

# 포항지진 액상화 현상 분석을 통한 국내 액상화 평가 기준의 개정 타당성 검토

## Feasibility Study for Revision of Domestic Liquefaction Evaluation Criteria by Analyzing the Liquefaction Phenomenon Caused by the Pohang Earthquake

하 익 수<sup>1</sup> Ha, Ik-Soo

오 이 태<sup>2</sup> Oh, I-Tae

### Abstract

In this study, liquefaction evaluation was performed by applying liquefaction evaluation criteria commonly applied in Korea and recently revised evaluation criteria to five sites where liquefaction was observed or potential for liquefaction was high during the 2017 Pohang earthquake. The purpose of this study is to examine the validity of the revised domestic liquefaction evaluation criteria by comparing and reviewing the results of the theoretical liquefaction evaluation with the actual liquefaction occurrence at the sites. For the analysis of earthquakes for the evaluation of the liquefaction, the actual Pohang earthquake wave, as well as the waves that was conventionally used in Korea, was used. The magnitude of the peak ground acceleration of analysis earthquake varied from 0.097 g to 0.2713 g. From the analysis results, the validity of the liquefaction evaluation criteria presented in the 2016 Foundation Design Criteria, which has been commonly applied in Korea, was evaluated. From the evaluation results, the improvement of the existing criteria was suggested, and the suitability of revised items of liquefaction evaluation criteria presented in the Seismic Design General established in 2018 was confirmed.

### 요 지

본 연구의 목적은 2017년 포항지진 시 액상화가 관측되었거나 액상화 가능성이 높은 부지 5곳에 대하여, 국내에서 통상적으로 적용해 왔던 액상화 평가 기준과 최근 개정된 평가 기준을 적용하여 액상화 평가를 실시하고, 이러한 이론적인 액상화 평가 결과와 대상 부지에서의 실제 액상화 발현여부를 비교·검토함으로써, 개정된 액상화 평가 기준의 타당성을 검토하는 데에 있다. 액상화 평가를 위한 해석지진은 기존 국내에서 통상적으로 사용해 온 지진파와 포항 실지진파를 사용하였고, 해석지진의 최대지반가속도 크기는 0.097g~0.2713g 범위의 값을 적용하였다. 해석결과로부터, 기존 국내에서 통상적으로 적용해 왔던 구조물기초설계기준(2016)에 제시된 액상화 평가 기준의 개선점을 제시하고, 2018년에 개정된 내진설계일반에 제시된 액상화평가 기준의 기존 기준대비 개정 사항의 상대적 타당성을 평가해 보았다.

**Keywords** : Liquefaction, Liquefaction evaluation, Pohang earthquake, Liquefaction evaluation criteria, Earthquake

1 정회원, 경남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungnam Univ., Tel: +82-55-249-2669, Fax: +82-505-999-2165, [geotech@kyungnam.ac.kr](mailto:geotech@kyungnam.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 경남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungnam Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

한국지질자원연구원에서 2012년 발표한 한반도 활성 지반운동 지역으로 경북권역이 지진 발생확률이 높을 것으로 판단하였고(Choi and Hong, 2017), 실제로 2016년 경주지진과 2017년 포항지진이 발생하였다. 그리고 2018 지진연보(KMA, 2019)에 따르면 국내 내륙과 해역에 각각 64회와 51회의 지진이 발생하였는데, 그 중 대구·경북 지역에서 발생한 횡수는 35회로 가장 많았다.

2017년에 발생한 포항지진은 포항시 북구 흥해읍이 진앙으로 1978년 국내 지진관측 이래 규모가 두 번째로, 1,798명의 이재민과 135명의 부상자, 673억 원의 재산 피해를 발생시켰으며, 300km 이상 떨어진 서울에서도 흔들림이 느껴지는 지진이였다. 포항지진은 중요 구조물에 직접적인 큰 피해를 발생시키지는 않았으나, 예상치 못한 액상화 현상이 관측되어 1978년 계기지진관측 이래 발생한 국내 첫 액상화 현상이 발현된 지진으로 기록되었다.

액상화(liquefaction) 현상은 지반이 전단강도를 잃고 마치 물처럼 거동하는 현상으로, 포항지진 이전까지는 국외에서 발생한 사례를 통해 간접적으로만 경험할 수 있었다. 1964년에 일본의 Niigata 지진과 미국의 Good Friday 지진 시 액상화 현상이 발생하였고, 액상화로 인한 라이프라인 시설들의 막대한 손상이 발생되었는데, 이를 계기로 액상화에 대한 연구가 활발히 시작되게 되었다(Schnabel et al., 1972; Seed et al., 1976; Iwasaki, 1978).

최근 국내에서도 액상화 현상이 나타난 포항지진 이후에 액상화 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Park 등(2018)은 포항지진 시 액상화가 발생한 지역의 모래를 이용하여 정현파와 계측 지진파를 적용한 반복 직접단순전단시험을 실시하고, 모래의 상대밀도에 따른 액상화 거동을 평가하였다. Mun(2018)도 마찬가지로 반복직접단순전단시험기를 이용하여, 포항지진 시 액상화가 발생한 지역의 모래에 대하여 상대밀도와 입도분포가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 연구하였다. Ahn 등(2018)은 포항지진 시 액상화가 발생한 2곳의 부지에 대하여 수행한, 1차원 유효응력개념의 지반응답해석 결과를 실제 발현현상과 비교하여, 유효응력개념의 지반응답해석의 액상화 평가 적합성을 평가하였으며, 지반분류를 기준으로 산정한 액상화가능지수(LPI, Liquefaction

Potential Index)와 응답해석을 적용하여 산정한 LPI 결과를, 마찬가지로 실제 발현현상과 비교하여, LPI 산정에 있어 두 가지 방법의 적합성을 검토하였다. Choi 등(2018)은 한반도 동남권 지역의 전력구를 대상으로 LPI를 이용하여 액상화 위험지도를 작성하고, 이를 이용한 전력구의 액상화 위험도를 평가하였다.

국내 액상화 평가 기준은 ‘항만 및 어항시설의 내진설계표준서(MOF, 1999)’에 거의 최초로 기술된 이후, 시설물별 특성을 반영한 약간의 차이와 다소의 변경이 있었지만, 구조물기초설계기준(MOLIT, 2016)에 기술된 액상화 평가 기준(Fig. 1의 (a) 참조)과 같이 그 주요 내용은 현재까지 그대로 유지되어 왔다. 이러한 국내 액상화 평가 기준이 근 20여 년간 통용되어 왔음에도 불구하고, 평가 기준의 적합성 검토에 관한 연구는 거의 없었고, 상기에 제시된 국내 연구사례들에서 알 수 있는 바와 같이 포항지진 시 액상화 현상이 발현된 이후에도 이와 관련된 연구는 거의 진행되지 않았다. 최근 제정된 내진설계일반(MOLIT, 2018)에 기존 기준과 비교하여 주요 내용이 변경된 액상화 평가 기준(Fig. 1의 (b) 참조)이 제시되었는데, 변경 취지는 국내 적용성에 대한 평가결과라기 보다는 평가방법 상 상세평가를 위한 실내반복시험의 실효성의 문제와 국외 연구 결과에 기초한 것이며, 개정된 내용에 대한 국내 적용 타당성에 대한 검토는 아직 이루어지지 않았다.

2017년 포항지진 시 발현된 액상화 현상에 대한 검토는 이러한 통용되어 온 기존 액상화 평가 기준(구조물기초설계기준)의 타당성을 검토하고, 새로이 개정된 평가기준의 개정 사항에 대한 적합성을 확인할 수 있는 더없이 좋은 기회를 제공한다. 본 연구의 목적은 2017년 포항지진 시 액상화가 관측되었거나 액상화 가능성이 높은 부지 5곳에 대하여, 국내에서 통상적으로 적용해 왔던 액상화 평가 기준과 최근 개정된 평가 기준을 적용하여 액상화 평가를 실시하고, 이러한 이론적인 액상화 평가 결과와 대상 부지에서의 실제 액상화 발현여부를 비교·검토함으로써, 개정된 액상화 평가 기준의 타당성을 검토하는 데에 있다. 액상화 평가를 위한 해석지진은 기존 국내에서 통상적으로 사용해 온 지진파와 포항 실지진파를 사용하였고, 해석지진의 최대지반가속도 크기는 0.097g~0.2713g 범위의 값을 적용하였다. 해석결과로부터 기존 구조물기초설계기준(2016)에 제시된 액상화 평가 기준의 개선점을 제시하고, 2018년에 개정된 내진설계일반에 제시된 액상화평가 기준의 기

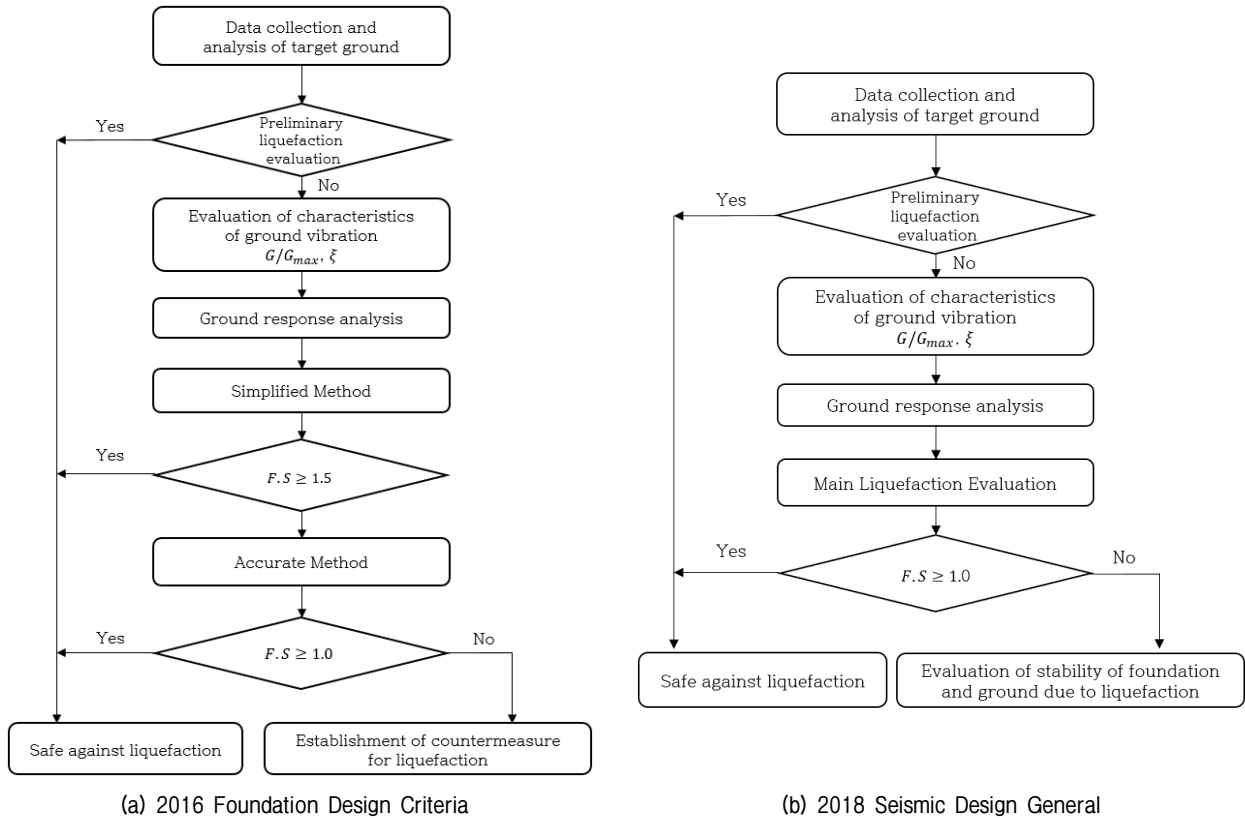


Fig. 1. Flowchart for Evaluation of Liquefaction Potential

존 기준대비 개정 사항의 상대적 타당성을 평가해 보고자 한다.

## 2. 국내 액상화 평가 방법 및 기준 개요

본 연구에서 액상화 평가는 구조물기초설계기준(MOLIT, 2016) 또는 이에 대한 해설서인 구조물기초설계기준해설(KGS, 2018), 내진설계일반(MOLIT, 2018)에 제시된 액상화 평가 방법과 기준을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 해당 기준서에 제시된 평가 방법 및 기준의 개요는 다음과 같다.

### 2.1 구조물기초설계기준(2016) 액상화 평가 방법 및 기준

국내에서 액상화 평가는 구조물기초설계기준에 제시된 방법과 기준이 가장 많이 적용되고 있으며, 이에 대한 해설서로서 구조물기초설계기준해설이 통용되고 있다. 해당 기준에서 액상화 평가는 예비평가, 간편평가, 상세평가의 단계적 평가로 제시되며, 내용은 각 평가단계별로 구분·기술된다(Fig. 1의 (a) 참조).

예비평가에서 액상화 평가가 필요할 것으로 판정된

지반은 액상화 평가 흐름도에 따라 간편평가를 실시한다. 간편평가는 Seed와 Idriss가 제안한 간편예측법(Seed and Idriss, 1971)을 수정·보완한, 수정 Seed와 Idriss 간편예측법이 적용된다. 해당 간편예측법은 지진 시 지반에 발생하는 지진력을 표현하는 진동전단응력비(CSR, Cyclic Stress Ratio)와 액상화에 대한 저항력을 나타내는 진동저항전단응력비(CRR, Cyclic Resistance Ratio)를 각각 산정한 후, 안전율, F.S(Factor of Safety)를 계산하고( $F.S=CRR/CSR$ ) 이를 기준안전율과 비교하여 액상화 안정성을 평가한다. 이 때, 액상화 발생 여부를 판단하는 기준안전율로 '1.5'가 제시되고 있다.

진동전단응력비(CSR)는 식 (1)과 같이 산정된다. 식 (1)에 나타난 각각의 매개변수는 지반 물성자료로서,  $\sigma_v$  과  $\sigma'_v$ 은 각각 지반 심도별 상재압과 유효상재압으로 지하수위를 고려하여 계산되며,  $a_{depth}$ 는 심도별 최대지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)로 이는 부지별 지반응답해석을 통하여 산정된다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{a_{depth}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (1)$$

진동저항전단응력비(CRR)의 산정은 일반적으로 현장시험 결과( $N_{60}$ ,  $q_c$ ,  $V_s$  값 등)가 이용된다. 국내에서는 표준관입시험(SPT, Standard Penetration Test) 결과인  $N_{60}$ 을 이용한 방법이 주로 사용되고 있다. 표준관입시험을 통해 얻은  $N_{60}$ 은 SPT 장비에너지 효율 보정, 유효상재압 보정(Liao and Whitam, 1986), 심도별 세립분함유량에 대한 보정(Youd and Idriss, 2001) 과정을 거쳐,  $(N_1)_{60}$ 이 산정하고 이 값을 식 (2)에 대입하여, CRR을 산정한다. 이렇게 산정된 값은 지진규모 7.5에 해당되는 값이므로, 규모 보정(Youd and Idriss, 2001) 과정을 거쳐, 최종적으로 지진규모 6.5에서의 CRR을 산정하게 된다.

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma'_v}\right) = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (2)$$

간편평가로 계산된 대상 지반의 안전율이 1.5 미만이면 상세평가를 실시한다. 상세평가는 간편평가와 비교하여 안전율 기반의 평가법이라는 점에서는 동일하나, CRR을 실내반복시험 결과로 획득한 액상화 전단저항 특성곡선(Fig. 2 참조)으로부터 산정하고, 기준안전율을 '1.0'을 적용한다는 점에서 차이가 있다. 본 연구에서는 국립재난안전연구원에서 수행한 반복삼축압축시험 결과(NDMI, 2017)로 산정된 CRR을 이용하여 액상화 상세평가를 실시하였다.

## 2.2 내진설계일반(2018) 액상화 평가 방법 및 기준

포항지진(2017)이 직접적 계기가 된 것은 아니나, 포

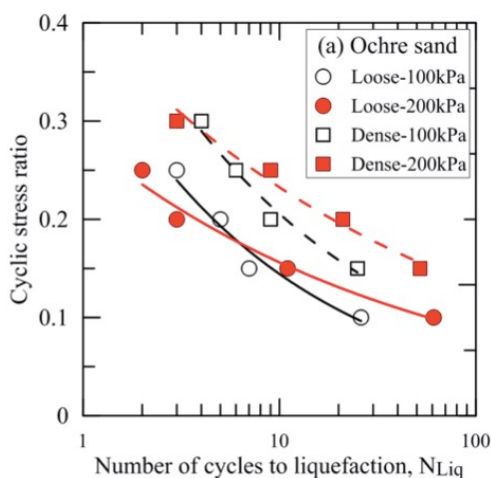


Fig. 2. Example of Liquefaction Resistance Curve (from Park et al. (2018))

항지진 발생 즈음에 국내에서는 국가 내진설계기준 공통적용사항을 담고 있는 내진설계일반(MOLIT, 2018) 코드가 제정되었고, 해당 코드에 기존 기준과 비교하여 주요 내용면에서 차이가 있는 액상화 평가기준이 개정·제시되었다. 내진설계일반 내 액상화 평가 관련 주요 개정 내용은 다음과 같다. 액상화 평가 절차에 있어서, 기존 구조물기초설계기준은 평가단계가 예비평가, 간편평가, 상세평가의 3 단계인 반면, 개정된 기준은 평가단계가 예비평가, 본평가의 2 단계로 축소되었다. 기존 간편평가가 본평가로 명칭이 변경되었고, 실내반복시험으로 CRR을 산정하는 기존의 상세평가는 평가 절차에서 제외되었다. 그리고 기존 기준의 간편평가가 개정 기준에서는 본평가로 명칭이 변경되었을 뿐, 내용은 거의 동일하나, 액상화 발생 여부를 판단하는 기준안전율이 기존 기준의 간편평가에서는 '1.5'이었던 것이, 개정된 내진설계일반 내 액상화 기준의 액상화 본평가에서는 '1.0'으로 변경되었다(Fig. 1의 (b) 참조).

## 3. 대상 부지에 대한 액상화 평가

### 3.1 평가 일반 사항 및 해석 조건

본 연구에서는 국립재난안전연구원에서 선행연구(NDMI, 2017)를 통하여, 액상화 발생 가능성이 높은 부지 5곳을 연구 대상 부지로 선정하였기 때문에 액상화 예비평가에 대한 내용 기술은 생략한다.

식 (1)에 제시된 CSR 산정을 위해 심도별 최대지반가속도,  $a_{depth}$ 의 산정이 선행되어야 하는데, 이는 각 부지별 1차원 지반응답해석 결과로부터 산정하였다. 1차원 지반응답해석은 1차원 등가선형 지반응답해석 프로그램인 SHAKE91(Idriss and Sun, 1993)을 이용하였다. 해석을 위한 입력지진파로 기존의 국내 액상화 평가에서 통상적으로 사용해 온, 장주기 특성이 탁월한 Hachinohe 파, 단주기 특성이 탁월한 Ofunato 파, 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파를 사용하였다. 아울러, 포항지진 시 관측된 실지진파를 추가로 사용하였는데(Fig. 3의 (d) 참조), 해당 지진파는 M 5.4 포항지진 시 진앙으로부터 9km 떨어진 위도 36.1929 °N, 경도 129.3708 °E에 위치한 PHA2(포항) 지진관측소에 기록된 N-S 방향 지진파로서, 지진파를 계측한 지진계는 신선한 기반암층에 설치되어 있다(Han et al., 2014). 참고로, Fig. 3에 제시된 지진파들의 가속도 시간이력의 최대가속도는

사용된 지진파를 예로 보여주는 것에 의미가 있으며, 해석 시 조정되기 때문에 그림에서 확인되는 최대값 자체는 큰 의미를 가지지 않는다.

지반응답해석에 필요한 부지 5곳의 지층 단면에 대한 지반물성은 국립재난안전연구원의 선행연구(NDMI, 2017)에서 제시하는 시추조사 자료를 활용하였다(Fig. 4 참조). 각 부지별 각 지층의 전단탄성계수는 SPS logging (서스펜스 PS 검층법)으로 획득한 심도별 전단파속도

프로파일로부터 산정하였다(Fig. 5 참조). 각 지층을 구성하는 흙의 변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 동적곡선의 경우, 사질토는 현장에서 시료를 채취하여 수행된 공진주시험 결과로 획득하였고, 직접시험이 수행되지 않은 점성토와 암반은 각각 Idriss가 제안한 곡선(Idriss, 1990)과 Schnabel과 Seed가 제안한 곡선(Schnabel and Seed, 1973)과 같은 경험적 제안 곡선을 적용하였다.

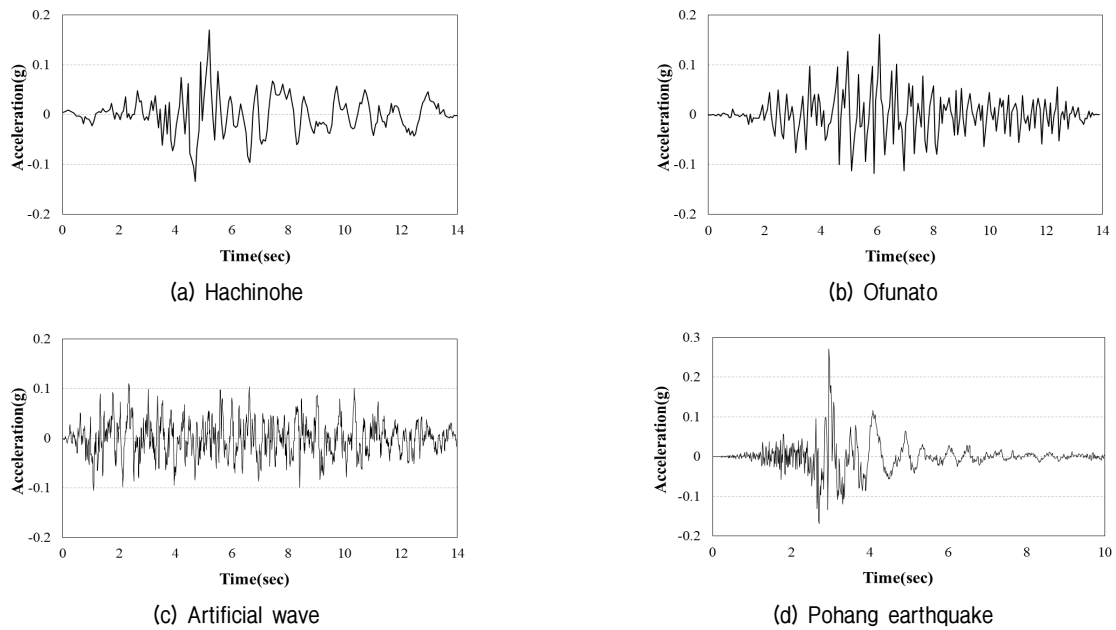
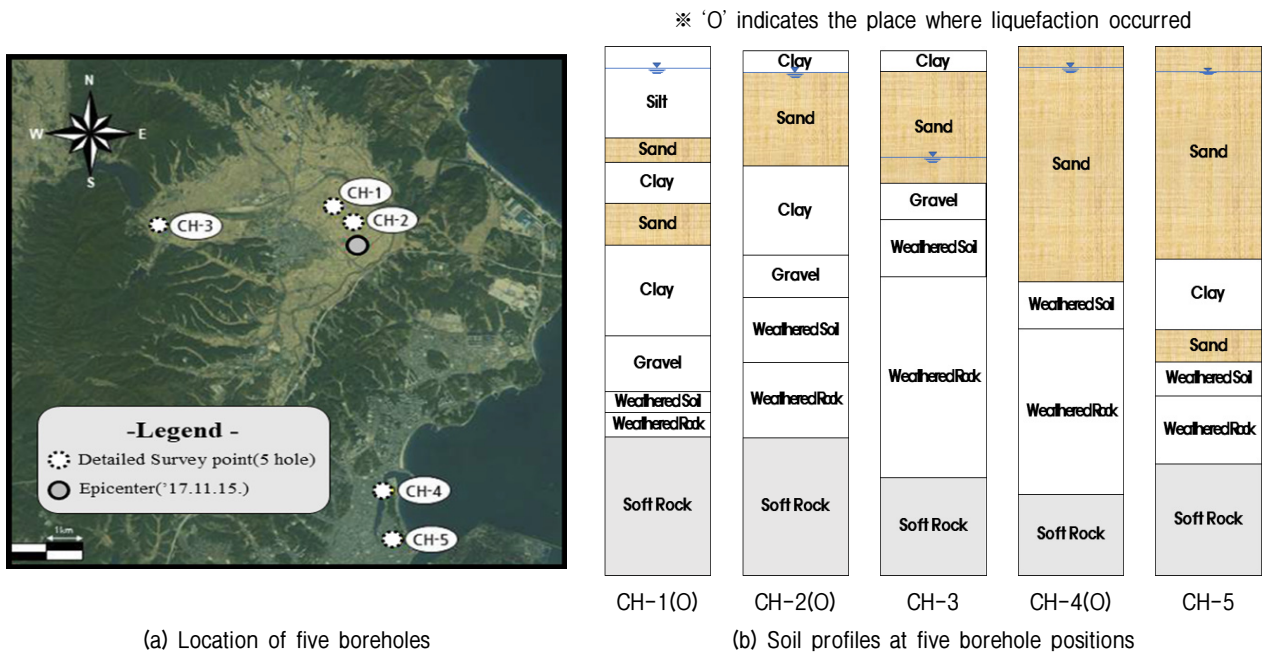


Fig. 3. Input acceleration time histories for ground response analyses



(a) Location of five boreholes

(b) Soil profiles at five borehole positions

Fig. 4. Borehole locations and soil profiles at the target sites for evaluating liquefaction potential

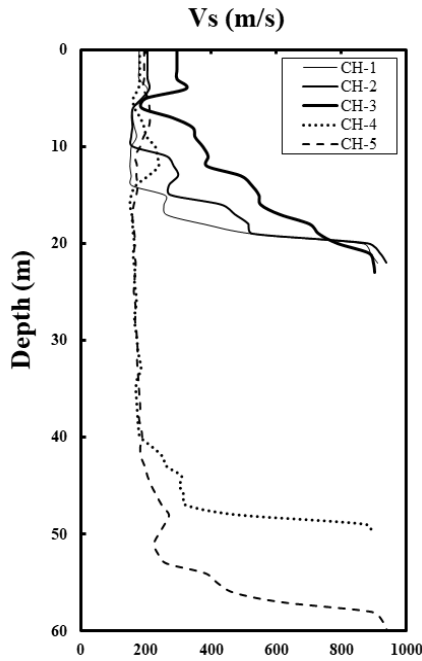


Fig. 5. Shear wave velocity profiles at the target sites obtained by SPS logging

### 3.2 포항지진 규모와 포항지진 실지진파 PGA 수준 지진에 대한 액상화 평가 및 결과

본 연구에서는 대상 부지 해석 지진파에 대해 다양한 최대지반가속도(PGA)를 설정하고, 이에 대하여 기존 국내에서 통상적으로 사용되고 있는 구조물기초설계기준(2016)과 최근 개정된 내진설계일반(2018)에서 제시하는 기준을 적용한 액상화 평가를 수행하고자 하였다. 이를 위하여, 내진설계기준에 따라 내진 II등급과 내진 I등급 붕괴방지수준에 각각 상응하는 PGA 0.11g와 0.154g를 설정하였고(3.3 절 참조), 이보다 작은 PGA 수준은 포항지진 시 M 5.4의 진앙지에서 발생할 만한 수준의 PGA 추정 값을, 이보다 큰 PGA 수준 값으로는 포항지진 시 예측된 실지진파의 PGA(0.2713g)를 설정하였다.

포항지진과 동일한 크기의 규모 5.4의 진앙지에서 발생한 만한 수준에 해당하는 PGA를 설정하기 위하여,

기존의 연구결과들에서 제시된 규모(M), 수정머칼리진도(MMI, Modified Mercalli Intensity scale), 최대지반가속도(PGA) 간의 경험식을 이용하였다. 최대지반가속도 설정에 이용한 식은 미국 서부지역의 지진특성을 근거로 제안된 Gutenberg와 Richter의 경험식(Gutenberg and Richter, 1956)과 미국 중동부지역의 지진특성을 근거로 제안된 Nuttli와 Herrmann의 경험식(Nuttli and Herrmann, 1978)이다. 아울러, 이상 두 가지 경험식과 함께 국내 지반조건에 대한 고려를 위하여 기상청에서 2006년에 제안한 경험식(Kim, 2013)과 Trifunac와 Brady가 제안한 경험식(Trifunac and Brady, 1975)을 조합한 식을 추가로 고려하여 PGA를 산정하였다(Table 1 참조). 본 연구에서는 Table 1에 산정된 값들 중 상대적으로 큰 값인 PGA 0.097g를 규모 5.4의 진앙지에서 발생한 만한 수준에 해당하는 PGA로 설정하였다. 해당 PGA 설정을 위해 적용된 경험식들은 통계적 자료 분석에 의해 제안된 것이기 때문에 실제 지진 시 관측될 수 있는 값과는 차이를 보일 수 있는 제약사항이 있음에도, 본 연구에서 액상화 평가를 위한 가장 낮은 수준의 PGA 설정을 위한 근거로 활용되었다.

본 연구에서는 또한 다양한 크기의 PGA와 입력지진을 액상화 평가에 적용한다는 차원에서 M 5.4의 포항지진 시 PHA2 관측소에서 계측된 실지진파(이하 PHA2 지진파)를 액상화 평가를 위한 해석지진으로 사용하였다. PHA2 지진파의 계측 특성은 전술되었고(3.1 절 참조), PGA는 0.2713g이다. PHA2 지진파의 PGA 0.2713g는 M 5.4의 지진 시 진앙지에서 발생한 만한 수준으로 본 절에서 추정된 0.097g와는 큰 차이를 보이는 값이나, Fig. 3의 (d)에서 볼 수 있듯이 높은 PGA에 비해, Fig. 3의 (a), (b), (c)의 다른 지진파들에 비해 PGA가 스파이크(spike) 형태로 나타나며 지속시간은 짧아 에너지 차원에서는 발현될 만한 수준의 지진파형으로 여겨지지만, 높은 PGA에 대한 의견은 여전히 분분하다. 그럼에도, 본 연구에서는 액상화 평가 결과가 PGA의 영향을

Table 1. PGAs at epicenters of M 5.4 estimated by empirical equations

Magnitude	Magnitude - MMI	MMI - PGA	MMI	PGA (g)
M 5.4	Gutenberg & Richter (1956) ( $M = 2 \log PGA + 2.0$ )		VII	0.051
	Nuttli & Herrmann (1978) ( $M = 2.222 \log PGA + 1.031$ )			0.095
	KMA (2006) ( $M = 0.5 MMI + 1.75$ )	Trifunac & Brady (1975) ( $\log PGA = 0.3 \times MMI + 0.014$ )		0.097

크게 받고, 실지진파를 해석에 적용한다는 취지에서 해석 지진파의 PGA 수준(0.097g, 0.11g, 0.154g, 0.2713g) 중 가장 큰 PGA 수준의 지진파로 포항지진파를 액상화 평가를 위한 지반응답해석에 적용하였다.

1차원 지반응답해석은 기존 평가방법에 따라 Fig. 3의 (a), (b), (c)는 PGA를 0.097g로 조정하고, Fig. 3의 (d)의 포항지진파는 해당 규모에서 실제 발생한 지진파 (PGA는 0.2713g)이므로 PGA 조정 없이 그대로 해석에 적용하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 PGA, 0.097g인 통상적으로 사용되고 있는 입력 지진파들과 PGA, 0.2713g인 포항 실지진파를 적용한 구조물기초설계기준에서 제시하는 액상화 간편평가 결과와 액상화 상세평가 결과를 CH-1

부지에 대하여 예로 나타낸 것이다. 상세평가는 간편평가에 대하여 CSR의 산정값은 동일하나, CRR을 산정하는 방법은 다르다. 즉, 간편평가는 SPT-N값을 기반으로 CRR을 산정한 반면, 상세평가는 반복삼축압축시험 결과를 이용하여 CRR을 산정하였다. 상세평가에서 CRR 산정은 국립재난안전연구원에서 반복삼축압축시험 결과로 제시한 액상화 저항전단응력 특성곡선을 이용하되, M 5.4에 대한 CRR은 Seed 등이 제안한 지진규모별 등가진동 재하횟수 자료(Seed et al., 1983)로부터 반복 재하횟수 3회(참고로 M 6.5의 경우는 10회)에 해당되는 저항전단응력비를 CRR로 산정하였다.

Table 2와 Table 3은 기존 구조물기초설계기준과 개정된 내진설계일반에 제시된 액상화 기준으로, 5개 부

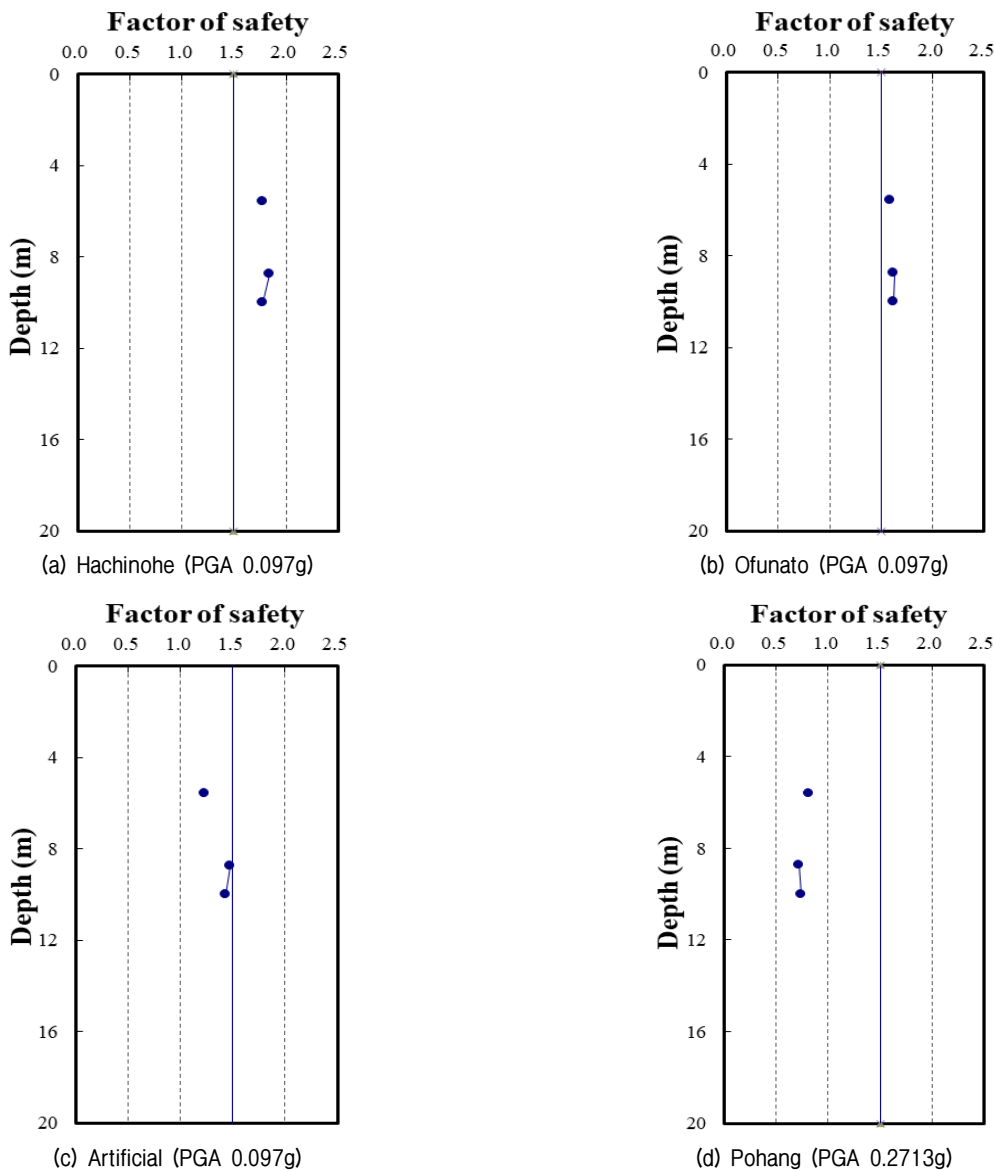


Fig. 6. Evaluation of Site Liquefaction by Simplified Method (CH-1 site, PGA=0.097g or 0.2713g)

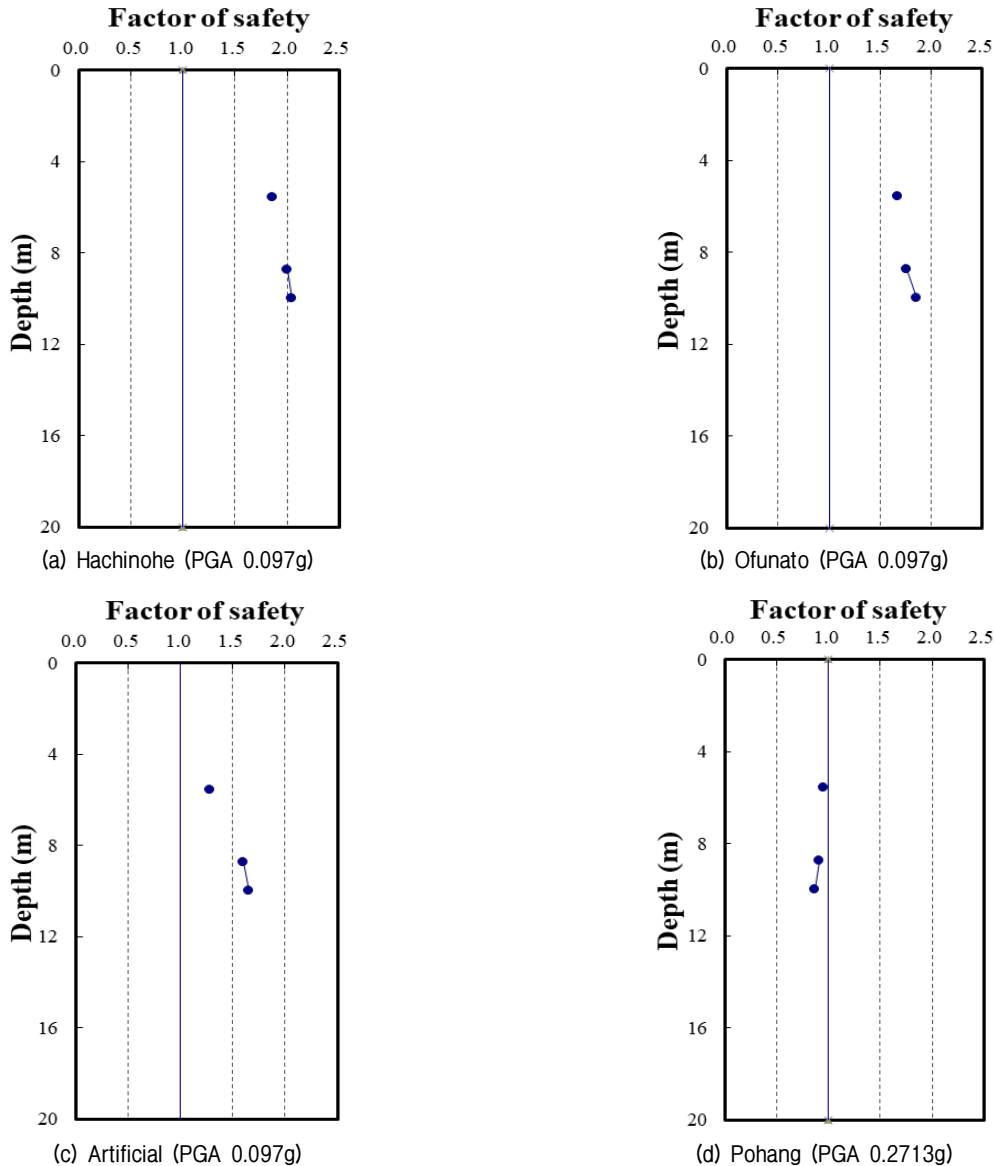


Fig. 7. Evaluation of Site Liquefaction by Accurate Method (CH-1 site, PGA=0.097g or 0.2713g)

지를 대상으로 각각 PGA 0.097g로 조정된, Hachinohe, Ofunato, 인공지진파에 대한 액상화 평가 결과와 PGA 0.2713g인 포항지진 실지진파에 대한 액상화 평가 결과를 정리한 것이다. 참고로 Table 2를 비롯한 본 연구 전체에서 대상 부지 중 액상화가 실제 발현된 부지라고 판정한 근거는 지표면에서의 sand volcano 현상의 발생 여부로 한정하였다. 이러한 현상이 지표에서 나타나지 않았다고 해서 해당 부지의 지층에서 액상화가 발생되지 않았다고 단정하기는 어렵다는 측면에서 실제 발현 현상을 액상화 평가 결과와 직접 비교하는 데에는 분명한 한계가 있다. 다만, 5개 대상 부지의 지층 구성에 있어 액상화 발생 가능 지층이 대부분 지표에 근접해 있다는 측면에서는 비교 기준으로 활용성은 충분히 있는 것으로

판단하였다.

Table 2와 같이 기존 기준에서 통상적으로 적용하고 있는 3가지 지진파를 사용한 결과를 보면, 간편평가 단계까지만 평가를 한 경우, 실제 액상화가 발생한 CH-1, CH-2, CH-4 부지 중 CH-1과 CH-4 부지에 대하여 액상화가 발생하는 것으로 평가한 반면, 상세평가 단계까지를 거쳐 평가를 한 경우에는, 5개 부지 모두에서 액상화가 발생되지 않는 것으로 평가하여, 간접적 비교이기는 하나 대상 부지에서의 액상화 발현 현상과는 전혀 동떨어진 평가 결과를 제시하는 것을 확인할 수 있었다. 마찬가지로, 개정된 기준을 적용한 결과도 해당 PGA 수준에서는 5개 부지 중 액상화 발생 부지는 없는 것으로 나타났다.

Table 3에서 보는 바와 같이, PGA 0.2713g 포항지진



Table 2. Results of Liquefaction Evaluation (PGA 0.097g)

Site	Criteria Input Motion	2016 Foundation Design Criteria				Final Result	2018 Seismic Design General		Site Liquefaction Occurrence	
		Simplified Method		Accurate Method			Main Evaluation			Final Result
		F.S	F.S > 1.5	F.S	F.S > 1.0		F.S	F.S > 1.0		
CH-1	Hachinohe	1.77	O.K	1.86	O.K	-	1.77	O.K	-	Liquefied
	Ofunato	1.59	O.K	1.67	O.K		1.59	O.K		
	Artificial	1.23	N.G	1.29	O.K		1.23	O.K		
CH-2	Hachinohe	2.32	O.K	-		-	2.32	O.K	-	Liquefied
	Ofunato	2.06	O.K				2.06	O.K		
	Artificial	1.79	O.K				1.79	O.K		
CH-3	Hachinohe	2.58	O.K	-		-	2.58	O.K	-	-
	Ofunato	1.71	O.K				1.71	O.K		
	Artificial	1.74	O.K				1.74	O.K		
CH-4	Hachinohe	1.03	N.G	2.17	O.K	-	1.03	O.K	-	Liquefied
	Ofunato	1.26	N.G	2.64	O.K		1.26	O.K		
	Artificial	1.37	N.G	2.58	O.K		1.37	O.K		
CH-5	Hachinohe	2.62	O.K	-		-	2.62	O.K	-	-
	Ofunato	2.84	O.K				2.84	O.K		
	Artificial	2.92	O.K				2.92	O.K		

Table 3. Results of Liquefaction Evaluation (PGA 0.2713g, Pohang Earthquake)

Site	Criteria Input Motion	2016 Foundation Design Criteria				Final Result	2018 Seismic Design General		Site Liquefaction Occurrence	
		Simplified Method		Accurate Method			Main Evaluation			Final Result
		F.S	F.S > 1.5	F.S	F.S > 1.0		F.S	F.S > 1.0		
CH-1	Pohang Earthquake	0.72	N.G	1.01	O.K	-	0.72	N.G	Liquefied	Liquefied
CH-2		0.88	N.G	1.18	O.K	-	0.88	N.G	Liquefied	Liquefied
CH-3		1.11	N.G	1.22	O.K	-	1.11	O.K	-	-
CH-4		0.78	N.G	0.44	N.G	Liquefied	0.78	N.G	Liquefied	Liquefied
CH-5		1.61	O.K	-		-	1.61	O.K	-	-

실지진파를 적용한 기존 기준에 의한 해석 결과를 보면, 간편평가 단계까지만 평가를 한 경우, 액상화가 발현되지 않은 CH-3 부지까지도 액상화가 발생하는 것으로 평가하기는 했으나, 나머지 실제 발현된 3개 부지에 대해서는 액상화가 발생하는 것으로 평가하였다. 그러나 상세평가의 경우는 CH-4 부지에 대해서만 액상화가 발생하는 것으로 평가했을 뿐이며 상세평가 단계까지 거친 최종평가 결과는 CH-1과 CH-2 부지의 액상화 발현과는 상이한 평가결과를 나타냈다. 이에 반해, 2018년에 개정된 내진설계일반의 액상화 평가기준은, 본평가(기존 기준에서는 간편평가)의 기준안전율을 ‘1.5’ 대신 ‘1.0’을 적용하고 있고 상세평가 단계 없이 최종적인 액상화 발생 여부를 평가하는데, 개정된 기준을 따른다면, 높은 PGA 수준의 실지진파를 적용한 본평가는 액상화가 실제 발현된 5개 부지 모두에 대하여 액상화가 발생하는 것으로 평가함을 알 수 있었다.

### 3.3 내진설계기준 PGA 수준 지진에 대한 액상화 평가 및 결과

2017년 포항지진 시에는 규모 5.4의 지진이 발생했지만, 일반적으로 설계 시 3.2절에서와 같이 예측할 수 없는 해당 규모를 설정해서 액상화를 평가하지는 않는다. 3.2절에서는 포항지진과 동일한 규모의 M 5.4 지진 시 진앙지에서 발생할 만한 수준의 PGA를 갖는 지진과 비교적 큰 값으로 판단되는 PGA 수준(0.2713g)의 실제 계측된 포항지진파를 입력지진으로 가정한 해석을 수행한 것이다. 실제 설계개념에서 포항지역에 대한 액상화를 평가한다고 한다면, 내진설계기준에 제시된 PGA 수준의 지진에 대하여 액상화를 평가하게 된다. 그러므로 본 절에서는 포항지진이 발생하고 또한 지진 시 액상화 현상이 발현되었다는 사실은 전혀 인지하지 못한다고 가정하고, 기존의 기준에 따라 포항지역에 대한 액상화

평가를 실시한다고 할 때, 국내 내진설계기준에 제시된 PGA 수준의 지진에 대한 기존 기준과 개정된 기준에서 제시하는 방법에 의한 액상화 평가를 수행하고, 평가 결과의 실제 부지의 액상화 발현 여부와의 간접적인 비교를 통해서 기존 기준과 개정된 기준의 상대적 타당성을 검토해 보았다.

국내 설계기준(구조물기초설계기준(2016), 내진설계일반(2018))에서 액상화 평가를 위한 PGA 수준은 대상

지반 또는 대상 지반 상 구조물의 중요도 등급에 따라 정해진다. 본 연구에서는 내진설계기준에 따라 내진 II 등급과 내진 I등급 붕괴방지수준에 각각 상응하는 PGA 0.11g와 0.154g를 액상화 평가를 위한 지반응답해석 시 PGA로 설정하였다(Table 4 참조).

Fig. 8과 Fig. 9는 내진설계기준에 따라 설정된 PGA, 0.154g에 대한 기존 구조물기초설계기준(2016)에서 통상적으로 사용되는 지진파인, Hachinohe 지진파, Ofunato

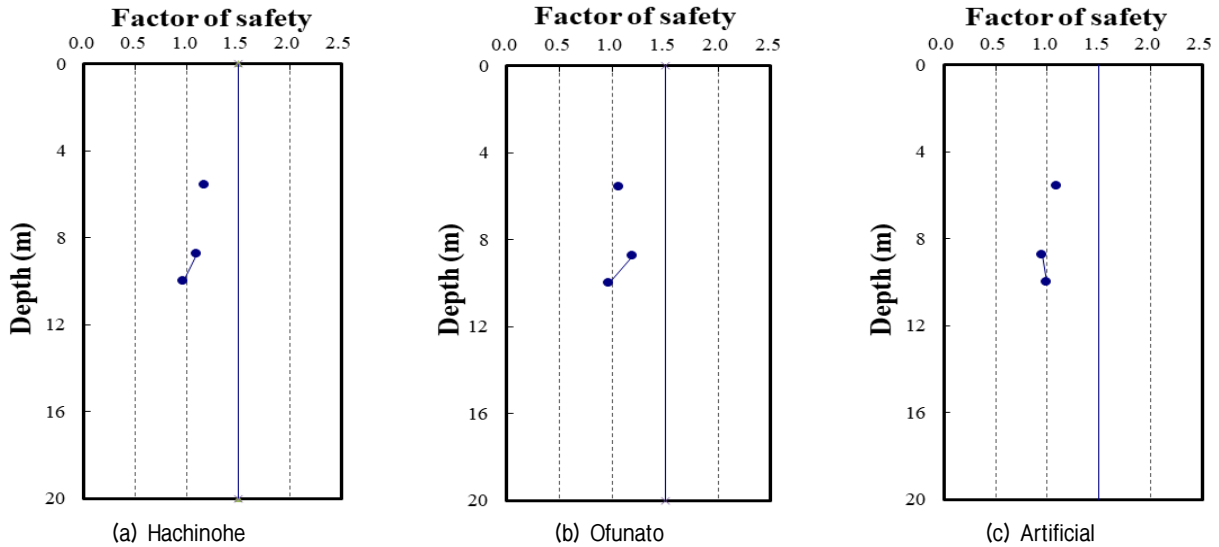


Fig. 8. Evaluation of Site Liquefaction by Simplified Method (CH-1 site, PGA 0.154g)

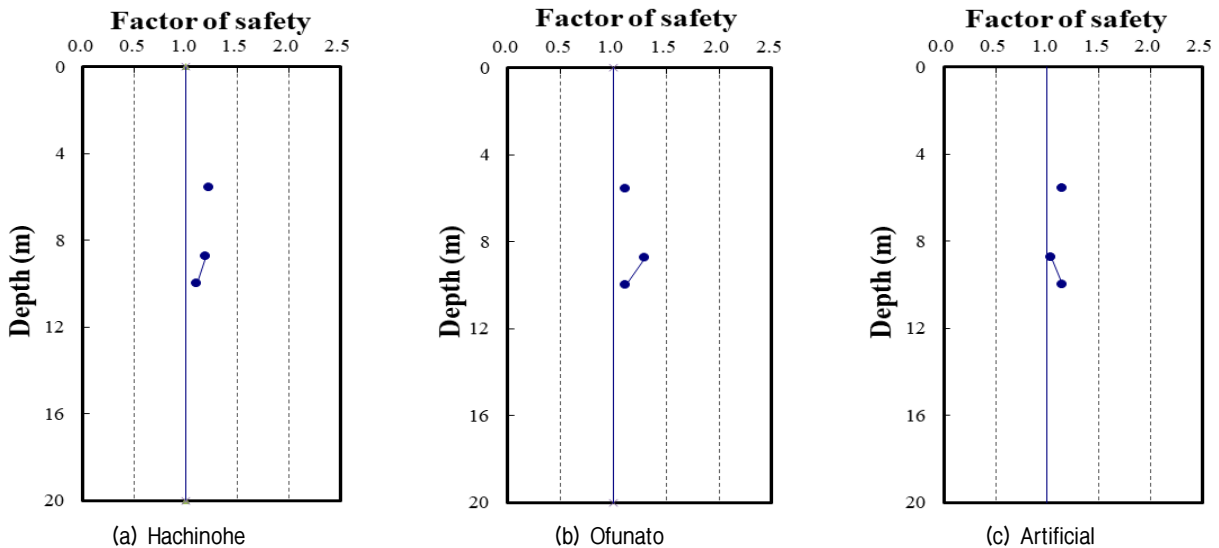


Fig. 9. Evaluation of Site Liquefaction by Accurate Method (CH-1 site, PGA 0.154g)

Table 4. PGAs for Ground Response Analysis and Liquefaction Potential Evaluation

Area	Seismic Zone	Design Performance Level	Seismic Classification	Method	Rock Outcrop Motion (Return period)
Pohang	I	Collapse Prevention	Grade II	Seismic Zonation	0.11g (500 years)
			Grade I	Seismic Zonation	0.154g (1,000 years)

지진파, 인공지진파를 적용한 액상화 간편평가 결과와 액상화 상세평가 결과를 CH-1 부지에 대하여 예로 나타낸 것이다. 상세평가에서 CRR 산정은 국립재난안전연구원에서 반복삼축압축시험 결과로 제시한 액상화 저항전단응력 특성곡선을 이용하되, M 6.5에 대한 CRR은 구조물기초설계기준에서 제시하는 반복재하횟수 10회에 해당되는 저항전단응력비를 CRR로 산정하였다.

Table 5와 Table 6은 기존 구조물기초설계기준과 개

정된 내진설계일반에 제시된 액상화 기준으로, 5개 부지를 대상으로 각각 PGA, 0.11g와 PGA, 0.154g로 조정된, Hachinohe, Ofunato, 인공지진파에 대한 액상화 평가 결과를 나타낸 것이다.

Table 5에서 기존 구조물기초설계기준에서 통상적으로 적용하고 있는 3가지 지진파를 사용하여 액상화를 평가한 결과를 보면, 간편평가 단계까지만 평가를 한 경우, 실제 액상화가 발현된 CH-2 부지를 액상화가 발생

Table 5. Results of Liquefaction Evaluation (PGA 0.11g)

Site	Criteria Input Motion	2016 Foundation Design Criteria				Final Result	2018 Seismic Design General			Site Liquefaction Occurrence
		Simplified Method		Accurate Method			Main Evaluation		Final Result	
		F.S	F.S > 1.5	F.S	F.S > 1.0		F.S	F.S > 1.0		
CH-1	Hachinohe	1.55	O.K	1.63	O.K	-	1.55	O.K	-	Liquefied
	Ofunato	1.51	O.K	1.59	O.K		1.51	O.K		
	Artificial	1.14	N.G	1.31	O.K		1.14	O.K		
CH-2	Hachinohe	2.11	O.K	-	-	2.11	O.K	-	Liquefied	
	Ofunato	1.78	O.K			1.78	O.K			
	Artificial	1.76	O.K			1.76	O.K			
CH-3	Hachinohe	2.30	O.K	-	-	2.30	O.K	-	-	
	Ofunato	1.51	O.K			1.51	O.K			
	Artificial	1.60	O.K			1.60	O.K			
CH-4	Hachinohe	0.95	N.G	1.96	O.K	-	0.95	N.G	Liquefied	Liquefied
	Ofunato	1.13	N.G	2.31	O.K		1.13	O.K		
	Artificial	1.23	N.G	2.35	O.K		1.23	O.K		
CH-5	Hachinohe	2.38	O.K	-	-	2.38	O.K	-	-	
	Ofunato	2.54	O.K			2.54	O.K			
	Artificial	2.44	O.K			2.44	O.k			

Table 6. Results of Liquefaction Evaluation (PGA 0.154g)

Site	Criteria Input Motion	2016 Foundation Design Criteria				Final Result	2018 Seismic Design General			Site Liquefaction Occurrence
		Simplified Method		Accurate Method			Main Evaluation		Final Result	
		F.S	F.S > 1.5	F.S	F.S > 1.0		F.S	F.S > 1.0		
CH-1	Hachinohe	0.96	N.G	1.11	O.K	-	0.96	N.G	Liquefied	Liquefied
	Ofunato	0.97	N.G	1.12	O.K		0.97	N.G		
	Artificial	0.95	N.G	1.04	O.K		0.95	N.G		
CH-2	Hachinohe	1.68	O.K	1.08	O.K	Liquefied	1.68	O.K	-	Liquefied
	Ofunato	1.24	N.G	0.83	N.G		1.24	O.K		
	Artificial	1.32	N.G	0.91	N.G		1.32	O.K		
CH-3	Hachinohe	1.41	N.G	1.03	O.K	Liquefied	1.41	O.K	-	-
	Ofunato	1.14	N.G	0.84	N.G		1.14	O.K		
	Artificial	1.14	N.G	0.84	N.G		1.14	O.K		
CH-4	Hachinohe	0.77	N.G	1.61	O.K	-	0.77	N.G	Liquefied	Liquefied
	Ofunato	0.86	N.G	1.76	O.K		0.86	N.G		
	Artificial	0.97	N.G	1.86	O.K		0.97	N.G		
CH-5	Hachinohe	1.88	O.K	-	-	1.88	O.K	-	-	
	Ofunato	1.92	O.K			1.92	O.K			
	Artificial	1.99	O.K			1.99	O.k			

되지 않는 것으로 평가한 것을 제외하고 나머지 4개 부지에 대한 액상화 발현 여부와 액상화 평가 결과는, 간접적인 비교이기는 하나 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 기존 방법의 상세평가 단계까지를 거친 후 최종 평가를 한 결과는, 액상화가 발현된 CH-1, CH-2, CH-4 부지 모두에 대해서 액상화가 발생하지 않는 것으로 평가하는 등, 실제 액상화 발현 여부와는 전혀 상이한 평가 결과를 보였다. 이에 반해, 간편평가만을 본평가에 포함시키고, 기준안전율을 '1.0'으로 적용하는 개정된 내진설계일반(2018)의 평가 기준을 적용하면, 액상화가 발현된 CH-1과 CH-2 부지에 대해서 액상화가 발생하지 않는 것으로 평가하는 것은, 나머지 3개 부지의 액상화 발현 여부와 평가결과는, 상대적으로 기존 기준을 적용하는 경우에 비해 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Table 6에서 기존 구조물기초설계기준에서 통상적으로 적용하고 있는 3가지 지진파를 사용하여 액상화를 평가한 결과를 보면, 간편평가 단계까지만 평가를 한 경우, 실제 액상화가 발현되지 않은 CH-3 부지를 액상화가 발생된 것으로 평가한 것을 제외하고 나머지 4개 부지에 대한 액상화 발현 여부와 액상화 평가 결과는, 간접적인 비교이기는 하나 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 기존 방법의 상세평가 단계까지를 거친 후 최종 평가를 한 결과는, 액상화가 발현된 CH-2 부지에 대해서만 액상화가 발생된 것으로 평가했을 뿐, 나머지 4개 부지의 액상화 발현 여부와는 전혀 상이한 평가 결과를 보였다. 이에 반해, 내진설계일반(2018)의 평가 기준을 적용하면, 액상화가 발현된 CH-2 부지에 대해서 액상화가 발생하지 않는 것으로 평가하지만, 나머지 4개 부지의 액상화 발현 여부와 평가결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4. 국내 액상화 평가 기준의 개정 타당성 검토

Table 2와 3, Table 5와 Table 6에 대한 검토결과로부터, 각 PGA 수준(0.097g, 0.11g, 0.154g, 0.2713g)에 대한 기존 구조물기초설계기준(2016)을 적용한 액상화 상세평가를 실시한 결과는 실제 5개 대상 부지의 액상화 발현여부와 전혀 상이하게 나타나, 간편평가를 통해 액상화가 발생하는 것으로 평가된 부지에 대해서 추가 단계 절차에 해당되는 상세평가를 수행하여, 최종적으로 액상화 발생을 평가하고 있는 기존 기준에 제시된 액상화 평가 관련 기준은 타당성이 부족한 것으로 평가되었

다. 즉, 본 연구 대상 부지에 국한하여 관련 기준을 적용하는 경우, 상세평가 단계를 거치지 않고 간편평가만 실시하는 것이 실제 부지의 액상화 발현 여부와 평가결과가 비교적 잘 일치되는 것을 알 수 있었다. 기존 기준의 간편평가에서 현장시험 결과들을 바탕으로 CRR을 산정하는 방법은 전 세계적으로 적용되고 있으나, 상세평가에서 실내시험 결과들을 바탕으로 CRR을 산정하는 방법은 일본 기준에서만 액상화 평가절차에 필수적으로 적용하고 있다(EESK, 2019). 이러한 이유는 반복실내시험을 이용하여 CRR을 산정하기 위해서는 현장의 시료가 교란되지 않도록 정밀한 시료 채취가 요구되어, 현업에서 직접적으로 적용하기에 많은 어려움이 있기 때문이다. 본 연구에서 상세평가를 위한 CRR은 교란된 시료를 재성형하여 수행한 반복삼축압축시험 결과를 이용하여 산정하였는데, 실제 액상화가 발생한 다양한 조건에 대한 엄밀한 평가를 수행하지 않아 원인을 단정 짓기는 어려우나, 이것도 상세평가에 의한 액상화 평가 결과와 실제 부지의 액상화 발현 여부가 상이하게 나타난 원인들 중 하나로 평가될 수 있다. 실제로, 내진설계일반(2018)에 제시된 액상화 평가 기준은 기존 구조물기초설계기준(2016)에 제시된 간편평가에 이은 상세평가를 추가로 실시하는 2단계 평가 절차에서, 실내시험 결과를 이용하는 상세평가 단계를 제외하고 현장시험 결과만으로 CRR을 산정하는 간편평가를 본평가로 수정하여, 본평가만을 수행하도록 개정되었다. 다만, 이 경우 기존의 간편평가에서 적용되었던 기준안전율 '1.5'는 개정된 본평가에서는 '1.0'으로 조정되었다.

Table 7은 기존 구조물기초설계기준과 개정된 내진설계일반에 제시된 액상화 기준으로, 5개 부지를 대상으로 다양한 PGA 수준(0.097g, 0.11g, 0.154g, 0.2713g)의 지진에 대해 액상화를 최종적으로 평가한 결과를 실제 지반의 액상화 발현 여부와 비교하여 나타낸 것이다. Table에서 알 수 있듯이, 개정된 기준에 의한 평가결과는 해석지진파의 PGA가 커질수록 실제 부지의 액상화 발현여부와 일치성이 커지는 경향이 있으나, 기존 기준에 의한 평가결과는 PGA 변화에 따른 일치성에 대한 경향이 없으며, 일치성 또한 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

Table 2와 3, Table 5와 Table 6, Table 7에 대한 검토 결과로부터, 간편평가로 액상화가 발생할 것으로 평가된 부지에 대해서 추가 단계 절차에 해당하는 실내반복 시험 결과에 기초한 상세평가를 수행하여, 최종적으로

Table 7. Comparison of Liquefaction Evaluation Results by Two Design Criteria

Criteria PGA (g) Site	2016 Foundation Design Criteria				2018 Seismic Design General				Site Liquefaction Occurrence
	0.097	0.11	0.154	0.2713	0.097	0.11	0.154	0.2713	
CH-1	-	-	-	-	-	-	L	L	Liquefied
CH-2	-	-	L	-	-	-	-	L	Liquefied
CH-3	-	-	L	-	-	-	-	-	-
CH-4	-	-	-	L	-	L	L	L	Liquefied
CH-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

L : evaluated as Liquefied, - : evaluated as not liquefied

액상화 발생 여부를 판단하는 기존의 구조물기초설계 기준에 제시된 액상화 평가 기준은 본 연구 결과에 한해 실효성이 낮은 것으로 평가된다. 개정된 내진설계일반(2018)에 제시된 액상화 평가 기준은 이러한 기준 기준에 제시된 간편평가에 이은 상세평가를 추가로 실시하는 2단계 평가 절차에서, 반복실내시험결과를 이용하는 상세평가 단계를 제외하고 현장시험 결과만으로 CRR을 산정하는 간편평가를 본평가로 수정하여, 본평가만을 수행하도록 개정되어 절차적인 측면에서 개정 타당성을 확보하는 것으로 평가되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 2017년 포항지진 시 액상화가 관측되었거나 액상화 가능성이 높은 부지 5곳에 대하여, 국내에서 통상적으로 적용해 왔던 구조물기초설계기준(2016)과 최근 개정된 기초내진설계기준(2018)에서 제시하는 액상화 평가 방법과 기준을 적용하여 액상화 평가를 실시하고, 이러한 이론적인 액상화 평가 결과와 대상 부지에서의 실제 액상화 발현여부를 비교·검토함으로써, 개정된 국내 액상화 평가 기준의 개정 타당성을 검토해 보았다. 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 포항 5개 부지를 해석 대상으로, 포항지진 시 M 5.4의 진앙지에서 발생할 만한 수준으로 추정된 PGA(0.097g), 내진설계기준에 따라 설정한 PGA(0.11g와 0.154g), 포항지진 시 실지진파의 PGA(0.2713g)를 갖는 입력지진에 대하여 각각 수행된, 구조물기초설계기준(2016)에서 제시하는 액상화 간편평가 결과는, 대상 부지의 액상화 발현 여부와 비교적 잘 일치하였다.
- (2) 동일 부지에 대해, 동일한 입력지진에 대하여 각각

수행된 구조물기초설계기준에서 제시하는 액상화 상세평가 결과는, 간편평가 결과가 각각에 대해 모두 적정 수준으로 액상화 발현여부와 일치성을 보인 것과는 달리 일치성이 상대적으로 매우 낮은 것으로 나타났다.

- (3) (1), (2)의 결과로부터, 간편평가로 액상화가 발생할 것으로 평가된 부지에 대해서 추가 단계 절차에 해당되는 실내반복시험 결과에 기초한 상세평가를 수행하여, 최종적으로 액상화 발생 여부를 판단하는 기존의 구조물기초설계기준에 제시된 액상화 평가 기준은 본 연구 결과에 한해 실효성이 낮은 것으로 평가되었다.
- (4) 동일 부지에 대해, 동일한 입력지진에 대하여 수행된 개정 내진설계일반(2018)에서 제시하는 액상화 본평가 결과는, 간편평가에 이은 상세평가를 단계적으로 실시하는 기존 구조물기초설계기준을 적용한 결과에 비해 대상 부지의 액상화 발현여부와 일치성이 상대적으로 높은 것으로 나타나, 개정 기준의 개정 사항에 대한 타당성이 있음을 확인할 수 있었다.

기존 구조물기초설계기준에는 액상화 상세평가를 위한 CRR을 실내반복시험 결과로부터 산정하도록 제시되어 있다. 이러한 실내반복시험을 이용한 CRR 산정을 위해서는 교란되지 않는 현장 시료 채취가 중요한데, 이는 현재 대부분의 현장 여건에서는 거의 불가능한 사항이므로, 개정된 내진설계일반의 액상화 본평가에서 이러한 실내반복시험에 기반을 둔 상세평가 단계를 제외하고, 현장시험 결과를 바탕으로 CRR을 산정하는 간편평가만을 본평가로 변경하여 액상화 평가를 수행하도록 제시하고 있다. 본 연구에서 상세평가 결과는 제한된 수량의 교란된 재성형 시료에 대하여, 반복삼축압축시

험 결과로 산정한 CRR을 이용하는 통상적인 절차나 방법으로 도출한 것이므로, 실내반복시험의 필요성과 정확성을 언급하기에는 한계가 있다. 다만, 향후 실내반복 시험이 엄밀한 불교란시료를 이용하고 시험기법이 보다 고도화된다면, 액상화가 발생할 것으로 판정된 기초 지반의 액상화로 인한 안정성을 평가할 수 있는 중요 도구로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부, 경상북도와 경북연구개발지원단의 과학기술기반 지역수요맞춤형 R&D 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(CN19100GB001).

## 참고문헌 (References)

- Ahn, J. K., Baek, W. H., Choi, J. S., and Kwak, D. Y. (2018), "Investigation of Pohang Earthquake Liquefaction Using 1D Effective-Stress Site Response Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.8, pp.37-49.
- Choi, Y. J. and Hong Y. G. (2017), "A Study on Direction of Construction for Earthquake Disaster Information System in Daegu Based on GIS", Daegu Gyungbok Development Institute, pp.3-4.
- Choi, J. S., Park, I. J., Hwang, K., and Jang, J. (2018), "A Study on Seismic Liquefaction Risk Map of Electric Power Utility Tunnel in South-East Korea", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.19, No.10, pp.13-19.
- EESK (2019), *Manual of Seismic Design General (KDS 17 10 00 : 2018)*, Earthquake Engineering Society of Korea, Goomibook, pp.72-75.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1956), "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration: (Second paper)", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol.46, No.2, pp.105-145.
- Han, S.M., Park, E.H., Ham, I.K., Park, S.C., Jeon, Y.S., Jo, E.Y., and Lee, C.W., "Technical Report for the Observation Environment of the Korean Meteorological Administration Seismic Observatory", National Institute of Meteorological Sciences, NIMR-TN-2014-007, pp.54.
- Idriss, I. M. (1990), "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes", *In Proceedings of HB Seed Memorial Symp.*, Vol.2, pp.273-289.
- Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1993), *User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*, <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/getpkg?id=SHAKE91>
- Iwasaki, T. (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential based on Case Studies at various Sites in Japan", *In Proceedings of Second Int. Conf.*, Microzonation Safer Construction Research Application, Vol.2, pp.885-896.
- KGS (2018), *Manual of Foundation Design Criteria*, Korean Geotechnical Society, pp.826-837.
- Kim, D. K. (2013), *Dynamics of Structure*, Goomibook, pp.413-414.
- KMA (2019), *2018 Earthquake Annual Report*, Korea Meteorological Administration, pp.1-10.
- Liao, S. S. and Whitman, R. V. (1986), "Overburden Correction Factors for SPT in Sand", *Journal of Geotechnical engineering*, Vol.112, No.3, pp.373-377.
- MOF (1999), *Standard of Seismic Design for Fishing Port and Harbor Facilities*, Ministry of Oceans and Fisheries.
- MOLIT (2016), *Foundation Design Criteria*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- MOLIT (2018), *Seismic Design General*, KDS 17 10 00:2018, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Mun, G. Y. (2018), *A Study on the Effect of Relative Density and Particle Size Distribution on the Liquefaction Resistance Strength of Sand in Pohang Liquefaction Region*, Master's thesis, Pusan National University, pp.66-68.
- NDMI (2017), *The investigated result of liquefaction due to Pohang earthquake (2017.11.15.)*, National Disaster Management Research Institute.
- Nuttl, O. W. and Herrmann, R. B. (1978), *State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States : Report 12*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Park, S. S., Nong, Z., Choi, S. G., and Moon, H. D. (2018), "Liquefaction Resistance of Pohang Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.9, pp.5-17.
- Schnabel, P. B. and Seed, H. B. (1973), "Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.63, No.2, pp.501-516.
- Schnabel, P. B., Lysmer, K., and Seed, H. B. (1972), *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, EERC Report 72-12, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.97, No.9, pp.1249-1273.
- Seed, H. B., Ugas, C., and Lysmer, J. (1976), "Site-dependent Spectra for Earthquake-resistant Design", *Bulletin of the Seismological society of America*, Vol.66, No.1, pp.221-243.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. (1975), "On Correlation of Seismoscope Response with Earthquake Magnitude and Modified Mercalli Intensity", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.65 No.2, pp.307-321.
- Youd, T. L. and Idriss, I. M. (2001), "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of geotechnical and geo-environmental engineering*, Vol.127, No.4, pp.297-313.

Received : March 1<sup>st</sup>, 2020

Revised : April 14<sup>th</sup>, 2020

Accepted : April 17<sup>th</sup>, 2020