

# 원심모형실험을 이용한 그룹 삼축 마이크로파일의 동적거동 평가

## Evaluation of the Dynamic Behavior of Inclined Tripod Micropiles Using Dynamic Centrifuge Test

김 윤 아 <sup>1</sup>	Kim, Yoon-Ah	권 태 혁 <sup>2</sup>	Kwon, Tae-Hyuk
김 종 관 <sup>3</sup>	Kim, Jongkwan	한 진 태 <sup>4</sup>	Han, Jin-Tae
김 재 현 <sup>5</sup>	Kim, Jae-Hyun	안 성 율 <sup>6</sup>	An, Sung-Yul

### Abstract

Despite recent modifications to building structural standards emphasizing the seismic stability of building foundations, the current design focus remains solely on vertical support, resulting in insufficient consideration of horizontal loads during earthquakes. In this study, we evaluated the dynamic behavior of inclined tripod micropiles (ITMP), which provide additional seismic resistance against horizontal and vertical loads during earthquakes. A comparison of the dynamic characteristics, such as acceleration, displacement, bending moment, and axial force, of ITMP with a 15° installation angle and normal vertical micropiles with a 0° installation angle was performed using dynamic centrifuge model tests. Results show that under moderate seismic loads, the proposed ITMP exhibited lower acceleration responses than the vertical micropiles. However, when subjected to a long-period strong seismic excitation, such as sine (2 Hz), ITMP showed greater responses than the vertical micropiles in terms of acceleration and settlement. These results indicate that the use of ITMP reduces the amplification of short-period (high-frequency) contents compared with the use of vertical micropiles. Therefore, ITMP can be used to enhance seismic performance of structures.

### 요 지

최근 건축물 구조 기준의 개정으로 말뚝 기초의 내진성능 강화가 강조되고 있음에도 불구하고, 현재 건축물 기초의 내진설계는 비용과 시공상의 어려움으로 충분한 시행이 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 지진 시 수평 및 수직 하중에 효과적으로 대응할 수 있는 구조로 제안된 삼축 마이크로파일(TMP)의 지진 시 동적 거동을 평가하고자 하였다. 동적 원심모형실험을 통해 설치 각도가 15°인 그룹 삼축 마이크로파일과 설치 각도가 0°인 연직 균말뚝의 가속도,

- 1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology)
- 2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology, Tel: +82-42-350-8221, t.kwon@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg. Research, Korea Inst. of Civil Eng. and Building Tech.)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engrg. Research, Korea Inst. of Civil Eng. and Building Tech.)
- 5 정희원, 강원대학교 문화예술·공과대학 건축토목환경공학부 토목공학전공, 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., The College of Art, Culture and Engrg., Kangwon National Univ.)
- 6 정희원, (주)에스아이텍 대표 (Member, Director of Research, SYTEC Co. Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 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.

변위, 휨모멘트, 축력 등의 동적 거동이 비교 분석되었다. 실험 결과에 따르면 가속도와 수평 및 수직 변위 결과를 바탕으로 살펴보았을 때 탁월 주기가 0.5 초 미만인 실지진과 가진 조건에서 경사진 그룹 삼축 마이크로파일의 내진 성능은 연직 균말뚝보다 좋거나 비슷한 수준으로 평가된다. 그러나 Sine 2Hz와 같은 장주기의 강한 지진 가진 시에는 경사진 삼축 마이크로파일의 응답이 전반적으로 수직 마이크로파일보다 크게 나타났다. 협소한 공간에서 기존 시설물의 단주기 지진파에 대한 응답을 줄이는 내진보강이 필요한 경우 경사진 삼축 마이크로파일이 수직 마이크로파일의 대안으로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Dynamic centrifuge model test, Micropile angle, Seismic performance, Tripod micropile

## 1. 서론

최근 건축물의 기초를 구조 부재에 통합하여 설계하는 방향으로 건축물 구조 기준 규칙이 개정됨에 따라 기초의 내진성능 확보가 강조되고 있다. ‘건축물의 구조 기준 등에 관한 규칙’ 및 건축물 기초구조 설계 기준(KDS 41 20 00)과 같은 규정에도 불구하고, 현재 건축물 기초의 내진설계는 비용과 시공상의 어려움으로 충분한 시행이 이루어지지 않고 있다.

기존시설물 보강을 위해 개발된 공법 중 하나인 마이크로 파일 공법은 1950년대 초 이탈리아에서 시설물의 피해를 최소화하며 보강하기 위해 고안되었으며, 협소한 공간에서의 우수한 접근성과 시공성으로 다양한 형태로 발전하여 현재까지 실무에서 활발하게 활용되고 있다. 그러나 연직 지지력에 비해 낮은 수평 지지력으로 내진보강 공법으로 적용하는 사례는 낮은 편이다(Kim et al., 2020). 연직하중 뿐만 아니라 지진 시 가해지는 수평하중에도 저항하기 위해서는 기존 말뚝과는 다른 구조의 말뚝 설계가 요구된다.

삼축 마이크로파일(Tripod Micropile, TMP)은 건축물의 기초 부분에 삼발이 형태로 설치되어, 지진 시 건축물에 발생하는 횡방향 하중에 효과적으로 대응할 수 있도록 개발된 구조의 기초이다. 세 개의 스테인레스 마이크로파일을 사용하여 시공되어 소형 장비로도 협소한 건축물에 적용할 수 있으며, 트러스 구조를 통해 수직 및 수평력에 대한 저항 능력을 강화한 특징을 가지고 있다(Kim et al., 2021a; Kim et al., 2021b). 삼축 마이크로파일과 유사한 경사말뚝의 내진성능은 원심모형실험, 1g 진동대 실험, 수치해석 등을 통해 다방면에서 평가되었다. Escoffier et al.(2008)은 원심모형실험에서 수평하중 재하를 통해 준정적하중에서 수직 말뚝군과 경사 말뚝군의 응답을 비교했고 경사군말뚝이 더 큰 횡방향 저항과

더 작은 최대 휨 모멘트를 갖는 것을 보였다(Escoffier et al., 2008). Hwang et al.(2020)은 모형실험을 통해 설치 각도가 증가하면 연직 말뚝에 비해 수평 지지력이 증감함을 보였다. Oh et al.(2015)는 파일 설치조건에 따라 달라지는 마이크로파일의 수평 지지특성을 알아보기 위해 모형실험을 수행하였으며 짧은 마이크로파일의 경우 설치 각도가 30°인 경우 수평지지력을 효과적으로 증진시키는 것을 확인하였다. 이 외에도 동적 원심 모형실험을 활용한 연직 마이크로파일의 동적거동 연구로는 Yoo et al.(2013)이 동적 원심모형실험을 통해 마이크로 파일의 p-y 곡선을 산정하고 이를 기존 p-y 곡선들과 비교하여 적용성을 검증한 바 있으며, 궤도지지말뚝의 동적 거동을 평가하고 궤도지지말뚝의 일반 단면에 대해 연약지반 대비 성토체 높이 비율 기준을 제시하였다(Yoo et al., 2019). 마이크로파일은 단독으로 사용되기보다 균말뚝의 형태로 사용되는데 마이크로파일 사이의 간격에 따라 균말뚝 효과가 나타나기도 한다. Zhang et al.(2008)은 설치 각도를 달리한 그룹 마이크로파일에 대해 동적 원심모형실험을 수행하였다. 중앙에 위치한 수직말뚝의 경우 휨모멘트와 관성력 사이에 상대적으로 높은 상관관계가 있으나 경사말뚝에서는 상관관계가 관찰되지 않아 경사말뚝 기초의 내진평가가 복잡함을 강조하였다. 그러나 그룹 삼축 마이크로파일의 동적 거동에 대한 이론적, 실험적 고찰은 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 그룹 삼축 마이크로파일과 일반 연직 균말뚝의 지진 시 동적 거동의 차이를 비교 분석하고 삼축 마이크로파일의 내진성능을 원심모형실험을 통해 평가하고자 하였다. 마이크로파일 12개를 사용하여 설치 각도가 0°인 연직 균말뚝과 설치 각도가 15°인 그룹 삼축 마이크로파일을 축소모형으로 제작하였다. 두 균말뚝의 수평변위, 수직변위, 가속도 응답, 깊이

에 따른 휨모멘트, 축력 등의 실험 결과를 통해 연직 균 말뚝과 비교하여 그룹 삼축 마이크로파일의 내진성능을 평가하였다.

## 2. 실험 구성

### 2.1 심축내진말뚝 모형

삼축 마이크로파일 모형은 동일한 길이의 강관 마이크로파일을 디스크 형태의 파일 두부에서 결합시켜 제작하였다. 실제 삼축 마이크로파일은 철로 이루어져 있으나 높은 g-level에서 동일한 재료로 축소 모형을 제작할 경우 파일의 직경이 매우 작아져 센서 부착에 어려움이 따를 수 있다. 따라서 마이크로파일을 철보다 강성이 낮은 알루미늄으로 제작하고 아래 식 (1)을 통해 원형과 모형 삼축 마이크로파일의 휨강성을 동일하게 하여 삼축 마이크로파일 모형의 직경을 결정하였다.

$$E_p I_p = E_m I_m \times N^4 \quad (1)$$

이 때 N은 원심모형실험에서의 g-level로 본 연구에서는 20 g-level에서 실험을 수행하였다.  $E_p$  및  $E_m$ 는 각각 철과 알루미늄의 영률이며,  $I_p$  및  $I_m$ 는 각각 원형 및 모형의 단면 2차 모멘트이다. G-level과 휨강성을 고려한 삼축 마이크로파일의 원형 및 모형 제원은 Table 1에 기재된 바와 같다. 설치 각도에 따른 그룹 마이크로파일의 동적 거동을 평가하기 위해 마이크로파일의 설치 각도는 0°와 15° 두 가지로 설정하였다. 삼축 마이크로파일을 구성하는 마이크로파일의 길이는 모두 모델 스케일로 300mm(원형 스케일로 6m)로 동일하기 때문에 설치 각도에 따라 높이 및 삼축 마이크로파일의 직경이 달라진다. 각각의 삼축 마이크로파일의 세 마이크로파일 중 가진 방향과 나란한 마이크로파일에 변형률을 측정하기 위한 6쌍의 스트레인 게이지를 부착하였으며 부착 간격을 Fig. 1에 도시하였다. 설치 각도가 15°인 삼

Table 1. Specifications of micropiles of tripod micropiles

	Model scale	Prototype scale
G-level (g)	1	20
Outer Diameter (mm)	12	240
Inner Diameter (mm)	10	200
Length (m)	0.3	6

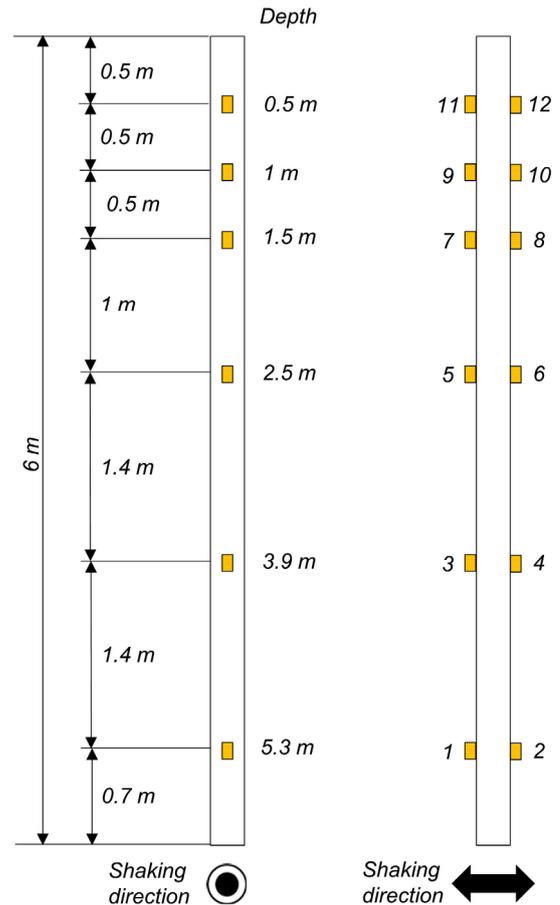
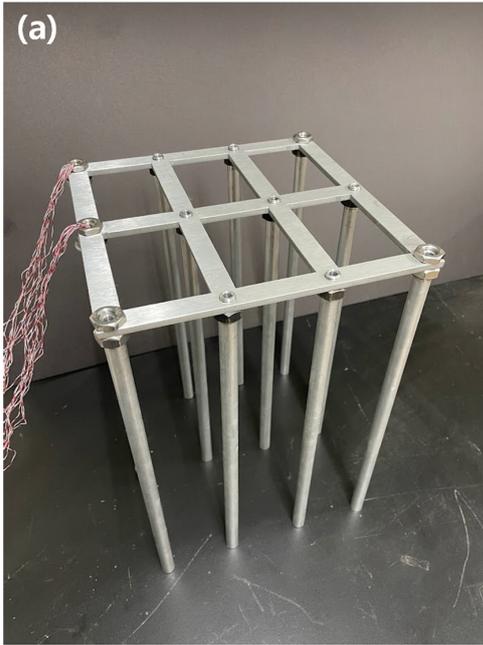


Fig. 1. Arrangement strain gauges (Dimensions in prototype scale)

축 마이크로파일 네 개를 Fig. 2의 좌측과 같이 말뚝 상부의 중심 간의 간격이 모델 스케일로 200mm(원형 스케일로 4m)가 되도록 배치하여 그룹 삼축 마이크로파일 모형을 제작하였다(Group 15). 설치 각도가 0°인 그룹 삼축 마이크로파일(Group 00)은 Group 15에서 사용된 마이크로파일 개수와 동일한 12개의 마이크로파일을 격자 프레임에 Fig. 2와 같이 배치하여 제작하였다.

### 2.2 지반 조성

지반조성에 사용된 시료는 silica sand이며 물성을 Table 2에 정리하였다. 조성에 사용한 토조는 동적 원심모형 실험에서 토조와 지반 사이 발생하는 경계효과를 최소화 하는 것으로 알려진 등가전단보 토조를 사용하였다(Lee et al., 2013). 토조의 크기는 840mm(L) × 630mm(W) × 620mm(D)이다. 삼축 마이크로파일의 설치 깊이에 도달한 뒤 말뚝의 설치 위치를 고정하기 위해 가는 알루미늄 지지대에 말뚝들을 연결하고 있는 알루미늄 프레임을 매달아 고정하여 상대밀도가 65%가 되도록 낙사를



(a) Group 00 (0°)



(b) Group 15 (15°)

Fig. 2. Group inclined tripod micropiles and vertical micropiles connected to a frame

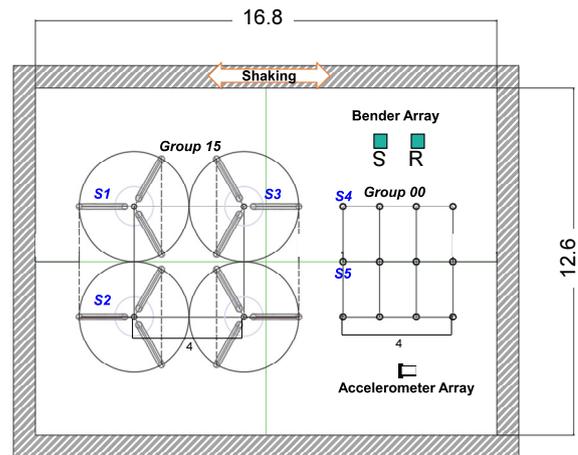
Table 2. Soil properties

Properties	Soil
USCS classification	SP (Poorly graded silica sand)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.490
d <sub>50</sub> (mm)	0.235
Relative density (%)	65
e <sub>max</sub>	1.06
e <sub>min</sub>	0.64

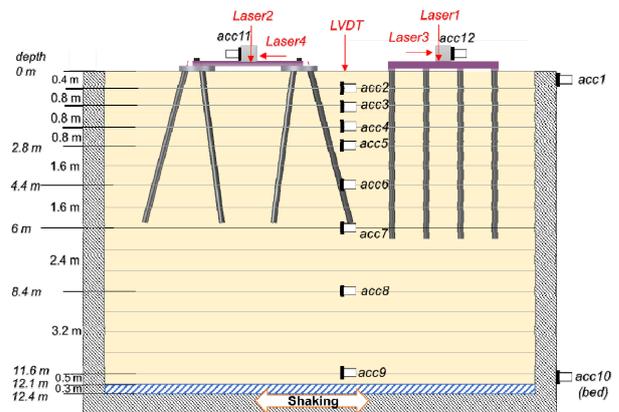
수행하였다. 이때 스트레인 게이지를 부착한 마이크로파일이 지진파의 가진 방향과 일직선을 이루도록 파일의 위치를 설정하였다.

### 2.3 실험 단면

삼축 마이크로파일 및 지반의 응답을 측정하기 위해 스트레인 게이지, 가속도계, 레이저 센서, 벤티어 엘리먼트 등을 사용하였으며, Fig. 3a에 스트레인 게이지가 부착된 마이크로파일을 S1부터 S5로 표시하였다. Group 15에서는 가진 방향과 나란하게 S1, S2, S3에 스트레인 게이지를 부착하였다. Group 00에는 지진 응답이 가장 클 것으로 예상되는 S4와 S5 위치에 스트레인 게이지를 부착하였다. 지반에 깊이별로 가속도계를 설치하였으며, 세 삼축 마이크로파일 상부에도 수평방향으로 가속도계를 부착하였다. 또한, 레이저 센서를 사용하여 삼축



(a) Top view



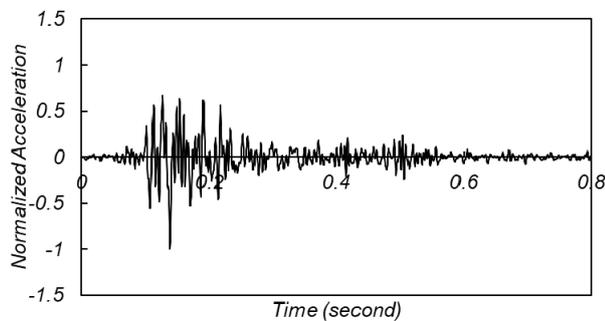
(b) Front view

Fig. 3. Schematic diagram of testing models (All dimensions in m in prototype scale)

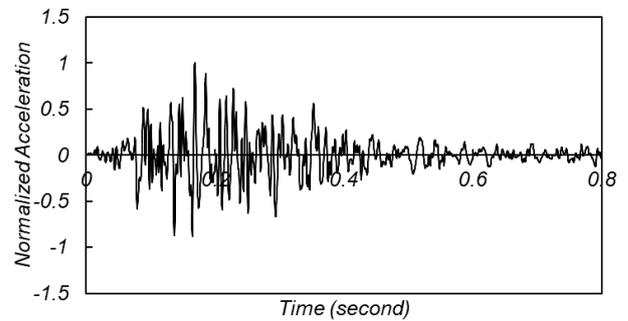
마이크로파일 상부에서의 수평 및 수직변위를 측정하였고 LVDT로 지반 침하량을 측정하였다. 깊이별 가속도와 레이저 센서 배치를 Fig. 3b에 도시하였다.

## 2.4 입력 지진파

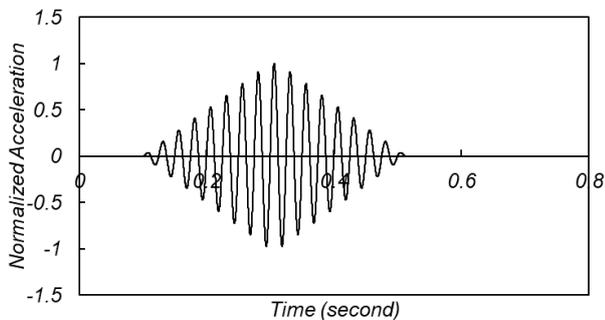
본 연구에서는 KAIST에 있는 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형실험기 및 전기제어-유압방식(electro hydraulic servo type)의 2차원 진동대를 이용하여 지진 하중을 모사하였다. 실험에 사용된 진동대는 최대 적재하중 700kg에 대하여 최대지반가속도 0.5g 수준의 지진 하중을 가할 수 있다(Kim et al., 2013b). 실험에 사용된 지진파는 Capetown, San Fernando, ramped Sine 2Hz로 각 지진파의 정규화된 가속도-시간이력 및 중간 세기로 가진 시 acc 10(bed)에서의 응답스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. Capetown과 San Fernando는 실지진파로 탁월주기가 각각 0.38초 및 0.39초이고 ramped Sine 2Hz는 탁월주기가 0.5초로 두 실지진파보다 장주기 성분이 우세하다. Capetown, San Fernando 및 ramped Sine 2Hz 지진파는 각각 0.258g, 0.246g, 0.222g 수준까지 stage test를 통해 최대입력지진가속도를 증가시켜가며 가진되었다.



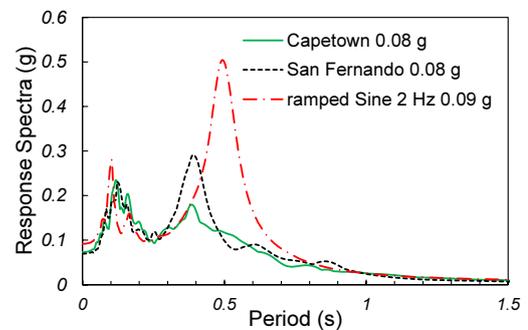
(a) Normalized acceleration-time history of Capetown earthquake



(b) Normalized acceleration-time history of San Fernando earthquake



(c) Normalized acceleration-time history of ramped Sine 2 Hz



(d) Spectral acceleration of Capetown, San Fernando and ramped Sine 2 Hz earthquakes

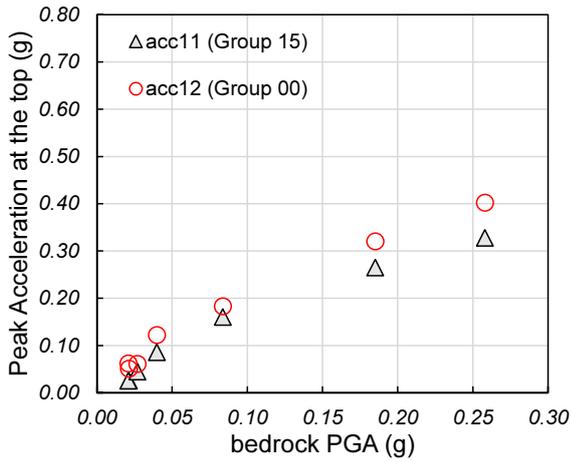
Fig. 4. Input earthquakes

## 3. 실험 결과

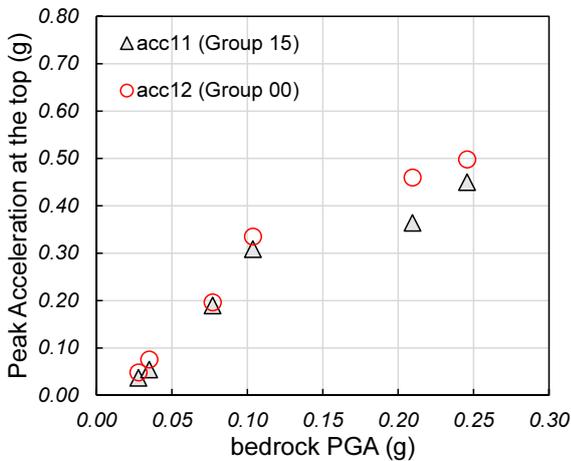
원심모형실험 결과를 바탕으로 Group 15와 Group 00의 동적 응답을 분석하였다. 각 군말뚝 상부에서의 가속도 응답, 잔류 수평 및 수직변위 응답을 비교하였으며, 마이크로파일에 가해지는 모멘트 및 축력을 깊이별로 비교 분석하였다.

### 3.1 가속도 응답

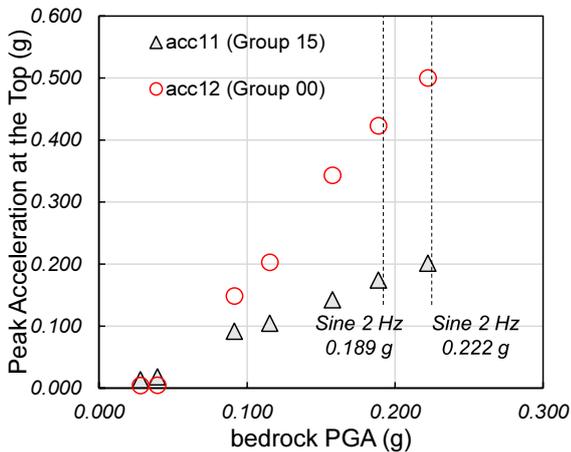
최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 전반적으로 입력지진가속도의 세기가 증가함에 따라 말뚝 상부에서의 최대 가속도도 증가하는 경향을 보였으며, Capetown과 San Fernando 입력지진파에 대해서는 전반적으로 Group 00이 Group 15보다 큰 응답을 보였다. Capetown 지진파 강진(0.185g, 0.258g) 가진 시 Group 15의 상부에서의 가속도 응답은 Group 00보다 약 18% 감소했다. San Fernando 강진(0.209g, 0.246g)에서는 각각 Group 15의 응답이 Group 00보다 21% 및 10% 감소했다. 반면 Sine 2Hz 강진(Sine 2Hz 0.158g, Sine 2Hz 0.189g, Sine 2Hz 0.222g)



(a) Capetown



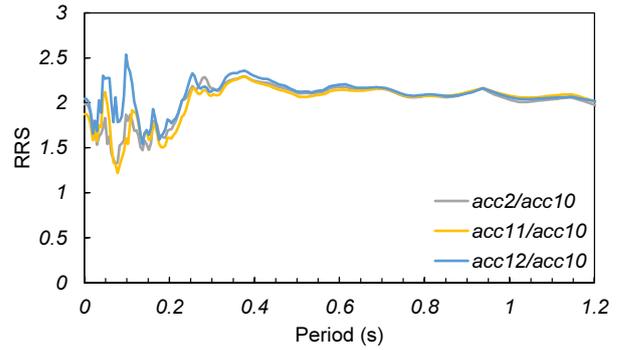
(b) San Fernando



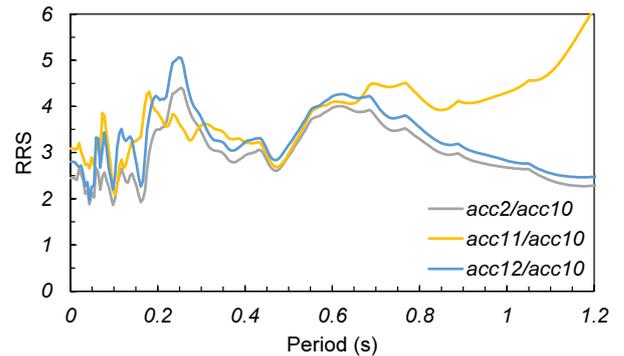
(c) Ramped Sine 2 Hz

Fig. 5. Peak acceleration at the top of the group piles as bedrock PGA increases

이 가해졌을 때는 Group 00 및 Group 15의 증폭이 실지 진파에서의 증폭보다 크게 발생하였으며 Group 15의 응답이 Group 00의 응답보다 각각 6%, 33%, 10% 크게 나타났다. Sine 2Hz 강진에서 Group 15의 가속도가 더



(b) Input motion: raped Sine 2 Hz 0.115 g



(b) Input motion: raped Sine 2 Hz 0.222 g

Fig. 6. Ratio of response spectra of soil surface (acc2), Group 15 (acc11), Group 00 (acc12)

많이 증폭되는 현상은 크게 두 가지 이유로 설명될 수 있다. 첫 번째로 Group 15에서 장주기 성분의 가속도 증폭이 더 많이 일어났기 때문일 수 있다. Fig. 6a와 Fig. 6b는 각각 Sine 2Hz 0.115g와 Sine 2Hz 0.222g 가진 시 지표(acc2), Group 15(acc11), Group 00(acc12)의 응답 스펙트럼비 결과이다. 상대적으로 약한 지진인 0.115g에서는 단주기 영역에서 Group 00(acc12)의 증폭이 더 많이 발생하였으나 강진인 0.222g에서는 Group 15(acc11)의 0.7초 이상에서의 증폭이 눈에 띄게 큰 폭으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 두 번째 이유로는 Sine 2Hz 강진과 같이 지반의 변형률이 큰 조건에서 Group 15에서만 군말뚝 효과가 발생하여 Group 00보다 큰 동적 거동을 보였을 가능성이 있다. 그러나 본 실험에서 취득한 데이터로는 정확하게 원인을 규명하는 데 한계가 있으며 대변형을 야기하는 조건에서의 삼축 마이크로 파일의 거동에 대한 추가적인 실험 및 분석이 필요하다.

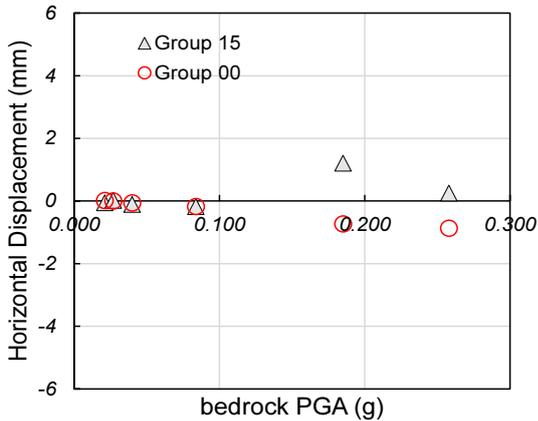
### 3.2 수평 및 수직 잔류변위

Fig. 7은 입력지진파의 최대입력지진가속도에 따른 두 군말뚝의 수평 잔류변위 결과이다. Capetown 및 San

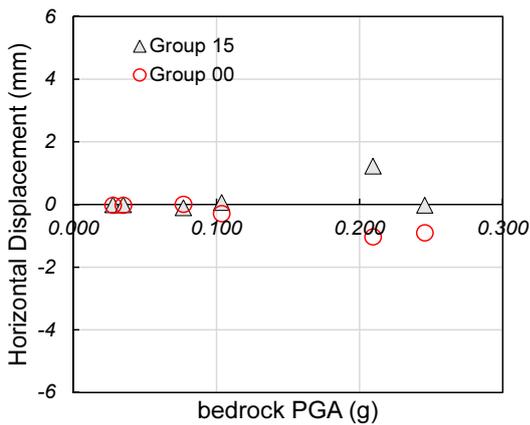
Fernando 가진 시에는 2mm 내의 작은 잔류변위가 발생하였으며 Group 00과 Group 15의 수평 잔류변위 차이 또한 매우 작았다. Sine 2Hz 지진파 가진 시에도 최대입력지진가속도가 0.158g 이하에서는 2mm 이내의 수평 잔류변위가 발생하였으나 0.189g에서는 Group 15와 Group 00의 수평 잔류변위가 반대방향으로 각각 4mm와 5.2mm

가량 발생하였다. 지반 조성 시 두 모델 근방의 흙이 균일한 밀도로 조성되지 않았을 가능성이 있는데 이는 수평 잔류변위가 반대로 발생한 원인 중 하나로 작용했을 가능성이 있다.

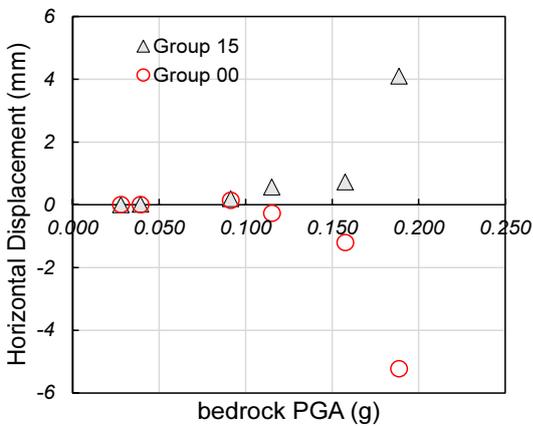
Fig. 8은 세 종류의 지진파에 대하여 최대입력지진가속도에 따른 수직 잔류 침하량 결과를 나타낸다. 전반적



(a) Capetown

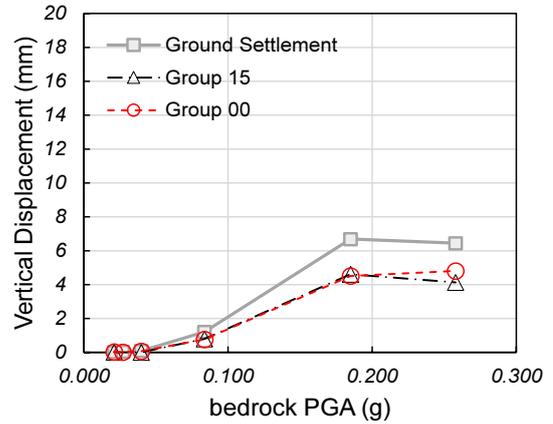


(b) San Fernando

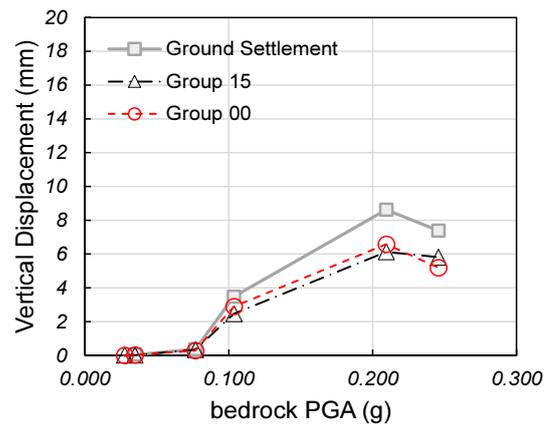


(c) Ramped Sine 2 Hz

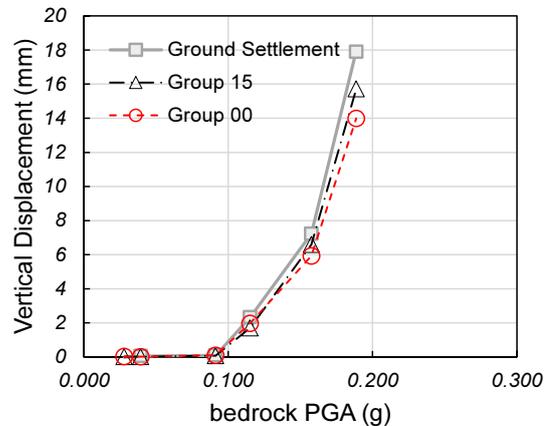
Fig. 7. Residual horizontal displacement of the group piles as bedrock PGA increases



(a) Capetown



(b) San Fernando



(c) Ramped Sine 2 Hz

Fig. 8. Residual settlement of the group piles as bedrock PGA increases

으로 지반의 침하가 말뚝의 침하보다 크게 발생하였고, Group 15와 Group 00의 침하량 차이는 거의 없었다. Capetown과 San Fernando 지진파를 가했을 때는 최대 입력지진가속도가 0.2g 이상에서도 10mm 이하의 침하량이 발생했으나 Sine 2Hz 지진파를 가했을 때는 최대 입력지진가속도가 0.2g 이하에서도 약 15mm 가량의 비교적 큰 침하량이 발생했다. 지반의 침하량은 깊이가 지표에 가까울수록 더 커질 수밖에 없다. 본 실험에서는 군말뚝 위 상재 하중이 없기 때문에 군말뚝의 침하량은 군말뚝 선단부 지반의 침하량을 따른다. 따라서 지표보다 군말뚝의 침하량이 작게 측정된 것으로 판단된다. 또한, Group 15의 침하량이 Group 00의 침하량보다 10% 이상 크게 발생하였다. Fig. 5에서의 가속도 결과와 종합해보면 Sine 2Hz 강진 조건에서 Group 15의 응답이 Group 00의 응답보다 더 큰 것을 알 수 있다.

### 3.3 휨모멘트 및 축력

마이크로파일의 부착된 변형률 데이터로 식 (2)와 식 (3)을 통하여 휨모멘트와 축력을 계산하였다.

$$Moment = EI \times \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2r} \quad (2)$$

$$Axial Load = EI \times \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \quad (3)$$

이때,  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 마이크로파일에서 같은 깊이의 마주 보고 있는 두 개의 스트레인 게이지에서 측정된 변형률 값이며,  $r$ 은 마이크로파일의 반지름이다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 입력지진파가 Capetown 0.084g, ramped Sine 2Hz 0.222g일 때 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 휨모멘트 및 축력 프로파일이다. 두 경우 모두 휨모멘트가 경우 말뚝 상부로 갈수록 크기가 증가하는 경향을 보였다. 이는 상부로 갈수록 지반의 수평방향 거동이 증폭되어 마이크로파일에 영향을 주기 때문이다. 마이크로파일의 근입 깊이가 2m 보다 깊을 때는 Group 15에 부착된 S1, S2, S3의 휨모멘트가 Group 00에 부착된 S4, S5보다 작게 발현되었으나 2m 깊이부터 지표까지는 Group 15의 휨모멘트가 빠르게 증가하며 Group 00보다 크게 발현되었다. 축력은 두 경우 모두 파일 전반에 걸쳐 고르게 발생하였으며 Group 15의 축력이 Group 00의 축력보다 크게 발생했다. 이는 수평 방향 지진 하중이 Group 15에서 설치 각도로 인해 마이크로파일을 따라 압축 혹은 인장력으로 힘의 분해가 일어나기 때문일 것으로 예상된다.

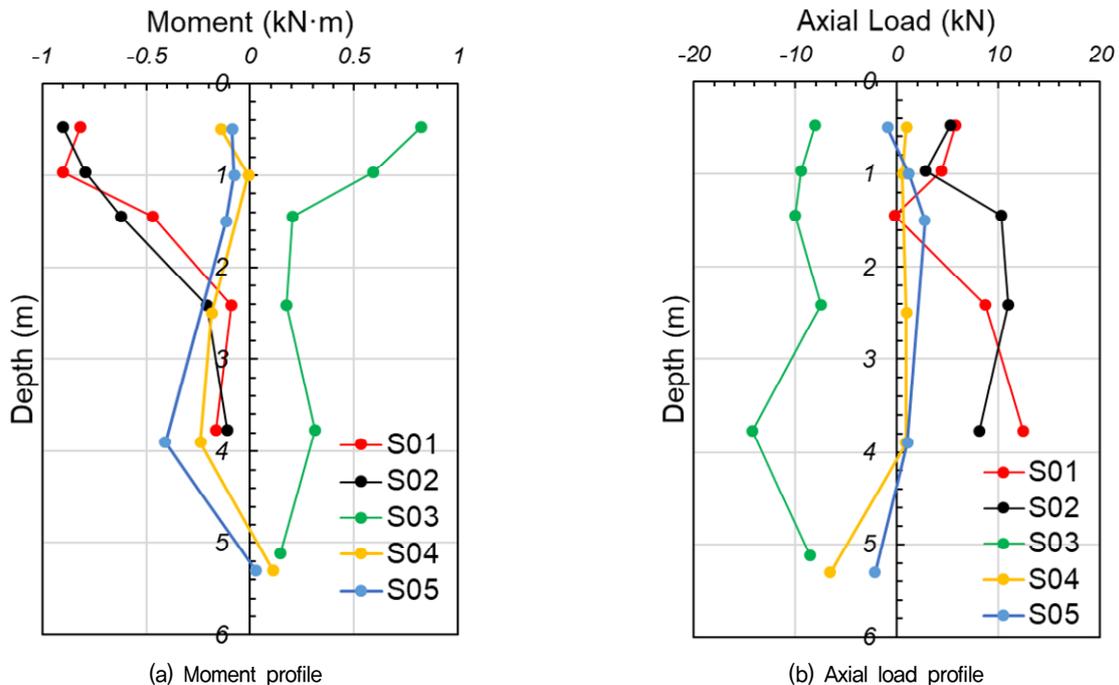


Fig. 9. Moment and axial load profile when PGA at ground surface (acc1) is maximum (input motion: Capetown 0.084 g)

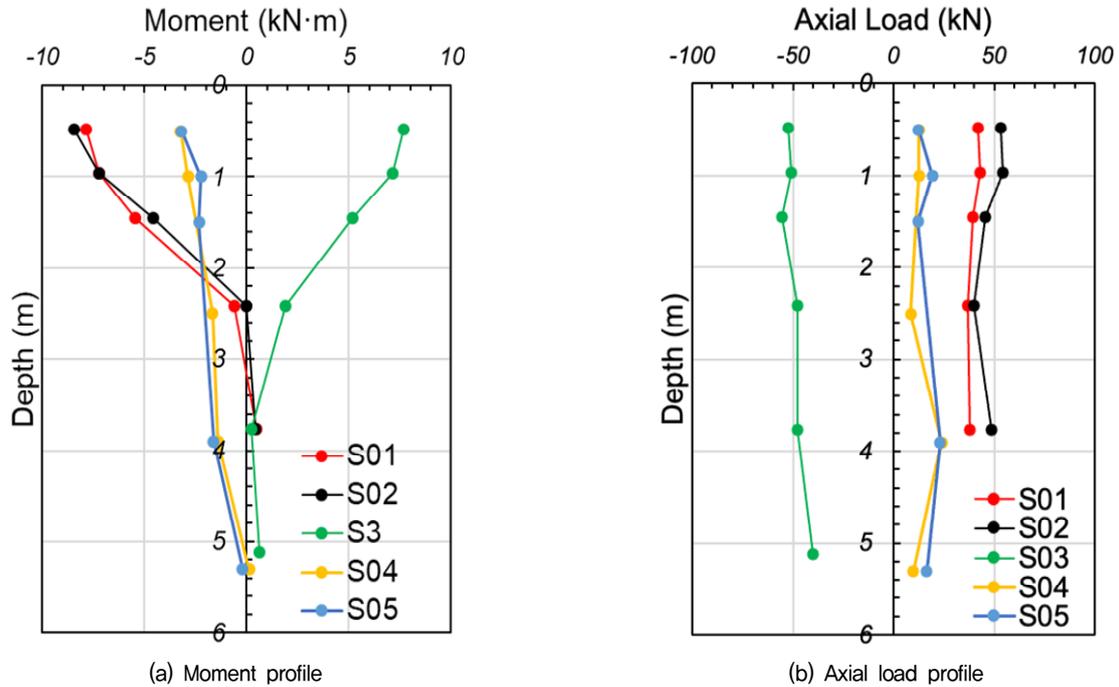


Fig. 10. Moment and axial load profile when PGA at ground surface (acc1) is maximum (input motion: ramped Sine 2 Hz 0.222 g)

#### 4. 결론

본 연구에서는 설치 각도가 15°인 그룹 삼축 마이크로파일(Group 15)과 설치각도가 0°인 일반 연직 군말뚝(Group 00)의 지진 시 동적 거동의 차이를 비교 분석하고 삼축 마이크로파일의 내진성능을 평가하고자 하였다. 그룹 마이크로파일을 축소모형으로 제작하여 원심 모형실험을 수행하였고 두 군말뚝의 수평변위, 수직변위, 가속도 응답, 깊이에 따른 휨모멘트, 축력 등의 동적 거동을 비교하였다. 실험 결과를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) Capetown, San Fernando, ramped Sine 2Hz 약진 가진 시 가속도 응답은 Group 15보다 Group 00에서 더 크게 발생했다. 침하량과 수평변위 결과에서는 Group 15와 Group 00의 차이가 거의 없었다.
- (2) Ramped Sine 2Hz 강진 가진 시 Group 15에서 장주기 성분의 증폭이 크게 증가하여 가속도 및 침하량이 Group 00보다 크게 발생하였다.
- (3) 2m 이상의 깊은 근입깊이에서는 Group 00의 휨모멘트가 Group 15에 크게 발현되었고 얇은 근입깊이부터 지표까지는 Group 15의 휨모멘트가 Group 00보다 크게 발현되었다. 축력은 두 군말뚝 모두 파일 전반에 걸쳐 고르게 발생하였으며 Group 15의 축력

이 Group 00의 축력보다 크게 발생했다.

- (4) 가속도와 수평 및 수직 변위 결과를 바탕으로 살펴 보았을 때 탁월 주기가 0.5 초 미만인 실지진파 가진 조건에서 Group 15의 내진성능은 Group 00보다 좋거나 비슷한 수준으로 평가된다. 협소한 공간에서 기존 시설물의 내진보강이 필요한 경우 경사진 삼축 마이크로파일의 사용이 수직 마이크로파일의 대안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 한계점 및 추후 개선 사항은 다음과 같다.

- (1) 지진파 가진 시 stage test를 수행하였기 때문에 각 실험에서 앞서 일어난 가진으로 인해 지반 변형이 발생하여 동일한 초기조건에서 실험이 수행되었다고 단정할 수 없다.
- (2) 본 연구에서는 상재하중이 없는 상태에서 두 군말뚝의 동적 거동을 평가하였으나 실질적인군말뚝의 내진성능을 평가하려면 상부 구조물과의 상호작용에 관한 연구가 추가로 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과

제번호 20230132-001, 건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구).

### 참고문헌 (References)

1. Escoffier, S., Chazelas, J. L., and Garnier, J. (2008), Centrifuge Modelling of Raked Piles, *Bulletin of earthquake engineering*, 6, pp.689-704.
2. Hwang, T. H., Kim, M. Y., and Lee, Y. S. (2020), Variation of Lateral Bearing Capacity of 2-row Micropile with Installation Conditions by Model Test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.11, pp.25-49.
3. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W., and Cho, G. C. (2013), A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
4. Kim, S. B., Son, S. W., and Kim, J. M. (2020), Horizontal behavior Characteristics of Umbrella-type Micropile Applied in Sandy Soil Subjected to Seismic Motion, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.21, No.7, pp.5-16.
5. Kim, T., Ahn, K., and An, S. (2021), Behavioral Analysis of Triaxial Micropile (TMP) through Field Loading Test and 3D-numerical Analysis, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.22, No.4, pp.15-23.
6. Kim, T., Ahn, K., and An, S. (2021), Lateral Bearing Capacity of Triaxial Micropile by Installaton Condition, *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.22, No.5, pp.5-12.
7. Lee, S. H., Choo, Y. W., and Kim, D. S. (2013), Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, pp.102-114.
8. Oh, J. B., Hwang, T. H., Huh, I. G., Shin, J. H., and Kwon, O. Y. (2015), Horizontal Bearing Characteristics of Micropiles with the Length Ratio and Installation Angle of Pile, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.6, pp.5-13.
9. Yoo, M. T., Choi, J. I., Han, J. T., and Kim, M. M. (2013), Dynamic py Curves for Dry Sand from Centrifuge Tests, *Journal of earthquake engineering*, Vol.17, No.7, pp.1082-1102.
10. Yoo, M., Lee, M., Baek, M., Choo, Y. W., and Lee, I. W. (2019), Dynamic Behavior Evaluation of Pile-Supported Slab Track System by Centrifuge Model Test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.2, pp.5-17.
11. Zhang, F., Okawa, K., and Kimura, M. (2008), Centrifuge Model Test on Dynamic behavior of Group-pile Foundation with Inclined Piles and its Numerical Simulation, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2, pp.233-241.

Received : November 29<sup>th</sup>, 2023

Revised : December 16<sup>th</sup>, 2023

Accepted : December 18<sup>th</sup>, 2023