

간편법을 이용한 액상화 평가 기준에 대한 고찰

Overview on Standards for Liquefaction Triggering Evaluation using the Simplified Method

김연준¹⁾ · 고길완²⁾ · Manandhar Satish³⁾ · 김병민⁴⁾ · 김동수^{5)*}

Kim, Yeon-Jun¹⁾ · Ko, Kil-Wan²⁾ · Manandhar, Satish³⁾ · Kim, Byungmin⁴⁾ · Kim, Dong-Soo^{5)*}

¹⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 석사과정, ²⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후연구원, ³⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정, ⁴⁾울산과학기술원 도시환경공학과 조교수, ⁵⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, ²⁾Postdoctoral Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, ³⁾Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, ⁴⁾Assistant Professor, School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, ⁵⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

/ A B S T R A C T /

Evidence of liquefaction during the 2017 Pohang earthquake has highlighted the urgent need to evaluate the current seismic design standard for liquefaction in Korea, particularly the liquefaction triggering standard. With the simplified method, which is the most popular method for evaluating liquefaction triggering, the factor of safety for liquefaction triggering is calculated via the cyclic stress ratio (CSR) and the cyclic resistance ratio (CRR). The parameters in the CSR and CRR have undergone changes over time based on new research findings and lessons learned from liquefaction case-histories. Hence, the current design standard for liquefaction triggering evaluation in Korea should also reflect these changes to achieve seismic safety during future earthquakes. In this study, liquefaction susceptibility criteria were discussed initially and this was followed by a review of the current liquefaction triggering codes/guidelines in other countries and Korea. Next, the parameters associated with the CSR such as the maximum ground acceleration, stress reduction factor, magnitude scaling factor, and overburden correction factor were discussed in detail. Then, the evaluation of the CRR using the SPT N-value and CPT qc-value was elaborated along with overburden and clean-sand correction factors. Based on this review of liquefaction triggering evaluation standards, recommendations are made for improving the current seismic design standard related to liquefaction triggering in Korea.

Key words: Liquefaction, Simplified method, Triggering evaluation, Seismic design code

1. 서론

지반 액상화는 지반에 반복하중을 가할 시 지반이 강성과 전단 강도를 상실하여 액체처럼 거동하는 현상이다. 지진 시 지반 액상화는 1964년 니가타 지진(규모 7.5)과 알래스카 지진(규모 9.2) 이후 내진설계 또는 내진 성능평가에 있어 중요한 쟁점이 되었다. 내진설계를 위한 액상화 평가 방법 중 Seed and Idriss[1]에 의해 개발된 간편법은 액상화 평가의 대표적인 방법으로 소개된다. 간편법은 액상화 발생 가능성을 진동전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 진동전단저항비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)의

비로 평가하는 방법이다. CSR은 지반에 가해지는 반복 전단응력을 초기 유효 구속압으로 나누어 준 값이며, CRR은 주어진 하중 재하 횟수에서 지반 액상화가 발생하는데 필요한 CSR 값이다[1]. 이때 현장 지반의 CRR은 표준 관입시험(Standard Penetration Test, SPT), 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)과 전단파속도(V_s)[2-4]를 통해 구할 수 있다.

우리나라에서 간편법에 관한 연구는 활발히 진행되어왔지만[5-7], 2017년 포항 지진(규모 5.4) 이후 그 필요성이 더욱 강조되었다. Baek et al.[8]은 LPI(Liquefaction Potential Index) 지수[9]로 포항 지역의 액상화 위험도를 평가하였다. Ahn et al.[10]은 Baek et al.[8]의 연구를 바탕으로 1차원 지반응답해석을 통해 포항 지역의 액상화 발생 정도를 재확인하였다. Yoo et al.[11]은 국내외 기준에서 제안한 방법으로 포항 액상화 발생지역의 CSR을 계산하였다. 또한, Park et al.[12]은 액상화 발생 지역의 시료를 이용하여 반복직접전단시험을 수행하고 시험결과를 통해 해당지역의 지반

*Corresponding author: Kim, Dong-Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received April 27, 2020; Revised July 9, 2020; Accepted July 29, 2020)

물성을 평가하였다. Bong et al.[13]은 CPT를 통한 세립분 함량 예측식의 유효성을 평가하였으며, 포항 지역의 CPT 결과를 이용해 예측식 결과와 실제 결과의 오차를 분석하였다. Song et al.[14]은 표준관입치(SPT-N)값과 V_s 값을 이용한 CRR을 비교하였다. Jang et al.[15]은 국내 내진설계에 활용되는 지진파와 설계 응답스펙트럼에 부합하는 국내외 7개 지진파를 선정하고, 선정된 지진파를 통해 지반응답해석을 수행하였다. 해석 결과 입력 지진파가 액상화 평가에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 앞서 언급된 연구와 같이, 지금까지 포항지진과 액상화에 관한 연구는 액상화 평가에 초점이 맞추어져 있었다. 그러나, 간편법과 액상화 평가에 사용되는 변수들의 시대별 변화에 관한 문헌 연구는 부족하다.

한편, 해외 기준에서는 간편법을 액상화 평가의 주된 방법으로 사용하고 있다. 뉴질랜드 지침서(New Zealand guideline)[16], 미연방도로국(Federal Highway Administration, FHWA)[17], 일본도로협회(Japan Road Association, JRA)[18]는 액상화 평가에 간편법을 활용하며, 이에 대한 예제를 제공하고 있다. 또한, Southern California Earthquake Center(SCEC)[19], Federal Emergency Management Agency(FEMA, 750)[20], Eurocode 8[21], 일본항만표준[22]은 간편법을 설계기준으로 준용하고 있으며, 지속적인 연구를 통해 상세규정을 개정하고 있다. CSR의 경우 해외 기준에서는 지반 물성과 지진 특성의 영향을 보정계수로 반영하였으며, 최근 국내[23]에서도 이를 일부 반영하고 있다. CRR의 경우 지반조건과 세립분 함량은 CRR에 영향을 미치나, 이를 고려하기 위해 소개된 방법은 연구자별로 상이하다. 따라서, 본 연구에서는 액상화 평가에 대한 전반적인 과정을 소개하고 이를 통해 해외설계기준과 국내설계기준을 비교하였다. 또한, 1971년 Seed and Idriss[1]부터 현재까지 진행된 액상화 간편법에 관한 문헌들을 정리하였다. 이를 통해 CSR 및 CRR 산정에 사용되는 보정계수들이 액상화 평가에 미치는 영향을 요약하였다. 마지막으로, 액상화 평가에 사용되는 보정계수들의 시대별 변화를 요약하였다.

2. 국내외 액상화 평가 기준

2.1 액상화 평가 과정

지반 액상화를 평가하는 과정은 액상화 민감도(Susceptibility), 유발(Triggering), 그리고 결과(Consequence)로 분류된다.

민감도(Susceptibility) 평가 기준을 Table 1에 나타내었다. 민감도 평가의 목적은 액상화에 취약한 지반을 선제적으로 판단하는 것이다. 이는 지질학적 기준(Geological criteria)과 지반분류에 따른 기준(Compositional criteria)으로 나누어 수행된다. 지질학적 기준은 지층의 형성 시기를 나타낸다. 지질학적 기준에 따르면, 액상화는 신생대 제4기 이후에 형성된 지반에서 주로 발생한다[24-26]. 그러나, 지반의 연대 효과(Aging effect)를 정량적으로 평가하기 어려우므로 설계기준 및 지침서에서는 이를 간접적으로 언급하고 있다. 지반분류에 따른 기준은 소성지수(Plasticity Index, PI)를 기반으로 한다. PI에 따라 사질토 거동 혹은 점성토 거동으로 분류되며, 점성토의 경우 반복하중 재하 시 지반 액상화가 아닌 동적 연화(Cyclic softening)로 간주한다[27, 28]. 기준에는 점성토에 대한 액상화 민감도 기준으로 중국 기준을 준용하였다[29]. 그러나, 중국 기준은 액상화 발생을 과소평가하여, 현재는 뉴질랜드 지침서에서 액상화 민감도 기준으로 Boulanger and Idriss[27]와 Bray and Sancio[28]의 분류 체계를 사용하고 있다[16].

지반의 액상화 민감도 평가 후, 유발(Triggering) 평가를 통해 특정 지반의 액상화 발생 가능성을 판단한다. 유발 평가는 현장 시료를 이용한 상세법과 현장 지반조사를 통한 간편법으로 구분된다. 상세법은 현장 시료를 대상으로 진동삼축압축, 직접전단시험 등을 수행하여 현장 시료의 반복하중에 대한 액상화 저항력을 평가하는 방법이다. 그러나, 교란 시료의 경우 재성형 방법에 따라 액상화 저항력이 다르며, 비교란 시료의 경우 채취가 어렵다. 따라서 평가 기준에서는 간편법을 선호한다[16-23]. 간편법은 현장 시료 대신 현장 지반조사를 통한 현장시험값(e.g., SPT-N, CPT- q_c , 전단파 속도 등)을 사용하여 동적 응력에 따른 깊이별 안전율(Factor of safety, FS)을 평가하는 방법이다. 액상화 안전율은 액상화에 대한 저항력의 지표인 CRR과 지진 시 전단력을 표현하는 CSR의 비($FS = CRR/CSR$)로 정의된다. 간편법에 따라 안전율 1 미만의 지반층은 액상화가 발생하는 것으로 판단한다(Fig. 1). 안전율 산정에 필요한 CSR과 CRR은 지진 하중에 의한 전단력과 액상화 저항력이 초기 유효 응력으로 무차원화된 값이다. CSR과 CRR은 목적에 따라 확률론적 혹은 결정론적 방법으로 산정된다. 전반적인 간편법의 평가 과정은 Fig. 2와 같다.

CSR의 경우 Seed and Idriss[1]에서 제시된 공식을 현재까지 사용하고 있으며, 지진 및 지반 특성에 따른 CSR의 변화는 보정계수를 통해 반영될 수 있다. CSR에 관한 보정계수로는 전단응력감소계수(Stress reduction factor, r_d), 수직응력보정계수(Overburden correction factor, K_σ), 규모보

Table 1. Criteria of liquefaction susceptibility

Susceptibility	Criteria			
	Likelihood that cohesionless sediments, when saturated, will be susceptible to liquefaction			
Geological criteria [25]	Quaternary		Neogene	
	Modern < 500 yra*	Holocene 500 yra - 10 kya**	Pleistocene 10 kya - 1.6 Mya***	Pre-Pleistocene > 1.6 Mya
	Susceptibility: High	Susceptibility: Moderate	Susceptibility: Low	Susceptibility: Very Low
	PI < 7 Sand like - behavior		7 < PI < 12 Sand like - behavior	12 < PI Clay like - behavior
Composition criteria [28]	Susceptible to liquefaction		Potentially susceptible to liquefaction	
	Susceptible to liquefaction		Not susceptible to liquefaction	

yra* : years ago, kya** = thousands of years ago, Mya*** = millions of years ago

정계수(Magnitude scaling factor, MSF), 정적전단응력보정계수(Static stress correction factor, K_σ)가 있다. 정적전단응력보정계수의 경우 사면이나 댐과 같은 경사진 지반에 적용되나 활용 가능한 연구가 부족하다.

CRR의 경우 현장실험과 경험식을 통해 구한 지반의 저항값이다. CRR 산정에 필요한 경험식은 현장 자료를 바탕으로 지속해서 개선되어왔다[2, 30-35]. Youd et al.[2]은 액상화 발생자료를 토대로 CRR 값과 보정계수를 정리하였다. Cetin et al.[30, 33]은 현장 지반의 SPT 자료를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 CRR을 산정하였으며, 수정된 보정계수를 통해 결정론적 뿐만 아니라 확률론적으로도 CRR을 산정하였다. 이후 Moss et al.

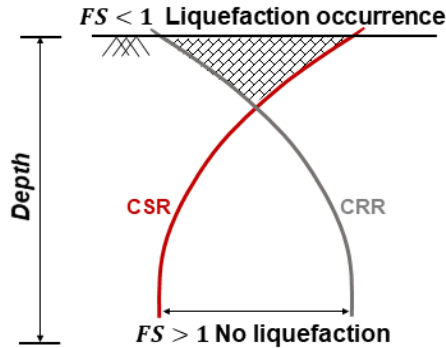


Fig. 1. Factor of safety and liquefaction occurrence

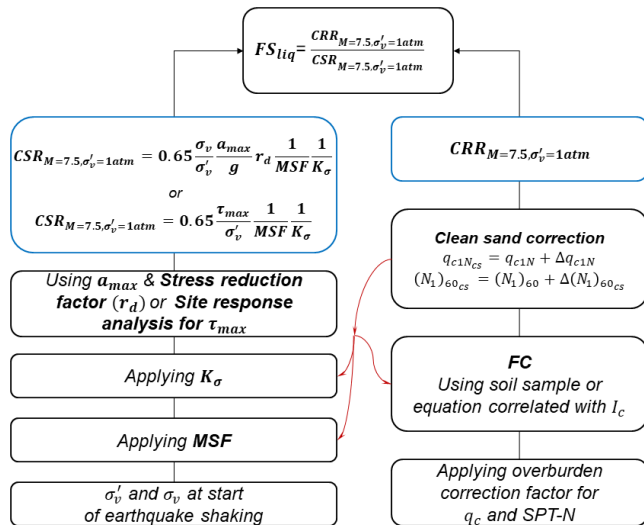


Fig. 2. Evaluation procedure of liquefaction triggering for simplified methods (Boulanger and Idriss [32])

Table 2. Comparison of liquefaction evaluation code for triggering

Code / Guideline	Triggering methods	MSF consideration	FC consideration
SCEC [19]	Simplified method	N/A	○
FEMA [20]	Simplified method	○	○
Eurocode 8 [21]	Simplified method	○	△
Japan port and harbour standard [22]	Simplified method / Detailed method	○	○
Guidelines for evaluating and improving earthquake resistance of existing facilities (Foundation and ground) [23]	Simplified method	○	○
New Zealand guideline [16]	Simplified method	○	○

[34]과 Kayen et al.[3]은 각각 콘 선단 저항치(q_c)와 V_s 를 이용하여 결정론적 및 확률론적 방법으로 CRR을 산정하였다. 한편, Idriss and Boulanger [31]은 세립분 함량(Fine Contents, FC)에 따른 현장실험 값의 변화를 등가순모래(Clean sand)로 치환하여 보정하였다. Boulanger and Idriss[32]는 기존 자료뿐만 아니라 추가된 현장 자료를 통해 세립분 보정식과 보정계수를 제안하였다. 또한, 시료 회수가 불가능한 CPT 실험의 신뢰성을 높이기 위해, Robinson et al.[36]은 지반거동유형지수(I_c)와 세립분 함량으로 특정 지반의 액상화를 판단할 수 있는 식을 정리하였다.

결과(Consequence)는 안전율, 액상화 발생 위치, 지반 및 지진 특성, 과잉간극수압 등 다양한 요소의 결합을 통해 사면이나 제방의 전단강도 손실, 지표면의 측방 유동, 구조물 피해와 재압밀 침하, 터널 및 지하 매설물의 부상 등 상세한 피해를 평가하는 과정이다. 현재의 공학적 해석법으로는 다양한 변수들을 합리적으로 고려하거나 예측하기 어려우며, 이에 따라 수치해석을 이용하는 방법을 권고하고 있다[16, 32].

2.2 국내외 설계기준 및 지침서

액상화 평가시 모든 영향 인자를 고려하기 어렵다. 따라서, 그 대안으로 응력, 변형률, 에너지 등을 기반으로 한 액상화 평가법을 사용해왔다. 이 중 응력 기반의 액상화 간편법이 편리하고 경제적이기 때문에, 국내를 비롯한 유럽, 일본, 미국 등 대부분의 국가에서 해당 방법을 보편적으로 사용하고 있다. 국내외 설계기준의 액상화 평가법과 상세기준 차이를 Table 2에 정리하였다. 국가별 설계기준은 간편법 채택 여부, 순모래 보정 여부, 규모 보정 여부에서 차이가 있다. 최근까지 이와 관련된 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으며, 그중 New Zealand guideline[16]은 최신 연구를 바탕으로 안전하고 합리적인 액상화 평가법을 제시하고 있다.

2.2.1 미국 - SCEC[19], FEMA[20]

SCEC[19]와 FEMA[20]는 Youd et al.[2]을 바탕으로 한 액상화 간편법을 규정하고 있다. 위 기준에서는 정확한 CRR 산정을 위해 현장 관입 치에 순모래 보정을 적용하고 있다[37]. 또한, 안전율과 SPT-N값을 바탕으로 피해양상을 침하(Settlement), 표면분사(Surface manifestation), 측방 유동(Lateral spreading) 세 가지로 구분하였다. FEMA[20]의 경우 안전율이 1.2 이상일 경우 액상화에 안전하다고 판단하며, 안전율이 1.2 미만일 경우 상세분석을 수행하도록 하고 있다. 또한, 지반의 자갈 유무에 따라 해

당 조건에 적합한 현장실험을 수행하도록 권장하고 있다. 한편, SCEC[19]은 민감도 기준으로 중국기준[29]을 인용하고 있으며, FEMA[20]의 경우 이를 별도로 명시하고 있지 않다.

2.2.2 유럽 - Eurocode 8[21]

Eurocode 8[21]는 Youd et al.[2]에 따른 액상화 간편법을 준용한다. Eurocode 8[21]은 CRR 산정을 위해 사용되는 추세선을 순모래와 실트질 모래에 따라 다르게 제시하고 있다. 한편, 안전율이 1.25 이상인 지반은 액상화에 안전하다고 판정하며, 구조물별 안전율을 달리 평가하였다. 또한, 액상화 평가 시 규모보정계수(MSF)를 적용하였으며, 등가 순모래에 대한 보정을 적용하고 있다. 한편, 민감도 평가 기준 중 지반분류에 따른 판단체계는 반영하지 않는다.

2.2.3 일본 - Japan port and harbour standard[22]

일본항만표준[22]은 액상화 간편법과 상세법을 모두 준용하고 있다. 또한, 안전율 평가에는 변형된 간편법을 사용하고 있다. CSR과 CRR 대신 등가 가속도 (Equivalent acceleration)와 등가 관입치(Equivalent N value)를 사용한다. 등가 관입치를 추정하기 위해 세립분 함량 뿐만 아니라 PI에 대한 연구를 반영하고 있다. 또한, 별도의 평가 과정 없이 등가 가속도와 등가 관입치 관계만으로 액상화 피해를 예측한다. 일본항만표준[22]의 경우 액상화로 인한 피해 예측까지 안전율 평가에 포함하며, 이와 같이 자국의 연구를 바탕으로 독자적인 규격을 택한 것이 특징이다. 한편, 민감도 평가의 경우 지반분류에 따른 기준은 Iai et al.[38]의 입도분포를 사용하며, PI에 따른 기준은 간편법에 포함하여 사용한다[39, 40].

2.2.4 뉴질랜드 - New Zealand guideline[16]

New Zealand guideline[16]은 Boulanger and Idriss[32]의 액상화 간편법을 준용한다. 또한, 정확한 CRR 산정을 위해 Boulanger and Idriss[32]가 제안한 등가 순모래 보정 방식을 적용하며, 시료 회수가 불가능한 CPT 실험결과에 세립분을 고려하여 CRR 경험식을 적용하였다. SPT뿐만 아니라 CPT를 이용한 액상화 평가에 대해 자세히 다루었으며, FC와 I_c 관계를 통한 액상화 평가법을 소개하였다. New Zealand guideline[16]은 세립분 보정뿐만 아니라 수직응력 보정, 규모 보정도 설명하고 있다. 민감도 평가 과정에는 지반분류에 따른 판단체계로 Boulanger and Idriss[27]와 Bray and Sancio[28]을 인용하여 비교적 최신 연구결과를 반영하고 있다.

2.2.5 국내 설계기준 - 기존 시설물 (기초 및 지반) 내진 성능 평가 요령(안) 2020[23]

국내 설계기준은 Youd et al.[2]을 바탕으로 한 액상화 간편법을 준용하였다. 그러나, ‘기존 시설물(기초 및 지반) 내진 성능 평가 요령(안) 2020’[23]에서 Boulanger and Idriss[32]를 이용한 세립분 보정과 액상화 저항비를 수정하였다. 안전율이 1.0 이상인 지반에 대해 상세평가 없이 액상화

에 안전하다고 판단한다. 한편, ‘기존 시설물(기초 및 지반) 내진 성능 평가 요령(안) 2020’[23] 통해 국외 기준에서 적용하는 등가 순모래 보정과 규모 보정을 반영하고 있을 뿐만 아니라 입도분포 기준[39]도 반영하고 있다. 이후 단원에서는 합리적인 액상화 평가를 위한 간편법의 전반적인 평가 과정과 국내에 반영되지 않은 보정계수들에 대해 고찰하였다.

3. 진동전단응력비(CSR)에 대한 고찰

액상화 평가 시 액상화를 유발하는 지진 하중은 진동전단응력비(CSR)로 표현된다. CSR 산정식은 다음과 같다.

$$CSR = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \tag{1}$$

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \tag{2}$$

여기서, τ_{max} 는 평가 깊이에서의 지진으로 인한 최대전단응력, σ'_v 는 평가 깊이에서의 유효수직응력, a_{max} 는 지표면 최대지반 가속도, g 는 중력가속도, σ_v 액상화 평가 깊이에서의 전체수직응력이, r_d 는 전단응력감소계수이다.

식(1), (2)와 같이 CSR은 최대지반가속도와 수직응력에 영향을 받는다. 수직응력은 현장지반조사를 통해 확정된 값으로 도출되는 반면, 최대지반가속도는 결정 방식에 따라 폭넓은 분산을 나타내며, 이에 따라 결과의 불확실성을 수반한다. 또한, 최대지반가속도는 추정방식에 따라 달라지고, 이에 따라 CSR 결과에 큰 영향을 미치므로 추정방식에 대한 연구자의 합리적인 판단이 요구된다. 최대지반가속도는 지진재해도, 관측소의 기록 지진, 지반 운동예측식(Ground Motion Prediction Equations, GMPE)등을 통해 결정될 수 있다(Fig. 3). 한편, r_d 를 이용하지 않는 경우 지반응답해석을 통해 깊이별 진동전단응력을 계산할 수 있다.

지진재해도를 이용한 방법은 국가지진위험지도와 재현주기를 바탕으로 a_{max} 를 결정하는 방법이다. a_{max} 는 대상 지역과 재현주기에 따른 지진 구역계수와 위험도계수, 그리고 지반 분류에 따른 증폭계수를 곱하여 추정된다. 지진재해도를 이용한 방법은 액상화 평가 지역의 정보가 제한적이거

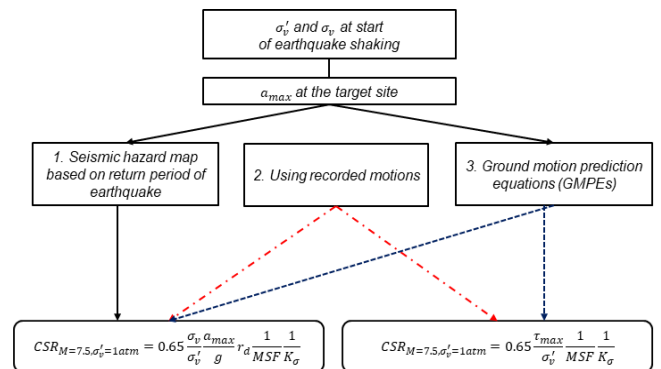


Fig. 3. Determination process for CSR

나 광범위한 대상 지역에 적용할 때 효과적이다. 그러나, 이는 국부적인 지반 특성과 권역별 특수성을 고려하기 어렵다. 따라서 액상화 검증 단계보다는 설계단계에 적합하며, Baek et al.[8]은 이와 같은 방법으로 포항 지역의 액상화 위험도를 평가하였다.

지진 기록을 이용한 방법은 설계 지진파 혹은 계측된 지진파를 사용하며, 이격거리(R_{rup})별로 관측소 지진 기록이 충분할 때 사용될 수 있다. 대상 지역의 지진파가 확보되지 않았을 때 인접한 이격거리의 두 지진 기록을 내삽하거나, GMPE로 추정된 지진파와 발생지진기록을 내삽하여 지표면 혹은 기반암의 최대가속도를 추정할 수 있다[32]. 지진 발생 이후 진원 주변의 지진 기록이 충분할 때 발생 지진의 검증과정에서 사용될 수 있다. 이 방법은 진원과의 거리별 감쇠를 개략적으로 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 관측소에서 기록된 지진파가 제한된 경우 지진파와 그에 상응하는 최대가속도 산정이 어려우며, 선정된 지진파에 따라 큰 오차를 야기할 수 있다. Ahn et al.[10]은 이와 같은 방법으로 액상화 위험도를 평가하였다.

GMPE는 발생 지진들의 회귀분석을 바탕으로 개발되었으며, 이를 통하여 지표면 혹은 기반암의 응답스펙트럼을 예측할 수 있다. GMPE를 사용하기 위해서는 활성단층 및 대상 지반의 정보와 모델을 결정해야 한다. GMPE 모델로는 NGA-West, NGA-West2, NGA-East 등이 있으며, Baek et al.[40]는 NGA-West2 모델의 국내 적용 여부를 확인하였다. NGA-West2의 경우 NGA-West를 보완하기 위해 만들어졌으며, 미서부의 얇은 지각 지진을 기반으로 개발되었다. 이는 기존 모델과 달리 5%의 기준값 감쇠 효과를 반영하였으며 NGA-West에는 부족하였던 규모별 지진 자료를 추가로 반영하였다[40]. NGA-West2의 예측 모델은 총 5개(i.e., ASK14, BSSA14, CB14, CY14, I14)가 있다. 각각의 모델은 단층 함수에 따라 기여도를 다르게 하여 가중치를 적용하는 것이 특징이다. 각각의 모델은 거리 관련 함수, 사건 관련 함수, 부지 관련 함수로 나뉜다. 거리 관련 함수는 이격거리, 최근접거리(R_{JB}), 단층 직교면과의 수직거리(R_x), 단층 직교면과의 수평거리(R_{y0})로 구성된다. 사건 관련 함수는 역단층(F_{RV}), 정단층(F_{NM}), 단층의 역방향(Hanging wall fault, F_{HW})등으로 구성된다. 부지 관련 함수는 30 m의 평균 전단파속도 ($V_{s,30}$), 전단파속도가 1 km/s가 되는 깊이 ($Z_{1.0}$), 전단파속도가 2.5 km/s가 되는 깊이($Z_{2.5}$), 그리고 단층 넓이 (W)로 구성된다. 각 모델 별 가중치 설정 후 각각의 변수에 적절한 값을 입력하면 a_{max} 와 지표면 응답스펙트럼을 획득할 수 있다. 한편, $V_{s,30}$ 에 기반암 전단파속도를 입력할 경우 기반암의 최대지반가속도와 응답스펙트럼을 얻을 수 있다. GMPE는 진원과 거리별 계측기록에 대한 정보가 부족할 때 사용하여 합리적인 결과를 도출할 수 있다. 그러나, 아직까지 국내 지반에 적합한 모델은 부족하다. 예를 들어, NGA-West2의 경우 국내와 다른 환경의 지진 기록을 토대로 개발되었기 때문에 NGA-West2를 국내에 적용할 경우 지반 운동이 단주기 영역에서는 과소평가, 장주기 영역에서는 과대평가될 수 있다. NGA-East GMPE는 진앙 주변에서 단주기의 지반 운동 가속도를 과하게 예측하는 면이 있어 국내 지반운동을 정확히 예측할 수는 없다. 이처럼 해외에서 개발된 GMPE 모델을 국내에 적용하기 위해서는 추가적인 검증과정이 필요하다.

앞서 언급된 과정들을 통해 평가대상 지반 기반암의 지진파를 획득한 후, 지반응답해석을 수행하여 깊이별 CSR을 산정할 수 있다. 이 경우 CSR은 식 (1)과 같이 표현되며, 등가선형해석 혹은 비선형해석을 통해 깊이별

τ_{max} 를 직접적으로 획득할 수 있다. 지반응답해석을 이용한 CSR 평가는 중요한 부지나 복잡한 지반층을 평가할 때 적합하나, 지진파의 가속도 시간 이력을 적절하게 선정해야 하므로 연구자의 숙련도가 중요하다.

한편, 지표면 최대지반가속도(a_{max})를 획득할 경우, 지반응답해석을 수행하지 않고 r_d 를 적용하여 식 (2)와 같이 깊이별 최대지반가속도를 간편하게 추정할 수 있다. 이는 평가대상 지반의 정보가 부족하거나 지진파 선정이 어려운 경우 깊이별 CSR 값을 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, a_{max} 산정의 불확실성 때문에 CSR을 정확하게 평가하지 못하는 단점이 있다.

CRR은 위 두 가지 방식을 통해 추정된 CSR과 다른 조건(강진지속시간, 상부압력)에 해당하며, 이는 다음과 같이 보정될 수 있다.

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \frac{CSR_{M, \sigma'_v}}{MSF \times K_\sigma} \quad (3)$$

$$FS = \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}}{(CSR_{M, \sigma'_v} / (MSF \times K_\sigma))} \quad (4)$$

여기서, $CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1}$ 은 1기압, 규모 7.5 수준의 진동전단응력비, $CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}$ 은 1기압, 규모 7.5 수준의 진동전단저항비이다.

CRR은 강진지속시간과 상부압력에 영향을 받는다. 반면, CSR은 고정된 조건에서 도출되지 않으므로 보정계수를 통해 동일한 수준의 규모와 수직응력으로 보정하는 과정이 필요하다. 이는 각각 MSF와 K_σ 에 해당하며 후술 되는 단원을 통해 각 보정계수의 도입배경과 발전과정을 서술하였다.

3.1 응력감소계수(Stress reduction factor, r_d)

Seed and Idriss[1]는 지반응답해석을 수행하지 않고 응력감소계수를 이용하여 깊이별 CSR을 구할 수 있는 응력감소계수의 경험식을 제안하였다. Fig. 4와 같이 강체로 가정된 지반이 최대 지반가속도(a_{max})로 운동할 때 깊이(h)에 해당하는 강체 지반의 최대전단응력($(\tau_{max})_r$)은 아래와 같다.

$$(\tau_{max})_r = \gamma h \frac{a_{max}}{g} \quad (5)$$

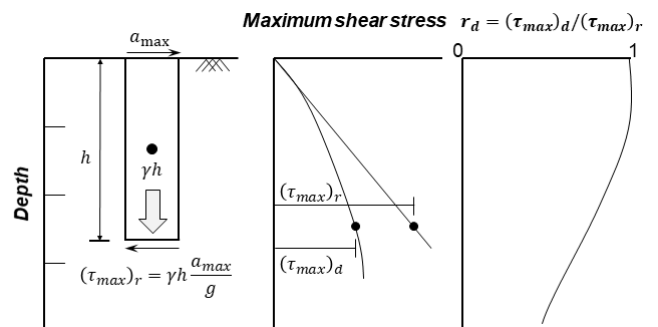


Fig. 4. Schematic for determining maximum shear stress and the stress reduction factor [41]

Table 3. Various equations for stress reduction factor

	Main parameters	Equations
Liao and Whitman [42]	Depth	$r_d = (1 - 0.0765z), z \leq 9.15m,$ $r_d = (1.174 - 0.0267z), 9.15 m \leq z \leq 23 m$
Idriss [41]	Depth, Magnitude	$r_d = \exp[\alpha(z) + M_w \times \beta(z)]$ $\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$ $\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$
Youd et al. [2]	Depth	$r_d = \frac{(1.00 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.00 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2)}$
Cetin et al. [30]	Depth, Magnitude, Shear wave velocity	$r_d = \frac{(1.00 + \frac{-23.013 - 2.949 \frac{PGA}{g} + 0.999M + 0.0525 V_{s,12m}}{16.258 + 0.201e^{0.341(-z + 0.0785 V_{s,12m} + 7.586)}})}{(1.00 + \frac{-23.013 - 2.949 \frac{PGA}{g} + 0.999M + 0.0525 V_{s,12m}}{16.258 + 0.201e^{0.341(0.0785 V_{s,12m} + 7.586)}})}$
Kishida et al. [41]	Depth, Magnitude, Average shear wave velocity, Natural period of the soil	$r_d(z) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\sin \frac{\pi T_s}{2 \cdot 0.2}}{\frac{\pi T_s}{2 \cdot 0.2}} + \frac{\sin \frac{\pi T_s}{2 \cdot 1}}{\frac{\pi T_s}{2 \cdot 1}} \right)^{0.651 PGA^{0.473}} + \frac{b_2}{2} \frac{1 - S_1}{1 + S_1} \left(\frac{\sin \frac{\pi T_s}{2 \cdot 0.2}}{\frac{\pi T_s}{2 \cdot 0.2}} + \frac{\sin \frac{\pi T_s}{2 \cdot 1}}{\frac{\pi T_s}{2 \cdot 1}} \right) \right\}$ $T_s(z) = \min\left(\frac{4z}{V_s}, 0.6s\right), S_1 = S_a(1.0)/S_a(0.2)$

z : Depth, M_w : Moment magnitude, PGA : Peak ground acceleration, $V_{s,12m}$: Shear wave velocity at 12 m depth, T_s : Natural period of the soil column, \bar{V}_s : Average shear wave velocity, S_1 : Spectral acceleration ratio, $S_a(1.0)$: Spectral acceleration at 1.0 second, $S_a(0.2)$: Spectral acceleration at 0.2 second

여기서, γ_s 는 강체로 가정된 지반의 단위 중량이다.

그러나, 실제 현장지반은 강체가 아닌 변형체이다. 따라서 실제 지반에 가해지는 전단응력은 아래와 같이 표현된다.

$$(\tau_{max})_d = r_d \times (\tau_{max})_r \Leftrightarrow r_d = \frac{(\tau_{max})_d}{(\tau_{max})_r} \tag{6}$$

여기서, $(\tau_{max})_d$ 는 변형체 지반의 최대전단응력이다. r_d 는 $(\tau_{max})_r$ 와 $(\tau_{max})_d$ 의 비로 정의된다[41]. r_d 는 등가선형해석 결과를 바탕으로 제안되었다. 초기에는 r_d 의 깊이별 평균값만을 제시하였으나 최근 연구에서는 변수에 따른 회귀분석 결과를 바탕으로 다양한 매개변수에 의한 r_d 의 변화를 분석하였다. 선행 연구에서 제시된 r_d 산정식을 Table 3에 요약하였다.

Liao and Whitman[42]과 Youd et al.[2]은 지반응답해석 결과의 평균값을 이용해 응력감소계수를 깊이(z)에 따른 함수로 제시하였다. Idriss [41]는 규모(M_w)와 깊이에 따른 응력감소계수 함수는 액상화가 발생된 50개 지역에 35개의 지진파로 수행한 지반응답해석을 통해 제시하였다. Cetin et al.[30]은 액상화가 발생된 53개 지역에 42개의 지진파로 2153번의 지반응답을 수행하였으며, 해당 결과를 규모, 깊이, 그리고 12 m 깊이의 전단파속도($V_{s,12m}$)를 중심으로 회귀분석하여 매개변수에 따른 응력감소계수를 제안하였다. 이후, Kishida et al.[43]는 후속 연구로 18개 지역에 264개의 지진파로 약 23,000번의 지반응답해석을 수행하였다. 해석 결과

를 바탕으로 규모, 깊이, 평균 전단파속도(\bar{V}_s)외에 단순화된 지반의 고유주기(T_s)를 추가적으로 고려하여 응력감소계수를 제안하였다.

$$T_s(z) = \min\left(\frac{4z}{V_s}, 0.6s\right) \tag{7}$$

여기서, z 는 깊이, \bar{V}_s 는 지면으로부터의 해당 깊이까지의 평균 전단파 속도이며, 단순화된 지반의 고유주기(T_s)는 $4z/\bar{V}_s$ 과 0.6 s 중 작은 값을 택한다. Liao and Whitman[42]과 Youd et al.[2]의 응력감소계수는 손쉽게 사용할 수 있는 장점이 있지만 정확한 값을 획득하기 어렵다. Idriss[41]가 제안한 응력감소계수는 깊이 뿐만 아니라 규모에 따른 지진 응력의 변화를 추가적으로 고려하여 Liao and Whitman[42]과 Youd et al.[2]의 응력감소계수보다 정확한 값을 제공한다. 또한, 사용이 간편하여 설계기준이나 지침서에 보편적으로 사용될 수 있다. 그러나, 이는 개별적인 지반 주상도의 영향을 고려할 수 없으며, 보수적인 결과를 나타낼 수 있다. Cetin et al.[30]의 응력감소계수는 개별적인 지반 주상도의 영향을 전단파 속도로 반영하여 앞선 응력감소계수보다 정확한 값을 나타낸다고 평가받으며, 국내 연구에서도 이와 같은 결과를 확인할 수 있다[11, 44]. 그러나 Cetin et al.[30]의 CRR은 같은 조건에서 Boulanger and Idriss[32]의 CRR보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 Cetin et al.[30]의 응력감소계수를 다른 연구에서 제시된 CRR과 같이 사용하는 것은 적합하지 않다[44]. Kishida et al.[43]의

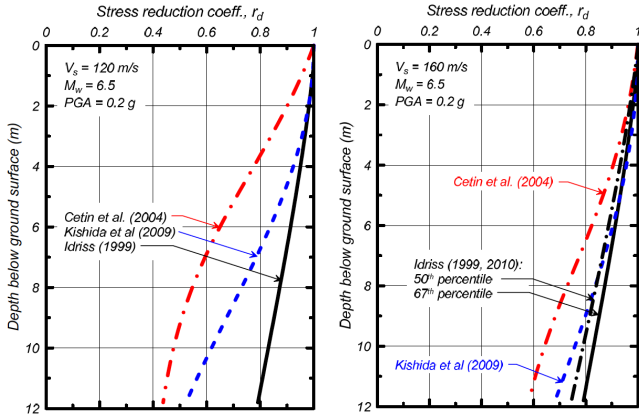


Fig. 5. Comparison of stress reduction coefficient curves [32]

응력감소계수는 보다 많은 매개변수를 고려하여 정확도를 높인 장점이 있으나 사용이 복잡한 단점이 있다. 또한, 미국 새크라멘토 제방 지역의 특정 대상지를 바탕으로 개발되었기 때문에 보편적인 지반에 대한 신뢰성 검증이 필요하다.

Fig. 5는 각각의 연구에서 제시된 응력감소계수를 동일 조건하에 도시한 그림이다. Idriss[41]의 응력감소계수가 가장 보수적인 값을 나타내며, Cetin et al.[30]의 응력감소계수가 가장 작은 값을 나타낸다. 그러나, Cetin et al.[30]를 제외한 나머지 응력감소계수는 기반암의 깊이가 깊은 미서부를 대상으로 제시되었으며, 이에 따라 기반암의 깊이가 상대적으로 얇은 국내에는 앞서 소개된 응력감소계수가 다소 보수적인 값이 될 수 있다. 따라서, 응력감소계수의 국내 적용을 위해서는 국내 지반 조건을 고려한 연구가 필요하다.

3.2 규모보정계수(Magnitude scaling factor, MSF)

Seed et al.[45]은 불규칙한 지진하중을 반복전단횟수와 등가전단응력으로 치환하는 방식을 제안하였다. Seed et al.[45]를 바탕으로 제안된 MSF는 규모에 따른 지진 지속시간효과(Duration effect)를 간편법에 고려하기 위한 계수이다.

$$MSF = \frac{CSR_M}{CSR_{M=7.5}} \quad (8)$$

여기서, $CSR_{M=7.5}$ 은 M_w 7.5에서의 CSR이다.

MSF는 실내실험과 현장 사례를 통해 지속적으로 수정되었다(Table 4). Youd et al.[2]은 기존 실내실험 결과들을 정리하여 5%의 변형률과 과잉간극수압비(r_u)가 1이 되는 반복 전단 횟수를 기준으로 MSF를 제시하였다. 이때, 계산된 MSF가 1.8 이상일 경우 일괄적으로 1.8을 적용한다. Cetin et al.[30, 33]은 액상화 발생/미발생 지역의 SPT 자료를 기반으로 회귀분석을 통해 MSF를 제안하였다. 같은 방식으로, Moss et al.[34]과 Kayen et al.[3]는 각각 CPT, V_s 를 기반으로 한 MSF를 제시하였다. 한편, Boulanger and Idriss[32]는 상대밀도와 세립분 함량에 따라 달라지는 반복전단횟수의 비를 고려하여 MSF를 수정하였다.

Youd et al.[2], Cetin et al.[30]이 제시한 MSF는 현장지반의 정보 없이 손쉽게 사용될 수 있으나, 지반 물성의 영향을 고려하지 못했다. Cetin et al.[30, 33]에서 제시한 MSF는 M_w 가 주로 6.9부터 7.4인 자료를 바탕으로 개발되었다. 따라서 해당 범위의 지진에서는 정확한 MSF 값이 제시될 수 있으나, 해당 범위를 벗어나는 규모에 대해서는 MSF의 신뢰성이 낮을 수 있다. Boulanger and Idriss[32]에서 제시한 MSF는 상세한 흙의 물성치를 입력하여 정확한 MSF를 산정할 수 있으나, 현장지반 물성과 해당 지반의 세립분 함량 값이 필수적이다. 즉, 충분한 현장 자료를 보유하고 있거나 중요 시설물의 액상화 평가를 수행하는 경우 Boulanger and Idriss[32]의 MSF를 사용하는 것이 적합하나, 주어진 정보가 부족한 경우 Youd et al.[2]의 MSF를 사용하는 것이 적합할 수 있다. 한편, 낮은 규모에 적합한 MSF에 관한 다양한 연구가 진행 중이며, MSF의 국내 적용을 위해 중약진에 적합한 MSF 산정이 필요하다.

3.3 수직응력보정계수(Overburden correction factor)

K_σ 는 CSR과 CRR을 같은 수직응력 조건에서 비교하기 위해 도입되었다. 이는 구속압이 지반의 팽창(Dilation)이나 수축(Contraction) 거동에 미치는 영향을 고려하기 위한 계수이다.

Table 4. Various equations for magnitude scaling factor

	MSF	Remark
Youd et al. [2]	$10^{2.24} / M_w^{2.56}$	Lab test based
Cetin et al. [30], Moss et al. [34]	$17.84 \cdot M_w^{-1.43}$	SPT, CPT based
Kayen et al. [3]	$15 M_w^{-1.342}$	V_s based
Boulanger and Idriss [32]	$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) (8.64 e^{-M_w/4} - 1.325),$ $MSF_{max} = 1.09 + \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right\}^2 \leq 2.2$ $MSF_{max} = 1.09 + \left\{ \frac{(q_{c1.Ncs})}{180} \right\}^3 \leq 2.2$	Fine contents, Relative density consideration
Cetin et al. [33]	$\left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.324} \quad 5.5 \leq M_w \leq 8.4$	SPT based

$(N_1)_{60cs}$: Standard penetration test N-value for equivalent clean-sand, $q_{c1.Ncs}$: Cone penetration test q-value for equivalent clean-sand

Table 5. Various equations for overburden correction factor

	Equations	Remark
Hynes and Olsen [46]	$K_{\sigma} = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{-(1-f)}$	$D_r = 40 \sim 60 \%, f = 0.7 \sim 0.8$ $D_r = 40 \sim 60 \%, f = 0.6 \sim 0.7$
Boulanger [47]	$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1$ $C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1,Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$ $C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3$	$(N_1)_{60cs} \leq 3$ $q_{c1,Ncs} \leq 2117$

P_a : Atmospheric pressure, f : Exponential function of site condition, C_{σ} : Normalized overburden coefficient

$$K_{\sigma} = \frac{CRR}{CRR_{\sigma'_v=1}} \tag{9}$$

여기서, $CRR_{\sigma'_v=1}$ 은 대기압 조건에서의 CRR이다.

Hynes and Olsen[46]은 순모래(Clean sand)를 이용한 실내실험 결과를 바탕으로 σ'_v , 대기압(P_a), 상대밀도에 따른 K_{σ} 를 정리하였다. 이후, Boulanger[47]는 SPT-N, CPT- q_c 값을 K_{σ} 에 반영하기 위한 수직응력 정규화계수(C_{σ})를 제안하였고, 이를 바탕으로 K_{σ} 를 개선하였다(Table 5).

일반적으로 액상화 간편법은 깊이가 20 m보다 얇은 지반에서 수행되며, 자유장에서 K_{σ} 에 따른 CRR 변화는 10% 이내이다. 한편, 건축물이나 대규모 토목 구조물 등 지반에 가해지는 상재 하중이 큰 경우 K_{σ} 를 신중히 고려해야 한다. 그러나 실내실험에서는 구조물이 가하는 상재 하중을 재현하기 어려우므로 이에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

한편, 수직응력이 보정된 SPT와 CPT 관입 치는 아래와 같다.

$$q_{c1,N} = C_N q_{c,N} = C_N \frac{q_c}{P_a} \tag{10}$$

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \tag{11}$$

여기서, C_N 은 관입 저항치를 위한 수직응력 보정계수, N_{60} 는 에너지 보정된 표준 관입치이다.

4. 진동전단저항비(CRR)에 대한 고찰

지반의 액상화 저항력은 반복전단횟수, 상대밀도, 구속압, 퇴적, 구조, 선행 응력-변형률 이력, 노화(Aging), 고결화(Cementation) 등 다양한 변수에 영향을 받는다. CRR에 대한 초기 연구에서는 현장 시료의 CRR을 결정하기 위해 실내실험(반복단순전단시험, 반복삼축실험)을 수행하였다. 실내실험 시 일정 수준의 변형률(3~10%)에서 r_u 가 1이 되는 반복전단횟수를 통해 CRR을 결정하였다[2, 31]. 그러나, 같은 상대밀도의 현장 시료도 재성형 방법에 따라 최대 2배에 가까운 CRR 차이를 나타내며, 동결 시료를 이용한 실내실험만이 오차를 줄이고 현장 물성을 대표할 수 있다고 여겨진다[48-51]. 한편, 동결 시료의 경우 기술적, 경제적인 문제들로 인해 보편적인 사용이 어렵다. 따라서, 실내실험의 대안으로 현장실험을 이용한

CRR 평가가 대두되었다.

일반적으로 간편법을 이용한 액상화 평가에는 CPT, SPT, 전단파 속도(V_s)결과가 이용된다. SPT의 경우 관입 제약 조건이 적으며, 시료 회수를 통해 깊이별 지반주상도를 확인할 수 있다. 그러나, 액상화에 영향을 미칠 수 있는 얇은 지반층에 대한 분석이 어려우며 간극수압의 형성과 재분배에 대한 정보를 알기 어렵다. CPT의 경우 얇은 층과 간극수압 분석이 가능하며, 사질토의 수축/팽창에 대한 정밀한 판단이 가능하다. 그러나, 자갈, 조밀한 지반 및 점토 등 지반종류에 따라 실험 중 지반 교란이 발생할 수 있다. 한편, 전단파 속도(V_s)의 경우 자갈층의 물성을 추정할 수 있는 장점이 있으나 비파괴 검사 특성상 직접적인 강도 물성을 추정하기 어렵기 때문에 보조적인 목적으로 사용된다. 그러므로, 간편법을 이용한 액상화 평가 시 하나의 현장실험 결과만 사용하는 것보다, 현장지반 조건을 고려하여 다양한 방법을 교차 비교하는 것이 적절하다.

4.1 등가 순모래 보정(Clean sand correction)

액상화는 상대밀도와 세립분 함량이 낮은 사질토에서 주로 발생한다. 따라서 현장지반의 액상화 평가를 위해선 대상 부지의 상대밀도를 측정해야 하지만, 현장지반의 상대밀도는 직접적인 산정이 어렵다. 이에 따라 Fig. 6와 같이, 선행연구에서 현장 실험결과(q_c)와 상대밀도의 상관관계로 현장지반의 상대밀도를 추정할 수 있는 경험식을 개발하였다[31, 52, 53]. Fig. 7은 상대밀도와 CRR의 관계를 보여준다[32, 52]. 상대밀도가 증가함에 따라 CRR도 증가하며, 60~75%의 상대밀도를 기점으로 CRR 변화는 더욱 커진다. 한편, 실트질 지반의 경우 세립분 함량에 따라 현장 실험결과(SPT-N, q_c)가 달라지므로, 위 관계는 주로 사질토에 적용된다. 실트질 지반이 현장실험결과에 미치는 영향은 입자 크기, 지반 구조에 의한 영향으로 구분될 수 있으며, 이는 다음과 같다.

- 관입 저항치(SPT-N, q_c)는 입자의 크기와 비례하며, 세립분은 관입 저항치(SPT-N, q_c)를 감소시킨다.
- 세립분 함량이 증가할수록 지반 구조는 사질토 구조(Sand-control matrix)에서 세립분 구조(Fine-control matrix)로 변하며 이는 지반의 상대밀도를 변화시켜 액상화 저항에 영향을 미친다.

즉, 세립분에 의한 $q_{c1,N}$ 의 감소는 정확한 상대밀도 추정을 어렵게 만들며,

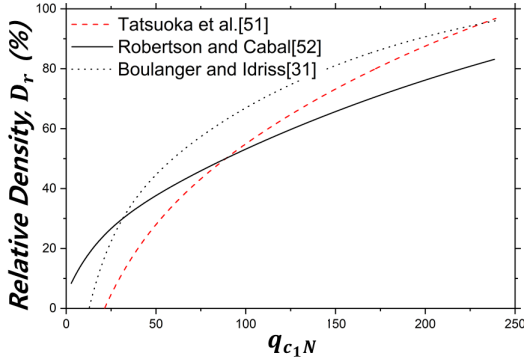


Fig. 6. Relation between q_c and relative density of soil

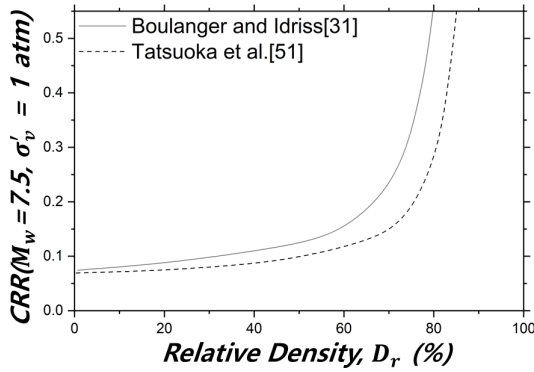


Fig. 7. Relation between relative density of soil and CRR

결과적으로 현장지반의 부정확한 CRR 산정을 야기한다. 이에 따라 초기 액상화 연구에서는 세립분 함량에 따른 CRR을 세가지 추세선(5, 15, 35%)으로 도시하였다[2]. 한편, Youd et al.[2], Cetin et al.[30, 33], Moss[34], Idriss and Boulanger[54, 55], Boulanger and Idriss[32]는 세립분 함량에 따른 q_{c1N} 변화를 고려하기 위해 순모래 보정(Clean sand correction)을 도입하였으며, 액상화 발생지역의 자료를 토대로 세립분과 q_{c1N} 의 관계를 정량화하였다.

실트질 모래를 순모래로 보정하기 위해서는 세립분 함량에 대한 추정이 필수적이다. SPT의 경우 현장시료를 회수하여 직접적으로 세립분 함량을 추정할 수 있으며, V_s 의 경우 비파괴 시험 특성에 따라 세립분에 큰 영향을 받지 않는다. 시료 회수가 불가능한 CPT의 경우 아래와 같은 식으로 세립분 함량(Fine Contents, FC)을 추정할 수 있다[32, 55, 56].

$$FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137, 0\% \leq FC \leq 100\% \quad (12)$$

$$I_c = [(3.47 - \log(Q))^2 + (1.22 + \log(F))^2]^{0.5} \quad (13)$$

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_v}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma_v} \right)^n \quad (14)$$

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_v} \right) \times 100\% \quad (15)$$

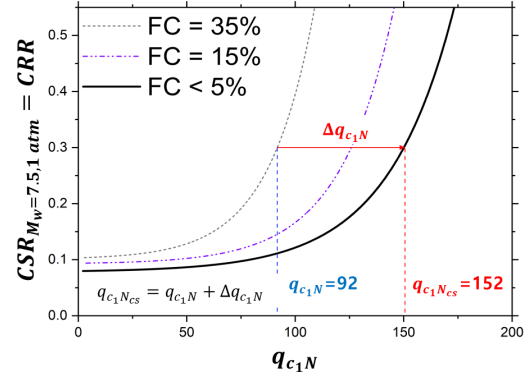


Fig. 8. Fine contents correction for determining CRR with q_c values

여기서, C_{FC} 는 단일보정계수, Q 는 정규화된 관입 비, F 는 정규화된 마찰 비, f_s 는 마찰 저항치이다. 식 (12)-(15)를 통해 세립분 함량을 고려한 q_{c1N} 을 산정할 수 있으나, 신뢰성이 높지 않아 위 방법의 단독 사용을 권장하지 않는다[13, 16].

한편, 등가 순모래 보정은 순모래 보정계수($\Delta(N_1)_{60}$, Δq_{c1N})을 통해 이루어지며, 이는 세립분을 변수로 둔 경험식에 근거한다.

$$\Delta q_{c1N} = (11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}) \exp \left\{ 1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (17)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left\{ 1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right\} \quad (18)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (19)$$

여기서, q_{c1Ncs} 는 세립분 보정된 콘 선단 저항치, $(N_1)_{60cs}$ 는 세립분 보정된 표준 관입치이다.

Fig. 8에 세립분 함량에 따른 q_{c1N} 값과 CRR의 관계를 도시하였다. Fig. 8을 이용한 순모래 보정과정의 예시는 다음과 같다. 35%의 세립분 함량을 지닌 $q_{c1N} = 92$ 의 경우 식 (16)을 통해 $\Delta q_{c1N} = 60$ 을 산정한 후, 식 (17)을 이용하여 $q_{c1Ncs} = 152$ 인 등가 순모래로 치환할 수 있다. SPT의 경우 식 (18), (19)를 이용하여 등가 순모래 보정이 가능하다.

4.2 SPT 기반 액상화 평가

SPT 기반 액상화 평가는 Seed et al.[57], Youd et al.[2], Cetin et al.[30, 33], Idriss and Boulanger[31], Boulanger and Idriss[32]를 통해 연구되었다(Table 6). Youd et al.[2]은 액상화 발생 사례를 통해 CRR 곡선을 제시하였다. 또한, 실트질 모래의 세립분 함량에 따른 순모래 보정식을 제안하였다. Cetin et al.[30, 33]은 액상화 평가를 확률론적과 결정론적 방법으로 분석하였다. Cetin et al.[30, 33]은 액상화 평가를 위해 규모, 세립분 함량, 수직 응력 등의 변수를 고려하였으며, 결정론적 방식을 통한 CRR

Table 6. Various equations for CRR using CPT

Reference	Equation	Remark
Robertson and Wride [35]	$\text{If, } (q_{c1N})_{cs} < 50, \quad CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs}/1,000] + 0.05$ $\text{If, } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 160, \quad CRR_{7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs}/1,000]^3 + 0.08$	Using $(q_{c1N})_{cs}$
Moss et al. [34]	$CRR = \exp \left[\frac{q_{c,1}^{1.045} + q_{c,1}(0.110 \cdot R_f) + c(1 + 0.850 \cdot R_f) - 0.848 \cdot \ln(M_w) - 0.002 \cdot \ln(\sigma'_v) - 20.923 + 1.632 \cdot \Phi^{-1}(P_L)}{7.177} \right]$ $CRR = \Phi - \left[\frac{q_{c,1}^{1.045} + q_{c,1}(0.110 \cdot R_f) + c(1 + 0.850 \cdot R_f) - 7.177 \cdot \ln(CSR) - 0.848 \cdot \ln(M_w) - 0.002 \cdot \ln(\sigma'_v) - 20.923}{1.632} \right]$	Probabilistic approach, Considering MSF, K_σ , FC
Boulanger and Idriss [32]	$CRR_{M=7.5, \sigma'_v = 1atm} = \exp \left\{ \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right\}$	Considering MSF, K_σ , FC

q_{c1N} : Normalized cone penetration test q-value, q_{c1Ncs} : Equivalent clean-sand cone penetration test q-value, R_f : friction ratio, Φ : The standard cumulative normal distribution function, $\Phi^{-1}(P_L)$: Inverse of the standard cumulative normal distribution function, σ'_v : Standard deviation of the model uncertainty of stress reduction factor

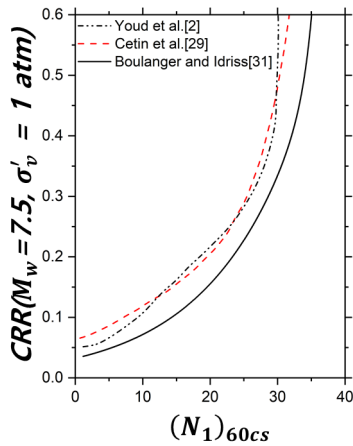


Fig. 9. Empirical curves for CRR with SPT-N values

산정에는 15%의 확률 곡선을 추천하였다. Idriss and Boulanger[31]과 Boulanger and Idriss[32]은 기준에 제시된 보정계수들과 등가 순모래의 관계식을 재정리하였다. 또한, 2010, 2011년 뉴질랜드 Canterbury에서 발생한 지진[58, 59]과 2011년 일본 Tohoku 지진[60, 61]을 바탕으로 CRR에 관한 경험식을 개선하였다.

앞선 연구에서 제시된 $(N_1)_{60cs}$ 에 따른 CRR 곡선을 Fig. 9에 도시하였다. Youd et al.[2] 이후 개선된 Cetin et al.[30]은 더 많은 액상화 자료를 활용했음에도 불구하고 비슷한 CRR 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 5에서 알 수 있듯이 Cetin et al.[30]의 응력감소계수는 같은 조건에서 가장 작은 값을 나타낸다. 따라서 Youd et al.[2], Boulanger and Idriss [32]의 CRR과 비교할 때 상대적으로 액상화 발생을 과소평가할 수 있다. 한편, Boulanger and Idriss[32]는 많은 현장자료를 바탕으로 개선된 보정

계수를 사용하여 CRR 경험식을 도출하였다. 따라서 Boulanger and Idriss[32]는 동일한 $(N_1)_{60cs}$ 값에서 상대적으로 가장 작은 CRR을 나타낸다. New Zealand guideline[16]은 최신 연구 결과를 반영하기 위해 Boulanger and Idriss[32]의 CRR 곡선을 따른다.

4.3 CPT 기반 액상화 평가

CPT기반 액상화 평가는 Seed et al.[57], Robertson and Wride[35], Douglas et al.[62], Shibata and Teparaksa [63], Stark et al.[64], Suzuki et al.[65], Moss et al.[34], Boulanger and Idriss[32]를 통해 연구되었다. 이중 Robertson and Wride[35], Moss et al.[34], Boulanger and Idriss [32]의 방법이 보편적으로 활용된다(Table 6). Robertson and Wride[35]은 Seed et al.[57]이 제시한 SPT-CRR 관계를 기반으로 SPT-N치를 등가의 CPT- q_c 값으로 치환하였으며, Youd et al.[2]은 해당 결과를 인용하여 정리하였다. Moss et al.[34]은 Cetin et al.[30] 결과에 약 200개의 CPT 자료를 추가하여 CPT 기반의 액상화 평가를 확률론적으로 접근하였다. 또한, 결정론적 방법을 이용한 CRR 산정에는 15%의 확률 곡선을 추천하였다. Boulanger and Idriss[32]는 액상화 평가에 필요한 보정계수들과 등가 순모래의 관계를 정리하였다. 또한, 시료 채취없이 지반의 입도분포와 세립분 함량을 추정할 수 있는 방법과 이를 CRR 산정에 적용하는 절차를 수립하였다.

앞선 연구에서 제시된 q_{c1Ncs} 에 따른 CRR 곡선을 Fig. 10에 도시하였다. q_{c1Ncs} 가 증가할수록 CRR 값이 커지는 동일한 경향을 나타낸다. 한편, Boulanger and Idriss[32]는 많은 현장자료를 바탕으로 개선된 보정계수를 사용하여 CRR 경험식을 도출하였다. 따라서 Boulanger and Idriss[32]

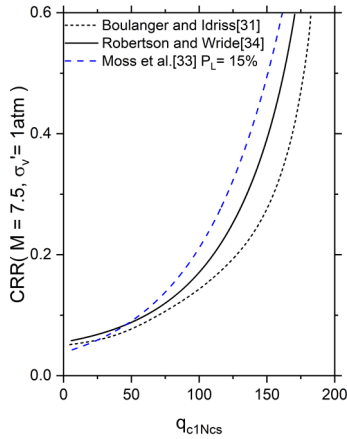


Fig. 10. Empirical curves for CRR with CPT-qc values

는 동일한 q_{c1Ncs} 값에서 상대적으로 가장 작은 CRR을 나타낸다. New Zealand guideline[16]은 최신 연구 결과를 반영하기 위해 Boulanger and Idriss[32]의 CRR 곡선을 따른다.

5. 결론

본 연구에서는 액상화 간편법의 전반적인 평가 과정과 해외의 액상화 설계기준을 요약하였다. 또한, 액상화 간편법에 이용되는 보정계수의 시대별 변화를 요약하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 액상화 평가 과정은 취약(Susceptibility), 유발(Triggering) 그리고 결과(Consequence)로 분류된다. 액상화 평가 시 모든 영향인자를 고려하기 어렵다. 따라서 응력, 변형률, 에너지 기반의 액상화 평가를 수행해왔으며, 이중 응력 기반의 액상화 평가법인 간편법은 편의성과 경제성으로 인해 국내를 비롯한 유럽, 일본, 미국 등에서 보편적으로 활용되고 있다.
- 2) 액상화 간편법의 핵심은 깊이별 안전율을 계산하는 것이며 이는 진동전단응력비(CSR)와 진동전단저항비(CRR)의 비로 결정된다. CSR의 경우 보정계수를 통해 지반 물성과 지진 특성을 반영하도록 발전하였으나 국내 기준에는 이를 반영하고 있지 않다.
- 3) 지진위험도, 관측소 기록, GMPE 및 지반응답해석 등을 통해 CSR 평가를 위한 최대지반가속도를 산정할 수 있다. 한편, CSR은 고정된 조건에서 도출되지 않으므로 보정계수를 통해 같은 수준의 규모와 수직응력으로 보정해야 한다. 이는 각각 규모보정계수(MSF), 연직응력 보정계수(K_p)로 표현된다.
- 4) CRR 결정을 위해 등가 순모래(Clean sand)보정이 필요하며, 이는 다음과 같은 요인 때문이다.
 - 세립분 증가에 따라 현상실험의 관입 치는 감소한다.
 - 세립분 증가에 따라 상대밀도는 변화하며 이는 CRR에 직접적인 영향을 미친다.

한편, CRR 결정 방식은 지속해서 발전됐으며, 최근에는 Boulanger and Idriss[32]의 방식이 가장 보편적으로 활용된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비 지원(19SCIP-C151438-01)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Seed HB, Idriss IM. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1971;97(9):1249-1273.
2. Youd TL, Idriss IM, Andrus RD, Arango I, Castro G, Christian JT, Li KHS. 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, 2001;127(10):817-833.
3. Kayen RE, Moss RE, Thompson EM, Seed RB, Cetin KO, Der Kiureghian A, Tokimatsu K. Shear-Wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013; 139(3):407-419.
4. Andrus RD, Stokoe KH, Hsein Juang C. Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation, Earthquake Spectra, 2004; 20(2):285-308.
5. Park DS. Liquefaction evaluation procedure using SPT, Magazine of the Korean Geotechnical Society, 2014;30(6):8-22.
6. Seo MW, Sun CG, Oh MH. LPI-based Assessment of liquefaction potential on the west coastal region of Korea, EESK J. Earthquake Eng, 2009;13(4):1-13.
7. Saeed-ullah JM, Park DH, Kim HS, Park KC. Cyclic simple shear test based design liquefaction resistance curve of granular soil, Journal of Korean Geotechnical Society, 2016;32(6):49-59.
8. Baek WH, Choi JS, Ahn JK. Liquefaction hazard map based on in pohang under based on earthquake scenarios, EESK J. Earthquake Eng, 2018;22(3):219-222.
9. Iwasaki T, Tatsuoka F, Tokida KI, Yasuda SA. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, In Proceedings 2nd International Conference on Microzonation Safer Construction Research and Application, 1978;2:885-896.
10. Ahn JK, Baek WH, Choi JS, Kwak DY. Investigation of Pohang earthquake liquefaction using 1d effective-stress site response analysis, Journal of Korean Geotechnical Society, 2018;34(8):37-49.
11. Yoo BS, Bong TH, Kim SR. Evaluation Methods of cyclic shear stress ratio for the assessment of liquefaction in Korea, Journal of Korean Geotechnical Society, 2019;35(6):5-15.
12. Park SS, Nong Z, Choi SG, Moon HD. Liquefaction resistance of Pohang sand, Journal of the Korean Geotechnical Society, 2018; 34(9):5-17.
13. Bong TH, Kim SR, Yoo BS. Evaluation of estimation and variability of fines content in Pohang for CPT-based liquefaction assessment,

- Journal of the Korean Geotechnical Society, 2019 Mar;35(3):37-46.
14. Song SW, Kim HS, Cho WJ. Liquefaction assessment variations with regard to the cyclic resistance ratio estimation methods. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 2020;21(1):13-19
 15. Jang YE, Seo HW, Kim BM, Han JT, Park DH. Selection of ground motions for the assessment of liquefaction potential for South Korea. *EESK J. Earthquake Eng.* 2020;24(2):111-119.
 16. New Zealand Geotechnical Society INC. Earthquake Geotechnical Engineering. Earthquake geotechnical engineering module 3 - liquefaction hazards. Ministry of Business Innovation and Employment, c2006.
 17. Marsh ML, Buckle IG, Kavazanjian E. LRFD seismic analysis and design of bridges (Reference manual). FHWA NHI-15-004, c2014.
 18. JRA. 5 Seismic Design Guide specification for highway bridges, the commentary. Japan road association, c2012
 19. Martin G, Lew M, Arulmoli K, Baez J, Blake T, Earnest J, Gharib F, Goldhammer J, Hsu D, Kupferman S, O' Tousa J, Real C, Reeder W, Simantob A, Youd T. Recommended procedures for implementation of DMG special publication 117 guidelines for analyzing and mitigating liquefaction hazard in California. Los Angeles, USA : The Southern California Earthquake Center, c1999.
 20. FEMA, NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures. FEMA P-750. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. c2009.
 21. Eurocode 8 : Design of Structures for Earthquake Resistance, Part5, Foundations, Retaining Structures, Geotechnical Aspect. CEM, Brussels, c2004
 22. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. Japan Port and Harbour Association, c2009.
 23. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Guidelines for evaluating and improving earthquake resistance of existing facilities (Foundation and ground) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, c2020.
 24. Youd TL, Hoose SN. Liquefaction susceptibility and geologic setting. In *Proceedings of 6th World Conference on Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1977;3:2189-2197.
 25. Youd TL, Perkins DM. Mapping of liquefaction induced ground failure potential. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1978;104(4):433-446.
 26. Youd TL. Liquefaction mechanisms and induced ground failure. *International Handbook on Earthquake and Engineering Seismology*. Academic, New York, Part B, 2003;Chap. 70:1159-1173.
 27. Boulanger RW, Idriss IM. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006;132(11):1413-1426.
 28. Bray JD, Sancio RB. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006;132(9):1165-1177.
 29. Wang WS. Some findings in soil liquefaction. Beijing : Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, c1979, p.55-63.
 30. Cetin KO, Seed RB, Der Kiureghian A, Tokimatsu K, Harder Jr LF, Kayen RE, and Moss RE. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004;130(12):1314-1340.
 31. Idriss IM, Boulanger RW. Soil liquefaction during earthquakes. California : Earthquake Engineering Research Institute, c2008.
 32. Boulanger RW, Idriss IM. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. California : Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California Davis, c2014.
 33. Cetin KO, Seed RB, Kayen RE, Moss RE, Bilge HT, Ilgac M, Chowdhury K. SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;115:698-709.
 34. Moss RE, Seed RB, Kayen RE, Stewart JP, Cetin KO. CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006;132(8):1032-1051.
 35. Robertson PK, Wride CE. Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT. Utah : National Center for Earthquake Engineering Research, c1997, p.41-88.
 36. Robinson K, Cubrinovski M, Bradley BA. Sensitivity of predicted liquefaction induced lateral displacements from the 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes. Wellington : University of Canterbury, c2013.
 37. Seed HB. Design problems in soil liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987;113(8):827-845.
 38. Iai S, Tsuchida H, Koizumi K. A liquefaction criterion based on field performances around seismograph stations. *Soils and Foundations*. 1989;29(2):52-68.
 39. Iai S, Koizumi K, Tsuchida H. A new criterion for assessing liquefaction potential using grain size accumulation curve and N-value. Tokyo : Report of the Port and Harbour Research Institute, c1986, p.125-234.
 40. Bae SJ, Kim MR, Lee HJ, Kim BM. Characteristics of the Gyeongju Earthquake Ground Motions: Comparison with Prediction Models. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 2018;18(1):57-67.
 41. Transportation Research Board (TRB). TRB workshop on new approaches to liquefaction analysis. Publ. No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration, Washington, D.C. (on CD-ROM), c1999.
 42. Liao SS, Whitman RV. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical engineering*. 1986;112(3):373-377.
 43. Kishida T, Boulanger RW, Abrahamson NA, Driller MW, Wehling TM. Seismic response of levees in Sacramento-San Joaquin Delta. *Earthquake Spectra*. 2009;25(3):557-582.
 44. Kavazanjian E, Andrade JE, Arulmoli K, Atwater BF, Christian JT, Green R. State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its Consequences. Washington

- DC: The National Academies Press, c2016, 350p.
45. Seed HB, Idriss IM, Arango I. Evaluation of liquefaction potential using field performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1983;109(3):458–542.
 46. Hynes ME, Olsen RS. Influence of confining stress on liquefaction resistance. Rotterdam : NIST SPECIAL PUBLICATION, c1999.
 47. Boulanger RW. High overburden stress effects in liquefaction analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003;129(12):1071–1082.
 48. Ladd RS. Specimen preparation and liquefaction of sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1974;100(GT10):1180–1184.
 49. Ladd RS. Specimen preparation and cyclic stability of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1977;103(GT6):535–547.
 50. Mulilis JP. The effects of method of sample preparation on the cyclic stress–strain behavior of sands. Technical Report EERC 75/18, California : University of California at Berkeley. c1975.
 51. Mulilis JP, Arulanandan K, Nitchell JK, Chan CK, Seed BH. Effects of sample preparation and sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1977;103(GT2):99–108.
 52. Tatsuoka F, Zhou S, Sato, Shibuya S. Method of evaluating liquefaction potential and its application. Tokyo : Ministry of Education of Japan, c1990.
 53. Robertson PK, Cabal KI. Cone penetration testing for geotechnical engineering. California : Gregg Drill–ing and Testing Inc. c2012.
 54. Idriss IM, Boulanger RW. SPT–based liquefaction triggering procedures. California : Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California, c2010.
 55. Idriss IM, Boulanger RW. Semi–empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2006;26(2–4):130–151.
 56. Robertson PK. Soil classification using CPT. *Canadian Geotechnical Journal*. 1990;(1):151–158
 57. Seed HB, Tokimatsu K, Harder LF, Chung RM. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1985;111(12):1425–1445.
 58. Van Ballegooy S, Malan PJ, Lacrosse V, Jacka ME, Cubrinovski M, Bray JD, O'Rourke TD, rawford SAC, Cowan H. Assessment of liquefaction–induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake Spectra*. 2014;30(1):31–55.
 59. Green RA, Cubrinovski M, Cox B, Wood C, Wotherspoon L, Bradley B, Maurer B. Select liquefaction case histories from the 2010–2011 canterbury earthquake sequence. *Earthquake Spectra*. 2014;30(1):131–153.
 60. Tokimatsu K, Katsumata K. Liquefaction–induced damage to buildings in Urayasu city during the 2011 Tohoku Pacific earthquake. German : In Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. c2012, p.665–674.
 61. Cox BR, Boulanger RW, Tokimatsu K, Wood CM, Abe A, Ashford S, Kishida T. Liquefaction at strong motion stations and in Urayasu City during the 2011 Tohoku–Oki earthquake. *Earthquake Spectra*. 2013 Mar ;29(1):55–80.
 62. Douglas BJ, Olsen RS, Martin GR. Evaluation of the cone penetrometer test for SPT liquefaction assessment. California : Fugro, Inc. c1981.
 63. Shibata T, Teparaksa W. Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests. *Soils and Foundations*. 1988;28(2):49–60.
 64. Stark TD, Olson SM, Long JH. Differential movement at the embankment/structure interface–mitigation and rehabilitation. Urbana : Illinois Transportation Research Center. c1995.
 65. Suzuki Y, Tokimatsu K, Moss RE, Seed RB, Kayen RE. CPT–based liquefaction field case histories from the 1995 Hyogoken–Nambu (Kobe) earthquake. California : The Pacific Earthquake Engineering Research Center's (PEER). c2003.