

공동구의 응답변위법 해석 시 국내 특성을 반영한 지반 비선형 보정계수 연구

A Study on the Correction Factors of Soil Non-linearity Considering Korean Regional Conditions for Seismic Deformation Method Applied to Multi-Utility Tunnels

최정호¹⁾ · 윤종석²⁾ · 추연욱^{3)*} · 윤준웅⁴⁾

Choi, Jeong Ho¹⁾ · Yun, Jong Seok²⁾ · Choo, Yun Wook^{3)*} · Youn, Jun Ung⁴⁾

¹⁾공주대학교 건설환경공학과 석사과정, ²⁾공주대학교 건설환경공학과 박사과정, ³⁾공주대학교 건설환경공학부 교수, ⁴⁾한국시설안전공단 국가내진센터 차장

¹⁾Master's Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University ²⁾Ph.D. Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University ³⁾Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, ⁴⁾Senior Manager, National Center for Seismic Safety, KISTEC

/ A B S T R A C T /

The seismic deformation method is conventionally used as a seismic design for a multi-utility tunnel in Korea. In the seismic deformation method, the soil ground's natural period is one of the most critical factors for calculating the ground displacement using cosine functions. Correction factors for the natural period and shear wave velocity have been used to consider the non-linearity of dynamic soil properties. However, the correction factors have been issued because the correction factors have not been sufficiently studied to consider Korea's regional conditions. This paper aims to evaluate the natural periods for the seismic deformation method considering Korea's ground conditions. Ground response analysis was performed using seven real earthquake records on twelve sites with different soil conditions where actual multi-utility tunnels are installed. As a result, natural periods of the sites were analyzed and new correction factors were proposed according to seismic performance and Korea's regional conditions.

Key words: Multi-utility tunnel, Seismic deformation method, Ground response analysis, Natural period of ground

1. 서론

최근 도시의 입체적인 개발을 위해 도심지 지하 공간을 활용하여 인간 생활의 기반이 되는 공익 시설물을 지중화하는 작업이 활발히 진행되면서 지중구조물의 시공이 증대되고 있다. 지중구조물은 지진 발생 시, 지상구조물에 비해 상대적으로 큰 진동이 발생되지 않아, 내진설계에 대한 연구가 미비하였으나 최근 지중구조물의 건설 수요가 증대되면서 지진에 대한 안전성 확보에 많은 관심이 기울어지고 있다. 지중구조물 중 공동구는 시민생활 관련 중요공급시설로서 지진으로 인해 파손되어 제 기능을 수행하지 못하는 경우 시민의 안전에 위협이 되므로 지진 안전성 확보가 매우 중요하다.

공동구를 포함한 지중 구조물의 지진해석방법으로 응답변위법, 시간영

역 또는 주파수영역에서의 동적해석법 등이 있으며[1-6], 현행 공동구 설계 기준[1], 기존시설물(공동구) 내진성능 평가요령[2], 기존시설물(터널) 내진성능 평가요령[3], 터널 내진설계기준[4], 도시철도 내진설계기준[5], 기존시설물(상수도) 내진성능 평가요령[6] 등 국내 지중구조물 관련 내진설계 및 내진성능평가 기준 및 지침에서는 응답변위법(Seismic Deformation Method, SDM)을 표준해석방법으로 채택하고 있다.

응답변위법은 1974년 일본도로협회에서 제안된 석유 파이프라인 기술 기준[7]에서 처음 도입된 지진해석방법으로 일본뿐만 아니라 국내에서도 지중구조물의 지진해석을 위해 일반적으로 사용하고 있다. 하지만 응답변위법은 강진지역인 일본을 기준으로 설계된 지진해석방법으로서 중·약진 지역에 속하는 국내에 적용하기에 국내 지반특성이 고려되지 않아 변위가 과대평가될 수 있어 국내 특성에 맞게 응답변위법을 수정할 필요가 있다는 연구결과들이 발표되어 왔다[8-14].

응답변위법은 지반을 지반스프링으로 치환하여 모델링한 후, 지진하중

*Corresponding author: Choo, Yun Wook

E-mail: ywchoo@kongju.ac.kr

(Received September 4, 2020; Revised October 5, 2020; Accepted November 4, 2020)

작용 시 주변 지반의 자유장 거동에서 발생하는 지반변위를 구조물에 하중으로 적용하는 해석 방법으로서, 응답변위법을 통해 지진하중에 대한 구조물의 거동특성을 파악하기 위해 깊이별 지반변위를 산정하는 것이 핵심이다[1-6]. 현행 국내 지중구조물 관련 내진설계 및 요령에서의 지반변위산정법은 해석대상 부지의 지층을 한 층으로 가정하는 단일코사인법과, 두 개의 층으로 가정하는 이중코사인법을 제시하고 있으며, 단일코사인법은 식(1)과 같다. 이때, 기반암 위 표층지반의 고유주기에 해당하는 T_g 와 T_s 가 주요 인자로 적용된다. T_g 와 T_s 는 각각 식(2) 및 식(3)과 같이 산정되고 선형고유주기에 해당하는 T_g 에는 지반의 비선형성을 고려하는 보정계수(A_0)를 1.25 또는 2.0를 적용하고 있다[1-6]. 그러나, 보정계수를 일본기준을 차용하는 과정에서 국내 적용성 검토가 미진하여 지반변위를 과대하게 산정하는 경향이 있음이 지적되어 왔다[9-14].

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2H_s}\right) \quad (1)$$

$$T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}} \quad (2)$$

$$T_s = A_0 T_g \quad (3)$$

여기서, $U_h(x)$: 심도 x 에서의 지반변위(m)

S_v : 고유주기에 해당되는 설계속도응답스펙트럼(m/sec)

T_s : 표층지반의 비선형 고유주기(sec)

T_g : 표층지반의 특성값으로 선형 고유주기(sec)

H_i : i 층 지반의 두께(m)

V_{si} : i 층 지반의 평균전단파속도(m/sec)

A_0 : 흙의 비선형 동적 변형특성을 고려한 보정계수

본 논문에서는 표층지반의 고유주기(T_g) 산정 시 적용되는 지반의 비선형성 보정계수(A_0)를 국내 지반 조건에 대하여 검토하였다. 일반적으로 사용되는 지반의 고유주기는 식(2)와 같이 탄성파탐사에 의한 선형영역의 전단파속도를 기반으로 계산되나, 본 논문에서는 지반의 비선형성을 고려하여 보정된 고유주기와 구별하기 위하여 T_g 를 ‘선형 고유주기’로, T_s 를 ‘비선형 고유주기’로 정의하였다. 국내 공동구 설치 현장의 지반조건을 수집하여 등가선형 지반응답해석(Equivalent Linear Ground Response Analysis)을 수행하였다. 해석결과로부터 지반의 비선형 변형특성이 반영된 고유주기를 산정하고 이를 선형 고유주기와 비교하여 응답변위법에서 사용하고 있는 고유주기 산정식과 보정계수를 검토하였다. 최종적으로 국내 지반조건 특성을 반영하여 지반 비선형성을 고려하는 보정계수(A_0)의 개선안을 제안하였다.

2. 문헌연구

2.1 국내 연구 사례

응답변위법의 국내 연구 사례는 다음과 같다. Kim et al.[8]은 응답변위

법의 보수성에 대해서 이론적으로 정리하였다. 응답변위법은 지반변위하중, 주면전단력, 관성력 하중의 최대값이 동시에 발생한다고 가정하므로 항상 보수적인 결과가 도출되게 된다고 언급하였다. Kim et al.[9]은 지하박스구조물을 대상으로 응답변위법과 유한요소해석을 수행하고 해석결과를 비교하였다. 응답변위법에서의 지반변위와 최대휨모멘트의 값이 유한요소해석 결과보다 현저히 큰 값을 보였으며, 국내 지반분류체계상의 연약한 지반보다 단단한 토사에서 더 큰 변위가 나타나는 등 국내 지반 특성을 잘 반영하지 못한다는 결과를 언급하며, 이를 토대로 속도응답스펙트럼과 지반반력계수 산정방법의 수정을 제안하였다. Yoon et al.[11]은 국내 지하철 건설현장부지를 대상으로 Proshake 프로그램을 활용한 등가선형 지반응답해석을 수행하여 고유주기에 대한 속도응답스펙트럼 검증 및 지반변위 산정법을 규명하고자 하였다. 국내지반에 적합한 수정설계속도응답스펙트럼을 제안하였으며, 단일코사인법을 이용한 지반변위 산정은 상부토층에서는 과소, 하부토층에서는 과대 평가될 수 있다고 언급하였다. Kim et al.[12]은 국내 지하철 건설현장부지를 대상으로 Proshake 프로그램을 활용한 등가선형 지반응답해석을 수행하여 응답변위법 적용 시 사용되고 있는 지반변위 산정식의 문제점을 검토하고 이를 개선한 지수함수 형태의 지반변위 산정식을 제안하였다.

이와 같이 응답변위법 이용 시 국내 지반특성을 고려하여 적절한 지반변위를 결정하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔지만 여전히 보완이 필요한 상황이다. 또한, 현재까지 국내 연구는 속도응답스펙트럼, 지반변위산정식과 지반반력계수에 집중되어왔으며, 지반 변위를 산정할 때에 주요 인자로 작용하는 표층지반의 비선형 고유주기(T_g)에 대한 연구와 지반의 비선형성을 고려한 고유주기의 보정계수(A_0)에 대한 연구는 발표된 바 없다.

2.2 고유주기에 대한 일본 및 국내 기준 연구

응답변위법을 채택하고 있는 현행 국내 지중구조물 설계기준 및 평가요령과 일본 기준에서 사용하는 고유주기 산정식과 보정계수를 정리하면 Table 1과 같다. 지진 시 지반의 비선형 동적변형특성을 고려하기 위해 고유주기에 보정계수를 적용하고 있다. 또한, 구조해석 모델 구성에 사용되는 지반스프링과 지반변위하중을 결정할 때 사용되는 전단탄성계수에도 비선형성을 반영하고 있다. 다만, 고유주기와 전단탄성계수는 전단파속도에 근거하고 있어 비선형 동적변형특성이 중복하여 고려되지 않도록 주의해야 한다. 따라서, Table 1에 조사된 일본 기준들의 경우, 고유주기와 별도로 전단탄성계수의 비선형 특성을 고려하는 감소계수 c_v 를 도입하여 중복을 피하고 있다. 반면, 과거 국내 기준에서는 이러한 구분이 없어 과도하게 적용된 점이 지적되어[13, 14], 신설된 기존시설물(공동구)내진성능 평가요령[2]에서는 고유주기와 전단탄성계수에서 구별된 계수를 도입한 바 있다.

또한, 대부분의 일본 기준[15], [16], [18]은 보정계수 1.25($c_v = 0.8$ 에 해당)를 선택하고 있고, 일본수도시설 내진설계지침에서는 Level 2의 강진에 대해 2.0을 제안하고 있다[17]. 또한, 일본 기준에서는 ‘공학적 기반면’을 $V_s \geq 300$ m/s으로 제시하여 이보다 단단한 지반의 경우 비선형성을 고려하지 않고 있는 반면, 2020년 이전에 시행된 국내 기준[1, 4-6]에서는 $V_s \geq 760$ m/s을 기반면으로 설정하고 있어 결과적으로 비선형이 보다 크게 적용되는 측면이 있어 왔다. 따라서, 2020년 제정된 기존시설물(공동구)

Table 1. Summary of seismic guidelines for underground structures in Japan and Korea

Nation	Guideline	T_s, T_g	Calculation of shear modulus	Engineered bedrock
Japan	Guidelines for Seismic Design of multi-utility tunnel [15]	$T_s = 1.25 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_{DS}^2$ $V_{DS} = \frac{4H}{T_s} = \frac{4H}{1.25 T_G} = 0.8 \times \frac{4H}{T_G}$	$V_s \geq 300 m/s$
	Guidelines for Seismic design & construction of parking lots [16]	$T_s = 1.25 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_{DS}^2, V_{DSi} = c_V \times V_{Si}$ $c_V = \begin{cases} 0.8 (V_{Si} < 300 m/s) \\ 1.0 (V_{Si} \geq 300 m/s) \end{cases}$	
	Seismic guidelines for water facilities [17]	Level 1 $T_s = 1.25 T_g$ Level 2 $T_s = 2.00 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_S^2$ - V_S is calculated by empirical equations using N at 10^{-3} strain to consider non-linearity	
	Design Guidelines for Land Improvement Construction [18]	$T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_{DS}^2, V_{DSi} = c_V \times V_{Si}$ $c_V = \begin{cases} 0.8 (V_{Si} < 300 m/s) \\ 1.0 (V_{Si} \geq 300 m/s) \end{cases}$	
Korea	Seismic design standard for Urban Railway [5]*	$T_s = 1.25 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_S}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_S^2, V_S = C \times V_{Si}$ $C = \begin{cases} 0.8 (OLE) \\ 0.5 (CLE) \end{cases}$	$V_s \geq 760 m/s$
	Design Code for Multi-utility Tunnel : Seismic Design [1]	$T_s = 1.25 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	N/A	
	Guidelines for Seismic Performance Evaluations of Existing Structures (Multi-utility Tunnel) [2]	$T_s = 1.25 T_g$ $T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{si}}$	$G_D = \frac{1}{g} \gamma_t V_{DS}^2, V_{DSi} = C \times V_{Si}$ $C = \begin{cases} 0.8 (V_{Si} < 360 m/s) \\ 1.0 (V_{Si} \geq 360 m/s) \end{cases}$	

* Corresponding part of the revised "Seismic design standard for Urban Railway (2018)" has been deleted

** $C = c_V$. Marked as C in Korea and c_V in Japan

내진성능 평가요령에서는 $V_s \geq 360 m/s$ 인 풍화암 이상 지반에서는 전단 탄성계수와 전단파속도의 비선형성이 미미하여 감소계수를 적용하지 않는 것으로 제시하였다[2]. 그러나, 현재까지도 국내 지반 특성을 고려한 보정 계수(A_0) 또는 감소계수(c_V)에 대한 검토는 미비한 실정이다.

3. 지반응답해석

본 연구에서는 대상부지의 고유주기를 분석하기 위해 DEEPSOIL v7.0[19] 프로그램을 이용하여 등가선형 지반응답해석을 수행하였다.

3.1 대상부지

국내 특성을 반영하는 적절한 보정계수(A_0)를 제안하고자 국내에 공동구가 설치된 현장을 대상으로 지반응답해석을 수행하였다. 국토지반정보시스템[20]에서 제공하는 자료를 활용하여 Fig. 1과 Table 2와 같이 서로 다른 고유주기를 갖는 국내 공동구 설치현장 12개소(Site A~L)를 대상으로 지반응답해석을 수행하였다.

3.2 설계지반운동 수준 및 입력지진기록 선정

본 연구에서는 2018년 제정된 내진설계 일반[21]에서 명시하는 기준에 적합한 국내여건과 유사한 판내부 지역에서 측정한 국내·외 실지진기록을 지반응답해석에 이용하였다. 먼저 국내에서 발생한 2016년 경주지진(규모 5.8), 2017년 포항지진(규모 5.4)을 국가지진종합정보시스템(NECIS)을 통하여 이용하였고, 다양한 주기의 지진특성을 고려하기 위하여 지진규모 6.0~7.0 이내의 판내부에서 발생한 5개의 국외 실지진기록을 미국의 PEER 센터(The Pacific Earthquake Engineering Research Center)에서 제공하는 자료를 활용하여 선정하였다. 본 연구에서 이용한 총 7개의 입력 지진기록은 Table 3과 Fig. 2와 같이 정리하였다.

선정된 7개의 지진기록은 내진설계 일반[21]에 따라 내진성능수준(붕괴방지수준, 기능수행수준)에 해당하는 S_1 지반의 5% 감쇠비에 대한 표준 설계응답스펙트럼 형상에 부합하도록 스펙트럼 보정을 수행하였다. Seismo-match v2018 프로그램[22] 내에 탑재되어 있는 Atik & Abrahamson (2010)[23]의 알고리즘을 활용하여 주기 0.05초에서 4초 사이에 대한 스펙트럼을 보정함과 동시에 시간 이력의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)가 내진성능수준에 해당하는 유효수평지반가속도(S)와 일치하도록 보정계수(Scale factor)를 조정하여 시행착오법을 통해 스펙트

Shear wave velocity (m/s)

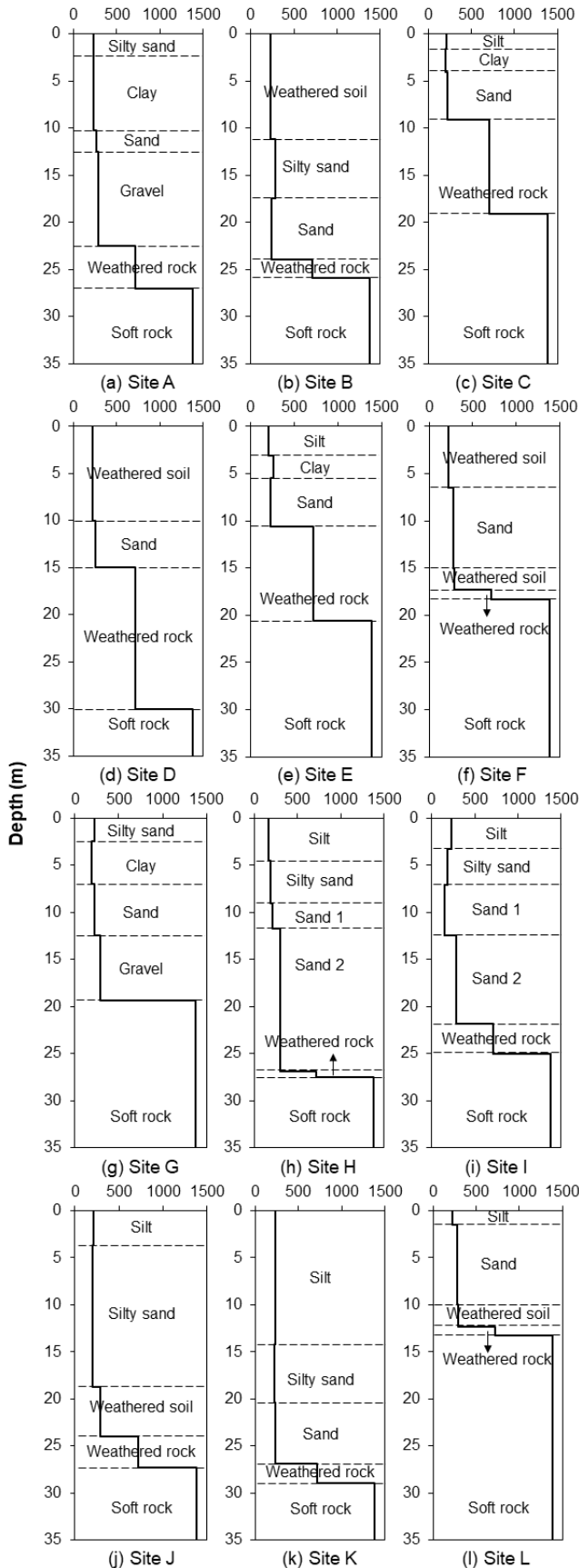


Fig. 1. Shear wave velocity profiles of sites

Table 2. Information of sites investigated in this study

Site	Linear natural period, T_g (sec)	Mean shear wave velocity, $V_{s,soil}$ (m/sec)	Site class
A	0.375	288.2	S_4
B	0.401	258.4	S_4
C	0.223	342.9	S_2
D	0.349	344.3	S_4
E	0.242	340.4	S_4
F	0.275	266.1	S_2
G	0.328	235.2	S_3
H	0.463	237.8	S_4
I	0.429	233.3	S_4
J	0.466	234.3	S_4
K	0.474	243.7	S_4
L	0.186	286.3	S_2

Table 3. Real seismic records used in this study

No.	Country	Magnitude	PGA (g)	Event	Year
1	Iran	6.5	0.640	Bam	2003
2	Iran	6.4	0.219	Qadrooni	2005
3	USSR	6.4	0.608	Gazli	1976
4	India	6.5	0.379	Konya	1967
5	Canada	6.76	0.978	Nahanni	1985
6	Korea	5.8	0.346	Gyeongju	2016
7	Korea	5.4	0.331	Pohang	2017

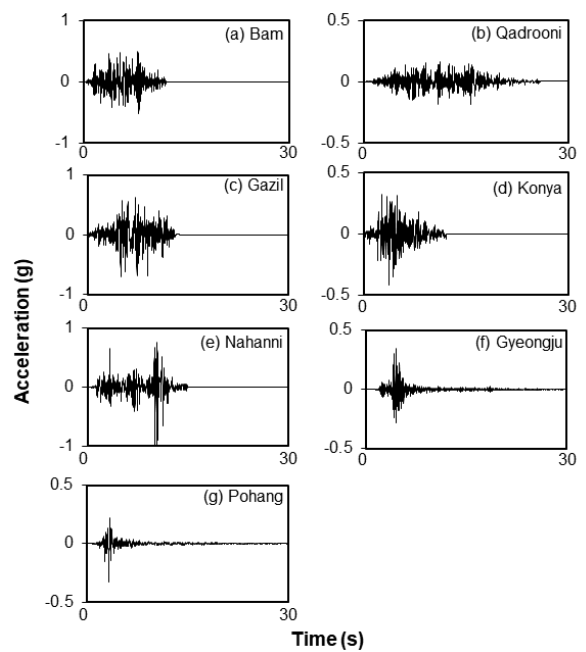


Fig. 2. Earthquake records used in this study

럼을 보정하였다. 공동구 설계기준[1]에서는 공동구를 내진 I등급 시설물로 규정하고 있으며, 연구에 활용된 대상부지는 지진구역 I에 속한다. 이에 따라 본 연구에서는 입력지진파들을 붕괴방지와 기능수행수준에 해당하도록 유효수평지반가속도를 0.154 g 및 0.0627 g로 보정하였다.

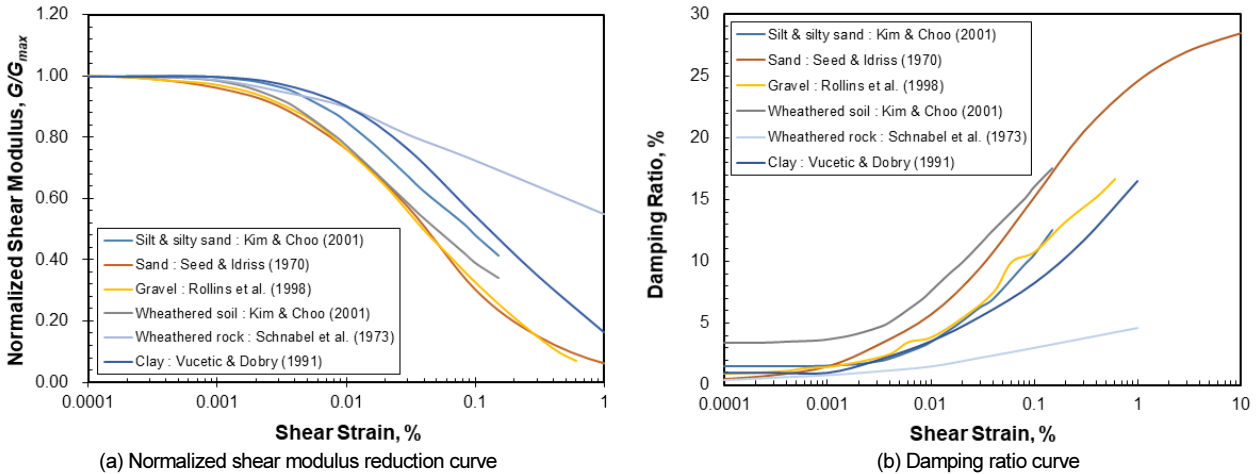


Fig. 3. Nonlinear dynamic deformation property curves

3.3 흙의 비선형 동적 변형특성

등가선형 지반응답해석에서 흙의 비선형 동적변형특성을 반영하기 위해 변형률에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max} - \log \gamma$)과 감쇠비곡선($D - \log \gamma$)이 입력된다. 본 연구에서는 지반조사자료로부터 분류된 지층들의 흙 분류에 따른 비선형 동적곡선들을 선형 연구결과로부터 수집하여 지반응답해석을 수행하였다. 대상부지의 지반조사자료로부터 나타난 대표지층은 실트, 실트질 모래, 점성토, 사질토, 자갈, 풍화토 및 풍화암 층으로 분류하였다.

대표지층들에 대하여 기존의 문헌자료에서 제시된 자료로부터 흙의 비선형 곡선의 중간값을 적용하였고, 적용된 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 실트 및 실트질 모래층에는 Kim and Choo[24], 점성토층에는 Vucetic and Dobry[25], 사질토층에는 Seed and Idriss[26], 자갈층에는 Rollins et al. [27], 풍화토층에는 Kim and Choo[24] 및 풍화암층에는 Schnabel[28] 곡선을 활용하였다.

3.4 해석 조건

지반모델은 앞 절에서 언급한 바와 같이 국내에 공동구가 설치된 12개소의 대상부지를 지반조사자료를 통해 지층을 분류하고 기존문헌자료를 활용하여 각 지층에 적합한 지반의 비선형 곡선을 적용하여 모델링하였다. 입력 지진파로는 붕괴방지 및 기능수행수준에 적합한 스펙트럼 매칭을 수행한 지진기록 7개를 활용하였다. 등가선형해석에서 적용된 유효변형률계수는 0.65이며, 비선형 동적특성곡선에서 유효변형률에 상응하는 전단탄성계수와 감쇠비를 추정하기 위한 해석반복횟수(Iteration)는 10회를 적용하였다.

4. 지반응답해석 결과

부지 12개소에 대하여 지진기록 7개를 활용하여 붕괴방지수준과 기능수행수준의 내진성능수준을 대상으로 총 168회의 지반응답해석을 수행한 결과로부터 비선형 고유주기(T_a)를 산출하였다. 이때, 지반응답해석을 통해 나타난 지표면에서의 푸리에진폭을 기반암에서의 푸리에진폭으로 나누

어 계산되는 푸리에진폭 비의 첨두 값에 해당하는 고유주기를 비선형 고유주기(T_a)로 결정하였다. 또한, 비선형 고유주기(T_a)를 선형고유주기(T_g)와 비교하였으며, 선형고유주기(T_g) 대비 비선형 고유주기의 비(T_a/T_g)를 기존의 보정계수와 비교하였다.

4.1 붕괴방지수준(Collapse prevention performance level, CLE)

붕괴방지수준에 대한 지반응답해석을 수행한 결과 도출된 비선형 고유주기와 보정계수를 선형 고유주기에 따라 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서 구한 보정계수(A_0)는 현행 기준시설물(공동구) 내진성능 평가요령[2]에서 제시하는 1.25에 근접하거나 대체로 작은 값을 보이는 반면, 선형 고유주기가 0.401초, 0.463초 및 0.474초인 부지 B, H, K에서는 1.25를 크게 상회하는 결과가 나타났다.

부지 B, H, K의 경우 선형 고유주기가 0.4초를 초과하는 장주기 특성을 보이고, 기반면까지의 깊이가 25.9~28.9 m로 깊으며, 기반면 상부 지층에서 풍화암층의 두께가 0.6~2 m로 풍화암층이 차지하는 비율이 2.18~7.72%로 기반면 위 토층 중 10% 미만의 비중을 차지하는 지반특성을 가진다.

반면에 선형 고유주기가 0.223초, 0.349초인 부지 C, D에서는 선형 고유주기 보다 작거나 유사하여 보정계수(A_0)가 1에 근접한 결과가 나타났다. 해당 부지들의 공통적인 지반특성은 단주기특성을 갖는 지반이며, 기반면 상부 지층에서 풍화암층이 차지하는 비율이 50~52.6%로 기반면 위 토층의 50% 이상의 비중을 차지하는 지반특성을 가진다.

또한, 국내지진기록의 보정계수 평균값은 1.301이며, 국외지진기록의 보정계수 평균값은 1.164로, 국내지진기록이 국외지진기록에 비해 비선형 고유주기(T_a) 및 보정계수(A_0)가 다소 작은 결과가 나타났다. 이는 국내 지진기록의 경우 탁월주기가 작으며, 해석에 이용된 지반 선형 고유주기와 탁월주기의 차이가 크기 때문으로 보여진다. 그 결과 지반응답해석으로 도출된 국내지진기록에서의 깊이별 최대 전단변형률은 평균적으로 0.027%로 나타났으며, 국외 지진기록의 깊이별 최대전단변형률은 평균적으로 0.045%로 나타나 국내지진기록에서 지반 비선형성이 다소 작게 나타난 것으로 보인다.

기반면까지의 깊이가 깊고 전단파 속도가 높은 풍화암이 차지하는 비율

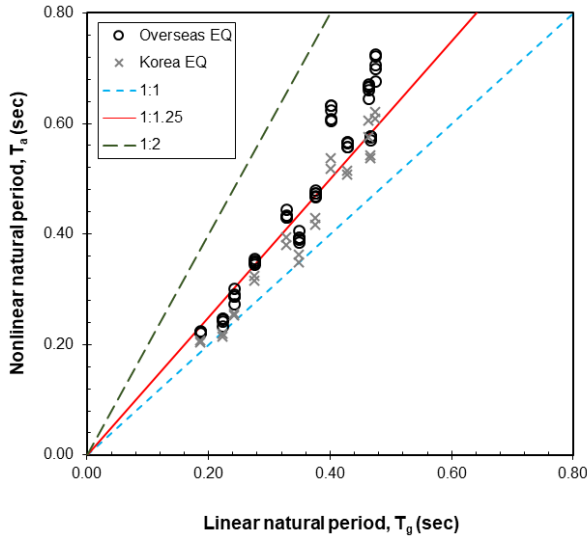


Fig. 4. Nonlinear natural period of CLE, T_a

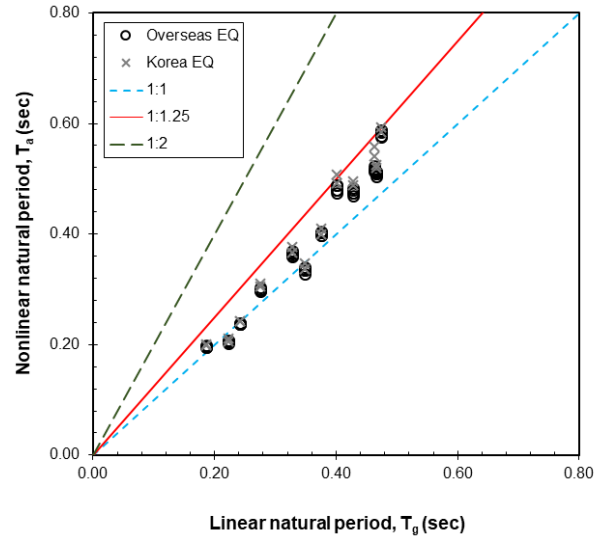


Fig. 6. Nonlinear natural period of OLE, T_a

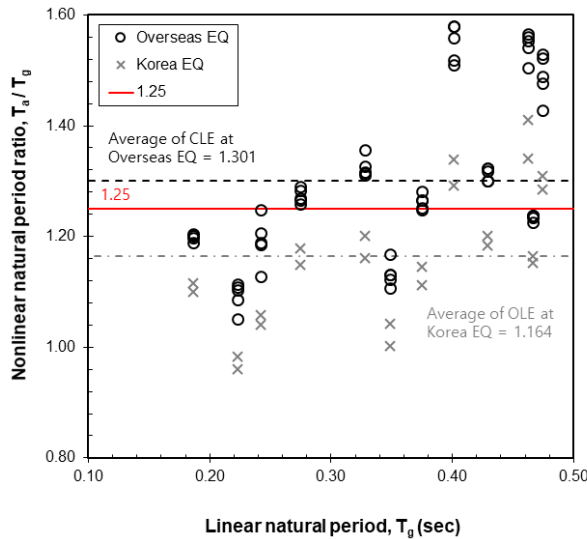


Fig. 5. Nonlinear natural period ratio of CLE, $T_a/T_g (A_0)$

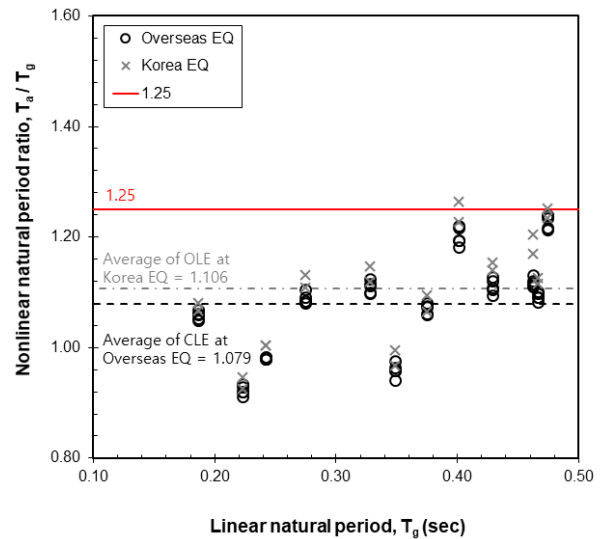


Fig. 7. Nonlinear natural period ratio of OLE, $T_a/T_g (A_0)$

이 낮은 경우에는 비선형 고유주기와 선형 고유주기의 차이가 크게 나타났고, 풍화암층이 차지하는 비율이 큰 경우에는 지반응답해석 결과 도출된 비선형 고유주기와 선형 고유주기가 유사하였다. 따라서, 지반의 비선형을 고려하는 보정계수는 지층의 분포 특성에 따라 차별적인 값을 적용하는 것이 필요하다고 판단된다.

4.2 기능수행수준(Operational performance level, OLE)

기능수행수준에 대한 지반응답해석을 수행한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 기능수행수준에서의 보정계수(A_0)는 부지 B, K를 제외하고 1에 근접하여 선형 고유주기와 유사한 결과를 보였다. 또한 국내지진기록에서의 깊이별 최대 전단변형률은 평균적으로 0.016%로 나타났으며, 국외지진기록의 깊이별 최대전단변형률은 평균적으로 0.020%로 국내·외지진기록의 차이에도 지반이 경험하는 전단변형률 수준이 비슷하여 결과적

으로 국내·외 지진기록에 따른 비선형 고유주기(T_a) 및 보정계수(A_0)의 차이가 거의 나타나지 않은 것으로 보인다.

따라서, 기능수행수준에서는 지진기록과 지층 특성에 따른 지반의 비선형 특성이 미미하나, 현행 기존시설물(공동구)내진성능 평가요령[2]에서는 붕괴방지수준과 동일한 보정계수를 사용하도록 권고하고 있으므로 이에 대한 수정이 필요하다고 판단된다.

4.3 지반특성에 따른 분석

지반응답해석 결과 도출된 보정계수는 부지의 지층 및 물성조건에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 선형고유주기, 토층평균전단파속도, 기반암의 깊이와 표층지반내 풍화암층의 비율에 따른 영향을 추가로 분석하였다. 각 부지별(A~L부지) 보정계수의 평균을 Fig. 8에 나타내었다. 선형고유주기가 0.4초 이상의 장주기 지반일 때, 기반암 깊이가 20 m를 초

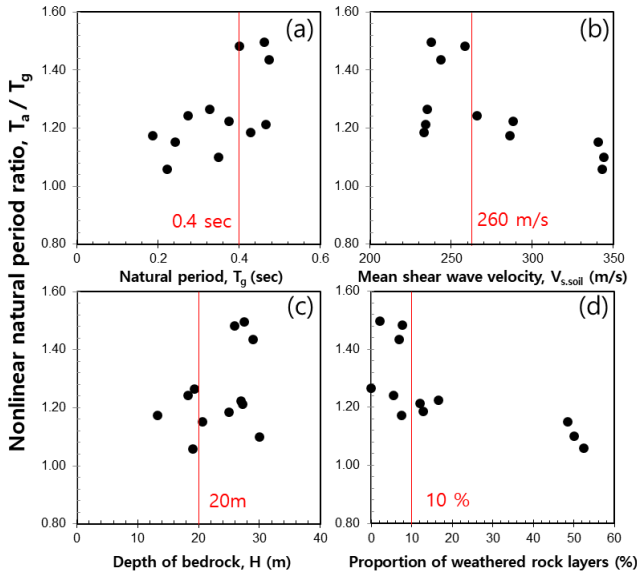


Fig. 8. Nonlinear natural period ratio by soil property; (a) Natural period, T_g , (b) Mean shear wave velocity, $V_{s,soil}$, (c) Depth of bedrock, H , (d) Proportion of weathered rock layers, H_W/H .

Table 4. Average and standard deviation of nonlinear natural period ratio calculated of 1-parameter

Classification criteria			
Soil property		Seismic performance level	
Parameters	Condition	CLE	OLE
T_g	C1: $T_g > 0.4$	1.362 ± 0.156	1.162 ± 0.057
	C2: $T_g \leq 0.4$	1.174 ± 0.096	1.033 ± 0.068
$V_{s,soil}$	C1: $V_{s,soil} < 260 \text{ m/s}$	1.346 ± 0.153	1.154 ± 0.055
	C2: $V_{s,soil} \geq 260 \text{ m/s}$	1.245 ± 0.138	1.090 ± 0.061
H	C1: $H > 20 \text{ m}$	1.286 ± 0.166	1.104 ± 0.091
	C2: $H \leq 20 \text{ m}$	1.185 ± 0.104	1.051 ± 0.076
H_W/H	C1: $H_W/H < 10\%$	1.349 ± 0.151	1.144 ± 0.064
	C2: $H_W/H \geq 10\%$	1.155 ± 0.082	1.029 ± 0.074

과하는 깊은지반일 때, 보정계수가 증가하며 큰 변화를 보였다. 토층평균전단파속도가 260 m/s 미만, 풍화암층의 비율 10% 미만일 때, 보정계수가 증가하며 큰 변화가 나타나, 보정계수는 지반특성에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

보정계수 개선에 지반특성을 고려하기 위해 비선형성이 크게 나타나는 조건 C1과 그 외 지반조건 C2로 분류하고자 하였다. Fig. 8에서 확인된 기준값으로 구분하여 보정계수를 분류하여 평균값과 표준편차를 분석하여 분산도를 Table 4에 비교하였다. Table 4와 같이 한 개의 독립변수로 지반조건을 분류할 경우, C1 조건에서 비선형 고유주기 비의 표준편차가 0.151~0.166로 매우 크게 나타났다. 따라서, 분산도가 작은 분류체계를 제안하고자 두 개의 변수를 이용하여 분석하였고 이는 Table 5와 같다. Table 5는 네 개의 변수 중 두 개의 변수를 조합하여 평균값을 도출하고 분산도를 비교하였다.

두 개의 변수를 사용할 경우, 풍화암층의 비율(H_W/H)이 공통적으로 포함된 분류조건에서 표준편차가 작게 나타났다. 따라서, 본 논문에서는 분류

Table 5. Average and standard deviation of nonlinear natural period ratio calculated of 2-parameter

Classification criteria			
Soil property		Seismic performance level	
Parameters	Condition	CLE	OLE
H	C1: $H > 20 \text{ m}$ and $H_W/H < 10\%$	1.471 ± 0.099	1.195 ± 0.048
	C2: Not in the range of C1 values	1.179 ± 0.088	1.050 ± 0.069
H	C1: $H > 20 \text{ m}$ and $V_{s,soil} < 260 \text{ m/s}$	1.346 ± 0.153	1.154 ± 0.055
	C2: Not in the range of C1 values	1.245 ± 0.138	1.090 ± 0.061
H	C1: $H > 20 \text{ m}$ and $T_g > 0.4$	1.346 ± 0.153	1.154 ± 0.055
	C2: Not in the range of C1 values	1.245 ± 0.138	1.090 ± 0.061
T_g	C1: $T_g > 0.4$ and $H_W/H < 10\%$	1.471 ± 0.099	1.195 ± 0.048
	C2: Not in the range of C1 values	1.179 ± 0.088	1.050 ± 0.069
T_g	C1: $T_g > 0.4$ and $V_{s,soil} < 260 \text{ m/s}$	1.346 ± 0.153	1.154 ± 0.055
	C2: Not in the range of C1 values	1.245 ± 0.138	1.090 ± 0.061
H_W/H	C1: $H_W/H < 10\%$ and $V_{s,soil} < 260 \text{ m/s}$	1.471 ± 0.099	1.195 ± 0.048
	C2: Not in the range of C1 values	1.179 ± 0.088	1.050 ± 0.069

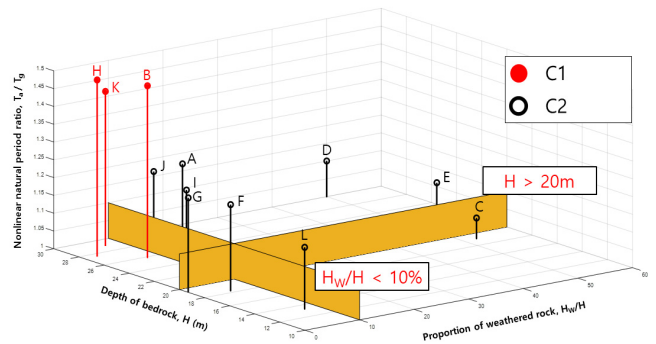


Fig. 9. Nonlinear natural period ratio by depth of bedrock and proportion of weathered rock layers

기준으로 풍화암층의 비율을 1차로 선정하고, 나머지 변수로 현행 지반분류체계에서 사용하고 있는 기반암 깊이를 선정하였다. 선정된 두 변수를 사용할 경우 Fig. 9와 같이 비선형성이 크게 나타나는 C1이 명확하게 구별되어 지반조건 분류기준으로 기반암 깊이와 풍층지반 내 풍화암층 비율을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.4 보정계수의 개선

앞 절의 결과를 토대로 보정계수의 변화가 발생하는 지반 특성을 C1과

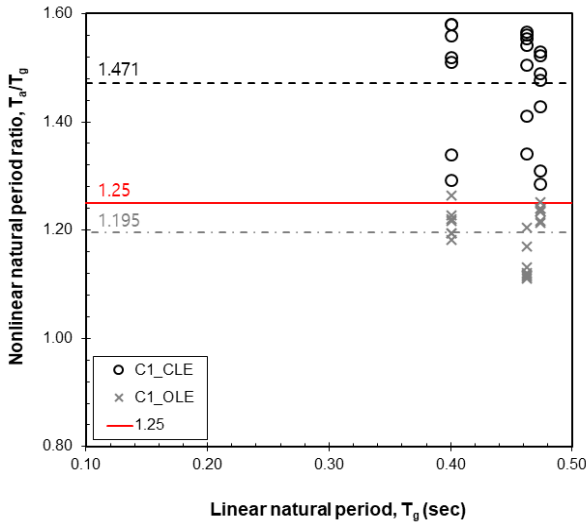


Fig. 10. Nonlinear natural period ratio of C1, T_n/T_0

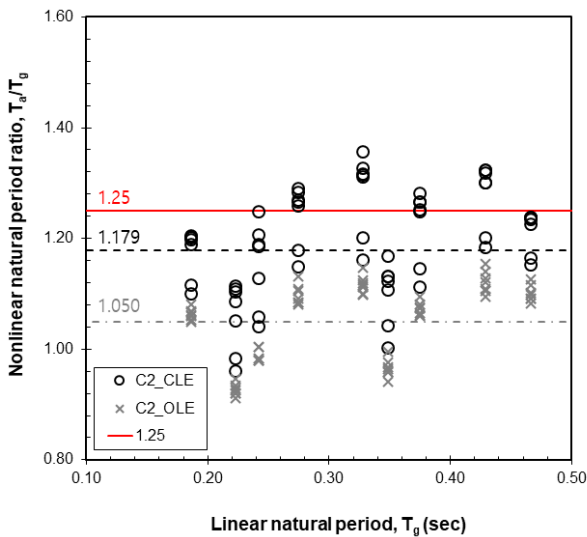


Fig. 11. Nonlinear natural period ratio of C2, T_n/T_0

C2 두 가지 조건으로 분류하였다. C1은 기반면 깊이가 20 m를 초과하는 깊은 지반이며, 표층지반 내 풍화암층의 비율이 10% 미만인 지반특성, C2는 그 외 지반특성을 나타낸다. 국내 대부분의 지반 특성은 기반암의 깊이가 얇고 단주기인 지반 특성을 가지는 것으로 알려져 있어[29-31], 대부분의 국내 지반은 C2에 해당될 것으로 판단된다. 지반응답해석 결과로 도출된 보정계수를 내진성능수준과 지반특성에 따라 분류하여 Figs. 10과 11에 나타냈으며, Table 6과 같이 조건별 평균값과 편차를 정리하였다.

전체적으로 C1의 보정계수는 C2에 비해 크게 나타났다. 붕괴방지수준에서의 C1은 현행 기준시설물(공동구) 내진성능 평가요령[2]의 보정계수 1.25를 크게 상회하는 것으로 나타난 반면, C2의 평균값은 현행 평가요령[2]의 1.25보다 다소 작다. 기능수행수준에서는 C1의 경우 현행 평가요령[2]의 1.25보다 다소 작은 값을 보이고, C2의 평균값은 1에 근접한 결과를 보였다. Table 6의 내진성능수준과 지반특성 별 평균값에 표준편차를 합산한 값을 보정계수로 제안하여 응답변위법의 지반변위산정시 보수적인 적용이 되도록 하였고, 최종적으로 제안된 보정계수는 Table 7과

Table 6. Average and standard deviation of nonlinear natural period ratio calculated in this study

Classification criteria		
Soil property	Seismic performance level	
	Collapse prevention performance level (CLE)	Operational performance level (OLE)
C1	1.471 ± 0.099	1.195 ± 0.048
C2	1.179 ± 0.088	1.050 ± 0.069

Table 7. Suggested nonlinear natural period ratio

Classification criteria		
Soil property	Seismic performance level	
	Collapse prevention performance level (CLE)	Operational performance level (OLE)
C1	1.6	1.25
C2	1.25	1.1

같다.

C1의 기능수행수준과 C2의 붕괴방지수준에서는 기존보정계수 1.25에 근접한 결과를 보여 동일한 값으로 결정하였고, C1의 붕괴방지수준과 C2의 기능수행수준은 평균값에 편차를 더해 반올림하여 보수적으로 결정하여 내진성능수준과 지반특성을 고려한 수정안을 제안한다. 하지만, 본 연구에서 활용한 지진파는 현행 내진설계일반[21]을 따라 선정되었으나, 국내 지진파의 수가 제한적이므로, 국내 특성 반영에 불확실성이 수반될 수 있다. 또한, 추가적으로 국내 공동구가 설치된 지반조건 수집을 통하여 국내 특성을 반영하는 지진파에 의한 영향과 국내 지반 조건 다양성에 대한 보완 연구가 필요하다.

4.5 전단파속도 감소계수(c)

본 절에서는 지반응답해석결과로부터 전단파속도의 비선형성을 분석하여 전단파속도에 적용되는 감소계수를 검토하였다. 현행 평가요령[2]에서는 $V_s < 360 m/s$ 인 지층에서는 0.8, $V_s \geq 360 m/s$ 인 지층에서는 1을 제시하고 있으며, 이를 검토하기 위하여 해석결과로부터 비선형성을 분석하여 Fig. 12과 Fig. 13에 나타내었다.

전단파속도와 전단탄성계수는 $V_s = \sqrt{G/\rho}$ 의 관계를 가진다. 지반응답해석결과로부터 각 지층별로 산정되는 전단변형률을 추출한 후, 이를 입력변수로 사용된 흙 종류별 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max} - \log \gamma$)에 적용하여 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})를 역산하고 이의 제곱근($\sqrt{G/G_{max}}$)을 추정하여 감소계수를 분석하였다. 전단파속도 360 m/s를 기준으로 분류한 전단탄성계수의 제곱근(즉, 감소계수)의 평균값은 Table 8과 같으며, 현행 기준시설물(공동구) 내진성능 평가요령[2]에서 사용하는 감소계수와 대체로 유사하게 나타났다. 하지만 대상부지에서 전단파속도 294.72 ~ 714.98 m/s에 해당하는 부지가 존재하지 않아 향후 다양한 전단파속도를 갖는 국내 지반조사자료 데이터베이스를 활용하여 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

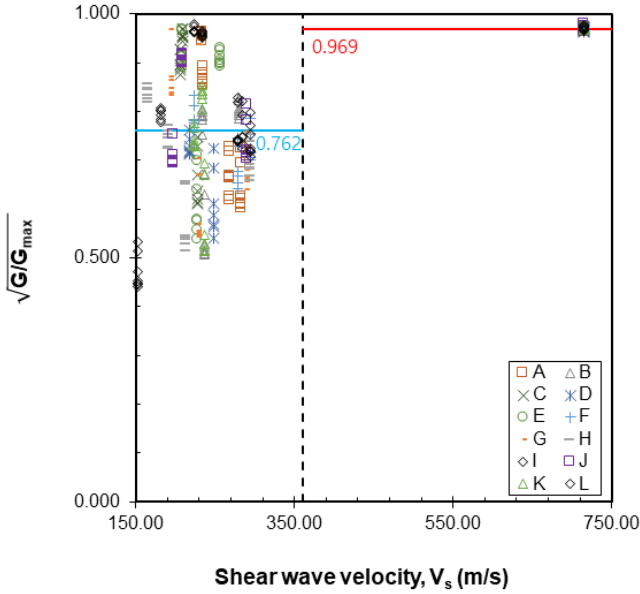


Fig. 12. Square root of normalized shear modulus by shear wave velocity of CLE

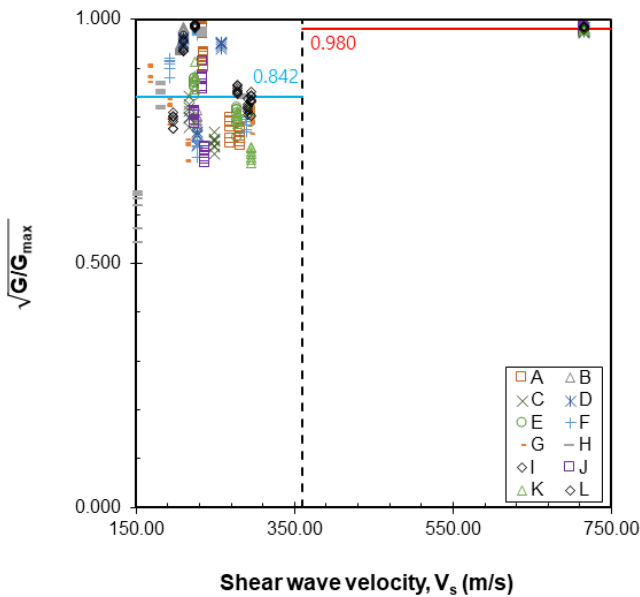


Fig. 13. Square root of normalized shear modulus by shear wave velocity of OLE

Table 8. Verification of ground deformation reduction factor(C)

Guidelines for seismic performance evaluation [2]		This study results	
Conditions	Ground deformation reduction factor (C)	$\sqrt{G/G_{max}}$	
		CLE	OLE
$V_s < 360\text{m/s}$	0.8	0.762	0.842
$V_s \geq 360\text{m/s}$	1.0	0.969	0.980

5. 결론

본 연구에서는 응답변위법에서 주요 인자로 사용되는 표층지반의 고유주기(T_s)를 산정 시 지반의 비선형성을 고려하는 보정계수(A_0)와 전단탄성계수에 지반의 비선형 특성을 고려하기 위한 감소계수(C)를 검토하였다. 이를 위하여 국내에 공동구가 설치된 부지 12곳에 대해 지반응답해석을 수행하여 보정계수와 감소계수에 대하여 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 붕괴방지수준에서의 보정계수는 현재 국내평가요령에서 준용하고 있는 보정계수 1.25에 대체로 근접하거나 작지만, 장주기 지반특성을 가지며 기반면의 깊이가 20 m 이상이고 풍화암층의 분포비가 10% 미만으로 매우 적은 지반 특성에서 1.25를 크게 상회하는 결과가 나타났다.
2. 기능수행수준에서의 보정계수는 현재 국내에서 준용하고 있는 보정계수 1.25보다 현저히 작은 보정계수가 나타났으며, 해석케이스에 따라 선형고유주기보다 작은 비선형 고유주기도 보였다.
3. 지반특성에 따른 분석을 수행한 결과, 보정계수는 선형고유주기가 장주기 기일수록, 기반면의 깊이가 깊어질수록 다소 증가하는 경향을 보이고, 토층평균전단파속도와 표층지반 내 풍화암층의 비율이 작아질수록 증가하는 경향을 보였다.
4. 보정계수 개선에 지반특성을 고려하기 위해 비선형성이 크게 나타나는 조건 C1과 그 외 지반조건 C2로 분류하고자 하였다. 지반특성에 따른 분석을 통해 분산도가 적게 나타나는 분류기준을 제안하고자 두 개의 변수를 사용했으며, 보정계수에 가장 큰 영향을 미치는 표층지반내 풍화암층의 비율과 현행지반분류체계에서 사용하고 있는 기반암 깊이를 지반분류조건으로 선정하였다.
5. C1은 기반면의 깊이가 20 m 이상이며, 동시에 풍화암층의 비중이 10% 미만인 지반 특성을, 그 외 지반을 C2로 정의하였다.
6. 본 연구의 결과로 내진성능수준과 지반특성 조건별로 보정계수를 제시하였고, 각각 C1의 붕괴방지수준에서는 1.6, 기능수행수준에서는 1.25를 제시하였으며, C2의 붕괴방지수준에서는 1.25, 기능수행수준에서는 1.1을 제시하였다.
7. 전단파속도의 비선형을 보정하는 감소계수 C를 검토한 결과, 전단파속도에 따라 상이한 양상이 나타났으며, 현행 기존시설물(공동구) 내진성능 평가요령[2]에서 도입한 감소계수와 유사하게 나타났다.
8. 본 연구에서 사용된 국내 공동구가 설치된 지반조건 및 국내 지진파의 수가 한계가 있어 향후 국내 지반조사 데이터베이스와 다양한 지진파를 활용한 추가 연구를 수행하여 본 연구의 결과에 대한 대표성을 높일 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

공주대학교 연구년 사업에 의하여 연구되었음.

/ REFERENCES /

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Design Code for Multi-utility Tunnel : Seismic Design, (KDS 11 44 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2018.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Guidelines for Seismic Performance Evaluations of Existing Structures (Multi-utility Tunnel). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2020.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Guidelines for Seismic Performance Evaluations of Existing Structures(Tunnel). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2020.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Design Code for Tunnel : Seismic Design, (KDS 27 17 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2018.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Seismic Design Standard for Urban Railway. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2016.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Guidelines for Seismic design of Existing Structures (Water Supply Facilities). (KDS 57 17 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2019.
7. Japan Road Association (JARA). Guidelines for Oil Pipeline Technology. Japan Road Association, Japan, c1974.
8. Kim JM, Kim DA. A Study on Conservativeness of Seismic Deformation Method for Earthquake Analysis of Underground Structures. *Journal of Korea Concrete Institute*. 2009 Nov;117-118.
9. Kim MC, Kim YI, Cho WY, Kim MK. Modification of Response Displacement Method for Seismic Design of Underground Structures under Domestic Conditions. *EESK J. Earthquake Eng.* 2004 Apr; 8(2):83-93.
10. Lee BR, Shin YJ, Kim SK, Park JH. Site-Natural-Period and Seismic Shear Stress on the Double Cosine Method. *EESK J. Earthquake Eng.* 2009 Mar;105-112.
11. Yoon JK, Kim DS, You JN. Evaluations of Velocity Response Spectrum of Seismic Base and Response Displacement for the Seismic Design of Underground Structures. *Journal of Korean Geotechnical Society*. 2003 Aug;19(4):211-221.
12. Kim MK, Kwak CH, Kim JS, Cho KH. Ground Displacement Evaluation of Response Displacement Method for Seismic Design of Utility Tunnel. *Korean Society of Civil Engineers*. 2004 Oct;3015-3020.
13. Choo YW, Park IJ, Lee JS, Kim SR, Lee YK. A Study on the Guidelines for Seismic Performance Evaluations of Existing Structures (Multi-utility Tunnel, Tunnel, Foundation and Ground). *Proceedings of EESK Conference*. Jeju, Korea, 2019 Sep;127-128.
14. Kim JM, Lim JS. Discussion on Seismic Response Analysis Method of Multi-utility Tunnel. *Proceedings of EESK Conference*. Jeju, Korea, 2019 Sep.
15. Japan Road Association (JARA). Guidelines for Seismic Design of Multi-utility Tunnel. Japan Road Association, Japan, c1986.
16. Japan Road Association (JARA). Guidelines for Seismic Design & Construction of Parking Lots. Japan Road Association, Japan, c1993.
17. Japan Water Works Association (JWWA). Guidelines for Seismic Design of Water Facilities. Japan Water Works Association, Japan, c2009.
18. The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF). Guidelines for Seismic design of Land Improvement Construction. The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan, c2015.
19. Hashash, YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Groholski DR, Phillips CA, Park D. DEEPSOIL 7.0. User Manual. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, c2017.
20. Geotechnical Information DB system, Available from: <http://www.geoinfo.or.kr>.
21. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). General Seismic Design (KDS 17 10 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2018.
22. Seismosoft : Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions : Seismosoft, 2019, Nov 5 Available from : <https://seismosoft.com/>.
23. Al Atik L, Abrahamson N. An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. *Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute*. 2010 Aug;26(3):601-617.
24. Kim DS, Choo YW. Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests. *Journal of Korean Geotechnical Society*. 2001 Oct;17(5):115-128.
25. Vucetic M, Dobry R. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1991 Jan;117(1):89-107.
26. Seed HB, Idriss IM. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report No. EERC 70-10. Earthquake Engineering Resource Center. University of California, Berkley, California, c1970.
27. Rollins KM, Evans MD, Diehl NB, Daily III WD. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998 May;124(5):396-405.
28. Schnabel PB, Seed HB. Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1973;63(2):501-516.
29. Sun CG, Chung CK, Kim DS. A Proposition of Site Coefficients and Site Classification System for Design Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula. *Journal of Korean Geotechnical Society*. 2005;21(6):101-115.
30. Sun CG, Han JT, Cho WJ. Representative Shear Wave Velocity of Geotechnical Layers by Synthesizing In-situ Seismic Test Data in Korea. *Journal of Engineering Geology*. 2012;22(3):293-307.
31. Sun CG, Yang DS, Chung CK. Evaluation of Site-Specific Amplification Characteristics in Plains of Seoul Metropolitan Area. *EESK J. Earthquake Eng.* 2005;9(4):29-42.