반복직접단순전단시험을 이용한 모래의 액상화 저항 특성 고찰

Liquefaction Characteristics of Sands Based on Cyclic Direct Simple Shear Test

황병윤* · 곽태영** · 김종관*** · 한진태****

Hwang, Byongyoun*, Kwak, Tae-Young**, Kim, Jongkwan***, and Han, Jin-Tae****

Abstract

In this study, a series of cyclic direct simple shear tests were conducted on Pohang sand, Jumunjin sand, and Ottawa sand. The cyclic resistance ratio (CRR) was derived on the basis of the test results obtained. For verification of the effect of particle distribution on liquefaction resistance, the simplified method for evaluation of the possibility of liquefaction was used to assess these sands. The test results showed that the cyclic resistance ratio of Pohang sand was the lowest, which was consistent with the result of the simplified evaluation method for determining the possibility of liquefaction. In addition, the results showed that the liquefaction resistance increased for particle shapes being more angular than round. Normalization was subsequently applied to minimize the effects of the different factors, and the correlation between the $CRR_{N=10}$ normalization curve and the $CRR_{N=15}$ normalization curve was confirmed.

Key words : CDSS Test, Liquefaction, Cyclic Resistance Ratio, Normalized Liquefaction Curve

요 지

본 연구에서는 포항 액상화 현상 발생 현장에서 채취한 모래를 비롯한 두 종류의 대표적인 사질토인 주문진 표준사와 오타와 모래를 사용하여 반복직접단순전단시험을 수행하였으며, 시험결과를 기반으로 액상화 저항곡선을 도출하여 액상화 저항강도(CRR)를 산정하였다. 포항 현장 모래의 액상화 저항강도가 가장 낮게 나와 액상화 발생 가능성 도표와 부합함을 확인하였으며, 입자 형상이 모달수록 액상화 저항강도가 증가하는 경향 또한 확인하였다. 추가적으로, 인자의 영향을 최소화하기 위하여 정규화 방법을 적용하였으며, 국내 내진설계기준을 적용한 $CRR_{N=10}$ 정규화 곡선과 규모 7.5의 지진을 기준으로 하는 $CRR_{N=15}$ 정규화 곡선의 상관성을 확인하였다.

핵심용어 : 반복직접단순전단시험, 액상화, 전단저항능력비, 정규화 액상화 저항 곡선

1. 서 론

지진 발생 시에 포화된 모래 지반에서 순간적인 충격이나 진동으로 인해 과잉간극수압이 증가함에 따라 유효응력이 감소하여, 최종적으로 모래가 액체와 같이 거동하는 현상을 액상화(Liquefaction)라 정의한다. 일본, 미국, 중국, 뉴질랜드 등 다양한 국가에서 지진으로 인한 액상화 현상이 보고되었으

며(Idriss and Boulanger, 2008), 이로 인해 막대한 규모의 재산 피해가 발생하였다. 국내에서도 2017년 포항 지역에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인해 기기 계측 최초로 액상화 현상이 관측되었다. 모래가 물과 함께 지표면으로 분출되는 분사현상(Sand Boiling)이 관측되었으며, 이로 인해 국내 지반에 대한 액상화 평가 관련 연구에 대한 필요성이 강조되고 있다. 지반의 액상화에 대한 저항력은 CPT, SPT를 비롯한 현장

*정회원, 과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학 석사과정(E-mail: hwangbyongyoun@kict.re.kr)

Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Science & Technology

**교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 박사후연구원(Tel: +82-31-910-0594, Fax: +82-31-910-0561, E-mail: tykwak@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Post-Doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

시험 결과를 이용한 간이 평가법과 동적실내시험을 통한 평가법으로 구분된다(Ishihara, 1996; Youd and Idriss, 2001). 현장시험을 통한 평가법의 경우 Seed and Idriss (1971)가 최초 현장시험 결과를 토대로 지반의 액상화 저항강도(CRR) 평가법을 제시한 이후로, 다양한 연구자들이 지속적인 연구를 통해 지속적으로 경험식을 수정하였다(Seed, 1979; Seed et al., 1985; Youd and Idriss, 2001; Boulanger and Idriss, 2014). 반면, Kramer (1996)와 Vucetic et al. (1998)은 반복직접단순전단시험을 통해 지진으로 인해 발생하는 횡방향 응력 조건을 보다 정확하게 모사할 수 있음을 제시하였으며, 여러 연구자들이 영향 인자를 선정하여, 각 인자들이 액상화 저항 강도에 미치는 영향을 확인하였다(Vaid and Sivathayalan, 1996; Chang and Hong, 2008; Mortezaie and Vucetic, 2013). 일반적으로 정현파 형태의 하중을 반복 재하하는 방식으로 반복직접단순전단시험을 수행하였으며, Mortezaie and Vucetic (2013)은 진동수와 유효구속응력이 증가함에 따라 과잉간극 수압이 감소한다고 제시하였다. Vaid and Sivathayalan (1996)은 모래의 액상화 저항 강도에 대한 상대 밀도와 유효구속응력의 변화가 미치는 영향을 발표하였다. Chang and Hong (2008)은 모래에 포함된 세립분 함량에 따른 액상화 저항 강도 영향을 확인해보고자 하였으며, 세립분 함량이 증가함에 따라 액상화 저항강도가 선형적으로 증가함을 확인하였다.

국내의 경우는 주로 현장 시료를 적용하여 영향 인자를 평가하는 연구가 수행되었다. Park et al. (2011)은 낙동강 유역에서 채취한 소량의 세립분이 포함된 모래를 사용하여 세립분 만의 소성지수가 모래 지반의 액상화 거동에 미치는 영향을 확인하였다. Park et al. (2018)은 포항 액상화 발생 현장에서 채취한 두 종류의 모래를 사용하여 반복하중의 형태(정현파 및 실지진파)에 따른 포항 모래의 액상화 저항 특성을 연구하였다. Yoon et al. (2007)은 인천 해안 지역에서 채취한 패각질 모래에 대하여 유효구속응력, 상대밀도 그리고 패각 함유량이 액상화 저항 강도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이와 같이 다양한 인자들에 따른 액상화 저항 강도에 대한 연구가 활발히 수행되었음에도 불구하고, 국내 모래를 포함하여 모래의 입도분포 및 입자 형상에 따른 액상화 연구는 거의 수행되지 않았다. Mandokhail et al. (2016)은 오타와 모래와 주문진 표준사를 사용하여 반복 직접단순전단시험을 수행하여 설계에 활용할 수 있는 정규화된 액상화 저항 곡선을 제안한 바 있으나, 입도분포 및 입자 형상에 대한 고찰은 수행되지 않았다.

본 연구에서는 입도분포 및 입자 형상에 따른 액상화

저항 강도를 확인하고자, 포항 액상화현장에서 채취한 모래와 함께 주문진 표준사 및 오타와 모래를 이용하여 반복직접단순전단시험을 실시하였다. 시험 결과를 토대로 액상화 발생까지의 반복횟수를 통해 시료별 액상화 저항 곡선을 도시하였으며, 액상화 저항강도(CRR)를 산정하여 액상화 저항 특성을 고찰하였다. 추가적으로, 국내 및 국외 기준을 토대로 정규화를 수행하여 인자의 영향을 최소화하였으며, 두 정규화 곡선의 상관성을 확인하였다.

2. 반복직접단순전단시험 개요(CDSS Test)

2.1 시험 시료

본 연구에서는 국내에서 실제 액상화 현상이 관측된 경상북도 포항시 송도동에서 채취한 모래를 시료로 사용하였다. 이와 함께 입경이 균일한 대표적 표준사(Poorly-Graded Soil)인 주문진 표준사 및 오타와 모래를 이용하여 결과를 비교하였다. Fig. 1은 반복직접단순전단시험에 사용된 시료의 입도 분포를 나타내며, 세 시료 모두 통일분류법상 빈입도 모래(SP)로 분류되었다. 평균 입경의 크기는 오타와 모래($D_{50} = 0.90$ mm), 주문진 표준사($D_{50} = 0.51$ mm), 포항 현장 모래($D_{50} = 0.21$ mm)순으로 큰 값을 나타냈다. 각 시료별 물리적 특성은 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1. Particle Distribution of Soil Having the Possibility of Liquefaction (Yamazaki et al., 1998)

실험 수행에 앞서, Fig. 1과 같이 각 시료의 입도분포 곡선을 Yamazaki et al. (1998)이 제시한 입도분포에 따른 액상화 발생 가능성 도표에 함께 도시하였으며, 이를 토대로 시료의

Table 1. Physical Properties of Sands

Sand	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c	G_s	e_{max}	e_{min}
Pohang Sand	0.12	0.17	0.23	1.92	1.05	2.50	0.90	0.64
Jumunjin Sand	0.34	0.42	0.55	1.62	0.96	2.55	0.92	0.56
Ottawa Sand	0.65	0.78	0.96	1.46	0.96	2.64	0.74	0.50

입도분포에 따른 액상화 저항성을 확인하였다. 그 결과, 포항 현장 모래의 경우 액상화 가능성이 높은 (A) 구간에 위치하고 주문진 표준사와 오타와 모래의 경우 액상화 발생 가능성이 있는 (B) 구간에 위치하고 있음을 확인하였다.

추가적으로 각 시료의 입자 형상을 확인하기 위해 주사현미경(SEM)을 활용하여 촬영하였으며, 각 시료별 SEM 사진을 Fig. 2에 제시하였다. 기존 연구자들은 시료의 사진을 통하여 시각적으로만 판단할 경우, 각 입자 형상 간의 차이를 명확하게 구별하기 어렵기 때문에 수치적으로 정량화하는 방법을 다양하게 제시한 바 있다(Cho et al., 2006; Cherif Taiba et al., 2018; Yoshimura and Ogawa, 1993). 본 연구에서는 Yoshimura and Ogawa (1993)이 제안한 입자 형상의 간이정량화 방법을 적용하여 각 시료에 대한 입자 형상을 수치적으로 제시하였다. Yoshimura and Ogawa (1993)는 Eq. (1)과 같이 요철계수(the Coefficient of Form Unevenness, FU)의 개념을 제시하였으며, 요철계수 FU는 입자가 완전한 구 형태일 때 1.0이며 요철 정도가 심해질수록 그 값이 작아진다.

$$FU = \frac{4\pi a}{l^2} \quad (1)$$

여기서, a 와 l 은 각각 입자의 단면적과 외주를 뜻한다. 본 연구에 사용된 시료의 입자 형상은 다음과 같은 순서로 확인하였다. (1) 집합체로 이루어진 모래의 개별 입자 형상을 하나의 수치로 정량화시키기 위해, 각 모래 시료의 SEM 사진에서 20개 정도의 표본을 무작위 추출한다(Yoshimura and Ogawa, 1993). (2) 무작위 추출된 입자들에 대해서 이미지 해석 소프트웨어인 Image J를 활용하여 입자의 단면적 a 와 외주 l 을 측정한다. (3) Eq. (1)을 통해 각 입자들의 요철계수 FU를 확인하며, 결과들의 평균값을 통해 Table 2와 같이 각 시료별 요철계수 FU를 산정한다. 오타와 모래,

주문진 표준사, 포항 현장 모래 순으로 요철 계수 FU가 큰 값을 나타냈으며, 비교를 용이하기 위해 원형, 정사각형, 정삼각형의 요철계수 FU를 함께 제시하였다.

2.2 시험 장비

본 연구에 사용된 실험 장비는 미국 Geocomp사의 ShearTrac-II 장비로, Fig. 3과 같이 균일한 전단 변형의 발생을 허용하기 위하여 공시체 주위에 테플론 재질의 링을 쌓아올리는 SGI-type (Amer et al., 1987)을 적용하여 측면을 구속한 뒤, 연직 방향으로 응력을 재하한다(구속압 효과). 시험 중에 로드셀과 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)를 설치하여 연직 및 수평 방향의 응력과 변위를 지속적으로 측정하였다. 시료의 압밀이 완료된 후, 시료의 높이를 고정시켰으며, 시료의 하부판에 수평 방향 응력을 반복적으로 재하하여 시료 전체에 균일한 전단 변형을 발생시킨다. 이를 통해 일정체적조건을 모사하였으며, Dyvik et al. (1987)가 언급한 바와 같이 반복되는 전단응력에 따른 유효연직응력의 변화량을 시료 내 발생하는 과잉간극수압의 변화와 동일하다고 가정하였다. 가정 조건을 토대로 시료를 포화시켜 진행하는 비배수 실험을 건조 상태의 시료를 사용하여 모사하였다.

2.3 시험 조건 및 방법

본 연구에서는 세 가지 사질토 시료의 상대밀도와 입도분포, 그리고 입자 형상이 액상화 강도에 미치는 영향을 확인하고자 Table 3과 같이 반복직접단순전단시험을 수행하였다. 시료는 ASTM D8296 (2019)에 의거하여 직경 63.5 mm, 높이 24 mm로 재성형하였으며, 시료를 3층으로 나누어 저다짐법(Ladd, 1978)을 사용하여 제작하였다. 공시체의 직경에 대한 높이의 비율이 매우 작기 때문에, 압밀 후 시료의 상대밀도는 초기에 설정한 상대밀도에 비하여 상당히 증가하는 경향을 나타낸다. 실제 현장 조건은 압밀이 완료된

Fig. 2. SEM Photos of Sands

Table 2. The Coefficient of Form Unevenness (FU) of Sands and Figures

Figure	Pohang Sand	Jumunjin Sand	Ottawa Sand	Circle	Square	Triangle
FU	0.77	0.73	0.83	1.00	0.79	0.60

(a) ShearTrac-II

(b) Teflon Stacked Rings

Fig. 3. Geocomp CDSS Test Apparatus

Table 3. Test Conditions of Cyclic Direct Simple Shear Test

Test No.	Sand	Effective Vertical Stress (kPa)	Wave Type	Frequency (Hz)	D_{ri} (%)	D_{re} (%)	CSR
1	Pohang sand	100	Sine wave	0.1	45.0	63.0	0.20
2						62.4	0.10
3						64.7	0.09
4						62.4	0.08
5		100	Sine wave	0.1	65.3	84	0.23
6						81.6	0.15
7						84.4	0.10
8						80.6	0.08
9	Jumunjin Sand	100	Sine wave	0.1	53.0	64.5	0.20
10						63.8	0.13
11						60.8	0.10
12						62	0.08
13		100	Sine wave	0.1	74.0	80.2	0.25
14						81.9	0.20
15						79.7	0.15
16						83.0	0.10
17	Ottawa sand	100	Sine wave	0.1	49.0	61.9	0.20
18						61.6	0.15
19						63.9	0.10
20						65.0	0.08
21		100	Sine wave	0.1	69.2	78.7	0.25
22						78.0	0.20
23						79.3	0.15
24						79.6	0.10

상태로 가정하는 것이 합리적이기 때문에, 시료의 상대 밀도 역시 압밀 후를 기준으로 상대밀도 60%와 80%에 근접하도록 성형하였다(D_{ri} = 초기 성형 시의 상대밀도/ D_{re} = 압밀 단계 종료 시점에서의 침하량을 고려한 상대밀도). 시료의 반복 전단 단계에서는 심도 10 m ~ 20 m 사이에서 지반에 작용하는 유효 구속압을 재현하고자 100 kPa 조건으로 고정하였으며, 0.1Hz의 정현파를 적용하여 0.08 - 0.25의 응력비 (CSR) 범위에서 반복하중을 재하하였다. 실험 시 액상화

발생 기준은 일반적으로 유효연직응력에 대한 과잉간극수압의 발생량 혹은 전단변형률로 판단하며(De Alba et al., 1976; Ishihara and Yamazaki, 1980), 본 연구에서는 NRC (1985)에 의거하여 양방향 전단변형률이 7.5%에 도달할 때를 시험 종료 시점으로 결정하였다(Vaid and Sivathayalan, 1996). 반복직접단순전단시험을 수행하는 동안 시험 전 과정에서 발생하는 과잉간극수압(가정조건에 따른 유효연직응력의 감소량)도 함께 확인하였다.

3. 반복직접단순전단시험 결과 및 분석

각 시료별 반복직접단순전단시험 결과로 전단변형률 및 과잉간극수압 등을 확인하였으며, Vaid and Sivathayalan

(1996)가 제시한 시험 종료 기준을 토대로 각 시험별 액상화 발생까지의 반복하중 재하 횟수(N_{liq})를 측정하여 Table 4에 나타냈다. Figs. 4와 5는 시료별 결과의 대표적 예시를 도시하였다(목포 상대밀도 60%, CSR = 0.10 / 목포 상대밀도

Table 4. Results of Cyclic Direct Simple Shear Test

Test No.	N_{liq}	Test No.	N_{liq}	Test No.	N_{liq}
1	1.6	9	1.7	17	1.8
2	8.2	10	6.0	18	3.3
3	21.5	11	13.4	19	10.3
4	40.8	12	35.3	20	29.3
5	1.3	13	1.3	21	2.3
6	4.8	14	4.8	22	3.3
7	15.8	15	12.3	23	8.8
8	96.8	16	27.8	24	28.8

(a) Shear Strain Versus Number of Cycles

(b) Excess Pore Pressure Versus Number of Cycles

(c) Shear stress-shear strain curve

(d) Effective Stress Path

Fig. 4. Results of Cyclic Direct Simple Shear Test (Target D_r = 60%, CSR = 0.1)

Fig. 5. Results of Cyclic Direct Simple Shear Test (Target $Dr = 80\%$, $CSR = 0.1$)

80%, $CSR = 0.10$). Figs. 4와 5의 (a)와 (b)는 반복하중 재하 횟수에 따른 전단변형률과 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있으며, 액상화 발생 시점을 검정색 점선으로 표시하였다. 전단응력이 반복적으로 재하됨에 따라 전단변형률 및 과잉간극수압이 증가하는 것을 확인하였다. 전단 변형률의 경우 양방향으로 고르게 증가하는 경향을 보이며, 액상화 발생 시점에서 유효연직응력이 점진적으로 감소하여 0 kPa에 도달할 때까지 과잉간극수압이 증가함을 확인하였다. Figs. 4와 5의 (c)와 (d)에는 각각 전단응력-전단변형률 곡선과 유효응력 경로를 도시하였다. 모든 구간에서 CSR 은 입력한 값에 정확하게 도달하였다. 다만, 높은 상대밀도의 주문진 표준사와 오타와 모래에서는 과잉간극수압이 수축되는 현상이 발생하여, 과잉간극수압이 최대치로 수렴하는 시점보다 액상화 발생시점이 늦은 것을 확인하였다(Zhang and Wang, 2012). 이에 반해 포항 모래는 액상화에 대한 저항성이

낮아 과잉간극수압이 최대치로 수렴하는 시점과 액상화 발생시점이 유사하게 나타났다.

Fig. 6은 시료별 목표 상대밀도가 각각 60%와 80%일 때 가해지는 반복전단응력비에 대한 액상화 발생 시점에서의 반복 재하 횟수의 관계를 토대로 도시한 액상화 저항 곡선이다. 액상화 저항 곡선은 아래의 Eq. (2)와 같이 일반적으로 사용되는 Idriss and Boulanger (2008)가 제안한 급수함수 형태의 경험식을 적용하여 도시하였다.

$$CRR = aN^{-b} \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 각각 곡선 적합 매개변수(Curve Fitting Factor)를 나타낸다. 액상화 저항강도(CRR)는 국내의 경우 해양수산부(MOF, 2018) 내진설계 기준에 의거한 지진규모 6.5에 해당하는 액상화 발생 시 반복 재하횟수 10회 시의

(a) Target relative density = 60%

(c) Target relative density = 80%

Fig. 6. Liquefaction Resistance Curve

Table 5. Cyclic Resistance Ratio of Sands

Sand	Pohang Sand		Jumunjin Sand		Ottawa Sand	
	Dr = 60%	Dr = 80%	Dr = 60%	Dr = 80%	Dr = 60%	Dr = 80%
CRR ($N_{liq}=10$)	0.11	0.13	0.11	0.15	0.11	0.14
CRR ($N_{liq}=15$)	0.10	0.11	0.10	0.13	0.10	0.12

반복전단응력비(CSR)으로 정의하고 있으며, 국외의 경우 Seed et al. (1985)가 제안한 지진규모 7.5 기준 반복 재하횟수 15회 시의 반복전단응력비(CSR)를 주로 사용하고 있다. 시험 결과를 토대로 도시한 액상화 저항곡선을 통해 각 시료별 반복 재하횟수 10회와 15회에 해당하는 액상화 저항강도(CRR)를 각각 산정하였으며, 이를 Table 5에 나타냈다. 반복 재하횟수 10회에서의 액상화 저항강도는 목표 상대밀도가 60%인 경우 세 시료의 액상화 저항강도는 모두 0.11로 동일한 값을 나타냈으며 목표 상대밀도가 80%인 경우 액상화 저항강도는 포항 현장 모래, 주문진 표준사, 오타와 모래가 각각 0.13, 0.15, 0.14로 산정되었다. 반복 재하횟수 15회에서의 액상화 저항강도는 목표 상대밀도가 60%인 경우 0.10으로 모두 동일한 값을 나타냈으며 목표 상대밀도가 80%인 경우 포항 현장 모래, 주문진 표준사, 오타와 모래가 각각 0.11, 0.13, 0.12로 확인되었다.

즉, 시료 종류에 관계없이 상대밀도가 증가함에 따라 액상화 저항강도가 증가하는 경향을 보였으나, 상대밀도 60%에서는 동일한 액상화 저항강도를 보이는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 Ishihara (1996)이 제시한 바와 같이 70% 이하의 상대밀도에서 모래의 액상화 저항강도가 선형의 미세한 크기로 증가하다가, 70% 초과 시에 급격하게 증가하는 경향에 의한 것으로 확인되었다. 이를 통해 상대밀도 70% 이하의 사질토(상대밀도 60%)에서 확인된 액상화 저항강도보다, 70%를 초과한 경우(상대밀도 80%)에서 시료별 액상화 저항 강도 특성이 명확하게 나타났다.

Figs. 4와 5에 제시된 실험 결과를 통하여, 동일한 연직응력

과 전단응력을 재하하였음에도 불구하고 액상화 발생 시의 반복재하횟수는 포항 현장 모래, 주문진 표준사, 오타와 모래 순으로 적은 값을 나타냈다. 특히 포항 현장 모래의 경우, 다른 두 시료보다 상대적으로 낮은 횟수에서 액상화가 발생하였음을 확인할 수 있었다. Yamazaki et al. (1998)이 제시한 액상화 간이 평가법을 세 모래에 적용할 경우, 포항 현장 모래는 액상화 발생가능성이 높은 (A)구역의 중앙, 다른 두 모래는 액상화 발생가능성이 있는 (B)구역에 위치한다. 이와 같은 결과는, Yamazaki et al. (1998)의 액상화 발생 가능성 도표를 적용하여 입도분포의 영향을 평가하는 것이 적절하다는 사실을 나타낸다.

주문진 표준사와 오타와 모래는 Yamazaki et al. (1998)의 액상화 발생 가능성 도표에서 모두 (B)구역에 위치하는 것으로 나타났지만, 액상화 저항강도는 반복 재하횟수 10회 기준 각각 0.15, 0.14로, 15회 기준에서는 각각 0.13, 0.12로 확인되었다. Table 2에 제시한 바와 같이, 주문진 표준사와 오타와 모래의 요철계수 FU는 각각 0.73, 0.83으로 나타나, 주문진 표준사의 입자가 오타와 모래보다 상대적으로 모난 형상을 띄고 있다. Santamarina and Cho (2001)와 Cherif Taiba et al. (2018)은 정적실내시험을 토대로 입자 형상의 모난 정도가 클수록 입자간 접촉력을 증가시켜 비배수 전단강도가 증가한다는 경향을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 동적 반복시험에서도 입자 형상이 상대적으로 더 모난 경우에 모래 입자간 접촉력이 증가하며, 이로 인해 주문진 표준사가 오타와 모래에 비해서 액상화에 대해 다소 높은 저항력을 보이는 것을 확인하였다.

4. 정규화를 통한 액상화 저항곡선 분석

기존 연구자들이 제시한 시험 결과 및 본 연구에서 수행된 시험 결과에서 확인할 수 있듯이, 사질토의 액상화 저항 곡선은 구속압, 상대밀도, 시료의 물성 및 조성 방법 등 다양한 인자들의 영향을 받게 되어 데이터의 불확실성(곡선 별로 큰 편차가 발생)을 야기한다. 특히, 실내시험을 통해 지반의 액상화 평가를 수행하는 경우, 불교란 시료 채취의 어려움으로 인하여 현장 상태를 동일하게 재현하기가 힘든 실정이다. 이에 따라 Seed and Idriss (1971)가 제안한 액상화 간편평가법에서는 SPT, CPT 등의 현장시험 결과를 이용하여 액상화 저항강도(CRR)를 산정하며, 국외에서는 주로 규모 7.5의 지진을 기준으로 등가 반복하중 재하횟수 15회 시의 CRR로 나타내며(현장시험 결과를 활용), 이를 $CRR_{N=15}$ 라 한다(Seed et al., 1985).

Mandokhail et al. (2016)은 현장시험결과로부터 산정한 $CRR_{N=15}$ 을 실내시험 결과로부터 계산한 액상화 저항 곡선과 점목시켜 설계에 활용하고자 하였으며, Fig. 7에 도시된 과정을 통해 방법을 제시하였다. 먼저, 반복하중 재하횟수 N 에서의 CRR을 토대로 산정된 액상화 저항 곡선을 $CRR_{N=15}$ 로 정규화한 뒤, 액상화 평가 대상 현장에서 수행한 현장시험결과를 토대로 $CRR_{N=15}$ 을 구하여 정규화 곡선 식에 곱하면 해당 현장 고유의 액상화 저항 곡선을 산출할 수 있다고 제안하였다.

본 연구에서는 Mandokhail et al. (2016)이 제안한 내용에 따라 Fig. 6에 제시한 시료별 모든 액상화 저항 곡선을 $CRR_{N=15}$ 에 대해 정규화하였으며, 이를 통해 인자들의 영향에 따른 분산의 정도를 평가하였다. Fig. 8은 각 시험별로 산정된 액상화 저항 곡선을 $CRR_{N=15}$ 으로 정규화를 수행한 결과로, Fig. 6에 제시된 기존 액상화 저항 곡선에 비해 분산이 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 정규화된 CRR의 최대값은 2.0 ~ 2.6의 범위로 나타났으며, 상대밀도에 따라 곡선의 위치가 변함을 확인하였다.

제시된 정규화 액상화 저항 곡선의 적절성을 검증하기 위하여 기존 연구자들이 수행한 정규화 결과와의 비교를 수행하였다(Liu et al., 2001; Boulanger and Ziotopoulou, 2015). Fig. 9는 액상화 저항곡선을 $CRR_{N=15}$ 으로 정규화한 결과로, 기존 연구자들이 제시한 정규화 곡선의 상한선과 하한선을 빨간색 점선으로, 본 연구에서 수행된 시험 결과에 대한 정규화 결과를 검은색 실선으로 함께 도시하였다. 앞서 언급한 Eq. (2)에서의 곡선 적합 매개변수 b 는 정규화 방법과 무관하게 일정한 값을 가지며, 기존 연구자들이 제시한 정규화 곡선의 상한($b = 0.37$)과 하한($b = 0.25$) 내에 본 연구에서 제시한 정규화 액상화 저항 곡선이 포함됨을 확인하였다.

추후, 추가적으로 포항에서 채취한 시료를 이용하여 실험을 수행하고, 정규화 곡선의 데이터를 좀 더 확보하게 되면, Fig. 7의 방법을 통해 포항지역 사질토의 액상화 저항 곡선을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7. Schematic Procedure of Deriving Site Specific Liquefaction Resistance Curve (Mandokhail et al., 2016)

Fig. 8. Normalized Liquefaction Resistance Curves

Fig. 9. Comparison of Normalized Liquefaction Resistance Curves

5. 결 론

본 연구에서는 포항지역 액상화 발생 현장에서 채취한 모래와 함께 대표적 사질토 시료인 주문진 표준사와 오타와 모래를 사용하여 반복직접단순전단시험을 수행하였다. 세 가지 사질토를 통해 입도분포, 상대밀도, 입자 형상이 액상화 저항 강도에 미치는 영향을 확인하였다. 사질토의 입도분포 영향은 Yamazaki et al. (1998)이 제안한 액상화 발생 가능성 도표를 통해 확인하였으며, 상대밀도의 영향은 세 가지 시료 모두 압밀 후 상대밀도 60%와 80%로 재성형하여 비교 분석하였다. 추가적으로, 입자 형상의 영향을 확인하기 위하여 시료별 요철계수(FU)를 측정하여 입자 형상을 수치적으로 정량화하였다. 수행된 반복직접단순전단시험 결과에 대해서 인자의 영향을 최소화하기 위하여 정규화 방법을 적용하였으며(Mandokhail et al., 2016), 국내 내진설계기준을 적용한 $CRR_{N=10}$ 정규화 곡선과 국외 기준에서 지진규모 7.5일 경우 사용되는 $CRR_{N=15}$ 정규화 곡선의 상관성을 확인하였다. 본 연구를 토대로 도출한 결론은 다음과 같다:

- (1) 시료별 입도분포곡선을 토대로 Yamazaki et al. (1998)이 제안한 액상화 발생 가능성 도표와 비교한 결과, 세 시료 모두 액상화 발생 가능성이 있는 구간 내에 포함되었으며, 특히 포항 현장 모래의 경우, 액상화 발생 가능성이 높은 (A) 구간에 위치하여 액상화에 대해 취약함을 확인하였다.
- (2) 압밀 후 상대밀도 60% 조건에서 실험한 결과, 액상화 저항강도는 국내기준($CRR_{N=10}$)과 국외기준($CRR_{N=15}$)에 따라 세 시료 모두 0.11과 0.10 정도로 유사하게 나왔으며, 이를 통해 Ishihara (1996)이 제시한 바와 같이 70% 이하의 상대밀도에서는 시료별 액상화 저항 강도 특성이 뚜렷하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 압밀 후 상대밀도 80% 조건에서 실험한 결과, 포항

현장 모래의 액상화 저항강도가 국내기준 0.13, 국외 기준 0.11으로, 다른 두 시료에 비해 액상화에 대한 저항력이 약한 것으로 나타났다. 이는 Yamazaki et al. (1998)의 액상화 발생 가능성 도표 결과와 부합하고 있음을 확인하였다.

- (4) 액상화 발생 가능구역(B)에 속하는 주문진 표준사와 오타와 모래의 경우, 입자의 모난 정도가 주문진 표준사가 더 크며 액상화 저항강도 역시 주문진 표준사가 국내기준 0.15, 국외기준 0.13으로 오타와 모래보다 더 큰 값을 가지고 있었다. 이를 토대로, 입자 형상이 상대적으로 더 모난 경우에 모래 입자간 접촉력이 증가하여 액상화 저항 강도 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.
- (5) $CRR_{N=15}$ 에서의 정규화 액상화 저항곡선은 기존 저항 곡선에 비해 분산 정도가 감소하였으며, 곡선 적합 매개변수 b 가 기존 연구자들이 제시한 범위 내에 위치하는 것을 통해 정규화 액상화 저항곡선의 적절성을 확인하였다.

추후 추가적인 실험을 통해 요철계수(FU)에 따른 액상화 저항 강도 관계 및 본 연구에서 얻은 액상화 정규화 곡선을 바탕으로 포항 지역 사질토에 적합한 액상화 저항 곡선을 산정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 과학기술정보통신부, 경상북도와 경북연구개발지원단의 과학기술기반 지역수요맞춤형 R&D 지원사업(1711079685)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Amer, M.I., Kovacs, W.D., and Aggour, M.S. (1987). Cyclic simple shear size effects. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 7, pp. 693-707.
- ASTM D8296. (2019). *Standard test method for consolidated undrained cyclic direct simple shear test under constant volume with load control or displacement control*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Boulanger, R.W., and Ziotopoulou, K. (2015). *PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications*. Report No. UCD/CGM-15/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, USA.

- Boulanger, R.W., and Idriss, I.M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM.-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, USA.
- Chang, W.J., and Hong, M.L. (2008). Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands. *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 1, pp. 101-114.
- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., and Schanz, T. (2018). Experimental investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 619-633.
- Cho, G.C., Dodds, J., and Santamarina, J.C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp. 591-602.
- De Alba, P., Seed, H.B., and Chan, C.K. (1976). Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, No. 9, pp. 909-927.
- Dyvik, R., Berre, T., Lacasses, S., and Raadim, B. (1987). Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests. *Géotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 3-10.
- Idriss, I., and Boulanger, R.W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behavior in earthquake geotechnics*. The Oxford engineering science series, Oxford, UK: Clarendon.
- Ishihara, K., and Yamazaki, F. (1980). Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading. *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 1, pp. 45-59.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Ladd, R.S. (1978). Preparing test specimens using under compaction. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23.
- Liu, A.H., Stewart, J.P., Abrahamson, N.A., and Moriwaki, Y. (2001). Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 12, pp. 1017-1026.
- Mandokhail, S.J., Park, D., Kim, H., and Park, K.C. (2016). Cyclic simple shear test based design liquefaction resistance curve of granular soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 6, pp. 49-59.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2018). *Seismic design standard of port and harbor (KDS 64 17 00)*.
- Mortezaie, A.R., and Vucetic, M. (2013). Effect of frequency and vertical stress on cyclic degradation and pore water pressure in clay in the NGI simple shear device. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 10, pp. 1727-1737.
- National Research Council (NRC). (1985). *Liquefaction of soils during earthquakes*. Washington, D.C., USA: National Academy Press.
- Park, S.S., Kim, Y.S., and Kim, S.H. (2011). Cyclic shear characteristics of Nakdong River sand containing fines with varying plasticity. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 3C, pp. 93-102.
- 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.
- Santamarina, J.C., and Cho, G.C. (2001). Determination of critical state parameters in sandy soils-Simple procedure. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 2, pp. 185-192.
- Seed, H.B. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. 2, pp. 201-255.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 97, No. 9, pp. 1249-1273.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.
- Vaid, Y.P., and Sivathayalan, S. (1996). Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 281-289.
- Vucetic, M., Lanzo, G., and Doroudian, M. (1998). Damping at small strains in cyclic simple shear test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 585-594.

- Yamazaki, H., Zen, K., and Koike, F. (1998). *study of the liquefaction prediction based on the grain distribution and the SPT N-value*. PHRI Technical Note No. 914, The Port and Harbour Research Institute.
- Yoon, Y., Yoon, G., and Choi, J. (2007). Liquefaction strength of shelly sand in cyclic simple shear test. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 8, No. 6, pp. 69-76.
- Yoshimura, Y., and Ogawa, S. (1993). A simple quantification method of grain shape of granular materials such as sand. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, Vol. 1993, No. 463, pp. 95-103.
- 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.
- Zhang, J., and Wang, G. (2012). Large post-liquefaction deformation of sand, Part I: Physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm. *Acta Geotechnica*, Vol. 7, pp. 69-113.
<https://doi.org/10.1007/s11440-011-0150-7>

Received	May 11, 2020
Revised	May 13, 2020
Accepted	June 2, 2020