

초고층 빌딩과 인접 지하구조물의 SSI를 고려한 동적해석과 유사정적해석의 거동 비교 연구

유광호^{1*} · 김승진²

¹정회원, 수원대학교 건설환경공학과 교수

²비회원, 수원대학교 건설환경공학과 석사과정

A comparative study on the behavior of dynamic analysis and pseudo-static analysis considering SSI of a tall building and an adjacent underground structure

Kwang-Ho You^{1*} · Seung-Jin Kim²

¹Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

²Graduated Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Suwon

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

Abstract

Recently, earthquakes have occurred near Gyeongju and Pohang and the social demands are thus being increased for seismic analysis of tall buildings and their adjacent underground structure in big cities. Since most of the previous seismic analysis studies considered a tall building and an adjacent underground structure separately, however, they lack the analysis on dynamic mutual behavior between two structures. Therefore, in this study, a dynamic analysis with a full soil-structure interaction was performed for a complex underground facility with a tall building and an adjacent underground structure constructed on the bedrock with a surface layer. To improve the reliability, in particular, a pseudo-static analysis was performed and compared with the dynamic analysis results. It is comprehensively concluded that the analysis of adjacent underground structures being considered is more conservative than that of not considered.

Keywords: Dynamic analysis, Pseudo-static analysis, Soil-structure interaction, Dynamic factor of safety, Adjacent underground structure

초 록

최근 경주, 포항 인근에서 지진이 발생하여 대도시의 초고층 빌딩과 그에 인접한 지하구조물의 내진해석에 대한 사회적 요구가 증가하고 있다. 그러나 기존에 수행되어 왔던 대

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(4)671-686(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.4.671>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 16, 2018

Revised June 20, 2018

Accepted June 26, 2018



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

부분 내진해석 연구는 초고층 빌딩과 지하구조물을 개별적으로 분석하여 구조물간 동적 상호거동 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기반암과 표층으로 이루어진 지반에 건물과 인접 지하구조물이 설치된 복합지하시설물을 대상으로 지반과 구조물을 동시에 고려한 동적해석을 수행하였다. 특히 신뢰도를 높이기 위해 유사정적해석을 추가로 수행하여 동적해석 결과와 비교·분석하였다. 종합적으로 복합시설물에 대한 SSI 해석 시 인접 지하구조물을 고려하는 것이 보다 보수적인 방법이라고 결론 내렸다.

주요어: 동적해석, 유사정적해석, 지반-구조물 상호작용, 동적안전율, 인접 지하구조물

1. 서론

현재 대도시의 건물은 한정된 부지와 인구과밀화로 인해 점차 고층화되고 있으며 초고층건물 주변에는 대형 쇼핑몰, 지하철 역사 등과 같은 지하구조물이 시공되어 있다. 그러나 최근 경주 및 포항지진으로 인하여 대도시의 이러한 복합구조물에 대한 내진해석의 사회적 요구가 증가되고 이를 위해 구조물 간 동적거동 및 내진안정성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

You and Kim (2018)은 동적해석에 비해 간편하고 해석 소요시간이 짧은 응답진도법에 근거한 유사정적해석에 기초하여 동적(유사정적)안전율을 평가하는 방법을 제시하고, 각각 지진규모 6.4와 7.0에 해당하는 PGA 0.154 g, 0.3 g에 대해 초고층건물과 인접지하시설물로 구성되는 복합구조물의 안정성을 산정하였다. 하지만 PGA 크기가 내진설계기준의 재현주기를 고려하여 산정되지 못하였다. 이를 보완하여 You and Kim (2018a)은 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당하는 위험도계수와 지역계수를 기준으로 PGA를 0.154 g, 0.22 g로 산정하고, 유사정적해석을 이용한 복합구조물의 내진안정성을 평가하였다. 연구 결과 PGA와 구조물의 높이가 증가할수록 안전율이 낮게 산출되었고, 복합구조물의 안정성 평가 시 인접 지하구조물의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 판단하였다. 한편, 복합구조물의 동적안정성 평가 및 인접 지하구조물이 초고층 건물에 미치는 영향을 좀 더 자세히 분석하고자 You and Kim (2018b)은 구조물 높이, 인접 지하구조물 유·무, 지진파 크기(PGA)를 파라미터로 하여 SSI를 고려한 동적해석에 기초한 민감도분석을 수행하였다. 초고층건물과 인접 지하구조물의 수평변위, 구조부재의 휨응력을 분석하여 내진안정성을 평가하고, 허용 휨응력을 초과하는 건물의 취약부를 조사하여 복합구조물의 동적안정성 평가 시 인접 지하구조물의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 주장하였다.

또한 Kim et al. (2010)은 국내 및 국외의 초고층 건축물의 내진설계의 문제점과 보완사항을 제시하고자 초고층 건축물의 내진설계의 국내·외의 현황을 파악하였고, 국내 초고층 건축물의 내진성능목표는 국내 상황을 고려하여 조정될 필요가 있고, 지반의 특성을 반영할 수 있는 스펙트럼의 개발이 요구된다고 하였다. 그러나 초고층 건물에 한정하여 해석하고 지하구조물에 대한 고려가 이루어지지 못하였기 때문에 구조물간의 상호거동을 효과적으로 파악하지 못한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 SSI (Soil-Structure Interaction)를 이용한 동적해석 및 유사정적해석을 통해 지진동 시 지상 구조물과 터널과 같은 인접 지하구조물로 구성된 복합구조물의 내진 안정성을 판단하고자 하였다. 대상구조물은 초고층건물(높이 275 m, 55층)과 25 m 이격되어 심도 10 m에 위치한 인접 지하구조물(폭 50 m, 높이 15 m)로 구성되는 것으로 하였다. 재현주기 1,000년과 2,400년에 해당하는 최대 지반가속도인 0.154 g와 0.22 g의 Hachinohe 파를 입력지진파로 사용하여 동적해석을 수행하고, 인접 지하구조물의 유·무가 건물로 미치는 영향을 유사정적 해석의 결과와 비교·분석하였다. 이를 위해 초고층건물과 인접 지하구조물의 수평변위, 층간변위비, 구조부재에 작용하는 휨응력, 취약부 위치를 조사하였다. 참고로 구조물의 층간변위비가 ‘즉시거주’ 수준인 1.5% 이상으로 발생하면 파괴되는 것으로 간주하였다.

2. 유사정적해석을 이용한 동적안전율 산정

동적해석법은 구조물과 지반을 모델링하고 시계열을 고려한 지진파를 입력하여 지반 및 구조물의 내진해석을 수행하는 방법이다. 일반적으로 응답변위법, 응답진도법 등과 달리 시간에 따라서 구조물과 지반의 변위, 속도, 가속도, 부재력 등을 분석할 수 있다. 그러나 다른 해석방법보다 결과의 정확도가 높지만 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다(Jeong et al., 2016).

유사정적해석 또는 진도법(seismic coefficient method)은 시간에 따른 변화를 고려하지 않고, 구조물의 중량에 설계 지진가속도를 곱한 힘(관성력)을 구조물 도심에 작용시켜서 지진에 의해 구조물에 발생하는 응력을 구하는 방법이다(Park, 2007). 그러나 다른 해석방법보다 간편하고 해석시간이 적게 걸리지만 결과의 정확도가 떨어지는 단점이 있다(Yun et al., 2009).

$$F^{trial} = \frac{\text{Horizontal Acceleration}^{trial}}{PGA} \quad (1)$$

식 (1)과 같이 기준이 되는 PGA와 가해지는 수평가속도의 비를 안전율로 정의하였다. 수치해석 시 해당 수평가속도(Horizontal Acceleration^{trial})를 증가시켜 최초로 평행상태로 수렴이 되지 않는, 즉 최초로 파괴를 발생시키는 값을 찾아 기준 PGA로 나눈값(F^{trial})을 동적안전율로 산정하였다(You and Kim, 2017).

한편, 내진안정성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 산정 흐름도에 따라 유사정적해석을 수행하여 동적안전율을 산정할 수 있다. 해석 시 1 step이 증가할 때 직전 step 대비 변위의 변화량이 1.0×10^{-4} 이하, 전단변형률 속도가 1.0×10^{-9} 이내일 때를 수렴조건으로 판단하였다.

참고로 동적안전율과는 별개로 대상지반의 점착력과 내부마찰각을 점차적으로 감소시켜가며 안전율을 산출하는 전단강도감소기법을 이용하여 정적(static)안전율을 산출할 수 있다(You et al., 2007).

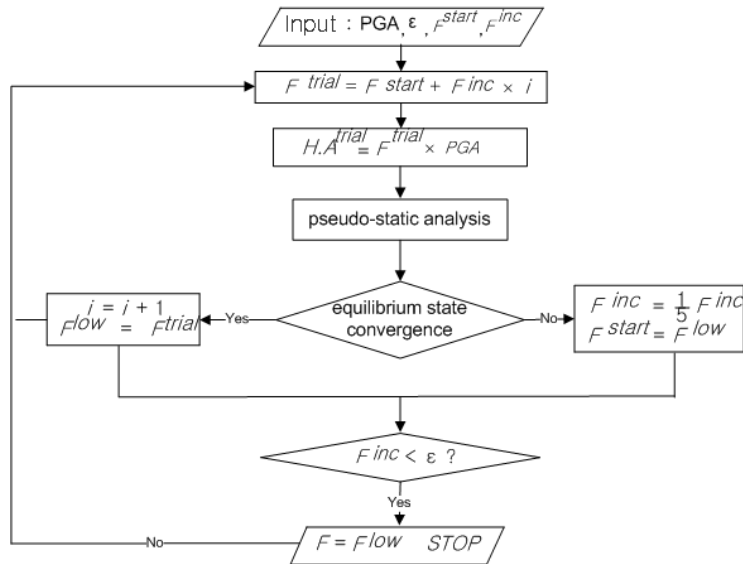


Fig. 1. Flow chart for the calculation of dynamic safety factor

3. 구조물 내진안정성 평가

3.1 층간변위비

지진 시에 층간변위가 크게 발생되면 건물의 안정성에 영향을 미치게 되기 때문에 Ministry of Land, Infrastructre and Transport (2015)에서는 우리나라에 지진발생 시 개략적인 지진피해 수준을 조기에 추정하기 위한 목적으로 국내 건축구조물의 허용 층간변위비를 손상도 분류에 따라 규정하였다. 지진재해 대응시스템에 따라 ‘기능수행 (Operational Level, OP)’, ‘즉시거주(Immediate Occupancy Level, IO)’, ‘인명안전(Life Safety Level, IS)’, ‘붕괴방지(Collapse Prevention Level, CP)’의 4 단계로 나누고, 각각의 층간변위비를 0, 0.5, 1.5, 2.0%로 구분된다.

건물의 건전성을 평가하는 지표로 사용될 수 있는 층간변위비(interstory drift ratio)는 n과 n + 1층의 수평변위를 각각 δ_n, δ_{n+1} , 두 층사이의 높이를 h라고 하면 식 (2)와 같이 계산된다(National Disaster Management Research Institute, 2012).

$$\text{층간변위비} = \frac{\delta_{n+1} - \delta_n}{h} \tag{2}$$

3.2 허용 휨응력

구조물에 발생된 휨응력이 허용값을 초과했는지를 파악하여 구조부재의 파괴여부를 판단할 수 있다. 한편 휨응력은 Fig. 2의 P (축력) - M (모멘트)상관도와 같이 구조부재에 발생하는 축력과 모멘트를 이용하여 산출될 수 있다.

$$\text{허용 횡압축응력}(\sigma_{ca}) = 0.6\sigma_{ck} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \tag{3}$$

$$\text{허용 휨인장응력}(\sigma_{ta}) = 0.63\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \tag{4}$$

즉 구조부재의 설계기준강도가 σ_{ck} 일 때 허용 횡압축 및 인장응력을 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구하고 해석 시 산출된 휨응력과 비교함으로써 구조물의 파괴 및 균열발생 여부를 판단할 수 있다(You et al., 2005).

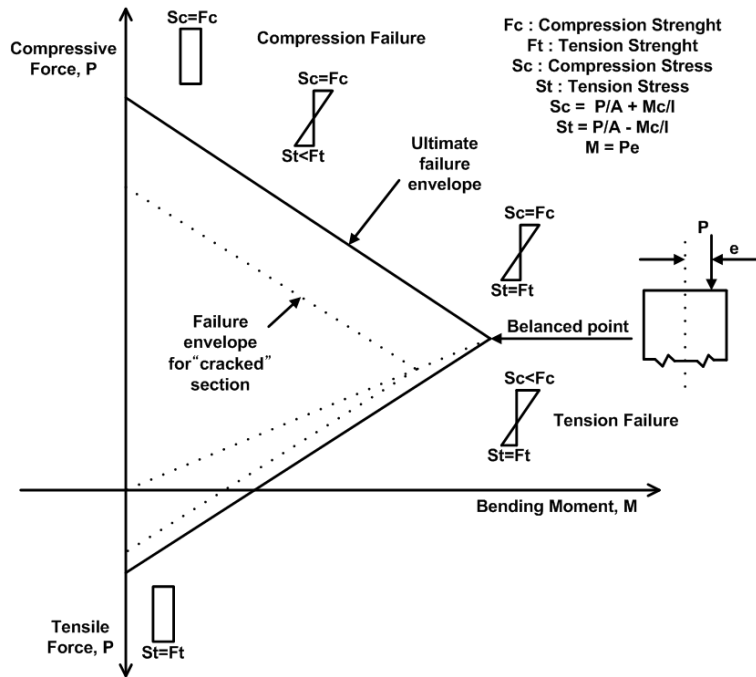


Fig. 2. A typical moment - thrust diagram (Itasca Consulting Group, Inc., 2005)

4. 수치해석 모델링

본 연구에서는 복합구조물의 거동특성 및 안정성 평가를 위해 동적해석 및 유사정적해석 수행 시 지반 범용 수치해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 Fig. 3과 같은 해석단면을 사용하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 대상 구조물은 초고층건물의 지상 및 지하부, 그리고 인접 지하구조물로 구성하였다. 또한 초고층건물과 인접 지하구조물은 기반암인 화강암 위에 놓여있는 것으로 적용하였으며, 기반암 상부 25 m 만큼 풍화토가 존재하도록 하였다. 초고층건물의 지상부는 55층(건물 높이 275 m, 층고 5 m)이며, 내부 기둥은 9 m 간격으로 2개가 설치되고, 건물의 좌·우측 벽체는 기둥으로부터 12.5 m 이격되는 것으로 하였다. 지하부 기둥의 경우 지상부 바로 아래는 지상부의 기둥 및 벽체의 간격과 동일하게 존재하도록 하였으며, 그 외 지하부 기둥은 10 m 간격으로 설치하였다. 또

한 지하부의 층고는 지하 1층부터 7.5 m, 6.0 m, 8.0 m, 3.5 m로 적용하였고 인접 지하구조물의 경우 3층(층고 5 m)으로 건물 폭 50 m, 기둥 간격 10 m로 적용하였으며 심도 10 m 아래에 있는 것으로 모사하였다.

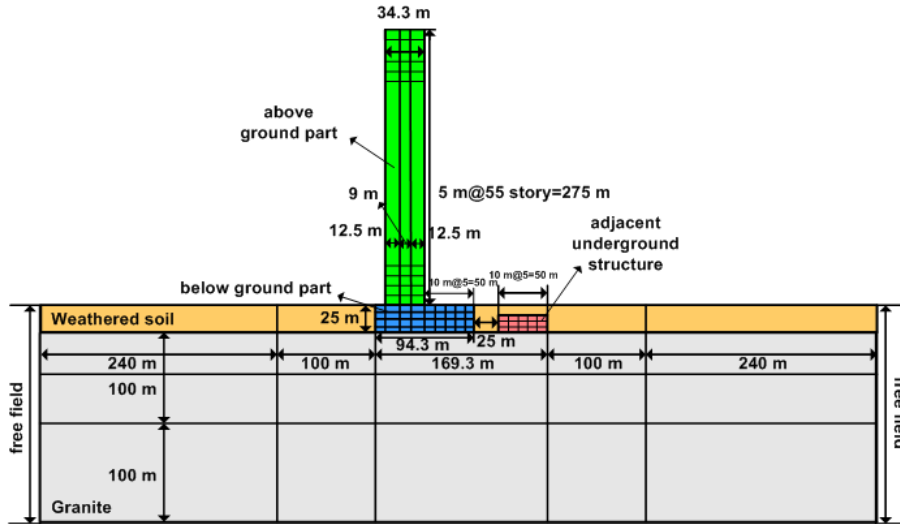


Fig. 3. The section for dynamic analysis and pseudo-static analysis

해석영역의 경우 지진가속도에 의해 영향을 미치지 않도록 초고층건물의 좌측 지하부 벽체와 초고층건물 우측에 설치된 인접 지하구조물의 우측벽체를 기준으로 340 m, 초고층건물의 지하부 최하단을 기준으로 200 m 만큼 설정하였다. 또한 구조물의 거동을 보다 자세히 분석하기 위해 초고층건물과 인접 지하구조물을 기준으로 좌, 우측 100 m, 하부 100 m의 영역은 요소의 크기를 2 m로 적용하였고, 그 외 영역은 요소의 크기가 점차 커지도록 설정하였다. 동일한 재료나 서로 다른 재료간의 접촉을 모사하기 위해 경계요소(interface element)를 고려해야 하나, 본 연구에서는 지반과 구조물이 일체로 거동하는 것으로 가정하여 고려하지 않았다.

요소망의 측면경계에서 지진파가 반사되어 해석결과에 영향을 미치는 것을 막기 위해 해석영역의 좌, 우측 경계는 자유장(free field)경계를 적용하였다. Park et al. (2010)은 암반노두에서 계측된 입력지진파를 기반면의 하부에 작용시키기 위해서는 deconvolution을 수행하여 지진파의 진동이 과대평가되는 것을 주의해야 하고 이를 위해 요소망의 하부경계에 quiet 경계(점성댐퍼)를 적용해야 한다고 주장하였다. 본 연구에서는 강제조건(rigid base)을 적용하여 quiet boundary가 자동으로 고려될 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 해석 종류, 지진규모, 인접 지하구조물의 유·무가 지진동 시 건물 및 인접 지하구조물에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 최대 지반가속도는 지진구역이 서울일 때 재현주기가 1,000년과 2,400년에 해당하는 0.154 g와 0.22 g로 선정하였다. 본 해석에 적용한 표층과 기반암은 각각 풍화토와 화강암을 적용하였으며, 물성치는 OO 설계회사가 실시설계에 사용한 자료(Western Metro, 2016)를 참고하여 Table 1과 같이 적용하였다. 축압계수는 표층과 기반암 모두 1.0을 적용하였으며, 지반 구성모델로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다.

Table 1. Ground properties for both dynamic analysis and pseudo-static analysis

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

본 연구에서는 초고층건물이 RC 구조물로 시공되었다고 가정하였다. 따라서 콘크리트 표준시방서(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)에서 제시한 고강도 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})가 40.0 MPa인 것을 참고하여 식 (3)과 식 (4)를 이용해 최대 허용 휨압축 및 인장응력을 각각 24.0, 4.0 MPa로 적용하였다. 그리고 탄성거동을 하는 beam 요소를 사용하여 슬래브, 벽체 그리고 기둥을 사용하여 건물과 인접 지하구조물을 모사하였다. 각 부재의 단위중량과 탄성계수는 동일하게 적용하였으며 이에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 한편 내진 보강을 위한 전단벽체는 고려하지 않았다.

Table 2. Properties of structural members

Structural members	Unit weight (kN/m ³)	Elastic 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
Column			0.18	1.3

구조물 부재 슬래브의 파괴를 고려하기 위해 소성모멘트(plastic moment)는 Yoon (2016)을 참고하여 0.12 MN·m로 적용하였다. 이는 두께가 0.35 m, 철근의 직경과 유효깊이가 각각 25 mm와 240 mm이고 하단에 단위 미터 당 3개가 배근되어 있는 단면을 가정하여 산정된 것이다. 구조물의 자중을 고려하기 위해 철근콘크리트의 단위중량을 25 kN/m³으로 적용하였으며 그 외의 활하중 및 사하중은 각각 4.2 kN/m², 2.5 kN/m²으로 가정하여 슬래브 1m²당 6.7 kN의 하중을 재하시켰다.

동적해석에서 적용한 입력지진파는 Fig. 4와 같이 총 가진시간이 15초인 Hachinohe 지진파를 사용하였다. 초고층 건물의 감쇠비는 (Koo and Kim, 2015)의 연구에 의해 제안된 감쇠비인 0.008을 적용하였고 지반의 감쇠비는 0.05를 사용하였다(Park et al., 2015; Itasca Consulting Group, Inc., 2005). 한편 초고층 건물의 고유주기는 식 (5)와 같이 건축설계기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서 제안한 간편식을 사용하여 5초로 적용하였다. 여기서 T는 건물의 고유주기이며 H는 건물의 전체 높이(m)이다.

$$T = 0.073H^{0.75} \tag{5}$$

Yoon (2006)은 지반 고유주기를 이용하여 지반을 분류하는 방법을 표로 제안하였는데, ‘기반암이 25 m 이내에 존재하지만 표층의 두께가 10 m 미만’인 경우 지반의 고유주기는 0.1~0.3초 사이에 해당한다고 하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 지반 조건이 상기조건에 해당되므로 고유주기를 0.22로 가정하여 사용하였다.

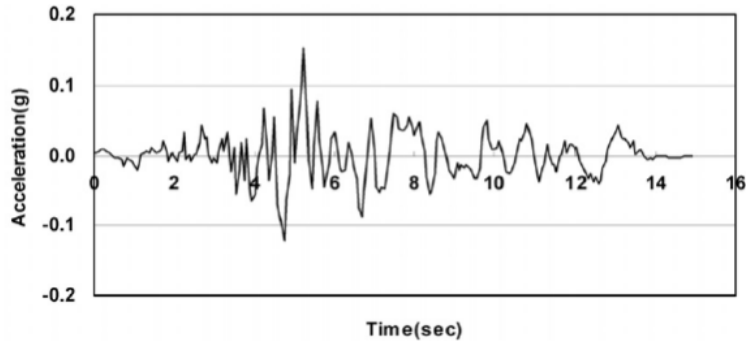


Fig. 4. Acceleration time history of the Hachinohe wave

5. 수치해석 결과 분석

5.1 지상구조물의 수평변위

초고층건물(55층)에 대한 동적해석 및 유사정적해석 시 지상부의 최대수평변위를 건물의 좌측 벽체를 기준으로 산출하여 구조물의 변형모드를 분석하고 층간변위비가 허용값 내로 발생하는지 분석하였다. 본 해석에서 적용한 수치해석 모델링의 경우 지반을 고려한 연속체 모델로서 산출된 수평변위는 지반의 변위도 포함되어있기 때문에 지반의 수평변위를 뺀 순수 수평변위 값을 구하였다. 최대수평변위는 동적해석의 경우 55층에서 가진시간 12초일 때 발생하였다. Table 3은 동적해석 및 유사정적해석 시 PGA, 지하구조물의 유·무 별로 동적해석의 지진동 시 구조물에 발생하는 순수 수평변위를 나타낸 것이다.

Table 3. Maximum pure horizontal displacements depending on the PGA and the existence of an adjacent underground structure

PGA (g)	Adjacent underground structure	Maximum horizontal displacement (cm)	
		Dynamic analysis	Pseudo-static analysis
0.154	Exist	75.46	73.94
	No exist	72.24	88.29
0.22	Exist	119.17	-
	No exist	115.19	-

동적해석 시 최대 지반가속도가 지상구조물의 순수 수평변위에 미치는 영향을 분석한 결과, 초고층 건물의 경우 인접 지하구조물의 유·무와 관계없이 최대 지반가속도가 0.154 g에서 0.22 g로 증가하면 최대 순수 수평변위는 약 1.3~1.5배 정도 증가하였다. 또한 초고층건물의 순수 수평변위는 인접 지하구조물이 있을 때가 없을 때보다 구조물 최상단에서 최대 3.5 cm 더 크게 발생하여 인접 지하구조물이 건물 지상부에 영향을 주는 것으로 나타났다. 유사정적해석 시 구조물에 발생하는 최대 순수 수평변위는 PGA 0.154 g 일 경우 인접 지하구조물이 있는 경우가 없는 경우보다 구조물 최상단에서 최대 15.7 cm 더 작게 발생하였다. 이는 인접 지하구조물 자체의 강성이 굴착 전 원지반보다 더 크기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 가진시간(dytime) 12초 때의 동적해석 및 유사정적해석의 초고층건물 좌측벽체를 기준으로 지반변위를 제외한 순수 수평변위분포를 나타낸 것이다. 동적해석의 경우 인접 지하구조물이 있을 때가 없을 때보다 미세하지만 수평변위가 증가하고 3차 이상의 모드 형상을 보였다. 반면 유사정적해석의 경우는 인접 지하구조물이 있을 때가 없을 때보다 약 최대 16 cm 정도 수평변위가 감소하였는데, 이는 앞선 Table 3에서 서술한 것과 마찬가지로 인접 지하구조물의 강성이 굴착 전 원지반보다 더 크기 때문에 발생하였다고 판단된다. 한편 변형모드는 2차 모드로 나타나 시계열을 고려한 동적해석보다 변형에너지(strain energy)가 더 적은 것으로 판단된다. 결과적으로 인접 지하구조물의 존재는 건물의 변형모드에 거의 영향을 미치지 못하지만 초고층 건물 수평변위에 불리한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

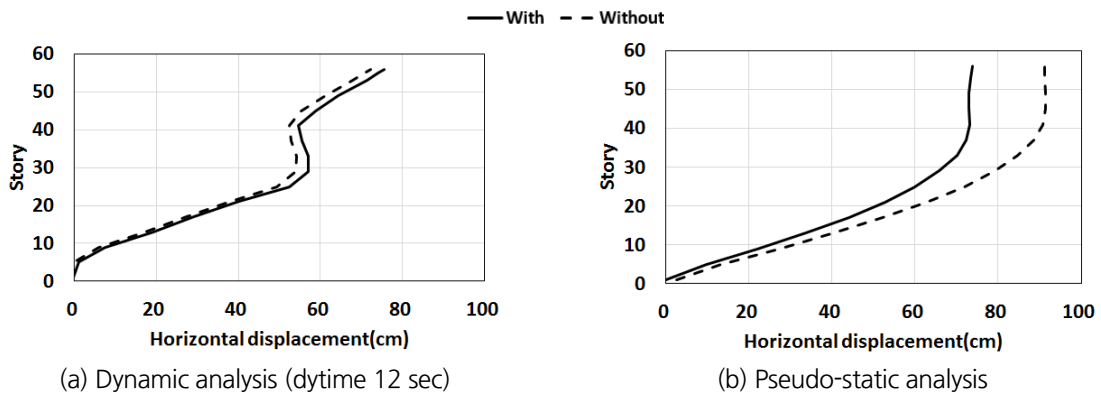


Fig. 5. Pure horizontal displacement distributions with/without an adjacent underground structure (PGA 0.154 g)

앞서 분석한 구조물 좌측벽체의 수평변위를 이용하여 지진 시 초고층건물의 취약부를 판단하기 위해 동적해석과 유사정적해석의 초고층건물의 층간변위비를 가진시간(dytime)이 12초일 때, 인접 지하구조물의 유·무에 따라 산출하여 Fig. 6에 도시하였다. 동적해석 시 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 없는 경우보다 층간변위비는 구조물 15~25층, 45~50층에서 최대 0.13% 높은 것으로 나타났다. 반면 유사정적해석은 인접 지하구조물이 없는 경우가 더 큰 수평변위가 발생하여 인접 지하구조물이 존재하지 않는 경우가 존재하는 경우보다 구조물 5~10층에서 최대 0.09% 크게 발생하였다. 한편, 동적해석의 경우 10층 및 20층 근처에서 최대 층간변위비인 약 1.3%

가 발생하여 일반적인 RC구조물의 경우 ‘즉시거주’ 수준의 층간변위비 0.5% (National Disaster Management Research Institute, 2012)를 초과하였지만 ‘인명안전’ 수준의 층간변위비 1.5% 이내로 발생하여 동적해석 시 초고층건물의 지상부는 내진 안정성이 건전한 것으로 판단된다. 유사정적해석 시 층간변위비는 인접 지하구조물이 없는 경우가 있는 경우보다 크게 산출되었지만 45층 이상에서는 역전현상이 발생하여 초고층 건물 상단은 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 더 큰 층간변위비가 발생하여 건물 상단도 취약한 것으로 나타났다. 결과적으로 지상 및 지하구조물 그리고 지반을 고려한 내진해석 시 지상부에는 내진 안정성이 양호하다고 판단된다.

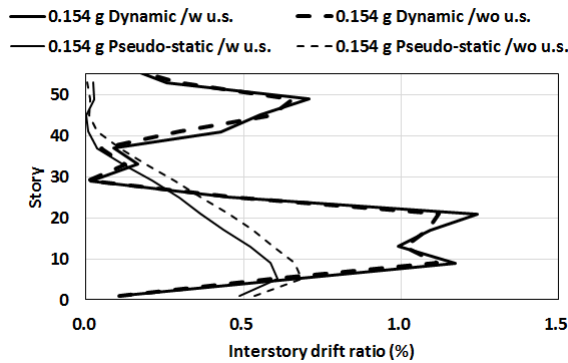


Fig. 6. Distributions of interstory drift ratio (dytime 12 sec)

5.2 동적안전율

식 (1)과 Fig. 1의 흐름도의 순서에 따라 Table 4와 같이 PGA, 인접 지하구조물의 유·무 별로 초고층건물의 동적(유사정적)안전율을 구하고, 전단강도 감소기법을 이용하여 구한 정적안전율과 비교하였다. 동적(유사정적)안전율이 정적안전율보다 작게 산정되었고, PGA가 0.154 g에서 0.22 g로 증가할 때 동적안전율은 감소하는데 PGA 0.22 g인 경우 안전율이 1.0 이하로 산출되어 수평변위 및 휨응력 산출이 불가하였다. 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 없는 경우에 비해 동적안전율과 정적안전율 모두 작게 나와 안정성 측면에서 좀 더 불리한 것으로 나타났다.

Table 4. Static and pseudo-static factors of safety

Adjacent structure	PGA (g)	Factor of safety	
		Pseudo-static	Static
Exist	0.154	1.07	1.99
	0.22	0.81	
No exist	0.154	1.15	4.29
	0.22	0.71	

5.3 수평가속도 이력

Fig. 5는 동적해석 시 가진시간을 기준으로 초고층건물 최상단 좌측벽체의 수평가속도 이력을 인접 지하구조물의 유·무에 따라 도시한 것이다. 가진시간 4초 후부터 초고층 건물 상단에서 수평가속도가 증가하기 시작하여 가진시간 8~12초 일 때 증폭되어 최대가 되었다. 그 후 가진시간 12초 이상일 때는 구조물의 감쇠로 인해 점점 수평가속도가 감소하는 현상이 나타나 가진시간 별 구조물 거동을 확인할 수 있었다.

Fig. 7(a)와 같이 인접 지하구조물이 있는 경우와 Fig. 7(b)와 같이 인접 지하구조물이 없는 경우 최대수평가속도는 가진시간 8초와 10초 근방에서 각각 0.38 g, 0.31 g로 인접 지하구조물이 있는 경우가 없는 경우보다 0.07 g 정도 증가하여 인접 지하구조물이 초고층 건물 최상단 가속도에 불리한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 최대 수평가속도가 발생하는 시간도 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우보다 빨리 발생하는 것으로 나타났다. 다만, 유사정적해석의 경우 시계열을 고려하지 않고 지진파를 수평가속도로 구조물에 적용하기 때문에 동적해석의 시간이력과 비교할 수 없었다.

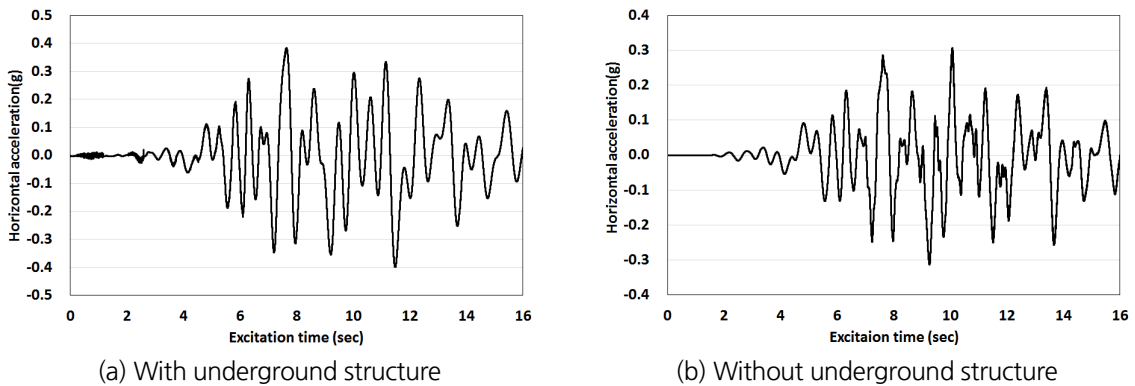


Fig. 7. The acceleration time histories at the top floor of tall building by dynamic analysis (PGA 0.154 g)

5.4 구조물의 휨응력

인접 지하구조물의 영향을 분석하기 위해 Fig. 8과 같이 PGA가 0.154 g 일 때 해석 종류와 위치별로 최대휨응력을 나누어 도시하였다. 초고층 건물의 수평변위가 최대가 되는 가진시간 12초를 기준으로 구조부재에 발생하는 휨응력을 분석하였다. Fig. 8과 같이 동적해석과 유사정적해석 모두 인접 지하구조물의 유·무에 관계없이 초고층건물의 지상부 및 지하부 최대휨압축/인장응력의 차이가 0.3 MPa 이내로 거의 차이가 없었다. 이는 인접 지하구조물의 규모가 내진안정성에 영향을 미치는 주요 인자인데(Choi et al., 2009), 본 연구에서 적용한 인접 지하구조물의 규모(폭 50 m, 높이 15 m)가 작았기 때문에 지진동 시 구조물에 미치는 영향이 크지 않는 것으로 판단된다. Fig. 8(a), 8(c)에서와 같이 초고층건물의 지상부와 지하부에서 발생한 최대휨압축응력은 허용값인 24.0 MPa 이내로 발생하여 안정하였다.

반면 최대휨인장응력의 경우 Fig. 8(b)와 같이 초고층 지상부는 허용값을 초과하여 발생하였고 Fig. 8(d)와 같이 동적해석의 경우 초고층 건물 지상부에서 최대 -14.3 MPa, 유사정적해석의 경우 초고층 건물 지상부에서 최대 -12.5 MPa 로 값의 차이가 발생하여 해석 종류에 따라 최대휨인장응력이 다르게 발생함을 확인하였다. 또한 Fig. 8(d)와 같이 동적해석의 경우 지하부의 최대휨인장응력이 지상부보다 9.0 MPa 작게 산출되었으나 유사정적해석의 경우 지상부, 지하부 최대휨인장응력이 동일하게 산출되었다. 이는 유사정적해석의 경우 일정한 방향의 수평 가속도와 구조물의 질량을 적용하여 구조물에 가하지만, 동적해석은 시간이력을 고려하는 해석으로 특정 가진시간 때의 현상이기 때문에 휨인장응력이 다르게 산출되었다고 판단된다. 따라서 해석 방법의 종류에 따라 차이는 있겠지만, 인접 지하구조물의 유·무는 건물의 구조부재의 휨응력에 큰 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있었다.

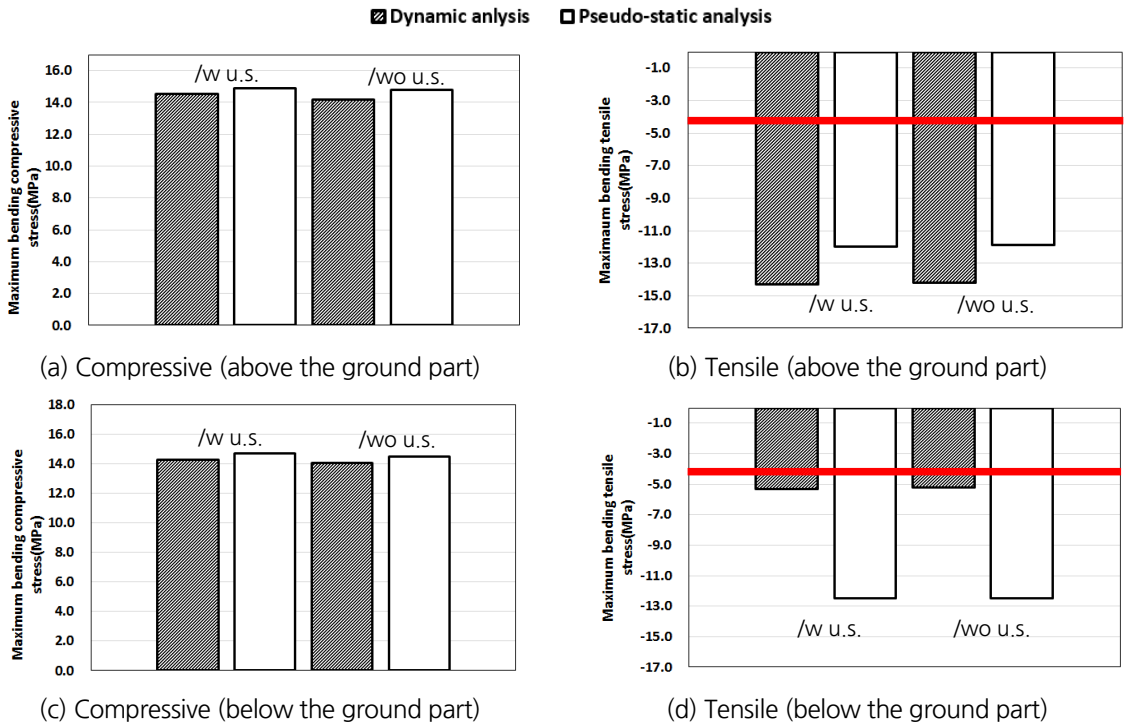


Fig. 8. Maximum bending stresses with/without an adjacent underground structure (PGA 0.154 g)

5.5 구조물의 취약부 산정

구조물의 취약부를 분석하기 위하여 Fig. 9, 10, 11과 같이 가진시간이 12초 일 때의 동적해석과 유사정적해석 시, 구조물의 휨인장응력 분포도를 조사하였다. 압축응력의 경우 허용 휨응력 24.0 MPa를 초과하는 부재가 없는 것으로 나타났다. 동적해석의 경우 Fig. 9(a)와 같이 초고층건물의 지상부에서는 상단에서 중앙 기둥 2개, 하단 중앙 기둥 2개와 우측 벽체에서 휨인장응력이 -4.0 MPa 초과하여 취약부가 발생하여 구조물의 균열 가능성이 존재

하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 10(a)에서와 같이 건물의 지하부에서는 지하 3층의 좌, 우측 벽체, Fig. 11(a)와 같이 인접 지하구조물에서는 3층 천정부와 지하 1층 좌·우측에 걸쳐 허용값인 -4.0 MPa을 초과하여 취약부가 발생하였다. 이는 건물과 인접 지하구조물이 연약한 풍화토 지반에 시공되었으며, 해당 취약부에서 약 20.4 cm의 최대수평변위가 발생하여 결과적으로 구조부재의 휨응력이 커진 것으로 확인하였다.

한편, 유사정적해석의 경우 초고층 건물의 지상부에서는 Fig. 9(b)와 같이 지상 1~35층 중앙 기둥 2개와 우측 벽체에서, Fig. 10(b)와 같이 지하부는 지하 3층의 좌, 우측 벽체에서, Fig. 11(b)에서 볼 수 있듯이 인접 지하구조물에서는 3층 천정부 전반에 걸쳐 취약부가 발생하였다. 즉, 휨인장응력의 취약부 범위가 동적해석이 유사정적해석보다 확대되었지만 전체적인 경향은 유사하게 산출되었다. 따라서 유사정적해석을 사용하여 간편하게 구조물의 취약부를 예측하는 것이 가능하다고 판단된다.

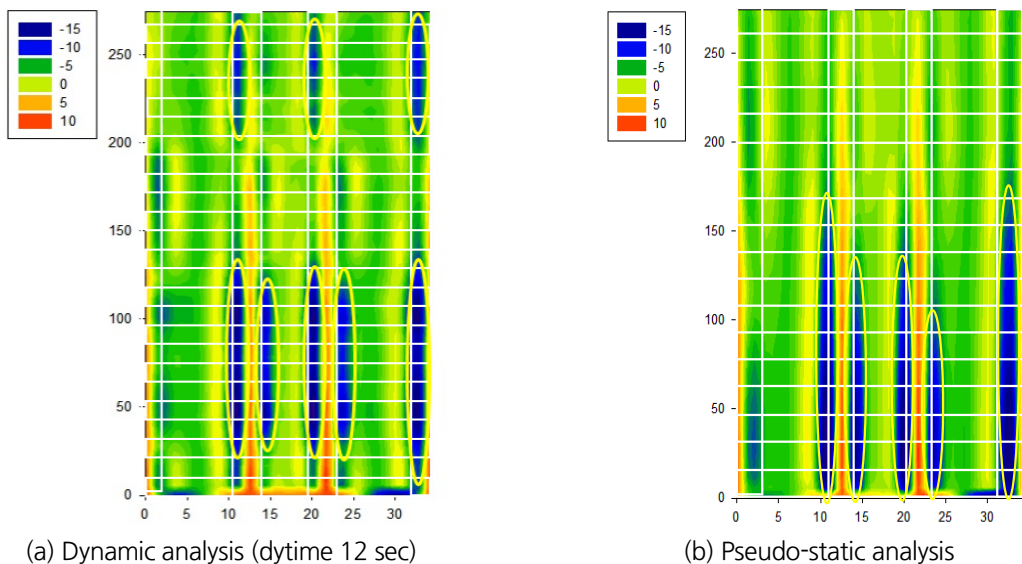


Fig. 9. Tensile bending stress distribution above the ground part

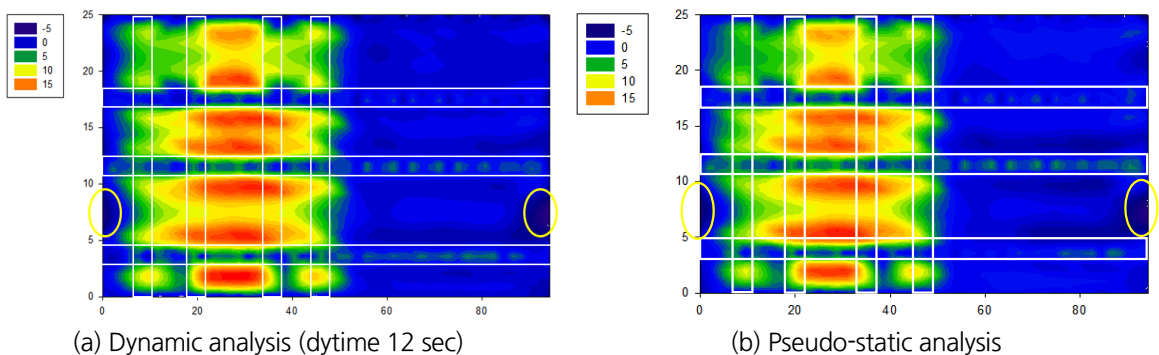


Fig. 10. Tensile bending stress distribution below the ground part

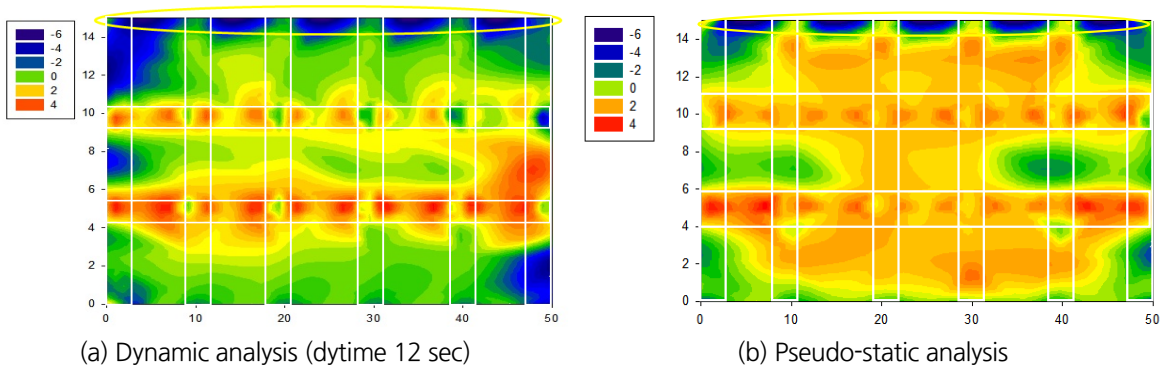


Fig. 11. Tensile bending stress distribution of adjacent underground structure (PGA 0.154 g)

6. 결론

본 연구에서는 Hachinohe파를 이용하여 PGA 크기, 인접 지하구조물의 유·무가 지진 시 초고층건물의 거동에 미치는 영향을 동적해석과 유사정적해석의 비교를 통하여 분석하였다. 이를 위해 FLAC 2D를 이용하여 동적 및 정적안전율을 구하고, 구조물에 발생하는 수평변위와 층간변위비, 최대휨응력을 산출하여 내진안정성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동적해석의 경우 수평변위, 층간변위비, 초고층 건물 최상단의 수평가속도이력 측면에서 종합적으로 볼 때, 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우보다 초고층 건물의 안정성에 불리한 것으로 나타났다.
2. 유사정적해석의 경우 초고층건물의 수평변위는 인접 지하구조물이 존재하지 않는 경우가 존재하는 경우보다 크게 산출되어 더 불리한 것으로 나타났지만, 이는 인접 지하구조물의 강성이 굴착 전 원지반보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다.
3. 안전율의 경우 인접 지하구조물이 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우에 비해 동적안전율과 정적안전율 모두 작게 나와 안정성 측면에서 좀 더 불리한 것으로 나타났다. 따라서 유사정적해석에서 지반을 고려한 복합시 설물에 대한 SSI 해석의 경우, 인접 지하구조물을 고려하는 것이 보다 보수적인 방법이라고 판단된다.
4. 해석 방법에 따라 휨응력값의 차이는 있지만, 인접 지하구조물이 건물 구조부재의 휨응력에 큰 영향을 주지 못하고, 허용 휨인장응력을 초과하는 취약부 위치가 국부적으로 다소 다르게 발생하였지만, 전반적인 경향은 유사하게 발생하여 유사정적해석을 사용하여 간편하게 구조물의 취약부를 사전에 예측하는 것이 가능하다고 판단된다.

본 연구에서는 해석 종류별로 제한된 파라미터를 대상으로 SSI 해석을 수행하였기 때문에 추후 연구에서는 건물의 지하부와 인접 지하구조물에 관한 다양한 파라미터를 선정하여 민감도 분석을 수행한다면, 최근 많이 시공

되고 있는 대규모 지하복합시설물과 인접해 있는 구조물에 대한 지진 시 상호거동을 보다 정확하게 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. 527.
2. Choi, S.H., Park, I.J., Kim, S.H. (2009), "Aseismic analysis for large underground structure", Journal of Korean Tunneling 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, Inc., 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 Tunneling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 4, pp. 20-33.
5. Kim, J.H., Kang, D.E., Kim, T.J. (2010), "Seismic design of high-rise buildings", Review of Architecture and Building Science, Vol. 54, No. 10, pp. 32-36.
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. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), A 3-axis seismometer and the program development for earthquake sensing of structures, pp. 185.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Concrete standard specification, pp. 358.
9. National Disaster Management Research Institute (2012), Development of the public buildings emergency integrity assessment technology using seismic acceleration response signal, pp. 253.
10. 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.
11. Park, I.J. (2007), "A seismic design of underground structure in Korea", Magazine of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 3, pp. 96-108.
12. 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.
13. Western Metro (2016), Final design of private infrastructure investment project on OO-OO double track railway (zone 4), Tunnel Analysis Report, pp. 906.

14. 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.
15. Yoon, Y.S. (2016), Mechanics and design of reinforced concrete, CIR, Seoul, pp. 587.
16. You, K.H., Kim, S.J. (2018a), "The estimation of seismic stability of tall building and adjacent underground structures by pseudo-static analysis", Proceedings of the KGS Spring National Conference 2018, pp. 154-155.
17. You, K.H., Kim, S.J. (2018b), "SSI basic study for evaluation of behavior of high-rise building and underground complex", Proceedings of the KTA 2018 Annual Spring Conference, pp. 75-76.
18. You, K.H., Kim, Y.J. (2017), "A safety factor evaluation method of a skyscraper with an adjacent underground facility based on the ground response seismic coefficient method", Korean Society of Civil Engineers, Proceedings of KSCE 2017 Conference, pp. 630-631.
19. You, K.H., Kim, Y.J. (2018), "A preliminary numerical analysis study on the seismic stability of a building and underground structure by using SSI", Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 1, pp. 23-38.
20. You, K.H., Lee, M.H., Park, Y.J. (2007), "Comparison and validation on shotcrete modelling method for the quantitative stability estimation of a tunnel", Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 2, pp. 99-107.
21. 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 Tunneling and Underground Space Association, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.
22. Yun, S.U., Park, D.H., Lee, S.H., Hwang, Y.C. (2009), "Development of novel method of seismic slope stability analysis", Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 10, No. 1, pp. 49-54.