



지반변동성을 고려한 액상화 진동전단응력비의 확률론적 해석

Probabilistic Analysis of Liquefaction Cyclic Stress Ratio Considering Soil Variability

허준^{*,†}
 Heo, Joon

Abstract

The objective of this study is to evaluate the liquefaction cyclic shear stress ratio considering the soil uncertainty. In this study, the probabilistic ground response analysis and the cyclic shear stress ratio analysis for the liquefaction potential evaluation are performed considering the soil variability. The statistical properties of input ground parameters were analyzed to investigate the parameters affecting the seismic response analysis. The Probabilistic analysis was carried out by Monte Carlo Simulation method. The ground response analysis was performed considering the soil variability and the probability distribution characteristics of the ground acceleration. The probability distribution of the peak ground acceleration by seismic characteristics was presented. The differences of liquefaction shear stress ratio results according to soil variability were compared and analyzed. The maximum acceleration of the ground by the deterministic method was analyzed to be overestimation of the ground amplification phenomenon. Also, the shear stress ratio was overestimated.

Keywords: Cyclic stress ratio; ground response analysis; monte carlo simulation; probabilistic analysis

1. 서론

2017년 11월 15일 발생한 리히터 규모 5.4의 포항지진에 의해 지반 액상화 현상에 대한 관심이 높아지고 있다. 지반의 액상화 현상은 포화된 느슨한 사질토, 매립지반에 지진과 같은 진동하중이 가해지면 순간적으로 배수가 허용되지 않아 지반에서 발생하는 과잉간극수압에 의해 유효응력이 0이 되고, 전단저항력이 저하되어 지반침하 및 횡방향 변위가 생기는 현상을 말한다.

액상화 가능성은 Seed and Idriss (1971)가 표준관입시험 결과로 평가하는 간편법을 제안하였고, 국내에서는 Kim et al. (2000)이 Seed and Idriss의 방법을 수정 보완하여 국내 여건을 고려한 액상화 간편예측과 상세예측 평가 방안을 제안하였다.

최근에는 지반 물성치의 불확실성을 고려하기 위하여 확률론적 액상화 가능성 평가 방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Loh et al., 1995; Juang et al., 1999; Hwang et al., 2004). Juang et al. (2001)은 인공신경망을 이용한 진동저항

응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)와 진동전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)의 산정 방법을 제안하였다. Juang et al. (2006)은 결정론적인 방법으로 산정된 안전율을 기반으로 확률론적인 액상화 가능성 평가 방법을 제시하였다. 국내에서는 지반변동성을 고려한 액상화에 대한 확률적 평가기법에 관한 연구는 미비한 실정이다. Yi et al. (2006)는 지반 물성치, 하중에 대한 불확실성을 고려하여 하중이 저항을 초과하는 파괴의 경우를 확률론적으로 산정하였으며, 파괴확률 및 신뢰지수를 산출하여, 사용기간에 대한 액상화 가능성을 평가하여 제시하였다. 액상화 진동전단응력비의 상관관계에 관한 연구에서는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 응력감소계수(Stress Reduction Coefficient) 및 지층의 단위중량에 대한 민감도 분석 연구를 수행하여 제시하였다(Heo, 2010).

본 연구에서는 액상화 가능성 평가에서 지반변동성이 고려된 확률론적 지반응답해석(Ground Response Analysis)과 진동전단응력비의 분석을 수행하였다. 진동전단응력비 평가시 기존의 확률론적 방법에서 고려하지 못하는 최대지반가속도를 확률변수로 채택하여 지진시 액상화를 발생시키는 하중을 산정하고자 한다. 확률론적 해석은 Monte Carlo Simulation 기법을 통하여 수행하였으며, 지반변동성의 고려 유무에 따른 액상화 진동전단응력비 결과의 차이를 비교 및 분석하였다.

* Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation
 † Corresponding author
 Tel.: +82-31-400-1792 Fax: +82-31-400-1794
 E-mail: jheo01@ekr.or.kr

Received: January 17, 2018
 Revised: January 22, 2018
 Accepted: January 22, 2018

II. 연구방법

1. 액상화 진동전단응력비의 평가

흙의 액상화 평가를 위해서는 지진력을 표현하는 진동전단응력비(CSR)와 지진시 액상화에 저항하는 저항력을 표현하는 진동저항응력비(CRR)의 산정이 필요하다. 액상화 평가시 안전율은 진동전단응력비에 대한 진동저항응력비의 값(FS=CRR/CSR)으로부터 산정된다.

Seed and Idriss (1971)는 진동전단응력비를 구하기 위해 다음 식을 제안하였다.

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (1)$$

여기서 a_{max} 는 지진에 의해 발생된 최대지반가속도, g 는 중력가속도, σ_{vo} 는 연직 전응력, σ'_{vo} 은 연직 유효응력, r_d 는 응력감소계수이다. 액상화 진동전단응력비 상관관계 분석결과와 심도별 최대지반가속도(PGA), 응력감소계수(r_d), 지층의 단위중량 순으로 민감도 우선순위가 제시된 바 있다(Heo, 2010). 민감도 지수가 가장 높은 최대지반가속도가 진동전단응력비를 결정하는 매우 주요한 설계인자임을 알 수 있다.

2. 확률론적 진동전단응력비의 평가

기존의 지반응답해석은 지반 불확실성에 의한 변동성을

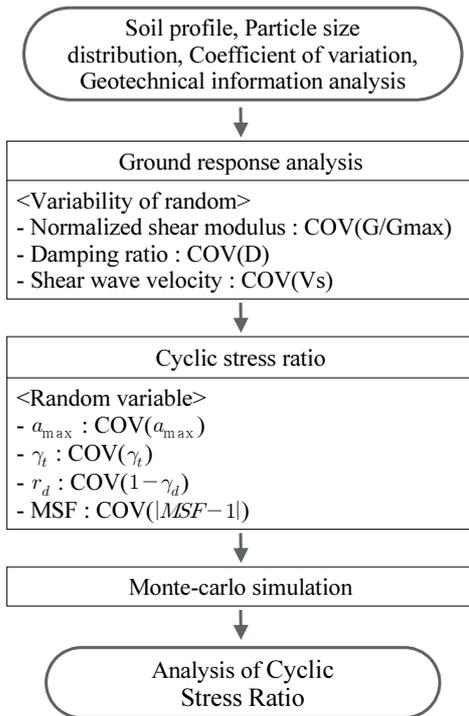
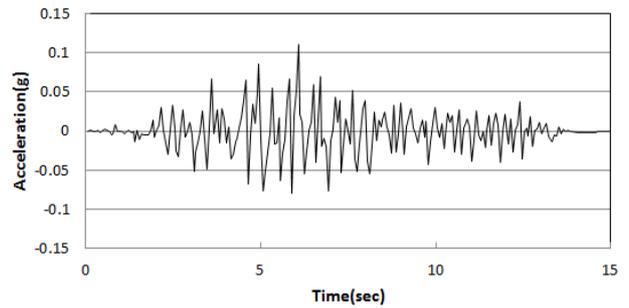


Fig. 1 Flow chart for probabilistic cyclic stress ratio analysis

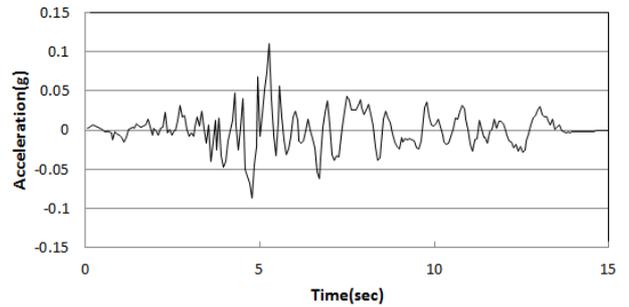
고려하지 않고 최대지반가속도를 평가하고 있다. 또한, 확률론적 반복전단응력비 평가에서도 최대지반가속도 값이 확률변수가 아닌 일반 상수로 취급되어진다. 최대지반가속도의 변동성이 반복전단응력비의 평가에서 고려되지 않고 있다.

본 연구에서는 1차원 지반응답해석에 사용되는 지반물성치에 변동계수(Coefficient Of Variation, COV)를 고려하였다. Monte Carlo Simulation을 통한 1,000개의 난수를 발생시켜 최대지반가속도 및 심도별 가속도를 하나의 대표값이 아닌 분포형태의 확률변수로 산정하였다. 이와 같이 산정된 최대지반가속도, 단위중량 등의 분포특성을 고려하여 진동전단응력비를 평가하였다(Fig. 1).

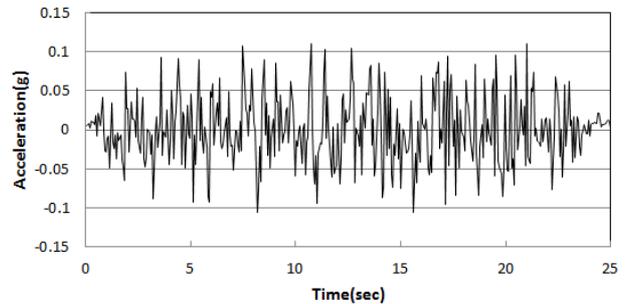
지반가속도의 확률분포는 설계변수의 불확실성을 극복하기 위하여 전단변형률과 G/Gmax 곡선, 전단변형률과 감쇠비



(a) Ofunato earthquake (0.11 g)



(b) Hachinohe earthquake (0.11 g)



(c) Artificial earthquake (0.11 g)

Fig. 2 Examples acceleration time history

의 관계는 국내의 시험 자료를 분석하여 흙의 종류에 따른 각각의 상한선, 하한선 및 평균값을 분석하였다 (Seed et al., 1984; Kim et al., 2001; Lee et al., 2009). 사질토의 경우 SPT-N값에 따라 G/Gmax 곡선과 감쇠비 곡선의 경계값을 설정하였고, 점성토의 경우 소성지수에 따른 경계값을 결정하였다. 결정된 상부·하부 경계값을 기준으로 지반 종류별 전단 변형률에 따른 변동계수를 산정하였다. 지반응답해석시 전단 변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선의 변동계수를 결정하여 각각의 변형률 의존곡선이 경계값 안에서 랜덤하게 생성되어 반복 계산을 수행하였다.

입력지진파는 현재 국내에서 지반구조물 내진해석에 많이 사용되고 있는 단주기 특성이 대표되는 Ofunato 지진파와 장주기 특성이 대표되는 Hachinohe 지진파를 사용하였다. 인공지진파는 표준설계응답스펙트럼에 만족하는 인공합성 지진파를 생성하여 해석에 적용하였다 (Fig. 2). 입력지진파는 내진설계기준 (건설교통부 내진설계기준연구 (II) (1997), 댐설계기준 (2005))의 위험도계수 (재현주기) 및 구역계수 (I 구역)가 고려된 설계지반 가속도로 Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파를 보정하여 지반응답해석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 해석 지반정수

새만금 지역의 지반조사 자료를 바탕으로 부지에 대한 설계지진에 대한 지반응답해석을 수행하였다. 지하수는 지표면에 존재하여 지반이 포화 상태라고 가정하였다. 각 층에 대한 깊이, 토층두께, 단위중량 등의 지반물성치는 Table 1에 정리하였다. 해석지반의 상부는 실트층의 두께가 13.0 m, 하부는 실트질 점토층의 두께가 11.0 m로 구성되어 있다. 퇴적층의 하부에는 풍화토, 풍화암이 분포하고 있다. Fig. 3은 심도에 따른 지층분류 결과, 표준관입시험 결과, 단위중량의 지층 구성을 도시하였다.

2. 지반정수의 변동성 분석

액상화 진동전단응력비의 확률론적 분석을 위하여 전단파 속도, 단위중량 등의 지반물성치의 변동성을 분석하였다. 설계지진에 대한 1차원 지반응답해석 과정에서 G/Gmax, 감쇠비, 전단파속도, 단위중량 등의 변동성을 고려한 지반응답해석을 각 1,000회 실시하여 확률밀도함수를 결정하였다.

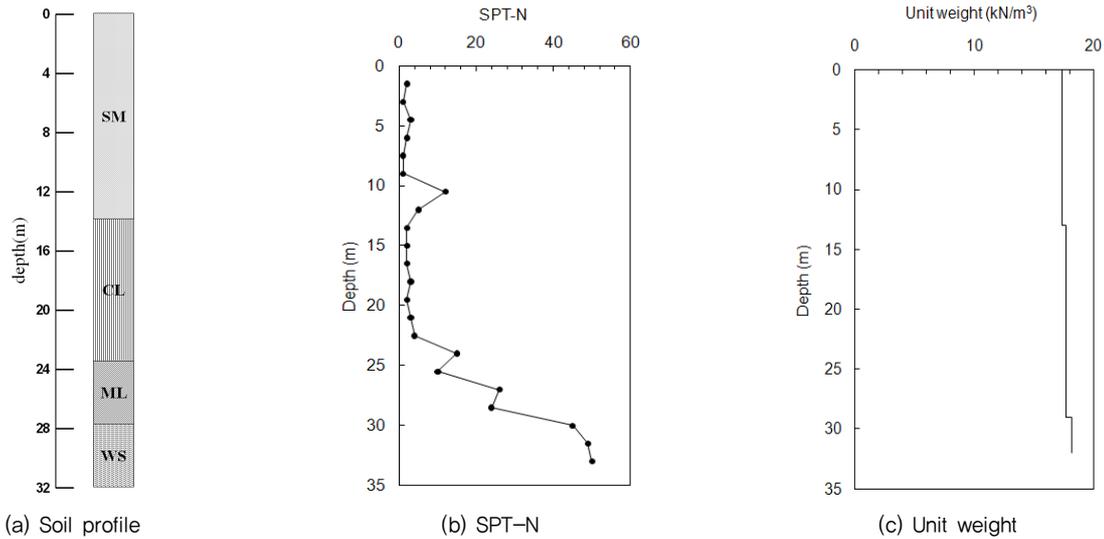


Fig. 3 Flow chart the proposed reliability method for liquefaction analysis

Table 1 Summary of physical properties

Soil type	Elevation (m)	Thickness (m)	Sample Position (m)	γ_t (kN/m ³)	FC (%)	Gs	w (%)	LL (%)	PI (%)
Silty Sand	0 ~ -13.0	13	-3.8	17.4	15.8	2.65	26.2	N,P	N,P
Clay & Silt	-13.0 ~ -24.0	11	-14.4	17.7	88.7	2.66	31.1	27.2	24.1
Clay & Silt	-24.0 ~ -29.0	5	-	17.7	96.4	2.67	39.0	32.0	27.0
Weathered soil	-29.0 ~ -33.0	4	-	18.2	-	-	-	-	-
Weathered rock	-33.0 ~	-	-	19.7	-	-	-	-	-

흙의 전단파 속도는 동적 지반구조물의 내진설계에서 중요하게 다루어야 하는 기본 토질상수이다. 전단파 속도는 표준관입시험 결과를 이용한 상관식을 적용하여 구하고 통계적 특성치를 결정하였다. 전단파 속도와 표준관입시험의 경험식은 Imai and Yoshimura (1970), Yamazaki and Umehara (1987) 및 Okamoto (1989)가 제안한 식을 사용하였다. Fig. 4는 표준관입시험 결과를 이용한 전단파 속도를 나타낸 것이다. 전단파 속도를 산정하고 3- σ 법칙을 이용하여 변동계수를 산정하였다. 경험적 상관 관계식으로 구한 전단파 속도의 변동계수는 7%로 나타났다. Imai & Yoshimura (1970), Yamazaki

and Umehara (1987) 및 Okamoto (1989)가 제안한 표준관입 시험 결과와 전단파 속도의 경험식은 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$V_s = 76N^{0.33} \tag{2}$$

$$V_s = 89.1N^{0.34} \tag{3}$$

$$V_s = 125N^{0.3} \tag{4}$$

Fig. 5는 지반응답해석에 적용된 단위중량의 확률분포 형태이다. 단위중량의 표준편차는 0.81이며 변동계수는 4.0%

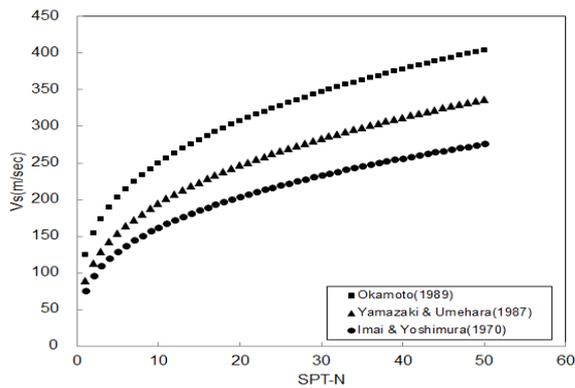


Fig. 4 Relationships between SPT-N and shear wave velocity

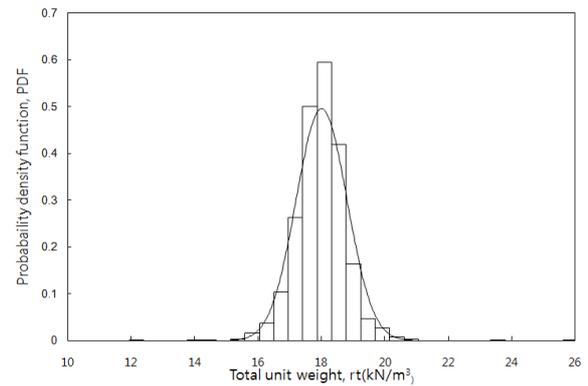


Fig. 5 Probability density function of unit weight

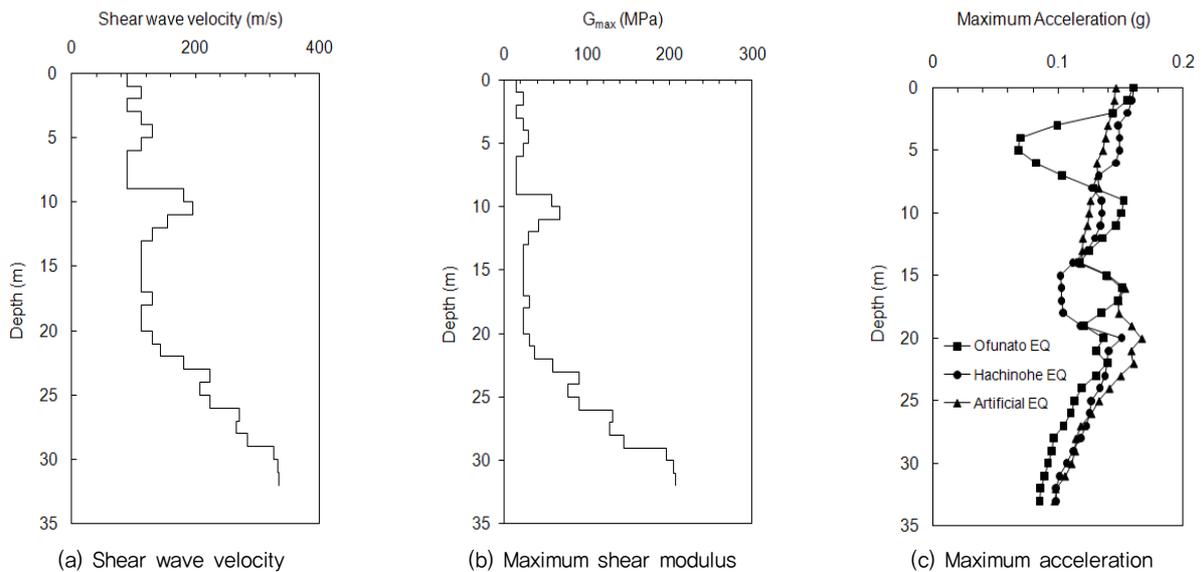


Fig. 6 Ground response analysis by deterministic approach

Table 2 Coefficient of variation (COV) of unit weight

Test	Range	P25	P75	Median	Mean	SD	COV	pdf
Unit weight (kN/m ³)	11.97~26.08	17.60	18.46	18.03	18.01	0.81	0.04	Normal

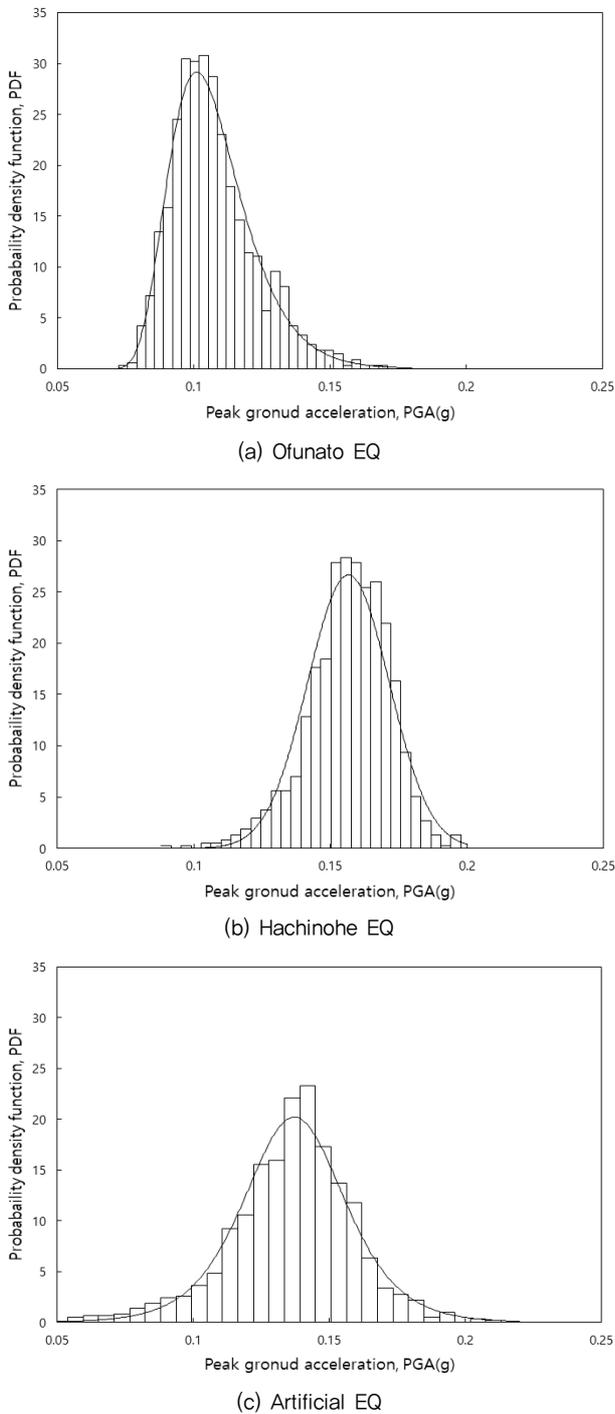


Fig. 7 Calculated probability density function of seismic wave

Table 3 Statistics and best fitting pdf of peak ground acceleration

Seismic	Deterministic	Range	P25	P75	Median	Mean	SD	COV	No. of test	pdf
Ofunato	0.160	0.073~0.171	0.097	0.115	0.105	0.107	0.015	0.142	1000	LN
Hachinohe	0.161	0.088~0.198	0.148	0.167	0.158	0.157	0.015	0.095	1000	N
Artificial	0.146	0.042~0.213	0.123	0.150	0.138	0.136	0.022	0.167	1000	N

로 통계적 특성치는 Table 2와 같이 적용하였다 (Heo, 2010).

결정론적 지반응답해석 방법에 의한 최대지반가속도는 Ofunato 지진파는 0.160 g, Hachinohe 지진파는 0.161 g, 인공지진파는 0.146 g로 나타났다. 지반 깊이에 따른 전단파속도, 전단탄성계수 및 지반가속도는 Fig. 6과 같다.

지반변동성을 고려한 지반응답해석에서 Ofunato 지진파에 의한 최대지반가속도의 분포범위는 0.073 g~0.171 g, 변동계수는 0.142가 나타났다. Hachinohe 지진파의 최대지반가속도의 분포범위는 0.088 g~0.198 g, 변동계수는 0.095가 나타났다. 인공지진파의 최대지반가속도의 분포범위는 0.042 g~0.213 g, 변동계수는 0.167이 나타났다 (Fig. 7). 결정론적 방법으로 평가한 최대지반가속도를 확률론적 방법과 비교할 때, 2.5%~49.5%의 지반 증폭현상을 과대평가하는 것으로 나타났다. Table 3에 지진파별 통계적 특성치를 정리하였다.

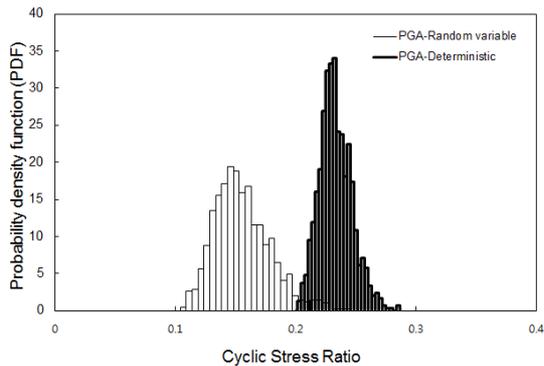
3. 지반 변동성을 고려한 진동전단응력비의 확률분포

결정론적 방법에 의한 진동전단응력비는 Ofunato 지진파는 0.231, Hachinohe 지진파는 0.237, 인공지진파는 0.216으로 나타났다. 최대지반가속도를 확률변수로 이용하여 진동전단응력비를 평가하면 Ofunato 지진파의 분포 범위는 0.102~0.264, 변동계수는 0.149, Hachinohe 지진파의 분포범위는 0.156~0.317, 변동계수는 0.112, 인공지진파의 분포범위는 0.113~0.335, 변동계수는 0.168가 산정되었다. 결정론적 방법으로 평가한 진동전단응력비를 확률론적 방법과 비교할 때, 2.2%~50.0%만큼 과대평가하는 것으로 나타났다. 지반변동성을 고려하지 않고 지반응답해석을 수행하여 최대지반가속도를 산출하고, 진동전단응력비를 평가하면 과대평가되는 것으로 나타났다.

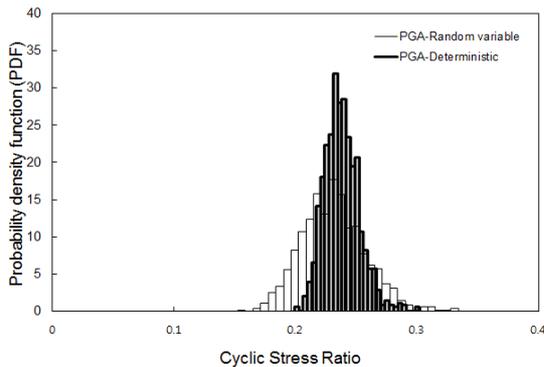
최대지반가속도의 변동성의 영향을 분석하기 위해 확률론적 진동전단응력비 평가시 최대지반가속도를 하나의 상수로 취급한 평가 방법과 최대지반가속도를 확률변수로 취급한 평가 방법을 비교하였다. 최대지반가속도를 일반 상수로 취급하여 확률론적 진동전단응력비를 평가하면 Ofunato 지진파의 분포 범위는 0.198~0.284, 변동계수는 0.060, Hachinohe 지진파의 분포범위는 0.205~0.297, 변동계수는 0.058, 인공지진파의 분포범위는 0.183~0.278, 변동계수는 0.059가 산정되었다.

Table 4 Calculated cyclic stress ratio (depth level(-)1.0 m)

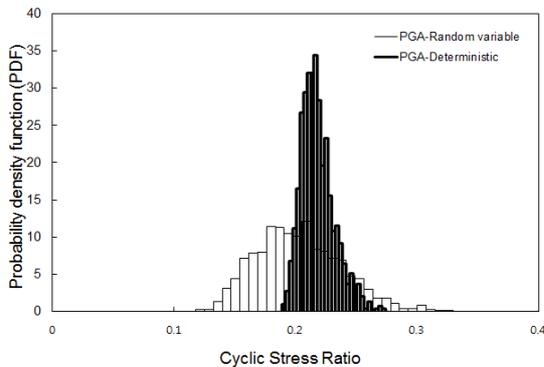
Seismic	Deterministic	Max. Acc	Range	P25	P75	Median	Mean	SD	COV
Ofunato	0.231	Random variable	0.102~0.264	0.139	0.168	0.152	0.154	0.023	0.149
		Deterministic	0.198~0.284	0.223	0.240	0.231	0.232	0.014	0.060
Hachinohe	0.237	Random variable	0.156~0.317	0.213	0.248	0.231	0.232	0.026	0.112
		Deterministic	0.205~0.297	0.229	0.247	0.237	0.239	0.014	0.058
Artificial	0.216	Random variable	0.113~0.335	0.177	0.263	0.199	0.202	0.034	0.168
		Deterministic	0.183~0.278	0.208	0.224	0.214	0.217	0.013	0.059



(a) Ofunato EQ (Depth Level(-)1.0 m)



(b) Hachinohe EQ (Depth Level(-)1.0 m)



(c) Artificial EQ (Depth Level(-)1.0 m)

Fig. 8 Comparison of cyclic stress ratio between acceleration-random variable and acceleration-deterministic

액상화 확률론적 해석과정에서 최대지반가속도를 확률변수로 적용하지 않고 상수로 적용하면 지진에 의한 하중의 분포범위를 작게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 액상화 확률론적 해석 과정에서 파괴확률을 과소평가 할 수 있음을 의미한다. 지반변동성을 고려한 진동전단응력비는 액상화 파괴확률을 산정하는 과정에서 지진에 의한 하중 분포범위를 크게 평가하여 액상화 발생 가능성을 보다 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 입력지진파에 따른 진동전단응력비의 확률분포 형태는 Fig. 8과 같으며, Table 4에 입력지진파별 통계적 특성치를 정리하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 확률론적 액상화 가능성 평가에서 진동전단응력비 (CSR)를 결정하는 주요 매개변수인 최대지반가속도 평가의 단점을 극복하기 위한 대안으로 확률론적 지반응답해석을 수행하고 이를 바탕으로 진동전단응력비 평가를 실시하였다.

지진응답해석에 영향을 미치는 매개변수를 알아보기 위해 입력 지반정수에 통계적 특성치를 분석하였다. 전단파속도 및 단위중량의 확률밀도함수를 제시하였다. 지반변동성을 고려한 지반응답해석을 수행하여 단주기, 장주기 및 인공지진파의 최대지반가속도의 확률분포 특성치를 제안하였다. 결정론적인 방법으로 평가한 최대지반가속도를 확률론적 방법과 비교할 때, 2.5%~49.5% 정도의 지반 증폭현상을 과대평가하는 것으로 나타났다.

결정론적 방법으로 평가한 진동전단응력비를 확률론적 방법과 비교할 때, 2.2%~50.0%만큼 과대평가하는 것으로 나타났다. 지반변동성을 고려하지 않고 지반응답해석을 수행하여 최대지반가속도를 산출하고, 진동전단응력비를 평가하면 과대평가되는 것으로 나타났다.

확률론적 액상화 평가과정에서 최대지반가속도를 확률변수로 적용하지 않고 상수로 적용하면 지진에 의한 하중의 분

포범위를 작게 평가하는 것으로 나타났다. 액상화 파괴확률을 과소평가 할 수 있으며, 지반변동성을 고려한 진동전단응력비는 지진에 의한 하중 분포범위를 크게 평가하여 액상화 발생 가능성을 보다 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Heo, J., 2010. Variability of Cyclic Stress Ratio in Liquefaction Reliability Analysis, Doctoral Dissertation, Seoul National University (in Korean).
2. Hwang, J. H., C. W. Yang, and D. S. Juang, 2004. A Practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24: 761-770. doi: 10.1016/j.soildyn.2004.06.008.
3. Imai, T., and Yoshimura, Y., 1970. Elastic wave velocity and soil properties in soft soil, *Tsuchi-to-Kiso*, 18(1): 17-22.
4. Juang, C. H., D. V. Rosowsky, and W. H. Tang, 1999. Reliability-Based Method for Assessing Liquefaction Potential of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(8): 684-689. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:8(684).
5. Juang, C. H., C. J. Chen, and T. Jiang, 2001. Probabilistic Framework for Liquefaction Potential by Shear Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(8): 670-678. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:8(670).
6. Juang, C. H., S. Y. Fang, and E. H. Khor, 2006. First-Order Reliability Method for Probabilistic Liquefaction Triggering Analysis Using CPT, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3): 337-350. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(337).
7. Kim, D. S., and Y. W. Choo, 2001. Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 17(5): 115-128 (in Korean).
8. Kim, N. Y., I. J. Kang, H. Choi, and T. H. Kim, 2014. Evaluation on the Seismic Performance of Port Structures using GIS, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, 22(4): 31-38. doi:10.7319/kogsis.2014.22.4.031 (in Korea).
9. Kim, S. I., I. J. Park, and J. S. Choi, 2000. A Study on the Assessment of Liquefaction potential in Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 20(2C): 129-139 (in Korean).
10. Lee, S. H., D. S. Kim, Y. W. Choo, and H. K. Kwon, 2009. Estimation of Dynamic Material Properties for Fill Dam : II. Nonlinear Deformation Characteristics. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(12): 87-105 (in Korean).
11. Loh, C. H., C. R. Cheng, and Y. K. Wen, 1995. Probabilistic evaluation of liquefaction potential under earthquake loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14: 269-278. doi: 10.1016/0267-7261(94)00052-I.
12. Okamoto, S., T. Kokusho, Y. Yoshida, and K. Kusunoki, 1989. Comparison of Surface Vs. Subsurface Wave Source for P-S Logging in Sand Layer, *Proc. 44th Annual Conf. JSCE*, 3: 996-997.
13. Seed, H. B., R. T. Wang, I. M. Idriss, and Tokimatsu., 1984. Moduli and Damping Factors for Dynamics Analysis of Cohesionless Soils, Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkely.
14. Seed, H. B., and I. M. Idriss, 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 97(9): 1249-1273.
15. Yamazaki, Zen, K., and H. Y. Umehara, 1987. Experimental study on shear modulus and damping ratio of natural deposits for seismic response analysis, Report of the Port and Harbour Research Institute.
16. Yi, J. H., O. S. Kwon, and W. S. Park, 2006. Evaluation of Liquefaction Potential for Soil Using Probabilistic Approaches, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(5C): 313-322 (in Korean).