

반복삼축압축시험을 이용한 국내 모래지반의 액상화 거동 특성 비교

서 혁¹ · 김대현^{2*}

¹(주)경동건설엔지니어링 연구소장, ²조선대학교 토목공학과 교수

Analysis of the Characteristics of Liquidization Behavior of Sand Ground in Korea Using Repeated Triaxial Compression Test

Hyeok Seo¹ · Daehyeon Kim^{2*}

¹Head of Research Center, Kyungdong Construction Engineering Co., Ltd.

²Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

Liquefaction refers to a phenomenon in which excessive pore water pressure occurs when a dynamic load such as an earthquake rapidly acts on a loose sandy soil saturated with soil, and the ground loses effective stress and becomes liquefied. The indoor repeated test for liquefaction evaluation can be confirmed through the repeated triaxial compression test and the repeated shear test. In this regard, this study tried to confirm the liquefaction resistance strength according to the relative density and particle size distribution of sand using the repeated triaxial compression test. As a result of the experiment, it was confirmed that the liquefaction resistance strength increased as the relative density increased regardless of the soil classification, and the liquefaction resistance strength according to the particle size distribution of the sand was confirmed that the liquefaction resistance strength of the SP sample close to SW was significantly higher. In addition, as a result of analyzing 30% of fine powder compared to 0% of fine powder, as the relative density increased to 40~70%, the liquefaction resistance strength decreased by 5~20%, and the domestic weathered soil ground had a fine liquefaction resistance strength compared to Jumunjin standard sand. When the minute was 10%, it was measured to be 30% or more, and when the fine particle was 30%, it was measured to be less than 50%.

Keywords: expansion material, foam reaction, uniaxial compression test, direct shear test, permeability test



*Corresponding author: Daehyeon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 28 September, 2021
Accepted: 6 December, 2021

© 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

액상화 현상이란 지반이 포화된 느슨한 사질토 지반에 지진과 같은 동적하중이 급속히 작용할 때 과잉간극수압이 발생하고, 지반이 유효응력을 상실하고 액체화 되는 현상을 말한다. 액상화 평가를 위한 실내 반복시험은 반복삼축압축시험과 반복전단시험을 통하여 확인이 가능하다. 이와 관련하여 본 연구에서는 반복삼축압축시험을 이용한 모래의 상대밀도와 입도분포에 따른 액상화 저항 강도를 확인하고자 하였고, 실험장비의 신뢰도 검증과 결과의 타당성을 확인하고자 기존의 선행연구와 대조하여 비교·분석하였다. 실험결과, 흙의 분류에 상관없이 상대밀도가 증가함에 따라 액상화 저항 강도가 높아짐을 확인하였고, 모래의 입도분포에 따른 액상화 저항강도는 SW에 가까운 SP시료의 액상화 저항강도가 상당히

높게 확인되었다. 또한 세립분 0% 대비 세립분 30%를 분석한 결과, 상대밀도 40~70%까지 증가함에 따라 액상화 저항강도가 5~20% 가까이 감소하였고, 국내 풍화토 지반이 주문진 표준사 대비 액상화 저항 강도가 세립분이 10%일 때는 30% 이상, 세립분이 30%일 때는 50% 이상 낮게 측정되었다.

주요어: 액상화, 반복삼축압축시험, 단순전단시험, 상대밀도, 유효응력

서론

연구의 배경 및 목적

액상화 현상이란 지반이 포화된 느슨한 사질토 지반에 지진과 같은 동적하중이 급속히 작용할 때 과잉간극수압이 발생하고, 지반이 유효응력을 상실하고 액체화되는 현상을 이야기한다. 다시 말해서 지진하중을 받은 지반이 전단강도를 잃고 지반 위에 있는 상부구조물을 더 이상 지지하지 못하는 현상을 말한다.

액상화 평가를 위한 실내반복시험은 반복삼축압축시험(Cyclic Triaxial Test)과 반복단순전단시험(Cyclic Simple Shear Test)을 통해 확인 가능하다. 반복삼축압축시험은 삼축압축시험과 동일하게 공시체를 성형 후 포화시키고 등방압밀을 준 상태에서 수직하중을 재하한다. 삼축압축시험과는 다르게 Loading과 Unloading을 반복하여 과잉간극수압이 발생하는 변형률 5%의 시점을 찾는 시험이다. 반복단순전단시험은 포화된 시료를 전단상자에 넣고 연직하중을 준 상태에서 수평방향으로 반복적인 전단력을 가한다.

두 시험 모두 액상화 저항 강도를 구하기 위한 시험이나 입력하중의 재하 방식에 차이가 있다. 일부 선행연구에서는 단순전단시험이 지진하중의 방향을 잘 고려한다고 하지만 1차원적으로는 한 방향으로 진동을 주어 액상화 발생 시점을 찾는 것은 동일하다. 단순전단시험의 경우 구속압 조건을 고려할 때 σ_1 을 이용하여 구현하지만, 반복삼축압축시험의 경우 σ_3 와 σ_1 을 이용하여 등방압밀을 가하기 때문에 구속압 조건에서 신뢰도가 높다고 말할 수 있다. 이러한 이유로 실내시험이나 실무에 적용할 때에도 반복삼축압축시험이 많이 사용되고 있다.

국내에서는 앞서 말한 두 가지 반복삼축압축시험을 통하여 액상화 평가를 수행하고 있다. 재료적인 측면에서 볼 때 대부분 비교본으로 느슨한 사질토에 대한 액상화 평가는 통일분류법상 입도분포가 불량한 모래(Poorly Graded Sand, 이하 SP)인 주문진 표준사를 사용하고 있다. 하지만 국내의 대부분의 지반은 통일분류법상 풍화토(SM) 지반으로 이루어져 있고, 이를 입도분포 시험을 통해 분석하면 입도분포가 양호한 모래(Well Graded Soil, 이하 SW)와 소성이 높은 실트인 세립분(High Plasticity Silt, 이하 MH)으로 구성되어 있다.

반복삼축압축시험을 통한 상세평가의 기준이 대두되는 현시점에서 국내 대부분의 느슨한 사질토가 풍화토(SM)라는 점에서 통일분류법 상 SP시료인 주문진 표준사 뿐만 아니라 풍화토(SM)지반에 대한 액상화 저항 강도에 대한 분석이 필요하다. 또한 반복삼축압축시험의 한계점인 구속압 조건과 주파수 영역에 대한 추가적인 해석적 검증이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 순수한 모래의 입도분포에 따른 액상화 저항 강도와 세립분 함유량 증가에 따른 액상화 저항 강도를 비교·분석하고자 비배수 반복삼축압축시험을 수행하였다. 반복삼축압축시험의 신뢰도 검증과 결과의 타당성을 확인하고자 기존의 선행연구와 대조하여 비교·분석하였고, 이를 개정된 내진설계일반(MOLIT, 2018)에 제시된 액상화 평가 기준의 타당성을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서 수행한 실험 결과와 선행연구를 대조하여 흙의 물성 특성을 확인하였다.

선행연구 분석

액상화에 대한 연구는 1964년 일본 Niigata 지진(규모 7.6)과 1964년 알래스카 Good Friday 지진(규모 8.4) 이후 본격적으로 시작되었다. 이후, 1969년 Casagrande가 한계간극비 이론(KSGE, 1997)을 주장하면서 액상화 현상을 한계간극비를 기준으로 느슨한 사질토와 조밀한 사질토로 구분하였다. Casagrande는 한계간극비보다 더 느슨한 상태의 포화모래에 지진과 같은 진동하중이 재하될 때 모래의 체적이 감소하면서 과잉간극수압이 발생한다고 주장하였다.

Seed and Lee(1966)는 Niigata 지진시 발생한 피해를 조사한 후, 액상화 현상이 포화 비배수상태의 사질토 지반에 전단하중이 반복하여 작용했을 때 발생한 것이라고 주장하였고, 1971년 실내실험인 진동삼축압축시험을 통한 액상화 간편 예측법을 제안하였다. Seed and Idriss(1971)은 진동삼축시험을 이용한 액상화 현상을 평가하기 위하여, 불규칙적인 지진파를 정현파로 재구성하여 지진파에 대한 액상화 저항 강도의 분석을 수행하였다. 이를 통해 입력 지진파를 규칙적인 정현파로 재현하는 내용에 대한 연구결과를 발표하였다.

Iwasaki et al.(1978)은 액상화 발생 가능성 정도를 추정할 수 있는 액상화 가능성 지수(Liquefaction Potential Index, 이하 LPI)를 제안하였고, Seed(1979)는 액상화 발생에 영향을 미치는 영향인자들을 조사하여, 연구대상지반에 대해 액상화 평가를 수행하였다. 그 후 Seed(1983)는 현장시험결과를 통하여 액상화 가능성을 평가하는 방법을 제안한 후 실내시험을 이용하여 액상화 평가 결과와 비교하는 연구를 수행하였으며, Tokimatsu and Yoshimi(1983)는 현장시험결과인 표준관입저항치(N치)를 통한 액상화 평가에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Youd and Perkins(1987)는 과거 지진발생 자료와 지질학적 연구데이터를 통하여 액상화 발생가능성에 대한 구역도를 작성하였고, 그에 따른 액상화지표(Liquefaction Secerity Index, 이하 LSI)를 제안하였다.

국외에서는 액상화를 평가할 때 LPI 지수를 고려하는 단계를 거치는데 이와 관련해서 국외 액상화 위험도에 관한 연구는 Holzer et al.(2002)이 CPT데이터를 이용하여 액상화 위험도를 작성하였다. Heidari and Andrus(2010)가 CPT데이터 바탕으로 LPI를 산정한 후에 South Carolina 지역에 대한 액상화 위험도 연구를 수행하였다. Valverde-Palacios et al.(2014)은 스페인 광역 지역에 대한 액상화 위험도 연구를 수행하였는데, Tokimatsu and Seed 방법과 Pradel 방법에 대해서 액상을 평가하여 분석하였다. Rahman et al.(2015)은 표준관입시험치를 이용하여 방글라데시 다카 지역에 대한 액상화 위험도 연구를 수행하였고, 이때 지반 및 지역적 특성을 반영한 Zonation 기법을 사용하여 위험도를 작성하였다.

국내 액상화 연구의 경우, 1995년 일본 Kobe 지진과 함께 국내의 진동 및 내진설계(KSGE, 1997) 이후부터 지진의 위험도에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 액상화 연구 초기에는 Shin et al.(1999)이 진동삼축시험을 통해 국내 지진특성을 고려한 액상화 평가기법의 개선방안에 대한 연구를 수행하였고, Kwak(2001)은 Iwasaki et al.(1978)이 제안한 액상화 가능성 지수(LPI)를 산정하여 국내 연안 매립지역을 중심으로 하여 액상화 위험도를 작성하였다. 또한 Park and Kim(2014)은 중진지역에 적합한 액상화 평가의 생략기준에 관한 연구를 이용하여 유럽, 미국, 그리고 일본의 액상화 평가방법에 대한 문헌연구를 실시하였고, 각각의 방법의 특징 등을 분석 후 국내 액상화 평가에 적합한 지진규모를 고려한 수정 방법을 발표하였다.

2017년 포항지진 이후, 국내 액상화에 대한 연구는 액상화 저항 강도와 LPI 구역도에 대한 연구로 수행되어왔다. 2018년 액상화 평가 기준이 개정되면서 액상화 상세평가법인 실내실험의 신뢰성에 대한 부분과 LPI 지수에 대한 단계가 추가되었다. 실내실험인 액상화 저항 강도 분석에 대한 연구는 포항지역 모래의 액상화 저항 강도 분석이 주로 이루어졌다.

LPI에 대한 연구에서는 Kim(2018)이 인천해안매립지역에 대한 액상화 평가를 위하여 장주기인 Hachinohe 지진파와 단주기인 Ofunato 지진파를 적용하여 1차원 지반응답해석 프로그램인 Pro-shake를 이용하여 액상화 구역도를 작성하였다. Beak et al.(2018)은 LPI기반의 액상화 위험도와 실제 피해지역을 비교하여 기존 방법의 한계와 문제점을 고찰하였다.

Ahn et al.(2018)은 1차원 지반응답해석 프로그램인 Deep soil v6.0을 이용하여 포항지진에 대한 액상화 위험도를 작성하였으며, Choi et al.(2018)은 지반의 액상화 현상이 지표면위의 구조물뿐만 아니라 지중의 구조물에 대해서 직접적인 영향을 줄 수 있다고 판단하여 동남권 지역 전력구를 대상으로 Pro-shake를 통한 액상화 위험도를 평가하였다. Ha et al.(2020)은 액상화 가능 지수(LPI)를 국내 하천제방에 적용하여 지진취약도 평가를 적용하는 연구를 수행하였다.

포항지진 이후 액상화 저항 강도에 대한 연구는 Saeed-ullah et al.(2016)이 오타와 모래와 주문진 표준사를 이용하여 그 결과를 토대로 액상화 저항 곡선을 도출하였다. Mun(2018)은 포항 지역 액상화 발생지점의 모래와 기존 서해안 실트질 모래와의 상대밀도 및 입도분포의 영향을 확인하였으며, Park et al.(2018)은 액상화가 발생된 현장의 두 시료를 채취하여 상대밀도 및 유효구속응력의 차이를 기반으로 지진하중에 따른 포항 모래의 액상화 저항 특성을 연구하였다.

또한 Lee(2019)는 포항 액상화 발생 지역(송도, 흥해) 모래의 강도정수와 액상화 저항 강도에 대한 연구를 수행하였고, Park(2020)은 부상 해안모래(7개소)의 액상화 저항특성에 대한 연구를 수행하였다.

국내의 액상화 평가의 경우 대부분 반복삼축압축시험을 통해 수행되었다. 이는 단순전단시험에 비해 σ_3 와 σ_1 를 이용한 등방압밀 조건을 정밀하게 모사할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 또한 대부분의 선행연구에서 입도분포가 불량한 주문진 표준사(SP)에 세립분을 추가하여 액상화 평가 실험이 진행되어 왔다. 균일한 입도를 가지고 있고 대표적인 물성치를 가진다는 점에서 주문진 표준사를 많이 사용하고 있지만, 국내 지반의 특성 풍화토(SM)성분이라는 점에서 풍화토 성분에 대한 세부적인 액상화 저항 강도에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 구속압 조건이 현장과 유사한 반복삼축압축시험을 이용하여 모래의 입도분포, 세립분 함유량에 대한 지반거동 평가를 분석하였고, 이를 선행연구와 대조하여 비교·분석 하였다.

액상화

액상화의 개념

액상화란 지반 내에 작용하는 전단응력에 의해 생기는 과잉간극수압이 토립자를 구속하고 있던 초기 유효응력과 같아져, 유효응력이 0이 되는 현상이라고 정의할 수 있다. 즉, 반복하중하에서 토립자는 변형 및 재배열을 하지만 포화 토체의 일정체적 유지성 때문에 토립자의 변형률 및 재배열량 만큼 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이처럼 발생한 간극수압이 토체 내의 유효응력과 같은 수준에 도달하게 되면, 토체내의 전단저항력이 완전히 상실되어 포화 사질토는 액상화에 이르게 된다.

Fig. 1은 액상화의 발생과정을 나타낸 것이다.

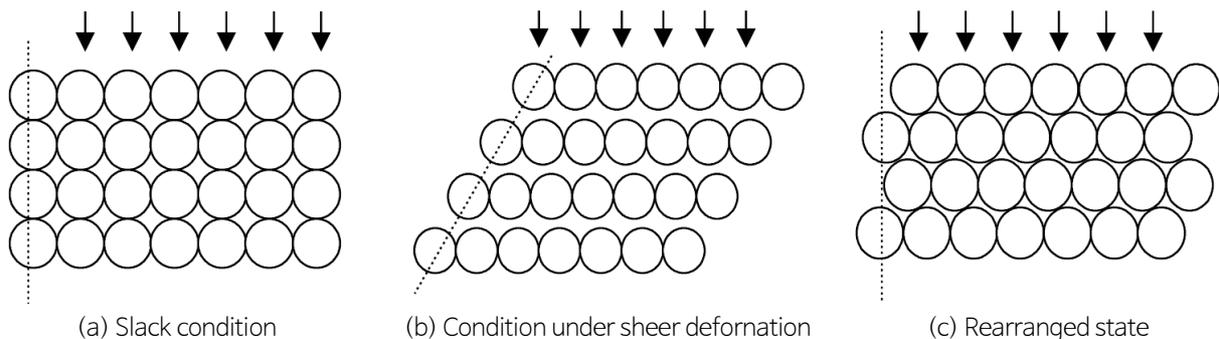


Fig. 1. Liquefaction process.

실내실험

시료의 특성

본 연구에서는 입도분포가 불량한 모래(SP)와 입도분포가 양호한 모래(SW), 세립분(MH)을 사용하여 실험을 진행하였으며, 시료의 물리적 특성을 확인하고자 비중 및 입도시험을 수행하였다. 세립분은 #200번체를 통과하는 시료를 사용하였고 풍화토의 건조중량비 100:0%, 90:10%, 80:20%, 70:30%로 혼합하여 공시체를 성형하였다. 상대밀도는 선행연구와 국내 액상화 생략기준에 따라 세립분은 30%까지, 상대밀도는 80% 미만인 40%, 55%, 70%로 수행하였다.

상대밀도에 따른 시료의 무게를 산정하기 위하여 간극비시험을 수행하였고, 그에 따른 모래의 최대 간극비(e_{max})와 최소 간극비(e_{min})를 도출한 후에 식 (1)을 이용하여 간극비를 산정하였다.

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (1)$$

여기서, Dr : 상대밀도, e : 간극비, e_{max} : 최대 간극비, e_{min} : 최소 간극비

Table 1은 모래의 입도분포와 상대밀도에 따라 간극비(e)값을 산정한 결과이고, Fig. 2는 입도분포시험의 결과를 나타낸 것이다.

Table 1. Mixing ratio of expansive material

Classification	e_{max}	e_{min}	Dr	e
SP	0.934	0.656	40	0.823
			55	0.781
			70	0.739
SW	0.711	0.470	40	0.711
			55	0.578
			70	0.542

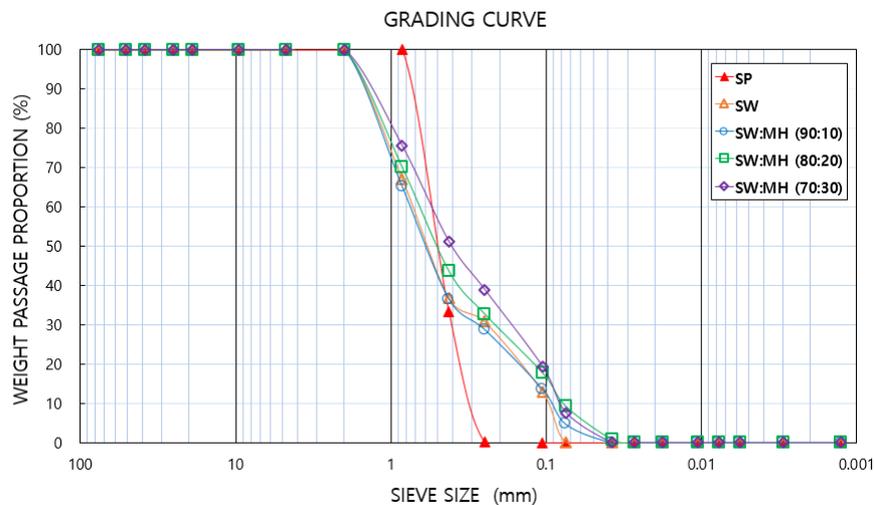


Fig. 2. Distribution curve.

반복삼축압축시험의 조건

공시체의 크기는 50×100 mm ($D \times H$)로써 먼저 하부에 멤브레인을 씌우고 다공판을 삽입 후 O-ring으로 봉한다. 그리고 진공성형상자(Forming Jacket)을 하부페디스털과 결합시킨다. 그 다음 멤브레인을 진공성형상자에 씌운 후 진공압을 가해 멤브레인을 진공성형상자에 밀착시킨다.

시료는 총 5층으로 나누어 주입하였고, 낙하고가 없이 여러층으로 나누어 낙하 후 퇴적을 시켰다. 각 층마다 네 방향에서 성형상자에 고무망치로 약간의 타격을 하여 주어서 필요로 하는 상대밀도에 맞추어 공시체를 성형하였다.

상대밀도에 따른 공시체의 중량은 식 (2)를 사용하여 흙의 건조단위중량을 도출한 후에 공시체의 단면적(A)과 높이(H)를 곱하여 도출하였다.

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \tag{2}$$

여기서, γ_d : 건조단위중량, G_s : 비중, γ_w : 물의 단위중량, e : 간극비

Fig. 3은 반복삼축압축시험을 위한 공시체 성형과정을 나타낸 것이다.

일반적으로 액상화 평가시 반복삼축압축시험을 주로 사용하고 있다. 단순전단과 비교하였을 때, 하중재하의 방식차이가 있으나 1차원적으로는 한 방향으로 반복적인 응력을 가하여 시료의 파괴 시점을 확인하는 것은 동일하다.

또한 단순전단시험의 경우 구속압을 적용할 때, 직접전단시험과 동일하게 공시체 상부에서 연직하중을 가하지만, 반복삼축압축시험의 경우 σ_3 와 σ_1 을 이용하여 등방압밀조건을 구현할 수 있으므로 구속압 조건에서 더욱 신뢰성이 있다.

Fig. 4는 반복삼축압축시험과 단순전단시험의 구속응력 조건을 나타낸 것이다.



Fig. 3. Process of making test specimen for repeated triaxial compression test.

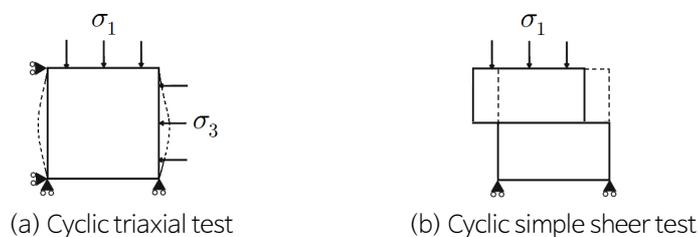


Fig. 4. Stress conditions of repeated triaxial test and simple shear test.

실내실험결과

반복횟수에 따른 축변형률과 간극수압의 관계

반복삼축압축시험 결과, 1개의 축차응력조건에서 반복횟수에 따른 축변형률, 반복횟수에 따른 간극수압비, 축변형률에 따른 축차응력, 유효구속압에 따른 축차응력으로 총 4개의 그래프를 도출할 수 있었다.

Fig. 5는 반복횟수에 따른 축변형률과 간극수압의 관계를 나타낸 것이다.

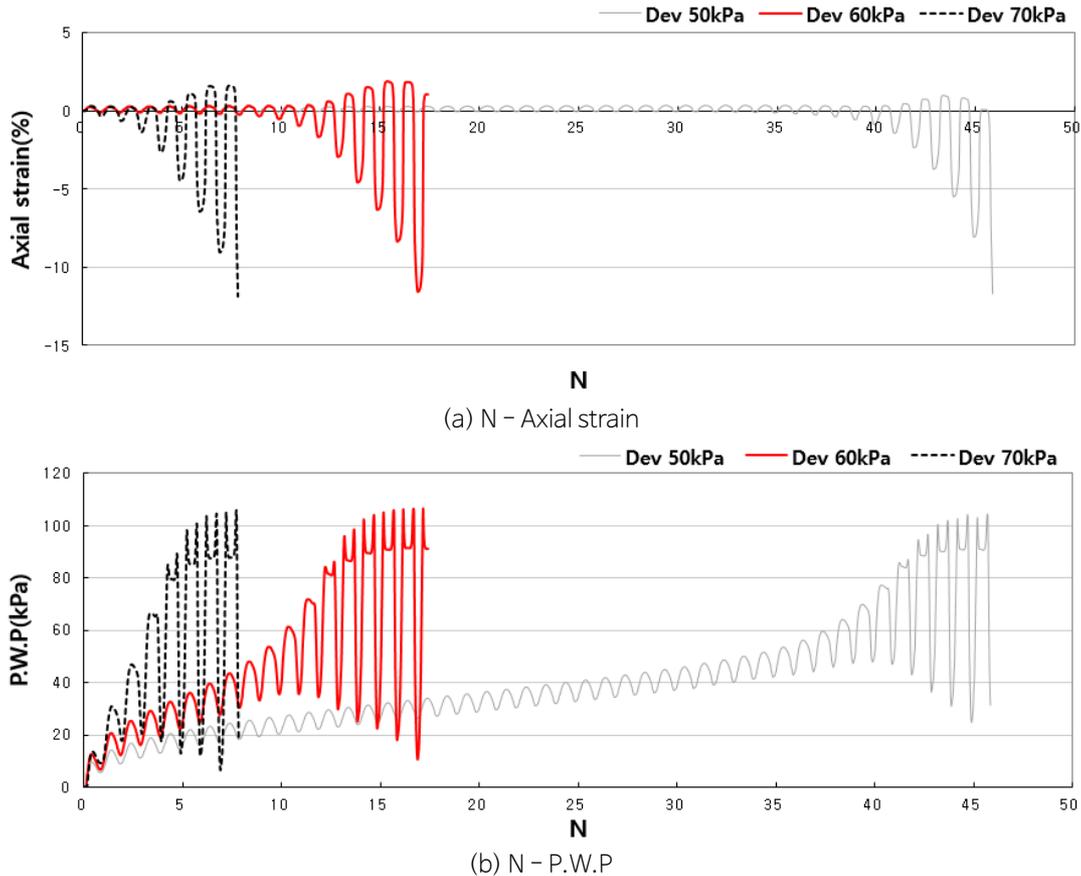


Fig. 5. Relationship between axial strain and pore water pressure according to the number of repetitions.

먼저 반복횟수에 따른 축변형률 그래프에서는 변형률의 변화에 따른 액상화 발생시점을 판단할 수 있는데 여기서 변형률은 5%에 도달하였을 때 액상화가 발생하였다고 판단할 수 있다.

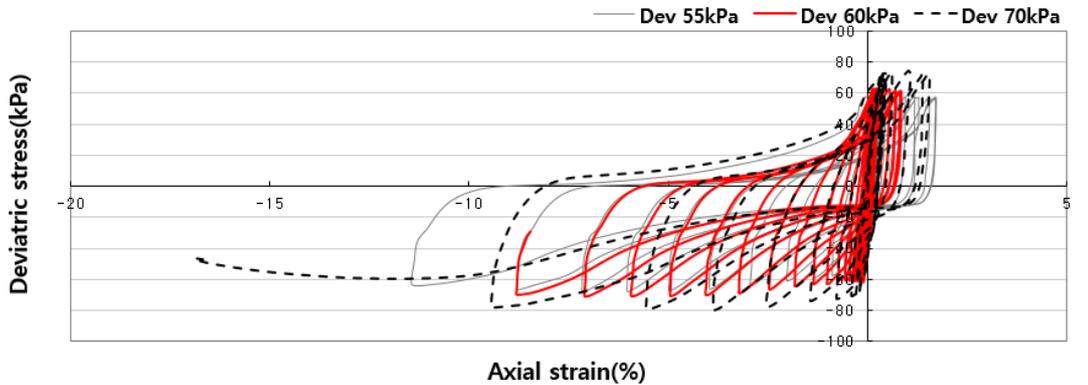
이를 뒷받침하는 근거는 반복횟수에 따른 간극수압비로 확인이 가능하다. 액상화란 느슨한 사질토 지반이 전단응력을 잃고 과잉간극수압이 발생하는 것을 의미하는데, 이는 과잉간극수압의 발생시점에 액상화가 발생할 수 있음을 판단할 수 있다.

축차응력에 따른 축변형률과 유효구속압의 관계

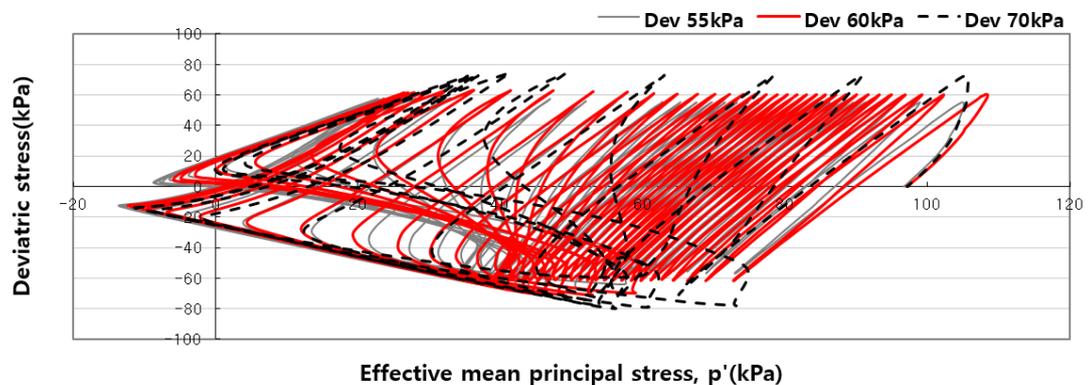
반복삼축압축시험 결과를 통해 도출된 그래프 중 Stress-strain 곡선과 Stress-path 곡선을 통하여 변형률 증가에 따른 유효응력의 변화를 확인할 수 있다.

Stress-path의 응력경로를 살펴보면 Deviatric stress(축차응력)가 증가할수록 변형률이 증가하는데, 이때 간극수압도 증가하면서 유효응력이 '0'에 가까워진다. 이는 액상화가 발생할 때 지반이 전단강도를 잃고 재배열 되는 상태를 의미한다.

Fig. 6은 축차응력에 따른 축변형률과 유효구속압의 관계를 나타낸 것이다.



(a) Axial strain - Deviatric stress



(b) Deviatric stress - P'

Fig. 6. Relationship between axial strain and pore water pressure.

모래의 입도분포와 상대밀도에 따른 반복저항응력비

상대밀도가 증가할수록 SP시료의 경우 CRR값이 0.193, 0.248, 0.301로 28%, 21% 증가하였고, SW시료의 경우 0.321, 0.336, 0.371로 5%, 10% 이상 CRR값이 증가하였다. 또한 같은 상대밀도 기준으로 SP시료 대비 SW시료에서 액상화 저항 강도가 66%, 35%, 23% 이상 높게 확인되었다.

같은 상대밀도 40%에서 SP와 SW의 CRR은 0.193, 0.321로 SW가 60% 이상 높은 것으로 확인되고, 상대밀도 55%에서 SP와 SW의 CRR은 0.248, 0.336으로 SW가 35% 이상 높은 것으로 확인되었다. 또한 상대밀도 70%에서 SP와 SW의 CRR은 0.301, 0.371로 SW가 23% 이상 높은 것으로 확인되었다.

이는 모래의 간극비 차이로 판단할 수 있으며, 입도분포가 불량한 모래 대비 입도분포가 양호한 모래의 입도가 고르게 퍼져있어 시료의 파괴가 더 늦게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 7은 동일한 구속압 구속압 조건에서 상대밀도에 따른 SP시료와 SW시료의 CRR값을 나타낸 것이다.

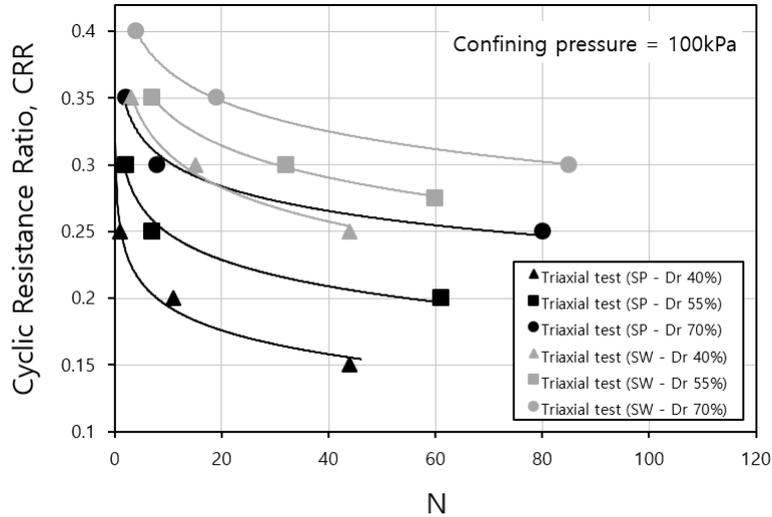


Fig. 7. Analysis of repeated resistance stress ratio by particle size distribution and relative density of sand (SP:SW).

Table 2는 세립분함유량과 상대밀도에 따른 실내실험 결과를 표로 나타낸 것이다.

Table 2. Result according to fine grain content and relative density

Classification	$D_r(\%)$	CRR
SP = 100%	40	0.193
	55	0.248
	70	0.301
SW = 100%	40	0.321
	55	0.336
	70	0.371
SW:MH = 90:10	40	0.199
	55	0.205
	70	0.219
SW:MH = 80:20	40	0.184
	55	0.188
	70	0.194
SW:MH = 70:30	40	0.160
	55	0.168
	70	0.171

기존 선행연구와의 비교 분석

모래의 입도분포와 상대밀도에 따른 반복저항능력비 비교(선행연구적용)

Fig. 8a~8b는 모래의 입도분포에 따른 반복저항능력비를 느슨한 상대밀도와 조밀한 상대밀도에 따라 나타낸 것이다. 기존의 선행연구와 본 연구에서 수행한 모래의 입도분포와의 차이를 상대밀도가 느슨하고 조밀한 정도에 따라 비교·분석하였다.

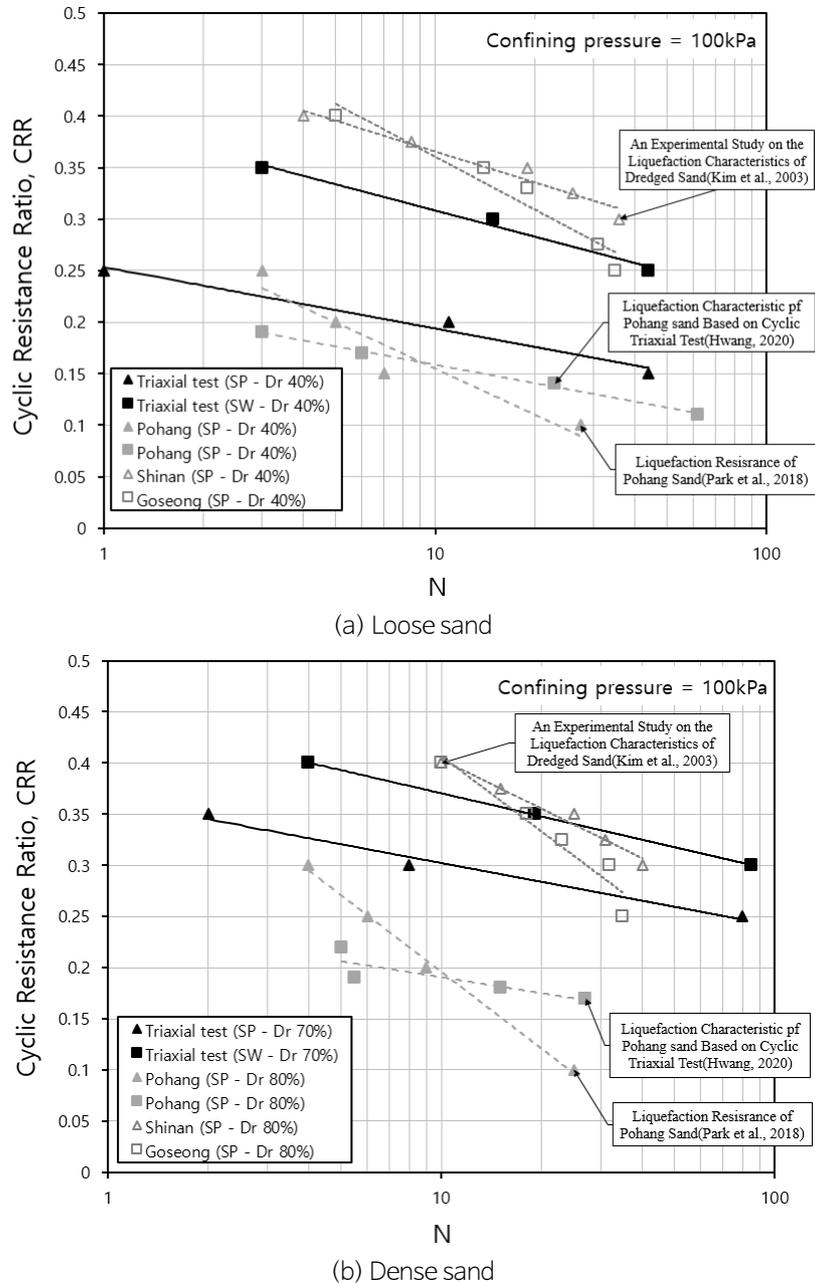


Fig. 8. Analysis of cyclic resistance stress ratio according to particle size distribution of sand.

Park et al.(2018), Hwang(2020)은 지진으로 인해 액상화가 발생된 포항지역의 모래(통일분류법상 SP)를 이용하여 반복삼축압축시험을 수행하였고, 그 결과를 그림 3.31과 같이 본 연구에서 수행한 실험결과와 분석하였다. 분석결과, 느슨한 상대밀도에서는 CRR 값이 입도분포가 불량한 모래와 유사성을 보였다. 상대밀도가 조밀한 상태에서는 입도분포가 불량한 모래의 CRR 값이 50% 가까이 높게 확인되었다.

이는 포항 지역의 모래의 상대밀도가 증가하여도 액상화 강도가 크게 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 상대밀도가 느슨한 상태에서는 주문진 표준사를 이용하여 포항 액상화 형상에 대한 공학적인 모사가 가능하나, 상대밀도가 조밀한 지반에서는 균등계수에 의한 영향을 확인해야 한다.

Kim and Jung(2003)은 전남 신안군, 경남 고성군 부근에서 채취한 모래(통일분류법상 SP)를 이용하여 반복삼축압축 시험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 8과 같이 본 연구에서 수행한 실험결과와 비교·분석하였다. 분석결과, 본 연구에서 사용한 시료(SW)와 CRR값을 비교하였을 때, 느슨한 상대밀도에서는 15%, 조밀한 상대밀도에서는 6% 이상 높은 액상화 강도를 확인할 수 있었다.

이는 모래의 입도분포에 따라 액상화 저항 강도는 다르게 측정될 수 있음을 확인할 수 있고, 동일한 SP 시료라 할지라도 SW시료와 유사성을 띠는 SP 시료일 경우 CRR값이 증가함을 확인할 수 있다.

흙의 특성에 따른 반복저항능력비 분석

본 연구에서는 모래의 입도분포에 따른 액상화 저항 강도를 확인하고자 입도분포가 양호한 모래(SW)와 입도분포가 불량한 모래(SP)를 이용한 반복삼축압축시험을 수행하였다. 실험에 사용된 흙은 그 상대밀도가 느슨(Loose)하고 조밀(Dense)한 정도에 따라 40%, 55%, 70%의 세 구간으로 나누어 실험을 수행하였다. 그 결과, 입도분포가 불량한 모래대비 입도분포가 양호한 모래의 액상화 저항 강도 값이 20~60%까지 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 선행연구와 대조하여 그 결과를 분석하고자 Fig. 8과 같이 각 흙에 성질에 따라 입도분포곡선을 다시 작성하였고, 그에 따른 균등계수와 곡률계수를 Table 3에 다시 산정하였다. 그 결과, 모래의 입도분포에 따른 균등계수나 곡률계수 연관성은 따로 확인할 수가 없었다.

Table 3. Physical properties according to the particle size distribution of sand

Classification	G_s	No. 200 (%)	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
SP	2.630	0	0.30	0.4	0.56	5.5	1.14	0.93	0.66
SW	2.651	0	0.10	0.26	0.73	2.5	0.72	0.71	0.47
Pohang A	2.520	6	0.09	0.18	0.36	4.0	1.00	0.98	0.70
Pohang B	2.500	2	0.12	0.17	0.23		1.05	-	-
Shinan	2.660	10	1.9				1.69	-	-
Goseong	2.649	9	0.11	0.25	0.34	3.1	1.85	-	-

모래의 입도분포가 양호하거나 불량한 정도에 따라 액상화 저항 강도가 달라지는 것은 분명한 사실이다. 하지만 Fig. 8a~8b에서처럼 SW에 가까운 SP의 경우 액상화에 대한 저항강도가 상당히 높게 확인되고 있다. 이 결과들에 대한 입도분포의 연관성을 확인하고자 Figs. 9~10과 같이 모래의 입도분포에 따른 균등계수를 비교해보았다.

그 결과 동일한 SP시료라 하더라도 균등계수에서 큰 차이를 확인할 수 있으며 오히려 SW시료보다 낮게 측정되는 경우도 있었다. 이는 단순히 모래의 액상화 저항 강도를 입도분포에 따라 유추하는 것이 타당하지 않다는 것을 말해주고 있으며, 현재 액상화 평가 과정 중 삭제된 상세평가법(실내진동실험)의 중요성을 보여주고 있다.

물론 액상화에 대한 실내실험의 신뢰도가 실험을 수행하는 엔지니어의 숙련도라 정밀성에 약간의 차이가 날 수가 있고, 시료 준비과정과 시험을 수행함에 있어 상당한 시간과 비용이 수반되지만 국내외에서 40여년 이상 반복삼축압축시험을 사용해왔고 그 데이터를 기반으로 내진설계를 수행하였다. 그러므로 SPT 결과를 가지고 현장에서의 액상화 평가를 통한 유추를 단순하게 수행하는 것은 공학적으로 미흡하다고 판단된다.

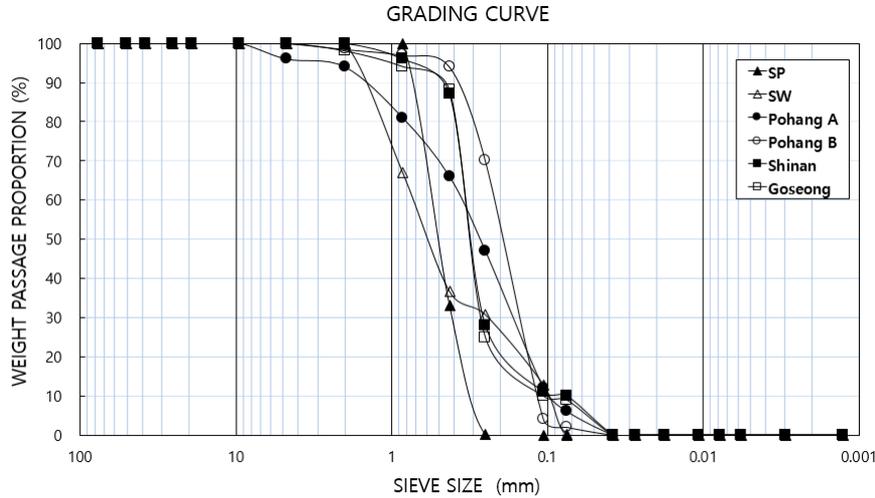


Fig. 9. Grading distribution curve of sand.

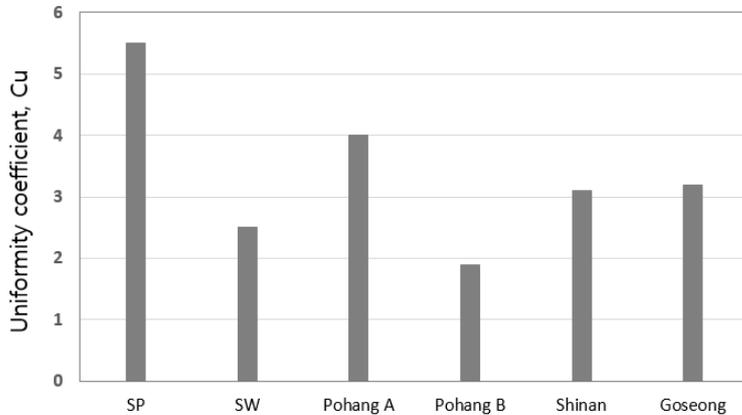


Fig. 10. Comparison of equal coefficients of sand.

결론

본 연구에서는 모래의 입도분포와 세립분 함유량에 따른 액상화 저항 강도를 상대밀도에 따라 분석 후, 국내 풍화토 지반에 따른 액상화 저항 강도를 확인하고자 하였다. 모래의 입도분포에 따라 SP와 SW로 나누었으며 SW시료에는 세립분 (MH)을 추가한 후, 풍화토(SW)를 조성하여 반복삼축압축시험을 수행하였다. 실내실험 결과의 신뢰도를 검증하고자 지반응답해석 프로그램인 FLAC V.7.0을 통하여 해석적 검증을 수행하였다. 또한 지반의 심도와 축차응력의 재하속도에 따른 모래지반의 액상화 저항 강도를 분석하기 위하여 장비의 한계인 구속압 조건과 주파수 영역을 수치해석상에서 바뀌게 하며 모래지반의 액상화 저항 강도를 확인하였으며, 그 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 상대밀도에 따른 액상화 저항 강도 분석결과, 입도분포가 불량한 모래(SP)에서는 상대밀도가 15% 증가함에 따라 액상화 저항 강도가 21~28% 이상 증가하였다. 입도분포가 양호한 모래(SW)에서는 상대밀도가 15% 증가함에 따라 액상화 저항 강도가 5~10% 이상 증가하였다. 세립분이 포함된 모래지반에서도 상대밀도가 증가함에 따라 액상화 저항 강도가 3~10% 가까이 증가하였다. 이는 흙의 분류에 상관없이 상대밀도가 증가함에 따라 액상화에 대한

저항 강도가 높아짐을 나타낸다.

- (2) 모래의 입도분포에 따른 액상화 저항 강도 분석결과, 입도분포가 불량한 모래(SP) 대비 입도분포가 양호한 모래(SW)의 액상화 저항 강도가 상대밀도 40~70%까지 증가함에 따라 23~60% 이상 증가한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이를 두 모래의 입도분포에 의한 차이로 판단하였다. 하지만 선행연구와 대조하여 비교하였을 때, SW에 가까운 SP의 경우 액상화에 대한 저항강도가 상당히 높게 확인되고 있다. 이는 단순히 모래의 액상화 평가를 입도분포의 양호하고 불량한 정도에 국한되어 평가하기보다는 모래의 입도분포에 따른 흙의 물성값을 모두 고려해야 한다.
- (3) 세립분 함유량에 따른 액상화 저항 강도 분석결과, SW시료에서 세립분 함유량이 증가할수록 액상화 저항 강도가 감소함을 확인하였다. 이는 흙의 분류에 따라 세립분 함유량이 증가하여도 액상화 저항 강도가 감소할 수 있음을 나타낸다. 세립분 0% 대비 세립분 30%를 분석한 결과, 상대밀도 40~70%까지 증가함에 따라 5~20% 가까이 감소하였다. 또한 국내 풍화토 지반이 주문진 표준사 대비 액상화 저항 강도가 세립분이 10%일 때는 30% 이상, 세립분이 30%일 때는 50% 이상 낮게 측정되었다. 이를 통해 국내에서 비교본으로 사용되는 주문진 표준사와의 차별성을 확인할 수 있다.

References

- Ahn, J.G., Baek, W.H., Choi, J.S., Kwak, D.Y., 2018, Investigation of Pohang earthquake liquefaction using 1D effective-stress site response analysis, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(8), 37-49 (in Korean with English abstract).
- Beak, W.H., Choi, J.S., An, J.G., 2018, Liquefaction hazard map based on in Pohang under based on earthquake scenarios, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 22(3), 219-224 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.S., Park, I.J., Hwang, K.M., Jang, J.B., 2018, A study on seismic liquefaction risk map of electric power utility tunnel in South-East Korea, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 19(10), 13-19 (in Korean with English abstract).
- Ha, I.S., Mun, I.J., Youn, J.W., Han, J.T., 2020, Evaluation of the vulnerability of earthquakes in domestic river banks of the liquidable index and review of applicability, *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineering*, 18(4), 31-40.
- Heidari, T., Andrus, R.D., 2010, Mapping liquefaction potential of aged soil deposits in Mount Pleasant, South Carolina, *Engineering Geology*, 112, 1-12.
- Holzer, T.L., Toprak, S., Bennett, M.J., 2002, Liquefaction potential index and seismic hazard mapping in the San Francisco Bay area, California, *Proceedings of the 7th National Conference on Earthquake Engineering: Urban Earthquake Risk*, Boston, 1699-1706.
- Hwang, B.Y., 2020, Liquefaction characteristic of Pohang sand based on cyclic triaxial test, *Master's Thesis*, University of Science and Technology, 1-80.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., Yasuda, S., 1978, A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, *Proceedings of the 5th Japan Earthquake Symposium*, Tokyo, 641-648.
- Kim, J.H., Jung, D.H., 2003, An experimental study on the liquefaction characteristics of dredged sand, *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Regular Conference*, Daegu, 4108-4111.
- Kim, S.H., 2018, Mapping of liquefaction potential in Songdo reclaimed land, *Journal of the Society of Disaster Information*, 14(3), 296-304 (in Korean with English abstract).
- KSGE (Korean Society of Geotechnical Engineering), 1997, *Vibration and seismic design*, 1-498.
- Kwak, C.W., 2001, A study on the liquefaction hazard microzonation at reclaimed ports and harbors in Korea, *Master's Thesis*, Yonsei University, 1-124.

- Lee, D.H., 2019, A study on the relationship between the strength parameters of sand in Pohang liquefied area and cyclic resistance ratio, Master's Thesis, Busan National University, 1-79.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport), 2018, Seismic design general, 1-26.
- 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, Busan National University, 1-82.
- Park, G.B., Kim, Y.S., 2014, A study on the liquefaction behavior of soil in Jangbogo station, Journal of the Korean Geosynthetics Society, 13(2), 49-57 (in Korean with English abstract).
- Park, J.H., 2020, A study on characteristic of liquefaction resistance of Busan's coastal sand, Master's Thesis, Busan National University, 1-69.
- Park, S.S., Nong, Z., Choi, S.G., Mun, H.D., 2018, Liquefaction resistance of Pohang sand, Journal of the Korean Geotechnical Society, 34(9), 5-17 (in Korean with English abstract).
- Rahman, M.Z., Siddiqua, S., Kamal, A.M., 2015, Liquefaction hazard mapping by liquefaction potential index for Dhaka City, Bangladesh, Engineering Geology, 188, 137-147.
- Saeed-ullah, J.M., Park, D.H., Kim, H.S., Park, G.C., 2016, Cyclic simple shear test based design liquefaction resistance curve of granular soil, Journal of the Korean Geotechnical Society, 32(6), 49-59 (in Korean with English abstract).
- Seed, H.B., 1979, Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(GT2), 201-255.
- Seed, H.B., 1983, Earthquake resistant design of earth dams, Proceedings of the Symposium on Seismic design of Embankments and Caverns, ASCE, Philadelphia, Vol. 1, 41-64.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971, Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 93(SM9), 1249-1273.
- Seed, H.B., Lee, K.L., 1966, Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 92(SM6), 105-134.
- Shin, Y.S., Park, I.J., Choi, J.S., Kim, S.I., 1999, Evaluation of liquefaction strength based on Korean earthquake magnitude, Journal of the Korean Geotechnical Society, 15(6), 307-317 (in Korean with English abstract).
- Tokimatsu, K., Yoshimi, Y., 1983, Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT *N*-value and fines content, Soils and Foundation, 23(4), 56-74.
- Valverde-Palacios, I., Vidal, F., Valverde-Espinosa, I., and Martin-Morales, M., 2014, Simplified empirical method for predicting earthquake-induced settlements and its application to a large area in Spain, Engineering Geology, 181, 58-70.
- Youd, T.L., Perkins, D.M., 1987, Mapping of liquefaction severity index, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 113(11), 1374-1392.