

# 국내 지진 모의시험에 이용되는 규사의 액상화 저항특성에 관한 실험적 분석

## Experimental Analysis of Liquefaction Resistance Characteristics of Silica Sand Used in Earthquake Simulation Tests

최재순<sup>†</sup> · 진윤홍<sup>1)</sup> · 백우현<sup>2)</sup>

Jaesoon Choi · Yunhong Jin · Woohyun Baek

Received: December 28<sup>th</sup>, 2021; Revised: February 21<sup>st</sup>, 2022; Accepted: April 20<sup>th</sup>, 2022

**ABSTRACT** : In this study, dynamic characteristics and liquefaction resistance characteristics of silica sand which is used to simulate sandy layer were conducted using the cyclic triaxial test according to the relative density difference. The difference in liquefaction resistance with the relative density was confirmed through the test results, which the relative density conditions were changed to 40%, 60%, and 80%, and the cyclic resistance ratio (CRR) curve of the silica sand was obtained. In addition, in order to examine the validity of the liquefaction resistance ratio (CRR) curve, artificial silica sand ground was created, and liquefaction potential was evaluated through the simple assessment method and the detailed assessment method, and the safety factors of each were compared.

**Keywords** : Silica sand, Cyclic triaxial test, Density, Ground response analysis, Liquefaction assessment

**요지** : 본 연구에서는 국내 지진모의시험 수행 시 모래지반의 모사를 위해 국내에서 널리 이용되는 지반재료인 인공규사를 대상으로 상대밀도 차이에 따른 진동삼축시험을 수행하여 인공규사의 동적특성 및 액상화 저항특성을 실험적으로 분석하였다. 상대밀도 조건을 40%, 60%, 80%로 달리한 시험결과를 통해 상대밀도에 따른 액상화 저항특성을 확인하였으며, 액상화 진동저항응력비(Cyclic resistance stress ratio, CRR) 산정 곡선을 도출하였다. 또한, 액상화 진동저항응력비(CRR) 산정곡선의 타당성을 검토하기 위해 실내진동삼축시험에 사용된 규사로 이루어진 인공지반을 조성한 후, 간편예측법과 상세예측법을 통한 액상화 평가를 수행하여 각각의 안전율을 비교·검토하였다. 최종적으로, 상대밀도를 달리한 실험을 통해 인공규사의 동적물성을 파악하여 결과를 도출하였으며, 이 결과를 물성치로 적용한 상대밀도 40% 간편예측법은 안전율이 1로 안전한 지반으로 도출된 반면 상세예측법은 0.05작은 값으로 결과가 도출되었다.

**주요어** : 인공규사, 진동삼축시험, 상대밀도, 지반응답해석, 액상화 평가

## 1. 서론

지진하중에 의한 지반의 동적 거동특성 및 지반-구조물의 동적 거동특성을 보다 신뢰성 높게 파악하기 위해 진동대 시험 및 원심모형시험과 같은 지진모의시험이 동반된다. 이러한 지진모의시험에 있어서 대부분 축소모형을 이용하는 것이 일반적이며 이때, 하중, 시간, 구조물 등에 대해 축소비율을 고려한 상사율이 적용된다. 그러나, 모형지반을 조성하는 경우, 축소비율을 맞추는 것이 쉽지 않기 때문에 가능한 한 입도가 매우 작은 인공규사를 이용하는 것이 일반적이다. 국내·외 지진모의실험에서 인공규사를 사용한 사례를 살펴보면, Yun et al.(2020)은 지반 내 다양한 깊이에서 지반 가속도를 산정하여 이를 활용해 응답스펙트럼 해석을 수행

하고, 지반을 인공규사로 조성한 잔교식 안벽 구조물 실험 및 해석을 통해 도출된 잔교식 안벽 구조물의 모멘트 결과를 비교하여 응답스펙트럼 해석 시 적절한 입력지반가속도를 결정하는 방법을 제시하기 위해 동적 원심모형시험을 수행하였다. Jo et al.(2013)는 모형지반의 기초지반과 뒤채움 지반 조성에 인공적으로 생산한 인공규사를 사용하여 역T형 옹벽을 대상으로 동적 원심모형시험을 수행하였으며, 이를 통해 지진 시 옹벽에 작용하는 동적 토압을 M-O이론과 모형 모델 거동과의 비교를 통한 차이점을 평가하였다. 또한 성능기반내진설계에서 수치해석의 검증 및 적용성을 위해 실제 지진으로 예측된 구조물의 변위 또는 지진모의시험을 통해 확인된 예측결과와 비교가 수행된다. 이때, 비교를 위한 지진모의시험인 동적원심모형시험에 규사를 이용한다.

† Professor, Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University (Corresponding Author : [geotech@skuniv.ac.kr](mailto:geotech@skuniv.ac.kr))

1) Staff, Geotechnical Department, Soosung Engineering & Consulting

2) Ph.D.Candidate, Construct System Engineering, Seoul National University of Science & Technology

Lee et al.(2018)은 항만구조물의 성능기반 내진설계 도입을 위해서 액상화를 포함하는 비선형 유효응력해석기법의 검증에 대해 중력식 케이슨 안벽의 지진 시 거동에 대한 수치 해석의 결과와 인공규사로 조성된 지반과 중력식 케이슨 안벽의 축소모형을 통한 동적 원심모형시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Bao et al.(2018)은 건조 인공규사 지반에 설치된 무리말뚝에 대한 동적 원심모형시험을 수행하여 동적 무리말뚝 효과를 고려하는 동적 p-y곡선을 제안하고, 비선형 동적해석을 통해 제안된 동적 p-y곡선의 적용성을 검증하였다.

이상과 같이, 최근 발생한 경주지진과 포항지진으로 인해 인공규사를 이용한 진동대 및 원심모형시험과 같은 지진모의시험의 수행이 증가되고 있으나 지반모사를 위한 인공규사에 대한 실험적 고찰은 매우 미흡한 실정이다. 특히, 국내 지반진동과 관련된 실험연구를 보면, 대부분 실내진동삼축시험을 이용한 것으로 알려져 있으며 시험시료의 종류 및 특성, 액상화에 영향을 미치는 조건 등에 따라 시험이 수행된다. 대부분 주문진표준사 또는 액상화가 발생한 포항지역의 모래이다. 예를 들어, Shin(1999)는 주문진표준사를 이용해 상대밀도, 유효구속압, 실트질함유량에 대한 진동삼축시험을 수행해 액상화 영향인자에 대한 액상화저항강도특성 차이를 확인하였으며, Lee et al.(2010)는 진동삼축시험 시, 이방 구속 조건에서 실지진 하중을 이용해 주문진표준사의 액상화 저항강도특성을 확인하고 이방 구속된 시료의 액상화 저항강도를 구할 수 있는 보정계수를 제안하였다. Hwang et al.(2020)과 Kim et al.(2020)은 액상화가 발생한 포항지역 및 송도동에서 채취한 시료를 바탕으로 진동삼축시험을 수행해 액상화저항강도 특성을 확인하고 타 시료의 액상화 저항강도와 비교를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 지진모의시험에 이용되는 인공규사의 동적 특성을 분석하기 위해 상대밀도를 달리한 진동삼축시험을 수행하고 실험결과를 토대로 인공규사의 액상화 저항특성을 분석하였다. 또한, 실험을 통해 획득한 상대밀도에 따른 지반정수 추정을 통해 본 연구의 진동삼축시험에 이용된 규사로 이루어진 인공지반을 조성하고, 이를 대상으로 지반응답해석을 이용한 액상화 간편예측법을 수행하였으며, 진동삼축시험의 결과로 산정된 액상화 상세예측법의 안전율과 비교하였다.

## 2. 실내진동삼축시험

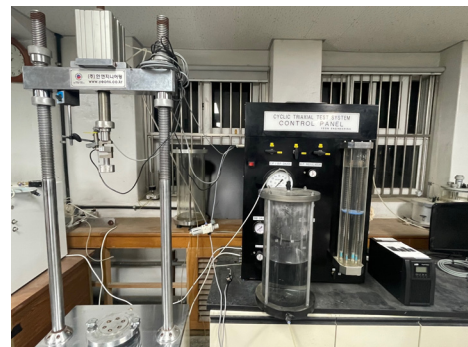
진동삼축시험은 지반의 진동저항 즉, 액상화 저항응력비(CRR)를 산정하는 시험 중 하나로 Seed & Lee(1966)가 사

질토의 액상화 발생 매커니즘에 대한 설명을 위해 진동삼축시험을 수행하면서부터 시작되었다. 특히, 지진 분야에 있어서 실험연구가 크게 발전한 일본의 경우 진동삼축시험을 통한 실험적 연구가 매우 활발하다. 국내에서도, 1999년 항만 및 어항시설 내진설계표준서에서 진동삼축시험을 통한 액상화 상세예측법이 제시된 이후, 최근, 내진설계 기준(MOF 2018)에도 액상화 상세예측법에서 액상화 저항응력비 산정곡선을 획득하기 위해서는 반드시 수행해야 하는 시험으로 규정되어 있다.

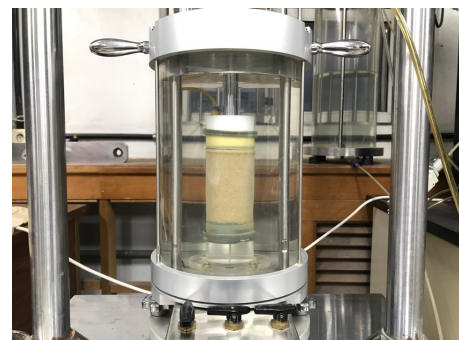
### 2.1 시험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실내진동삼축시험기는 Fig. 1과 같이 크게 제어용 컴퓨터, 판넬, 하중재하시스템과 시험용셀로 구성된 본체로 구분할 수 있다. 하중재하는 공기압으로 제어되며 컴퓨터 컨트롤 프로그램을 통해 삼축시험용 셀 내부의 구속압(Confining pressure) 및 시료 내부의 배압(Back pressure)을 제어한다. 또한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer), 간극수압계, 로드셀(Load Cell)을 이용하여 변위, 과잉간극수압(excess pore water pressure), 연직응력을 측정하여 컴퓨터 화면에서 확인이 가능하다.

시험시료 제작에 있어서 시험체의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 통일하였으며 상대밀도에 따라 셀 내부에 시



(a) CTX equipment



(b) Test progress

Fig. 1. Cyclic triaxial test equipment and test process

료를 성형한 후 시료 내부에 이산화탄소를 주입해 흙 내부 간극에 존재하는 공기를 밖으로 배출시킨다. 이는 포화 시 이산화탄소가 물에 더 잘 녹아 포화도 상승시간을 줄이기 위함이다. 포화도는 Skempton(1954)이 제안한 기준 문헌에 따라 B값(B Value)이 0.95가 되면 시료의 포화가 완료된 것으로 보고 시험을 수행하였다. B값이 만족하게 되면 지정한 유효구속압 100kPa에 맞추어 등방조건 하에서 압밀을 진행한다. 사질토의 경우, 점성토에 비해 비교적 압밀이 빠르게 진행되며 설정한 100kPa의 유효구속압에 도달하여 시료의 변형률이 일정해지면 압밀을 종료한다. 압밀종료 후, 배수 조건을 비배수조건을 전환시킨 후 진동전단응력(Cyclic shear stress)을 재하하며, 액상화 진동저항응력비(CRR) 산정 곡선을 획득하기 위해서 3번 이상의 진동전단응력을 달리한 시험을 반복한다.

## 2.2 시험 시료

본 연구에 사용된 시료는 국내 시험에 사용되는 인공규사로써 YUN et al.(2020), Lee et al.(2018) 등이 동적원심모형 시험 시 사용된 시료를 사용하였다. 우선적으로 체가름 시험을 수행하여 #200 통과율 5% 미만으로 세립분의 영향이 거의 없는 사질토인 것으로 확인하였으며, 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ ) 산정을 통해 통일분류법상 빈입도모래(SP)로 확인되었다. 또한 최대단위중량( $\gamma_{dmax}$ ) 및 최소단위중량( $\gamma_{dmin}$ )

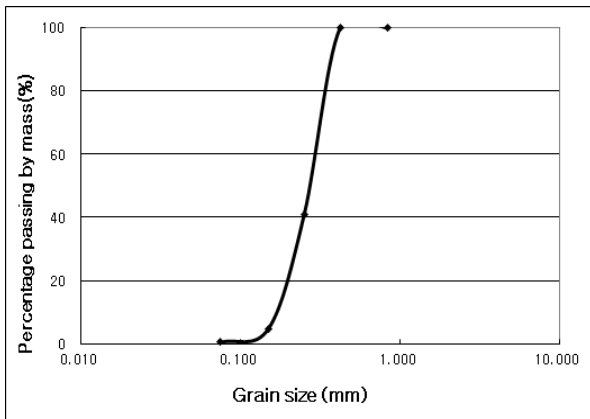


Fig. 2. Grain size distribution curve of tested soils

Table 1. Physical properties of soil

Soil type	Silica sand
$\gamma_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	1.65
$\gamma_{dmin}$ ( $g/cm^3$ )	1.24
$D_{50}$	0.26
Coefficient of uniformity ( $C_u$ )	1.93
Coefficient of curvature gradation ( $C_c$ )	1.11
$G_s$	2.6

시험을 통해 각각의 값을 산정하였다. 기본 지반정수는 Table 1에 요약한 바와 같으며, 입도분포곡선을 도식화하면 Fig. 2와 같다.

## 2.3 시험 조건

본 연구를 위해 수행된 진동삼축시험은 인공규사의 상대 밀도 조건을 느슨, 중간, 조밀 상태로 표현하기 위해 40%, 60%, 80%로 달리해 수행하였으며, 압밀 시 유효구속압은 100kPa로 수행하였다. 또한 재하주파수는 재하 소요시간이 과다해지지 않는 범위 내에서 시험의 안정성을 위해 최대한 작은 주파수 0.1Hz를 사용하였다. 이상의 시험조건을 요약 정리하면 Table 2와 같다. 진동하중 재하 시 양진폭 기준 축변형률 5% 혹은 과잉간극수압이 유효구속압과 같아져 유효응력이 0이 되는 시점(Ishihara, 1993)을 시험 종료기준으로 보았으며, 과잉간극수압의 변화와 이 기준을 토대로 액상화 발생 여부를 판단하였다.

Table 2. Condition of cyclic triaxial test

Test condition			
Relative density (%)	Dry unit weight ( $g/cm^3$ )	Effective stress (kPa)	Frequency (Hz)
40	1.377	100	0.1
60	1.457		
80	1.548		

## 3. 시험결과 분석

### 3.1 인공규사 실내진동삼축시험 결과

인공규사에 대한 진동삼축시험은 상대밀도에 따라 진동 축차응력을 달리한 실험이 3회 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 Table 3과 같다. 이 중 상대밀도별로 대표적인 시험

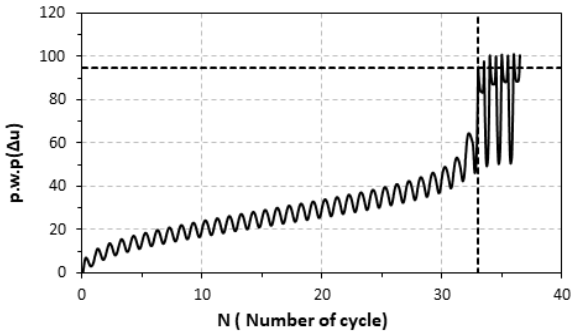
Table 3. Result of cyclic triaxial test

Test result		
Relative density (%)	Number of cycle (N)	Stress ratio
40	3	0.3
	8	0.25
	34	34
60	4	0.35
	7	0.32
	42	0.28
80	6	0.55
	9	0.5
	28	0.4

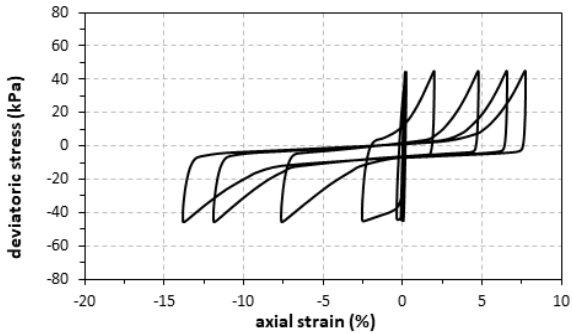
결과인 시간에 따른 과잉간극수압과 변형률의 변화를 나타내면 Fig. 3부터 Fig. 5와 같다. 시험 모두 진동하중이 반복됨에 따라 과잉간극수압이 증가하며 시료 내부의 초기유효 구속압 100kPa만큼 올라가는 것을 확인할 수 있다. 이때, 유효

효용력이 0에 가깝게 돼 액상화가 발생했음을 확인할 수 있었다. 또한, 상대밀도 80%의 경우 Fig. 5(a)와 같이 과잉간극수압이 상대적으로 느슨한 상태의 시험결과와 같이 급격하게 상승하기 보다 점차 초기유효구속압만큼 상승하는 것을 확인할 수 있다. 축응력-축변형률 곡선에서는 연직변형률이 반복하중 재하 횟수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, 진동삼축시험에서 흙이 압축에 대한 저항성보다 인장에 대한 저항성이 더 작기 때문에 하중 재하에 따른 인장 시에 연직변형률이 더 크게 나오는 것이 확인되었다(Kim et al., 2020).

Table 3의 시험 결과들을 종합하여 진동하중 반복횟수(N)와 축차응력비( $\sigma_d/2\sigma'_3$ )의 관계를 나타내면 Fig. 6과 같다.

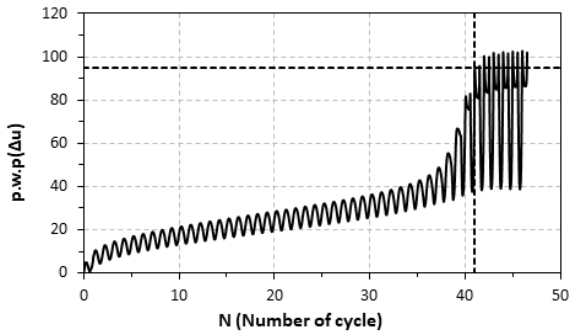


(a) Excess pore water pressure

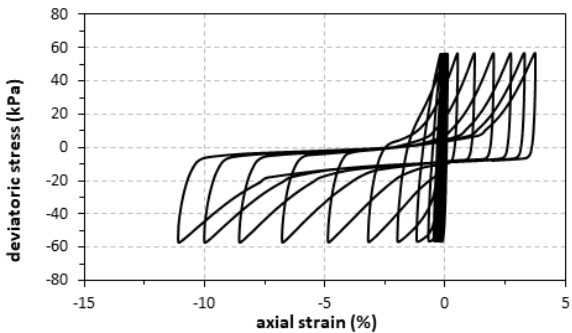


(b) Stress - stain

Fig. 3.  $D_r = 40\%$  Cyclic triaxial test results

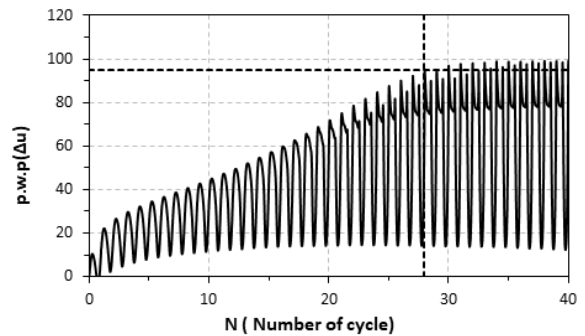


(a) Excess pore water pressure

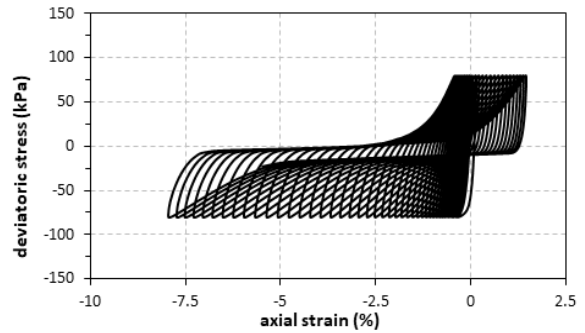


(b) Stress - stain

Fig. 4.  $D_r = 60\%$  Cyclic triaxial test results



(a) Excess pore water pressure



(b) Stress - stain

Fig. 5.  $D_r = 80\%$  Cyclic triaxial test results

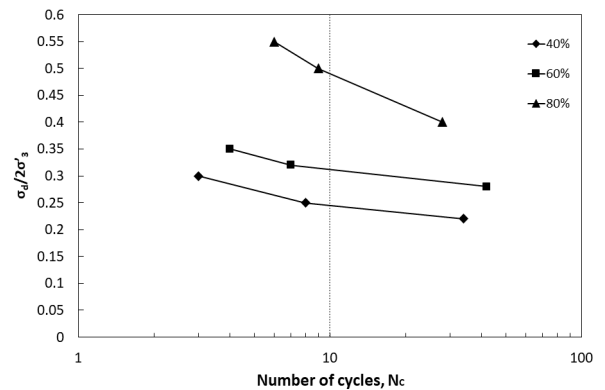


Fig. 6.  $\sigma_d/2\sigma'_3$  & N Curve

#### 4. 액상화 간편예측을 통한 액상화 저항곡선 타당성 검토

진동삼축시험으로 획득한 상대밀도별 CRR곡선의 타당성을 검증하기 위해 내진설계기준(MOF 2018)을 바탕으로, 간편예측을 통해 산정된 안전율 값(Fs\_sp)과 실내시험 수행을 통한 상세예측법의 안전율 값(Fs\_dt)을 비교하였다. 안전율을 비교를 위한 실내시험 및 지반조건은 상대밀도 40%를 이용하였다. 이때, 상대밀도 40%만을 대상으로 한 점은 상대밀도 80%의 경우, 상대밀도 자체가 내진설계 기준상 액상화 평가 제외대상에 해당된다는 점과, 상대밀도 60%의 경우에도 상당 부분 액상화 발생 가능성이 높지 않다는 점이 고려되었다.

간편예측법에 대한 안전율 산정은 Fig. 7에 제시된 CRR 곡선(Seed et al., 1984)을 이용하였다.

지반상태 파악을 위한 현장시험의 종류 중 하나인 표준관입시험(SPT)으로 산정된 타격횟수(N)의 결과를 상재하중 및 에너지비에 대한 보정값 등을 고려한 환산 SPT-N치((N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>)로 변환한 후, 이를 기초로 Fig. 7을 통해 CRR값을 결정한다. 이때, Fig. 7을 통해 결정된 CRR값은 지진규모 7.5의 값이므로 우리나라의 지진규모(6.5)를 고려하여 보정을 수행해야 한다.

이상의 액상화 간편 및 상세예측을 통한 안전율 산정과정을 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8의 중앙에 나타난 식에서 a<sub>max</sub>는 대상지반의 심도별 최대 지반가속도, g는 중력가속도, σ<sub>v</sub>는 대상지반의 심도에서의 총 상재압, σ'<sub>v</sub>은 대상지반의 심도에서의 유효상재압이며, 왼쪽의 M=6.5는 간편예측법의 CRR산정에 있어서

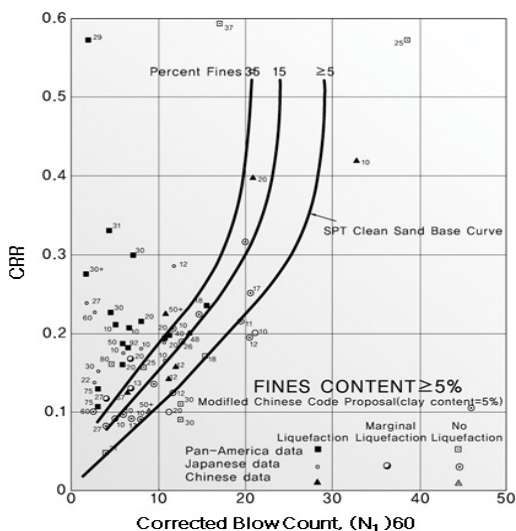


Fig. 7. Seed et al. the proposed CRR curve

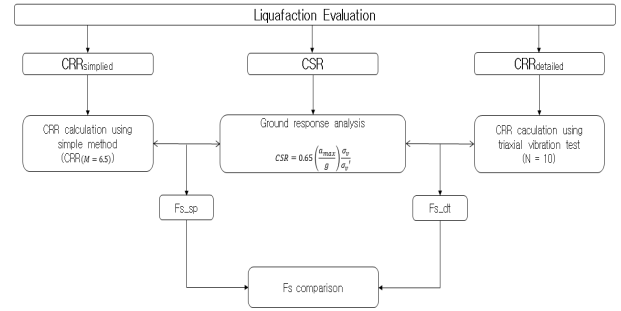


Fig. 8. Liquefaction assessment process

Fig. 7의 CRR곡선을 이용한 후 국내 지진규모에 대한 보정을 의미하고 본 연구에서는 지진규모 보정계수 1.5를 적용하였다. 또한, 오른쪽의 N=10은 Fig. 6과 같은 실내시험결과를 통해 획득된 CRR곡선을 이용할 경우, 지진규모 6.5의 CRR값을 선정할 때 적용되는 진동반복횟수(Number of cycle, N)이다(MOF, 2018).

#### 4.1 지반응답해석 및 CSR 산정

액상화 평가를 위해 Fig. 9와 같이 본시험에서 사용된 유사로 이루어진 인공지반을 형성하고 지반을 모델링해 지반응답해석을 수행하였으며, 획득한 결과값을 바탕으로 지진에 의한 전단응력비(Cyclic Stress Ratio)를 산정하였다. 지반응답해석은 1차원 등가선형해석프로그램인 PRO-SHAKE를 사용하였으며, 상대밀도 40% 인공유사로 이루어진 인공지반은 심도 20m에 지하수위 2m로 지반을 가정하였다. 지하수위를 2m로 가정한 것은 진동삼축시험에서 유효수축압 100kPa과 같은 조건을 맞추기 위한 것이다. 지반응답해석을 위해서는 지반에 대한 입력자료로 단위중량, 전단파속도, 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선 등 상대밀도, 입도분포외에 여러 지반정수에 대한 자료가 필요하다. 본 연구에서는 지반응답해석 시 필요한 기본적인 지반정수 값을 기존 연구자들의 경험식을 활용해 획득하였다. Skempton(1986)이 제안한 Eq. (1)은 느슨한 상태 사질토의 상대밀도(D<sub>r</sub>)과 (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>의 상관관계를 나타낸다. 이때, 상대밀도 40%를 대입하며 (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub> 값은 9가 산정되었다. 또한, 산정된 (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>을 바탕으로 인공지반에 대한 전단파속도(V<sub>s</sub>)를 결정하기 위해 Eq. (2)에 나타난 바와 같이 사질토지반에 적용 가능한 국내에서 제안된 경험식(Sun et al., 2008)을 사용해 V<sub>s</sub>값을 산정하여 지반 입력정수로 사용하였다.

$$(N_1)_{60} / D_r^2 = 55 \quad (1)$$

$$V_s = 82.01 N^{0.319} \quad (2)$$

또한, Eq. (2)의 경험식을 이용하기 위해서는 Eq. (1)을 통해 획득된  $(N_1)_{60}$ 을 N치로 전환하는 작업이 필요하다. 항만 및 여항 내진설계(MOF 2018)를 기준으로 하여, N은 표준관입시험(SPT) 측정값으로  $(N_1)_{60}$ 은 Eq. (3)와 같이 N값에 상재압( $C_N$ ), SPT 에너지비 60% 보정을 위한 해머효율 보정계수( $C_E$ ), 관입직경( $C_B$ ), 룯드 길이( $C_R$ ), 샘플링 방법( $C_S$ )에 대한 영향을 고려해 보정된 값이다.

$$N = \frac{(N_1)_{60}}{C_N C_E C_B C_R C_S} \quad (3)$$

임의로 가정된 인공지반의 경우 실제 N치 산정이 불가능하여 Eq. (3)에 나타난 것처럼  $(N_1)_{60}$ 의 값에 역으로 보정계수들을 나누어 N값을 산정하였다. 이때, 관입직경( $C_B$ ), 룯드 길이( $C_R$ ), 샘플링 방법( $C_S$ )에 대한 보정계수는 1로 하였으며, 상재압( $C_N$ ), SPT 에너지비 60% 보정을 위한 해머효율 보정계수( $C_E$ )에 대해서는 보정값을 적용하였다. 상재압( $C_N$ )은 Liao & Whitman(1986)이 제안한 Eq. (4)을 사용해 산정하였으며  $P_a$ 는 대기압으로 1atm(100kPa)이고,  $\sigma'_{vo}$ 은 액상화 평가대상 깊이에서의 유효상재하중을 나타낸다. 대표적인 보정계수 값을 확인해보면, 액상화 평가지점인 지반심도 10m 지점의 유효상재하중은 100kPa로 상재압 보정계수( $C_N$ )는 1이 된다. SPT 에너지비 60% 보정을 위한 해머효율 보정계수( $C_E$ )는 도넛 헤머(0.5~1.0), 안전 헤머(0.7~1.2), 자동 선단 도넛 헤머(0.8~1.3) 보정계수의 평균값인 0.9를 사용하였다.

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5} \quad (4)$$

이상의 보정과정을 통해 심도 10m에 대한 N치값을 10으로 결정하고 이 값을 Eq. (2)에 제시된 식에 대입하여  $V_s$  값으로 170.9m/sec을 획득하였으며 전체 지반에 같은 전단파속도를 적용하였다. 또한 지반응답해석 시 동적곡선은 Darendeli (2001) 곡선을 사용하였다.

이상의 지반정수들을 정리하여 나타내면 Table 4와 같고 지반응답해석 시 해석지반은 Fig. 9와 같다.

지반응답해석에 있어서 지반자료가 모두 입력되면, 최종적으로 지진하중을 재하하게 되는데, 본 연구에서는 입력 지진파로 장기주파와 단주기파로 대표되는 Hachinohe, Ofunato 지진파를 사용하였으며 설계지반운동수준은 지진구역 I, 재현주기 1,000년 수준에 해당하는 0.154g으로 하였다.

각 입력지진에 대한 지반응답해석 결과, 심도별최대가속도( $a_{max}$ )는 Fig. 11과 같다.

Table 4. Physical properties of assessment depth

Test condition	
Relative density (%)	40
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.38
$\gamma_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.91
$(N_1)_{60}$	9
N	10
$V_s$	176.8

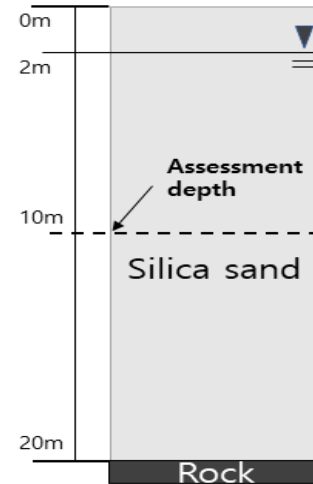
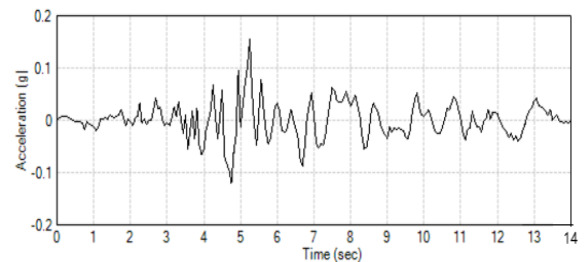
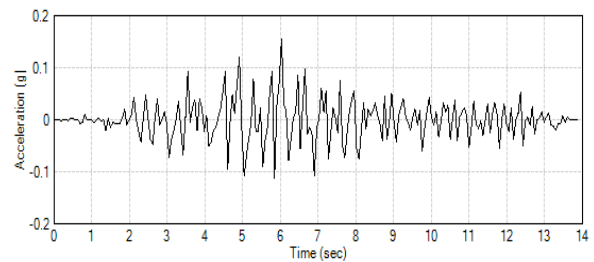


Fig. 9. Ground modeling



(a) Hachinohe



(b) Ofunato

Fig. 10. Seismic wave

Fig. 8에 나타난 바와 같이 간편예측 및 상세예측 모두, 지반응답해석을 통해 획득된  $a_{max}$ 를 이용해 지진에 의한 CSR 값을 산정하게 된다. Fig. 8에 제안된 식(Kim et al., 2000)은 기존 Seed&Idriss(1971)가 제안한 방법을 우리나라 실정에 맞게 보완한 수정방법으로 지반응답해석을 이용한 대상지반

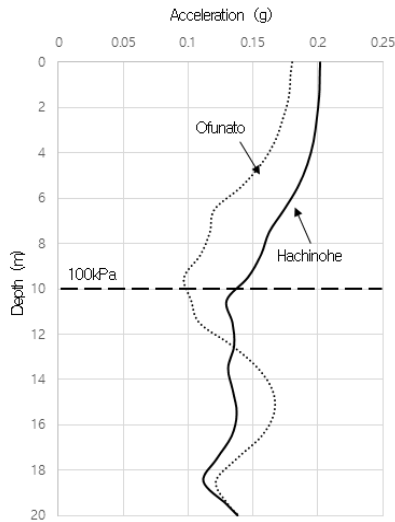


Fig. 11. Peak acceleration

의 깊이별 최대가속도를 산출하고 이를 이용해 깊이별 CSR을 산정하는 것이 특징이다. Fig. 11을 보면, 상대밀도 40%, 지반심도 10m의 최대지반가속도( $a_{max}$ )는 Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파에서 각각 0.151g, 0.127g으로 도출되었으며, 이를 이용한 CSR값은 0.156, 0.116로 산정되었다.

#### 4.2 지반응답해석 및 CSR 산정

액상화에 대한 안전율은 지진 시 발생하는 지반 내 한 점의 진동전단응력비(CSR)와 액상화 진동저항응력비(CRR)를 비교하여 산정한다. CRR산정 시 간편예측법에서는 Fig. 7을 이용하며, 이때  $(N_1)_{60}$ 이 적용된다. 이에 반해 상세예측법에서는 실내진동삼축시험결과인 진동전단응력비에 대한 액상화 발생 시점에서의 반복재하 횟수(N)의 관계를 토대로 도시한 액상화 저항곡선을 통해 산정된다. 본 연구에서는 Idriss & Boulanger(2008)이 제안한 급수함수형태의 경험식 (5)을 바탕으로 액상화 진동저항응력비(CRR) 곡선을 나타내었다.

$$CRR = aN^{-b} \quad (5)$$

일반적으로 실내진동삼축시험 등 실내시험을 수행할 경우, 실제 현장상태와 실제 지진파를 완벽히 모사하기가 쉽지 않기 때문에 이를 위해 몇 가지 사항을 가정 후 시험을 수행하는 것이 일반적이다. 따라서, 시험결과에 대해 실제 현장의 지진방향성과 현장응력상태를 고려하기 위한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 현장응력상태에 대한 보정계수 (Correction factor) 산정식을 Eq. (6)(MOF, 2018)을 이용하였다.

$$\text{Correction factor} = 0.9 \times (1 + 2K_0) / 3 \quad (6)$$

여기서,  $K_0$  값은 Jaky가 제안한 Eq. (7)을 사용하였으며 인공규사의 내부마찰각은 사질토의 일반적인 내부마찰각  $30^\circ$ 로 고려하여  $K_0$  값을 0.5로 결정한 후 식에 대입해 보정계수를 0.6으로 정하였다.

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (7)$$

이상의 과정을 거쳐 상대밀도( $D_r$ )가 40%일 때 최종 도시된 CRR 곡선 그래프는 Fig. 12와 같다. 시험으로 산정된 3개의 축차응력 값에 계산된 보정계수 0.6를 곱하여 보정값을 산정하였으며, Fig. 12에서 실선은 보정 전 진동삼축시험 결과를 나타내며, 점선은 보정 후 액상화 저항응력비 곡선을 나타낸다.

본 연구에서는 지반응답해석 결과와 Fig. 7 및 Fig. 12의 CRR곡선을 이용하여 액상화 간편예측과 상세예측을 수행하였다. 간편예측의 경우, Fig. 7의 세립분 함유량 5% 미만 곡선에서  $(N_1)_{60}$  값 9에 해당되는 값인 0.156이 적용되었으며, 상세예측에서는 Fig. 12의 액상화 진동저항응력비(CRR) 곡선에서 반복횟수(N) 10회 시에 대한 값 0.149가 적용되었다. 간편예측과 상세예측에 의한 액상화 평가내용을 요약 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5의 안전율들을 비교해 보면, 각각의 안전율이 크게 0.1 이하의 차이를 나타내었다. 이 점으로부터 본 연구를

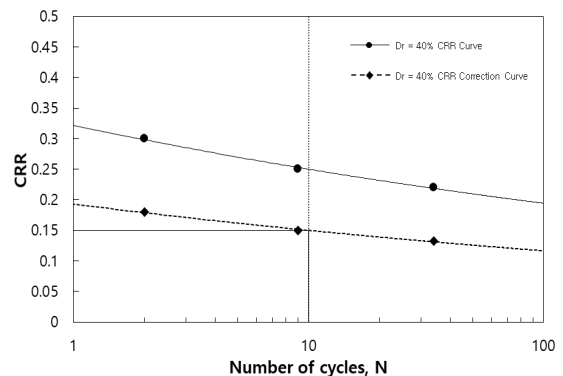


Fig. 12.  $\sigma_d/2\sigma'_3$  & N Curve

Table 5. Liquefaction assessment result

Density	Evaluate type	Input motion	CSR, $(\tau_d/\sigma'_v)$	CRRM=6.5 $(\tau_1/\sigma'_v)$	Fs
40%	Simple	Hachinohe	0.156	0.156	1
		Ofunato	0.116		1.34
	Detail	Hachinohe	0.156	0.149	0.95
		Ofunato	0.116		1.28

통해 획득된 진동삼축시험결과 기반의 CRR곡선이 간편예측에서 이용하는 CRR곡선과 일정부분 유사성을 갖는 것으로 판단된다. 다만, 간편예측에서는 2가지 입력지진 모두 액상화 안전율이 1 이상으로 액상화에 대해 안전한 것으로 판정되었지만, 상세예측법에서는 Hachinohe 지진의 경우 안전율이 1 미만인 것으로 나타나 액상화에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 이는, 간편예측법에서 결정된 안전율값이 허용기준인 1과 동일하게 판정되었기에 상세예측과의 차이가 0.05임에도 불구하고 안전율을 만족하지 못한 결과가 나타나게 된 것으로 판단된다. 이러한 점으로부터, 액상화 간편예측 결과가 1과 같거나 아주 조금 큰 수준인 경우, 상세예측 결과에서는 안전치 않은 결과가 나올 가능성이 없지 않기 때문에 이상과 같이 간편예측의 결과가 허용기준과 큰 차이가 없는 경우에는 상세예측을 병행하는 것이 적절할 것으로 판단되며 이러한 점으로부터 지금과 같이 항만 및 여항시설의 내진설계기준이 적용될 경우에는 이전 간편예측에서의 사용된 허용안전율이 1.5에서 1로 개정된 내용에 대해 보완이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 지진모의시험에 사용되는 국내에서 생산된 인공규사의 동적 거동 및 액상화 저항에 관한 특성을 실험적으로 분석하였다. 지반재료의 액상화 저항강도에 영향을 조사하는 실내진동삼축시험을 상대밀도를 달리하여 수행하고 이를 통해 인공규사의 액상화 진동저항응력비(CRR) 산정곡선을 획득하였다. 또한, 액상화 발생가능성이 가장 높을 것으로 예상되는 상대밀도 40% 인공규사로 임의의 가상지반을 조성하고 이에 대해 지반응답해석을 이용한 액상화 간편예측과 상세예측을 수행하였다.

이상의 연구를 통해 획득된 결과는 다음과 같다.

- (1) 인공규사를 이용한 실내진동삼축시험의 결과 상대밀도의 차이에 의한 시험의 결과가 달라짐을 확인할 수 있었다. 실험을 통해 획득된 액상화 저항특성에 있어서 매우 조밀한 상태인 상대밀도 80%의 경우, 중간 정도 상태인 60%, 그리고 느슨한 상태인 40%의 순으로 액상화 저항특성이 저하되는 것으로 나타났으며 이를 토대로 인공규사의 실험결과 보정 전 액상화 진동저항응력비(CRR) 산정곡선이 획득되었다.
- (2) 상대밀도 40%로 조성된 가상지반에 대한 액상화 평가 결과, 간편예측법과 상세예측법의 액상화 안전율이 0.1

이하의 차이로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 지반응답해석을 통해 동일하게 지진에 의한 전단응력비(CSR)이 적용되고 지반에 액상화 저항응력비 산정이 간편예측에서는 Seed가 제공한 CRR곡선, 그리고 상세예측에서는 실험결과를 통해 획득된 CRR곡선이라는 점을 감안할 때, 두 방법 모두 유사하게 액상화 예측을 하고 있는 것으로 판단되며 이를 통해 본 연구에서 획득된 CRR곡선이 일정부분 신뢰성을 확보한 것으로 판단된다.

- (3) 다만, 간편예측에서 액상화 안전율이 정확하게 1로 나타나 안전으로 판정된 반면, 상세예측에서는 안전율이 이보다 0.05 작게 산정되어 불안정한 것으로 판정된 점은 해석대상이 액상화 발생가능성이 높게 예측되는 상대밀도 40% 수준의 인공규사라는 점을 감안한다면 향후 이와 유사한 경우가 발생할 여지가 매우 크므로 간편예측과 상세예측에 대한 적절한 혼용방법이 보완될 필요가 있을 것으로 판단된다.
- (4) 향후, 국내 진동대시험 및 원심모형시험의 수행이 크게 주목받고 있는 점을 고려할 때, 이와 같은 지진모의시험에 이용되는 모형시료들에 대해 실내실험을 통한 동적 특성분석이 추가될 경우, 국내 지진모의시험에 적절한 지반재료의 선정도 가능할 뿐만 아니라 지진모의시험 자체에 대한 수치해석의 수행에도 크게 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22SCIP-C151438-04).

## References

1. Bao, N. N., Nghiem, X. T. and Kim, S. R. (2018), Evaluation of dynamic p-y curves of group piles using centrifuge model tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 5, pp. 53-63 (In Korea).
2. Darendeli, M. B. (2001), Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, University of Texas at Austin.
3. Hwang, B. Y., Han, J. T., Kim, J. K. and Kwak, T. Y. (2020), Liquefaction characteristic of Pohang sand based on cyclic triaxial test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 9, pp. 21-32(In Korea).
4. Idriss, I. and Boulanger, R. W. (2008), Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute.
5. Ishihara, K. (1993), Liquefaction and flow failure during earthquakes,



- Geotechnique, Vol. 43, No. 3, pp. 351~451.
6. Jo, S. B., Ha, J. G., Choo, Y. W. and Kim, J. K. (2013), A case study of evaluating inertial effects for inverted T-shape retaining wall via dynamic centrifuge test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 4, pp. 33~44 (In Korea).
  7. Kim, J. K., Kwak, T. Y., Han, J. T., Hwang, B. Y. and Kim, K. S. (2020), Evaluation of dynamic ground properties of Pohang area based on in-situ and laboratory test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 9, pp. 5~20 (In Korea).
  8. 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. 2-C, pp. 129~139 (In Korea).
  9. Kim, S. R. (2018), Evaluation of dynamic p-y curves of group piles using centrifuge model tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 5, pp. 53~63 (In Korea).
  10. Lee, C. J., Kim, S. I. and Jung, S. S. (2010), A study on the liquefaction resistance of anisotropic sample under real earthquake loading, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 5~14 (In Korea).
  11. Lee, J. S., Park, T. J., Lee, M. G. and Kim, D. S. (2018), Verification of the numerical analysis on caisson quay wall behavior under seismic loading using centrifuge test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 11, pp. 57~70 (In Korea).
  12. MOF (2018), Korea Design Standard : Seismic Design of Port and Harbor (KDS 64 17 00).
  13. Seed, B. and Lee, K. L. (1966), Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 4972 92 Proceeding.
  14. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 97, No. 9, pp. 1249~1273.
  15. Seed, H. B., Tokimatsu, K. and Harder, L. (1984), The influence of SPT procedures in evaluating soil liquefaction resistance, UCB, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, EERC, pp. 84~15.
  16. Sun, C. K., Kim, H. J. and Chung, C. K. (2008), Deduction of correlations between shear wave velocity and geotechnical in-situ penetration test data, *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 12, No. 4, pp. 1~10 (In Korea).
  17. Shin, Y. S. (1999), A Study on the Modified Method for Assessing Liquefaction Potential Based on Korean Earthquake Magnitude, Master's thesis, Yonsei University, pp. 66~90 (In Korea).
  18. Skempton, A. W. (1954), The pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 143~147.
  19. Skempton, A. W. (1986), Standard penetration test procedures and the effects in sands of over-burden press, relative density, particle size, ageing and overconsolidation, *Geo-technique*, Vol. 36, No. 3, pp. 425~447
  20. Yoo, M. T. and Kwon, S. Y. (2018), Comparison of lateral pile behavior under static and dynamic loading by centrifuge tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 7, pp. 51~58 (In Korea).
  21. Yun, J. W., Han, J. T. and Kim, J. K. (2020), Study on improvement of response spectrum analysis of pile-supported structure: focusing on the natural periods and input ground acceleration, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 6, pp. 17~34 (In Korea).