

원심모형실험을 통한 수평 및 경사지반에 관입된 말뚝지지 구조물의 동적 거동 특성 분석*

Dynamic Behaviour Characteristics of Pile-Supported Structure Installed in Horizontal and Inclined Ground through Centrifuge Model Tests

윤정원**

Jungwon Yun**

Abstract

This study conducted centrifuge model tests to investigate the behavior of pile-supported structures in both horizontal and inclined sand ground. Sinusoidal and artificial seismic waves were applied with varying acceleration amplitudes from 0.04 g to 0.25 g. The study analyzed ground acceleration and pile moment responses based on ground inclination and input motion characteristics. Results showed that inclined ground models with shorter natural periods (0.5-0.59 s) exhibited larger responses under short-period seismic waves (0.15-0.5 s). Conversely, horizontal ground models with longer natural periods (0.55-0.64 s) had larger responses under long-period sinusoidal waves (1 s). The structural response was amplified when the ground response period matched the structure's natural period, highlighting the need for design methods that consider both ground response and structural natural periods.

Keywords: Pile-Supported Structure, Centrifuge Model Test, Earthquake, Horizontal Ground, Inclined Ground

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

말뚝지지 구조물은 상부 구조물의 하중을 지반으로 직접 전달하는 형식의 말뚝 구조물로서, 하중 전달 방식에 따라 마찰말뚝 및 선단지지 말뚝으로 구분된다. 먼저, 마찰말뚝은 지반 내 암반층이 깊어 말뚝을 도달시킬 수 없을 때 말뚝의 주면 마찰력을 통해 지지력을 발생시키는 형태이며, 선단지지말뚝은 말뚝 선단을 암반층까지 정착시키는 형태이다. 국내

지형의 경우 대부분 산지로 구성되어 있어 20-30m 이내 암반층이 존재하므로 주로 선단지지 말뚝을 사용하고 있다.

일반적으로, 말뚝지지 구조물의 경우 작게는 수 m에서 크게는 수십 m에 이르므로, 축소모형실험을 통해 말뚝의 성능을 평가하고 있다. 그러나, 일반 축소모형 실험의 경우 모델의 크기가 감소함에 따라 지반의 구속압이 감소하게 되고, 이로 인해 실제 말뚝의 응답 특성을 적절히 모사하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 지반의 구속압을 적절히 고려할

*이 논문은 2021년 박사학위 논문(원심모형실험을 통한 잔교식 구조물의 내진성능 평가 및 응답스펙트럼해석법 개선사항 도출) 중 일부 데이터를 활용하여 작성하였음.

**LH 토지주택연구원 책임연구원(yunjungwon@lh.or.kr)

수 있는 축소모형실험 방법인 원심모형실험이 널리 활용되고 있다.

박용부 외(2014) 및 김상연 외(2014)는 각각 사질토 및 점성토 지반에 근입된 비정형 말뚝 기초에 대한 원심모형실험을 수행하였으며, 지반 및 기초판의 응답스펙트럼을 비교하였다. 결과적으로, 실험에서 측정된 스펙트럼 가속도를 설계에 적용할 경우 표준설계스펙트럼을 적용할 때보다 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다. 또한 Tran et al.(2021)은 수평지반에 관입된 말뚝지지 구조물의 원심모형실험을 수행하였으며, 수치해석을 통해 지반-말뚝의 인터페이스 물성치를 적절히 도출할 수 있는 방법을 제안하였다. 윤정원 외(2022)는 잔교식 말뚝 구조물의 원심모형실험을 수행하였으며, 응답스펙트럼해석 시 지진하중을 고려한 지반 스프링 모델을 제안하였다. 위 연구들의 경우 수평지반에 관입된 말뚝 기초에 대한 내진성능 평가 결과를 다루고 있다.

Tran et al.(2022)은 경사지반에 관입된 단말뚝 및 군말뚝의 원심모형실험을 수행하였으며, 지반 운동학적 힘 및 구조물의 관성력 변위 위상을 바탕으로 두 힘의 상호작용을 분석하는 연구를 수행하였다. 또한 Yoo et al.(2023)은 경사지반에 관입된 군말뚝에 대한 원심모형실험을 수행하였으며, 액상화 발생 시 유발되는 사면의 수평력이 말뚝에 미치는 영향을 분석하였다. 유사하게, Yun and Han(2024)은 경사지반에 관입된 말뚝지지 안벽에 대한 원심모형실험을 수행하였으며, 액상화 유무에 따른 사면 및 말뚝의 동적 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 위 연구들의 경우, 경사지반에 관입된 말뚝 기초에 대한 실험 결과를 다루었으며, 사면 운동학적 힘에 의한 영향을 중점적으로 분석하였다.

일반적으로 말뚝지지 구조물의 경우 수평 및 경사지반 조건에 따라 구조물의 고유주기 특성이 달라질 수 있으며, 이로 인해 구조물의 동적 거동 특성 또한

차이가 발생할 수 있다. 그러나, 앞서 설명한 연구들의 경우, 수평 혹은 경사지반에 관입된 말뚝 기초에 대한 연구 결과들을 개별적으로 다루고 있으며, 현재까지 지표면 형상에 따른 말뚝의 동적 거동 특성을 원심모형실험을 통해 분석한 연구는 부족한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 수평 및 경사지반에 관입된 말뚝지지 구조물의 동적 거동 특성을 분석하기 위해 원심모형실험을 수행하였다.

1.2 연구 방법

원심모형실험은 말뚝 지지 상사비(N) 만큼 원심 가속도를 N 배 가하여 지반의 구속압을 유사하게 모사할 수 있는 실험방법이다. 본 연구에서는 5m 회전반경을 가지는 KAIST 지오센터리푸지 실험센터 원심모형실험기를 활용하여 실험을 수행하였다(Kim et al., 2013). 실험을 위해 길이, 폭, 높이가 각각 49cm, 49cm, 63cm인 정사각형 등가 전단 토조(equivalent shear beam box)를 사용하였다(Lee et al., 2013). 위 토조는 강성판 사이에 고무를 적층하여 제작한 토조로서, 지반과 유사한 횡방향 변위를 허용하여 벽체의 반사파로 인해 발생하는 교란을 감소시킬 수 있다.

2. 원심모형실험 수행

2.1 실험 모델 및 지반 조성

본 연구에서는 3열 3행의 9개 강관 말뚝으로 콘크리트 상판을 지지하는 형태의 단면을 선정하여 원심모형실험을 수행하였다. 실험 지반의 경우 단일 사질토로 단순화하였으며, 수평 및 경사지반으로 조성하였다.

각 모델은 1/48의 축소모형으로 제작되었으며, Table 1에 원형(prototype) 및 모형 구조물의 상사비를 보여주고 있다(Schofield, 1981). 실험에 사용

Table 1. Properties of Centrifuge Model and Prototype (Scale Factor=48)

	Prototype	Diameter (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Density ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	Flexural Rigidity ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)
Pile	Prototype	914	24,000	14	78.5	7.81×10^5
	Model	19	500	1	26.4	0.147
Deck	Prototype	-	-	1000	24.5	-
	Model	-	-	20	26.4	-

된 말뚝은 알루미늄 강관 말뚝을 사용하였으며, 원형 구조물의 두께를 1/48로 축소하기 어려우므로 말뚝의 휨강성을 고려하여 모형 말뚝 제원을 산정하였다. 또한 대한민국 지반에 적합한 선단지지 말뚝을 모사하기 위해 말뚝을 하부 기초판에 고정하였다. 실험 모델의 지반 조성을 위해 규사(silica sand)를 활용하였으며, 낙사법(air-pluviation)을 통해 지반의 상대 밀도를 조절하였다. 상대 밀도는 낙사 장비의 낙사 고도, 낙사 장비, 이동 속도, 입경 크기를 통하여 결정되었다. 지반 상대밀도의 경우 수평지반 및 경사지반 모델에서 각각 45%, 40%로 조성되었으며, 각 상대밀도의 경우 지반의 밀도가 1.4t/m^3 및

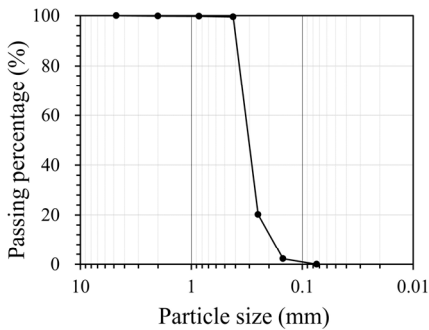
1.38t/m^3 으로 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

또한 본 실험에서는 건조 상태의 단일 사질토 지반에서 실험을 수행하였으며, 규사의 기본 물성 정보를 Fig. 1 및 Table 2에 나타내었다.

2.2 입력 지진파 및 계측기

입력 지진파는 위상에 따른 구조물의 동적 거동을 분석하기 위한 정현파 및 대한민국 표준설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파를 제작하였다(해양수산부, 2014). 정현파의 경우 1Hz 주파수 범위를 보이며, 인공지진파의 경우 KAIST 원심모형실험 장비의 허용 주파수 범위(40-300Hz, 모형 기준)의 지진파를 제작하였다. Fig. 2에는 기초판에 가진된 입력 지진파를 보여주고 있다. 지진파의 경우 진폭을 변화시키면서 단계별로 가진하였다. 수평지반 모델의 경우 0.09, 0.14, 0.15, 0.18, 0.23g를, 경사지반 모델의 경우 0.04, 0.12, 0.16, 0.18, 0.23g를 가진하였다.

Fig. 3은 모델 단면 및 계측기 위치를 보여주고 있으며, Fig. 4는 실험 사진을 보여준다. 본 실험에서는 5개의 레이저 변위계, 14개 혹은 18개의 가속도계, 그리고 42개의 말뚝 변형률계를 설치하였다.

**Fig. 1.** Grain Size Distribution Curve of Silica Sand**Table 2.** Properties of Silica Sand

USCS	Plastic Index (PI)	Coefficient of Curvature	Coefficient of Uniformity	Specific Gravity	Max. Dry Unit Weight (kN/m^3)	Min. Dry Unit Weight (kN/m^3)
SP	NP	1.16	1.96	2.63	16.5	12.4

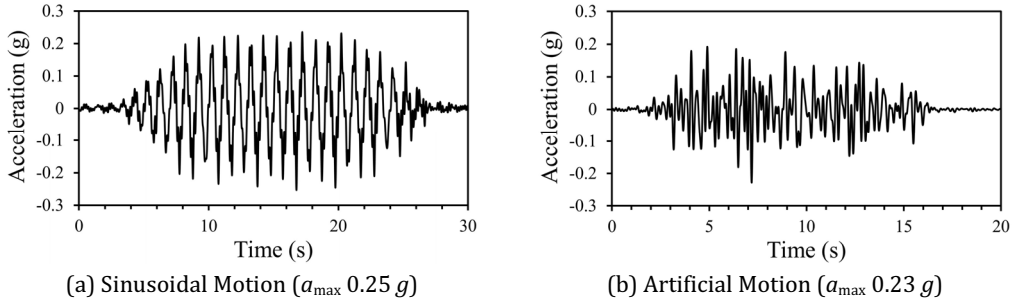


Fig. 2. Base Input Motion

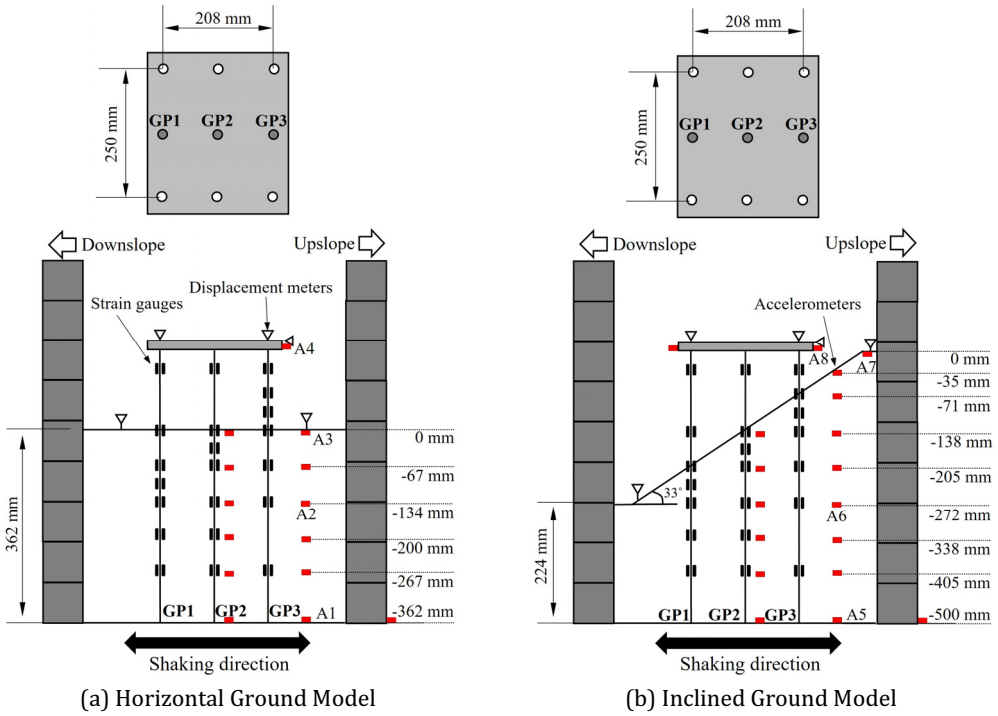


Fig. 3. Model Cross Section (In Model Scale)

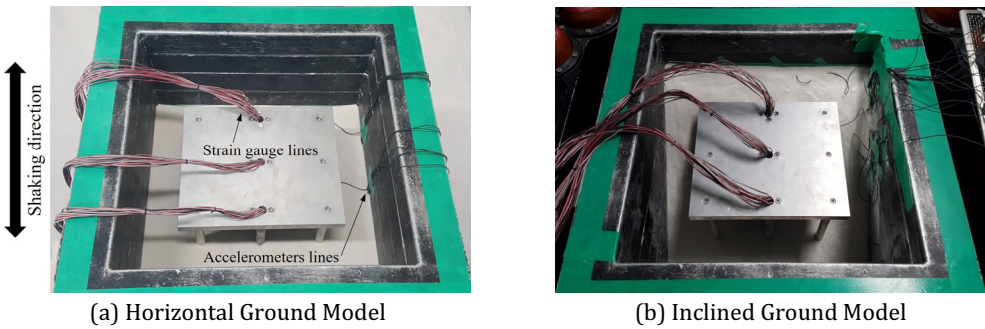


Fig. 4. Experimental Model

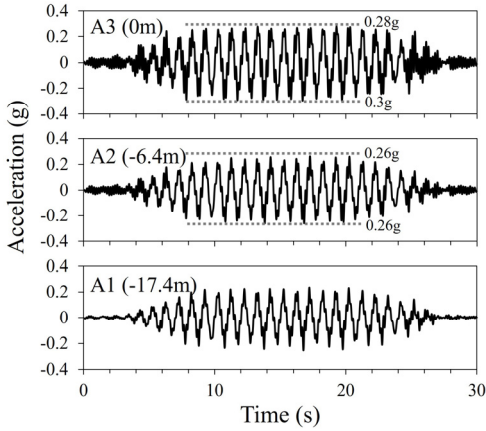


Fig. 5. Ground Acceleration Time History of Horizontal Ground Model (Sinusoidal Motion, a_{\max} 0.25 g)

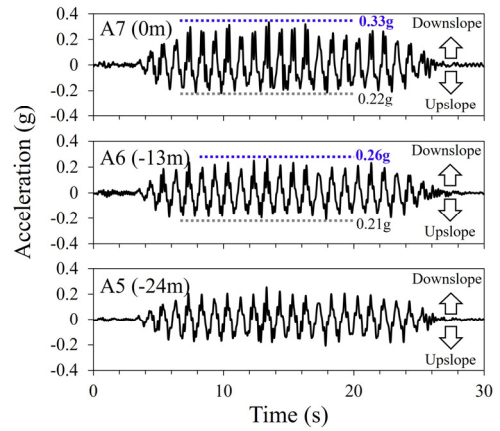


Fig. 6. Ground Acceleration Time History of Inclined Ground Model (Sinusoidal Motion, a_{\max} 0.25 g)

3. 원심모형실험 결과 분석

3.1 지반 응답 분석

본 절에서는 수평 및 경사지반에 따른 지반 가속도 운동 특성을 분석하였다. 분석을 위해 위상에 따른 지반의 시간 이력 특성을 판단하기 쉬운 정현파 결과($a_{\max} = 0.25g$)를 활용하였다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 수평 및 경사지반 모델의 깊이 따른 가속도 시간이력응답을 보여준다. 먼저, Fig. 5는 수평지반 모델의 기초판(A1), 지층 중간(A2), 지반 상부(A3) 위치의 지반 응답을, Fig. 6은 경사지반 모델의 기초판(A5), 지층 중간(A6), 사면 상부(A7) 위치의 지반 응답을 보여준다.

그림을 보면, 수평지반 및 경사지반 모델 모두 기초판에서 지표면 상부로 갈수록 가속도 응답이 증가한 것으로 나타났다. 이는 해당 지반이 느슨한 지반으로 조성되었으므로 지반 증폭현상이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 수평지반 모델의 경우 모든 깊이에서 (+) 방향 및 (-) 방향 가속도가 유사하게 도출되었으나, 경사지반 모델의 경우 지층 중간(A6) 및 사면 상부(A7) 위치에서 양(+) 방향 응답이 음(-) 방향 응답보다 크게 도출되었다. 이는 사면 하부(downslope)

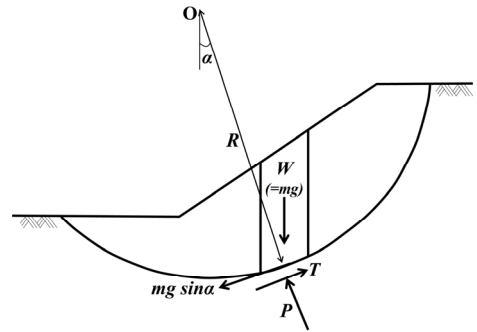


Fig. 7. Fellenius Slice Method

방향으로 발생하는 전단응력 때문으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 Fellenius의 절편법 개념을 활용하여 사면에 발생하는 전단응력을 설명하고자 한다.

Fig. 7은 Fellenius의 절편법을 설명하고 있다. Fellenius의 절편법은 절편법 중 가장 단순한 방법으로, 복합토층사면을 분할하여 해당활동면의 전단응력을 도출할 수 있는 방법이다(서승남 외, 2004). 여기서, $W(=mg)$ 는 절편 토층의 무게를 의미하며 절편 파괴면 하부 방향으로 발생하는 전단응력은 $mg \sin \alpha$ 로 나타낼 수 있다. 해당 그림에서, m 은 절편의 질량, g 는 중력가속도, P 는 절편 저면의 유효수직력, T 는 절편 저면의 전단력, O 는 가상회전 중

심점, R 은 파괴원호의 반지름, α 는 수평면과 파괴면이 이루는 각을 의미한다.

결과적으로, 관성력의 관점에서 볼 때 질량(m)을 제외한 $g \sin \alpha$ 만큼의 가속도가 파괴면 하부 방향으로 작용되므로 Fig. 6에서 사면 하부(downslope) 방향의 가속도 응답이 사면 상부(upslope) 방향의 가속도 응답보다 크게 도출된 것으로 판단된다.

현재 실무에서 사용되고 있는 방법과 같이, 지진계 수 및 위험도계수를 통해 지진응답을 산정하거나 1차원 지반응답해석을 수행하는 경우 사면의 가속도 응답 특성을 반영하기 어렵다. 따라서 이를 적절히 도출하기 위해서는 사면 형상을 고려한 2차원 혹은 3차원 수치해석 기법을 사용하는 것이 요구된다.

3.2 구조물 응답 분석

말뚝의 부재 응력은 휨 응력과 축력을 조합하여 산정하며, 부재 응력이 허용응력을 초과하지 않도록 설계를 수행하여야 한다(해양수산부, 2014). 일반적으로 지진 하중이 발생하는 경우 횡방향 하중으로 인한 휨 응력이 주로 발생하므로, 본 절에서는 휨 응력을 발생시키는 말뚝의 휨 모멘트를 중점적으로 분석하였다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 정현파($a_{\max} = 0.25g$)가 가진된 수평 및 경사지반 모델의 말뚝 별 휨 모멘트를 보여주고 있다. 휨 모멘트의 경우 말뚝에 부착된 변형률 응답으로부터 도출하였으며, 최대 모멘트가 발생한 시점의 깊이 별 모멘트를 보여주고 있다. 또한 경사지반 모델에서는 말뚝이 downslope 및 upslope 방향으로 이동할 때의 최대 모멘트를 보여준다. 수평지반 모델 말뚝의 경우 downslope 및 upslope 방향의 구분이 없으나, 편의를 위해 나타내었다. 또한 수평지반 모델의 경우 계측기의 손상으로 GP3의 응답을 도출하지 못하였다.

먼저, 수평지반 모델의 말뚝 모멘트 결과를 보면, 말뚝 두부에서 최대 혹은 최소 모멘트가 발생한 뒤

지반 내에서 반대 부호의 모멘트가 발생하고, 모멘트가 0으로 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝 상단이 회전 구속되어 있으므로 최대 모멘트 반력이 발생하며, 이후 지반 반력의 영향으로 반대 방향 모멘트 반력이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 수평지반 모델의 경우 말뚝 위치(GP1, GP2)에 따라 모멘트 차이가 거의 발생하지 않았고, 좌우 거동 방향에 따른 차이 또한 거의 발생하지 않았다.

경사지반 모델의 말뚝 모멘트 결과를 보면, 수평지반과 마찬가지로 말뚝 두부에서 최대 혹은 최소 모멘트가 발생한 뒤 지반 내에서 반대 부호의 모멘트가 발생하고, 모멘트가 0으로 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나, GP1에서 GP3로 갈수록 지반 내 최대 모멘트 발생 위치가 높아졌는데, 이는 지반의 높이가 높아지므로 지반 내 모멘트 반력이 발생하는 위치 또한 높아지기 때문이다. 또한 말뚝이 upslope 방향으로 이동하는 경우 downslope 방향으로 이동하는 경우에 비해 지반 내 모멘트 반력이 발생하는 위치가 높아졌는데, 이는 upslope 방향의 지반 위치가 downslope 방향에 비해 높으므로, 더 높은 위치에서 지반 반력이 발생하기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 입력가속도에 따른 상부 구조물(A4, A8) 최대 가속도 응답을 보여준다. 먼저, Fig. 10(a)는 인공지진파가 가진된 모델의 상부 구조물 최대 가속도를, Fig. 10(b)는 정현파가 가진된 모델의 상부 구조물 최대 가속도를 보여준다.

먼저, 인공지진파가 가진되는 경우, 입력가속도 0.15g까지는 가속도 차이가 크게 발생하지 않았다. 이는 입력가속도가 작은 경우, 상부 구조물에 가해지는 관성력이 크지 않으므로 지반 조건에 따른 구조물의 응답 차이 또한 크게 발생하지 않은 것으로 판단된다. 이후, 입력가속도가 증가함에 따라 경사지반에 관입된 구조물에서 수평지반에 관입된 구조물에 비해 큰 가속도 응답이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 입력가속도 0.23g가 가진되는 경우, 경사

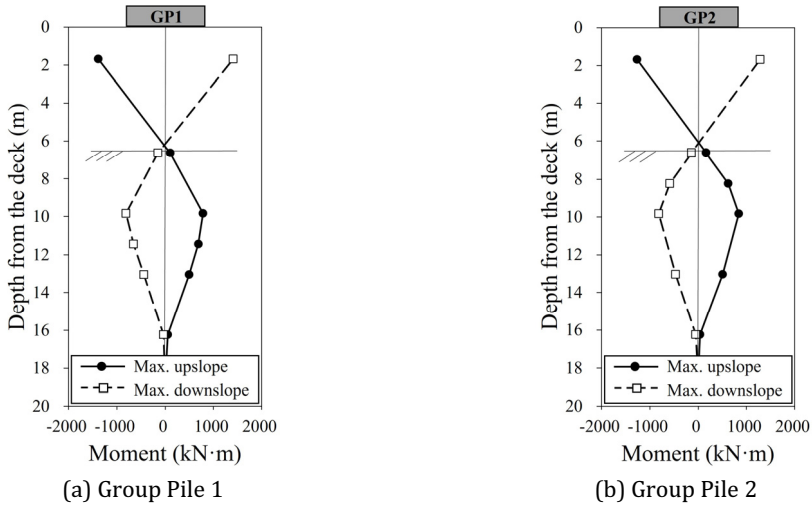


Fig. 8. Pile Moment Depth Profile of Horizontal Ground Model (Sinusoidal Motion, a_{\max} 0.25 g)

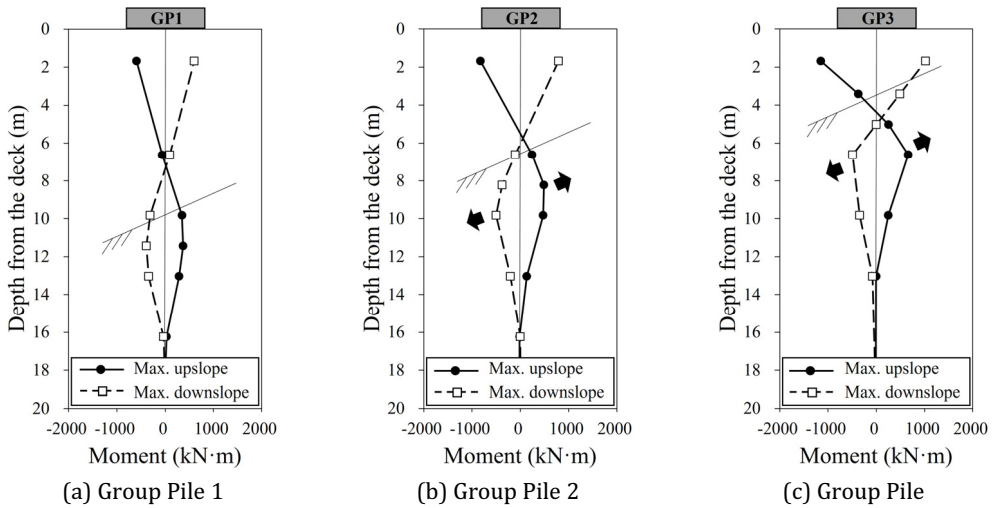


Fig. 9. Pile Moment Depth Profile of Inclined Ground Model (Sinusoidal Motion, a_{\max} 0.25 g)

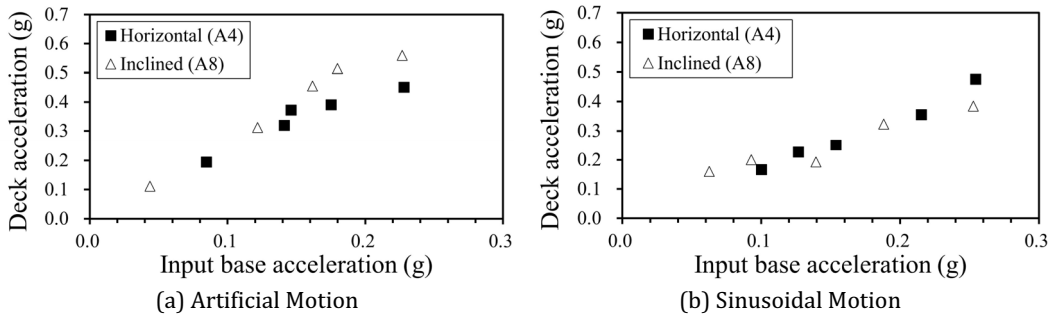


Fig. 10. Peak Deck Acceleration According to the Input Base Motion

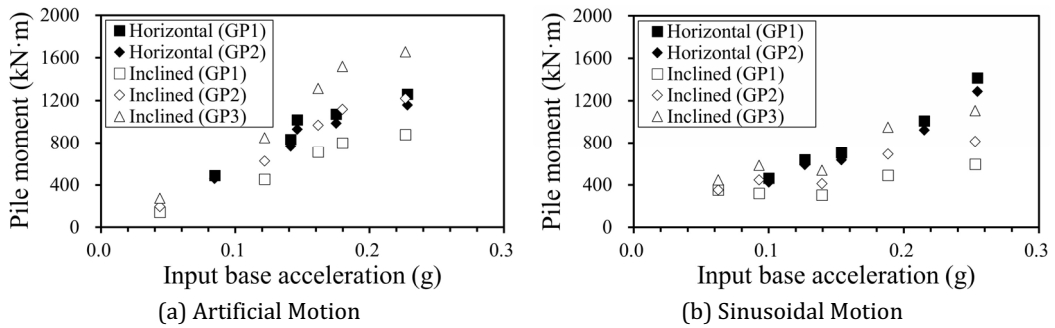


Fig. 11. Maximum Pile Moment According to the Input Base Motion

지반 모델(A8)에서 수평지반 모델(A4)에 비해 약 24% 큰 모멘트가 발생하였다.

반면, 정현파가 가진되는 경우, 수평지반에 관입된 구조물에서 경사지반에 관입된 구조물과 유사하거나 다소 큰 가속도 응답이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 입력가속도 0.25g가 가진되는 경우, 수평지반 모델(A4)에서 경사지반 모델(A8)에 비해 약 26% 큰 모멘트가 발생하였다.

위와 같이 입력 지진파 종류에 따라 반대의 결과를 보이는 현상은 말뚝의 모멘트 응답에서도 동일하게 발생하였다. Fig. 11은 입력가속도에 따른 말뚝(GP1, GP2, GP3) 별 최대 모멘트를 보여준다. 먼저, Fig. 11(a)는 인공지진파가 가진된 수평 및 경사지반 모델의 최대 모멘트를, Fig. 11(b)는 정현파가 가진된 최대 모멘트를 보여준다.

먼저, 경사지반 모델을 보면, 두 그림 모두 GP1에서 GP3로 갈수록 모멘트 응답이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 GP1에서 GP3으로 갈수록 지반에 관입된 말뚝 길이가 깊어짐에 따라 지반 구속력이 증가하므로 말뚝에서 모멘트 반력이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 반면, 수평지반 모델의 경우 지반에 관입된 말뚝 길이가 모두 같으므로 동일한 모멘트가 도출된 것으로 보인다.

또한, Fig. 11(a) 인공지진파가 가진되는 경우, 경사지반에 관입된 말뚝(GP3)에서 수평지반에 관입

된 말뚝(GP1)에 비해 큰 모멘트 응답이 발생하는 것으로 나타났다. 반면, Fig. 11(b) 정현파가 가진되는 경우 수평지반에 관입된 말뚝(GP1)에서 경사지반에 관입된 말뚝(GP3)에 비해 더 큰 모멘트 응답이 발생하는 것으로 나타났다.

앞서 설명한 바와 같이, 인공지진파가 가진되는 경우 경사지반 모델의 모멘트 및 가속도 응답이, 정현파가 가진되는 경우 수평지반 모델의 모멘트 및 가속도 응답이 증가하는 현상이 발생하였다. 그러므로 본 절에서는 이에 대한 원인을 분석하기 위해 입력 지진의 진동수 및 구조물의 고유진동수 특성이 각 모델에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 12는 수평 및 경사지반 상부의 지반 가속도 응답스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 12(a)는 0.23g의 인공지진파가 가진된 지반 응답을, Fig. 12(b)는 0.25g의 정현파가 가진된 지반 응답을 보여준다. 각 그림에서는 수평지반의 경우 A3 위치의 지반 응답을, 경사지반의 경우 A7 위치의 지반 응답을 대표로 보여주고 있다. 또한 각 그림에는 수평지반 및 경사지반에 관입된 구조물의 고유주기 범위를 함께 나타내고 있다. 고유 주기 범위의 경우 본 연구와 동일한 모델의 실험 및 해석 결과를 활용하였던 Yun and Han(2021b)의 연구를 참고하였다. 위 연구에서는 가속도 증폭 비(acceleration response spectrum ratio method)방법을 통해 고유주기를 도출하였으

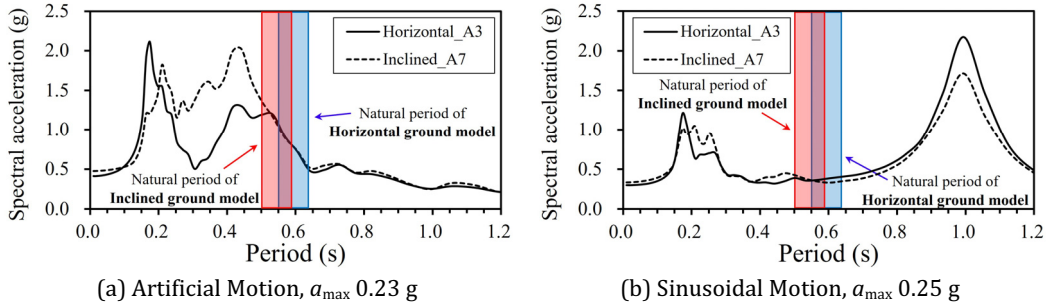


Fig. 12. Response Spectrum Curve and Natural Period of Model

며, 해당 방법은 구조물 하부(base) 및 상부(deck)의 가속도 응답스펙트럼의 비를 통해 최대 응답이 산정되는 주기 영역을 예측하는 방법이다. 수평지반 모델의 경우 0.55-0.64s, 경사지반 모델의 경우 0.5-0.59s로 구조물의 고유주기 범위가 도출되었다. 경사지반 모델에서 수평지반 모델에 비해 고유주기가 더 작게 도출된 이유는 지반 및 말뚝의 상호작용 특성 때문으로 판단된다. 수평지반 모델의 경우 모든 말뚝의 관입 깊이가 17.4m로 동일하게 관입되어 있다. 반면, 경사말뚝의 경우 GP1에서 GP3로 갈수록 말뚝의 관입 깊이가 증가하며, Pile 3의 경우 약 20.6m 관입되어 있다. 군말뚝 구조물의 경우 말뚝 두부가 서로 연결되어 영향을 받으므로, 큰 구속력을 받는 경사말뚝 모델에서 수평지반 모델에 비해 고유주기가 작게 도출된 것으로 판단된다.

Fig. 12(a) 인공 지진파의 가속도 응답을 보면, 약 0.15-0.5s 영역의 주기에서 높은 가속도 응답이 도출된 것으로 나타났다. 특히, 수평지반 응답의 경우 0.17s에서, 경사지반 응답의 경우 0.44s에서 최대 가속도 응답이 도출되었다. 이 때, 경사지반 모델의 경우 고유 진동수가 0.5-0.59s 영역에 있으므로 가속도 응답이 크게 발생하는 주기 영역(0.44s)에 가까운 것으로 보인다. 따라서, 경사지반에 관입된 구조물의 고유주기 영역에서 큰 응답 가속도가 발생하므로, 수평지반에 관입된 구조물에 비해 더 큰 구조적 응답이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 12(b) 정현파의 가속도 응답을 보면, 입력주기 범위인 1s 영역의 주기에서 큰 가속도 응답이 도출된 것으로 나타났다. 수평지반 모델의 경우 고유진동수가 0.55-0.64s로, 경사지반 모델에 비해 가속도 응답이 크게 발생하는 주기 영역(1s)에 가까운 것으로 보인다. 그러나, 고유주기에 따른 응답 가속도의 차이가 크지 않으므로, 수평지반 모델에서 경사지반 모델과 유사하거나, 다소 큰 구조적 응답이 발생한 것으로 판단된다.

결과적으로, 단주기 영역의 성분이 포함된 인공지진파(0.15-0.5s)가 가진되는 경우 고유주기가 작은 경사지반 모델에서 큰 응답이 도출되었으며, 장주기 영역의 성분이 포함된 정현파(1s)가 가진되는 경우 고유주기가 큰 수평지반 모델에서 유사하거나 다소 큰 응답이 도출되는 것으로 나타났다. 즉, 구조물의 응답은 지반 응답의 주기 성분과 구조물의 고유주기가 가까워지는 경우 크게 증가하므로, 향후 말뚝지지 구조물의 설계 시 지반 응답의 특성 및 구조물의 고유주기를 적절히 고려한 설계법의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 잔교식 구조물 및 교량과 같이 상부 구조물이 지표면에서 돌출된 형태의 말뚝 구조물에 대해 다루었으므로, 아파트 기초 등과 같이 기초판이 지반에 근입되어 있는 상황에서 본 연구 결과를 활용하기는 어렵다. 또한 경사지반 모델의 경우 사면 운동학적 힘이 말뚝에 미치는 영향을 분석하기

위해 사면 보강 처리를 수행하지 않았으므로, 보강된 지반 응답과 차이가 발생할 수 있는 것으로 판단된다(Yun and Han, 2021a).

4. 결 론

본 연구에서는 원심모형실험을 통해 수평 및 경사 지반에 관입된 말뚝지지 구조물의 거동 특성을 분석하였다. 실험 지반의 경우 단일 사질토로 단순화하였으며, 수평 및 경사지반으로 조성하였다. 입력 지진파의 경우 정현파 및 인공지진파를 적용하였으며, 진폭을 0.04-0.25g로 변화시키면서 단계에 따라 지진파를 가진하였다.

1. 먼저, 수평 및 경사지반에 따른 지반 가속도 운동 특성을 분석하였다. 경사지반 모델의 경우, 지진 시 사면 하부(downslope) 방향 응답이 사면 상부(upslope) 응답보다 크게 도출되었다. 이는 중력 가속도(g)의 영향으로 전단 파괴면 하부에 발생하는 가속도 응답이 $g \sin \alpha$ 만큼 증가하므로, 사면 하부 방향의 가속도 응답이 사면 상부 방향의 가속도 응답보다 크게 도출된 것으로 판단된다.
2. 다음으로, 지반에 관입된 말뚝 모멘트 응답 특성을 분석하였다. 모멘트 결과를 보면, 말뚝 두부에서 최대 혹은 최소 모멘트가 발생한 뒤 지반 내에서 말뚝 두부와 반대 부호의 모멘트가 발생하고, 지반 하부에서 모멘트가 0으로 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝 상단이 회전 구속되어 있으므로 최대 모멘트 반력이 발생하며, 이후 지반 반력의 영향으로 반대 방향 모멘트가 발생하는 것으로 판단된다.
3. 마지막으로, 입력가속도에 따른 구조물의 응답 특성을 분석하였다. 단주기 성분이 포함된 인공지진파(0.15-0.5s)가 가진되는 경우 고유주기가 비교적 작은 경사지반 모델(0.5-0.59s)에서 큰 응답이

도출되었으며, 장주기 성분이 포함된 정현파(1s)가 가진되는 경우 고유주기가 비교적 큰 수평지반 모델(0.55-0.64s)에서 큰 응답이 도출되는 것으로 나타났다.

4. 구조물의 응답은 지반 응답의 주기 성분과 구조물의 고유주기가 가까워지는 경우 공진현상에 의해 크게 증가할 수 있다. 그러므로 향후 말뚝 구조물의 설계 시 지반 응답의 특성 및 구조물의 고유주기를 적절히 고려한 설계법의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상연·박종배·박용부·김동수(2014), “동적 원심모형실험에 의한 점성토 지반에 근입된 말뚝지지 기초의 응답 스펙트럼 분석”, 『LHI Journal』, 5(2): 115~120.
2. 박용부·박종배·김상연·김동수(2014), “동적 원심모형실험에 의한 사질토에 근입된 말뚝지지 기초의 응답 스펙트럼 분석”, 『LHI Journal』, 5(1): 35~40.
3. 서승남·이용선·채광석(2004), “Fellenius 원호활동의 해석해”, 『대한토목학회논문집』, 24(6C): 367~374.
4. 윤정원(2021), “원심모형실험을 통한 잔교식 구조물의 내진성능 평가 및 응답스펙트럼해석법 개선사항 도출”, 박사학위논문, 과학기술연합대학원대학교.
5. 윤정원·김종관·이석형·한진태(2022), “잔교식 말뚝 구조물의 응답스펙트럼해석 시 지진하중을 고려한 지반 스프링 모델 제안”, 『한국지반공학학회논문집』, 38(9): 5~17.
6. 해양수산부(2014), 「항만 및 어항설계 기준 해설」, 세종.
7. Kim, D. S., N. R. Kim, Y. W. Choo, and, G. C. Cho (2013), “A Newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea”, 『KSCE Journal of Civil Engineering』, 17: 77~84.
8. Lee, S. H., Y. W. Choo, and D. S. Kim (2013), “Performance of An Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests”, 『Soil Dynamics and Earthquake Engineering』, 44: 102~114.

9. Schofield, A. N. (1981) "Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling", *Proceeding of the First International Conference on Recent Advanced in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic*, St. Louis, MO.
10. Tran, N. X., T. Bong, and S. R. Kim (2022), "Kinematic and Inertial Interaction of Single and Group Piles in Slope by Displacement Phase Relation", *Journal of Earthquake Engineering*, 26(7): 3639~3659.
11. Tran, N. X., T. Bong, B. S. Yoo, and S. R. Kim (2021), "Evaluation of the Soil-Pile Interface Properties in the Lateral Direction for Seismic Analysis in Sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140: 106473.
12. Yoo, B. S., B. Y. Hwang, N. X. Tran, J. W. Yun, and S. R. Kim (2023), "Evaluation of Liquefaction-Induced Lateral Force on Pile in Slope by Centrifuge Tests", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(3): 1033~1041.
13. Yun, J. W. and J. T. Han (2021a), "Dynamic Behavior of Pile-Supported Wharves by Slope Failure during Earthquake via Centrifuge Tests", *International Journal of Geo-Engineering*, 12(1), 33.
14. Yun, J. W. and J. T. Han (2021b), "Evaluation of Soil Spring Methods for Response Spectrum Analysis of Pile-Supported Structures via Dynamic Centrifuge Tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141: 106537.
15. Yun, J. and J. Han (2024), "Evaluation of Dynamic Interactions between Sloped Ground and Pile through Centrifuge Model Tests", *Journal of Earthquake Engineering*, 28(4): 1069~1092.

요 약

본 연구에서는 수평 및 경사지반에 관입된 말뚝지지 구조물의 거동 특성을 분석하기 위해 원심모형실험을 수행하였다. 실험 지반의 경우 단일 사질토로 단순화하여 수평 및 경사지반으로 조성하였다. 입력 지진파의 경우 정현파 및 인공지진파를 적용하였으며, 진폭을 0.04-0.25g로 변화시키면서 단계에 따라 지진파를 가진하였다. 본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 수평 및 경사지반에 따른 지반 가속도 및 말뚝 모멘트 응답 특성을 분석하였으며, 입력지진 및 지반 특성에 따른 구조물의 응답 특성을 분석하였다. 결과적으로, 단주기 성분이 포함된 인공지진파(0.15-0.5s)가 가진되는 경우 고유주기가 비교적 작은 경사지반 모델(0.5-0.59s)에서 큰 응답이 도출되었으며, 장주기 성분이 포함된 정현파(1s)가 가진되는 경우 고유주기가 비교적 큰 수평지반 모델(0.55-0.64s)에서 큰 응답이 도출되는 것으로 나타났다. 구조물의 응답은 지반 응답의 주기 성분과 구조물의 고유주기가 가까워지는 경우 크게 증가하므로, 향후 말뚝지지 구조물의 설계 시 지반 응답 특성 및 구조물의 고유주기를 적절히 고려한 설계법의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

주제어: 말뚝지지 구조물, 원심모형실험, 지진, 수평지반, 경사지반