

1g 진동대 실험을 이용한 철도 제방의 재액상화 거동 연구

A Study on Reliquefaction Behavior of Railway Embankment Using 1g Shaking Table Test

채민환 ¹	Chae, Minhwan	유민택 ²	Yoo, Mintaek
이일화 ³	Lee, Il-Wha	이명재 ⁴	Lee, Myungjae

Abstract

The purpose of this study is liquefaction phenomenon was simulated using the 1g shaking table test. Analysis of liquefaction and Re-liquefaction behavior according to the ground conditions was analyzed when an embankment exists above the ground. The soil used in the experiment was silica sand and the ground composition was a liquefied layer of 50cm (Case 1), a non-liquefied layer of 17.5cm and a liquefied layer of 32.5cm (Case 2). The embankment was formed by fixing the height of 10cm and the slope of the slope at a ratio of 1:1.8. For seismic waves, excitation of a 5Hz sine wave was performed for 8 seconds, and a total of 5 case excitations were performed. In Case 1, it was confirmed that liquefaction occurred at all depths during the first vibration excitation at the free-field and that liquefaction did not occur at all depths except 5cm at the third vibration excitation. At the center of the embankment, liquefaction occurred up to a depth of 20cm during the first vibration excitation, and it was confirmed that liquefaction did not occur at all depths except for a depth of 5cm during the second vibration excitation.

요 지

본 연구는 액상화 현상을 모사할 수 있는 1g 진동대 실험(Shaking table test)을 이용하여 포화 사질토 지반 위 제방 존재 유무에 따른 지반 조건 대상으로 재액상화 거동에 대하여 연구하였다. 실험에 사용된 지반은 실리카 모래를 사용하였으며, 지반조성은 액상화층 50cm(Case 1)와 비액상화층 17.5cm와 액상화층 32.5cm인 경우(Case 2)로 2가지 조건으로 수증낙사법을 이용하여 조성하였다. 제방은 높이 10cm, 사면 기울기는 1 : 1.8 비율로 고정하여 조성하였다. 지진파는 5Hz의 정현파를 8초간 가진을 진행하여 총 1차부터 5차 가진을 수행하였다. Case 1의 경우 자유장 위치에서 1차 가진 시 모든 깊이에 액상화가 발생하였으며, 3차 가진 시 5cm 깊이를 제외한 모든 깊이에서 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 제방 중심 위치에서는 1차 가진 시 20cm 깊이까지 액상화가 발생하였으며, 2차 가진 시 5cm 깊이를 제외한 모든 깊이에서 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하여, 제방 구조물 설치 시 재액상화 거동에 대하여 평가하였다.

Keywords : 1g shaking table test, Embankment, Excess pore pressure, Liquefaction, Reliquefaciton

- 1 정희원, 한국철도기술연구원 첨단인프라융합연구소 석사과정 (Member, Graduate Student, Advanced Infrastructure Research Team of Korea Railroad Research Institute)
- 2 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)
- 3 정희원, 한국철도기술연구원 첨단인프라융합연구소 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)
- 4 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team of Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5446, Fax: +82-31-460-5446, myungjae@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2021 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

액상화 현상이란 느슨한 포화 사질토 지반 내에 진동 하중이 일정시간 지속될 경우, 과잉간극수압이 점차적으로 증가함에 따라 지반이 저항력을 잃고 액체처럼 거동하는 현상을 말한다. 액상화가 발생되면 지반 강도가 저하되고 건물과 교량의 기초를 지지하는 능력이 저하되어 지반의 침하가 발생하게 된다. 대표적인 사례로는 1964년 니가타현 아와시마 남부 앞바다에서 발생한 Niigata 지진(규모 $M=7.5$)으로 인해 최대 140cm의 침하가 측정되어 아파트와 건물이 무너지는 등 큰 피해가 발생하였으며, Niigata 지진 이후로 실제적인 액상화 정의 및 본격적인 액상화 연구가 시작되었다.

Ohara et al.(1992)은 1983년 Nihokai-chubu 지진을 통해 액상화가 발생한 지반에는 최대지반가속도(α_{max})와 전단응력비가 초기보다 낮은 수치에도 액상화가 발생함을 확인하였으며, 이전에 받은 지진 규모보다 작은 지진의 규모에도 재액상화가 발생할 수 있음을 확인하였다. 2017년에 국내에서 발생한 포항지진(규모 $M=5.4$)은 국내지진 관측사상 처음으로 액상화 현상이 발생되었으며, 액상화 발생 후 해당지역에서 규모 2.0 이상의 여진이 총 101회 발생하는 등 국내에서도 재액상화가 발생할 수 있어 재액상화 발생에 대한 다양한 대응책을 구축할 필요성이 있다. 액상화 현상은 Casagrand(1936)에 의해 한계간극비 이론에 기초하여 느슨한 모래의 액상화 현상을 처음으로 정의했으며, 70년대부터 현재까지 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT), N값을 통한 안전율 산출방법과, 진동삼축시험(Cyclic triaxial test) 및 진동대시험(Shaking table test)을 이용한 액상화 평가가 이루어지고 있다. Ha et al.(2011)은 진동대를 이용하여 액상화 발생 가능성이 높은 5종류의 시험모래로 지반을 조성하여 재액상화 시 모래의 입도 특성이 재액상화 강도변화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 D_{10}/C_u 값이 증가함에 따라 재액상화 강도감소율은 선형적으로 감소하며 D_{10}/C_u 값이 0.15mm 이상으로 증가하면서 재액상화 시 강도감소율이 20% 정도로 일정해지는 경향을 확인하였다. 또한 시간에 따른 과잉간극수압과 반복하중 횟수를 통하여 4, 5차 진동하중을 가했을 경우 과잉간극수압이 감소하여 액상화 발생확률이 낮아짐을 확인하였다. 최근 재액상화 연구로 Nepal et al.(2020)은 재액상화 실험을 통하여 과잉간극수압 및 가속응답을 측정하였다. 1차 액상화가 발생할 경우 보다

2차 액상화가 발생할 경우에 모래의 액상화 저항이 가장 낮았으며 액상화 저항은 깊이에 따라 다르며 지표면 근처의 토양층이 액상화 될 가능성이 높은 것을 확인하였다. 또한 액상화 토양층에서 지진 전단파의 감쇠는 일반 토양층과 다른 특성을 가지는 것을 확인하는 등 최근에도 많은 연구가 이루어지고 있지만 기존 연구는 구조물이 없는 자유장에서의 재액상화에 대한 것으로 제방과 같은 구조물이 있는 경우에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구는 액상화 현상을 모사 할 수 있는 1g 진동대를 통해 지반 위에 제방이 있을 경우의 액상화층과 비액상화층의 두께를 조정하여 재액상화 발생 시 지반의 지층별 진동하중에 대한 데이터 확보를 통해 응답 데이터의 시간이력 그래프 및 고유진동수를 확인했다. 또한 간극수압계를 이용하여 1차 액상화부터 5차 액상화 발생까지의 과잉간극수압비를 계산해 재액상화 시 가속도 및 과잉간극수압비의 상관관계를 비교 분석하였다.

2. 액상화 및 재액상화 매커니즘

액상화 현상은 유동 액상화(Flow liquefaction)와 반복 유동(Cyclic mobility)로 나눌 수 있다. 유동 액상화는 정적전단응력이 정상상태 강도보다 큰 경우에 발생하는 현상으로, 주로 경사지에서 발생하며 액상화와 관련된 피해 중 가장 위험한 피해인 유동파괴(Flow failure)를 유발한다. 반복 유동(Cyclic mobility)은 정적 전단응력이 액상화된 토질의 전단강도 보다 작을 때 발생하며 포화 사질토와 같이 퇴적연대가 짧고 다져지지 않은 모래지반이 진동을 받았을 때 발생하며 주로 완만한 경사지인 해안가에서 발생한다(Han, 2012).

토양의 재액상화 거동의 특징은 액상화 발생 후 배수로 인해 토양의 밀도가 증가에도 불구하고 액상화 저항이 급격히 감소하는 현상이 발생하는 경우가 있다. Oda et al.(2001)은 한번 액상화가 발생한 지반은 전단변형으로 인해 흙의 입자구조가 불안정한 형태로 변하게 되어 과잉간극수압이 급격히 상승하고 이로 인해 작은 지진에도 액상화가 더 쉽게 발생하는 것을 확인하였다. Ha (2005)은 재액상화 시 하중반복횟수를 과잉간극수압 변화와 비교하여 재액상화를 발생시키는데 필요한 하중반복횟수가 최초 액상화 발생 시 필요한 하중반복횟수 보다 작은 것을 확인하였다.

3. 실험개요 및 방법

3.1 지반 물성치 및 제방 제원

지반 조성에 사용된 모래는 실리카 모래 7호사를 사용하였다. 실리카 모래 7호사의 입도분포 곡선은 Fig. 1

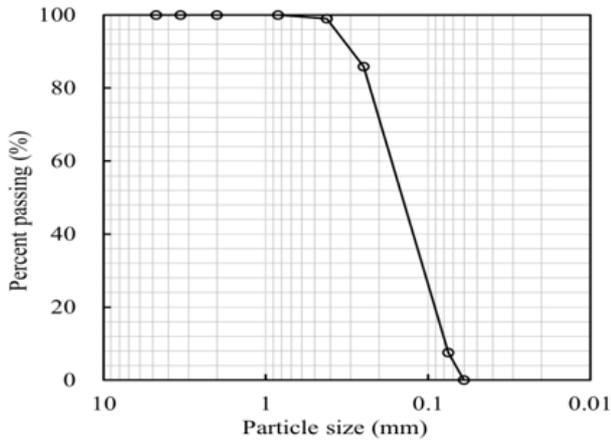


Fig. 1. Particle distribution of silica sand

Table 1. Basic property value of silica sand

Parameter	Value
Specific gravity, G_s	2.65
Maximum void ratio, e_{max}	0.93
Minimum void ratio, e_{min}	0.43
Relative density, D_r (%)	28
Angle of friction, ϕ' (°)	30.5
Mean particle size, D_{50} (mm)	0.11
Uniformity coefficient, C_u	2.89
Coefficient of curvature, C_c	1.07
Permeability, k (m/s)	2.51×10^{-4}

과 같으며 ATC(Applied Technology Council, 1996)에서 제안한 액상화 가능성 있는영역(입도 0.01~1.0mm)에 포함된다. 실리카 모래의 물성치는 Table 1과 같다. 실험에 사용된 실리카 모래 7호사의 비중(G_s)은 2.65이며, 최대건조단위중량은 18.17kN/m^3 , 최소단위건조중량은 13.47kN/m^3 으로 측정되었다. 제방 모델 단면은 호남고속철도 건설사업 3공구 구간을 모델로 선정하였다. 액상화는 변형을 연화거동에 가깝기 때문에 lai 의 상사법칙 3형태를 적용하였으며(lai , 1989), 상사비는 Table 2와 같이 40을 적용하였다. 모형제방의 물성치는 Table 3과 같다.

3.2 지진파

1g 진동대 실험(Shaking Table Test) 시 입력지진파는 5Hz의 정현파를 사용하였다. 입력 가속도는 0.2g, 지속 시간은 증가구간 1.5초, 일정구간 5.0초, 감소구간 1.5초로 총 8초의 정현파를 가진하였으며 입력 지진파는 Fig. 2와 같다.

Table 3. The properties of the model embankment

Parameter	Prototype	Model
Top (cm)	1,400	35
Bottom (cm)	2,840	71
Height (cm)	400	10
Length (cm)	2,000	50
Volum (cm^3)	$1,696 \times 10^9$	26,500
Density (kg/m^3)	2,000	2000
Load (kg)	3,392,000	53
Stress (kg/m^2)	5,971.83	149.30

Table 2. Similitude for model tests in 1g shaking table tests (lai , 1989)

Parameter	Scaling factors ($\lambda = 40$)			
	Generalization of similitude	Type 1 $\lambda_p = 1$	Type 2 $\lambda_e = \lambda^{0.5}, \lambda_p = 1$	Type 3 $\lambda_e = 1, \lambda_p = 1$
Length	λ	λ	λ	λ
Density	λ_p	1	1	1
Time	$(\lambda\lambda_e)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_e)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	1	1	1	1
Displacement	$\lambda\lambda_e$	$\lambda\lambda_e$	$\lambda^{1.5}$	λ
Stress	$\lambda\lambda_p$	λ	λ	λ
Strain	λ_e	λ_e	$\lambda^{0.5}$	1
Pore pressure	$\lambda\lambda_p$	λ	λ	λ

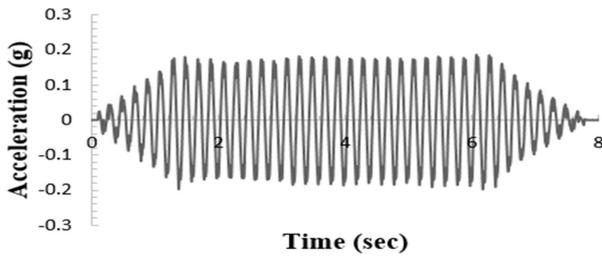


Fig. 2. Input motion at 0.2 g, 5 Hz

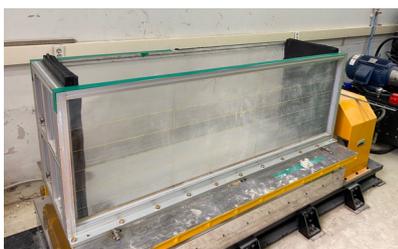
3.3 실험 방법

본 연구에서는 비액상화층 두께에 따른 제방의 재액상화 거동을 분석하기 위해, 액상화층만 50cm인 경우와 하부 액상화층과 상부 비액상화층이 각각 32.5cm, 17.5cm인 경우로 나누어 조성하였다. 각 실험별로 1g 진동대를 이용하여 1차~5차 정현파 가진을 통해 재액상화 실험을 수행하였다. 제방에 사용된 재료는 1~2cm 자갈로 단위중량은 2.0kN/m^3 이며, 제방 높이는 10cm, 사면 기울기는 1:1.8 비율로 고정하였다. 또한 제방의 크기는 실제 사용되고 있는 제방의 40배를 축소된 크기로 모사하였다. 제방은 노면 위에 성토 구조물이므로 실제 구간의 무게를 고려하여 53kg의 상재하중을 적용하였다. 액상화층의 경우 지반 조성 시 진동대 위에 시브(Sieve)를 설치하여 퇴적토의 생성원리와 동일한 수중 낙사법을 이용했으며, 실리카 모래를 수중에 72시간 포화하였다. 지반은 상대밀도 50%로 조성하였다. 비액상화층의 경우 진동대에 설치 되어 있는 벨브에 호스를

설치하여 피에조미터(Piezometer)를 설치 후 지하수위를 액상화층 높이인 32.5cm 까지 맞춰 조성하였다. 실험 조성 순서는 Fig. 3과 같다. 길이, 폭 그리고 높이가 $200\text{cm} \times 50\text{cm} \times 70\text{cm}$ 인 토조를 이용하여 실험을 수행하였고, 진동 시 토조의 강성에 의한 파의 반사효과(Boundary effect) 감소를 위해 토조 양 벽면에 두께 5cm 스폰지를 설치하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 계측기를 포함한 실험의 단면이다. 재액상화 시 깊이에 따른 지반 거동 및 액상화 발생을 분석하기 위해 지표면에서 깊이 약 10, 20, 30, 40, 45cm로 제방 끝단, 제방 중심, 자유장 위치에 간극수압계를 설치하였으며, 액상화 지반 내에서 일정한 높이를 유지하기 위해 알루미늄 막대를 이용하여 간극수압계를 고정시켰다. 가속도계는 지표면 깊이가 0, 10, 20, 30, 40, 50cm에 설치하였으며, 액상화 발생 시 지반과 같이 거동하기 위해 정사각형 구조의 아크릴 판에 고정시켜 실험을 수행하였다. LVDT(Linear Variable Differential Transformer)의 경우 제방 및 자유장에서 침하량을 측정하기 위해 제방 끝단, 제방 중심, 자유장에 설치하였으며, 실험 조건은 Table 4와 같다.

4. 실험결과 및 분석

1g 진동대 실험(Shaking Table Test)을 통해 각 지층별 설치된 가속도계, 간극수압계 및 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 가속도-시간이력, 과잉간극수압비, 제방 침하량 및 상대밀도를 산정하였



(1) Sponge installation



(2) PWP and accelerometer installation



(3) Install the sieve



(4) Formation of liquid layer ground



(5) Embankment and LVDT installation



(6) Completion of construction

Fig. 3. Experiment process

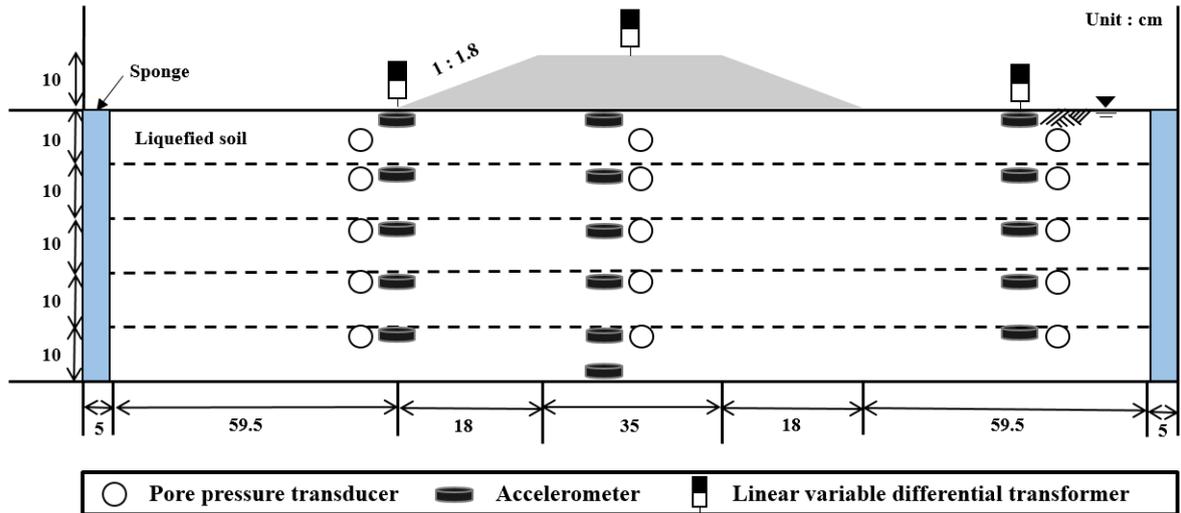


Fig. 4. Experimental section of liquefied layer (case 1)

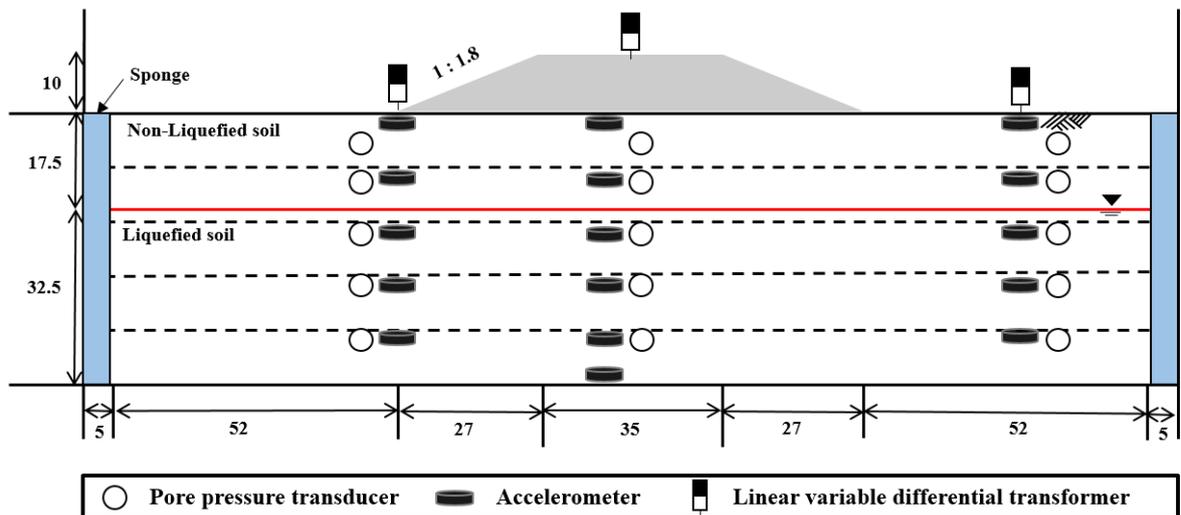


Fig. 5. Experimental section of Non-liquefied layer and liquefied layer (case 2)

Table 4. Experimental conditions

Case	Composition of facilities	Thickness of the lower liquefied layer (cm)	Thickness of the upper Non-liquefied layer (cm)	Note
Case 1	Embankment (h = 10cm, Slope 1 : 1.8 Fix)	50	0	Performance with 1~5 vibrations to confirm Re-liquefaction behavior
Case 2		32.5	17.5	

다. 앞으로 제시되는 결과 값들은 실제 제방의 크기를 40배 축소한 모형실험 결과를 lai의 상사법칙 제 3형태를 이용해 원형(prototype)의 크기로 환산한 것이다.

4.1 액상화층 50cm 결과 및 분석

지반의 지층별 진동하중에 대한 데이터 확보를 확보하여 액상화 발생 현황을 확인하기 위해 가속도계와 간

극수압계를 Fig. 4와 같이 각각 16개 및 15개씩 설치하여 실험을 수행하였다. 1차 가진 시 지표면부터 20cm 깊이까지 과잉간극수압비 및 가속도를 통해 액상화가 발생함을 확인하였으며, 지표면 30cm 깊이부터는 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 6은 1차 가진 시 제방 중심부 지표면 및 30cm 깊이에 설치한 가속도계를 통해 측정된 가속도 시간 이력이다. Fig. 6(a)에 의하면 액상화 발생 시 가속도 값이 감소하는 경향을

확인할 수 있다. 이는 액상화가 발생하면서 지반이 액체처럼 거동하기 때문에 지반 반력이 발현되지 않아 진폭이 감소하기 때문이다.

과잉간극수압비는 시간에 따른 과잉간극수압을 유효 응력으로 나누어 산정했으며, 과잉간극수압비가 1 이상으로 증가 하는 것에 따라 지반의 액상화 여부를 판단하였다. Fig. 7은 1차 가진 시 제방 중심 위치와 자유장 위치에서의 깊이별 과잉간극수압비를 나타낸 그래프이

다. 제방 중심의 경우 Fig. 7(a), (b)와 같이 5cm 및 20cm 깊이에서의 과잉간극수압비가 1 이상 발생하여, 액상화가 발생하는 것으로 확인하였다. 30cm 및 40cm 깊이에서는 Table 5와 같이 과잉간극수압비가 1 미만으로 발생하였으며, 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 하지만 자유장에 위치한 간극수압계의 경우 Fig. 7(e), (f), (g)와 같이 1차 가진 시 모든 깊이에서 액상화 발생을 확인하였다. 이런 이유로는 제방이 침하되면서 발생

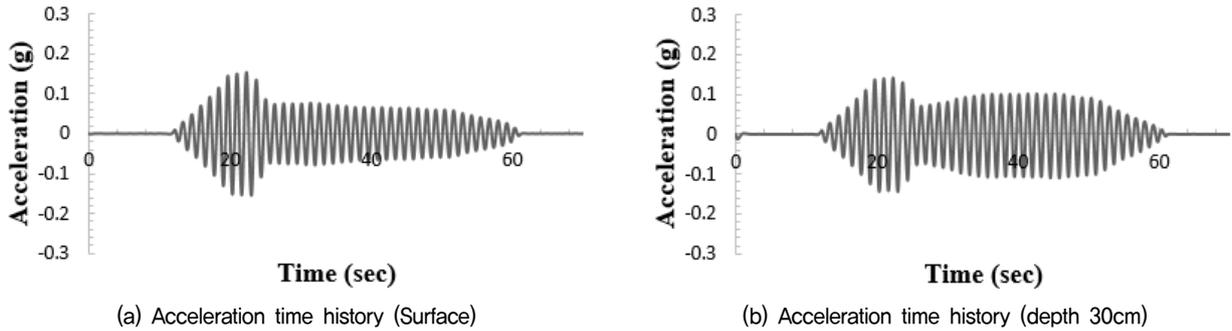


Fig. 6. 1st shaking event of acceleration center of the embankment (case 1)

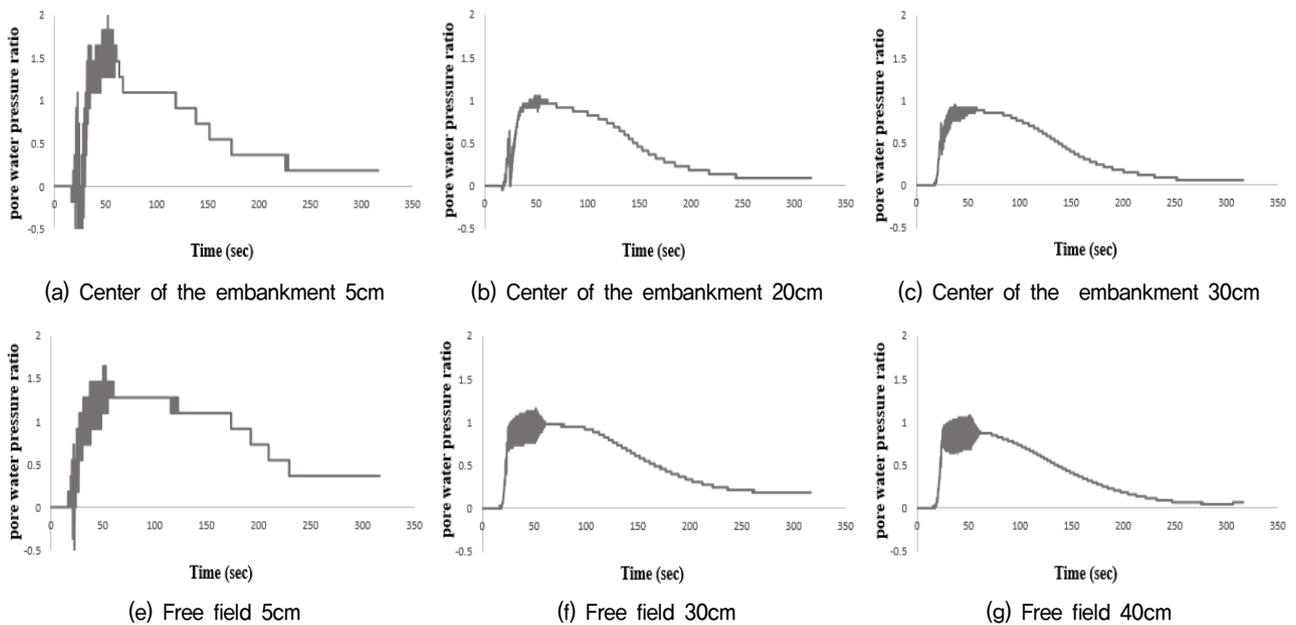


Fig. 7. 1st shaking event pore water pressure ratio by depth at the center of the embankment and free field (case 1)

Table 5. Pore water pressure ratio by depth in the center of the embankment (case 1)

Number of event	Pore water pressure ratio (depth 5cm)	Pore water pressure ratio (depth 20cm)	Pore water pressure ratio (depth 30cm)	Pore water pressure ratio (depth 40cm)
1st	2.001	1.05	0.943	0.982
2nd	1.376	0.903	0.831	0.881
3rd	0.839	0.839	0.811	0.818
4nd	0.496	0.785	0.744	0.806
5nd	0.49	0.735	0.735	0.776

하는 상재하중 영향으로 지반 구속압이 자유장보다 증가하여 깊이 30cm부터는 다른 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

3차 진동 가진 시 Fig. 8(a), (b), (c)와 같이 제방 중심 위치에서는 모든 깊이에서 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 자유장의 경우 5cm 깊이에서 액상화가 발생하였으며, 그 외의 나머지 깊이에서는 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다.

5차 진동 가진 시 제방 중심 및 자유장 위치에서 모든

깊이에서 과잉간극수압비가 1 미만으로 액상화가 발생하지 않음을 확인하였다(Fig. 9, Table 5, Table 6). Table 6은 진동 가진시 자유장 위치에서의 깊이별 상대밀도를 나타낸 표이다. 20cm 깊이의 과잉간극수압비의 경우 계측 불량으로 인해 결과에 포함하지 않았다. 제방과 같은 상재하중의 영향 및 재가진에 따른 지반 침하에 따라 상대밀도가 증가하여 액상화 현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 10과 같이 LVDT(Linear Variable Differential

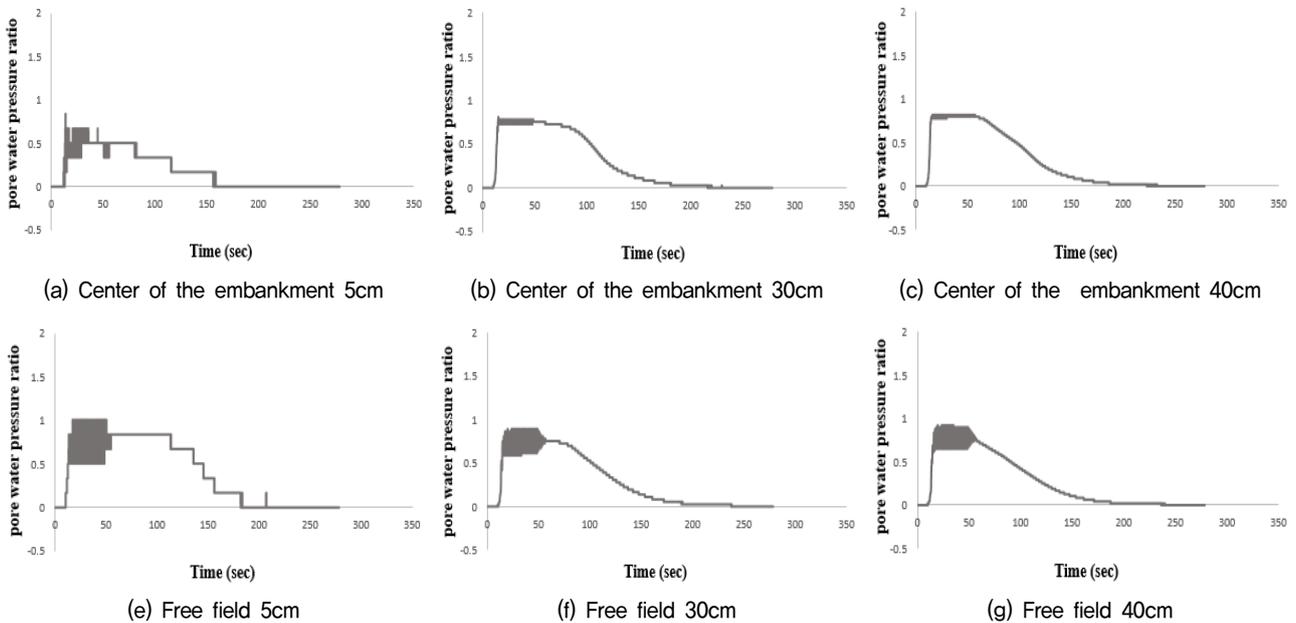


Fig. 8. 3rd shaking event pore water pressure ratio by depth at the center of the embankment and free field (case 1)

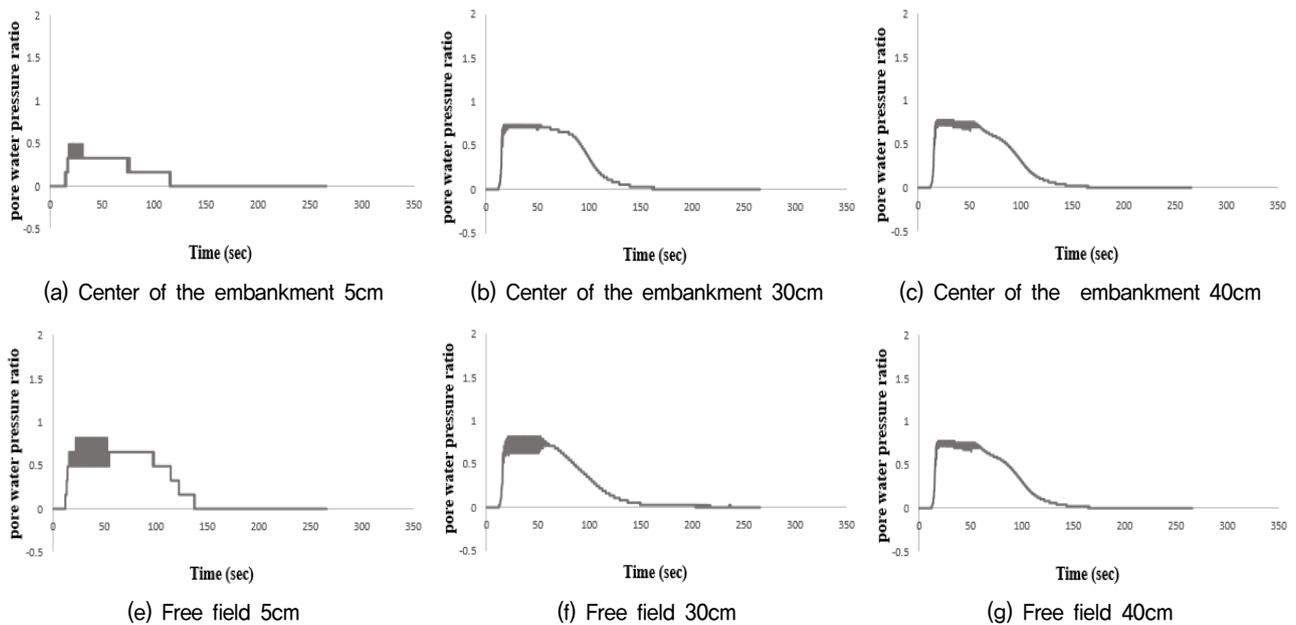


Fig. 9. 5th shaking event pore water pressure ratio by depth at the center of the embankment and free field (case 1)

Table 6. Pore water pressure ratio by depth in the center of the free field (case 1)

Number of event	Pore water pressure ratio (depth 5cm)	Pore water pressure ratio (depth 20cm)	Pore water pressure ratio (depth 30cm)	Pore water pressure ratio (depth 40cm)
1st	1.643	N/A	1.157	1.073
2nd	1.375		0.946	0.967
3rd	1.007		0.895	0.922
4nd	0.827		0.882	0.847
5nd	0.817		0.817	0.735

Table 7. Relative density to settlement in the middle of the embankment (case 1)

Number of event	Shake 1	Shake 2	Shake 3	Shake 4	Shake 5
Settlement (Accumulated settlement), mm	49,027 (49,027)	16,602 (65,629)	7,322 (72,951)	3,834 (76,785)	3 (79,785)
Relative density, %	59.4	63.9	65.9	66.9	67.3

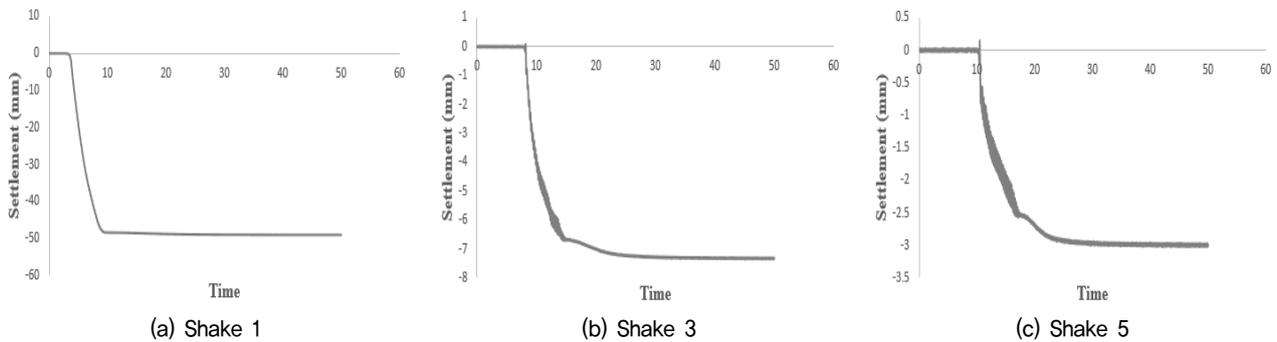


Fig. 10. LVDT in the middle of the embankment (case 1)

Transformer)를 통해 측정된 침하량은 1차 가진 시 급격하게 침하가 발생하지만 가진 횟수(1차~5차)가 증가함에 따라 침하량이 현저히 감소되는 경향을 확인하였다. Table 7은 가진 횟수 별 침하량과 상대밀도를 나타낸 데이터이다. 상대밀도는 지반의 깊이에 따라 제시하여야 하지만 실험적 제한으로 인해 본 연구에서는 지반 전체의 상대밀도로 제시하였다. 이를 통하여 상대밀도가 5차 가진 시에 총 67.3%까지 증가하여 가진 차수가 증가할수록 침하량 감소와 자유장 위치에 하부 지반에서 액상화가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

제방 중심위치에서의 깊이 별 과잉간극수압비와 상대밀도의 상관관계를 비교하기 위해 Fig. 11과 같이 나타내었다. 가진 횟수가 증가할수록 상대밀도는 점차적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 5, 20cm 깊이에서 1차 가진 시 과잉간극수압비가 1 이상으로 액상화가 발생함을 확인하였으며, 30, 40cm에서는 과잉간극수압비가 1 미만으로 감소하여 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 액상화 현상이 발생하지 않음과 동시에 상대밀도의 증가 추세는 감소하는 경향을 보였으

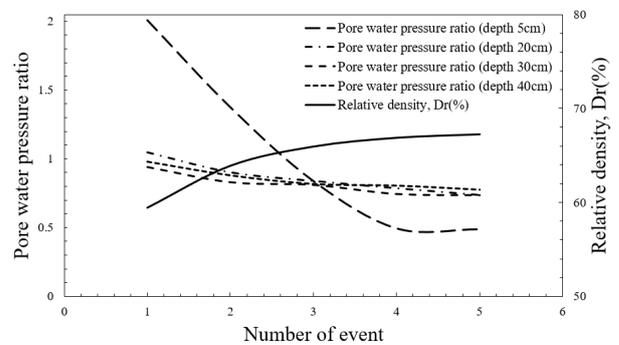


Fig. 11. Comparison of pore water pressure ratio and relative density (middle of the embankment, case 1)

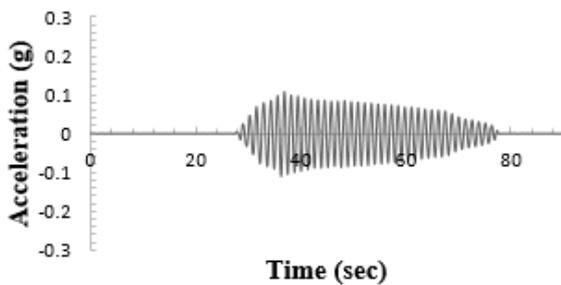
며, 상대밀도가 약 65~66% 이상으로 증가할 경우 모든 깊이에서 과잉간극수압비가 1 미만으로 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 가진이 진행될수록 상대밀도가 특정치에 도달하게 되면 지반이 조밀해지므로 과잉간극수압비가 1 이상으로 증가하지 않고 액상화 현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

4.2 비액상화층 17.5cm, 액상화층 32.5cm 결과 및 분석

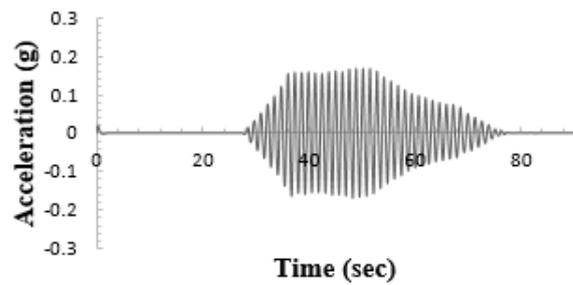
지반 상부에 비액상화층이 존재할 경우 Fig. 12와 같이 1~3차 가진에서 모든 지반층에서 액상화가 발생하지 않았으며, 4차 진동 가진 시 액상화 현상이 발생되었다. 이는 지진하중이 진행될수록 액상화층에 존재하는 지하수위가 비액상화층 높이까지 증가하여 4차부터 모든 지반이 지하수위에 잠기게 되어 4차 가진부터 액상화가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 재액상화 영향을 확인하기 위해 추가적으로 총 8차 가진을 수행하였다. Table 8을 통하여 4차 가진 시 제방 중심 위치에 모든 깊이에서 과잉간극수압비가 1 이상으로 액상화가 발생함을 확인하였다. 5차 가진시 20cm 깊이에서 액상화가 발생했으며, 30cm, 40cm 깊이에서는 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 이후 7차, 8차 가진

시에도 과잉간극수압비가 1 미만으로 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. Table 9와 같이 비액상화층이 존재할 경우 자유장 위치에서 액상화가 발생한 4차 가진부터 6차 가진까지 모든 깊이에서 액상화가 발생하였으며 7차, 8차 가진 시 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 제방 중심과 자유장에서 액상화 현상 발생차이는 Case 1과 동일하게 상재 하중의 영향으로 인해 제방이 존재하지 않는 지반보다 제방이 존재할 경우 적은 가진 시 액상화 현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 13은 제방 중심 설치된 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 통해 제방 침하량을 나타낸 그래프이다. 이는 Case 1과 동일하게 가진이 진행될수록 상대밀도가 높아지면서 침하량이 감소하는 경향을 확인하였다(Table 10).



(a) Acceleration time history (Surface)



(b) Acceleration time history (depth 30cm)

Fig. 12. 5nd shaking event of acceleration center of the embankment (case 2)

Table 8. Pore water pressure ratio by depth in the center of the embankment (case 2)

Number of event	Pore water pressure ratio (depth 10cm)	Pore water pressure ratio (depth 20cm)	Pore water pressure ratio (depth 30cm)	Pore water pressure ratio (depth 40cm)
1st	0.204	0.194	0.146	0.137
2nd	0.204	0.227	0.171	0.137
3rd	0.469	0.356	0.268	0.255
4nd	1.028	1.426	1.147	1.057
5nd	0.964	1.071	0.908	0.973
6nd	0.886	0.963	0.866	0.939

Table 9. Pore water pressure ratio by depth in the center of the free field (case 2)

Number of event	Pore water pressure ratio (depth 5cm)	Pore water pressure ratio (depth 20cm)	Pore water pressure ratio (depth 30cm)	Pore water pressure ratio (depth 40cm)
1st	0.432	N/A	0.22	0.176
2nd	0.432		0.22	0.176
3nd	0.617		0.39	0.274
4nd	1.77		1.18	1.106
5nd	1.071		1.135	1.046
6nd	0.674		1.091	1.011

Table 10. Relative density to settlement in the middle of the embankment (case 2)

Number of event	Shake 3	Shake 4	Shake 5	Shake 6	Shake 7	Shake 8
Settlement (Accumulated settlement), mm	0.23 (0.23)	39.863 (40.093)	24.039 (64.132)	9.935 (74.067)	4.471 (78.538)	2.723 (81.261)
Relative density, %	52.6	55.2	58.5	62	63.1	63.9

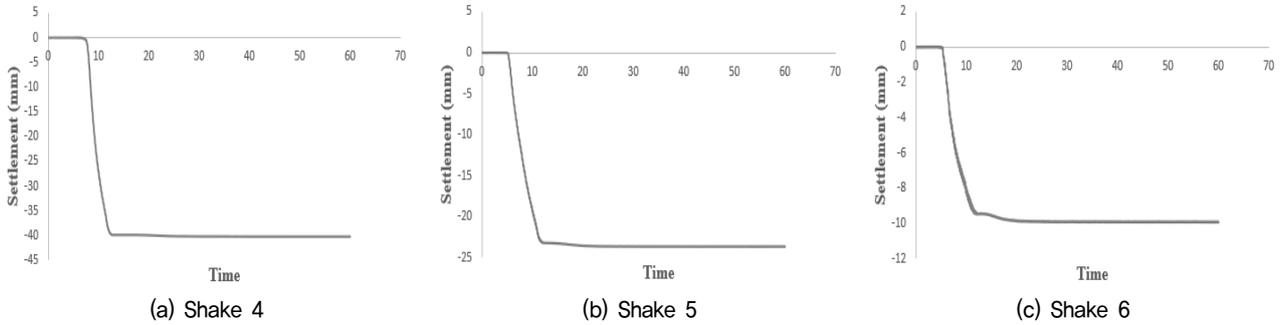


Fig. 13. LVDT in the middle of the embankmen (case 2)

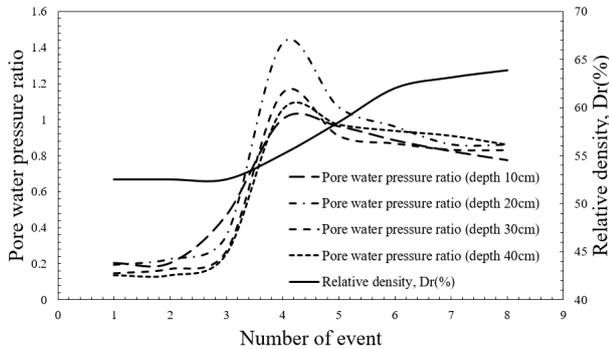


Fig. 14. Comparison of pore water pressure ratio and relative density (middle of the embankment, case 2)

Fig. 14는 비액상화층이 상부 지반에 존재할 경우의 제방 중심에서의 깊이 별 과잉간극수압비와 상대밀도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 비액상화층이 존재할 경우 3차 가진까지 액상화 현상이 발생하지 않아 상대밀도와 과잉간극수압비의 큰 변화가 발생하지 않았지만, 4차 진동 가진시 액상화가 발생하면서 과잉간극수압비가 1 이상으로 증가하며, 상대밀도와 같이 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 상대밀도가 약 58~59% 이상으로 도달한 후에는 과잉간극수압비가 1 이상 발생하지 않아 그 이후 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 액상화 현상을 모사할 수 있는 1g 진동대 실험(Shaking Table Test)을 이용해 포화 사질토 지반

위에 제방이 있을 경우 액상화층과 비액상화층 두께를 조정하여 실험을 수행하였다. 가속도계, 간극수압계 및 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 통해 재액상화 시 깊이에 따른 지반 거동 및 액상화 발생을 분석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 지반 상부층이 비액상화층으로 조성된 경우(Case 2), 1~3차 가진까지는 액상화 현상이 발생하지 않았지만, 4차 진동 가진 시 액상화 현상이 발생하였다. 이는 진동하중이 진행될수록 액상화층에 존재하는 수위가 비액상화층 높이까지 상승하여 액상화가 발생하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 비액상화층 아래에 액상화층이 존재할 경우 여진에 의해서도 액상화의 발생 가능성이 존재할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) Case 1의 경우 자유장 위치에서 3차 가진부터 5cm 깊이를 제외한 모든 깊이에서 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 제방 중심 위치에서는 1차 가진 시 제방 중심 20cm 깊이까지 과잉간극수압비가 1 이상으로 증가하면서 액상화가 발생하였다. 30cm 깊이 이후부터는 액상화 현상이 발생하지 않고, 2차 가진 시 5cm 깊이를 제외한 모든 깊이에서 액상화 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 이는 제방과 같은 상재하중이 있을 경우 구속압의 차이로 인하여 재액상화 발생에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- (3) 재액상화 진행에 따라 제방 중심 위치에서 상대밀도

와 과잉간극수압비의 상관관계를 비교하였다. Case 1, Case 2 모두 가진 횡수가 증가할수록 상대밀도는 점차적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, Case 1, 5cm 깊이 기준에서 상대밀도 65% 이후 부터는 과잉간극수압비가 1 미만으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 비액상화층이 존재하는 지반에서는 상대 밀도가 약 58% 이후부터 과잉간극수압비가 감소하는 경향을 보였다. 두 조건 모두 상대밀도가 약 65% 이상일 때 액상화가 발생하지 않았으며, 이는 상대 밀도가 특정치에 도달했을 경우 액상화 발생 가능성 여부를 판단하는 근거로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 철도구조물을 제외한 제방만의 하중을 고려하였기 때문에 합리적인 결과를 도출하기 위해서는 추후에 많은 변수를 고려해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(21SCIP-C155167-03: MT21027).

참고문헌 (References)

1. ATC, A. (1996), Seismic evaluation and retrofit of concrete building, Applied Technology Council. Report ATC, 40.
2. Casagrande, A. (1936), The Determination of the Pre-consolidation Load and Its Practical Significance, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), Cambridge, MA, 22-26 June 1936, Cambridge, MA.
3. Ha, I. S., Olson, S. M., Seo, M. W., and Kim, M. M. (2011), Evaluation of Reliquefaction Resistance Using Shaking Table Tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No.4, pp. 682-691.
4. Ha, I. S. and Kim, M. M. (2005), Evaluation of Characteristics of Re-liquefaction Resistance in Saturated Sand Deposits Using 1-g Shaking Table Test, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.4, pp.65-70.
5. Han, J. T. (2012), Please Explain the Definition of Liquefaction and How to Design the Pile Foundation in Liquefiable Soils, *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol.60, No.8, pp.90-93.
6. IAI, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol.29, No.1, pp.105-118. doi:10.3208/sandf1972.29.105
7. Nepal, D. B., Deng, J., Chen, J., and Maakoe, T. (2020, February). Re-liquefaction of sand in shaking table, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 758, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
8. Oda, M., Kawamoto, K., Suzuki, K., Fujimori, H., and Sato, M. (2001), Microstructural Interpretation on Reliquefaction of Saturated Granular Soils under Cyclic Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.5, pp.416-423. doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:5(416)
9. Ohara, S., Yamamoto, T., and Yurino, H. (1992), Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit, *In Proc. of the 10th WCEE* (Vol.3, pp.1425-1430)

Received : October 21st, 2021

Revised : November 1st, 2021

Accepted : November 1st, 2021