

## 비대칭지반에 설치된 무리말뚝의 동적거동 분석

# Analysis of Dynamic Behavior of Group Piles in Asymmetric Ground

조 경 일<sup>1)</sup> · 강 흥 식<sup>2)</sup> · 정 구 식<sup>3)</sup> · 안 광 국<sup>†</sup>

Kyungil Cho · Hongsig Kang · Kusic Jeong · Kwangkuk Ahn

Received: September 5<sup>th</sup>, 2023; Revised: September 6<sup>th</sup>, 2023; Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2023

**ABSTRACT** : Structures such as bridge columns installed on the asymmetric ground such as mountain areas and sloping ground are subject to various loads such as wind, temperature, earthquake, and etc. The pile foundation is generally applied to bridge columns on the asymmetric ground in order to stably support structures. The behavior of the pile foundation supporting bridge columns changes due to various load conditions. In particular, ground-pile-structure interactions should be studied to analyze the behavior of the pile foundation that supports bridge columns effected by dynamic loads such as earthquakes. The pile foundation installed on the asymmetric ground effected by the earthquake has the complicated dynamic interaction between the foundation and the ground due to the ground slope, the difference in soil resistance according to the shaking direction, and the ground movements. In this study, the 1g shaking table tests were conducted to confirm the effect of the slope of the sloping ground on the dynamic behavior of group piles supporting the superstructure installed at the berm of the sloping sandy soil which is the asymmetric ground. The result shows that the acceleration of the pile cap and the superstructure decrease as the slope of the sloping ground increase, and the slope of the dynamic p-y curve of the pile decrease.

**Keywords** : Asymmetric ground, Sloping ground, Group pile, Dynamic behavior, Slope

**요 지** : 산악지역 및 경사지반과 같은 비대칭지반에 설치된 교각과 같은 구조물은 바람, 온도, 지진등의 다양한 하중을 받게 된다. 비대칭지반에 설치된 교각과 같은 구조물을 안정적으로 지지하기 위해 보편적으로 말뚝기초가 많이 사용되고 있다. 교각을 지지하는 말뚝기초의 거동은 다양한 하중조건에 의해 변화하게 된다. 특히 지진과 같은 동적하중이 작용하는 교각을 지지하는 말뚝기초의 거동을 분석하기 위해서는 지반-말뚝-구조물 상호작용이 검토되어야 한다. 지진이 작용하는 비대칭지반에 설치된 말뚝기초는 지반 경사, 진동방향에 따른 지반저항력 차이, 지반 변위 등에 의해 말뚝기초와 지반의 동적 상호작용은 매우 복잡해진다. 본 연구에서는 비대칭지반으로 경사사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 경사지반의 기울기가 미치는 영향을 확인하기 위해 1g 진동대 모형실험을 수행하였다. 그 결과, 경사지반의 기울기가 증가함에 따라 말뚝캡, 상부구조물의 가속도는 감소하는 것으로 확인되었으며, 말뚝의 동적 p-y 곡선의 할선기울기는 감소하는 것으로 확인되었다.

**주요어** : 비대칭지반, 경사지반, 무리말뚝, 동적거동, 기울기

## 1. 서 론

산업 및 경제 활동의 주요 기반시설인 도로 및 철도는 원활한 교통을 위해 신설 및 확장되고 있다. 교통시설인 도로 및 철도를 건설하기 위한 설계와 시공은 경제성 및 안정성 등을 목적으로 직선화된 노선이 채택되고 있는 경우가 많다. 이로 인해 시공이 어려운 산악지역이나 연약지반, 경사지반 등의 특이 구간에도 설계와 시공이 이루어지고 있다. 특이 구간에 대한 설계와 시공은 기존의 검토방법으로는 지반과 지반구조물에 대한 거동을 만족스럽게 분석하지 못하는 경우가 있어 특이 구간에 대한 거동 분석을 위해 모형실험 및 수치해석이 활용되고 있다(Ko, 1988; Yoo et al., 2007).

산악지역 및 경사지반과 같은 비대칭지반에 설치되는 교각과 같은 구조물은 바람, 온도, 지진등의 복잡한 하중조건을 받는다. 교각과 같은 구조물의 하중을 지반의 견고한 지지층에 안전하게 전달하기 위하여 일반적으로 말뚝기초가 사용되고 있으며, 다양한 하중조건을 고려하여 교각을 지지하는 말뚝기초의 거동을 분석하기 위해서는 지반-말뚝-구조물 상호작용을 적절히 모사하는 것이 필요하다. 특히, 구조물의 내진설계는 상부구조물뿐만 아니라 말뚝기초 및 말뚝기초 아래 지반의 영향까지 고려하여야 하며, 경사지반과 같은 비대칭지반에 설치된 말뚝은 진동방향에 따른 지반저항력 차이, 지반 변위 등에 의해 말뚝과 지반의 동적 상호작용이 매우 복잡해진다(Tran et al., 2020; Han et al., 2021).

1) Manager, Korea Rural Community Corporation

2) General Manager of Research Byeokdong Construction Co. Ltd.

3) Representing Director, Byeokdong Construction Co. Ltd.

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : [akk@cbnu.ac.kr](mailto:akk@cbnu.ac.kr))

말뚝과 지반의 상호작용을 분석하는 방법으로 정적 또는 반복수평 하중실험 결과로 제시된 p-y 곡선이 사용되고 있다(Matlock & Reese, 1960; Reese & Welch, 1975; API, 2000). 대부분의 p-y 곡선은 정적 하중조건에서 제시되었기 때문에 지진과 같은 동적하중을 받는 말뚝기초에 적용하기 어렵다. 이에 일부 연구자들이 진동대 및 동적 원심모형실험을 수행하여 동적 p-y 곡선을 분석 및 제시한바 있다(Yang et al., 2011; Yoo et al., 2013; Nguyen et al., 2018; Kim et al., 2018).

동적 p-y 곡선은 정적 p-y 곡선에 비해 지진하중을 받는 말뚝의 거동을 합리적으로 모사할 수 있다. 그러나, 대부분 p-y 곡선을 평가하기 위한 실험조건은 수평지반 조건에 대하여 수행되었을 뿐 경사지반을 고려한 p-y 곡선에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다(Tran et al., 2020).

Yoo et al.(2007)은 원심모형실험을 수행하여 매립층이 경사지로 형성된 지반에 시공된 교대기초의 거동분석을 통해 안정성을 확인하였을 뿐 매립층의 경사 및 지반경사에 의한 영향은 확인하지 못하였다. Bae et al.(2009)는 실내모형실험을 통해 말뚝기초가 매설된 모래지반의 기울기를 변화시켜 경사모래지반이 말뚝기초의 수평저항력에 미치는 영향을 확인하여 말뚝기초의 수평저항력과 비탈면 관계도를 제시하였으나 지진과 같은 동적하중 및 상부구조물에 의한 영향은 고려하지 못하였다. Tran et al.(2020)은 경사지반에 설치된 잔교식 안벽을 지지하는 말뚝기초의 동적거동을 분석하기 위해 동적원심모형실험을 수행하여 경사지반에 설치된 무리말뚝에 경사지반 및 무리말뚝 효과가 말뚝-지반 상호작용에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 말뚝기초의 동적 p-y 곡선은 지반경사, 지반의 잔류변위, 단일말뚝과 무리말뚝의 운동학적 힘 등 다양한 요인에 의해 매우 복잡한 형상을 보이게 됨을 확인하였다. 그러나 지반경사는 단일경사만이 고려되었을 뿐 지반경사에 의한 영향은 확인하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 비대칭지반으로 경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 경사지반의 기울기가 미치는 영향을 확인하기 위해 1g 진동대 모형실험을 수행하였다.

## 2. 1g 진동대 모형실험

### 2.1 1g 진동대 모형실험

비대칭지반으로 경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 경사지반의 기울기가 미치는 영향을 확인하기 위한 1g 진동대 모형실험은

Fig. 1과 같은 진동대 모형실험장치를 이용하였다. 기울기가 다른 경사모래지반을 조성하기 위한 모델박스는 지반의 분리거동과 모델박스 벽면에서 발생하는 반사파에 의한 영향을 방지하기 위해 단일구조와 스프링으로 조합된 적층 구조의 모델박스를 사용하였으며, 모델박스의 내부 크기는 폭 50cm 길이 50cm, 높이 55cm이다.

모형실험을 위한 상사법칙은 횡방향 지진력을 고려하여 말뚝의 휨강성에 대한 상사법칙을 적용하였으며(Iai, 1989), 상사비는 기성콘크리트말뚝을 원형으로 모형말뚝의 휨강성을 고려하여 39.2의 상사비로 결정하여 모형실험에 적용하였다. 모형말뚝의 휨강성은 1지점 하중실험을 수행하여 확인하였다(Yang, 2009; Kim et al., 2018; Tran et al., 2020).

Fig. 2는 경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 1g 진동대 모형실험 단면으로 상부구조물은 지반-말뚝-구조물의 상호작용에 영향을 미치는 국내의 지진특성을 고려하여 고유주기가 0.25s인 단주기 1자유도 모형 상부구조물을 Fig. 3(a)와 같이 제작하여 모형실험에 적용하였다.

무리말뚝은 Fig. 3(b)와 같이 말뚝기초의 중심 간격은 3D, 말뚝기초의 배열은 3×3 정방향을 고려하였으며, 모형 말뚝기초는 외경 12mm, 두께 2mm의 중공형 알루미늄파이프를 모형 말뚝캡은 강제거동을 위해 알루미늄판을 재료로 사용

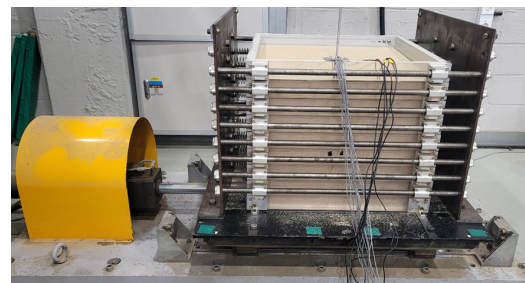


Fig. 1. Shaking table device

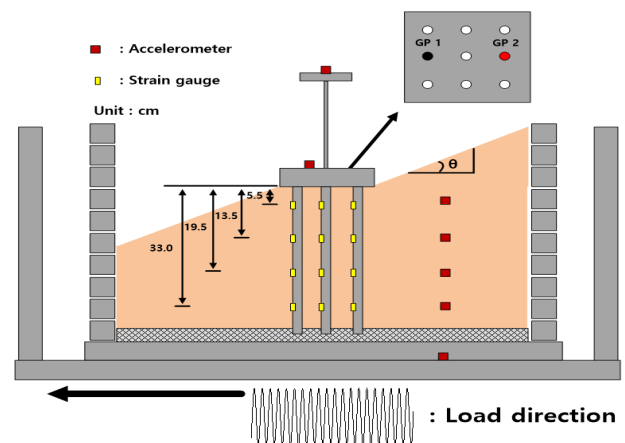


Fig. 2. Schematic of model test

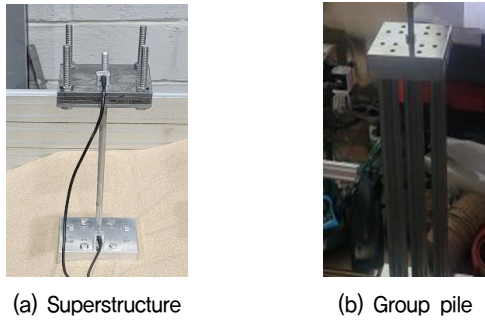


Fig. 3. Model in used test

하여 모형 무리말뚝을 제작하여 모형실험에 적용하였다. 상부구조물과 무리말뚝의 연결은 강결조건으로 무리말뚝과 모델박스는 힌지조건으로 연결하여 모형실험에 적용하였다.

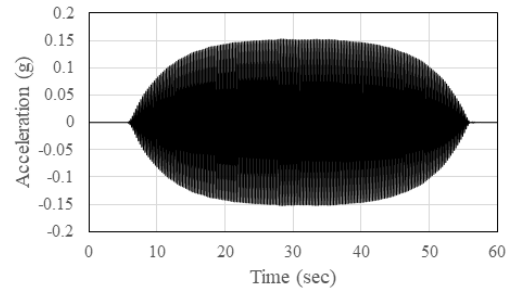
경사모래지반은 통일분류법에 의해 SP로 분류되는 주문진 표준사를 사용해 조성하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다. 경사모래지반의 상대밀도는 주문진 표준사의 최대건조단위중량과 최소건조단위중량을 고려하여 80%의 상대밀도를 갖도록 정적다짐을 수행하여 모형지반을 조성하였다. 경사모래지반의 기울기가 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위한 경사지반의 기울기는 모델박스 상부 표면까지 모형지반을 조성한 후 소요 기울기가 되도록 절토하여 조성하였으며, 모형실험에 적용한 경사지반의 기울기( $\theta$ )는 말뚝캡 저면을 기준으로 상향 및 하향으로 각각 0°, 15°, 25°를 적용하여 모형 경사모래지반을 조성해 모형실험에 적용하였다.

말뚝기초의 동적거동을 확인하기 위한 입력지진파는 상부구조물과 같이 국내의 지진 특성(Yoon et al., 2006)을 고려하여 0.25s의 고유주기를 갖는 Fig. 4와 같은 단주기 정현파를 모형실험에 사용하였으며, 입력지진파의 지진하중 크기는 0.15g를 모형실험에 적용하였다.

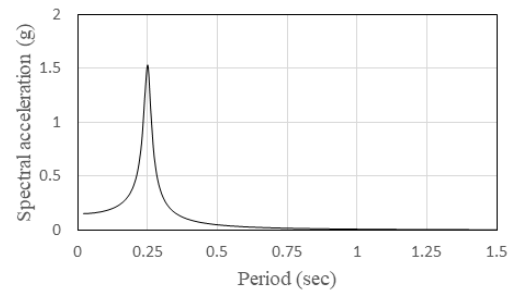
경사지반의 기울기가 경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위한 1g 진동대 모형실험은 Fig. 2와 같이 지반, 무리말뚝, 상부구조물이 조성되도록 ①무리말뚝의 말뚝 선단을 모델박스의 바닥에 수평변위 및 수직변위가 발생하지

Table 1. Jumunjin standard sand

Classification	Value
D10 (mm)	0.32
Cu	1.65
Cs	1.43
$\gamma_{d_{max}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.66
$\gamma_{d_{min}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.33
USCS	SP



(a) Time history



(b) Response spectrum analysis

Fig. 4. Input acceleration at bottom plate of shaking table device

않도록 고정시킨 후, ②80%의 상대밀도를 갖는 모형지반을 조성하기 위해 모델박스에 모래를 균등하게 나누어 투입한 후 정적다짐을 수행하여 모형지반을 조성하고 절토를 통해 경사지반의 기울기가 소요 기울기가 되도록 모형 경사지반을 조성하였다. 모형경사지반이 완료된 후 ③경사모래지반의 소단에 위치한 무리말뚝과 말뚝캡, 상부구조물을 연결하고 ④0.15g의 지진하중을 갖는 입력 지진파를 적용해 진동대 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 경사지반의 소요 기울기 별로 수행하였으며, 경사지반의 기울기에 따른 지반, 무리말뚝, 상부구조물의 동적거동을 확인하기 위한 계측기는 Fig. 4와 같이 말뚝기초에는 변형율계를 말뚝캡 및 지반, 상부구조물에는 가속도계를 설치하여 동적거동을 확인하였다.

## 2.2 동적 p-y 곡선 산정

모형실험을 통한 말뚝기초와 지반의 동적 상호작용을 확인하기 위한 동적 p-y 곡선은 지반에서의 가속도와 말뚝기초의 휨모멘트를 이용하여 산정할 수 있다. 지반반력 p는 Eq. (1)과 같이 말뚝 깊이에 따른 휨모멘트 분포 곡선을 2번 미분하여 얻을 수 있으며, 말뚝의 상대변위 y은 Eq. (2)와 같이 말뚝 깊이에 따른 휨모멘트 분포 곡선을 2번 적분하여 산정할 수 있다. 이때 말뚝기초의 휨모멘트는 말뚝기초에서 측정된 변형율에 휨강성을 곱하여 계산되며, 말뚝의 상대변위는 지반의 변위를 고려하여 계산할 수 있다.

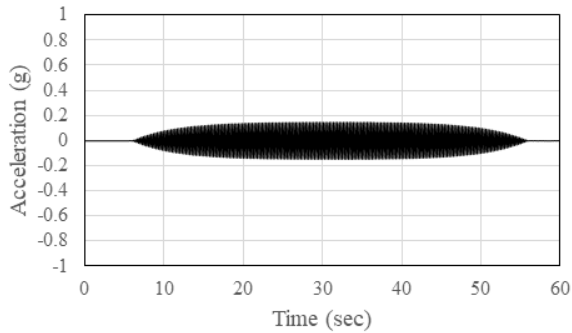
$$p = \frac{d^2 M_{(z)}}{dz^2} \quad (1)$$

$$y = \iint \frac{M_{(z)}}{EI} dz^2 \quad (2)$$

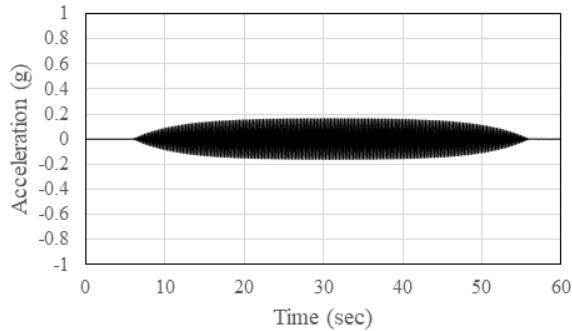
여기서,  $M_{(z)}$ 는 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포곡선이며,  $EI$ 는 말뚝의 휨강성이다.

깊이에 따른 말뚝의 휨모멘트 및 지반의 변위 분포곡선은 말뚝기초 및 지반의 깊이 별로 측정된 휨모멘트 및 변위 데이터를 이용하여 Cubic spline 방법을 이용하여 구할 수 있다(Brandenberg et al., 2010; Haiderali & Madabhushi, 2016; Bao et al., 2018).

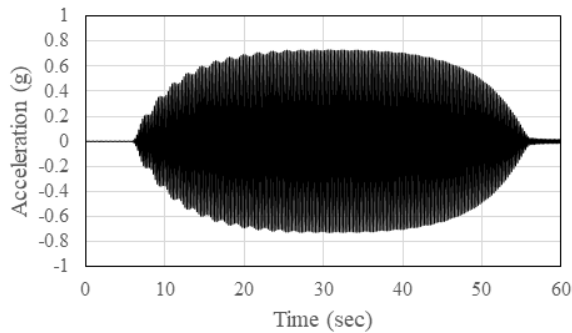
지진하중을 받는 지반-말뚝-구조물 시스템의 상호작용은



(a) Top ground



(b) Footing



(c) Superstructure

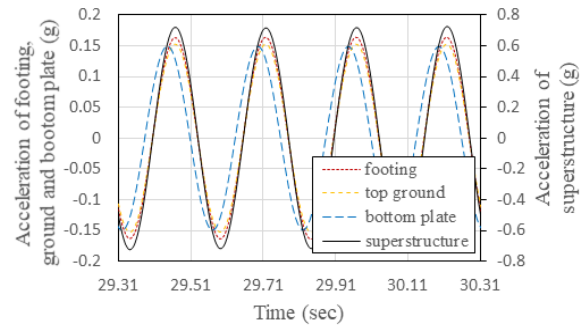
Fig. 5. Time history of acceleration (0.15g)

상부구조물의 관성력에 의한 영향이 크다(Suzuki et al., 2014; Kwon & Yoo, 2016). 그러므로 본 연구에서는 상부구조물의 관성력이 크게 나타난 최대가속도가 발생된 시점을 고려하여 지반반력과 말뚝변위의 관계를 통해 말뚝의 동적거동을 분석하였다.

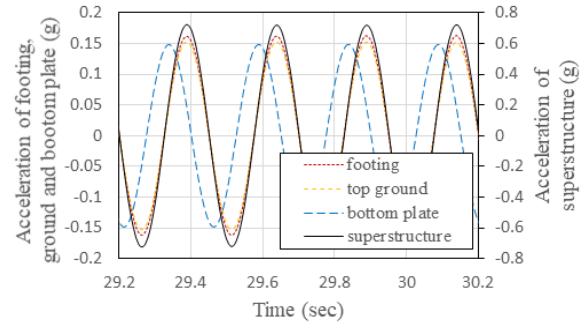
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 경사지반의 기울기에 따른 가속도 변화

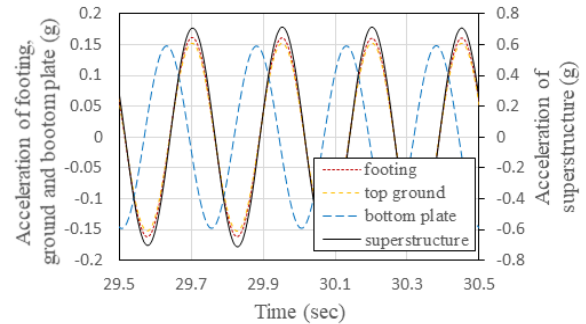
경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 상부지반, 말뚝캡, 상부구조물의 가속도 거동은 경사지반의 기울기와 관계 없이 Fig. 5와 같이 입력지진과 거동과 유사하게 나타났으나 Fig. 6 및 Fig. 8과 같이 최대가속도



(a) Slope 0°



(b) Slope 15°



(c) Slope 25°

Fig. 6. Phase on time history of acceleration

의 위상차이 및 최대가속도 크기는 경사지반의 기울기에 따라 다르게 나타났다.

최대가속도의 위상차이는 Fig. 6과 같이 상부지반, 말뚝캡, 상부구조물에선 위상차이가 발생하지 않았으나, 입력지진파가 적용된 진동파와는 위상차이가 발생하였다. 그리고 경사지반의 기울기에 따라 진동파의 위상차이가 변화하는 것으로 나타나 Fig. 7과 같이 가속도 위상차를 경사지반의 기울기에 따라 비교하였다.

가속도 위상차는 Tran et al.(2020)의 방법을 고려하여 Eq. (3)과 같이 입력지진파가 적용되는 진동파 및 상부구조물, 말뚝캡, 지반에서의 최대가속도 발생 시간 차이를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\psi_a = 2\pi \frac{t_{aA} - t_{aB}}{T} \quad (3)$$

여기서,  $\psi_a$ 는 가속도 위상차(radian),  $t_{aA}$ 는 상부구조물, 말뚝캡, 지반에서의 최대가속도 발생 시간,  $t_{aB}$ 는 입력지진파 최대가속도 발생 시간,  $T$ 는 입력지진파의 주기이다.

진동파와의 위상차이는 진동파가 먼저 거동한 후 상부지반 및 말뚝, 상부구조물의 거동이 위상차이 만큼 발생한 것 진동파와의 위상차이는 진동파가 먼저 거동한 후 상부지반 및 말뚝, 상부구조물의 거동이 위상차이 만큼 발생한 것을 의미하며, 위상차이 만큼 지반의 운동학적 힘이 말뚝 및 상부구조물에 작용한 것으로 보인다. 그리고 상부지반과 말뚝캡, 상부구조물의 동일한 위상은 말뚝캡과 상부구조물의 거동이 말뚝캡 인근 지반의 거동에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 보인다.

경사지반의 기울기에 따른 진동파와 상부지반 및 말뚝캡, 상부구조물의 위상차는 Fig. 8과 같이 경사지반의 기울기가 증가할 수록 기울기가 0°인 경우를 기준으로 5~7배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 경사지반의 기울기 증가로 인해 말뚝기초를 지지하는 지반강성의 감소와 지반이 말뚝을 밀어

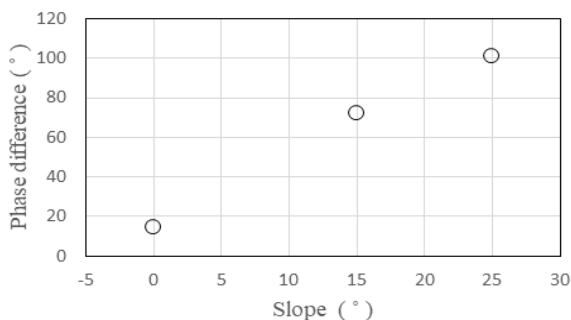


Fig. 7. Acceleration phase difference with slope

주는 효과가 크게 발생하였기 때문인 것으로 보인다.

상부지반, 말뚝캡, 상부구조물에서의 최대가속도는 경사지반의 기울기에 따라 Fig. 8과 같이 입력지진파(0.15g)에 비해 상부지반의 경우는 경사지반의 기울기에 관계 없이 1.02배, 말뚝캡의 경우는 1.08~1.09배, 상부구조물은 4.76~4.89배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 9와 같이 입력지진파와 동일한 고유주기 특성으로 인한 영향 때문인 것으로 보인다.

경사지반의 기울기에 따른 상부구조물의 최대가속도는 Fig. 8과 같이 경사지반의 기울기가 0°인 경우를 기준으로 기울기가 증가하면 최대가속도는 0.8~2.57% 미소하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 경사지반의 기울기에 따른 지반강성의 감소로 지반-말뚝-구조물의 상호작용을 억제하기 위한 구속효과가 감소하여 말뚝을 통해 전달되는 지진에너지의 소산으로 인해 상부구조물의 가속도가 감소한 것으로 보인다. 말뚝캡에서 최대가속도는 상부구조물의 경우와 유사하게 경사지반의 기울기에 따라 경사지반의 기울기가 0°인 경우를 기준으로 기울기가 증가하면 최대가속도는 0.61~1.22% 미소하게 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 상부구조물의 경우와 유사하게 경사지반의 기울기에 따라 지반강성이 감소하였기 때문인 것으로 보인다. 상부지반에서 최대가속도는 지반경사의 기울기와 관계 없이 동일하게 나타났으며, 이는 Fig. 2와 같이 경사지반과의 거리에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

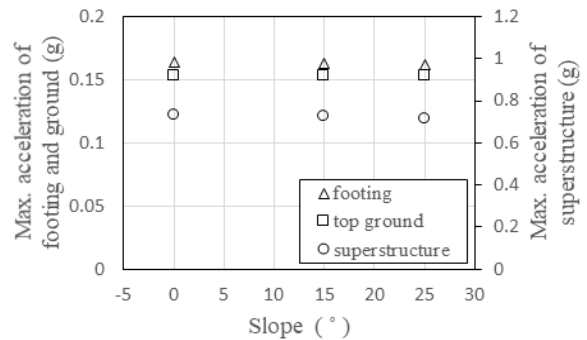


Fig. 8. Max acceleration with slope

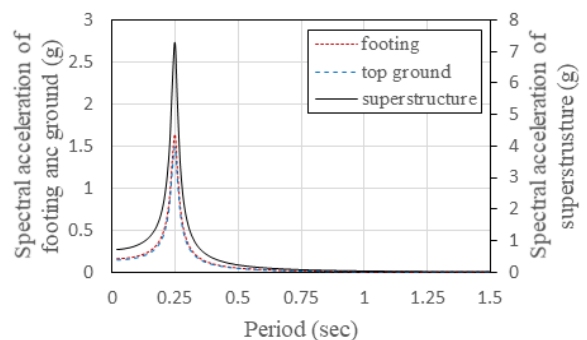


Fig. 9. Response spectrum analysis

### 3.2 경사지반의 기울기에 따른 말뚝의 휨모멘트

경사지반의 기울기가 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 무리말뚝 내 말뚝기초의 휨모멘트 분포를 확인하였다. 말뚝기초의 동적거동은 상부구조물에 의한 영향이 크며(Yang, 2009; Kwon & Yoo, 2016). 상부구조물의 가속도는 경사지반의 기울기에 영향을 받는 것으로 확인됨에 따라 동일한 상부구조물의 관성력(0.6g)을 고려하여 무리말뚝 내 경사지반 인근에 위치한 GP1과 경사지반과 거리가 있는 GP2에서 발생한 휨모멘트를 Fig. 10과 같이 경사지반의 기울기에 따라 비교하였다.

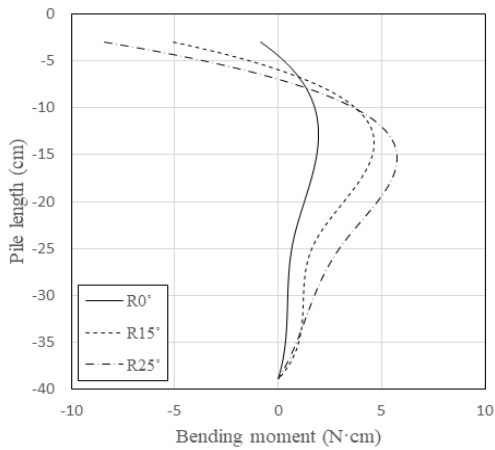
경사지반과의 거리에 따른 무리말뚝 내 말뚝기초의 휨모멘트 분포는 Fig. 10과 같이 경사지반과의 거리에 따라 거동이 다르게 나타났으며, 경사지반과의 거리에 따른 말뚝기초에서의 최대 휨모멘트 발생 위치는 경사지반 인근 GP1의 경우 말뚝 두부에서 발생하였으며, 경사지반과 거리가 있는 GP2의 경우에는 말뚝기초 내에서 발생하였다. GP1에서 경사지반의 기울기 변화에 따른 말뚝 두부에서의 최대 휨모멘트는 경사지반의 기울기가 0°, 15°, 25°로 증가할 수록 2.40~

2.99배 증가하는 것으로 나타났으며, GP2에서 경사지반의 기울기 변화에 따른 말뚝기초 내 최대 휨모멘트의 발생 위치는 경사지반의 기울기가 0°, 15°, 25°로 증가할 수록 2.30~3.67배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구와 유사하게 상부구조물의 관성거동에 의한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전거동에 의한 영향(Ahn, 2003; Kim et al., 2018)과 경사지반과의 거리에 의한 영향, 경사지반의 기울기 변화에 따른 말뚝기초를 지지하는 지반강성의 변화에 의한 영향이 복합적으로 작용하였기 때문인 것으로 보인다.

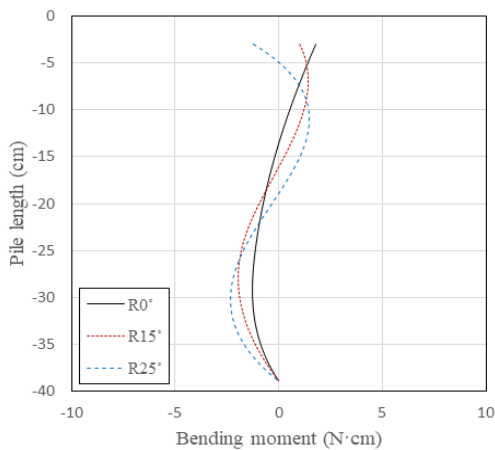
### 3.3 경사지반 기울기에 따른 무리말뚝의 동적 p-y 곡선

경사지반의 기울기가 무리말뚝과 지반의 동적상호작용에 미치는 영향을 확인하기 위하여 말뚝기초에 대한 동적 p-y 곡선을 확인하였다. 무리말뚝의 휨모멘트 분포는 경사지반과의 거리 및 경사지반의 기울기에 영향을 받는 것으로 확인됨에 따라 무리말뚝 내 경사지반 인근에 위치한 GP1과 경사지반과 거리가 있는 GP2에서 산정한 동적 p-y 곡선을 말뚝 깊이별로 경사지반의 기울기에 따라 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 비교하였다.

Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 무리말뚝의 동적 p-y 곡선의 할선기울기는 말뚝기초의 깊이, 경사지반과의 거리, 경사지반의 기울기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 말뚝기초의 깊이에 따른 동적 p-y 곡선의 할선기울기는 지표면으로부터 7.0D 위치에서의 할선기울기가 13.8D 위치에서의 할선기울기에 비해 1.15~1.91배 크게 나타났으며, 20.4D 위치에서의 할선기울기에 비해 13.8~77.0% 작게 나타났다. 말뚝기초의 깊이에 따른 동적 p-y 곡선의 할선기울기의 변화는 상부구조물의 관성거동으로 인한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전거동이 말뚝기초 인근 지반을 구속하여 지반강성을 증가시켰기 때문에 7.0D 위치에서의 할선기울기가 13.8D 위치에서의 할선기울기 보다 크게 나타난 것으로 보인다(Ahn, 2003; Kim et al., 2018). 경사지반과의 거리에 따른 말뚝기초의 동적 p-y 곡선의 할선기울기는 경사지반 인근 GP1에서의 할선기울기가 경사지반과 거리가 있는 GP2에서의 할선기울기에 비해 18.3~67.4% 작게 나타났으며, 이는 경사지반 인근 말뚝기초에 작용하는 지반강성과 경사지반과 거리가 있는 말뚝기초에 작용하는 지반강성의 차이에 의한 영향 때문인 것으로 보인다. 그리고 경사지반과의 거리에 따라 말뚝기초의 변위 및 지반반력의 크기 차이가 발생하였으며, 지표면으로부터 20.4D 위치에서 말뚝기초의 변위 방향이 다르게 나타났다. 이는 휨모멘트 거동과 유사하게 상부구조물의 관성거동에 의한 말뚝캡과 말뚝기초의 회전거동에 의한

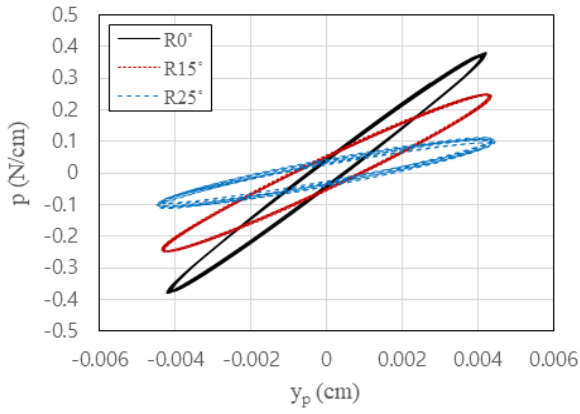


(a) GP 1

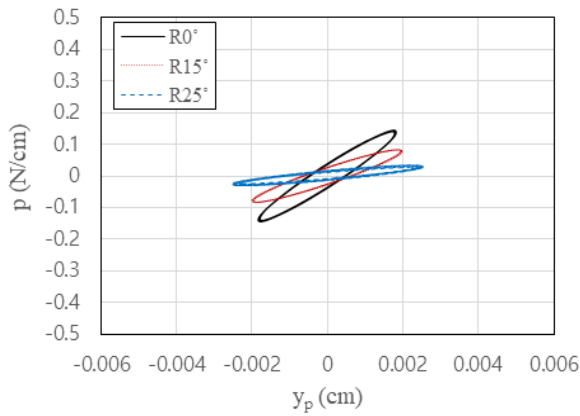


(b) GP 2

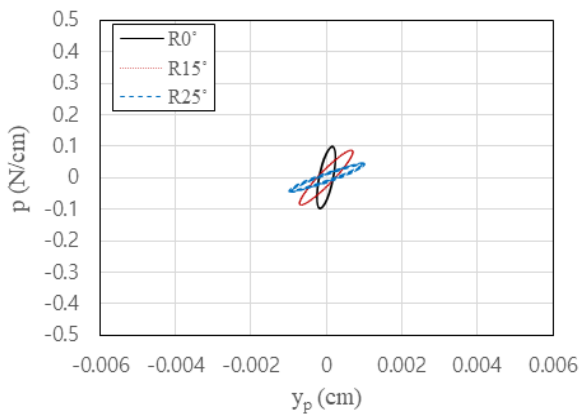
Fig. 10. Bending moment distribution (0.6g)



(a) 7.0D

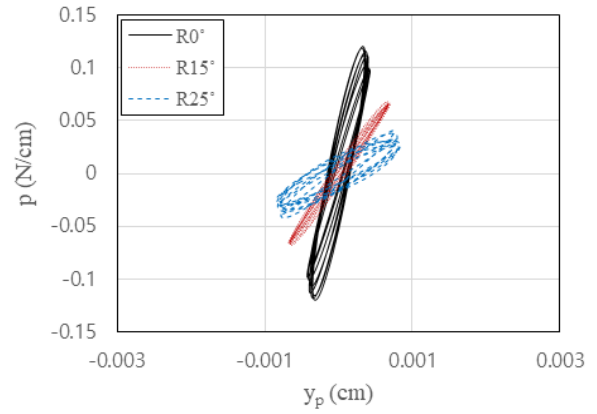


(a) 13.8D

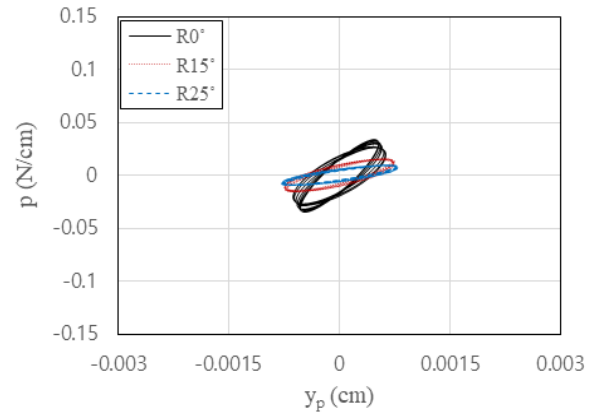


(a) 20.4D

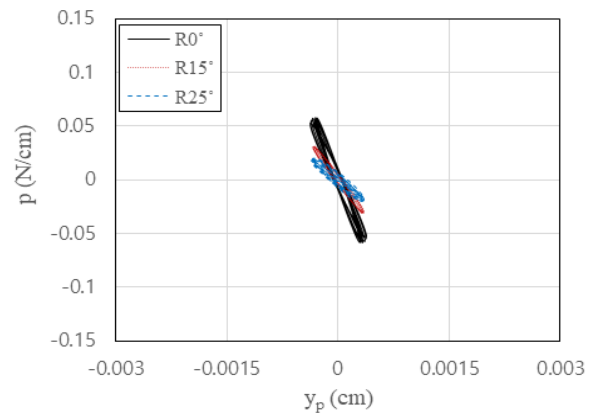
Fig. 11. Dynamic p-y loop of GP1



(a) 7.0D



(a) 13.8D



(a) 20.4D

Fig. 12. Dynamic p-y loop of GP2

영향 때문인 것으로 보인다.

경사지반의 기울기에 따른 동적 p-y 곡선의 할선기울기는 경사지반의 기울기가 0°, 15°, 25°로 증가할 수록 GP1에서의 할선기울기는 36.3~88.2% 감소하는 것으로 나타났으며, GP2에서의 할선기울기는 28.5~78.0% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 경사지반의 기울기 변화에 의한 영향으로 경사지반의 기울기가 변화함에 따라 말뚝기초를 지지하는 지반강성이 변화하였기 때문인 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

비대칭지반으로 경사모래지반의 소단에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 경사지반의 기울기가 미치는 영향을 확인하기 위해 경사지반의 기울기를 0°, 15°, 25°로 변화시켜 1g 진동대모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경사지반의 기울기 변화에 따라 하부지반(지동판)과 상부지반, 말뚝캡, 상부구조물의 가속도 거동에 위상차가 발생하며, 이는 기존 연구와 유사하게 지반의 운동학적 힘이 무리말뚝 및 상부구조물에 작용한 것으로 보인다 (Tran et al., 2020). 경사지반의 기울기에 따른 말뚝캡 및 상부구조물에서의 최대가속도는 경사지반의 기울기가 증가할 수록 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 경사지반의 기울기 증가로 인해 말뚝기초를 지지하는 지반강성의 감소에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.
- (2) 무리말뚝 내 말뚝기초의 휨모멘트는 경사지반과의 거리 및 경사지반의 기울기 변화에 따라 최대 휨모멘트 및 최대 휨모멘트 발생 위치가 변화하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구와 유사하게 상부구조물의 관성거동에 의한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전거동에 의한 영향과 경사지반과의 거리 및 경사지반의 기울기 변화에 따른 지반강성 차이에 의한 영향이 복합적으로 작용하였기 때문인 것으로 보인다.
- (3) 지반과 말뚝의 상호작용을 확인하기 위한 동적 p-y 곡선의 활선기울기는 말뚝기초의 깊이 및 경사지반과의 거리, 경사지반의 기울기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 말뚝기초의 깊이에 따라 동적 p-y 곡선의 활선기울기는 변화하는 것으로 나타났으며, 경사지반과의 거리에 따라 동적 p-y 곡선의 활선기울기는 경사지반 인근에서의 말뚝기초가 경사지반과 거리가 있는 말뚝기초에 비해 작게 나타났다. 그리고 경사지반의 기울기가 증가함에 따라 동적 p-y 곡선의 활선기울기는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 상부구조물의 관성거동에 의한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전거동에 의한 영향 및 경사지반의 기울기 변화에 따라 말뚝기초를 지지하는 지반강성의 변화에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.
- (4) 이상과 같이 경사지반의 기울기 변화는 지반-말뚝-상부구조물 상호작용에 서로 다른 복잡한 메커니즘을 발생시켜 말뚝과 지반의 동적거동에 영향을 미치는 것으로 확인됨에 따라 경사지반에 설치된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 정확한 내진설계를 위해서는 경사지반의 기울기 변화에 의한 영향이 고려되어야 할 것으로 보인다.

## References

1. Ahn, K. K. (2003), Pile-soil-pile interaction in pile groups under lateral loading, Ph D. dissertation, Illinois Tech, Chicago, USA.
2. American Petroleum Institute (API) (2000), Recommended practices for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 21th edn, Washington, DC.
3. Bao, N. N., Nghiem, X. T. and Kim, S. R. (2018), Evaluation of dynamic p-y curves of group piles using centrifuge model tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 5, pp. 53~63 (In Korean).
4. Bae, J. S., Kim, J. S. and Kwon, M. J. (2009), A study on the rectangular-shaped passive row piles in inclined sand-ground by model test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 11, pp. 39~51 (In Korean).
5. Brandenberg, S.J., Wilson, D.W. and Rashid, M.M. (2010), Weighted residual numerical differentiation algorithm applied to experimental bending moment data, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 854~863.
6. Haiderali, A.E. and Madabhushi, G. (2016), Evaluation of curve fitting techniques in deriving p-y curves for laterally loaded piles, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 34, No. 5, pp. 1453~1473.
7. Han, J. H., Ahn, S. N., Yoon, H. C. and Jung, J. W. (2021), Analysis of dynamic p-y curve characteristics according to mode shape of structure using shaking table tests, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 5, pp. 245~250 (In Korean).
8. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *soils and foundations*, *JSSMFE*, Vol. 29, No. 1, pp. 105~118.
9. Kim, S. h., Ahn, K. K. and Kang, H. S. (2018), Dynamic behavior of group piles according to pile cap embedded in sandy ground, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 19, No. 10, pp. 35~41 (In Korean).
10. Ko, H. Y. (1988), Summary of the State of art in Centrifuge Model Testing, *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield(des), Balkema, pp. 11~18.
11. Kwon, S. Y. and Yoo, M. T. (2016), Parametric study of dynamic soil-pile-structure interaction in dry sand by 3D numerical mode, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 9, pp. 51~62 (In Korean).
12. Matlock, H. and Reese, L.C. (1960), Generalized solutions for laterally loaded piles, *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division*, Vol. 86, No. 5, pp. 63~94.
13. Nguyen, B.N., Tran, N.X., Han, J.T. and Kim, S.R. (2018), Evaluation of the dynamic p-yp loops of pile-supported structures on sloping ground, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 5821~5842.
14. Reese, L.C. and Welch, R.C. (1975), Lateral loading of deep foundations in stiff clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 101, No. 7, pp. 633~649.
15. Suzuki, H., Tokimatsu, K. and Tabata K. (2014), Factors affecting stress distribution of a 3×3 pile group in dry sand based on three-dimensional large shaking table tests, *Journal of Soils and Foundations*, the Japanese Geotechnical Society, Vol. 54, No. 4, pp. 699~712.
16. Tran, N. X., Yoo, B. S. and Kim, S. R. (2020), Dynamic interaction of single and group piles in sloping ground, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 1, pp. 5~15 (In Korea).
17. Yang, E. K. (2009), Evaluation of Dynamic p-y Curves for a Pile in Sand from 1g Shaking Table Tests, Ph. D. Dissertation,



- Seoul National University, South Korea (In Korean).
18. Yang, E.K., Jeong, S.S., Kim, J.H. and Kim, M.M. (2011), Dynamic p-y backbone curves from 1g shaking table tests, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 813~821 (In Korean).
  19. Yoo, N. J., Jun, S. H. and Hong, Y. K. (2007), Centrifuge modelling of bridge abutment foundation on the sloped ground, *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl, Univ., Korea*, No. 27 B, pp. 209~214 (In Korean).
  20. Yoo, M.T., Choi, J.I., Han, J.T. and Kim, M.M. (2013), Dynamic p-y curves for dry sand by dynamic centrifuge tests, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 1082~1102 (In Korean).
  21. Yoon, J. K., Kim, D. S. and Bang, E. S. (2006), Development of site classification system and modification of design response spectra considering geotechnical site characteristics in Korea (I) - Problem statements of the current seismic design code, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 39~50 (In Korean).