한국지진공학회 논문집 24권 2호 (통권 제134호)
2020년 3월

ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099
EESK J Earthquake Eng Vol. 24 No. 2, 111-119
https://doi.org/10.5000/EESK.2020.24.2.111

국내 액상화 평가를 위한 지진파 선정

Selection of Ground Motions for the Assessment of Liquefaction Potential for South Korea

장영은[1] · 서환우[2] · 김병민[3] · 한진태[4] · 박두희[5]*

Jang, Young-Eun[1] · Seo, Hwanwoo[2] · Kim, Byungmin[3] · Han, Jin-Tae[4] · Park, Duhee[5]*

[1]한국원자력연구원 혁신원자력시스템연구소 수석연구원, [2]울산과학기술원 도시환경공학과 석박사통합과정, [3]울산과학기술원 도시환경공학과 조교수, [4]한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 지진안전센터 연구위원, [5]한양대학교 건설환경공학과 교수

[1]Senior Researcher, Innovative Nuclear Reactor Systems, Korea Atomic Energy Research Institute, [2]Combined M.S-Ph.D Program, School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, [3]Assistant Professor, School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, [4]Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, Seismic Safety Research Center, KICT, [5]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

/ ABSTRACT /

Recently, some of the most destructive earthquakes have occurred in South Korea since earthquake observations began in 1978. In particular, the soil liquefactions have been reported in Pohang as a result of the ML 5.4 earthquake that occurred in November 2017. Liquefaction-induced ground deformations can cause significant damage to a wide range of buildings and infrastructures. Therefore, it is necessary to take practical steps to ensure safety during an earthquake. In the current seismic design in South Korea, the Hachinohe earthquake and Ofunato earthquake recorded in Japan, along with artificial earthquakes, have been generally used for input motions in dynamic analyses. However, such strong ground motions are only from Japan, and artificial earthquake ground motions are different from real ground motions. In this study, seven ground motions are selected, including those recorded in South Korea, while others are compatible to the current design spectra of South Korea. The effects of the newly selected ground motions on site response analyses and liquefaction analyses are evaluated.

Key words: Ground motion, Site response analysis, Peak ground acceleration, Liquefaction assessment

1. 서 론

국내에서는 지반 구조물의 내진설계 및 액상화 가능성 평가시 인공지진파와 함께 장주기, 단주기 특성을 포함하는 세 종류의 지진파가 사용되고 있다. 이러한 지침은 1997년 건설교통부에서 발간된 『내진설계 기준연구(Ⅱ)』의 권장 사항을 따르는 것으로 입력 지진파의 선택을 위한 조건은 구체적으로 언급되어 있지 않다 [1]. 다만 국내에서 계측된 지진기록과 사례 부족으로 인해 1999년 『항만 및 어항시설의 내진설계표준서』에 수록된 설계 예제 작성 시 장주기 및 단주기 특성을 대표하는 일본의 Hachinohe항과 Ofunato항의 지진기록을 바탕으로 동적해석을 수행한 것이 대표적인 사례가 되어 두 지진파가 보편적으로 활용되어왔다 [2]. 이후 2017년 제정된 내진설계 기준 『내진설계기준 공통적용사항』에서는 내진성능평가시 지진파의 시간 이력에 대한 응답스펙트럼을 목표로 하는 설계응답스펙트럼 형상에 부합되도록 시간 이력을 보정(spectrum matching)하는 것을 추천한다고 명시되었다 [3]. 반면 기존에는 일반적으로 지진파의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 설계응답스펙트럼이 갖는 최대가속도에 부합하도록 보정하는 정도의 방법이 활용되었다. 그러나 2016년 9월 발생한 규모 5.8의 경주지진 및 2017년 11월 규모 5.4의 포항지진 이후로 한반도가 지진 안정권이라는 가정하에 수행되어 오던 내진설계 방식의 점검과 개선이 필요하다는 인식이 대두되었다. 특히 포항지진 이후 진앙 주변 곳곳에서 액상화 현상이 발견되었음에 따라 국내의 실정에 적합한 내진성능평가 방안을 마련함으로써 지진 발생으로 인한 추가적인 피해를 방지하기 위한 노력이 필요하게 되었다. 이를 위해 먼저 지반의 동적특성과 내진성능 평가에 영향을 미치는 주요 인자인 입력 지진파를 합리적인 과정을 통해 결정하고, 이를 통해 기존의 내진성능평가 방안을 보완할 필요가 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 국내외에서 계측된 7쌍의 입력 지진파를

*Corresponding author: Park, Duhee
E-mail: dpark@hanyang.ac.kr
(Received November 5, 2019; Revised February 11, 2020; Accepted February 14, 2020)

선정하였고, 새로 선정된 지진파와 기존 지진파의 적용에 따른 지반의 응답 및 액상화 평가결과에 미치는 영향을 검토하였다.

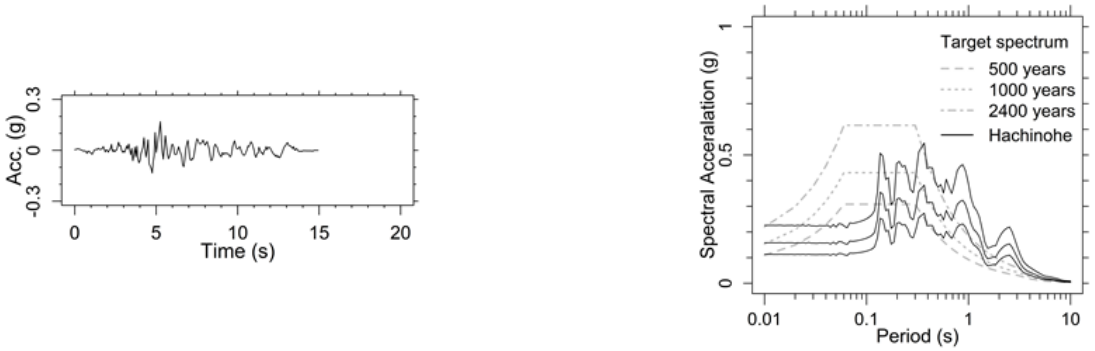
2. 국내 지진환경을 고려한 지진파 수집

2.1 지진파 수집 및 스펙트럼 매칭

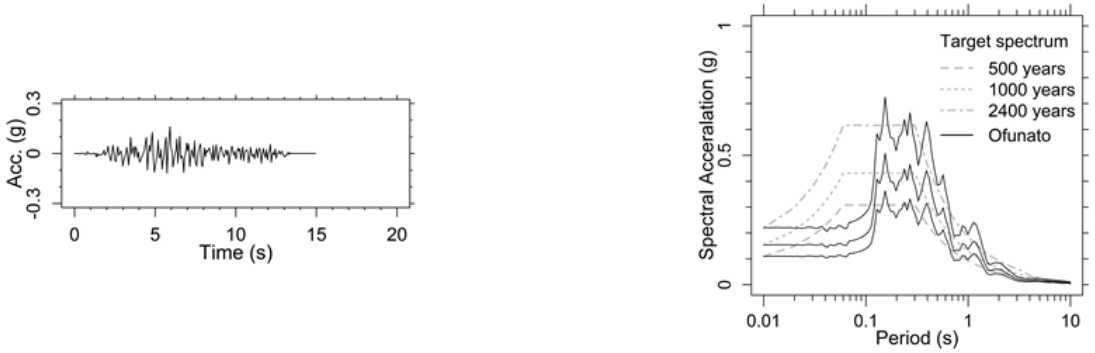
기존 내진성능 평가에서 보편적으로 활용되고 있는 세 종류의 지진파 중 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파는 각각 1968년 Tokachi-oki 지진(규모 7.9)과 1978년 Miyagi-ken-oki 지진(규모 7.4)발생 시 계측된 지진 기록이다. 각 지진파의 가속도-시간 이력 및 응답 스펙트럼을 Fig. 1에 도시하였다. 원지진파의 최대 가속도가 0.170 g인 Hachinohe 지진파(mean period: 0.532 g)와 0.161 g인 Ofunato 지진파(mean period: 0.230 g)는 기존의 방법에 따라 500년, 1,000년, 2,400년 재현주기에 따른 암반 설계 응답스펙트럼의 PGA 값에 대해 보정하여 사용하였다.

도시된 응답스펙트럼을 통해 Hachinohe 지진파는 1초 부근에서의 장주기 우세 특성과 Ofunato 지진파는 0.2초 부근에서의 단주기 우세 특성을 갖는 것을 알 수 있다 [4]. 그러나 두 지진파 모두 국내 설계응답스펙트럼과 비교해 설계응답스펙트럼의 주기별 형상 특성에 부합하지는 않는 부분이 존재하는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 1의 (c)는 암반에서의 설계응답스펙트럼에 근사적으로 합성된 인공지진파의 가속도-시간 이력과 응답스펙트럼을 보여준다. 인공지진파의 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼과 비교적 일치하는 형상을 보이지만, 가속도-시간이력을 살펴보면 PGA 발생 후 에너지가 감소하는 실지진파와 비교해 동적 에너지가 과다하게 포함된 비현실적인 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

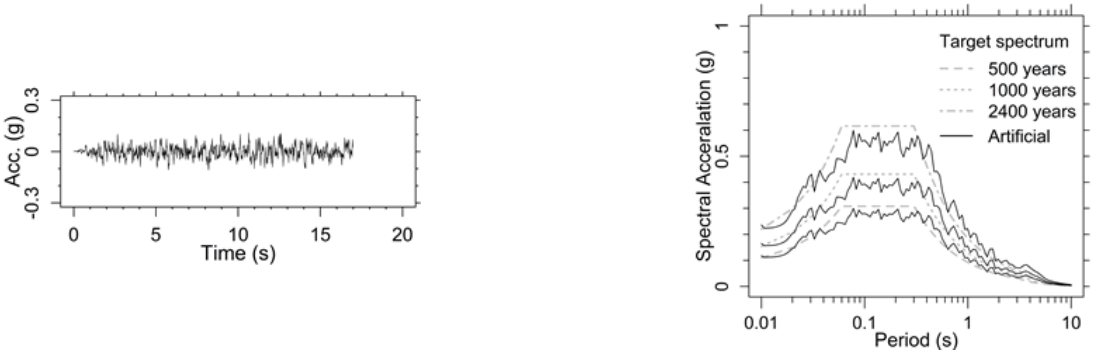
위에서 살펴본 것과 같이 기존의 지진파는 내진설계에서 보편적인 지표로 활용되는 설계응답스펙트럼과 연관성이 떨어지고, 인공지진파의 경우에는 과다한 에너지로 인해 보수적인 결과를 가져올 수 있음을 유추할 수 있다. 특히 국내에서는 지반의 액상화 가능성 평가시 Seed and Idriss (1971)



(a) Hachinohe earthquake ground motion



(b) Ofunato earthquake ground motion



(c) Artificial ground motion

Fig. 1. Acceleration time series and response spectra of the ground motions used in the current seismic design process

[5]의 방법에 따라 지반응답해석을 통해 산정된 지반 깊이별 최대지반가속도를 활용하고 있으므로, 입력 지진파의 재선정을 통해 액상화 평가결과의 신뢰성을 높일 필요가 있다고 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 기존 지진파와 비교해 더욱 합리적이고 국내의 실정에 적합한 지진파를 선정하기 위한 목적으로 국내에서 계측된 경주지진과 포항지진을 포함하여 일본의 홋카이도 지진파 및 미국, 그리스, 이탈리아 등지에서 계측된 지진파의 특성을 검토하였다. 국외의 내진설계기준 Eurocode 8 [6, 7], New Zeland Standard [8], Italian code [9] 등을 참고하여 7쌍의 지진파를 선정하였다 [10].

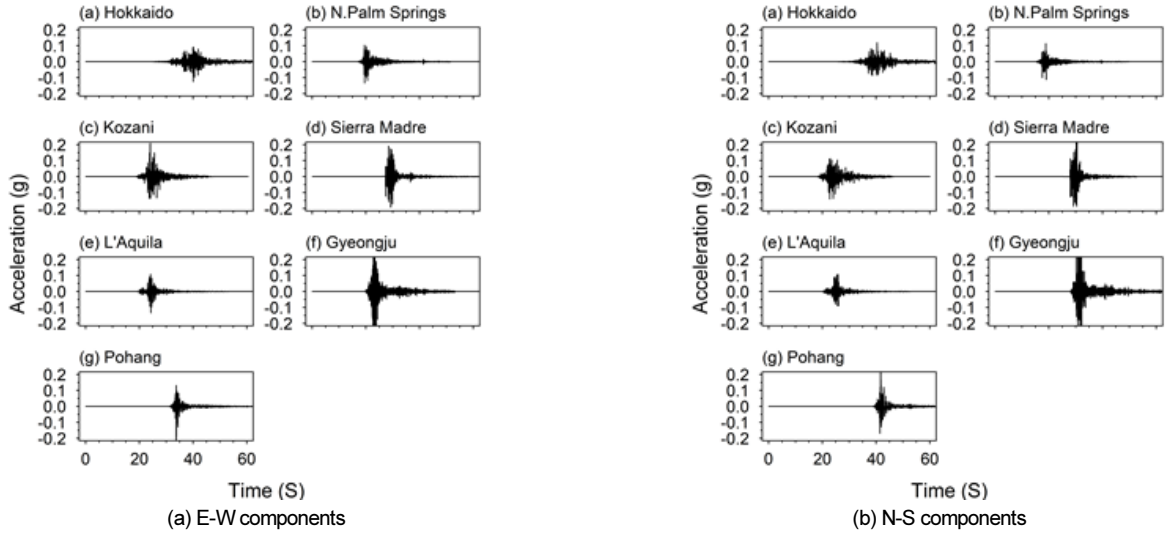
우리나라와 같이 중규모 지진(5 < M < 6.5)이 주로 발생되는 중진지역의 경우에서는 진앙에서 반경 약 15 km 이내에 지진으로 인한 피해가 집중되는 것으로 알려져 있다 [11].

이에 따라 국내 계측 지진파를 제외한 국외 지진파 선정시에는 상기 국내 지진 환경을 반영할 수 있는 지진 규모, 진앙지로부터의 거리를 고려하였다. 또한, 암반 조건을 고려하기 위하여 전단파속도가 600 m/s 이상인 관측소에서 계측된 지진파를 수집하였다. 또한, 국내 내진설계 기준에 따라 생성된 암반 설계 응답 스펙트럼에 상응하는 원지진파를 선정하였다.

국내 지진파 자료는 기상청이 운영하는 국가지진종합정보시스템 으로부터 확보하였으며, 일본 지진파는 일본 국립방재과학기술연구소에서 운영 중인 강진관측망 KIK-net (Kiban Kyoshin network)을 통해 수집하였

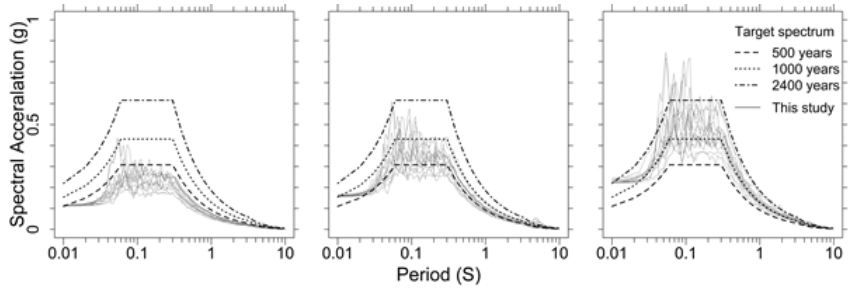
Table 1. Information of ground motion records selected in this study

	Earthquake	Country	Year	Magnitude (M)	Distance (Km)	PGA (g)	Mean Period (sec)
1	Gyeongju	Korea	2016	5.8	9.1	0.41	0.15
2	Pohang	Korea	2017	5.4	9.5	0.27	0.48
3	Hokkaido	Japan	2018	6.7	26	0.17	0.52
4	N. Palm Spring	USA	1986	6.06	16.55	0.13	0.15
5	Kozani_Greece-01	Greece	1995	6.4	14.13	0.21	0.28
6	Sierra Madre	USA	1991	5.61	10.36	0.28	0.25
7	L'Aquila (aftershock 1)_ Italy	Italy	2009	5.6	14.95	0.14	0.32



(a) E-W components (b) N-S components

Fig. 2. Acceleration time series of the seven raw ground motions recorded in the directions of (a) East-West and (b) North-South



(a) 500 years (b) 1,000 years (c) 2,400 years

Fig. 3. Response spectra of the select ground motions spectrally matched to the design spectra for return periods of (a) 500 years, (b) 1,000 years, and (c) 2,400 years

다. 그 외 국가의 지진 기록은 미국의 PEER 센터(The Pacific Earthquake Engineering Research Center)에서 관리하는 NGA-West 2 Database의 제공 자료를 활용하였다. 선정된 7쌍의 지진파에 대한 정보들을 Table 1에 정리하였다. 각 지진파는 Fig. 2와 같이 EW, NS 방향에 대한 측정 결과를 포함하며, Table 1에는 두 방향 지진파 중 더 큰 PGA 값과 평균 주기(mean period)를 명시하였다.

기존의 Hachinohe 지진파 및 Ofunato 지진파는 설계응답스펙트럼의 최대지반가속도에 대해 지진파를 보정한 것과 달리 본 연구에서는 원지진파를 설계응답스펙트럼의 전 주기에 맞게 보정하는 작업인 스펙트럼 매칭(spectrum matching)을 실시하였다. 이를 위해 국내 내진설계 기준에 따라 지진 구역 계수 0.11 g (지진구역 I) 및 500년, 1,000년, 2,400년 재현주기에 대한 위험도 계수를 적용하여 암반지반의 설계응답스펙트럼을 생성하였다. 스펙트럼 매칭은 Atik and Abrahamson (2010) [12]의 알고리즘을 바탕으로 Seismomatch 프로그램을 활용하여 주기 0.02초에서 10초 사이에 대해 매칭을 수행하였다.

단주기 영역에서 설계응답스펙트럼이 실지진파의 스펙트럼 모양과 상이하여, 단주기에서의 매칭이 원활하지 않다. 액상화 평가시에는 입력 지진파의 PGA값이 매우 중요하므로 매칭된 지진파를 최대 지반가속도에 대해 보정하여 사용하였다. Fig. 3은 3개 재현주기에 대해 보정이 완료된 지진파의 응답스펙트럼을 나타낸다.

3. 비선형 지반응답해석

3.1 지반응답해석 대상 국내 지반조건

입력 지진파에 따른 지반응답특성과 액상화 평가 결과의 비교를 위해 중규모 이상의 지진 발생 사례가 있는 동남권의 한 지역에서 조사된 지반조사를 수집하였다. 수집된 1853공의 시추공에 대한 표준관입시험(SPT) 결과 N값을 Table 2의 변환식을 사용하여 전단파속도로 변환하였다. SPT-N값을 전단파속도로 변환할 때에는 지반 조건에 따라 제안된 아래 식을 모두 적용하고, 최종적으로는 평균값을 활용하였다.

시추공의 깊이별 전단파속도는 Table 3의 국내 내진설계 기준에 따라 토층의 평균 전단파 속도를 기준으로 S1, S2, S3, S4, S5 지반으로 분류하였다. 그 중 암반지반인 S1 지반을 제외하고 S2~S5 지반 분류별로 각 5공씩 총 20공의 대표지반정보를 선정하였다. 각 지반 분류에 따른 시추공의 깊이별 전단파속도는 Fig. 4에 도시하였다.

본 연구에서는 상기 20공의 지반조건에 대해 서로 다른 입력 지진파에 적용하고 이에 대한 지반응답특성을 살펴보기 위해 DEEPSOIL v7.0을 활용하여 1차원 비선형 지반응답해석을 수행하였다 [16]. 지반응답해석을 위한 대표적인 동적물성치는 지층별 전단파속도, 단위중량 및 소성지수(PI) 등이 있으며, 앞서 정리한 전단파속도를 바탕으로 각 물성치를 결정하였다. 이때 사질토와 점토질로 이루어진 토사층 및 풍화토의 단위중량(γ)은 18

Table 2. List of relationships between VS and N-value and soil/rock type used in the study

Researcher	Proposed equation	Soil type
Sun et al. (2008) [13]	$VS = 82.01*N^{0.319}$	Sand
	$VS = 78.63*N^{0.361}$	Gravel
	$VS = 75.76*N^{0.371}$	Weathered soil
	$VS = 107.94*N^{0.418}$	Weathered rock
	$VS = 65.64*N^{0.407}$	All
Sun et al. (2012) [14]	VS = 1300	Hard rock
Sun et al. (2012) [14]	VS = 650	Weathered rock
	VS = 1300	Hard rock
KLHC (2009) [15]	$VS = 151.2*N^{0.225}$	Clay
	$VS = 173.9*N^{0.176}$	Sand
	$VS = 175.6*N^{0.161}$	Gravel
	$VS = 163.9*N^{0.210}$	Weathered soil
	$VS = 182.3*N^{0.229}$	Weathered rock
Sun et al. (2012) [14]	VS = 1300	Hard rock

Table 3. Site classes for South Korea [3]

Classification	Description	Criteria	
		Bedrock depth, H (m)	Average Vs of soil layer, Vs,soil (m/s)
S_1	Rock	H < 1	-
S_2	Shallow and stiff layer	$1 \leq H \leq 20$	$260 \leq Vs,soil$
S_3		Shallow and soft layer	Vs,soil < 260
S_4	Deep and stiff layer	20 < H	$180 \leq Vs,soil$
S_5		Deep and soft layer	Vs,soil < 180
S_6	Need specific calculations		

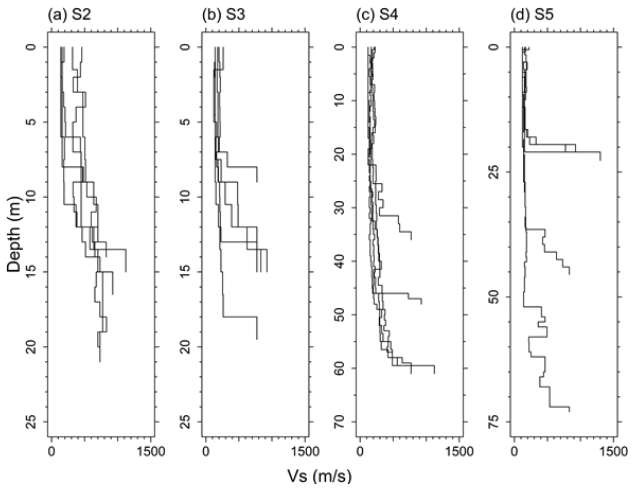


Fig. 4. Shear wave velocity profiles converted from N values for site classes S_2 – S_5

kN/m^3~20 kN/m^{3}을 적용하였으며, 소성지수의 경우 통일 분류법을 기준으로 사질토, 실트질 모래, 자갈층 및 점토층에 대해 0에서 15사이의 값을 선별적으로 적용하였다. 이때 20개 시추공의 지하수위는 2.5 m로 모두 동일하게 적용하였다. 또한 소성지수 등의 지반 물성치와 깊이별 구속압 조건을 고려한 Darendeli (2001) [17] 강성감쇠 및 댐핑 모델을 사용하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용된 대표적인 동적 곡선을 보여준다.

3.2 입력 지진파에 따른 부지응답 특성 비교

지진 시 지반운동의 부지증폭 정도를 살펴보기 위해 재현주기 500년에 대해 지반조건별로 입력 지진파의 응답 스펙트럼과 지표면에서 계산된 지진파의 응답 스펙트럼을 Fig. 6에 도시하였다. 각 그림에는 기존에 사용되고 있는 a) Hachinohe 지진파, b) Ofunato 지진파 및 c) 인공지진파를 포함하여 본 연구에서 선정한 d) 7개 지진파의 중간값에 대한 입력값을 실선으

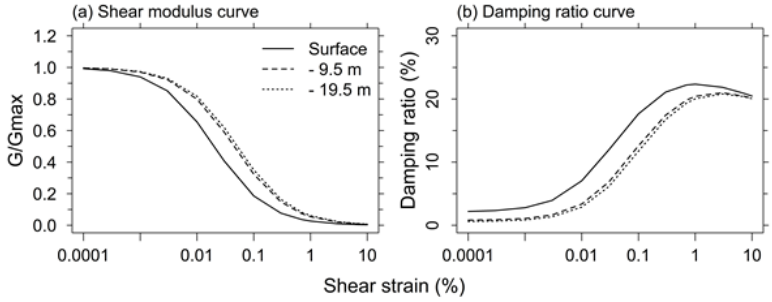


Fig. 5. Examples of shear modulus reduction and damping curves used in the study

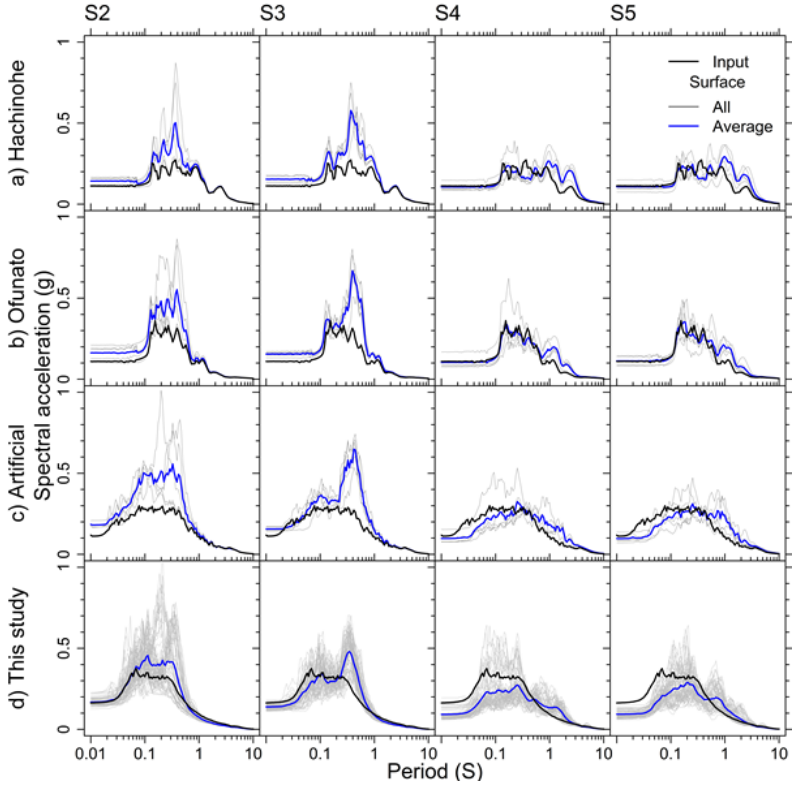


Fig. 6. Spectral accelerations of the ground motions estimated by site response analyses using the input motions for a return period of 500 years

Table 4. PGA at the bed rock and ground surface with different input motions for a return period of 500 years

Earthquake	Site class	PGA (g)	
		Bed rock	Surface
Hachinohe	S2	0.113	0.143
	S3		0.154
	S4		0.106
	S5		0.150
Ofunato	S2	0.111	0.163
	S3		0.156
	S4		0.104
	S5		0.113
Artificial	S2	0.118	0.185
	S3		0.156
	S4		0.098
	S5		0.098
This study	S2	0.164	0.168
	S3		0.139
	S4		0.092
	S5		0.094

로 표시하였다. 그림을 통해 같은 지반조건이라 하더라도 지진파에 따라 지반 증폭 특성이 조금씩 다르게 나타난 것을 볼 수 있다. 또한, S2, S3 지반에서는 단주기 및 중주기에서 지진파 증폭 현상이 예측되었으며, S4, S5 지반에서는 단주기 영역에서의 지진파 감폭과 장주기 영역에서의 지진파 증폭 현상이 예측되었다. Table 4를 통해 지반 조건 및 입력 지진파에 따라 PGA가 증가 또는 감소하였음을 알 수 있다.

액상화 평가에서는 최대지반가속도를 고려하기 때문에 본 연구에서는 최대지반가속도의 특성에 주목하고자 한다. 먼저, S2 지반에서는 Hachinohe 지진파의 최대지반가속도가 다른 지진파(Ofunato, artificial, this study (지진파 7개의 평균값))의 최대지반가속도보다 작게 예측되었다. S3, S4, S5 지반에서는 네 종류의 지진파가 모두 비슷한 최대지반가속도를 가지고 있다. 하지만 Fig. 7에서 보는 바와 같이 깊이 별 최대지반가속도는 차이가 더 크다. S2 지반의 하단부에서는 본 연구에서 산정한 지진파의 최대지반가속도가 기존 지진파보다 작다가, 지표면 근처에서는 Ofunato 및 Aritificial 지진파와 비슷해진다. S3 지반에서는 깊이 별로 본 연구에서 산정한 지진파가 다른 기존의 지진파와 비슷한 최대지반가속도를 가진다. S4, S5 지반에서는 본 연구에서 산정한 지진파의 최대지반가속도가 기존 지진파들의 최대지반가속도의 하한 구간(lower bound)과 비슷하다.

다음으로 내진설계 수준 및 액상화 평가에 활용되는 등 동적 설계에서 매우 중요한 지표인 PGA의 전달 특성을 살펴보았다. 이를 위해 지진파별 재현주기 500년, 1,000년, 2,400년에 대한 지반응답해석 결과로부터 암반 최대가속도(PGA_{rock})와 지표면 최대가속도($PGA_{surface}$)의 비율을 나타내는 PGA 증폭비(amplification factor)를 산정하였다. 이러한 PGA 증폭비와 입력 지진파의 PGA 관계는 지반조건에 따른 지진파의 증폭 특성을 효율적으로 예측할 수 있는 자료를 제공한다 [18]. Fig. 8은 기존 지진파 3개와 선정 지진파 7개에 대한 PGA 증폭 특성을 지반 분류별로 보여준다. 그림을 통해 대체로 입력 지진파의 최대가속도가 증가할수록 PGA 증폭비는 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 S4, S5 지반에서는 PGA_{rock}이 0.1 g 보다 크

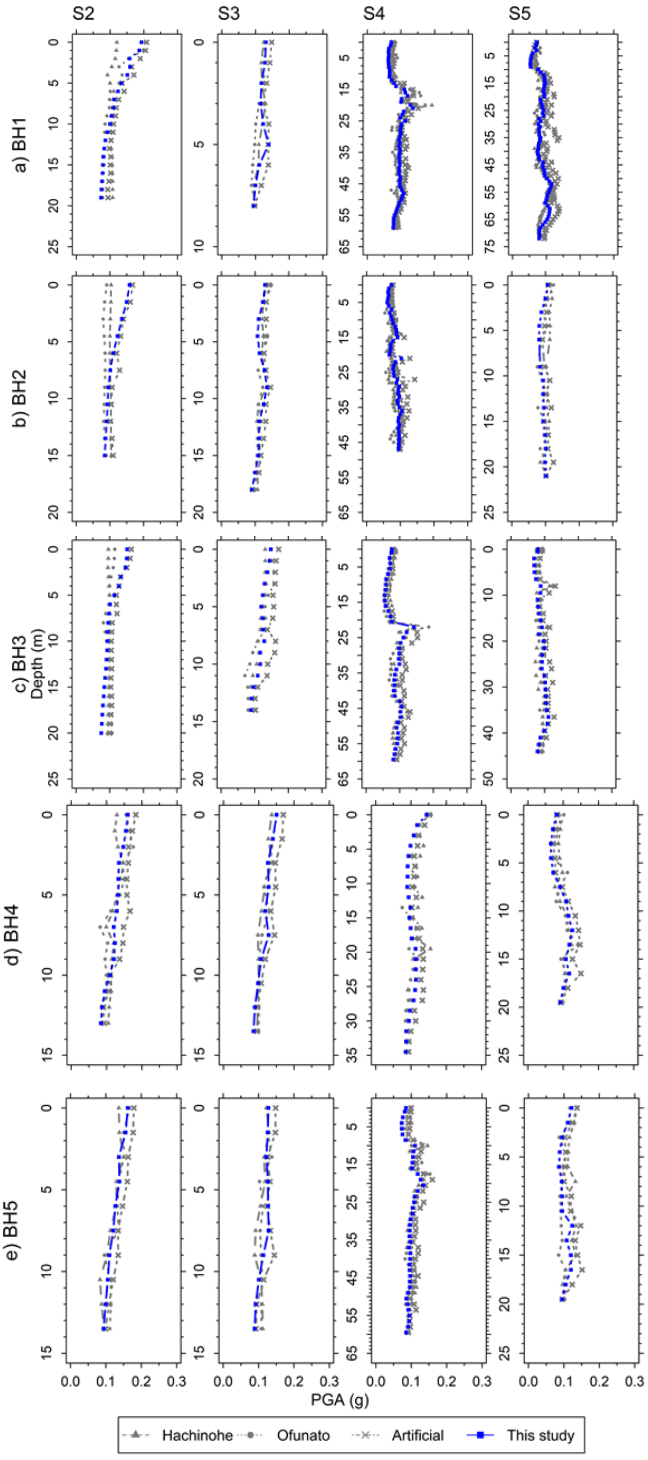


Fig. 7. Estimated PGA with depth for site classes S2 – S5 for a return period of 500 years

면 PGA가 감소한다. 이러한 PGA 증폭비는 S3, S4, S5 지반에서는 지진파 종류에 관계없이 유사한 경향이 있다. 하지만, S2 지반에서는 본 연구에서 산정한 지진파를 활용했을 때가 기존의 지진파를 활용했을 때보다 더 큰 PGA 증폭비를 예측하였다.

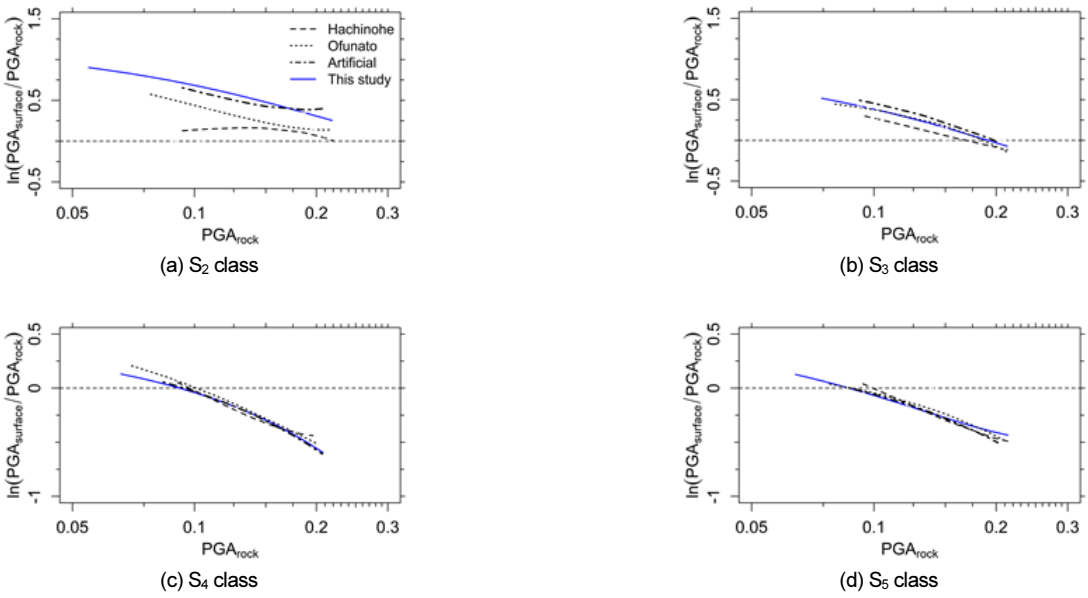


Fig. 8. PGA amplification factors with PGA of rock ground motion (PGA_{rock})for the four site classes, S_2 – S_5

4. 액상화 평가

다음으로, 위에서 살펴본 입력 지진파에 대한 지반응답특성이 액상화 평가에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 국내 액상화 평가는 지진에 의해 발생되는 진동전단응력비(Cyclic Shear Ratio, CSR)와 지반의 액상화 저항력인 진동저항응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 비교하여 안전율(CRR/CSR)을 산정하는 방식으로 수행되고 있다. 만약 안전율이 1 이상일 경우에는 액상화에 안전하다고 판단한다. 본 연구에서는 지반응답해석 수행 결과로부터 얻은 심도별 최대가속도를 식 (1)에 적용하여 CSR을 산정하였다.

$$CSR = \frac{\tau}{\sigma_v'} = 0.65\left(\frac{a_{\max}}{g}\right)\left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\right) \tag{1}$$

여기서, a_{max}는 지반응답해석 수행을 통해 산정된 액상화 평가 대상지반의 심도 별 최대지반가속도, g는 중력가속도, σ_v는 액상화 평가 심도에서의 구속압이며, σ'_v는 액상화 평가 심도에서의 유효 구속압을 의미한다.

진동저항응력비 CRR 산정은 실내실험 및 현장실험 결과를 활용하는 다양한 방법 중 SPT-N값을 통해 산정하도록 제안된 Youd and Idriss (2001) [19]의 모델을 활용하였다.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60,cs}+45]^2} - \frac{1}{200},\ (N_1)_{60,cs} < 30 \tag{2}$$

여기서, $(N_1)_{60,cs}$은 사질토의 세립분 함유량(FC)에 대하여 보정한 등가 순수 사질토의 N치로 식 (3)을 통해 계산한다.

$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \tag{3}$$

위의 식에서 α와 β는 다음의 관계식을 통해 구할 수 있다.

$$\alpha = 0 \quad \text{for } FC \le 5\% \tag{4a}$$

$$\alpha = \exp[1.76 - (\frac{190}{FC^2})] \quad \text{for } 5\% < FC < 35\% \tag{4b}$$

$$\alpha = 5.0 \quad \text{for } FC \ge 35\% \tag{4c}$$

$$\beta = 1.0 \quad \text{for } FC \le 5.0\% \tag{5a}$$

$$\beta = [0.99 + (\frac{FC^{1.5}}{1,000})] \quad \text{for } 5\% < FC < 35\% \tag{5b}$$

$$\beta = 1.2 \quad \text{for } FC \ge 35\% \tag{5c}$$

또한 응력 및 관입 에너지에 대한 표준관입저항치의 보정 값 $(N_1)_{60}$은 식 (6)을 통해 구한다.

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \tag{6}$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^{0.5} \tag{7}$$

여기서, N_m은 표준관입시험 결과, C_N은 유효 상재압에 대한 보정계수, C_E는 해머효율에 대한 보정계수, C_B는 굴착공 직경에 대한 보정계수, C_R은

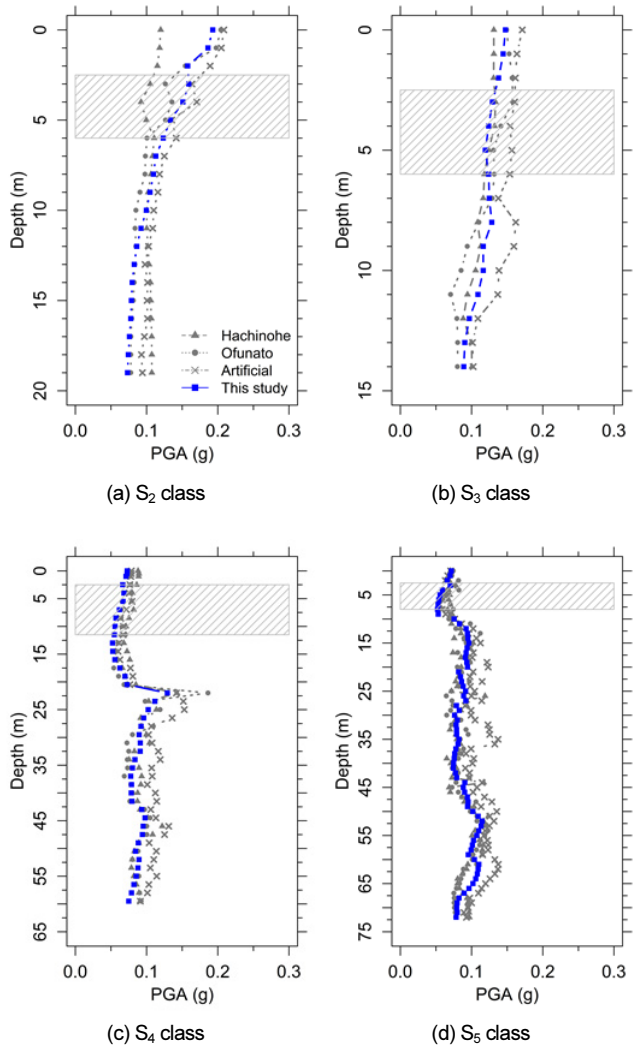


Fig. 9. Estimated PGA with depth for the four selected sites

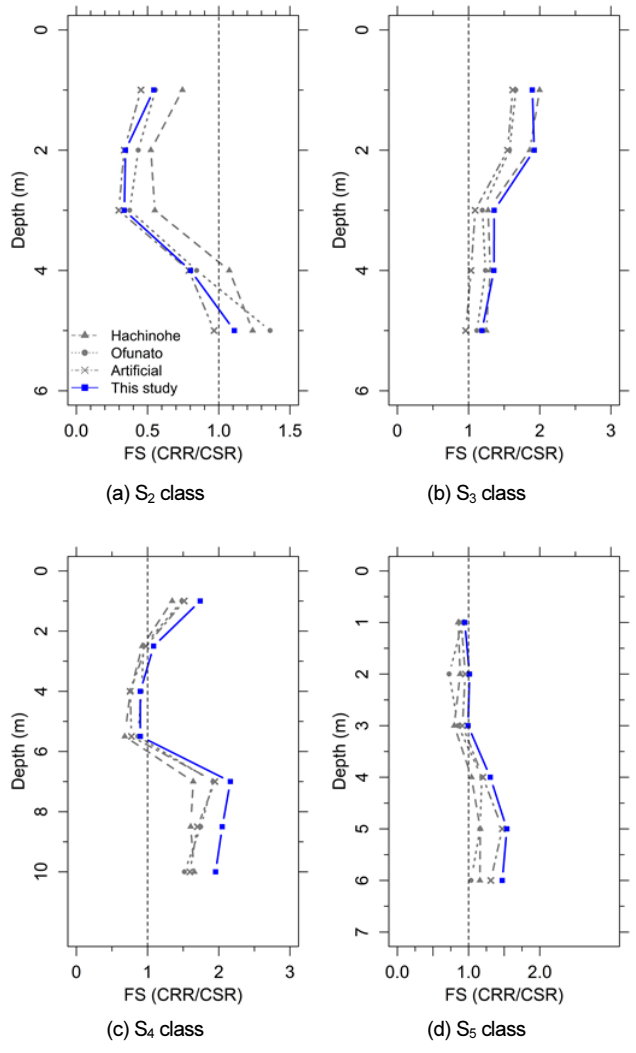


Fig. 10. Influence of input motions on the simplified liquefaction prediction results (Recurrence period: 500 years)

롯드길이에 대한 보정계수이며, C_S는 샘플러 종류에 따른 보정계수를 의미한다.

상기 액상화 평가법에 따라 액상화 평가를 수행하기 위해 각 시추공마다 지하수위 하부에 위치하고, N치가 20 이하인 모래지반 등 액상화에 취약하다고 판단되는 시추공을 선별하였다. 그 결과 S2, S3, S4, S5 지반 분류별로 1개씩의 시추공이 선정되었으며, Fig. 9는 4개 시추공에 대한 지반 심도별 최대지반가속도를 보여준다. 각 그림에서 빗금친 부분은 액상화 평가 대상층을 의미한다. 지반 심도별 PGA 산정 결과로부터 액상화 평가를 수행하기 위해 먼저 액상화 평가대상층의 진동전단응력비를 구하였고, 지반주상도로부터 얻은 SPT-N값을 이용하여 전단저항력을 계산하였다. 그 결과 액상화 평가대상층에 대한 깊이별 안전율을 산정하였고 이를 Fig. 10에 도시하였다. 각 그림은 위와 동일하게 지반 분류에 따라 나타냈으며, 액상화 판단 기준인 안전율 1에 대한 기준선을 표시하였다.

액상화 평가를 위한 안전율 산정 결과 S2 지반에서는 전체적으로 안전율이 1보다 작게 나왔고, 본 연구에서 선정한 7개 지진파에 대한 안전율이 가장 작게 나타났다. 약 4~5 m 지층 사이에서는 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파는 1보다 큰 안전율을 보였고, 인공지진파와 선정 지진파의 경우 상부 지층과 동일하게 액상화 가능성이 있는 것으로 산정되었다. 또한 S3, S4, S5 지반에서는 본 연구에서 산정한 지진파에 의한 안전율이 대체로 크게 나타났다. 다만 선정 지진파의 경우 S4 지반 심도 약 2~6 m와 S5 지반 심도 1~3 m 사이에서 기존 지진파와 다르게 액상화 평가 결과가 경계선상에 있는 것으로 나타났다. 기존의 지진파와 비교해 단주기와 장주기 성분이 고르게 분포되어 있는 선정 지진파가 지층별 고유주기에 따른 응답특성에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 실제 내진설계를 위한 액상화 평가에서 해당층에 대한 재검토 필요 여부를 파악할 수 있으며, 액상화 가능성에 대한 세심한 검토를 가능케 함으로써 평과 결과의 정확성을 높이는데 기여할 수 있다.

5. 결 론

기존의 동적해석에서는 과거 일본에서 계측된 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 및 설계응답스펙트럼에 부합하도록 생성된 인공지진파가 활용되어 왔다. 그러나 최근 국내 지진관측 이후 최대 규모의 지진이 연이어 발생하면서 국내 실정에 부합하는 지진파의 선정과 현재까지 몇차례 개정되어 온 내진설계 기준에 부합하는 해석 필요성이 높아지게 되었다.

따라서 본 연구에서는 기존 내진설계에 활용되고 있는 세 종류의 지진파와 달리 국내 설계응답스펙트럼에 부합하는 국내외 계측된 7개의 지진파를 새롭게 선정하고, 1차원 비선형 지반응답해석을 통해 입력 지진파 조건에 따른 지진파의 증폭 특성과 액상화 평가 결과를 살펴보았다. 다양한 지반운동 매개변수 중 대표적인 지진파 성분지표인 응답스펙트럼 비교를 통해 새롭게 선정된 7개의 지진파가 기존의 지진파들과 비교해 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼의 주기별 성분에 잘 부합하는 것을 확인하였다. 특히 새롭게 선정된 지진파의 경우 기존의 Hachinohe 지진파 및 Ofunato 지진파와 비교해 단주기와 장주기 성분이 고르게 분포되어 있음을 확인하였다.

지반응답해석 결과에서는 동일한 지반조건이라 하더라도 지진파의 입력 조건에 따라 응답스펙트럼의 지표면 증폭 특성에 차이가 나타났다. 특히 본 연구에서 선정한 지진파와 비교해 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파의 경우 지표면 지진파의 증폭 정도가 특정 부근에 집중되거나 인공지진파와 같이 지표면에서의 증폭 정도가 전반적으로 과대하게 나타나기도 했다. 또한, S4 지반과 S5 지반에서는 새롭게 선정된 지진파의 PGA 및 지표면 응답이 입력값 지진파와 비교해 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 두꺼운 점토층이 포함된 해당 지반의 고유주기가 증가하여 발생한 것으로 판단되었다. 반면 선정된 지진파와 비교해 비교적 장주기 성분이 우세한 Hachinohe 지진파 및 Ofunato 지진파의 경우 뚜렷한 감소 경향은 보이지 않았는데, 이러한 결과를 통해 검토 대상 부지의 고유주기 및 입력 지진파의 특성이 지반응답해석결과에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

또한 입력 지진파 조건이 내진설계에 있어서 중요한 설계요소인 액상화 평가 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 S2, S3, S4, S5 지반별로 액상화 평가 대상층을 선정하였다. 각 시추공에 대한 지반응답해석결과로부터 지반 심도별 PGA와 현장시험으로부터 구한 N값을 이용하여 액상화 안전율을 산정하였다. 각 지반조건에서 액상화 평가 결과는 일치하는 경향을 나타냈지만, S4 지반과 S5 지반 층에서는 새롭게 선정된 지진파에 대한 액상화 안전율이 다른 지진파들과 다르게 1에 가깝게 나타났음에 따라 내진설계 및 액상화 평가시 입력 지진파 조건이 평가 결과에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(19SCIP-B146946-02) 및 한국건설기술연구원 주요사업 “Tech-lead형 액상화 피해 예측 가시화 시스템 및 고효율· 저비용 액상화 보강 공법 개발” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Ministry of Construction & Transportation. Seismic Design Criteria Study(II). Earthquake Engineering Society of Korea. c1997.
2. Ministry of Oceans and Fisheries. Seismic Design Standard of Port and Harbor. c1999.
3. Ministry of the Interior and Safety (MIS). Seismic Design Code. c2017.
4. Sun CG, Han JT, Choi JI, Kim KS, Kim MM. Investigation into the Input Earthquake Motions and Properties for Round Robin Test on Ground Response Analysis. In Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference. Korean Geotechnical Society. 2007;266-292.
5. Seed HB, Idriss IM. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. J. of Soil Mechanics and Foundations Divisions. 1971;97(9):1249-1273.
6. CEN. Eurocode 8. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. c2003.
7. CEN. Eurocode 8. Design of Structures for Earthquake Resistance. Part II: Bridges, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. c2003.
8. Structural Design Actions Part 5: Earthquake Actions - New Zealand. Standards New Zealand. c2004.
9. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n. 3274. Norme Techniche per il Progetto. c2003.
10. Lee JS. Seismic Behavior of Inverted T-type Wall under Earthquake-Part II: Effect of Input Earthquake Motion. J. of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016;20(1):9-19.
11. Kim JH, Kim JK. Modeling of Near Fault Ground Motion due to Moderate Magnitude Earthquakes in Stable Continental Regions. J. of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2006;10(3):101-111.
12. Atik L, Abrahamson N. An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. Earthquake Spectra. 2010;26:601-617.
13. Sun CG, Kim HJ, Chung CK. Deduction of Correlations between Shear Wave Velocity and Geotechnical In-situ Penetration Test Data. J. of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2008;12(4):1-10.
14. Sun CG, Han JT, Cho WJ. Representative Shear Wave Velocity of Geotechnical Layers by Synthesizing In-situ Seismic Test Data in Korea. J. of Engineerng Geology. 2012;22(3):293-307.
15. Korea Land and Housing Corporation (KLHC). Measurement and Application of Shear Wave Velocity for Resonable Soil Classification in Seismic Design. c2009.
16. Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Okan I, Groholski DR, Phillips CA, Park D. DEEPSOIL 7.0. User Manual. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana. IL. c2017.
17. Darendeli MB. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Ph.D. thesis. University of Texas at Austin. 2001;131-153 (chapter 6).
18. Suetomi I, Ishida E, Isoyama R, Goto Y. Amplification Factor of Peak Ground Motion Using Average Shear Wave Velocity of Shallow Soil Deposits. In 13th World Conference on Earthquake Engineering. Canada. c2004.
19. Youd TL, Idriss IM. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001;127(4):297-313.