

1-G 진동대 실험을 이용한 시트파일 보강재의 액상화 및 피해 방지 효과

Liquefaction Prevention and Damage Reduction Effect of Reinforcement by Sheet Pile Using 1-G Shaking Table Test

심성훈¹⁾ · 윤종찬²⁾ · 손수원³⁾ · 김진만^{4)*}

Sim, Sung Hun¹⁾ · Yoon, Jong Chan²⁾ · Son, Su Won³⁾ · Kim, Jin Man^{4)*}

¹⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, ²⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, ³⁾부산대학교 지진방재연구센터 전임연구원, ⁴⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, ²⁾Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, ³⁾Associate Research, Seismic Simulation Test Center, Pusan National University,

⁴⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

Earthquake preparedness has become more important with recent increase in the number of earthquakes in Korea, but many existing structures are not prepared for earthquakes. There are various types of liquefaction prevention method that can be applied, such as compaction, replacement, dewatering, and inhibition of shear strain. However, most of the liquefaction prevention methods are applied before construction, and it is important to find optimal methods that can be applied to existing structures and that have few effects on the environment, such as noise, vibration, and changes in underground water level. The purpose of this study is to estimate the correlation between the displacement of a structure and variations of pore water pressure on the ground in accordance with the depth of the sheet pile when liquidation occurs. To achieve this, a shaking table test was performed for Joo-Mun-Jin standard sand and an earth pressure, accelerometer, pore water pressure transducer, and LVDT were installed in both the non-liquefiable layer and the liquefiable layer to measure the subsidence and excess pore water pressure in accordance with the time of each embedded depth. Then the results were analyzed. A comparison of the pore water pressure in accordance with Hsp/Hsl was shown to prevent lateral water flow at 1, 0.85 and confirmed that the pore water pressure increased. In addition, the relationship between Hsp/Hsl and subsidence was expressed as a trend line to calculate the expected settlement rate formula for the embedded depth ratio.

Key words: Liquefaction, Shaking table tests, Sheet pile, Settlement, Embedded depth ratio, Settlement

1. 서론

최근 한국에서 지진이 지속적으로 발생하면서 사람들의 지진에 대한 관심이 커지고 있으며 특히, 최근 발생한 포항 지진에서는 국내 첫 액상화 현상이 발생하여 액상화 현상에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 이러한 액상화 현상은 국제적으로도 큰 관심을 가지고 있다. 이에 비해 우리나라의 경우 경주 지진과 포항 지진이 발생하기 전까지 지진에 대한 국가적인 관심이 크지 않았고 이로 인해 구조물 건설 시 내진설계와 액상화 현상에 대한 방지 대책

을 적용하지 않은 구조물들이 매우 많다. 그리고 기존의 연구들은 새로운 구조물을 건설하면서 적용하는 액상화 방지 공법들이 대부분이며, 기존의 액상화 방지 공법이 적용되어 있지 않은 구조물에는 이러한 공법들의 적용이 힘들다.

액상화 현상이 발생한 대표적인 지진으로는 일본 니카타 지진(1964), 한신 대지진(1995), 동일본 대지진(2011)과 미국 노스리지(1994), 로마프 리에타지진(1989) 등이 있다. 이에 미국과 일본의 경우 지속적으로 액상화 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되었고[1-4], 많은 액상화 방지 공법의 개발과 연구를 수행하였다[5-9].

Tanaka(2000)은 유한요소해석에 대한 결과와 실험 데이터 분석을 통해 sheet pile 공법이 액상화 방지에 효과적이라는 것을 증명하였고, 특히, 배수능력이 있는 특수 강판의 경우 침하뿐만 아니라 부등침하에 대한 문제도

*Corresponding author: Kim, Jin Man

E-mail: jmkim@pusan.ac.kr

(Received April 10, 2020; Revised July 1, 2020; Accepted August 3, 2020)

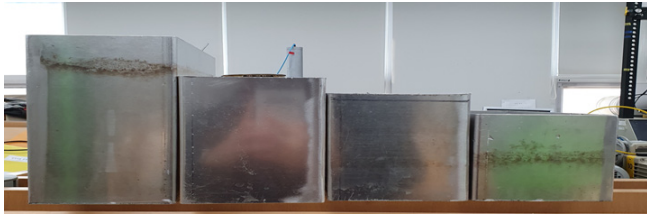


Fig. 1. Embedded depth ratio of sheet pile (1.0, 0.85, 0.75, 0.65)

충분히 방지할 수 있다고 하였다[10].

Towhata(2015)는 1-G 모형실험을 통해 구조물 기초 주위에 시트파일 설치 시 시트파일과 구조물의 간격에 따른 액상화 방지 효과와 시트파일의 근입깊이에 따른 액상화 방지 효과에 대해 연구를 수행하였다[11]. 바닥면으로부터 10 cm까지 수위를 높인 뒤 모래를 물에 일률적으로 넣는 수중낙사법을 이용하여 비액상화층과 액상화층으로 나누어 지반을 조성하였고 시트파일의 근입깊이는 바닥면까지 근입하는 경우와 지반의 절반까지만 근입하는 경우로 나누어 실험을 수행하였다. 그러나 시트파일의 근입깊이를 두가지 경우로만 나누어 실험하였으며, 시트파일의 다양한 근입깊이별 액상화 방지 효과에 대한 분석은 수행하지 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 1-G 모형실험을 통해 시트파일의 근입깊이에 따른 액상화 방지효과를 분석하여 기존 구조물과 기초에 적용 가능한 최적의 근입비를 선정하고자 한다. 지반조성은 주문진 표준사를 이용하였으며 비액상화층과 액상화층으로 나누어 조성하고 비액상화층은 하부 5 cm, 상부 3 cm 두께로 조성하였다. 액상화층은 1층을 5 cm로 조성하여 총 15 cm 두께로 조성한다. 비액상화층, 액상화층의 상대밀도는 각각 85%, 45%로 조성하였다. 시트파일의 근입비에 따른 액상화 방지 효과를 분석하기 위해 길이가 다른 4종류의 시트파일(근입비: 1, 0.85, 0.75, 0.75)을 사용하여 (Fig. 1) 시트파일의 근입 깊이가 지반의 거동에 미치는 효과를 살펴보았다 (근입비는 4.1 참고). 시트파일이 미치는 효과에 대한 실험결과에서 기술된 시간과 침하량 등은 모형으로 환산된 값이다.

2. 시험 준비

2.1 진동대 시험 장치

본 연구에 사용된 진동대 시험장치는 최대 500 kg의 힘을 가할 수 있는 액츄에이터와 강철프레임으로 구성되어 있으며 단축방향으로 동적 하중을 적용할 수 있다. 모형토조는 아크릴로 제작된 강성토조이며, 아크릴 토조의 크기는 길이 800 mm, 폭 400 mm, 높이 700 mm이며, 실험 수행 시 지층의 거동을 쉽게 확인할 수 있도록 투명하게 제작하였다. 강성토조의 측면에는 스티로폼 재질의 완충장치를 각각 5 cm 두께로 설치하여 측면 경계에서의 입력파를 흡수할 수 있도록 하였다(Fig. 2).

2.2 지반 조성 및 계측센서 설치

지반은 주문진 표준사를 사용하였고 입도분포곡선은 Fig. 3와 같다. 주문진 표준사의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 지반 조성에는 모래를 일

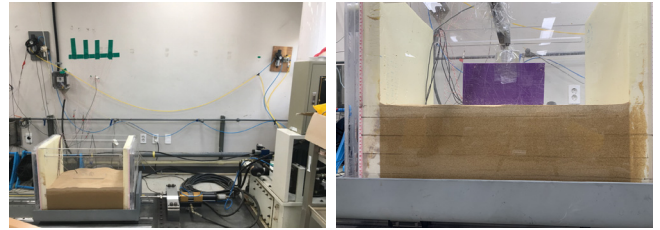


Fig. 2. Photograph of shaking table and sand composition

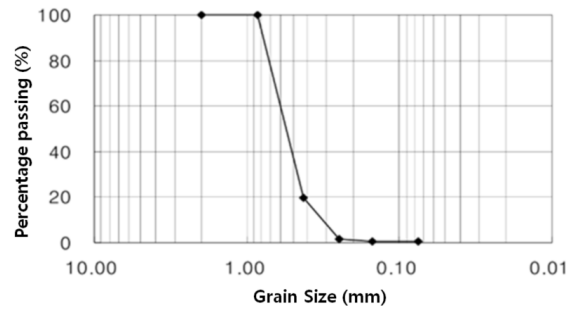


Fig. 3. Particle distribution of Joo-Mun-Jin standard sand

Table 1. Basic property value of Joo-Mun-Jin standard sand

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u
2.63	0.937	0.65	0.331	0.586	1.93

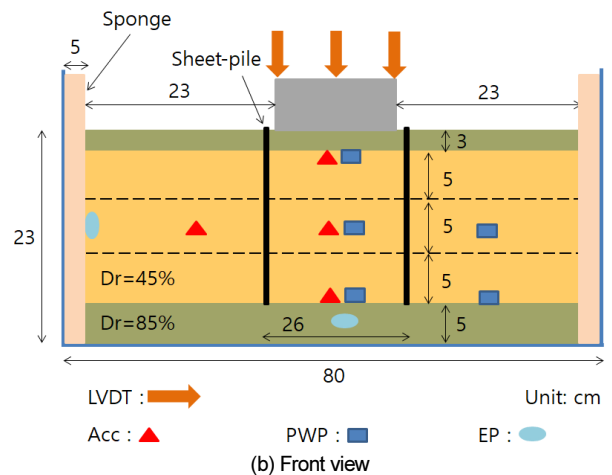
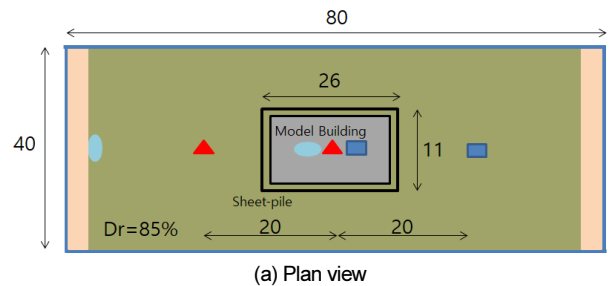


Fig. 4. Schematic diagram of a typical experiment and position of sensors

정한 높이에서 흩뿌리는 건조낙사법과 수중에 흩뿌리는 수중낙사법을 사용하였으며, 비액상화층과 액상화층을 구분하여 조성하였다. 비액상화층

은 건조사법을 사용하여 상대밀도 85%로 토조 바닥면과 지반의 상부에 각각 5 cm, 3 cm 두께로 조성하였다. 액상화층은 수중낙사법을 이용하여 상대밀도 45%로 1층을 5 cm로 조성하여 총 15 cm 두께로 조성하였으며, 흙이 적절하게 포화될 수 있도록 지반을 조성하고 24시간이 지난 후에 실험을 수행하였다. 지반 내 가속도와 간극수압 변화, 토압, 변위를 측정하기 위해 토압계(2EA), 가속도계(4EA), 간극수압계(5EA), LVDT(3EA)를 설치하였고, 양측에는 두께 5 cm의 스티로폼 재질의 완충장치를 설치하여 입력파를 흡수할 수 있도록 하였다(Fig. 4). 시트파일은 2 mm 두께의 스테인레스강으로 제작하였으며, Towhata(2015)가 모형지반을 조성했던 방법과 같이 수중낙사법을 이용하여 액상화층을 조성할 때 근입깊이에 맞춰 위치를 고정시키고 구조물 주위로 지반 조성하고 함께 설치하였다. Towhata(2015)는 시트파일 두께를 2 mm, 1 mm로 적용하여 비교 분석했으며, 조금 더 flexible한 두께 1 mm일 때에 강하고 긴 동적하중에서 침하가 증가한 것을 확인하였다. 이를 참고하여 모형시트파일은 어느 정도 연성을 가지면서 파괴되지 않는 두께로 2 mm를 적용하였다[11].

2.3 입력지진파 및 실험 프로그램

입력지진파는 다양한 가속도 수준과 주파수의 정현파를 사용하였다. 가속도 수준은 0.1 g ~ 0.5 g, 주파수는 1 Hz ~ 10 Hz의 범위로 진동대 실험을 수행하였다. 제시된 자료들은 액상화가 일어날 때를 기준으로 하였으며, 비

보강일 때의 가속도 수준과 주파수는 각각 0.4 g, 10 Hz이고, 근입비가 1, 0.85, 0.75, 0.65일 때의 가속도 수준과 주파수는 각각 0.5 g, 10 Hz였다 (Table 2). 액상화 발생여부는 실험 수행에 따라 변화하는 수위와 구조물과 지반의 변위거동, 그리고 간극수압비 등을 종합하여 판단하였다. 실험에 적용한 대표적인 입력지진파는 Fig. 5에 나타내었다.

3. 1-G 모형실험을 위한 상사법칙

Iai(1989)는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 구성 법칙, 그리고 변위-변형을 관계 등을 이용하여 1-G 진동대 모형실험에 적용할 수 있는 상사법칙을 제안하였다[12]. 본 연구에서의 실험은 모형지반을 느슨하게 조성하고 진동이 멈춘 후에도 계속해서 변형이 발생하는 형태이기 때문에 Iai의 상사법칙 중에서 Type 3을 적용하였다(Table 3). 원형은 부산에 위치한 가로 12 m 너비 7 m인 2층 높이의 구조물을 대상으로 하였다. 실험모형은 원형의 50분의 1 크기로 축소 제작하였다. 모형 구조물은 길이 250 mm와 폭 100 mm의 아크릴 상자로 제작하였고 모형 구조물의 높이는 100 mm이다. 무게는 8 kg이며, 표면 상재압은 3.136 kPa이다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 Hsp/Hsl

시트파일의 길이(액상화 발생 가능 지층 상부에서부터 하부로 측정된 길이)는 Hsp라 하고 액상화 발생 가능 지층의 깊이는 Hsl(=15 cm)로 표현하였다. 따라서 Hsp/Hsl는 시트파일의 길이와 액상화 발생 지층의 깊이에 대한 비로, 본 논문에서는 근입비로 표현하였다.

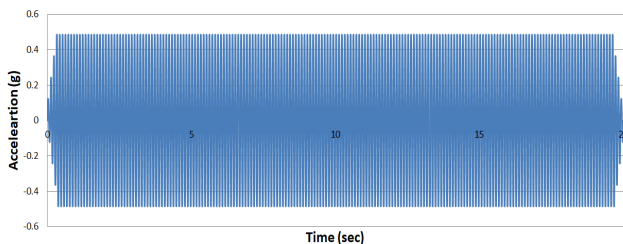
4.2 비보강 Case

Fig. 6은 시트파일을 적용하지 않은 비보강상태의 경우이며, 2~4초 사이에 급격한 침하가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이러한 침하변화를 바탕으로 2~4초 사이에 액상화가 발생하였다고 판단하였다. 비보강시 수압은 8초까지 뚜렷한 변화를 보이지 않았으며, 그 이후로는 계측 센서의 이상으로 인해 측정이 되지 않은 것으로 판단된다.

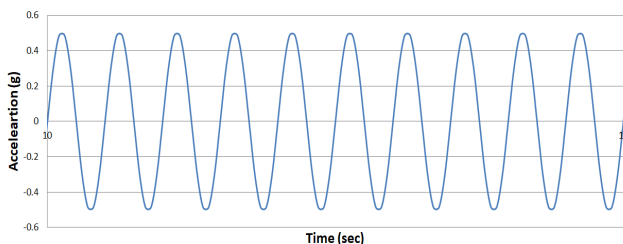
Fig. 7은 비보강일 경우에 액상화 발생 전과 발생 후의 지반 상태를 보여 주며, 액상화 발생 후 지반변형 및 침하가 일어난 것을 볼 수 있다.

Table 2. Characteristics of experiments

No.	Hsp/Hsl	Acceleration (g)	Frequency (Hz)
1	0	0.4	10
2	1	0.5	10
3	0.85	0.5	10
4	0.75	0.5	10
5	0.65	0.5	10



(a) The Whole shaking



(b) Shaking wave between 10 and 11 seconds

Fig. 5. Input motion at 0.5 g, 10 Hz

Table 3. Law of simulation based on Iai (1989)

Scale factor ($\lambda=50$)		
	Parameter	Prototype/Experiment
Length	λ	50
Stress and Pressure	λ	50
Acceleration	1	1
Time	$\lambda^{0.5}$	7.07
Stiffness	λ	50

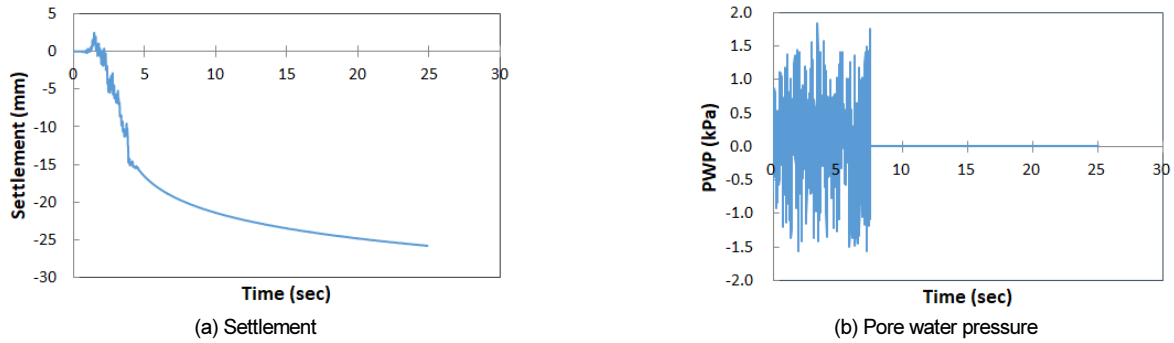


Fig. 6. In case of Hsp/Hsl=0, (a) Time history of Settlement, (b) Time history of pore water pressure

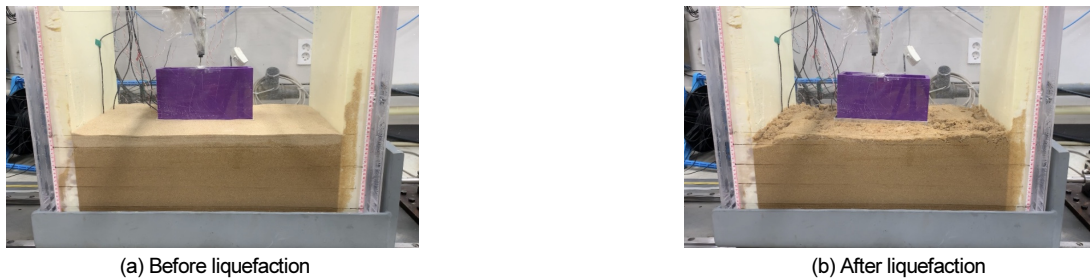


Fig. 7. Model geometry, (a) Before liquefaction, (b) After liquefaction

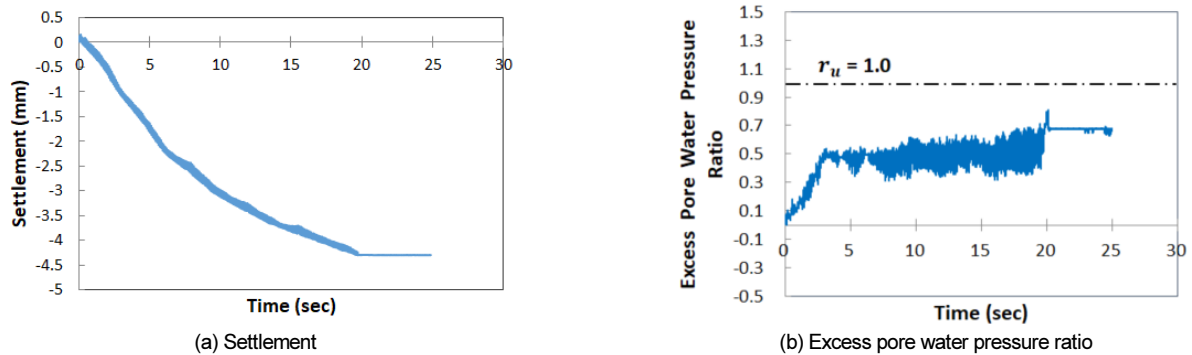


Fig. 8. In case of Hsp/Hsl=1, (a) Time history of Settlement, (b) Time history of Excess pore water pressure ratio

4.3 Hsp/Hsl=1.0, 0.85, 0.75, 0.65일 경우

4.3.1 Hsp/Hsl=1 Case

Hsp/Hsl=1은 시트파일의 근입 깊이와 액상화 발생 가능 지층의 깊이가 같은 경우이다. Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 구조물의 수직 침하하는 하중 적용 시작부터 지속적으로 발생하여 최종적으로 하중 적용 후 20초 일 때 4.3 mm로 가장 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 지반 내 액상화 현상 발생 시, 불투수벽의 역할을 하는 시트파일이 지반 내 강성을 증가시켜 측방 유동현상에 의한 구조물 침하를 억제함으로써 구조물의 침하를 감소시켜주는 효과를 보인 것으로 판단된다. 간극수압은 Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이 하중 적용 시작 후 5초까지는 급격한 상승을 보였으나 5초 이후부터는 간극수압이 서서히 증가하는 경향을 보였고 하중 적용 후 20초일 때 간극수압비는 0.75로 가장 큰 값을 보였다. 이는 시트파일이 액상화층 아래 비액상화층 부근까지 근입되어 있어 간극수압의 소산이 방해를 받은 것으로 판단된다.

4.3.2 Hsp/Hsl=0.85 Case

Hsp/Hsl=0.85는 시트파일의 근입 깊이가 액상화 발생 가능 지층의 85%에 해당하는 지층까지 근입된 경우이다. 동적하중 재하 후 10초 동안은 큰 변화가 없었으며 15초부터 급격하게 침하되어 17초일 때 5.42 mm의 값이 측정되었다(Fig. 9(a)). 간극수압비는 Fig. 9(b)에서 보이는 바와 같이 0.25의 값을 유지하다가 15초 구간이 지나면서 급격히 증가하는 경향을 보였고 17초일 때 약 1.25로 측정되었다. 시트파일이 지반 내 강성을 증가시키고 전단변형률을 감소시켜 침하를 억제시켰지만 Hsp/Hsl=1일 때보다 다소 증가한 것을 볼 수 있다.

4.3.3 Hsp/Hsl=0.75 Case

Hsp/Hsl=0.75는 시트파일의 근입 깊이가 액상화 발생 가능 지층의 75% 지점에 해당하는 지층까지 근입된 경우이다. Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이 하중 재하 후 점진적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며 최대 침하

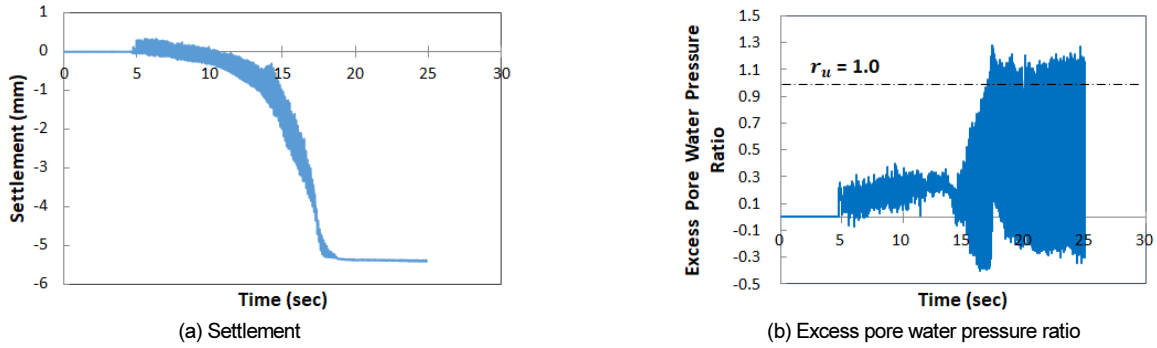


Fig. 9. In case of Hsp/Hsl=0.85, (a) Time history of Settlement, (b) Time history of Excess pore water pressure ratio

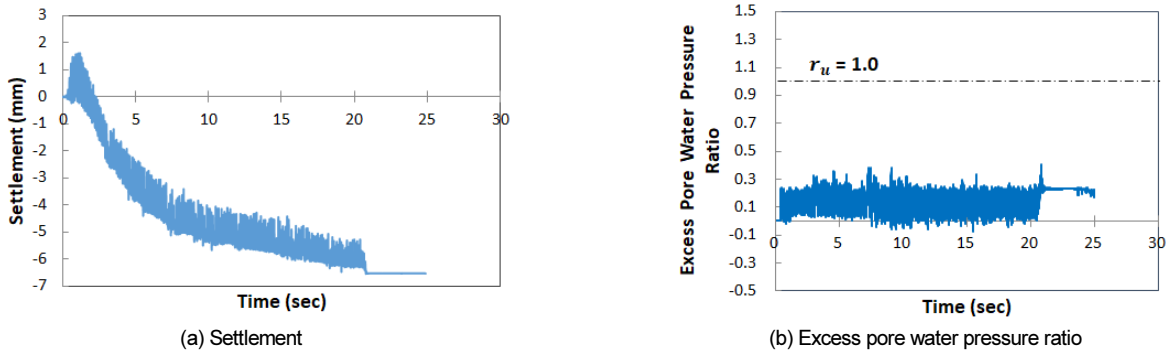


Fig. 10. In case of Hsp/Hsl=0.75, (a) Time history of Settlement, (b) Time history of Excess pore water pressure ratio

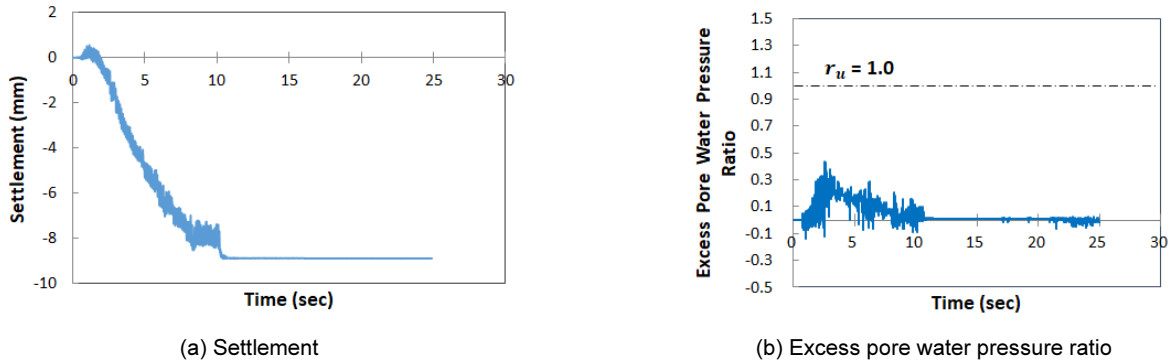


Fig. 11. In case of Hsp/Hsl=0.65, (a) Time history of Settlement, (b) Time history of Excess pore water pressure ratio

량은 6.53 mm이다. Fig. 10(b)에서 간극수압비는 0.3으로 앞서 설명했던 Hsp/Hsl=1, 0.85일 때에 비해 작은 값으로 측정이 되었다. 이는 측방 유동으로 인해 시트파일 아래의 빈 공간으로 지하수가 흘러들어가 간극수압이 감소한 것으로 판단된다.

4.3.4 Hsp/Hsl=0.65 Case

Hsp/Hsl=0.65는 시트파일의 근입 깊이가 액상화 발생 가능 지층의 65% 지점에 해당하는 지층까지 근입된 경우이다. 하중 재하 후 침하량은 급격히 증가하였고 10초일 때 최대 침하량으로 8.88 mm가 측정되었다 (Fig. 11(a)). Fig 11(b)에서 보이는 바와 같이 간극수압은 2초까지 급격히 상승하여 약 0.2 kPa로 가장 큰 값을 보였다. 그러나 하중 재하 시간이 길어 질수록 측방 유동으로 인해 시트파일 내부 지층에서의 간극수압이 감소하

는 경향을 보였으며 구조물의 침하 역시 크게 증가하여 액상화방지 효과는 거의 보이지 않았다.

4.4 시트파일의 근입 깊이에 따른 간극수압비 비교

간극수압비는 액상화를 판단하는 중요한 지표로 사용되며 간극수압을 초기 유효응력을 나누어 계산한다. 간극수압비가 1에 가까울수록 간극수압이 초기 유효응력과 동일한 값을 가지게 되고, 이는 유효응력의 감소와 더불어 액상화 발생을 의미한다. 간극수압계가 설치된 층(구조물 아래 3 cm구간)의 초기유효응력은 구조물에 의한 표면 상재압, 3.136 kPa과 상부 비액상화층의 유효응력, 0.464 kPa을 고려한 3.6 kPa이며, 계측된 간극수압을 초기 유효응력으로 나누어 간극수압비를 계산하였다. 시트파일의 근입 깊이가 깊을수록(Hsp/Hsl=1에 가까워질수록) 전단변형률을 감소시켜 침하

를 억제시켰지만 간극수압은 0.75, 0.65보다 크게 예측된 것을 볼 수 있다. 이는 시트파일의 축방 유동을 막아 소산속도가 느려져 시트파일 내부의 간극수압은 오히려 증가한 것으로 보인다. 시트파일은 과잉간극수압 소산을 억제하는 부정적인 효과가 있는 반면, 전단변형을 억제하여 액상화를 억제하는 긍정적인 효과가 있는데 최종적으로는 보강재의 역할로서 침하를 감소시키는 긍정적인 효과를 보였다.

4.5 시트파일의 근입 깊이에 따른 강도 비교

Fig. 12는 시트파일의 근입 깊이에 따른 구조물의 침하를 나타낸 것이다. 하중재하 시 시트파일의 축방 유동을 막아 지반의 전단변형률을 감소시킴으로 인해 Hsp/Hsl가 커질수록 침하량을 억제시켜주는 효과가 컸으며, 비보강시 침하량은 25.77 mm로 가장 컸다. Hsp/Hsl의 값이 1, 0.85, 0.75, 0.65일 때는 각각 8.88 mm, 6.53 mm, 5.42 mm, 4.30 mm으로 측정되었다(Table 4).

근입비에 대한 침하량의 관계를 추세식으로 표현하였으며, 근입비가 증가할수록 점점 수렴하는 형태를 보였다(Fig. 13). 근입비에 대한 예상 침하량 제안식은 식 (1)과 같다.

$$ln(y) = -1.809x + 3.27 \tag{1}$$

5. 결론

본 연구에서는 Hsp/Hsl에 따른 구조물 변위와 지반에서의 간극수압 변화의 상관관계를 추정하기 위해 길이가 다른 4종류의 시트파일에 대해 진동대 시험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Hsp/Hsl가 증가함에 따라 액상화 방지 효과를 얻을 수 있었으며, Hsp/Hsl가 작아질수록 보강 효과는 감소하였다. 그리고 간극수압비 비교를 통해 Hsp/Hsl가 1, 0.85일 때 시트파일이 지반의 전단변형률을 감소시켜 구조물의 침하는 감소시켰으나 시트파일 내부의 과잉간극수압 소산의 방해로 간극수압은 오히려 증가한 것을 확인하였다.
- 2) Hsp/Hsl=0.85인 경우, 동적하중이 재하된 후 15초일 때부터 급격하게 침하가 일어났으며, 간극수압도 15초 구간이 지나면서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 시트파일이 지반 내 강성을 증가시키고 전단변형률을 감소시켜 침하를 억제시켰지만 Hsp/Hsl=1일 때보다는 다소 증가한 것을 볼 수 있다. Hsp/Hsl가 0.75, 0.65인 경우, 하중 재하 후 점진적으로 감소하였으며, 축방 유동으로 인해 시트파일 아래의 빈 공간으로 지하수가 흘러들어가 간극수압이 감소하였다.
- 3) Hsp/Hsl이 1일 때 구조물의 침하가 가장 작았고 Hsp/Hsl이 0.65일 때 구조물의 침하가 가장 크게 발생하였다. 시트파일은 과잉간극수압 소산을 방해하는 부정적인 효과가 있는 반면, 전단변형을 억제하여 액상화를 억제하는 긍정적인 효과가 있는데 최종적으로는 보강재의 역할로서 침하를 감소시키는 긍정적인 효과를 보였다.
- 4) 본 논문에서는 시트파일을 사각형태의 단면으로 설정하여 실험수행하였으나, 실제 일반적으로 사용되는 시트파일의 단면과는 차이가 있으며 단면에 대한 한계점을 인지하고 고려해야한다.
- 5) 본 연구에서는 단일 사질토 지반에 대해서 모형실험을 수행하였으나, 실제 지반과 유사한 다층 지반에 대한 실험이 필요하다고 판단되며, 현재 이에 대한 연구를 수행 중이다.

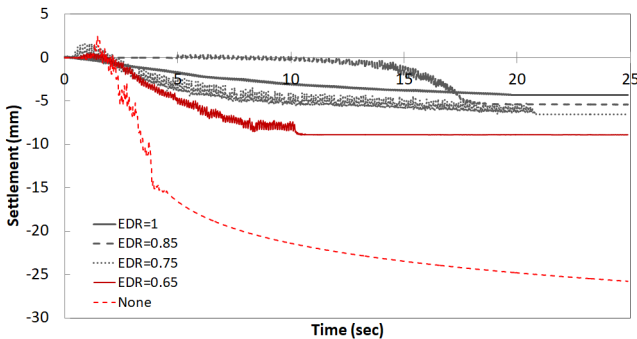


Fig. 12. Time history of settlement according to embedded depth ratio of sheet pile

Table 4. Settlement per embedded depth ratio

	None	0.65	0.75	0.85	1
Settlement	25.77	8.88	6.53	5.42	4.30

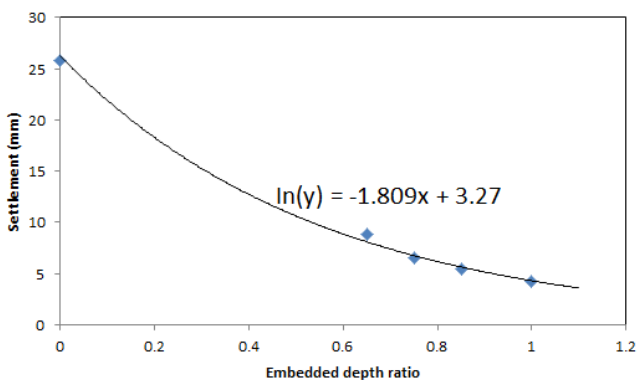


Fig. 13. A trend line according to relation of Settlement to Embedded depth ratio

/ 감사의 글 /

본 논문은 한국연구재단의 지원(과제번호 NRF-2017R1A2B4010201 및 NRF-2020R1H1A2010866)을 받아 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Boulanger RW, Idriss IM, Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006 Nov;1413-1426.
2. Rasouli R, Hayashida T, Towhata I, Experimental study on subsidence of structures due to liquefaction and its mitigation, JAEE, International Symposium on Earthquake Engineering, Tokyo,

- Japan, 2012 Nov;8-10:199-208.
3. Bray JD, Dashti S. Liquefaction-induced movements of buildings with shallow foundations. Missouri S&T, 2010-Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2010 May;OSP 2:1-10.
 4. Bray JD, Markham CS, Cubrinovski M. Liquefaction assessments at shallow foundation building sites in the central business district of christchurch. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017; 92:153-164.
 5. Elgamal A, Parra E, Yang Z, Adalier K. Numerical analysis of embankment foundation liquefaction countermeasures. Journal of Earthquake Engineering, 2002;6(4):447-471.
 6. Ha IS, Kim MM. Evaluation of Characteristics of re-liquefaction resistance in saturated sand deposits using 1-g shaking table test. Korean Geotechnical Society, 2005 Jun;21(4):65-70.
 7. Jeon NS, Choe MJ, Kwon OK, Kim DS. A study on size effect of model test by 1 g shaking table test and one-dimensional ground response analysis. Korean Society of Civil Eng, 2006 Oct;4116-4119.
 8. Jang WL, Park JJ, Shin EC, Jeon CK, Kang HH. Influence on the sheet pile withdrawing influence by using shaking table test. Korean Geotechnical Society, 2008 Oct;3891-3894.
 9. Park YH, Kim SR, Kim SH, Kim MM. Liquefaction of embankments on sandy soils and the optimum countermeasure against the liquefaction. Jour. of the KGS, 2000 June;16:15-21.
 10. Tanaka H, Murata H, Kita H, Okamoto M. Study on sheet pile wall method as a remediation against liquefaction, 12WCEE, 2000;0535: 1-8.
 11. Rasouli R, Towhata I, Hayashida T. Mitigation of seismic settlement of light surface structures by installation of sheet-pile walls around the foundation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015 May;72:108-118.
 12. Iai S. Similitude for shaking table tests on soil-structure- fluid model in 1 g gravitational field. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989 Mar; 29(1):105-118.