

수치해석을 통한 설치 경사각도에 따른 삼축내진말뚝의 동적 거동특성

Dynamic Behavior of Triaxial Micropile Under Varying Installation Angle: A Numerical Analysis

전 준 서 ¹	Jeon, Jun-Seo	메론 알레바추 메코넨 ²	Meron Alebachew Mekonnen
김 윤 아 ³	Kim, Yoon-Ah	김 종 관 ⁴	Kim, Jong-Kwan
유 병 수 ⁵	Yoo, Byeong-Soo	권 태 혁 ⁶	Kwon, Tae-Hyuk
안 성 율 ⁷	An, Sung-Yul	한 진 태 ⁸	Han, Jin-Tae

Abstract

This study employs three-dimensional simulation through FLAC3D to investigate the impact of installation angles on the dynamic characteristics of Triaxial Micropiles. The numerical model is validated against centrifuge test results to ensure accuracy. The findings reveal significant influences of the installation angle on the dynamic behavior of Triaxial Micropiles. Specifically, under seismic conditions such as the Capetown and San Fernando earthquakes, the lowest recorded values for peak bending moment and settlement occurred at an installation angle of 15 degrees. In contrast, when subjected to an artificial earthquake with a frequency of 2 Hz (Sine 2 Hz), Micropiles installed at 0 degrees exhibited the lowest peak bending moment, maximum axial load, and settlement values.

요 지

설치 경사각도에 따른 삼축내진말뚝의 동적 거동 특성을 파악하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였다. FLAC3D를 통해 3차원 수치모델을 구축하였으며, 동적 원심모형실험과의 비교를 통해 검증하였다. 수치해석 결과, 경사각도에 따라 말뚝의 동적 거동이 확연히 달라짐을 확인하였다. 실지진과 조건(Capetown EQ, San Fernando EQ)에서는 경사각도가 15도 일 때, 다른 경사각도(0도, 30도)에 비해 말뚝의 휨모멘트 및 침하량이 적음을 알 수 있었다. 반면 인공지진과 조건(Sine 2Hz EQ)에 대해서는 경사각도가 0도 일 때 가장 적은 부재력(휨모멘트, 축력) 및 침하량을 보여 지진과의 특성에 따라 동적 거동이 달라짐을 확인하였다.

Keywords : Centrifuge test, Dynamic behavior, Installation angle, Numerical analysis, Triaxial micropile

- 1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)
- 2 비희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 UST학생연구원 (UST Student, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)
- 3 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., KAIST)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)
- 5 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Eng., KICT)
- 6 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., KAIST)
- 7 정희원, ㈜에스아이텍 소장 (Member, Director of Research, SYTEC Co. Ltd)
- 8 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Eng., KICT, Tel: +82-31-910-0259, Fax: +82-31-910-0561, jimmyhan@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 5월 31일까지 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.

1. 서론

마이크로파일은 협소한 공간에서도 적용이 가능하고 소음이 적은 시공상의 장점으로 신설 구조물 기초 및 기존 구조물 보강용으로 주로 이용되고 있다. 기존 마이크로파일은 PHC파일, 강관파일에 비해 작은 직경으로 인해 수평지지력이 연직지지력에 비해 현저히 낮은 특성상 주로 연직지지력에 관한 연구 및 시공이 집중되어 왔으며, 수평지지력이 중요한 내진 보강을 위한 용도로는 한계가 있었다. 그러나 최근 들어 고강도 강종의 개발, 경사진 형태에 대한 시공 용이성, 내진성능 보강의 수요 증가 등으로 마이크로파일의 수평지지력에 대한 연구 및 관련 기술 개발 등이 활발히 이루어지고 있다 (Oh et al., 2015; Kyung and Lee, 2017; Hwang et al., 2020; Elsaywaf et al., 2022; Wang and Rolando, 2023). 특히 기존 마이크로파일에 경사각도를 준 경사말뚝을 대상으로 모형시험, 수치해석을 통해 다양한 형태/배열에 관한 연구가 수행되었다. Kim et al.(2017)은 반복수평재하 모형실험을 통해 일방향 및 양방향 반복수평하중 작용시 내/외향 단말뚝(positive/negative batter pile)의 거동특성을 분석하였다. 반복수평하중에 대한 수평저항력과 최대 휨모멘트가 외향말뚝, 수직말뚝, 내향말뚝순으로 증가함을 보였다. Kim et al.(2001)은 진동대 모형시험을 통해 3×3 배열 무리말뚝의 동적 거동분석을 수행하였으며, 무리말뚝은 1열 경사말뚝, 나머지 2, 3열은 수직말뚝으로 고려하였다. 경사각도가 약 14도일 경우 정적 수평하중 재하시 경사말뚝의 강성이 큼을 확인하였으나 동적 거동에서는 경사각도에 따라 경사말뚝이 수직말뚝보다 모멘트와 축력이 크거나 작아짐을 확인하였다. Kwon and Park(2018)은 2×2 배열 무리말뚝에 대한 수평재하 대형 모형실험을 통해 수평지지력 특성을 파악하였다. 1열만 경사지게 관입된 무리말뚝, 연

직 무리말뚝, 양방향으로 경사진 무리말뚝인 경우를 고려하였으며, Kim et al.(2001)의 결과와 달리 수평지지력은 한 방향으로만 경사진 무리말뚝, 연직 무리말뚝, 양방향으로 경사진 무리말뚝 순으로 유리함을 확인하였다. Kim et al.(2020)은 동적 수치해석을 통해 우산형 마이크로파일의 수평변위 거동을 분석하였다. 우산형 마이크로파일의 경우, 모멘트에 저항하는 수직말뚝과 축력에 저항하는 경사말뚝의 영향으로 일반 마이크로파일보다 수평변위 억제에 효과가 있음을 보였다. 이와 같이 단/무리말뚝 여부, 경사말뚝의 경사각도 및 배열, 형태에 따라 거동 특성이 달라진다.

삼축내진말뚝(triaxial micropile)은 Fig. 1과 같이 마이크로파일 강관이 3축 방향으로 설치되고 파일두부 캡으로 결합된 형태를 가진다. Kim et al.(2021)은 현장 수평재하시험 및 3차원 수치해석을 통해 정적 수평지지력을 분석하였으나, 내진성능 분석을 위한 동적 거동 특성 평가는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 동적 수치해석을 통해 경사각도에 따른 삼축내진말뚝의 동적 거동 특성을 평가하였다. 수치해석 모델은 삼축내진말뚝의 동적 원심모형실험 결과와 비교하여 검증하였으며, 말뚝의 경사각도가 지진 하중을 받을 때 부재력(모멘트, 축력) 및 침하량에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 원심모형실험 조건

원심모형실험은 한국과학기술원(KAIST) 분산공유형 시험시설을 이용하였으며, Fig. 2와 같이 총 3개의 입력 지진파(Capetown, San Fernando, Sine 2Hz)에 대해 지진하중을 천천히 증가시키는 방법(staged shaking test)으로 수행하였다. 내측규격 0.82m×0.63m×0.62m(폭×길

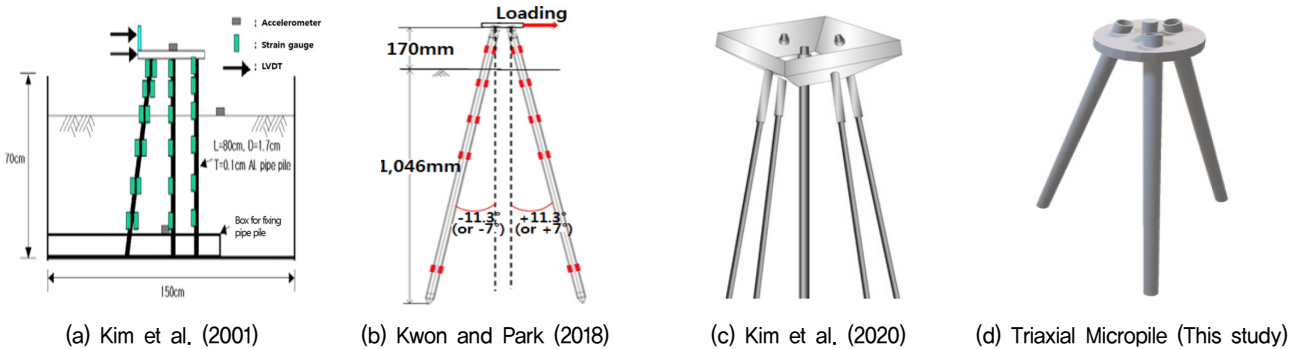


Fig. 1. Various types of batter pile

이×높이)의 등가전단보(equivalent shear beam, ESB) 토조를 이용하였으며, 원심가속도는 20g를 적용하였다. 지반은 사질토 지반으로 모사하기 위해 건조한 규사(silica sand)를 사용하였으며, 70%의 상대밀도로 조성하였다. 삼축내진말뚝은 경사각도(0, 15, 30도)에 따라 3개를 1열로 배치하였으며, 말뚝의 부재력(휨모멘트, 축력) 및 변

위, 지반가속도를 측정하기 위해 변형률계, 변위계, 가속도계를 Fig. 3과 같이 설치하였다. 상부 구조물은 모형 기준 무게 1kg의 철 재질로 49.4mm×49.4mm×48.0mm (폭×길이×높이) 규격으로 제작하였다. 원심모형실험의 자세한 내용은 추후 타 논문에 수록될 예정이다.

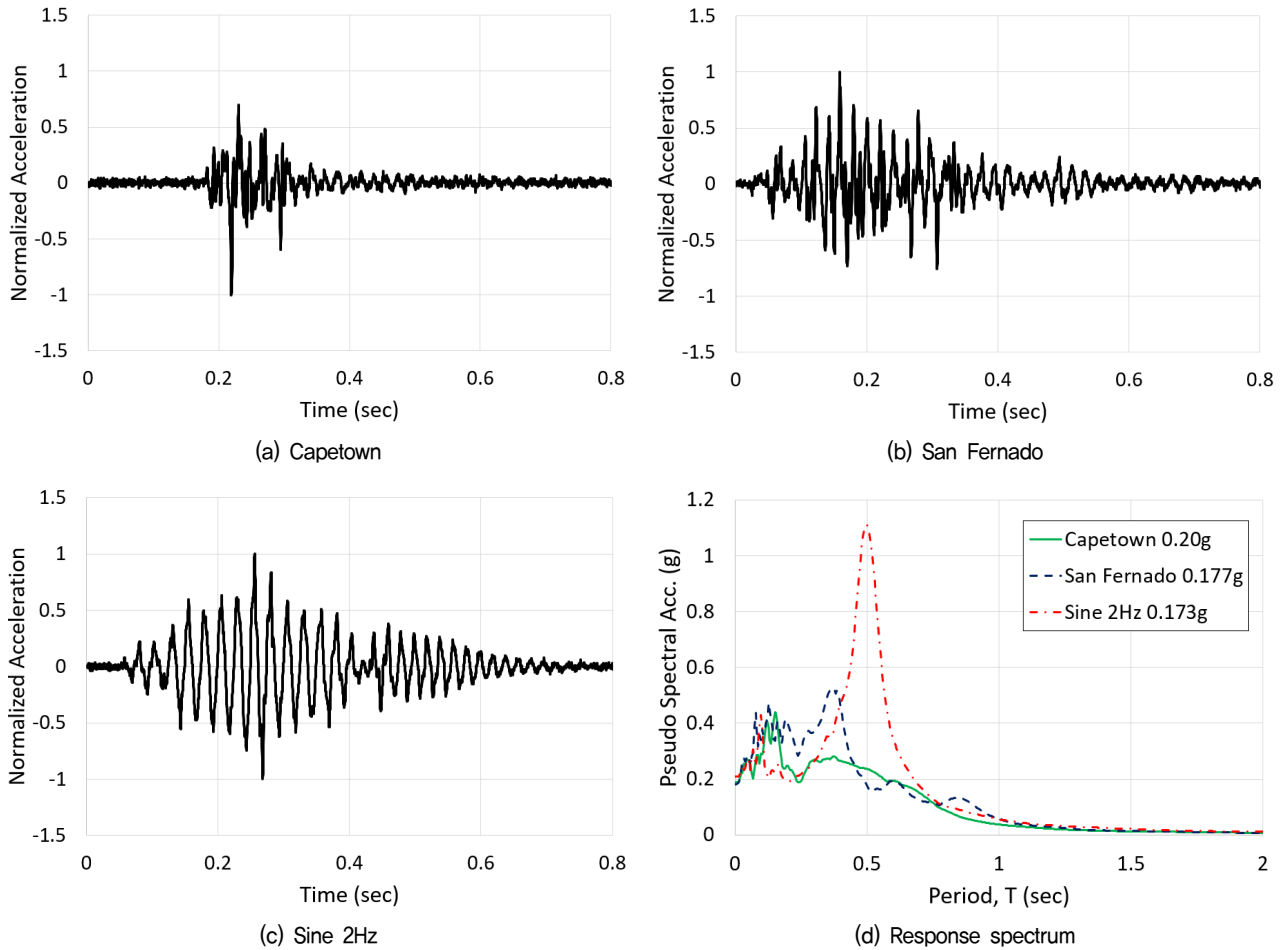


Fig. 2. Input seismic motions and response spectra

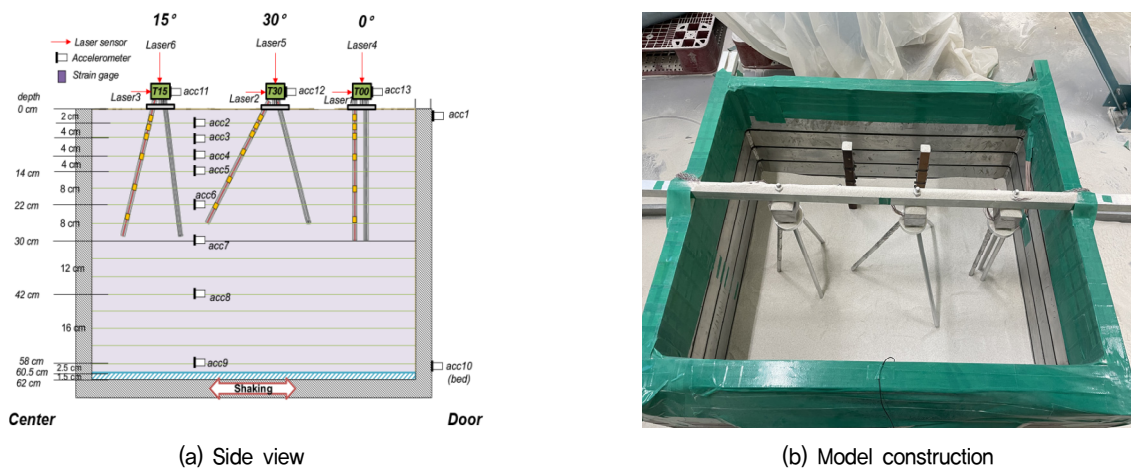


Fig. 3. Layout of dynamic centrifuge test

2.2 수치해석 모델링

수치해석 모델은 3차원 유한차분법을 이용하는 FLAC3D 프로그램을 이용하였다. Fig. 4와 같이 원심모형실험조건에 원심가속도를 고려하여 원형 크기로 모델링 하였다. 지반의 크기는 가로 16.4m, 세로 12.6m, 깊이 12.1m 이고, 하단은 ESB박스를 모사(두께 1.0m)하였다.

삼축내진말뚝은 pile structure element를 이용하여 모사하였으며, 삼축내진말뚝을 결합하는 파일캡(pile cap)은 shell structure element, 상부중량은 지반과 동일하게 zone element, 상부중량과 파일캡의 연결부는 beam structure element를 이용하여 구성하였다. 경계면에서의 입력 지진파 소산을 고려하기 위해 자유장 경계조건(free-field condition)를 이용하였으며, 입력 지진파는 ESB 토조 하

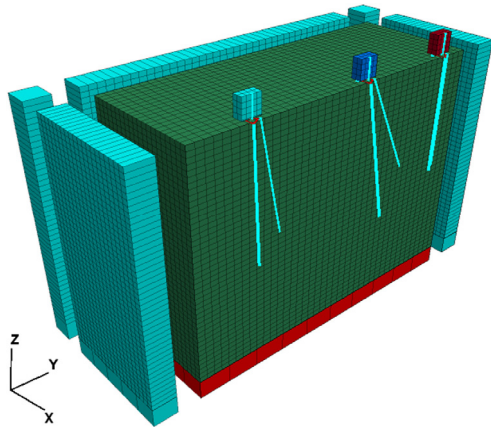


Fig. 4. 3D finite difference model of centrifuge test for triaxial micropile

단(깊이 13.1m)을 반무한 탄성암반(compliant base)로 정의하여 y축 방향으로 입력하였다. 지반, 삼축내진말뚝 및 상부구조물에 대한 물성은 Table 1, 2와 같다.

지반의 경우, 구속압에 따라 전단파속도, 전단계수, 탄성계수, 포아송비가 달라지므로 FISH 함수 코딩을 통해 깊이별로 입력하였다. 지반의 전단파속도는 식 (1)과 같이 구속압의 함수 형태로 표현 가능하다.

$$V_s = C_s \left(\frac{\sigma'_m}{Pa} \right)^n \quad (1)$$

여기서, C_s =재료상수, n =응력 지수

Chanh et al.(2018)는 재료상수, 응력 지수값을 Lee et al.(2015)에 의해 수행된 건조한 규사(silica sand)의 공진주 실험결과를 바탕으로 식 (2)를 이용하여 결정하였고, 모형지반의 상대밀도 70%를 감안하여 전단파속도 값을 식 (3)과 같이 결정하였다.

$$C_s = 0.961 \times D_r + 159.28 \quad (2)$$

$$V_s = 226.55 \left(\frac{\sigma'_m}{Pa} \right)^{0.22} \quad (3)$$

지반 구성 모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 이용하였으며, 이력 감쇠 모델을 적용하여 지반의 비선형 거동을 모사하였다. 이력 감쇠 모델은 식 (4)와 같이 FLAC3D에서 제공되는 hysteretic damping 모델 중

Table 1. Physical properties of soil and ESB

Physical properties			
Soil		ESB	
Constitutive model	Mohr-Coulomb	Constitutive model	Elastic
Density (kg/m ³)	1495	Density (kg/m ³)	2700
Friction angle (°)	38	Young's modulus (GPa)	73.0
Cohesion (kPa)	0	Poisson's ratio (-)	0.34
Poisson's ratio (-)	0.3	Bulk modulus (GPa)	76.0
Relative density (%)	70	Shear modulus (GPa)	27.2

Table 2. Physical properties of pile cap, connector and super structure

Physical properties			
Pile cap		Connector/Super structure	
Constitutive model	Elastic	Constitutive model	Elastic
Density (kg/m ³)	2710	Density (kg/m ³)	8605
Young's modulus (GPa)	7.e10	Young's modulus (GPa)	2.05e11
Poisson's ratio (-)	0.35	Poisson's ratio (-)	0.35

sigmodal-3 model를 이용하였으며, 입력변수는 Chanh et al.(2018)가 이용한 $a=0.9993$, $x_0=-0.8987$, $b=-0.3986$ 값을 사용하였다.

$$G/G_{\max} = \frac{a}{1 + \exp(-(\log_{10}\gamma - x_0)/b)} \quad (4)$$

여기서, a , x_0 , b 는 입력변수

해당 입력값은 Lee et al.(2015)이 수행한 공진주시험 결과값을 회귀하여 얻은 값이다. 고주파로 발생하는 노이즈를 제거하기 위해 지반 내 0.2% Rayleigh damping, 구조물에 대해 3%의 감쇠를 추가로 적용하였다. 지반을 제외한 나머지 영역은 상대적으로 큰 강성으로 변형이 크게 발생하지 않을 것으로 예상되어 모두 탄성 모델로 모델링하였다.

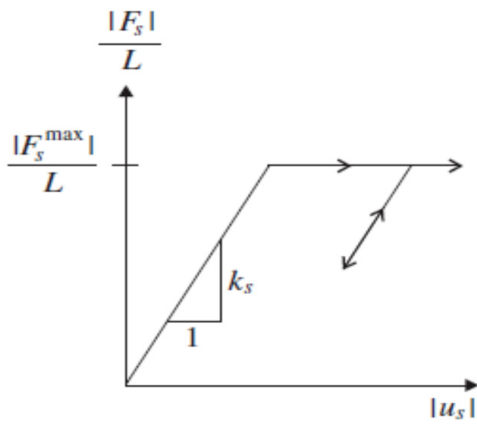
입력 지진파의 주파수와 지반의 전단파 속도에 따라 파동전달(wave transmission)의 수치해석 정확도가 달라

진다(Itasca Consulting Group, 2023). Kuhlmeyer and Lysmer(1973)는 식 (5)와 같이 입력 지진파의 가장 큰 주파수에 해당하는 파장(wavelength)보다 1/8~1/10배 작은 요소를 사용해야 정확한 파동전달이 가능함을 보였다. Capetown 지진파의 유의미한 주파수 대역은 최대 20Hz이며, 지반의 최소 전단파 속도는 약 110m/s이므로, 본 연구에서는 0.5m의 크기로 Grid를 구성하였다.

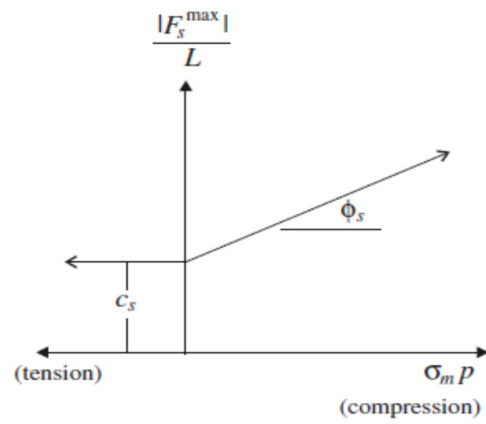
$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{8 \sim 10}, \lambda = \frac{V_s}{f} \quad (5)$$

여기서, λ : 지진파의 파장, f : 지진파의 주파수, V_s : 지반의 최소 전단파속도

본 모델링에서 지반-말뚝의 상호작용은 해석결과에 가장 중요한 요소로 Fig. 5, 6과 같이 Pile element에서는 전단방향(shear), 법선 방향(normal) 모두 스프링-미끄러짐 시스템으로 구성된다. 지반-말뚝 접촉면에서 발생하는

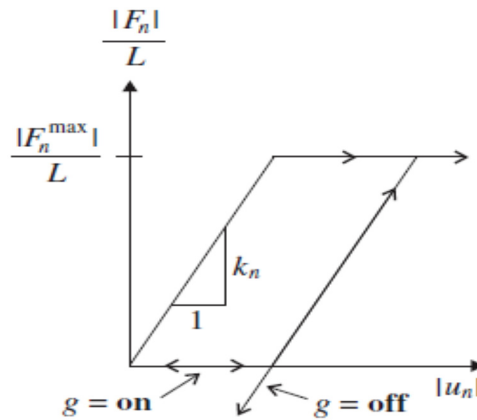


(a) Shear force/length vs relative shear displacement

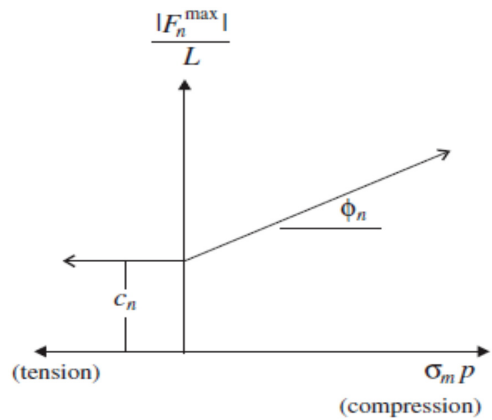


(b) Shear-strength criterion

Fig. 5. Behavior of pile element along with shear-direction (Itasca Consulting Group, 2023)



(a) Normal force/length vs relative normal displacement



(b) Normal-strength criterion

Fig. 6. Behavior of pile element along with normal-direction (Itasca Consulting Group, 2023)

Table 3. Physical properties of pile and soil-pile interface characteristics

Physical properties		Soil-Pile interface characteristics	
Density (kg/m ³)	2710	Shear coupling spring stiffness per unit length, k_s	1e10
Young's modulus (GPa)	70	Shear coupling spring cohesion per unit length, c_s	0
Poisson's ratio (-)	0.35	Shear coupling spring friction angle, ϕ_s (°)	33
Area (m ²)	1.382e-2	Normal coupling spring stiffness per unit length, k_n	1e10
Polar moment of inertia, I_p	1.686e-4	Normal coupling spring cohesion per unit length, c_n	1e10
Moment of inertia, I_x, I_y	8.432e-5	Normal coupling spring friction angle, ϕ_n (°)	33
Perimeter (m)	7.540e-1	Gap	Not considered

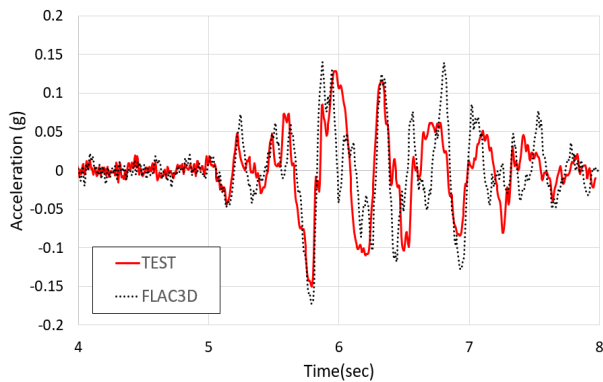
전단력이 전단강도보다 커질 경우, 미끄러짐이 발생한다. 전단방향(shear)으로 대변형을 고려할 수 있는 미끄러짐(slide), 법선 방향(normal)으로는 변형으로 발생하는 말뚝-지반 사이 틈(gap)도 고려가능하다. 본 연구에서 사용된 지반-말뚝 접촉면의 물성은 Table 3과 같다.

실제 지반-말뚝 접촉면의 물성은 별도의 실내실험으로 산정하여야 하나, 본 연구에서는 기존 문헌값을 바탕으로 산정하였다. 전단방향/접선방향 마찰각(friction angle)은 Beringen et al.(1979)이 제안한 지반의 최대 마찰각에서 5도를 뺀 값인 33도로 설정하였으며, 전단방향/접선방향 강도(stiffness)는 Itasca Consulting Group(2023)

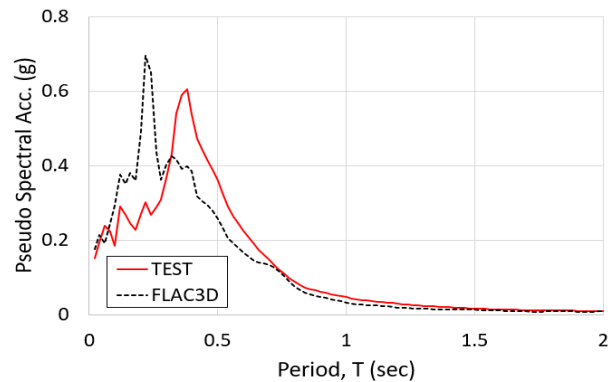
이 제안한 식을 이용하여 산정하였다. 접촉면(interface)에서 발생하는 전단방향, 접선방향 점착력은 건조한 규사(silica sand)를 이용하므로 0으로 설정하였다.

2.3 수치해석 모델의 검증

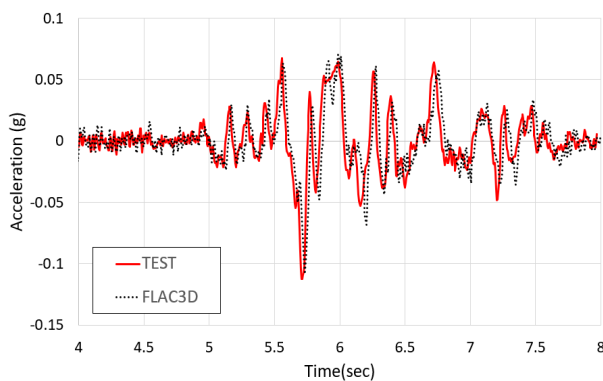
검증에 이용된 원심모형실험 결과는 0.157g의 Capetown 지진파를 입력했을 때의 결과를 이용하였다. 원심모형실험이 지진하중을 천천히 증가시키는 방법(staged shaking test)으로 이루어졌는데, 이는 시험진행에 따라 발생하는 지반물성 변화를 최대한 배제하기 위함이다.



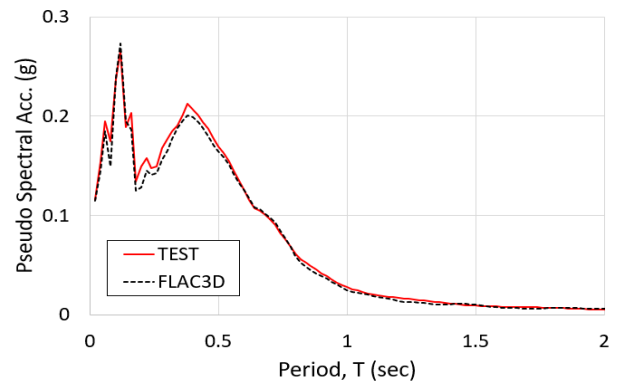
(a) Acceleration at acc 4



(b) Pseudo spectral acceleration at acc 4



(c) Acceleration at acc 9



(d) Pseudo spectral acceleration at acc 9

Fig. 7. Comparison between acceleration and response spectrum from test and simulation results

Fig. 7은 원심모형실험과 수치해석에서 얻어진 가속도 시간이력 및 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 비교한 결과를 보여준다. 지진파가 입력된 ESB박스에서 지표면으로 가까워질수록 원심모형실험과 수치해석으로 얻어진 가속도와 주파수대역에서 차이가 발생하였으나, 수치해석 모델은 지반에 의한 에너지 증폭/감쇠 효과가 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

Fig. 8과 9는 원심모형실험과 수치해석을 통해 얻어진 말뚝의 최대 모멘트와 최대 모멘트 발생 시점에서의 깊이별 모멘트를 비교하였다. 여기서 최대 모멘트는 전체 해석시간 동안 각 깊이별 위치에서 얻어진 최대 모멘트를 의미한다. 수치해석 결과는 정확히 원심모형실험 결과와 일치하지 않으나 전반적으로 유사한 경향을 보여 삼축내진말뚝의 거동을 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

다. 그리고 정량적인 차이는 지반물성의 불확실성, 지반-말뚝 접촉면 물성의 불확실성, 초기 응력/변형률 상태의 차이로 기인하는 것으로 판단된다.

3. 수치해석 결과

Fig. 10과 11은 0.1g, 0.2g의 지진파에 의해 발생하는 경사각도별 최대 휨모멘트를 나타낸다. 최대 휨모멘트는 입력지진파에 의해 해당 지점에 말뚝에 작용하는 최대 절대 휨모멘트값을 의미한다. 최대 휨모멘트가 발현되는 위치가 경사각도에 의해 달라짐을 확인하였다. 경사각도가 0도 일때는 1~2m 심도에서 발현되는 반면, 경사각도가 증가함에 따라 발현위치가 지표쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 지진 하중 작용 시

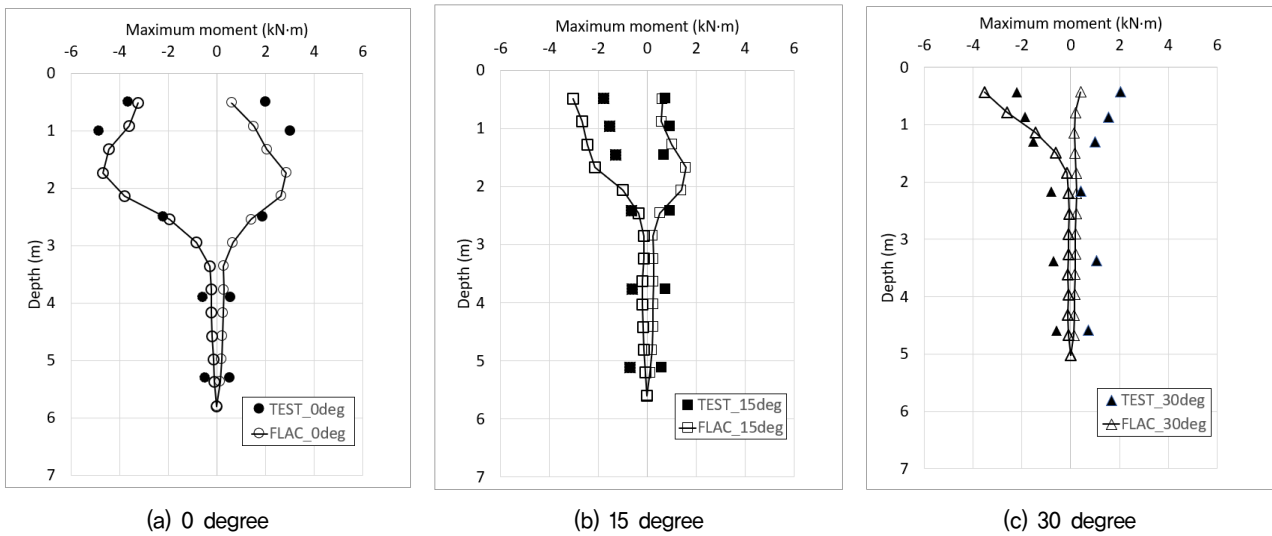


Fig. 8. Comparison between maximum moment from test and simulation results

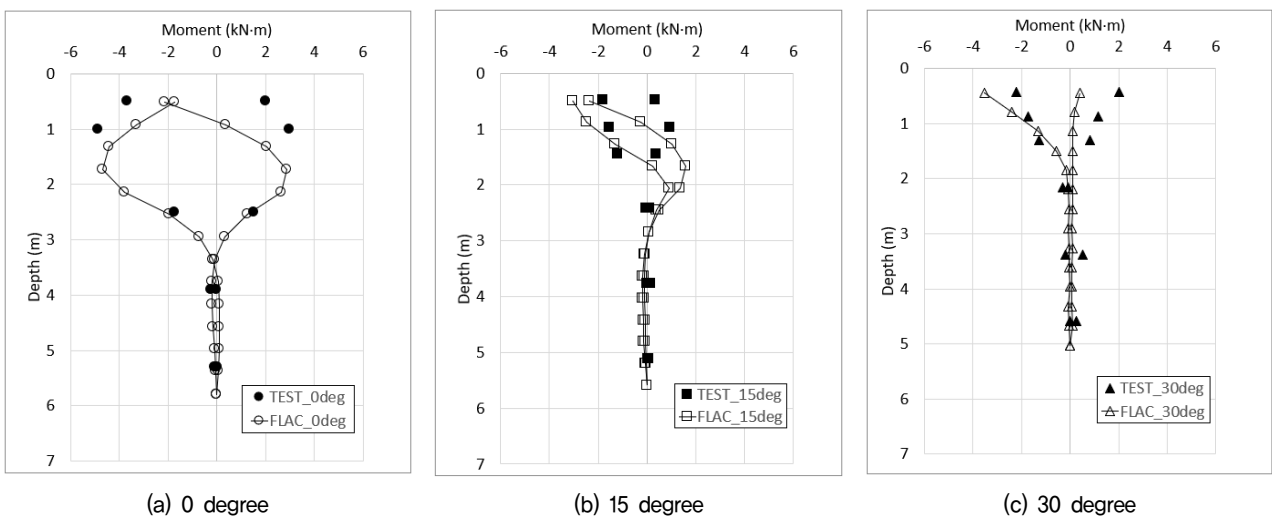


Fig. 9. Comparison between moment with depth from test and simulation results when maximum moment occurred

경사말뚝 두부에 큰 힘이 발생한다는 기존 연구 결과와 유사하다(Wang and Rolando, 2023).

Table 4와 같이 최대 휨모멘트는 세기가 0.1g에서 0.2g

로 증가됨에 따라 Capetown 지진파 조건에서 148%, San Fernando 지진파 조건에서 320%, Sine 2Hz조건에서 354% 증가되었다. 또한 Capetown 지진파와 San Fernando 지

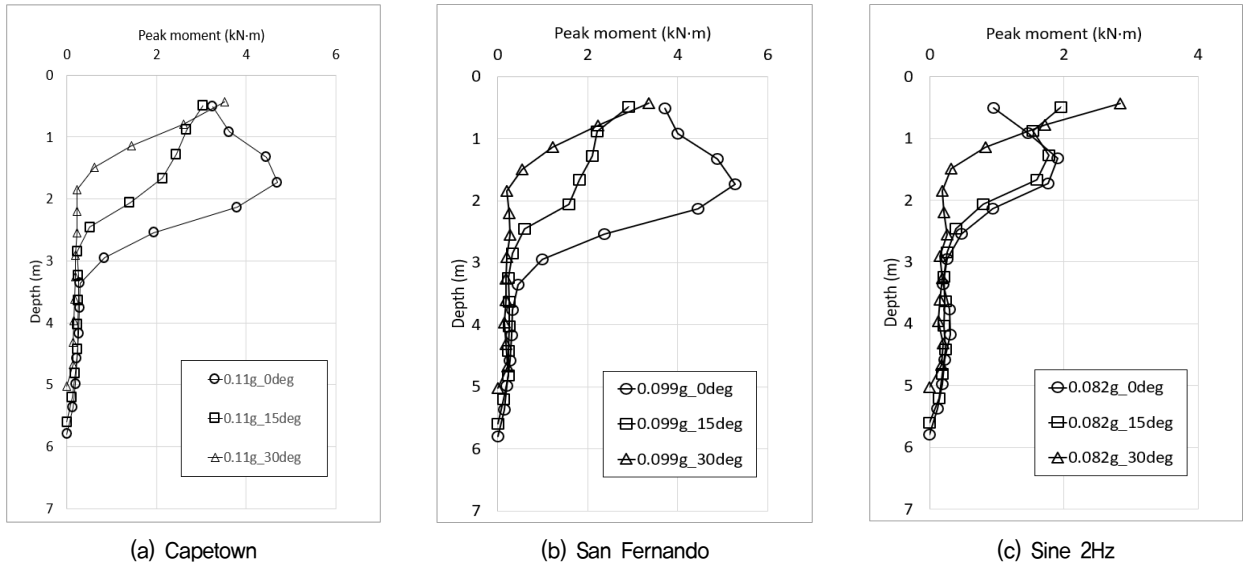


Fig. 10. Peak bending moment under various earthquakes with around 0.1g

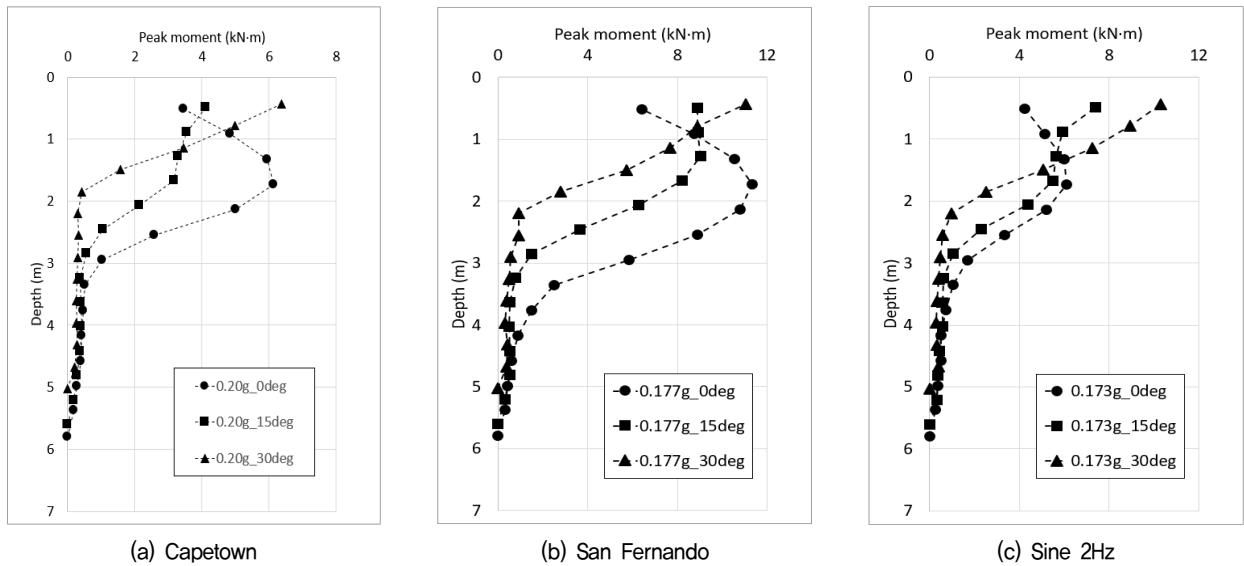


Fig. 11. Peak bending moment under various earthquakes with around 0.2g

Table 4. Peak bending moment under various earthquake conditions

Input signal	Peak bending moment (kN · m)		
	Installation Angle	Around 0.1g	Around 0.2g
Capetown earthquake	0 deg	4.70	6.12
	15 deg	3.04	4.10
	30 deg	3.53	6.36
San Fernando earthquake	0 deg	5.27	11.31
	15 deg	2.91	9.02
	30 deg	3.36	11.04
Sine 2Hz	0 deg	1.90	6.08
	15 deg	1.95	7.40
	30 deg	2.84	10.30

진파 조건에서는 경사각도가 15도 일 때 가장 낮은 최대 휨모멘트를 보였으며, 경사각도 0도에 비해 약 30% 정도 낮은 값을 보였다. 반면 Sine 2Hz 입력파에서는 경사각도가 증가할수록 최대 휨모멘트가 커지는 것으로 확인되었다.

Fig. 12와 13은 0.1g, 0.2g의 지진파에 대해 경사각도별 최대 축력을 나타낸다. Capetown 지진파와 San Fernando 지진파에서는 거의 유사한 거동을 보이는 반면, Sine 2Hz 입력파에서는 두 지진파와 달리 축력의 크기가 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 지진파 세기가 0.1g에서 0.2g로 증가함에 따라, Capetown 지진파 조건에서는 압축력, 인장력 각각 120%, 102%, San Fernando 지진파 조건에

서는 138%, 119%, Sine 2Hz 입력파 조건에서는 180%, 107%의 축력이 증가됨을 확인되었다. 경사각도별 최대 축력의 경우에는 모든 지진파에서 경사각도가 증가함에 따라 말뚝에 작용되는 축력이 낮아지는 것을 확인하였다. Capetown 지진파, San Fernando 지진파, Sine 2Hz 입력파 조건에서 경사각도 0도일 때 축력 대비 경사각도 15도의 압축력은 각각 18%, 17%, 0%, 경사각도 30도의 압축력은 30%, 36%, 0% 낮은 값을 보였으며, 인장력은 경사각도 15도일 때 19%, 21%, 19%, 경사각도 30도일 때는 38%, 34%, 44% 낮은 값을 보였다. 이는 경사각도에 따라 연직 말뚝의 축력보다 크거나 작게 나올 수 있다는 Kim et al.(2001)의 연구결과와 유사하다.

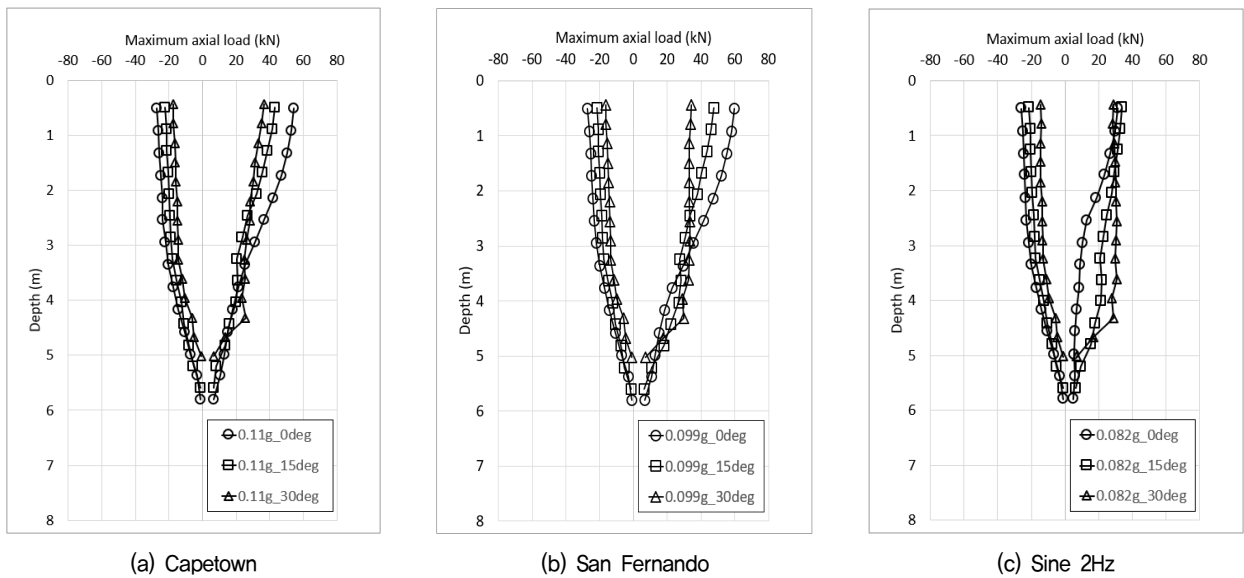


Fig. 12. Maximum axial load under various earthquakes with around 0.1g

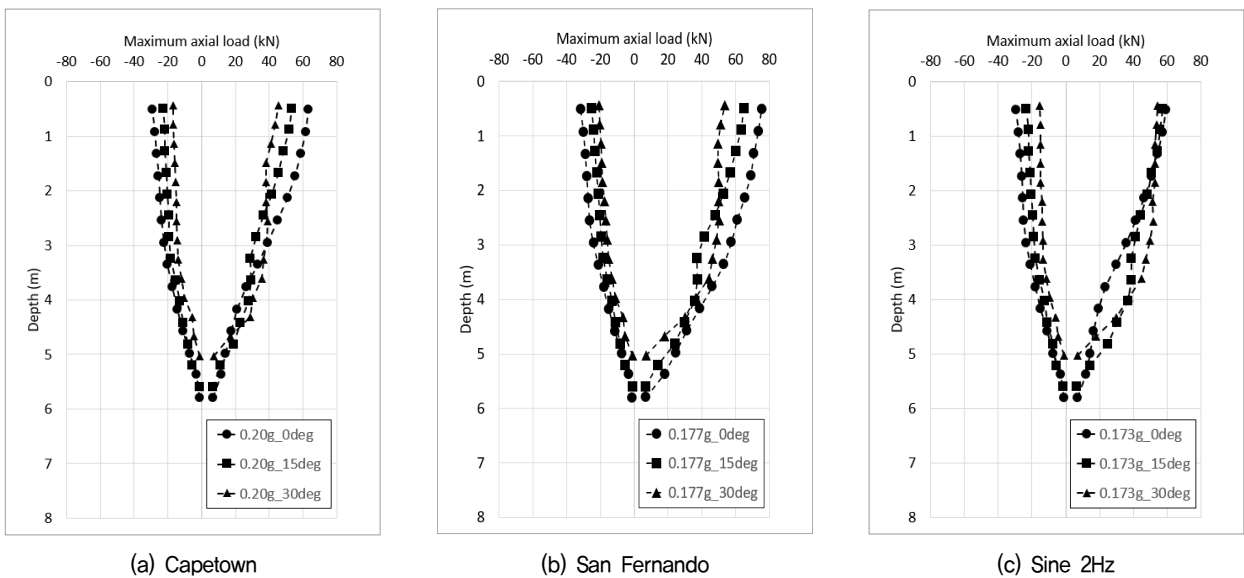
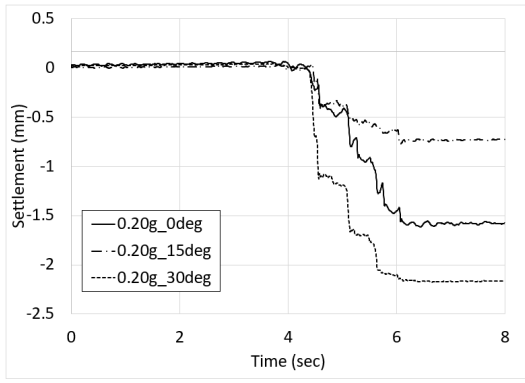
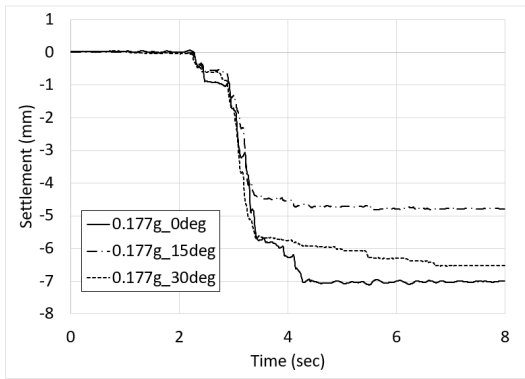


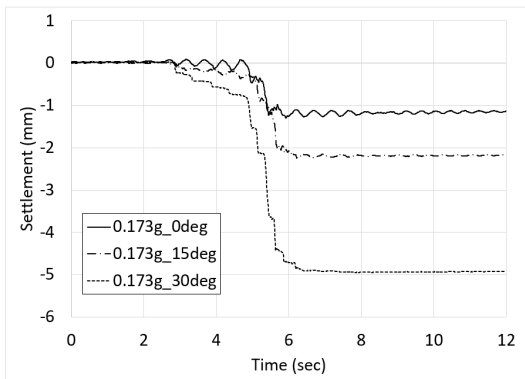
Fig. 13. Maximum axial load under various earthquakes with around 0.2g



(a) Capetown



(b) San Fernando



(c) Sine 2Hz

Fig. 14. Settlement under various earthquakes with around 0.2g

Fig. 14는 0.2g의 지진파에서 경사각도별 말뚝 두부의 침하량을 나타낸다. 입력 지진파 및 경사각도에 따라 침하양상은 각기 달라짐을 확인하였다. Capetown 지진파와 San Fernando 지진파에서는 경사각도가 15도일 때 침하량이 가장 작은 값을 가졌으나, Sine 2Hz 입력파에서는 0도일 때 가장 작은 침하량을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 FLAC3D을 통해 3차원 수치모델을 구

축하고, 원심모형실험 결과와 비교를 통해 검증을 하였다. 이를 바탕으로 경사각도에 따른 삼축내진말뚝의 동적 거동 특성을 확인하였다.

- (1) 0.157g의 Capetown 지진파 조건에서 3차원 수치모형을 원심모형실험 결과와 검증하였으며, 지반응답 및 말뚝의 최대 모멘트, 축력을 전반적으로 잘 모사하였다. 보다 정확한 모사를 위해서는 실내실험을 통한 지반의 동적물성, 지반-말뚝 접촉면 물성, 초기 응력/변형률 상태 모사가 필요한 것으로 판단된다.
- (2) 경사각도에 따라 삼축말뚝의 부재력(최대 모멘트, 축력) 및 침하량은 상이함을 확인하였다. 최대 모멘트는 실지진파(Capetown 지진파, San Fernando 지진파) 조건에서 경사각도 0도, 30도, 15도순으로 크게 나타난 반면, 인공지진파(Sine 2Hz 입력파) 조건에서는 경사각도 30도, 15도, 0도순으로 크게 나타났다. 축력은 모든 입력파(실지진파, 인공지진파) 조건에서 경사각도 0도, 15도, 30도순으로 크게 나타났다. 침하량은 실지진파 조건에서는 경사각도 15도일 때, 인공지진파에서는 경사각도 0도일 때 가장 낮은 값을 보였다.
- (3) 실지진파(Capetown 지진파, San Fernando 지진파)를 기준으로 삼축내진말뚝은 경사각도가 15도일 때 가장 낮은 최대모멘트, 침하량을 보여 가장 좋은 내진 성능을 보였다. 다만 인공지진파에서는 다른 경향을 보여 입력 지진파 특성에 관한 추가적인 분석이 필요하다.
- (4) 본 논문에서는 사질토 흡과 단일 말뚝에 대해서만 다루었으나 실제 다양한 지반 조건, 단일 말뚝 배치 방향 및 개수에 따른 군말뚝 효과, 입력지진파 영향 등 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(20230132-001)” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Beringen, F.L., Windle, D., and Van Hooydonk, W. R. (1979), Results of Loading Tests on Driven Piles in Sand, *Proceedings*

- of the Conference on Recent Development in the Design and Construction Piles, ICE, London, pp.213-225.
2. Chanh, P.V., Tran, N.X., and Kim, S. R. (2018), 2D Numerical Simulation of a Dynamic Centrifuge Test for a Pile-Supported Structure, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.8, pp.15-26.
 3. Elsawwaf, A., Nazir, A., and Azzam, W. (2022), The Effect of Combined Loading on the behavior of Micropiled Rafts Installed with Inclined Condition, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.29, pp.81321-81336.
 4. Hwang, T.H., Kim, M.Y., and Lee, Y.S. (2020), Variations of Lateral Bearing Capacity of 2-row Micropile with Installation Conditions by Model Test, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.36, No.11, pp.35-49.
 5. Itasca Consulting Group (2023), Itasca's FLAC3D 7.0 Documentation, Minnesota, USA.
 6. Kim, J.H., Hwang, J.I., Han, J.T., and Kim, M.M. (2001), Dynamic Analysis of Inclined Piles and Countermeasures against their Vulnerability, *Proceedings of EESK Conference-Fall 2001, Korea*, pp.107-115.
 7. Kim, J.S., Noh, J.S., and Kang, G.C. (2017), Behaviour Characteristics of Single Batter Pile under Dynamic Lateral Loads, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.9, pp.49-60.
 8. Kim, S.B., Son, S.W., and Kim, J.M. (2020), Horizontal Behaviour Characteristics of Umbrella-Type Micropile Applied in Sandy Soil Subjected to Seismic Motion, *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.21, No.7, pp.5-16.
 9. Kim, T.H., Ahn, K.K. and An, S.Y. (2021), Behavioral Analysis of Triaxial Micropile (TMP) through Field Loading Test and 3D-numerical Analysis, *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.22, No.4, pp.15-23.
 10. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973), Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, *J. Soil Mech. & Foundations*, Div. ASCE, 99(SM45), pp.421-427.
 11. Kwon, O.K. and Park, J.U. (2018), Experimental Behaviour Characteristics of 2×2 Group Pile under Lateral Loads, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.6, pp.5-16.
 12. Kyung, D.H. and Lee, J.H. (2017), Interpretative Analysis of Lateral Load-Carrying Behavior and Design Model for Inclined Single and Group Micropiles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.144, No.1, 04017105.
 13. Lee, J.S., Chae, H.G., Kim, D.S., Jo, S.B., and Park, H.J. (2015), Numerical Analysis of Inverted T-type Wall under Seismic Loading, *Computers and Geotechnics*, Vol.66, pp.85-95.
 14. 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, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.6, pp.5-13.
 15. Wang, Y. and Rolando, P.O. (2023), Numerical Investigation of Inclined Piles under Liquefaction-Induced Lateral Spreading, *Geotechnics*, Vol.3, No.2, pp.320-346.

Received : October 5th, 2023

Revised : October 16th, 2023

Accepted : October 16th, 2023