡력 저항 시스템에 따른 비정형 초고층건물에 대하여 평면 비틀림 각도, 지진지역 등을 달리하여 내진해석을 수행하였다. 이처럼 지금까지 지상과 지하구조물의 내진해석은 각각 별도로 수행되어 왔다. 따라서 초고층건물과 인접지하구조물을 동시에 고려하여 지진동 시의 상호거동을 분석한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 지진동 시 구조물의 높이와 인접지하구조물의 유·무가 구조물의 내진 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해 지반 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D를 사용하여 SSI (Soil-Structure Interaction) 해석을 수행하였다. 이를 위해 초고층건물(높이 275 m, 55층)과 저층건물(높이 50 m, 10층)을 대표 구조물로 선정하였으며, 건물과 25 m 이격되어 있는 가로폭 50 m, 높이 15 m, 심도 10 m의 인접지하구조물을 대상으로 하였다. 그리고 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당하고 붕괴방지수준의 최대지반가속도인 0.154 g와 0.22 g인 Hachinohe 파를 입력지진파로 하였다. 결과적으로 초고층건물과 저층건물, 인접지하구조물의 수평변위, 층간변위비, 구조부재에 작용하는 휨응력을 산출하고 취약부 위치를 파악하여 지진동 시 초고층 및 저층건물과 인접지하구조물의 상호거동을 분석하였다.

2. 동적해석법의 종류

동적해석법은 터널 및 주변지반을 모델링하고 시계열을 고려한 지진파를 입력하여 지반 및 구조물의 상호작용을 해석하는 방법이다. 일반적으로 복잡한 지반특성에 있는 지중구조물 해석에 적합하며, 응답변위법, 응답진도법 등과 달리 시간에 따라서 구조물과 지반의 변위, 속도, 가속도, 부재력 등을 분석할 수 있다. 또한 다른 해석방법보다 결과의 정확도가 높지만 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다(Jeong et al., 2016).

동적해석법은 응답스펙트럼법과 시간이력해석법 두 가지로 나뉘어진다. 응답스펙트럼법은 시간이력해석법보다 오차가 좀 더 발생하지만 정밀한 결과가 요구되지 않을 때 보다 간편하게 구조물의 동적특성을 파악할 수 있다. 반면 시간이력해석법의 경우 모드중첩법과 직접적분법으로 구분할 수 있으며 일반적으로 구조물이 탄성거동을 할 경우에는 모드중첩법을, 비선형 거동을 고려할 경우에는 직접적분법을 사용한다(Park, 2007).

3. 구조물 취약부 판정기준

3.1 층간변위비

지진 시에 층간변위가 크게 발생되면 건축물의 안정성에 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 내진설계 시에는 층간변위가 일정한 값을 초과하지 않도록 규정하고 있으며, 우리나라에서는 층간변위가 층고의 1.5% (내진 II 등급 기준, 허용최대층간변위)를 넘지 않도록 하고 있다.

층간변위비(interstory drift ratio)는 층 변위의 최대값을 해당 층 높이로 나눈 값이다. 본 연구에서는 National Disaster Management Research Institute (2012)가 수행한 지진 가속도계측기를 활용한 건축물의 건전성 평가연구를 참고하여, n과 n+1층의 수평변위의 차, $(\delta_{n+1} - \delta_n)$ 를 해당 층 높이로 나누어 식 (1)과 같이 계산하였다.

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

3.2 허용휨응력

구조물에 발생된 휨응력이 허용값을 초과했는지를 조사하여 구조부재의 파괴여부를 판단할 수 있다. 이를 위해 Fig. 1의 P (축력)-M (모멘트)상관도와 같이 구조부재에 발생하는 축력과 모멘트를 이용하여 휨응력을 산출한다. 즉 구조부재의 설계기준강도가 σ_{ck} 일 때 허용휨압축 및 인장응력을 식 (2)와 식 (3)을 이용해 구하고 산출된 휨응력과 비교함으로써 구조물의 파괴 및 균열발생 여부를 판단한다(You et al., 2005).

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

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

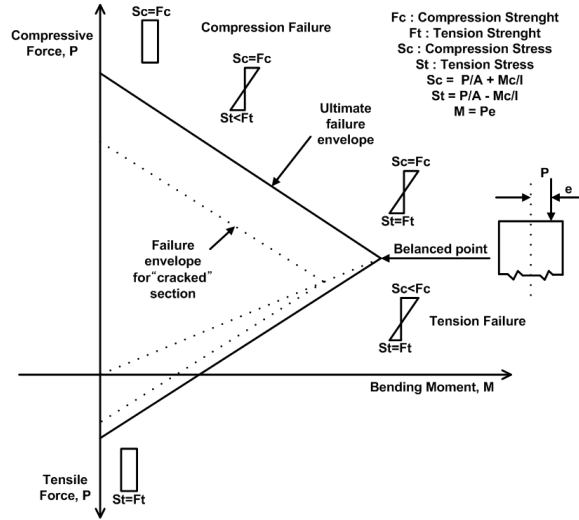


Fig. 1. A typical moment-thrust diagram (Itasca Consulting Group, Inc. 2005)

4. 지반 및 건물의 고유주기 및 감쇠비 산정방법

동적해석의 경우 유사정적해석과는 다르게 입력지진파를 사용하여 시계열을 고려한 해석을 수행하므로, 지반 및 구조물에 대한 감쇠비 및 고유주기를 추가적으로 고려해야 한다. FLAC에서는 지반에 Rayleigh 감쇠(damping)를 적용하기 위해 center frequency인 f_{min} 과 최소 감쇠비인 ξ_{min} 이 필요한데, Park et al. (2010)은 토층의 고유주파수를 사용하여 식 (4)과 식 (5)와 같이 계산할 수 있다고 제안하였다.

$$\xi_{min} = 0.6\xi \tag{4}$$

$$f_{min} = 3f_{site} \tag{5}$$

여기서, f_{site} : 토층의 고유주파수

ξ : 지반의 감쇠비

Koo and Kim (2015)은 국내의 36가지의 RC 구조물을 대상으로 감쇠비 산정식을 제안하고 Fig. 2와 같이 타 연구의 결과와 비교하였다. 모든 그래프에서 건물의 감쇠비는 높이가 증가함에 따라 100 m 까지 급격히 감소하였다. 반면 건물높이가 100 m 이상일 때는 Lagomarsino (1993)가 제안한 곡선을 제외하고 대부분의 곡선은 감쇠비가 약 0.01로 수렴하는 경향이 나타났다. 그리고 초고층건물과 저층건물의 고유주기는 건축설계기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서 식 (6)과 같이 간편식이 제시된 바 있다. 여기서 T는 건물의 고유주기이며 H는 건물의 전체 높이(m)이다.

$$T = 0.073H^{0.75}$$

(6)

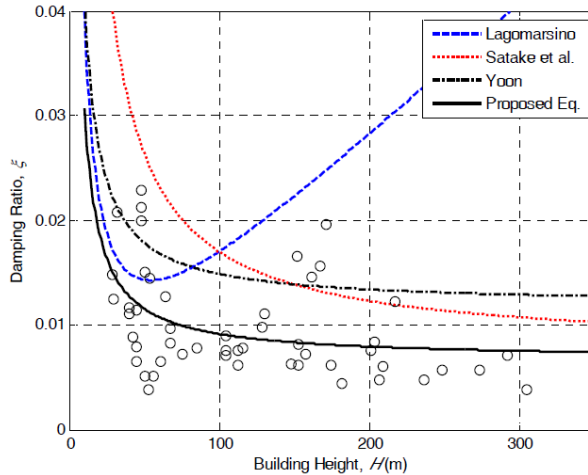


Fig. 2. Correlation between damping ratio and building height (Koo and Kim, 2015)

Yoon (2006)은 지반의 고유주기를 이용한 지반분류방법을 제시하기 위해, 162개 지반을 선정하여 지진응답 해석을 수행하였다. 그 결과 지진응답해석과 표준 설계응답스펙트럼이 장주기와 단주기영역에서 큰 차이가 나타났다. 따라서 국내의 지반분류 기준과 설계응답스펙트럼을 개선하기 위하여 고유주기를 이용하여 지반을 분류하는 방법을 Table 1과 같이 제시하였다. 지반조건에 따른 고유주기는 특정 암반이나 토사를 기준으로 하는 것이 아니라 기반암의 심도와 표층의 두께를 기준으로 산출하였다.

Table 1. A method of soil classification using the natural period of ground

Type	Natural period of ground (sec)	Ground conditions
T _R		• Soft or hard rock
T _A	T < 0.1	• Bedrock is located within 10 m and a thickness of soft soil layer is less than 5 m
T _B	0.1 ≤ T ≤ 0.3	• Most cases when bedrock exists between 10 and 20 m. Thicknesses of sand layer and soft layer are less than 10 m with the lower weathered layer although bedrock exists within 25 m.
T _C	0.3 < T ≤ 0.5	• Bedrock is located between 20 m and 30 m, and a thickness of sand layer and soft layer are more than 10 m • A thickness of sedimentary layer and weathered layer are 20 m or more when a depth of bedrock is 30 m or more.
T _D	0.5 < T	• Bedrock is located more than 30 m, and soft soil layer such as sand layer, clayey silt layer, and clay layers are located 20 m or more
T _E		• A ground that requires site-specific response analysis

5. 동적해석을 위한 모델링

본 연구에서는 초고층건물의 지상 및 지하부 그리고 인접지하구조물의 상호거동을 알아보기 위해 Fig. 3과 같은 해석단면을 사용하였다. 먼저 건물과 인접지하구조물은 기반암인 화강암 위에 시공되는 것으로 적용하였으며, 기반암 상부 25 m 만큼 풍화토가 존재하여 건물의 지하부와 인접지하구조물은 풍화토 내에 존재한다고 가정하였다. 초고층건물의 지상부는 55층(총 건물 높이 275 m, 층고 5 m)이며, 내부 기둥은 9 m 간격으로 2개가 설치되고, 건물의 좌우측 벽체는 기둥으로부터 12.5 m 이격되는 것으로 하였다. 지하부 기둥의 경우 지상부 바로 아래는 지상부의 기둥 및 벽체의 간격과 동일하게 설치하였으며, 그 외 지하부 기둥은 10 m 간격으로 설치하였다. 또한 지하부의 층고는 지하 1층부터 7.5 m, 6.0 m, 8.0 m, 3.5 m로 적용하였다. 인접지하구조물의 경우 3층(층고 5 m)이고 기둥 간격이 10 m인 폭 50 m로 적용하였으며 지표로부터 10 m 아래에 위치하는 것으로 모사하였다.

저층건물의 경우도 초고층건물과 같은 조건에서 지진 시의 거동을 분석하기 위해 동일한 해석단면을 사용하였고 건물의 층수만 10층으로 낮추어서 Fig. 3에서와 같이 적용하였다. 또한 초고층건물의 슬래브, 벽체, 기둥과 지반조건의 물성치도 동일하게 적용하였다.

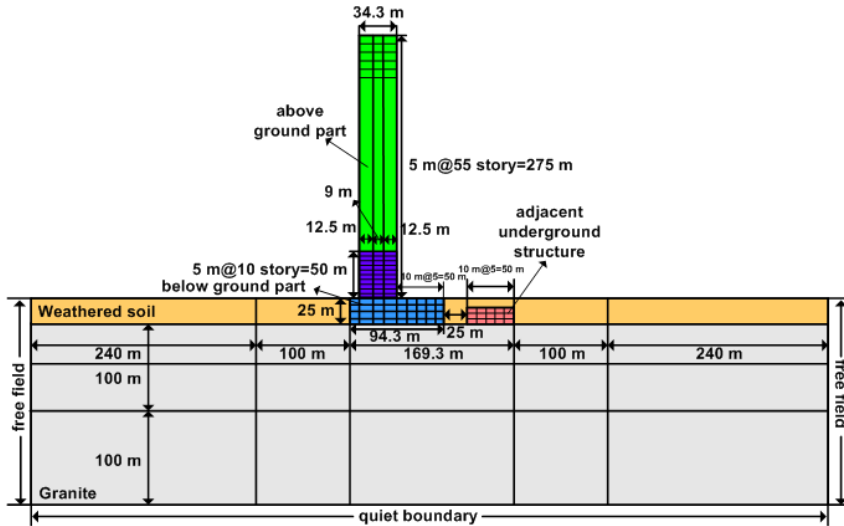


Fig. 3. Generals of the dynamic analysis section

해석영역이 결과에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 초고층 건물의 좌측 지하벽체와 초고층건물 우측에 설치된 인접지하구조물의 우측벽체를 기준으로 340 m, 초고층건물의 지하구조물 최하단을 기준으로 200 m 만큼을 해석영역으로 설정하였다. 또한 구조물의 거동을 보다 자세히 분석하기 위해 초고층건물과 인접지하구조물을 기준으로 좌, 우측 100 m, 하부 100 m의 영역은 요소의 크기를 2 m로 적용하였고, 그 이상의 영역은 요소의 크기가 점차 커지도록 설정하였다.

요소망의 측면경계에서 지진파가 반사되어 해석결과에 영향을 미치는 것을 막기 위해 해석영역의 좌, 우측 경계는 자유장경계를 적용하였다. 그리고 특정 지점에서 계측된 입력지진파를 기반면의 하부에 작용시키기 위해서는 deconvolution을 수행하여 지진파의 진동이 과대평가되는 것을 주의해야 한다고 한 Park et al. (2010)의 연구에 따라 본 연구에서는 요소망의 하부경계에 quiet 경계(점성댐퍼)를 적용하였다.

본 해석에 적용한 표층과 기반암은 각각 풍화토와 화강암을 적용하였으며, 물성치는 You and Kim (2017)의 초고층 빌딩과 인접지하시설물의 내진해석 연구를 참고하여 Table 2와 같이 적용하였다. 측압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다.

Table 2. Ground properties for dynamic analysis

Type	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio	Friction angle (°)	Cohesion (kPa)
Weathered soil (surface)	19	25	0.32	29	20
Granite (bed rock)	26	15,000	0.22	43	2,500

본 연구에서는 초고층 및 저층건물이 RC 구조물로 시공되었다고 가정하였다. 따라서 콘크리트 표준시방서 (Ministry of Land, 2016)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})가 40.0 MPa인 것을 참고하여 식 (2)와 식 (3)을 이용해 최대허용휨압축 및 인장응력을 각각 24.0, 4.0 MPa로 적용하였다. 그리고 탄성거동을 하는 beam 요소를 사용하여 슬래브, 벽체 그리고 기둥을 사용하여 건물과 인접지하구조물을 모사하였다. 각 부재의 단위중량과 탄성계수는 동일하게 적용하였으며 이에 대한 물성치는 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of structural members

Structural members	Unit weight (kN/m ³)	Deformation modulus (GPa)	Moment of inertia (m ⁴)	Thickness (m)
Slab	25	21	3.57×10^{-3}	0.35
Wall			4.23×10^{-2}	0.8
Pillar			0.18	1.3

본 연구에서 적용한 구조부재 중 슬래브는 폭 1.0 m, 두께 0.35 m 이고 직경 25 mm 철근이 슬래브 하단에 3개 배근되어 있는 단순한 단면으로 가정하고, Yoon (2016)을 참고해 소성모멘트(plastic moment)를 0.12 MN·m로 적용하여 파괴를 고려하였다. 또한 구조물의 자중을 고려하기 위해 철근콘크리트의 단위중량을 25 kN/m³으로 적용하였으며 그 외의 사하중 및 사하중은 각각 4.2 kN/m², 2.5 kN/m²으로 가정하여 슬래브 1 m²당 6.7 kN의 하중을 재하시켰다.

본 연구에서는 건물의 높이, 지진규모, 인접지하구조물의 유·무가 지진동 시 건물 및 인접지하구조물에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 따라서 Table 4와 같이 건물층수(2), PGA(2), 인접지하구조물 유·무(2)로써 총 6가지의 경우에 대해서 수치해석을 수행하였다. 최대지반가속도는 지진구역이 서울일 때 재현주기가 1,000년과 2,400년에 해당하는 0.154 g와 0.22 g로 선정하였다.

Table 4. Parameters applied on dynamic analysis

Building story	PGA (g)	Adjacent underground structure
55, 10	0.154, 0.22	Existence / Nonexistence

동적해석 시 지진파를 시간이력으로 요소망 최하단에 작용시켰으며, 입력지진파는 Fig. 4와 같이 총 가진시간이 15초 인 Hachinohe 지진파를 적용하였다. 그리고 초고층건물과 저층건물의 감쇠비는 국내에 시공된 아파트를 대상으로 Yoon (2002)이 제시한 감쇠비 산정식을 사용하면 각각 0.014, 0.018로 산출된다(Fig. 2 참조). 또한 지반의 감쇠비는 일반적으로 0.05가 사용되기 때문에(Park et al., 2015; Itasca Consulting Group, Inc. 2005), 식 (4)를 사용하여 0.03을 수치해석 상에 적용하였다.

초고층건물과 저층건물의 고유주기는 건축설계기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서 제시된 고유주기 간편식을 이용하여 각각 5초, 1초로 하였다. 그리고 고유주기에 따른 분류 방법을 제안한 Yoon (2006)은 Table 1과 같이 기반암이 25 m 내에 존재하는 T_B 지반의 고유주기를 0.22로 제시하였다. 따라서 수치해석 시에는 식 (5)를 사용하여 지반의 고유주기를 0.66으로 적용하였다(Table 1 참조).

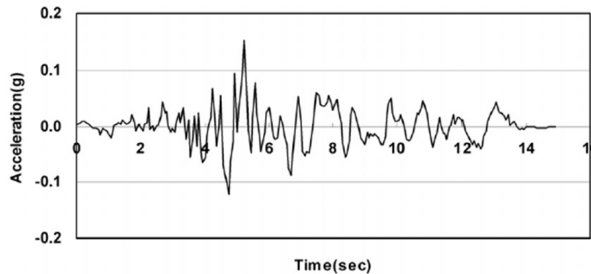


Fig. 4. A acceleration time history of the Hachinohe wave

6. 동적해석 결과

6.1 지상구조물의 수평변위

초고층 건물 및 저층건물에 대한 동적해석 시 지상부의 최대수평변위를 건물의 좌측 벽체를 기준으로 산출하여 층간변위비가 허용값 내로 발생하는지 분석하였다. Table 5는 건물의 높이, PGA, 지하구조물의 유·무 별로

지진동 시 가진시간에 따라 구조물에 발생하는 최대수평변위와 이에 해당하는 층을 나타낸 것이다.

Table 5. Maximum horizontal displacements influenced by story, PGA and the adjacent underground structure

Building story	PGA (g)	Adjacent underground structure	Maximum horizontal displacement (mm)							
			4 sec	Corresponding story	8 sec	Corresponding story	12 sec	Corresponding story	16 sec	Corresponding story
55	0.154	Exist	34.7	1	52.7	9	53.0	55	42.9	41
		No exist	37.2	1	51.3	9	39.6	27	24.7	55
	0.22	Exist	51.5	1	74.8	9	81.0	55	59.2	41
		No exist	48.2	1	73.6	9	74.3	25	45.9	55
10	0.154	Exist	35.9	1	48.1	10	21.3	10	11.6	10
		No exist	33.5	1	46.2	10	19.9	10	13.5	10
	0.22	Exist	50.3	1	72.0	10	31.8	10	13.9	10
		No exist	48.2	1	70.2	10	30.4	10	15.9	10

Fig. 5는 인접지하구조물이 건물의 수평변위에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 초고층건물의 경우 가진시간이 8초 이전에는 인접지하구조물 유·무에 따른 최대수평변위의 차이가 약 2 mm 이내로서 거의 발생하지 않았다. 그러나 가진시간 8초 이후부터 인접지하구조물이 있는 경우가 없을 때보다 PGA가 0.154 g일 때 평균 11.0 mm, 0.22 g일 때 7.0 mm 더 크게 발생하였다. 인접지하구조물 설치 시 굴착된 토사의 질량과 인접지하구조물 전체 구조부재의 질량은 각각 1,425 ton과 542.5 ton으로 산출되었다. 따라서 인접지하구조물이 있는 경우가 없는 경우보다 지하구조물이 포함된 요소망의 총질량이 상대적으로 작아서, 초고층 건물이 지반으로부터 전달되는 지진동의 영향을 더 크게 받았기 때문으로 판단된다. 이는 인접지하구조물이 있는 경우가 없는 경우보다 건물 지하부의 최하단 중심에서 최대가속도가 약 0.02 g 만큼 더 크게 나타난 Fig. 6의 결과로도 설명될 수 있다.

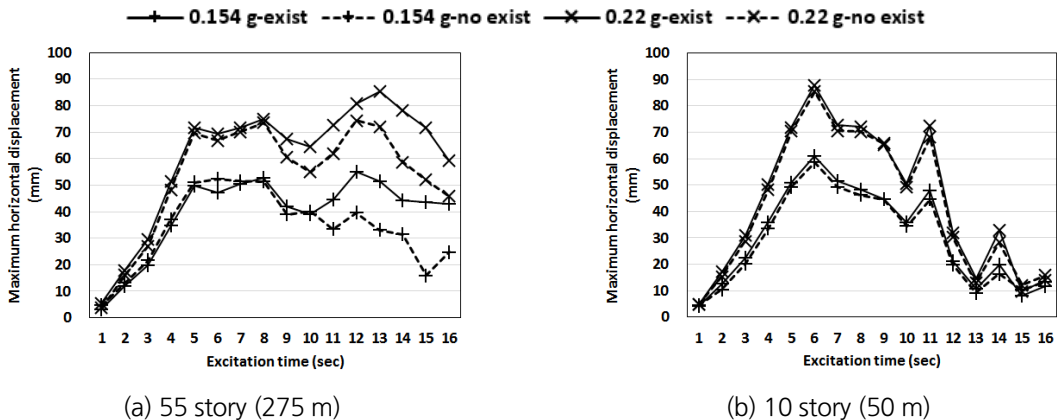


Fig. 5. Maximum horizontal displacements influenced by PGA and the adjacent underground structure

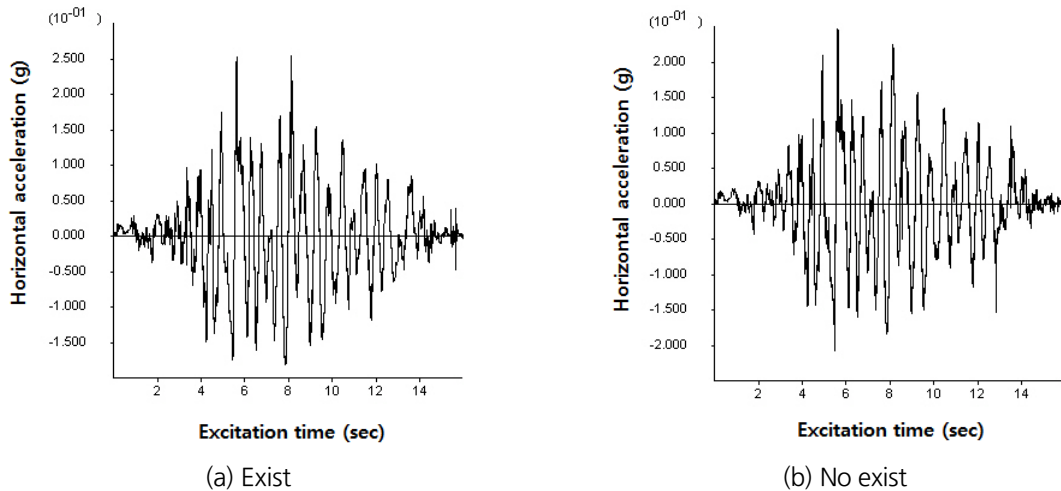


Fig. 6. The acceleration time histories at center of bottom boundary of high-rise building (PGA 0.154 g)

반면 저층건물의 경우 인접지하구조물의 유·무가 건물의 최대수평변위에 영향을 미치지 못했다. 이는 저층건물이 상대적으로 건물의 세장비가 작기 때문에 초고층건물과 동일한 지반조건과 지진동이 발생하여도 인접지하구조물의 영향을 더 적게 받았다고 판단된다.

Fig. 7은 가진시간(8초, 12초)에 따른 초고층 및 저층건물의 좌측벽체를 기준으로 한 수평변위분포를 나타낸 것이다. 초고층건물과 저층건물 모두 인접지하구조물이 있을 때와 없을 때 단순히 수평변위 크기만 증가하고 변형모드는 동일하게 발생하였다. 초고층건물의 경우 가진시간이 4초일 때는 2차 모드 형상에 가깝게 수평 변위분포가 발생하였지만, 시간이 경과할수록 3차 이상의 모드 형상을 보였다.

반면 저층건물의 경우 대부분의 가진시간에 1, 2차 모드 형상이 나타났다. 이는 탁월주기가 2초인 Hachinohe 파가 가해질 때, 초고층건물 3, 4차 모드 형상의 고유주기가 저차 모드보다 입력지진파인 Hachinohe파의 탁월주기인 2초에 근접하여 공진가능성이 높기 때문이라고 판단된다. 반면 저층건물의 경우 1, 2차 모드의 고유주기가 고차모드보다 입력지진파의 탁월주기와 가깝기 때문에 공진가능성이 가장 높아서 1, 2차 모드에 해당되는 수평 변위분포가 발생하였다고 생각된다.

한편, 초고층건물은 인접지하구조물이 있을 때가 없을 때보다 평균 7.0 mm 더 크게 발생하였으며, 저층건물의 경우 평균 2.0 mm 만큼 소폭 더 크게 발생하였다. 결과적으로 인접지하구조물은 건물의 변형모드에 거의 영향을 미치지 못하지만 저층건물보다는 초고층건물에 더 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 특히, 초고층건물의 경우 Fig. 7(b)와 같이 가진시간이 12초일 때 건물 25층 이상에서 인접지하구조물 유·무에 따른 수평변위의 차이가 12초 이전보다 크게 발생하였다. 이는 앞선 분석과 동일한 이유로서 인접지하구조물이 있는 경우가 없을 때보다 지하구조물이 포함된 요소망의 총질량이 더 작기 때문에 지진동의 영향을 상대적으로 더 크게 받아서 지상구조물의 수평변위가 크게 발생했다고 판단된다.

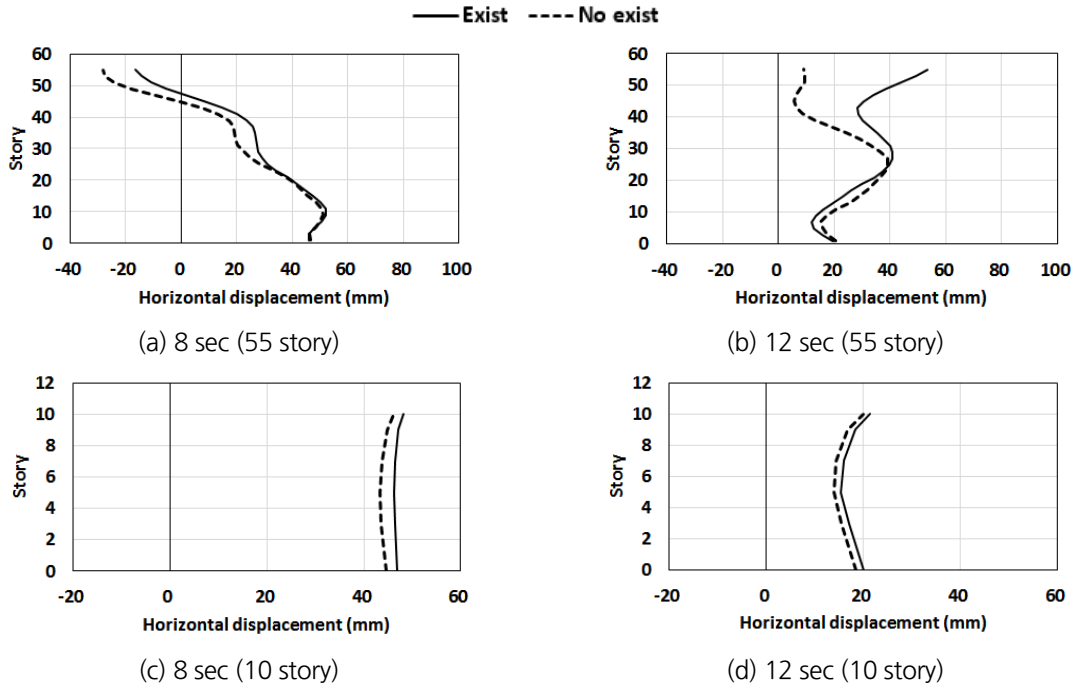


Fig. 7. Horizontal displacement distributions with/without the adjacent underground structure (PGA 0.154 g)

최대지반가속도가 지상구조물의 수평변위에 미치는 영향을 분석한 결과, Table 4와 같이 초고층건물과 저층 건물은 인접지하구조물의 유·무와 관계없이 최대지반가속도가 0.154 g에서 0.22 g로 증가하면 최대변위가 약 2.0 mm에서 3.0 mm 더 크게 발생되었다. 또한 초고층 및 저층건물 모두 최대지반가속도가 증가할 때 건물의 수평변위는 변위 크기만 변화하였으며 구조물의 변형모드는 거의 동일하게 나타났다. 결과적으로 최대지반가속도와 인접지하구조물의 유·무는 단순히 구조물의 수평변위 크기에 영향을 미쳤으며 구조물의 변형모드에는 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있었다.

앞서 분석한 구조물 좌측벽체의 수평변위를 이용하여 지진 시 초고층건물의 취약부를 판단하기 위해 초고층건물에 인접지하구조물이 있는 경우를 대표 케이스로 하여 층간변위비를 산출하였다. 먼저 초고층 건물 지상부 좌측벽체를 기준으로 가진시간이 8초일 때의 층간변위비를 Fig. 8과 같이 산출하였다. 그 결과 최대지반가속도가 0.22 g일 때 0.154 g일 때보다 층간변위비가 평균 0.005% 높은 것을 확인하였다. 최대지반가속도가 0.22 g 인 경우 45층에서 최대 층간변위비인 약 0.09%가 발생하였으나, 일반적인 RC구조물의 경우 ‘즉시거주’ 수준의 층간변위비가 0.5%이므로(National Disaster Management Research Institute, 2012) 모든 경우에서 초고층건물의 지상부는 내진 안정성이 건전한 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 다른 경우에서도 동일하게 나타났다. 결과적으로 지상 및 지하구조물 그리고 지반을 고려한 내진해석 시 지상부에는 내진 안정성이 양호하다고 판단된다.

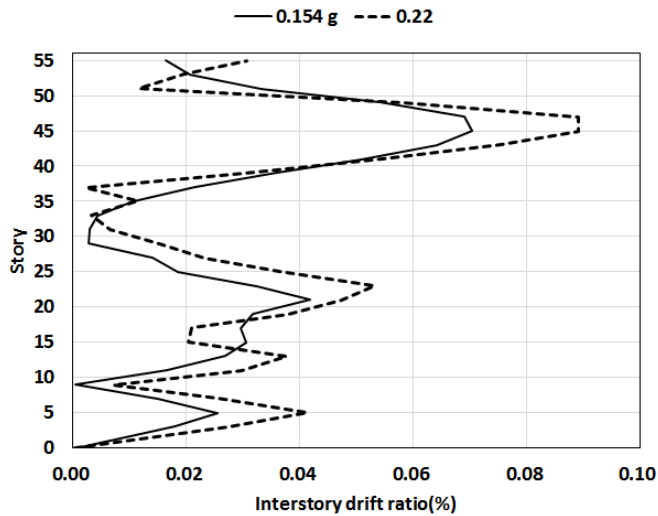


Fig. 8. Influence on interstory drift ratio (55 story, Exist the adjacent underground structure, 8 sec)

6.2 구조물의 휨응력

인접지하구조물이 구조물의 휨응력에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 PGA가 0.154 g 일 때 건물의 높이와 위치별로 최대휨응력을 나누어 도시하였다. 초고층건물은 가진시간이 8초일 때 인접지하구조물의 유·무에 관계없이 지상구조물의 수평변위가 최대값에 근접하게 발생하였다. 또한 저층건물의 경우 모든 경우에서 가진시간이 6초일 때 최대변위가 발생했기 때문에, 초고층건물과 저층건물 각각 8초와 6초를 기준으로 구조부재에 발생하는 휨응력을 분석하였다.

초고층건물과 저층건물 그리고 지상부와 지하부에 관계없이 인접지하구조물의 유·무에 따른 휨응력의 차이가 0.3 MPa 이내로 발생하였다. 이는 지하구조물의 규모가 내진안정성에 영향을 미치는 주요 인자인데(Choi et al., 2009), 본 연구에서 적용한 인접지하구조물의 규모가 작았기 때문에 지진동 시 구조물에 미치는 영향이 크지 않았을 수 있었다고 판단된다.

Fig. 9(a), 9(c)에서와 같이 초고층 및 저층건물 지상부와 지하부에서 발생한 최대휨압축응력은 허용값인 24.0 MPa 이내로 발생하여 균열 및 파괴가 발생할 가능성은 없다고 판단된다. 반면 최대휨인장응력의 경우 Fig. 9(b)와 같이 초고층 및 저층건물의 지상부는 허용값 이내로 발생하였다. 그러나 Fig. 9(d)와 같이 건물의 높이와 인접지하구조물의 유·무에 관계없이 지하부에서 약 10.0 MPa로 거의 동일한 최대휨인장응력이 발생하였으며 허용값인 4.0 MPa를 초과하였다. 따라서 모든 경우의 지하부 구조부재에서는 균열 및 파괴의 가능성이 있다고 판단된다.

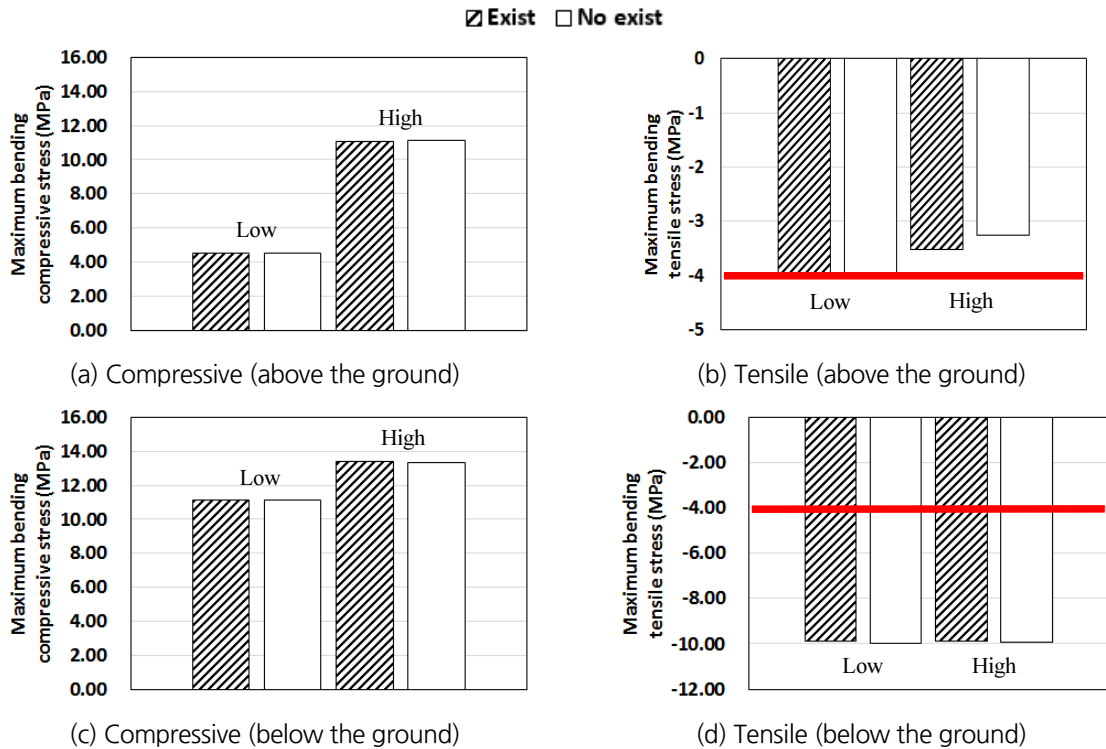


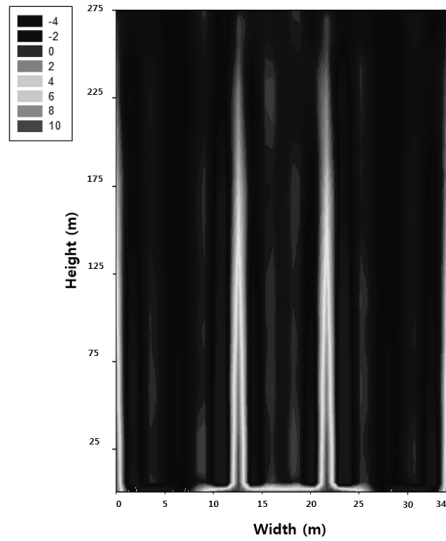
Fig. 9. Maximum bending stresses with/without the adjacent underground structure (PGA 0.154 g)

결과를 좀 더 자세히 분석하기 위해 Fig. 10과 같이 구조물의 휨응력 분포도를 조사하였다. 초고층건물의 지상 부에서는 중앙 기둥 2개의 중심에서 하부까지 압축응력이 발생하였고 그 외의 부분에서는 인장응력이 발생하였다. 하지만 휨인장응력이 모두 4.0 MPa 이내로 발생하여 구조물의 균열 가능성은 없는 것으로 판단된다.

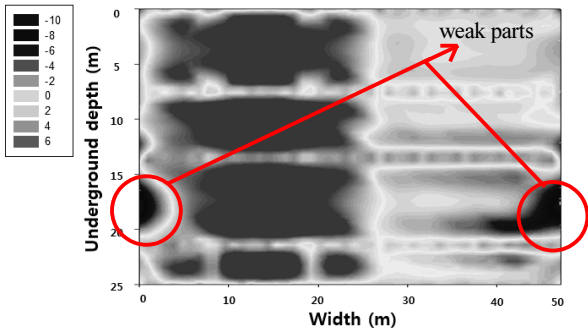
그러나 Fig. 10(b), 10(c)에서와 같이 건물의 지하부에서는 지하 3층의 좌, 우측 벽체, 인접지하구조물에서는 3층 천정부 전반에 걸쳐 허용값인 4.0 MPa를 초과하여 취약부가 발생하였다. 이는 건물과 인접지하구조물이 연약한 풍화토 지반에 시공되었으며, 해당 취약부에서 약 43.0 mm의 최대수평변위가 발생하여 결과적으로 구조부재의 휨응력이 커졌기 때문이다.

한편, 초고층 및 저층건물 지하 취약부의 휨인장응력은 약 10.0 MPa로 거의 동일하게 나타났지만, 인접지하구조물은 평균 8.3 MPa으로써 지하부보다 1.7 MPa 적게 발생하였다. 또한 건물 지하의 취약부에서 발생한 가속도 이력의 최대값이 인접지하구조물의 해당되는 값보다 약 0.02 g 정도 크게 발생한 것을 확인하였다. Kim et al. (2013)은 일반적으로 건물의 지하부는 지상부와 연결되어 있기 때문에 재료감쇠(material damping)만이 발생하지만, 인접지하구조물의 경우 주변 지반에 둘러싸여 있기 때문에 재료감쇠와 발산감쇠(radiation damping)가 동시에 일어나는 이중감쇠(double damping)가 발생한다고 주장한 바 있다. 결과적으로 지진동 시 인접지하구조물은 이중감쇠로 인해 건물 지하부보다 더 작은 휨응력이 발생하였다고 판단된다.

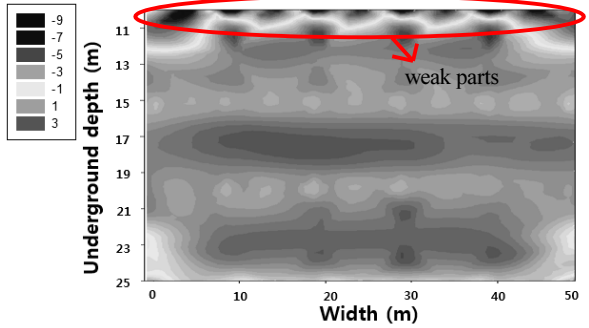
Fig. 10과 같은 휨응력 분포는 저층건물에서도 동일하게 나타났으나 최대지반가속도는 건물의 휨응력에 큰 영향을 주지 못하는 것을 확인하였다. 결과적으로 지진 시 건물의 지상부 보다는 지하부와 인접지하구조물이 취약하기 때문에, 추후 인접지하구조물의 규모 및 주변 건물과의 이격거리 등을 달리하여 SSI 해석을 수행한다면 더욱 다양한 조건에서 내진안정성을 알아볼 수 있을 것이라고 판단된다.



(a) Above the ground



(b) Below the ground



(c) The adjacent underground structure

Fig. 10. Bending stress distribution of high-rise building (PGA 0.154 g, 8 sec)

7. 결론

본 연구에서는 Hachinohe파를 이용하여 지진 규모와 인접지하구조물의 유·무가 초고층건물과 저층건물의 지진 시 거동에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고자 하였다. 이를 위해 FLAC 2D를 이용한 동적해석을 수행하여 구조물에 발생하는 수평변위와 층간변위비, 휨응력을 근거로 내진안정성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 모든 경우에서 지상구조물은 층간변위비가 ‘즉시거주’ 수준인 0.5% 이내로 발생하여 내진안정성이 양호하였지만 건물의 지하부 및 인접지하구조물의 휨인장응력이 허용값인 4.0 MPa를 초과하였다. 따라서 동적해석 시 지상구조물뿐만 아니라 지하구조물의 내진안정성을 평가하는 것이 필요하다고 판단된다.
2. 초고층건물의 경우 인접지하구조물로 인해 요소망의 총 질량이 작아질수록, 건물 지상부의 수평변위는 PGA가 0.154 g와 0.22 g 일 때 각각 평균 7.0 mm, 11.0 mm 더 커졌다. 반면 저층건물은 인접지하구조물이 지상부의 수평변위에 영향을 주지 못하는 것으로 확인되었다. 따라서 건물에 대한 내진안정성 분석 시 주변 지하구조물을 고려한 SSI 해석을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 제한된 파라미터를 대상으로 SSI 해석을 수행하였기 때문에 추후 연구에서는 건물의 지하부와 인접지하구조물에 관한 다양한 파라미터를 선정하여 민감도 분석을 수행한다면, 최근 많이 시공되고 있는 대규모 지하복합시설물과 인접해 있는 구조물에 대한 지진 시 상호거동을 예측할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Architectural Institute of Korea (2009), Korea building code, pp. 85-90.
2. Choi, S.H., Park, I.J., Kim, S.H. (2009), “Aseismic analysis for large underground structure”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 2, pp.163-174.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
4. Jeong, U.C., Lee, J.H., Park, S.W., Kim, Y.G. (2016), “Evaluation of tunnel structures based on a upward seismic design”, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 4, pp. 20-33.
5. Kim, T.S., Kim, D.S., Sa, G.M., Cho, K.H. (2013), “Analysis for vibration characteristics of low depth track system under various ground conditions of structure surrounding”, The Korean Society for Railway, Vol. 2013, No. 11, pp. 936-942.
6. Koo, H.J., Kim, H.J. (2015), “Natural period and damping ratio of RC buildings for serviceability design”, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 31, No. 2, pp. 37-44.
7. Largomarsino, S. (1993), “Forecast models for damping and vibration periods of buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 48, No. 2, pp. 221-239.
8. Lee, C.H. (2017), “Earthquake engineering analysis of ground accelerations measured in the 912 Gyeong-ju earthquake”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 65, No. 4, pp. 8-13.

9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Concrete standard specification, pp. 126-133
10. National Disaster Management Research Institute (2012), Development of the public buildings emergency integrity assessment technology using seismic acceleration response signal, pp. 100-107.
11. Park, D.H., Shin, J.H., Yun, S.U. (2010), "Seismic analysis of tunnel in transverse direction Part 2: evaluation of seismic tunnel response via dynamic analysis", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 6, pp. 71-85.
12. Park, I.J. (2007), "A Seismic design of underground structure in Korea", Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 3, pp. 96-108.
13. Park, S.S., Moon, H.D., Park, S.H. (2015), "A study on dynamic analyses of cut and cover tunnel during earthquakes", The Journal of Engineering Geology, Vol. 25, No. 2, pp. 237-250.
14. You, K.H., Kim, Y.J. (2017), "A safety evaluation method of skyscraper and adjacent underground facility using ground response seismic coefficient method", KSCE 2017 Convention, pp. 35-36.
15. Yoon, J.K. (2006), Development of site classification system and modification of design response spectra considering geotechnical site characteristics in Korea, Doctor's Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 143-152.
16. Yoon, S.W. (2002), "Damping ratios of reinforced concrete apartment for serviceability design of wind", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 20, No. 8, pp. 27-34.
17. Yoon, Y.S. (2016), Mechanics and design of reinforced concrete (fourth edition), CIR, Seoul, pp. 188-189.
18. You, K.H., Park, Y.J., Hong, K.Y., Lee, H.K., Kim, J.K. (2005), "Numerical estimation for safety factors of tunnels considering the failure of supports", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.
19. Youn, W.S., Lee, D.H., Cho, C.H., Kim, E.S., Lee, D.C., Kim, J.H. (2012), "Seismic performance evaluation of complex-shaped tall buildings by lateral resisting systems", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 25, No. 6, pp. 513-523.