

국내 액상화 평가를 위한 진동전단응력비 산정

Evaluation Methods of Cyclic Shear Stress Ratio for the Assessment of Liquefaction in Korea

유 병 수¹ Yoo, Byeong-Soo
봉 태 호² Bong, Tae-Ho
김 성 렬³ Kim, Sung-Ryul

Abstract

Usually, the cyclic shear stress ratio (*CSR*) for the assessment of liquefaction has been determined by performing ground response analysis or adopting simplified method suggested by Seed & Idriss with some modifications. In order to analyze the applicability of the *CSR* evaluation methods, the present study performed one-dimensional equivalent linear analysis and evaluated *CSR* based on design codes from *FHWA*, *JRA*, and *KDS*. The comparison of the *CSR* obtained from each code showed that the *CSR* from *KDS* showed the largest error with the analysis results. The reason is because *KDS* has an error, which defines the stress reduction coefficient applying the maximum acceleration at each depth, not the maximum cyclic shear stress mobilized in the soil.

요 지

액상화 평가를 수행할 때 진동전단응력비(*CSR*)는 일반적으로 지반응답해석 또는 Seed & Idriss의 간편법을 수정한 방법을 통해 산정하고 있다. 본 연구에서는 진동전단응력비 산정방법의 적용성을 분석하기 위하여 1차원 등가선형 지반응답해석을 수행한 후 미연방도로국(*FHWA*), 일본도로협회(*JRA*), 국내설계기준(*KDS*) 등에서 제안한 방법을 적용하여 진동전단응력비를 산정하였다. 연구결과, 국내설계기준(*KDS*)으로 산정한 진동전단응력비가 해석 결과와 가장 큰 오차를 나타내었다. 그 이유는 국내설계기준의 경우 깊이에 따른 응력감소계수를 최대진동전단응력의 비가 아닌 최대지반가속도의 비로 정의하는 오류가 있기 때문이다.

Keywords : Cyclic shear stress ratio (*CSR*), Ground response analysis, Stress reduction coefficient

1. 서 론

2016년 경주지진($M_w=5.8$), 2017년 포항지진($M_w=5.4$)

이 발생함에 따라 국내 내진설계에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히, 포항에서 액상화(liquefaction)의 징후로 여겨지는 ‘토사 분출(soil boiling)’ 현상이 관측됨에

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 건설환경종합연구소 연구조교수 (Member, Research Assistant Prof., Institute of Construction & Environmental Eng., Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-8760, Fax: +82-2-873-2684, sungryul@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

따라 액상화 평가에 대한 중요성이 증대되고 있다. 액상화 현상은 느슨한 포화 사질토 지반이 진동 하중에 의해 전단 강도를 상실하고 흠탕물처럼 거동하는 현상이다. 이렇게 전단 강도를 상실한 지반은 측방 유동(lateral spreading)과 같은 대규모 변형에서부터 구조물의 과도한 침하 및 부등 침하, 지반 내 매설물의 부상(up-lift)과 같은 경제적, 인명적 피해를 일으킬 수 있다. 이와 같은 피해를 예방하기 위해 액상화에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 이를 바탕으로 다양한 액상화 평가법이 제안되었다.

액상화 평가는 대상 토층의 액상화 발생 여부를 판단하는 안전율 평가를 기본으로 이루어진다. 액상화 안전율 평가법은 액상화 현상을 유발하는 지반 내 과잉간극수압이 어떤 원인으로 발생하는 지에 따라 응력, 변형률, 에너지 등을 평가하는 다양한 방법이 제안되었다(Seed and Idriss, 1971; Dobry et al., 1982; Nemat-Nasser and Shokoh, 1979).

국내를 비롯하여 미국, 일본 등 대부분의 국가에서 응력을 기반으로 한 액상화 안전율 평가법을 활용하고 있다. 응력 기반의 액상화 안전율은 진동전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 진동저항응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)의 비로 정의된다. 진동전단응력비는 지진파가 토층을 통과하면서 발생하는 진동전단응력을 유효구속압으로 나누어 준 값이며, 진동저항응력비는 해당 토층에 액상화를 유발하는 진동전단응력비를 의미한다.

액상화 안전율은 지반 내 특정 깊이의 값이므로 지표면 침하와 같은 액상화 피해를 정량적으로 예측하기 어렵고 피해 발생 가능성을 과대예측하는 한계가 있다(Ishihara, 1985; Russell and Ballegooy, 2015). 이를 개선하기 위해 액상화 피해 발생 가능성을 판단하는 다양한 액상화 취약성 평가법이 제안되고 있다(Iwasaki et al., 1984; Maurer et al., 2014; Rashidian and Gilins, 2018; Zhang et al., 2002; T&T, 2013). 그러나, 이러한 액상화 취약성 평가 과정에서도 액상화 안전율값이 활용되기 때문에 액상화 안전율을 정확히 산정하는 것이 중요하다.

액상화 평가 과정 중 진동전단응력비는 지반응답해석 또는 Seed and Idriss(1971)가 제안한 간편법(simplified method)을 적용하여 산정할 수 있다. 지반응답해석을 통해 산정한 진동전단응력비는 이론값으로 간주하며, 간편법을 통해 산정한 진동전단응력비는 추정값으로 볼

수 있다. 미연방도로국(Federal Highway Administration, FHWA), 일본도로협회(Japan Road Association, JRA), 국내설계기준(Korean Design Standard, KDS)에서는 진동전단응력비 산정법으로 Seed & Idriss 간편법 혹은 지역 특성에 맞게 수정된 간편법을 사용하거나 지반응답해석을 수행하도록 제안하고 있다(Marsh et al., 2014; JRA, 2012; MLIT, 2018; MOF, 2018).

깊이별 진동전단응력비를 산정할 때 미연방도로국과 일본도로협회에서는 지표면 최대지반가속도와 응력감소계수를 곱하여 산정한다. 이에 반해 국내설계기준에서는 깊이별 최대지반가속도를 적용하여 산정한다. 즉, 국내설계기준의 경우 깊이별 최대지반가속도 값이 지표면 최대지반가속도와 응력감소계수를 곱한 값과 동일하다고 가정하고 있다. 그러나, 파 전달 이론에 따르면 전단파에 의해 발생하는 최대지반가속도는 지반조건에 따라 달라진다. 점토와 사질토는 강성 차이로 인해 주된 증폭이 발생하는 고유진동수 영역이 다르며, 점토의 감쇠 특성으로 인해 사질토를 통과하면서 증폭되었던 가속도가 점토를 통과하면서 작아질 수 있다. 그러므로 최대지반가속도의 비로 정의된 응력감소계수는 최대진동전단응력의 비로 정의된 응력감소계수와 다를 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 지반조건 5개소, 입력지진파 3개 등 총 15가지 조건에 대하여 1차원 등가선형 지반응답해석을 수행하였다. 지반응답해석 결과 깊이별 최대진동전단응력과 최대지반가속도, 그리고 진동전단응력비를 산정하였다. 최대진동전단응력을 이용하여 응력감소계수를 산정하고 기존에 제안된 응력감소계수의 범위와 비교하였다. 또한, 각 기관의 방법을 따라 진동전단응력비를 산정하고 서로 비교하여 국내설계기준의 진동전단응력비 산정법의 타당성을 검토하였다.

2. 진동전단응력비 산정법

2.1 1차원 등가선형 지반응답해석

지반 내 발생하는 진동전단응력비는 지반응답해석(Ground Response Analysis, GRA)을 수행하여 결정할 수 있다(Kramer, 1996). 지반응답해석에 널리 적용되는 등가선형 해석기법은 지반의 비선형성을 고려하기 위해 선형 조건을 바탕으로 반복 계산을 수행하며 비선형 해석에 비해 빠르고 간단하면서도 비교적 신뢰도 있는

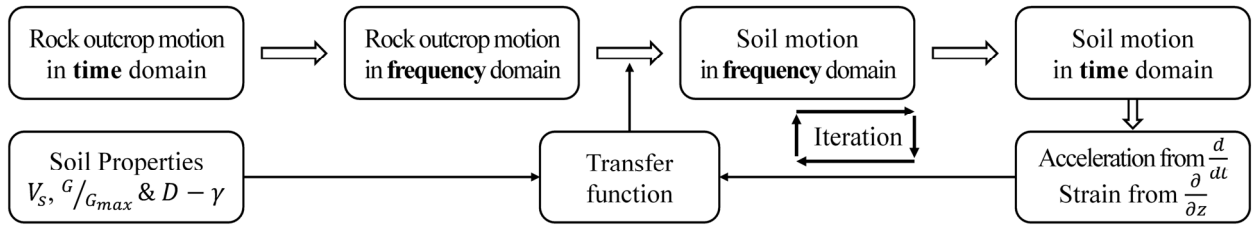


Fig. 1. Analysis flow of one-dimensional equivalent linear ground response analysis

해석 결과를 주는 것으로 알려져 있다(Yoshida, 2015).

등가선형 지반응답해석의 일반적인 흐름을 Fig. 1에 나타내었다. 암반에서 계측된 가속도 시간이력은 푸리에 변환(fourier transform)을 통해 진동수에 대한 푸리에 급수로 나타낼 수 있다. 변환된 암반 계측 가속도는 1차원 파 전달 이론에 따라 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 이용하여 산정된 전달함수에 의해 토층 가속도의 푸리에 급수로 나타낼 수 있으며, 이를 푸리에 역변환(inverse fourier transform)하면 토층의 가속도 시간이력을 얻을 수 있다. 토층의 가속도 시간이력을 시간에 대해 적분하면 토층의 속도, 변위 시간이력을 얻을 수 있으며, 변위를 심도에 따라 미분하면 토층의 전단변형률을 얻을 수 있다.

등가 선형 해석법에서는 지반의 비선형성을 반영하기 위해 토층의 정규화전단탄성계수(normalized shear modulus, G/G_{max}) 곡선과 감쇠비(damping ratio) 곡선을 이용하여 반복 계산을 수행한다. 선형 해석에서 얻어진 유효전단변형률을 토대로 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 재조정하여 해석을 반복 수행하면 수렴된 변형률을 나타내는 해석 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 1차원 등가선형 지반응답해석을 통해 토층의 변위, 속도, 가속도 시간 이력과 깊이에 따른 토층의 전단변형률, 전단응력 등 토층의 응답을 모두 얻을 수 있다.

2.2 Seed & Idriss 간편법과 국외 진동전단응력비 산정 기준

Seed and Idriss(1971)는 지반응답해석을 수행하지 않고 도표와 수 계산만으로 진동전단응력비를 산정하고자 간편법을 제안하였다. 간편법에서 가정한 상황을 Fig. 2에 나타내었다. 1차원 조건에서 진동전단응력은 연직 방향으로 진행되는 전단파에 의해 발생한다. 이러한 전단파에 의해 특정 깊이 위의 강체 토층이 지표면 최대지반가속도, a_{max} 로 운동한다. 이때, 힘의 평형 관계로부

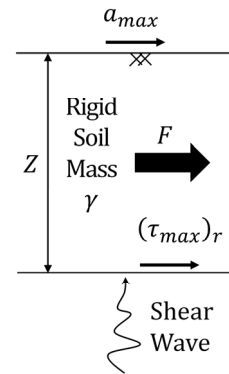


Fig. 2. Evaluation of the maximum shear stress below a rigid soil mass

터 강체 토층 바닥면의 최대진동전단응력, $(\tau_{max})_r$ 은 식 (1)과 같다.

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma Z}{g} a_{max} \quad (1)$$

where, $(\tau_{max})_r$ = maximum cyclic shear stress under the rigid soil mass

γ = unit weight of rigid soil mass

Z = target depth

g = acceleration of gravity

a_{max} = peak ground acceleration at the surface

그러나, 토층은 강체가 아니고 변형이 발생하므로 실제 토층 바닥면의 최대진동전단응력, $(\tau_{max})_d$ 은 토층을 강체로 가정하여 산정한 최대진동전단응력보다 작아진다. 그러므로 간편법에서는 응력감소계수(stress reduction coefficient, r_d)를 도입하여 강체 토층 바닥면의 최대진동전단응력을 감소시킨다. 이때, 응력감소계수는 지반응답해석에서 얻어진 최대진동전단응력, $(\tau_{max})_{d,GRA}$ 을 이용하여 식 (3)으로 산정한다. Seed and Idriss(1971)는 다양한 지반 및 지진파 조건에 대해 지반응답해석을 수

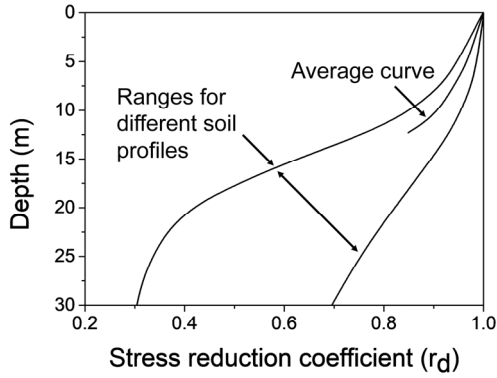


Fig. 3. Ranges and average curve of stress reduction coefficient (Seed and Idriss, 1971)

행하여 Fig. 3과 같이 심도에 따른 응력감소계수의 범위와 평균 곡선을 제안하였다.

$$(\tau_{\max})_d = r_d \times (\tau_{\max})_r \quad (2)$$

$$r_d = \frac{(\tau_{\max})_{d,GRA}}{(\tau_{\max})_r} \quad (3)$$

where, $(\tau_{\max})_d$ = maximum shear stress under the deformable soil mass
 r_d = stress reduction coefficient as the ratio of maximum cyclic shear stress
 $(\tau_{\max})_{d,GRA}$ = maximum shear stress determined by ground response analysis

이후 다양한 연구자들에 의해 응력감소계수의 수정 및 개선이 이루어지고 있다. Ishihara(1977)와 Imai(1981)는 1차원 파 전달 이론과 단일토층에 대한 분석을 통해 응력감소계수를 제안하였다. Iwasaki(1986)는 깊이에 따라 응력감소계수를 선형으로 감소시키는 간략식을 제안하였다. Golesorkhi(1989)는 지진의 모멘트 규모를 고려하여 깊이에 따른 응력감소계수를 제안하였으며, 이후 Cetin and Seed(2004)는 지진의 모멘트 규모, 지표면 최대지반가속도, 상부 12m 토층 평균 전단파 속도 등을 고려하여 깊이에 따른 응력감소계수를 제안하였다. Kishida et al.(2009)은 지층 구성과 입력 지진파를 변화시키며 1차원 등가선형 지반응답해석을 수행한 뒤 회귀 분석을 통해 Cetin and Seed(2004)가 제안한 응력감소계수를 개선하였다.

실제 지진파는 불규칙한 하중 조합으로 구성되므로 최대진동전단응력이 작용하는 시간은 매우 짧다. 그러

므로, Seed and Idriss(1971)는 진동전단응력의 평균값을 구하기 위해 식 (4)와 같이 최대진동전단응력의 0.65 배를 적용하는 간편법을 제안하였다.

Seed and Idriss의 간편법은 미연방도로국에서 직접 사용되고 있으며, 일본, 한국 등 대부분의 국가에서 개념을 차용하여 진동전단응력비 산정법을 제안하였다.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = \frac{0.65(\tau_{\max})_d}{\sigma'_v} = \frac{0.65r_d(\tau_{\max})_r}{\sigma'_v} \\ = 0.65 \frac{r_d}{\sigma'_v} \frac{\gamma Z}{g} a_{\max} = 0.65 r_d \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{\max}}{g} \quad (4)$$

where, τ_{av} = average cyclic shear stress

σ'_v = effective vertical stress at target depth

σ_v = total vertical stress at target depth

미연방도로국에서 발간한 “한계상태설계법 교량 내진설계 및 해석에 대한 매뉴얼(Marsh et al., 2014)”에서는 액상화 평가 방법을 일반적으로 사용되는 간편법과 특수한 경우 사용되는 수치해석법으로 분류하였다. 간편법에서 진동전단응력비는 식 (4)를 적용하여 산정한다. 지표면 최대지반가속도는 AASHTO seismic hazard map에서 지역별로 권장하는 값을 사용하도록 하였고, 깊이별 응력감소계수는 Seed & Idriss가 제안한 본래의 평균 곡선을 사용하도록 권장하였다(Youd et al., 2001). 액상화 평가법으로 수치해석법을 적용하는 조건은 (1) 액상화 가능 층이 15m 심도 아래에도 위치하는 경우, (2) 연약 점토나 불투수층이 끼인 경우, (3) 액상화 대책에 막대한 비용이 발생할 것으로 예상되는 경우의 세 가지를 제안하였다. 수치해석법은 등가선형 해석법과 비선형 유효응력 해석법을 제안하였다. 등가선형 해석법은 간편법의 진동전단응력비를 산정하는 데 활용하도록 하였으며 비선형 유효응력 해석법은 과잉간극수압을 직접 산정하여 액상화 평가를 수행하도록 하였다.

일본도로협회에서 발간한 “도로교시방서·동해설(JRA, 2012)”에서는 액상화 평가를 위한 진동전단응력비 산정법을 식 (5)와 같이 제안하였다. Seed & Idriss 간편법과 유사한 형태를 가지고 있으나, Iwasaki(1986)가 제안한 선형 응력감소계수를 사용하고 있으며, 평균진동전단응력이 아닌 최대진동전단응력을 사용하여 Seed & Idriss의 간편법에 포함된 계수 0.65가 제외되었다. 계수 0.65와 유사한 의미의 보정 계수가 진동저항응력비 산정법

에 포함되어 있으나 본 연구에서는 다루지 않았다. 또한, 지표면 최대지반가속도를 지반 분류, 지진 종류, 그리고 지역별 보정 계수에 따라 결정하도록 제안하여 일본의 지역 특성을 반영하였다.

$$CSR = r_d a_{\max} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (5)$$

where, $r_d = 1 - 0.015Z$ (Iwasaki, 1986)

$a_{\max} = a_{\max,0} c_z$, corrected peak ground acceleration at the surface

$a_{\max,0}$ = design peak ground acceleration at the surface

c_z = correction factor depending on the region

2.3 국내 진동전단응력비 산정 기준

국토교통부에서 발간한 “내진설계 일반편(MLIT, 2018; KDS 17 10 00)”에서는 ‘진동전단응력비는 구조물의 내진 등급을 고려하여 지반응답해석을 수행하여 결정한다.’라고 간략히 명시하고 있다. 응력 기반의 액상화 안전율을 통해 액상화 평가를 수행하며 미연방도로국 매뉴얼의 수치해석법 중 등가선형 해석법을 적용한 것으로 판단할 수 있다.

반면, 해양수산부에서 발간한 “항만 및 어항 설계기준(MOF, 2018; KDS 64 17 00)”에서는 진동전단응력비 산

정을 간이평가와 상세평가로 구분하였다. 간이평가에서는 Seed & Idriss 간편법을 차용하였으나, 지표면 최대지반가속도와 응력감소계수 대신 깊이별 최대지반가속도를 적용하여 식 (6)과 같이 제안하였다. 이는 깊이별 응력감소계수의 평균 곡선이 대상 지반의 특성을 정확히 반영하기 어렵다고 판단하여 해석을 통해 결정한 깊이별 최대지반가속도를 적용한 것이다(Kim et al., 2000).

상세평가에서도 동일하게 식 (6)을 적용하지만, 지반 응답해석의 입력 변수인 정규화전단탄성계수 곡선과 감쇠비 곡선을 실내시험으로 결정하도록 하였다. 즉, 지반응답해석의 결과로 얻어지는 깊이별 최대지반가속도의 신뢰 수준을 높인 것으로 판단할 수 있다.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \left(\frac{a_{\max,depth}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (6)$$

where, $a_{\max,depth}$ = peak ground acceleration at each depth

3. 산정법에 따른 진동전단응력비 비교

3.1 해석 대상지 및 입력 지진파

본 연구에서는 국내 OO 지역의 5개 위치에 대한 지반응답해석을 수행하였다. 각 위치에서의 표준관입시험, 탄성파 탐사 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 지반응답해석의 입력값인 정규화 전단탄성계수 곡선과 감쇠비

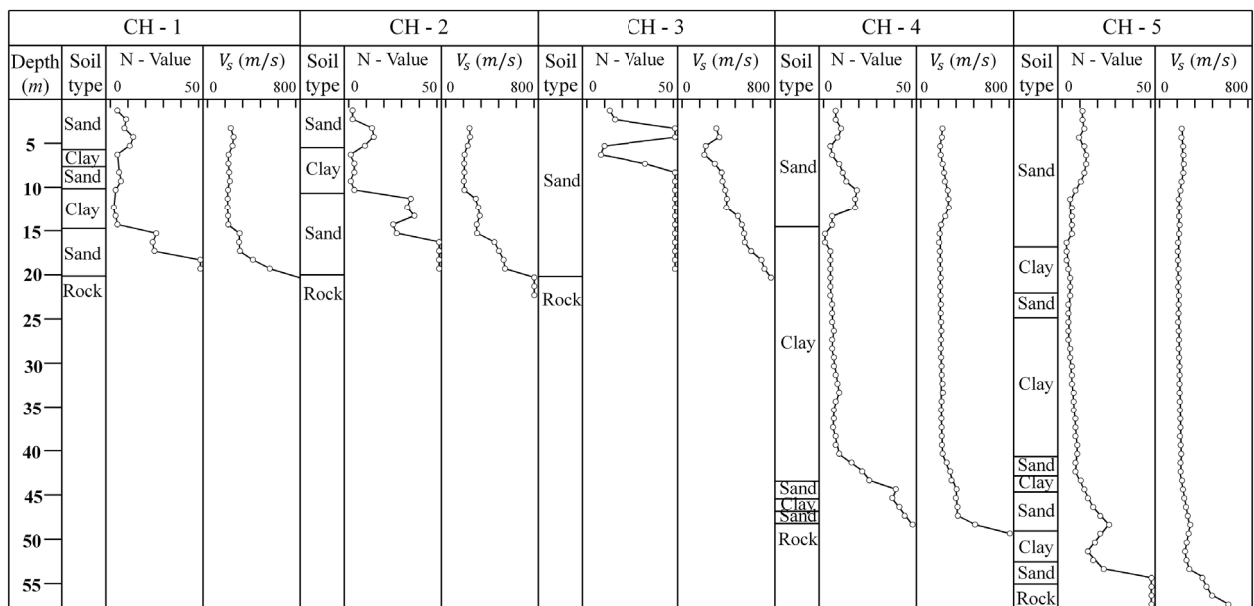


Fig. 4. SPT N value and V_s profiles at the study site

곡선은 Fig. 5와 같은 지층 분류를 바탕으로 사질토, 점성토, 그리고 암반층으로 단순화하여 문헌에 따른 값을 적용하였다(Seed and Idriss, 1970; Vucetic and Dobry, 1991; Schnabel et al., 1970). 입력 지진파가 적용되는 기반암 깊이는 탄성과 탐사 결과에서 전단파 속도가 760 m/s 이상이 되는 깊이로 결정하였다. 해석에 사용된 입력 지진파는 Fig. 6, 7과 같이 국내 표준응답스펙트럼 기준(내진설계 일반편; MLIT, 2018)에 맞게 보정한 2개

실지진파(M1, M2)와 인공지진파(M3)의 총 3개를 사용하였다. 표준응답스펙트럼의 재현주기는 1,000년이며, 최대가속도는 0.154g에 해당한다.

3.2 응력감소계수 범위 비교

본 연구에서는 Proshake 2.0(ProShake user's manual, 1998) 프로그램을 사용하여 1차원 등가선형 지반응답 해석을 수행하였다. 해석 종료를 위한 수렴 기준은 직전 해석과의 최대 전단탄성계수의 변동비율이 0.1% 이내가 되도록 설정하였으며 최종 반복 계산의 횟수는 최소 11회, 최대 24회로 나타났다. 15개 해석 사례에 대한 응력감소계수를 산정하여 기존 제안된 응력감소계수 곡선과 비교 하였다. 응력감소계수는 Seed and Idriss(1971)가 제안한 식 (3)을 적용하여 산정하였다. 계산된 응력감소계수 곡선과 기존에 제안된 곡선을 Fig. 8에 나타내었다(Seed and Idriss, 1971; Cetin and Seed, 2004).

본 해석에서 얻어진 총 15개 곡선 중 8개가 Seed and Idriss(1971)가 제안한 응력감소계수 범위를 벗어나는 것

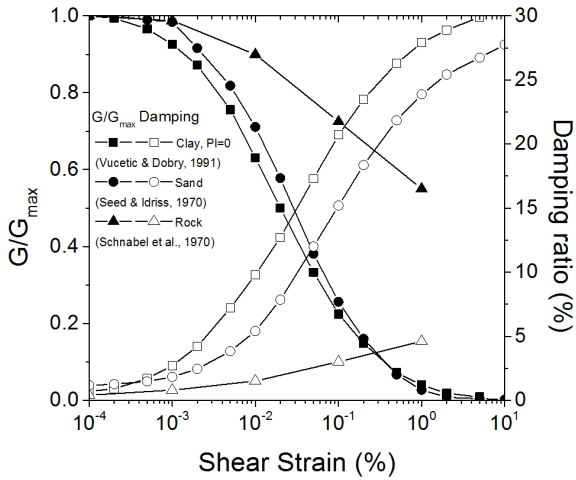


Fig. 5. Normalized shear modulus and damping ratio curves adopted in the study

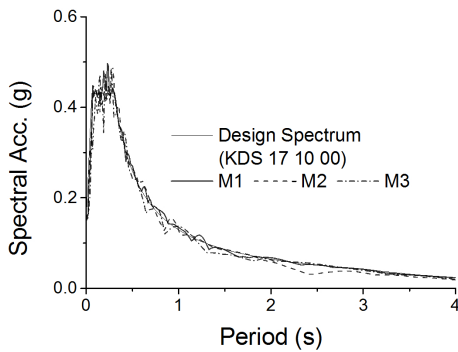


Fig. 6. Response spectrum of input motions modified to match Korean Design Standard

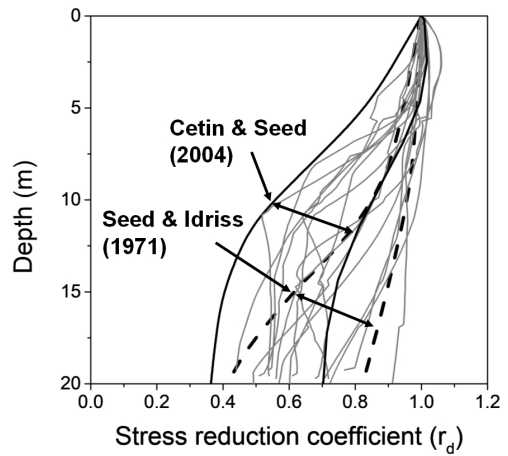


Fig. 8. Comparison of stress reduction coefficients obtained from the present study

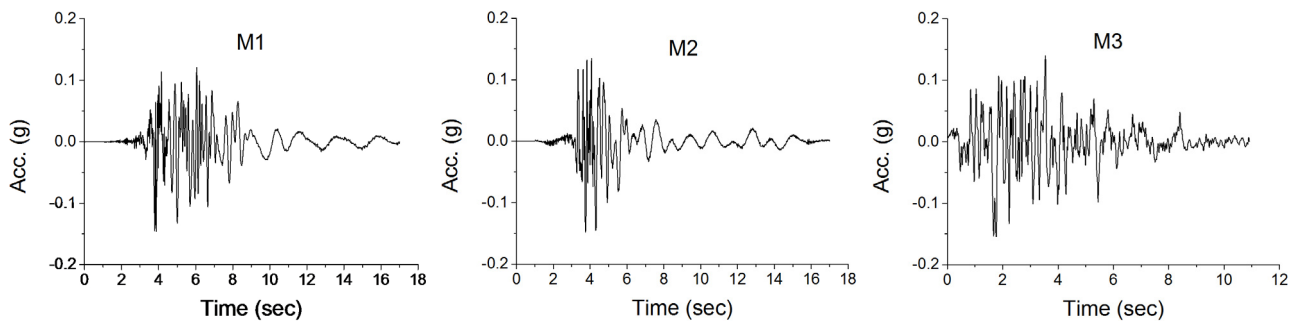


Fig. 7. Acceleration-time history of input motions

으로 나타났다. 그런데, Seed & Idriss는 응력감소계수를 깊이의 단일변수에 대한 함수로 제안하였다. 이와 달리, Cetin and Seed(2004)는 심도, 모멘트 규모, 12m 깊이 평균 전단파 속도 등을 종합적으로 고려하여 응력감소계수를 제안하였다. 실제, Seed & Idriss의 제안 범위에서 왼쪽으로 벗어난 7개 곡선은 모멘트 규모 6.8 이하, 지표면 최대지반가속도 범위 0.12~0.23g, 12m 깊이 평균 전단파 속도 160m/s 이상의 조건에 대해 Cetin & Seed가 제안한 응력감소계수 곡선의 ± 1 표준편차 범위 내에 포함되었다.

3.3 진동전단응력비 산정 결과 비교

미연방도로국(Marsh et al., 2014), 일본도로협회(JRA, 2012), 국내설계기준(MOF, 2018)의 3가지 기준으로 산정한 진동전단응력비를 비교하였다. 미연방도로국과 일본도로협회의 산정법에서 지표면 최대지반가속도는 해당 국가의 지역 특성에 맞춰 제안된 도표에서 선택하도록 하고 있으나, 다른 기준과의 비교를 위해 지반응답해석에서 얻은 지표면 최대지반가속도 값을 적용하였다. 또한, 미연방도로국과 국내설계기준은 평균전단응력비를 사용하고 일본도로협회는 최대전단응력비를 사용하고 있으므로 일본도로협회의 진동전단응력비에 0.65를 곱하여 동일한 조건에서 비교 분석을 수행하였다.

각 방법의 타당성을 평가하기 위하여 지반응답해석

에서 얻어진 진동전단응력비를 정해로 간주하였다. 그리고, 오차는 각 방법에 따라 산정한 진동전단응력비와 정해의 차이를 의미하며 오차율은 오차의 절댓값을 정해로 나눈 값으로 정의하였다. 깊이에 따른 최대 및 평균 오차율과 해석 사례별 오차율의 평균을 산정하였다. 또한, 깊이에 따른 경향성을 확인하기 위해 높은 오차율을 보인 해석 사례에 대해 진동전단응력비를 직접 비교하였다.

전체 15개 해석조건에 대하여 산정된 깊이에 따른 최대 및 평균 오차율과 해석 사례에 따른 평균을 Table 1에 요약하였다. 깊이에 따른 최대 및 평균 오차율은 모두 국내설계기준을 따를 때 나타났으며, 각각 142%와 54%(CH-1, M2 조건)로 나타났다. 해석 사례에 따른 오차의 평균값도 국내설계기준에서 최대로 나타났다.

국내설계기준을 따를 때 큰 오차를 보인 해석조건에 대하여 깊이에 따른 진동전단응력비의 경향성을 분석하고자 Fig. 9에 각 기준별 진동전단응력비를 나타내었다. 지반응답해석 결과는 모든 사례에서 깊이에 따라 증가하다가 최댓값에 도달한 후 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 미연방도로국과 일본도로협회 기준은 해석 결과의 경향을 비교적 잘 모사하였으나 최댓값 이후 깊이에서 해석 결과보다는 다소 작은 감소 경향을 나타내었다. 그러나 국내설계기준은 깊이별 최대지반가속도 값의 변화 경향을 그대로 추종하기 때문에 특정 깊이에서 급격히 감소하거나 증가하는 경향을 보여주었다.

Table 1. summary of maximum and mean percent error for CSR

Site	Motion	Maximum percent error (%)			Mean percent error (%)		
		FHWA	JRA	KDS	FHWA	JRA	KDS
CH-1	M1	48	35	113	25	13	45
	M2	57	32	142	24	12	54
	M3	49	31	103	18	11	37
CH-2	M1	73	43	59	35	22	35
	M2	83	67	114	42	28	37
	M3	46	30	65	25	15	29
CH-3	M1	100	67	11	42	29	5
	M2	65	45	9	38	26	7
	M3	41	45	45	9	12	18
CH-4	M1	47	23	103	22	11	26
	M2	27	9	41	5	6	12
	M3	80	49	86	22	11	23
CH-5	M1	5	20	62	2	10	12
	M2	22	12	38	5	7	13
	M3	55	28	60	15	8	17
Average		53	36	72	22	15	25

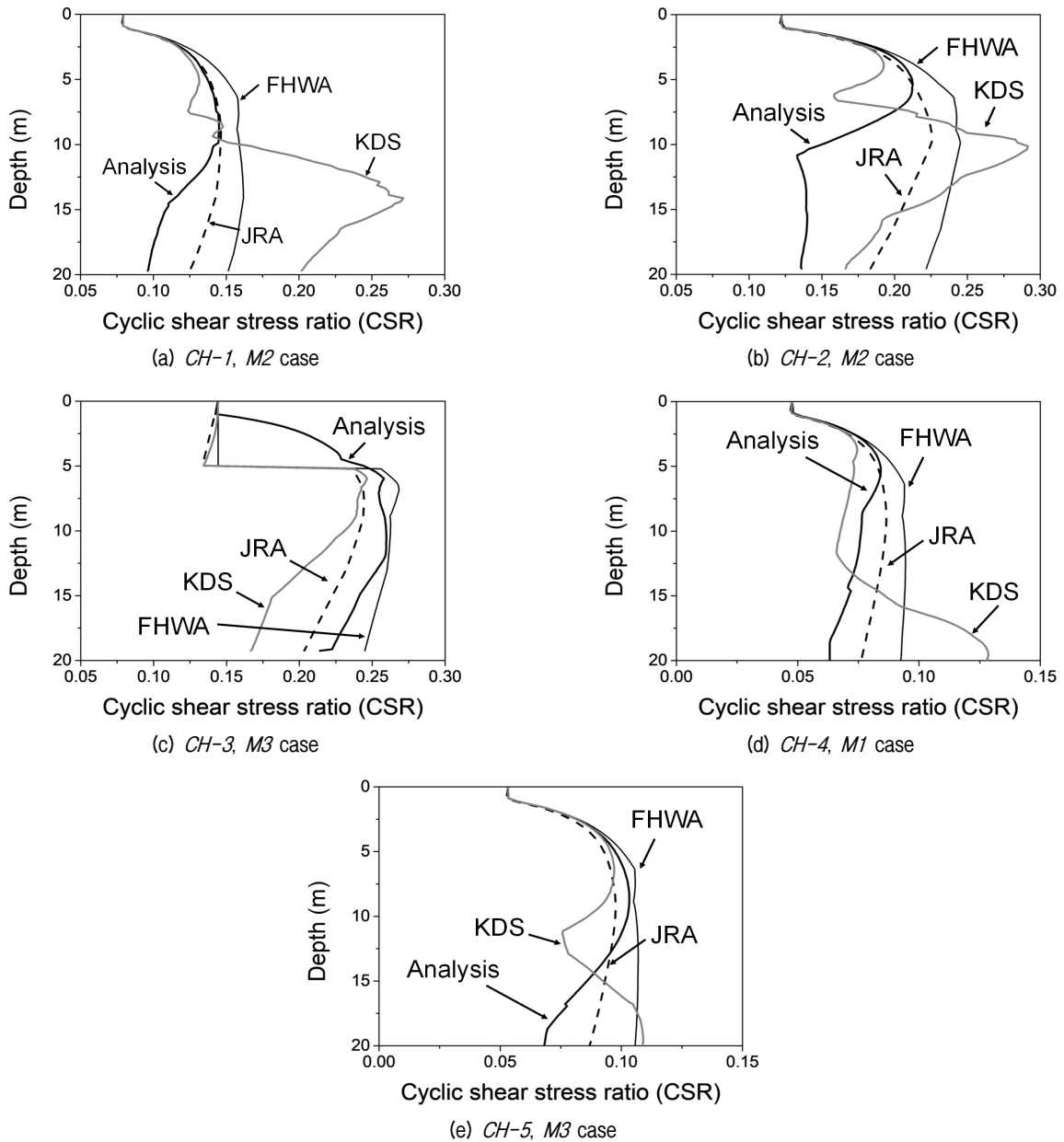


Fig. 9. Comparison of CSR from each method

3.4 국내설계기준 검토

국내설계기준의 진동전단응력비는 지반응답해석 결과와 다른 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 국내설계기준이 깊이별 최대지반가속도를 이용하여 진동전단응력비를 산정하기 때문이다. 국내설계기준은 Seed & Idriss 간편법을 수정하면서 식 (7)의 관계식, 즉 깊이별 최대지반가속도, $a_{max,depth}$ 를 지표면 최대지반가속도, a_{max} 로 나누는 깊이 응력감소계수와 같다고 간주하였으며, Farrokhzad and Janalizadeh(2017)도 동일한 관계식을 활용하여 응력감소계수를 산정한 바 있다. 그러나 원래 Seed and

Idriss(1971)가 제안한 응력감소계수는 최대진동전단응력의 비로 정의된다.

$$r_d = \frac{(\tau_{max})_d}{(\tau_{max})_r} \neq \frac{a_{max,depth}}{a_{max}} = (r_d)_a \quad (7)$$

where, $(r_d)_a$ = stress reduction coefficient as the ratio of the peak ground acceleration

Seed & Idriss가 제안한 응력감소계수와 국내설계기준의 응력감소계수 정의가 같아지려면 식 (8)의 관계가

성립해야 한다.

$$(\tau_{max})_d = a_{max,depth} \times \sigma_v \quad (8)$$

즉, 지반응답해석에서 얻어지는 최대진동전단응력이 그 깊이의 최대지반가속도와 상재하중의 곱과 같아야 한다. 그러나, 이 조건은 특정 깊이 상부의 토체가 강체일 경우에만 성립한다. 실제 토체는 Fig. 10과 같이 깊이별, 특정 시점별로 가속도가 모두 달라지며 이를 반영해야만 지반응답해석의 최대진동전단응력이 얻어진다.

식 (7)의 성립 여부를 정량적으로 평가하기 위하여 최대지반가속도의 비로 정의된 응력감소계수, $(r_d)_a$ 에 대한 최대진동전단응력의 비로 정의된 응력감소계수, r_d 의 비를 사용하였다. 전체 비교 결과를 Fig. 11(a)에 나타내었고, 사질토 단일토층의 지반조건과 다층지반조건

의 비교를 위해 깊이별 응력감소계수의 비를 지층 정보와 함께 Fig. 11(b)에 나타내었다.

다수의 해석조건에서 응력감소계수의 비는 1보다 큰 값을 나타내었으며, 최대 약 2.3배(CH-1 M2)의 차이를 보였다. 사질토와 점토로 구성된 다층지반조건에서 응력감소계수의 비는 지표 근처에서 1에 가까운 값을 나타내다가 점토층 전후로 급격히 증가하는 경향을 나타내었고 다시 사질토층을 만나면 감소하는 경향을 나타내었다. 예외적으로, 사질토 단일토층의 지반조건(CH-3)에서는 응력감소계수의 비가 1에 가깝거나 작은 값을 나타내었다. 이와 같은 경향은 Fig. 9(c)의 결과처럼 진동전단응력비를 과소평가하여 위험층의 설계를 유발할 수 있다.

그러므로, 국내 액상화 평가에서 진동전단응력비는 식 (9)와 같이 깊이별 최대지반가속도를 사용하는 대신 지반응답해석에서 얻어진 깊이별 최대전단응력을 직접 적용하는 것이 필요하다.

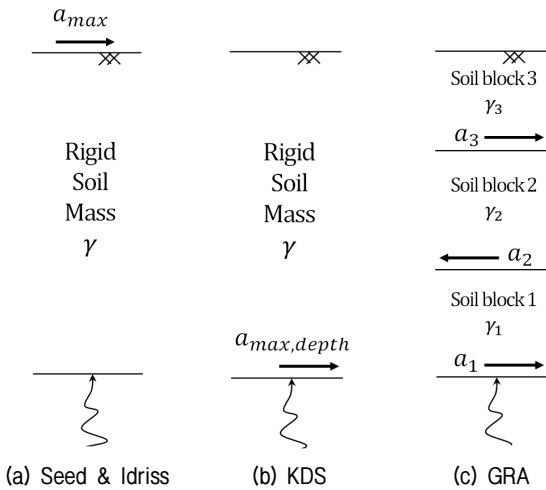


Fig. 10. Conditions for calculating maximum shear stress

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{(\tau_{max})_{d,GRA}}{\sigma'_v} \quad (9)$$

4. 결론

본 연구에서는 지반조건과 입력지진파를 변화시키며 총 15개 조건에 대한 지반응답해석을 수행한 후 각 기준별로 산정된 진동전단응력비를 비교하고 국내설계기준의 타당성을 분석하였다.

- (1) 본 연구에서 산정한 깊이별 응력감소계수 중 일부는 Seed and Idriss(1971)가 제안한 범위에서 벗어나는

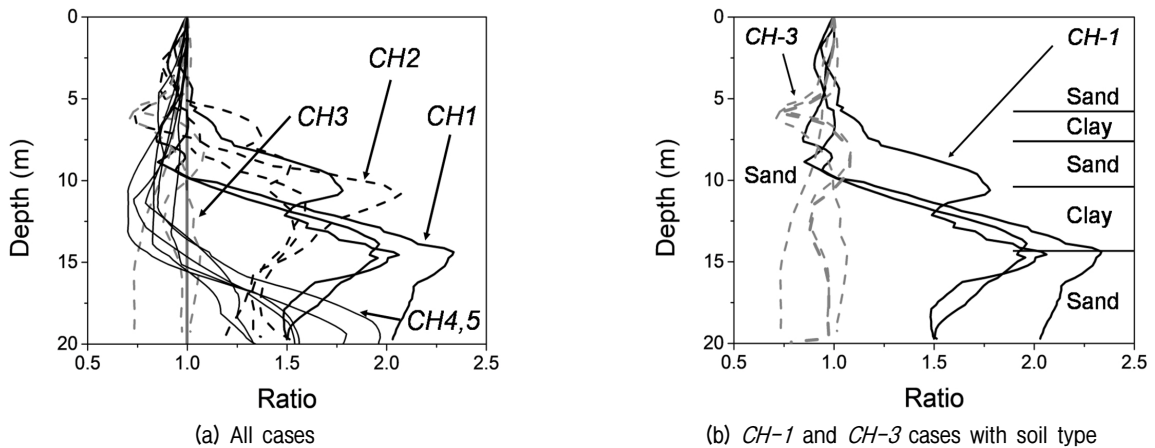


Fig. 11. Comparison of the ratio of stress reduction coefficient

결과를 나타내었다. 그러나, Cetin and Seed(2004)가 지진의 모멘트 규모, 지표면 최대지반가속도, 12m 깊이 토층 평균 전단파 속도를 고려하여 제안한 깊이별 응력감소계수 범위에 포함되어 기존 연구와 일치하는 결과를 나타내었다.

- (2) 미연방도로국(Marsh et al., 2014), 일본도로협회(JRA, 2012), 국내설계기준(MOF, 2018)의 3가지 기준으로 산정한 진동전단응력비를 지반응답해석의 정해와 비교한 결과, 국내설계기준은 가장 큰 오차를 나타내었고, 깊이별 최대지반가속도의 변화 경향을 그대로 추종하여 특정 깊이에서 급격히 감소하거나 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 국내설계기준이 응력감소계수를 최대진동전단응력의 비가 아닌 최대지반가속도의 비로 정의하는 오류가 있었기 때문이다.
- (3) 최대진동전단응력의 비로 정의된 응력감소계수와 최대지반가속도의 비로 정의된 응력감소계수를 비교하여 국내설계기준의 타당성을 분석하였다. 다층지반조건에서 두 응력감소계수의 비는 1보다 큰 값을 나타내었으며, 최대 약 2.3배의 차이를 보였다. 반면 사질토 단일토층 지반조건에서 두 응력감소계수의 비는 1에 가깝거나 작은 값을 나타내었다. 그러므로 향후 국내 액상화 평가법에서 진동전단응력비를 산정할 때 깊이별 최대지반가속도 대신 지반응답해석에서 직접 구해지는 깊이별 진동전단응력비를 적용하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 대림수암장학문화재단의 지원 및 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(항만 및 어항설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계 기술 개발).

참고문헌 (References)

1. Cetin, K. O. and Seed, R. B. (2004), "Nonlinear Shear Mass Participation Factor (rd) for Cyclic Shear Stress Ratio Evaluation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.24, No.2, pp.103-113.
2. Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., and Powell, D. (1982), Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method (Vol. 138). Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards.
3. Marsh, M. L., Buckle, I. G., and Kavazanjian, E. (2014), LRFD

- seismic analysis and design of bridges (reference manual). FHWA NHI-15-004.
4. Farrokhzad, F. and Janalizadeh, A. (2017), "Depth Reduction Factor Assessment for Evaluation of Cyclic Stress Ratio Based on Site Response Analysis", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.54, No.4, pp.244-252.
5. Golesorkhi, R. (1989), Factors influencing the computational determination of earthquake-induced shear stresses in sandy soils, University of California, Berkeley.
6. Ishihara, K. (1977), "Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.1-17.
7. Ishihara, K. (1985), "Stability of Natural Deposits during Earthquakes", *Proc. of 11th ICSMFE*, 1985, 1, pp.321-376.
8. Imai, T., Tonouchi, K., and Kanemori, T. (1981), The simple evaluation method of shear stress generated by earthquakes in soil ground, Rep. 3, pp.39-58.
9. Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. I. (1984), "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction during Earthquakes", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.3, No.1, pp.49-58.
10. Iwasaki, T. (1986), "Soil Liquefaction Studies in Japan: State-of-the-art", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.5, No.1, pp.2-68.
11. JRA (2012), 5 Seismic Design Guide specifications for highway bridges, the commentary, Japan road association, Japan.
12. MLIT (2018), general Seismic design (KDS 17 10 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
13. MOF (2018), Harbour and Fishery design criteria·design code (KDS 64 17 00), Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.
14. Kim, S. I., Park, I. J., and Choi, J. S. (2000), "A Study on the Assessment of Liquefaction Potential in Korea", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.2C, pp.129-129.
15. Kramer, S. L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
16. Kishida, T., Boulanger, R. W., Abrahamson, N. A., Driller, M. W., and Wehling, T. M. (2009), Seismic response of levees in the Sacramento-San Joaquin Delta, *Earthquake spectra*, Vol.25, No.3, pp.557-582.
17. Maurer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M., and Bradley, B. A. (2014), "Evaluation of the Liquefaction Potential Index for Assessing Liquefaction Hazard in Christchurch, New Zealand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.140, No.7, 04014032.
18. Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A. (1979), "A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.4, pp.659-678.
19. ProShake User's Manual (1996), Ground Response Analysis Program, Version 2.0. EduPro Civil systems, Inc. Sammamish, Washington.
20. Russell, J. and van Ballegooy, S. (2015), Canterbury Earthquake Sequence: Increased Liquefaction Vulnerability Assessment Methodology, Tonkin & Taylor Ltd, New Zealand.
21. Rashidian, V. and Gillins, D. T. (2018), Modification of the liquefaction potential index to consider the topography in Christchurch, New Zealand. *Engineering Geology*, 232, pp.68-81.
22. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Rep. No. EERC 70-10.

- Earthquake Engineering Research Centre, Berkeley, CA.
23. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
 24. T&T (2013), Liquefaction vulnerability study, Tonkin & Taylor Ltd, New Zealand.
 25. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of geotechnical engineering*, Vol.117, No.1, pp.89-107.
 26. 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 geoenvironmental engineering*, Vol.127, No.4, pp.297-313.
 27. Yoshida, N. (2015), *Seismic Ground Response Analysis*, Springer, Berlin, Germany.
 28. Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. W. (2002), "Estimating Liquefaction-induced Ground Settlements from CPT for Level Ground", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.5, pp.1168-1180.

Received : March 27th, 2019

Revised : May 7th, 2019

Accepted : May 8th, 2019