

# 지진 시 사질토 지반에 근입된 무리말뚝의 말뚝 캡 크기가 무리말뚝 효과에 미치는 영향

## A Group Pile Effect on Changing Size of Pile Cap in Group Pile under Sand Soil in Earthquake

이 현 근<sup>1)</sup> · 안 광 국<sup>†</sup> · 강 흥 식<sup>2)</sup>

Hyunkun Lee · Kwangkuk Ahn · Hongsig Kang

Received: August 26<sup>th</sup>, 2019; Revised: September 4<sup>th</sup>, 2019; Accepted: September 27<sup>th</sup>, 2019

**ABSTRACT** : The interaction between the ground and structures should be considered for seismic design of group piles supporting the superstructure. The p-y curve has been used widely for the analysis of nonlinear relationship between the ground and structures, and various researches have conducted to apply the dynamic p-y curve for seismic design of group piles. This curve considers the interaction between the ground and structures under the dynamic load such as an earthquake. However the supported effect by the pile cap and the interaction by inertia behavior of superstructures. Therefore, the shaking table test was conducted to verify the effect of the change of the pile cap in group piles supporting superstructures embedded in sandy soil. The test condition is that the arrangement and distance between centers of piles are fixed and the length of the pile cap is changed for various distances between the pile cap side and the pile center. The result shows that the distance between the pile cap side and the pile center have an effect on the dynamic p-y curve and the effect of group piles.

**Keywords** : Group pile, Seismic design, Pile cap, Pile group effect

**요 지** : 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 내진설계 시 지반-구조물의 상호작용이 고려되어야 한다. 무리말뚝 설계 시 지반과 구조물의 비선형 관계는 p-y 곡선이 많이 사용되고 있으며 지진과 같은 동적하중조건에서 지반-구조물의 상호작용이 고려된 동적 p-y 곡선을 무리말뚝의 내진설계에 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이와 같은 연구는 말뚝 캡에 의한 지지효과 및 상부구조물의 관성거동에 의한 상호작용은 고려되지 않았다. 이에 본 연구에서는 사질토 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 말뚝 캡의 변화가 무리말뚝에 미치는 영향을 확인하기 위해 말뚝의 배열 및 중심 간격은 고정하고 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격을 변화시켜 진동대 모형실험을 수행하였다. 그 결과 무리말뚝에서 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격의 변화가 말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리말뚝 효과에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

**주요어** : 무리말뚝, 내진설계, 말뚝 캡, 무리효과

## 1. 서 론

말뚝의 내진설계 시 말뚝과 지반 사이의 동적상호작용이 반드시 고려되어야 하며, 이를 위해 실무에서는 지반을 스프링으로 치환하고 상부구조물의 관성력을 말뚝 머리에 추가적인 하중으로 적용시켜 말뚝에 대하여 횡방향 해석을 수행하는 등가정적해석방법이 보편적으로 사용되고 있다. 등가정적해석 시 지반 스프링의 강성은 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선이 사용되고 있다. p-y 곡선은 다양한 지반 조건에서 말뚝의 두부에 정적 또는 반복 하중을 가하는 현장 및 실내실험을 통해 제안되었으나 대부분의 p-y 곡선은

말뚝 두부에 하중을 가하는 조건에서 제안되었을 뿐 지진과 같이 지반의 변형으로 인한 말뚝과 지반 사이의 상호작용 및 상부구조물의 관성력에 의한 상호작용은 고려되지 못하였다 (Reese et al., 1974; API, 1987; Matlock, 1970; Murchison & O'Neill, 1984). 그러므로 지진과 같은 동적하중조건에서 제안된 p-y 곡선의 활용은 적합하지 않다(Ting et al., 1987; Dou & Byrne., 1996; Rovithis et al., 2009). 이에 동적하중 조건에서 지반, 말뚝, 상부구조물의 상호작용을 고려한 동적 p-y 곡선을 내진설계에 활용하기 위해 Yang et al.(2009)은 사질토 지반에서, Han et al.(2010)은 연약한 점토 지반에서 말뚝의 휨강성 및 지진파의 가속도 크기, 진동수 등을

1) Director, Osong Enterprise Organization, Chungbuk Development Corporation

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

2) R & D Manager, R & D Department, Byeokdong Construction Co. Ltd.

변화시켜 진동대 모형실험을 수행하였다. 그 결과 동적하중 조건에서 말뚝의 동적 p-y 곡선을 확인하였으며, 등가정적 해석에 활용할 수 있는 동적 p-y 중추곡선을 제안하였다. 상부구조물을 지지하는 말뚝은 여러 개의 말뚝을 말뚝 캡으로 연결한 무리말뚝이 보편적으로 사용되고 있으며, 횡방향 하중을 받는 무리말뚝은 인접 말뚝 간의 상호작용으로 인해 단일말뚝에 비해 지반반력이 작게 되는 무리효과가 발생하게 된다. 실무에서 이를 정량적으로 반영하기 위해 단일말뚝과 무리말뚝의 지반반력의 비인 p-승수 개념이 사용되고 있다. 이러한 p-승수는 여러 연구자들에 의해 정적 또는 반복하중 조건에서 제안되었을 뿐 동적하중조건에서 지반, 말뚝, 상부구조물의 상호작용을 고려한 연구결과는 많지 않다 (US Army, 1993; Reese et al., 1996; AASHTO, 2000). 이에 Kim et al.(2002) 및 Yang et al.(2010)은 지진 시 사질토 지반에 설치된 무리말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리효과를 확인하기 위해 말뚝 중심 간격을 변화시켜 진동대 모형실험을 수행하였으며, 그 결과 동적하중조건에서 무리말뚝에 사용할 수 있는 동적 p-승수를 제안하였다. 그러나 동적하중조건에서 무리말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리효과는 말뚝 캡이 지표면 위에 위치하고 상부구조물은 단순중량으로 말뚝 캡 상부에 적용한 조건에서 제안되었을 뿐 지반에 근입된 말뚝 캡에 의한 영향 및 상부구조물의 관성력에 의한 영향은 고려하지 못하였다. 이에 Suzuki et al.(2014) 및 Kim et al.(2018)은 말뚝 캡의 지반 근입 여부가 지진 시 상부구조물 및 무리말뚝에 미치는 영향을 확인하기 위해 진동대 모형실험을 수행하였으며, 그 결과 말뚝 캡의 근입이 상부구조물 및 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하였다. 이와 같이 동적하중조건에서 말뚝 캡의 영향은 근입 유무만 확인되었을 뿐 말뚝 캡 변화에 따른 영향은 고려하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 지진 시 사질토 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 말뚝 캡 크기 변화에 따른 영향을 확인하기 위해 말뚝 캡의 크기에 영향을 미치는 말뚝의 배열 및 중심 간격, 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격 중 말뚝의 배열과 중심 간격은 고정하고 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격을 변화시켜 진동대 모형실험을 수행하였다. 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격은 구조물기초설계기준(2009)에 제시된 1.25D를 기준으로 0.75D, 1.25D, 2.00D, 2.75D로 변화시켜 진동대 모형실험을 수행하였다.

## 2. 모형실험

지진 시 사질토 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 말뚝 캡의 변화가 무리말뚝에 미치는 영향을 확

인하기 위한 모형실험은 길이 1m, 폭 1m인 1축 진동대 실험장치를 사용하였다. 그리고 실험에 사용된 모형토조는 지진 시 흙의 분리거동을 모사하기 위해 길이 60cm, 폭 60cm, 높이 5cm인 단일구조를 9층 적층한 적층구조의 모형토조를 사용하였으며, 모형토조 벽면에는 진동으로 인해 반사되어 발생하는 반사파를 감소시키기 위해 스프링을 설치하였다. Fig. 1은 모형실험에 사용한 진동대 실험장치 및 적층구조의 모형토조이다.

모형실험은 Iai & Sugano(1999)가 제안한 상사법칙 중 Type 2를 적용하였으며, 상사비는 모형토조 및 실험 재료의 한계로 인해 말뚝 지름에 대한 상사비는 충족시키지 못하였지만 말뚝의 횡방향 거동에 영향을 미치는 휨강성에 대한 상사비는 충족시켰다. 모형실험에 사용된 상사비는 말뚝 재료에 1지점 하중 실험을 수행하여 24.5의 상사비로 결정하였다. 모형실험에서 상부구조물은 Fig. 2(a)와 같은 교각 구조물을 원형으로 교각 구조물의 중량과 강성도, 상사비를 고려해 Fig. 2(b)와 같은 고유주파수가 1.58초인 1자유도 모형구조물을 제작하였다. 무리말뚝은 기성 콘크리트 말뚝을 이용해 말뚝 중심 간격은 4D, 말뚝의 배열은 3×3 정방향인 무리말뚝을 원형으로 상사비를 고려해 Fig. 3(a)와 같이 제작하였다. 말뚝은 외경 12mm, 두께 2mm인 중공형 알루미늄관을 사용하였으며, 말뚝 캡은 강제거동을 위해 알루미늄판을 재료로 콘크리트 설계기준과 구조물기초설계기준을 만족하도록 교각 구조물의 하중과 상사비를 고려해 8cm의

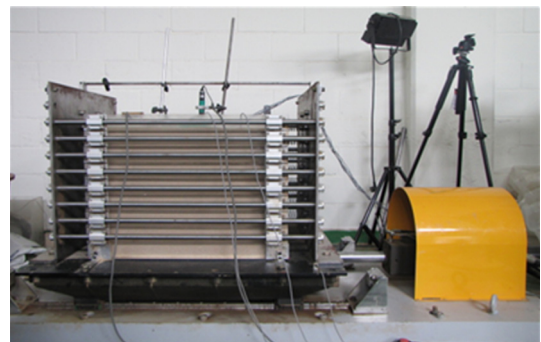
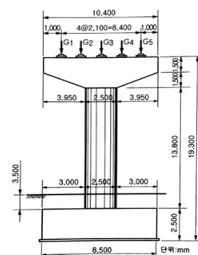


Fig. 1. Shaking table and model box

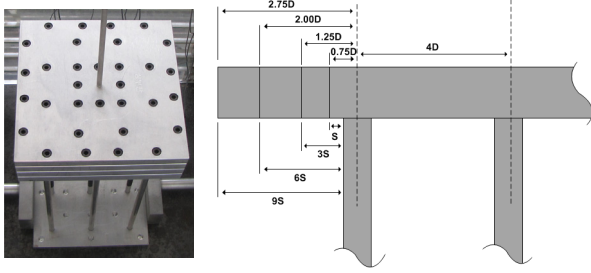


(a) Prototype



(b) Photo of model test

Fig. 2. Superstructure used in test



(a) Photo of group pile and cap (b) Scale of pile cap and cap

Fig. 3. Schematic diagram of group pile

두께를 적용하였고 말뚝 캡의 변화가 무리말뚝에 미치는 영향을 확인하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이의 간격을 0.75D, 1.25D, 2.00D, 2.75D로 변화시켰다. 상부구조물과 무리말뚝의 연결은 강결조건으로 말뚝 캡 상부 중앙에 탭을 내어 상부구조물을 삽입해 고정시켰으며, 무리말뚝의 연결은 말뚝 캡과 말뚝을 강결조건으로 말뚝 캡에 탭을 내어 말뚝을 삽입해 고정시켰다.

사실토 지반은 통일분류법에 의해 SP로 분류되는 균등계수가 1.65 및 곡률계수가 1.43인 국내 주문진 표준사를 이용하여 조성하였으며, 평균 74.2%의 상대밀도를 갖는 균일한 지반으로 조성하기 위해 15회에 나누어 진동다짐을 수행하였다. 진동다짐은 5mm의 진폭을 갖는 5Hz의 정현파를 20초 동안 모형토조에 하부에 적용하는 방법으로 수행하였다. 모형실험에 적용한 지진파는 상부구조물 및 무리말뚝, 지반에 영향을 미칠 수 있는 지진파로 다양한 주기적 특성을 갖는 지진파형 중 단주기 특성이 지배적인 Fig. 4와 같은 Ofunato 지진파를 모형실험에 적용하였다. 모형실험에 적용한 지진파의 지진하중은 실 지진파의 하중 크기를 0.15g로 변환시켜 모형실험에 적용하였다.

말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격에 따른 말뚝 캡 크기 변화가 무리말뚝에 미치는 영향을 확인하기 위한 진동대

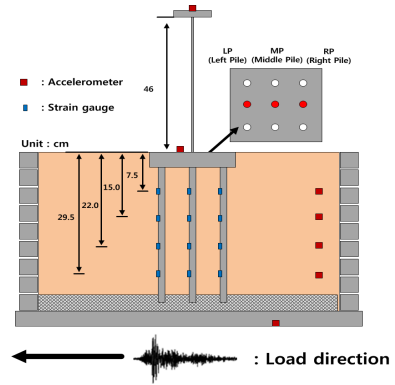


Fig. 5. Schematic of model test

모형실험은 Fig. 5와 같이 조성되도록 ①무리말뚝의 말뚝 선단을 모형토조 바닥에 고정시키고 말뚝 캡은 진동다짐 시 움직이지 않도록 모형토조 벽면에 고정시킨 후 ②모텔박스에 균일한 사실토가 조성되도록 진동다짐 수행하여 지반 조성 완료 후, ③무리말뚝의 말뚝 캡 상부에 1자유도 상부구조물을 설치하고 ④지진파를 적용하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 말뚝 캡 크기 별로 수행하였으며, 지반, 무리말뚝, 상부구조물의 동적거동을 확인하기 위한 계측기는 말뚝에는 변형률계, 말뚝 캡과 지반, 상부구조물에는 가속도계를 설치하였다. 지진 시 무리말뚝의 동적거동을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에 대하여 지진하중의 진행방향과 상부구조물을 기준으로 상부구조물의 왼쪽 말뚝을 LP, 중앙말뚝을 MP, 오른쪽 말뚝을 RP로 구분하여 분석을 수행하였다. 모형실험 시 계측기에는 내·외부에서 노이즈가 함께 수집됨에 따라 정확한 데이터 분석을 수행하기 위해 노이즈를 제거하여야 한다. 이를 위해 Fig. 6과 같이 계측된 가속도 및 변형률에 대한 FFT 분석을 수행하였으며, 그 결과를 비교해 입력지진파의 영향 범위인 0.01Hz~5Hz를 Cut-off 주파수로 선정하고, band-pass 필터링 방법을 이용해 노이즈를 제거하였다.

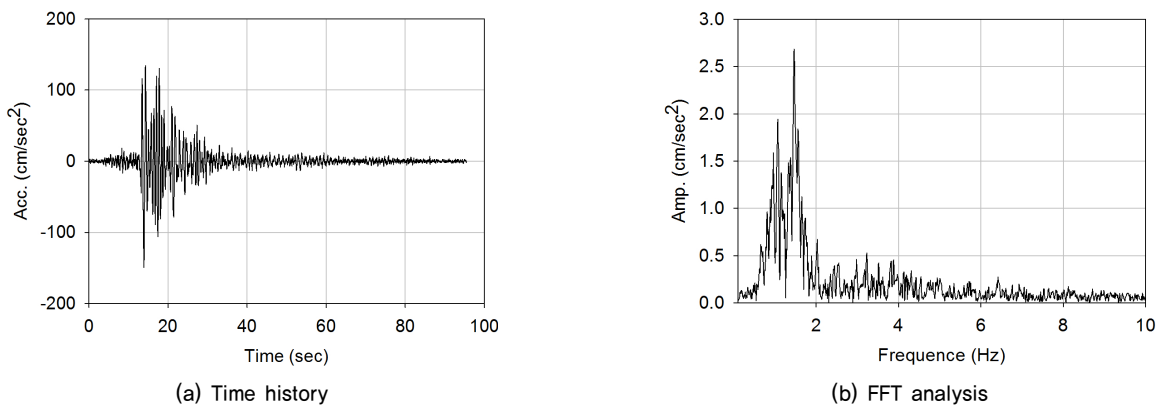


Fig. 4. Ofunato earthquake

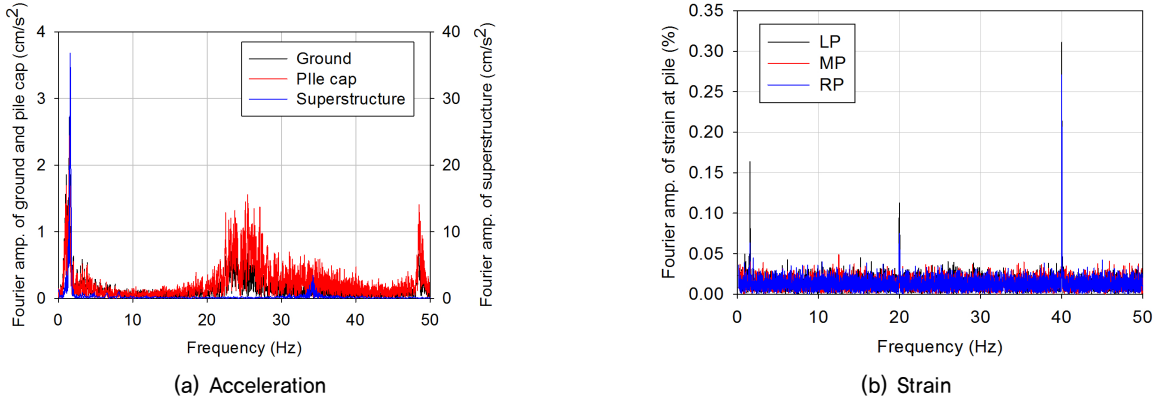


Fig. 6. FFT analysis

### 3. 말뚝의 동적 p-y 곡선 산정

말뚝의 동적 p-y 곡선은 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포 곡선으로부터 Eq. (1)과 같은 보(beam) 이론을 이용하여 지반반력 p와 말뚝변위  $y_{pile}$ 을 계산하여 각 깊이별 p-y 곡선을 작성할 수 있다. 즉 지반반력 p는 모멘트 분포곡선을 2번 미분하여 얻어지며 말뚝변위  $y_{pile}$ 은 모멘트 분포곡선을 2번 적분하여 구할 수 있다. 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포 곡선은 말뚝의 깊이 별 계측된 변형률 데이터에 휨강성을 곱하여 모멘트로 변환시킨 후 3차 스플라인(Cubic spline) 방법을 이용해 구할 수 있다(Yang et al., 2009; Yoo et al., 2012; Bao et al., 2018).

$$p = \frac{d^2}{dz^2} M_{(z)}, y_{pile} = \iint \frac{M_{(z)}}{EI} dz^2 \quad (1)$$

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

동적 p-y 곡선을 구성하는 y는 지반-말뚝간의 상대변위가

므로, y를 구하기 위해서는 Eq. (1)에서 구한 말뚝변위( $y_{pile}$ )에서 지반변위( $y_{soil}$ )을 빼야 된다. 이때 지반변위는 모형지반에서 계측된 깊이 별 가속도 자료를 2번 적분하여 구할 수 있다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 지반-무리말뚝-상부구조물 상호작용

사질토 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에 대하여 지진 시 지반, 무리말뚝, 상부구조물의 상호작용을 비교하기 위해 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 1.25D인 무리말뚝에서의 지반, 말뚝 캡, 상부구조물 가속도와 무리말뚝 중 LP에서의 휨모멘트를 Fig. 7과 같이 비교하였다. 비교 시간은 전 계측 시간 중 지반, 말뚝, 상부구조물의 상호작용을 비교하기 위해 10초에서 40초 사이의 구간을 표기하였다.

Fig. 7(a)와 같이 지반과 말뚝 캡에서의 가속도 거동은 유사하게 나타났으며, 이는 말뚝 캡이 지반에 근입되어 있기

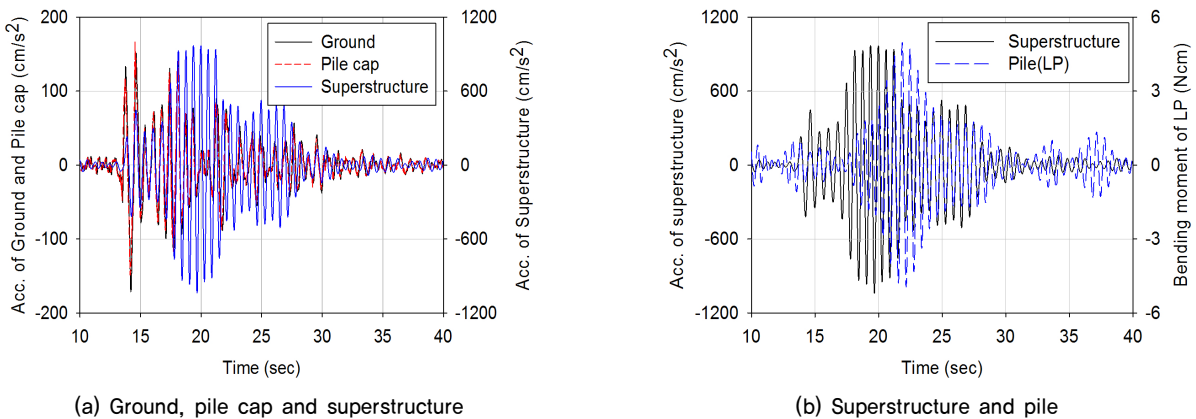


Fig. 7. Comparison of behavior for acceleration and strain

때문인 것으로 보인다. 그러나 상부구조물에서의 가속도 거동은 18초까지는 지반 및 말뚝 캡의 가속도 거동과 유사하게 나타났으나 18초 이후 증가한 가속도로 인해 지반 및 말뚝 캡에서의 가속도 거동과 다르게 자유거동으로 변화한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8(a)와 같이 말뚝 캡을 통해 전달되는 지진파와 상부구조물의 상호작용으로 인한 영향 때문인 것으로 보인다. 지진파와 상부구조물의 상호작용으로 인해 상부구조물에서의 최대 가속도는 계측기기의 한계( $1g$  ( $1,000\text{cm/s}^2$ ))로 인해 제한적으로 측정되었으나 말뚝에서의 변형률은 상부구조물에서의 가속도 거동과 다르게 제한 없이 측정되는 것으로 나타났다.

지반, 말뚝 캡, 상부구조물의 상호작용으로 인한 말뚝의 거동은 Fig. 7(b) 및 Fig. 8(c)와 같이 상부구조물의 가속도 거동에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구 결과인 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 말뚝의 휨 거동은 상부구조물의 관성거동에 지배를 받으며, 이러한 말뚝의 관성 거동은 지반의 관성거동과 다르게 나타난 결과와 같다(Kim et al., 2018; Suzuki et al., 2014). 그러므로 말뚝의 안전한 내진설계를 위해서는 지진파의 주기적 특성과 상부구조물의 상호작용에 의한 거동 확인이 필요할 것으로 보인다.

## 4.2 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 무리말뚝의 동적 p-y 곡선에 미치는 영향

지진과 같은 동적하중조건에서 지반, 무리말뚝, 상부구조물의 상호작용을 포함한 무리말뚝의 동적 p-y 곡선을 산정하기 위하여 Fig. 6과 같이 지반, 말뚝 캡, 상부구조물, 말뚝의 거동을 포함할 수 있는 13초~30초 범위에서의 동적 p-y 곡선을 작성하였으며, 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격에 따른 말뚝 캡 크기 변화가 무리말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리효과에 미치는 영향을 확인하기 위해 말뚝 캡 저면으로부터 2cm 깊이에서의 p-y 곡선을 다음과 같이 분석하였다.

### 4.2.1 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 0.75D인 무리말뚝

말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 0.75D인 무리말뚝의 말뚝 위치별 동적 p-y 곡선은 Fig. 9와 같이 나타났다. 말뚝 위치에 따른 최대지반반력의 경우 LP는  $0.27\text{N/cm}$ , MP는  $0.18\text{N/cm}$ , RP는  $0.09\text{N/cm}$ 로 나타났으며, 말뚝의 최대수평 변위의 경우 LP는  $0.015\text{cm}$ , MP는  $0.016\text{cm}$ , RP는  $0.018\text{cm}$ 로 나타나 LP, MP, RP 순으로 지반반력은 작게 말뚝의 최대수평변위는 크게 나타났다. 이러한 경향은 말뚝 캡이 지표면 위에 위치한 기존 연구 결과와 유사하며(Yang et al.,

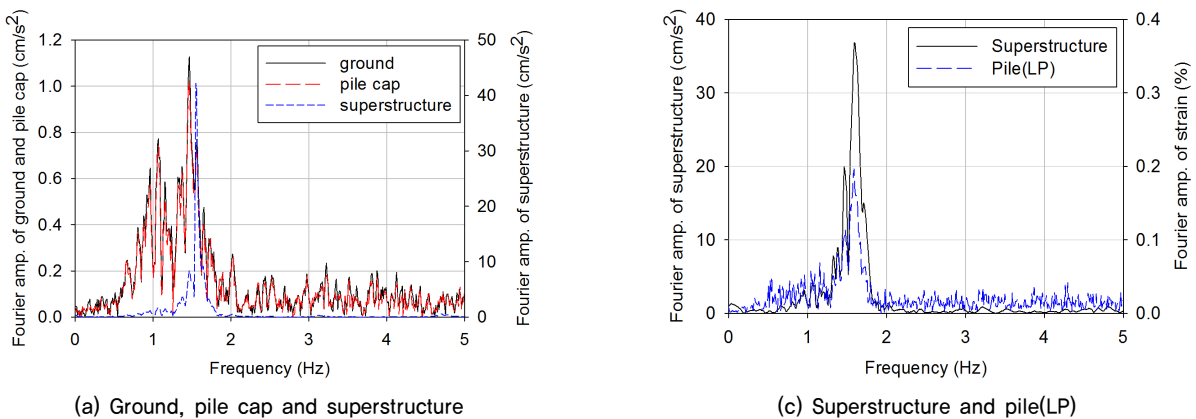


Fig. 8. Comparison of FFT analysis for acceleration and strain

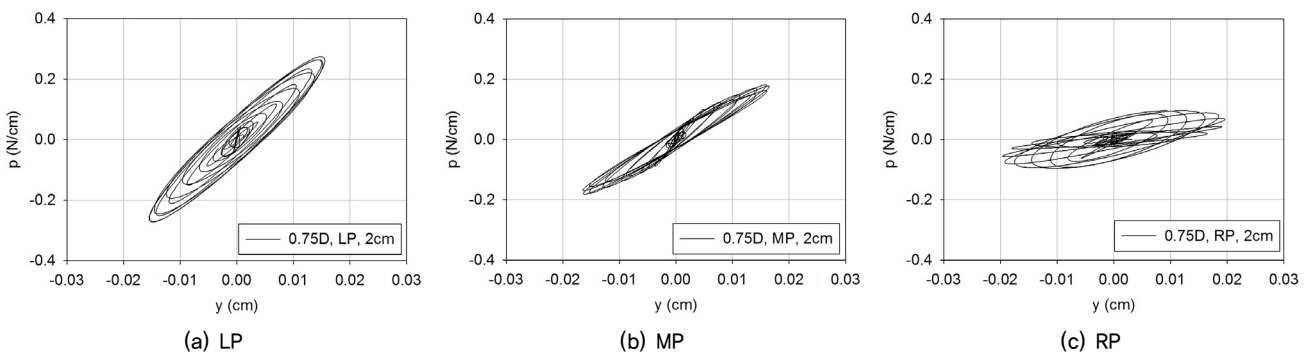


Fig. 9. Dynamic p-y curve of group pile in the case of 0.75D

2010), 이는 지반에 근입된 말뚝 캡의 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 짧아 말뚝 캡에 작용하는 지반저항이 상부구조물의 회전력 및 수평력을 감소시키지 못하였기 때문인 것으로 보인다. 그리고 말뚝 위치에 따른 지반반력 및 말뚝변위의 차이는 인접 말뚝간의 상호작용에 의한 무리효과 때문인 것으로 보인다.

#### 4.2.2 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 1.25D인 무리말뚝

Fig. 10은 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 1.25D인 무리말뚝의 말뚝 위치별 동적 p-y 곡선이다. 말뚝 위치에 따른 최대지반반력의 경우 LP는 0.13N/cm, MP는 0.02N/cm, RP는 0.06N/cm로 나타났으며, 말뚝의 최대수평변위의 경우 LP는 0.012cm, MP는 0.0038cm, RP는 0.013cm로 나타나 LP, RP 순으로 지반반력은 작게, 말뚝의 수평변위는 크게 나타나며 MP는 LP 및 RP에 비해 지반반력 및 말뚝의 수평변위가 작게 나타났다. 이는 말뚝 캡에 작용하는 지반저항이 상부구조물의 회전력에 저항하면서 MP에 작용하는 상부구조물의 회전력을 감소시켜 상부구조물의 수평력만이 MP에 작용했기 때문에 MP에서의 말뚝변위 및 지반반력이 작게 나타난 것으로 보이며, LP 및 RP의 경우는 지반저항에 의한 영향이 미치지 못해 상부구조물의 회전력에 의해 말뚝 변위 및 지반반력이 크게 나타난 것으로 보인다. 그리

고 0.75D의 경향과 다르게 말뚝 위치에 따른 지반반력 및 말뚝변위의 차이는 기존 인접 말뚝의 상호작용에 의한 영향보다 말뚝 캡에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

#### 4.2.3 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 2.00D인 무리말뚝

말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 2.00D인 무리말뚝의 말뚝 위치별 동적 p-y 곡선은 Fig. 11과 같이 나타났다. 말뚝 위치에 따른 최대 지반반력의 경우 LP는 0.089N/cm, MP는 0.094N/cm, RP는 0.092N/cm로 나타났으며, 말뚝의 최대수평변위의 경우 LP는 0.011cm, MP는 0.011cm, RP는 0.015cm로 나타나 말뚝 위치에 따른 지반반력 및 말뚝의 수평변위가 유사하게 나타났다. 이는 말뚝 캡에 작용하는 지반저항이 상부구조물의 회전력에 저항하면서 LP, RP에 작용하는 상부구조물의 회전력을 감소시켜 상부구조물의 수평력만이 LP, MP, RP에 작용하였기 때문인 것으로 보인다. 그리고 말뚝 위치에 따라 지반반력 및 말뚝변위가 유사하게 나타난 것은 인접 말뚝의 상호작용이 아닌 말뚝 캡에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

#### 4.2.4 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 2.75D인 무리말뚝

Fig. 12는 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 2.75D인 무

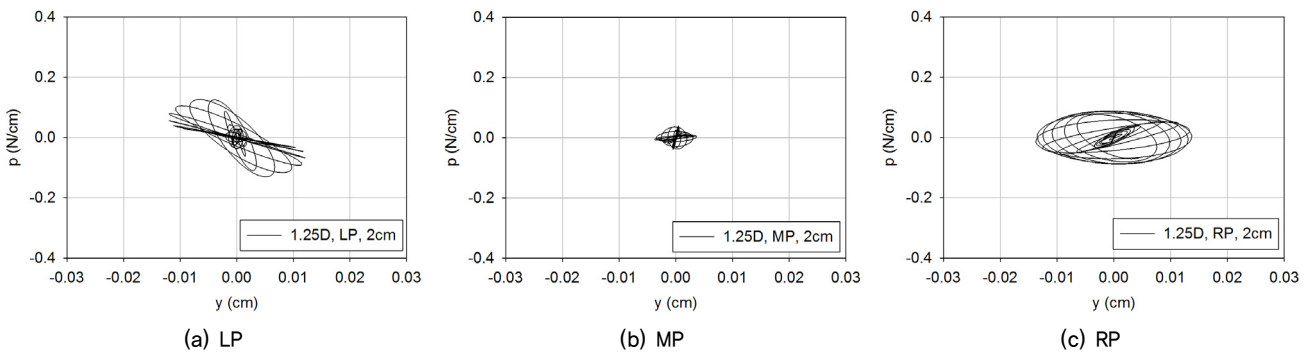


Fig. 10. Dynamic p-y curve of group pile in the case of 1.25D

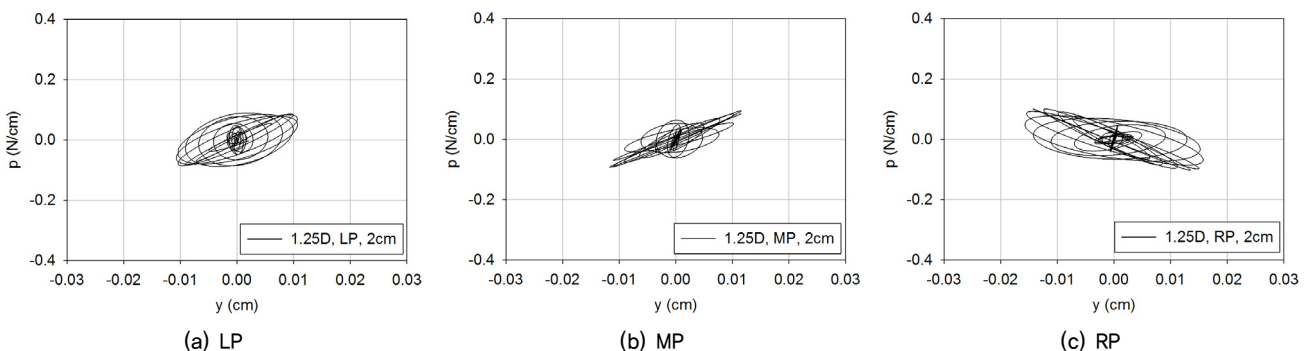


Fig. 11. Dynamic p-y curve of group pile in the case of 2.00D

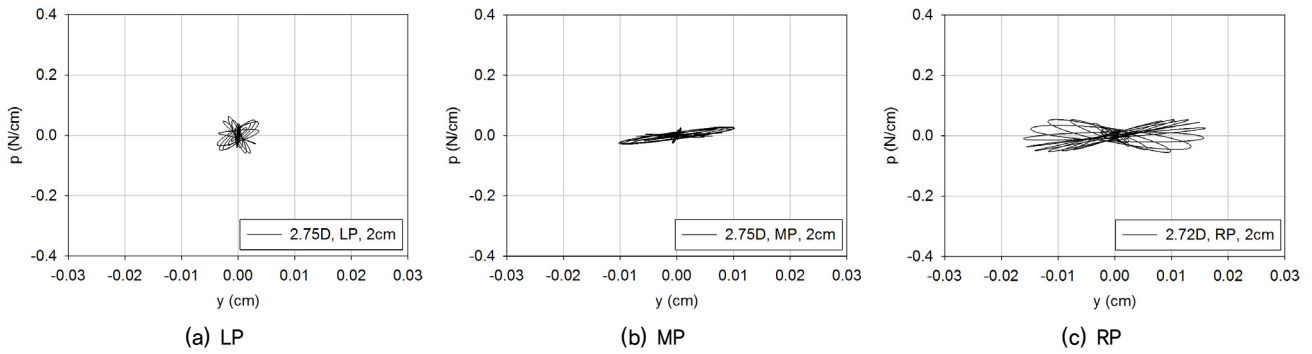


Fig. 12. Dynamic p-y curve of group pile in the case of 2.75D

리말뚝의 말뚝 위치별 동적 p-y 곡선이다. 말뚝 위치에 따른 최대 지반반력의 경우 LP는 0.062N/cm, MP는 0.028N/cm, RP는 0.050N/cm로 나타났으며, 말뚝의 최대수평변위의 경우 LP는 0.0036cm, MP는 0.010cm, RP는 0.015cm로 나타나 지반반력은 LP, RP, MP 순으로 작게 나타났으며, 말뚝의 수평변위는 LP, MP, RP 순으로 크게 나타났다. 이는 말뚝 캡에 작용하는 지반저항으로 인해 상부구조물의 수평력이 LP, RP, MP로 감소하였기 때문인 것으로 보이며, 말뚝 변위는 하중방향에 대하여 인접 말뚝의 상호작용으로 인해 LP, MP, RP 순으로 감소하였기 때문인 것으로 보인다. 그리고 2.00D의 경향과 다르게 말뚝 위치에 따른 지반반력 및 말뚝변위의 차이는 말뚝 캡 및 인접 말뚝의 상호작용이 동시에 발생하였기 때문인 것으로 보인다.

## 5. 결 론

지진 시 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이 간격이 변화하는 말뚝 캡이 무리말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리말뚝 효과에 미치는 영향을 확인하기 위하여 진동대 모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 사질토 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝에서 지진 시 말뚝의 거동은 상부구조물에 의한 영향이 크게 나타났으며, 상부구조물의 거동은 말뚝 캡을 통해 전달되는 지진파의 주기 특성과 상부구조물의 고유주기 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러므로 말뚝의 안전한 내진설계를 위해서는 상부구조물의 정확한 거동 확인이 필요할 것으로 보인다.
- (2) 말뚝 캡과 말뚝 중심 간격 변화에 따른 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적 p-y 거동은 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 0.75D의 경우 지반반력

및 말뚝의 수평변위가 가장 크게 나타났으며, 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 1.25D 이상 증가함에 따라 지반반력 및 말뚝의 수평변위는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝 캡 중앙에 위치한 상부구조물의 회전력을 말뚝 캡에 작용하는 지반저항으로 인해 감소하였기 때문인 것으로 보인다.

- (3) 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 무리효과는 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 0.75D의 경우 기존 연구결과와 유사하게 나타났으나 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 간격이 1.25D 이상의 경우는 0.75D의 경우와 다르게 나타났다. 이는 말뚝 캡에 작용하는 지반저항으로 인해상부구조물의 관성력에 의한 수평력과 회전력의 분배가 말뚝 위치에 따라 다르게 나타났기 때문인 것으로 보인다.
- (4) 이와 같이 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적 p-y 곡선 및 무리효과는 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이의 간격 변화에 영향을 받는 것으로 확인되었다. 따라서 지반에 근입된 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 정확한 내진설계를 위해서는 말뚝 캡 측면과 말뚝 중심 사이의 간격에 따른 영향을 반영하기 위해 보다 정밀한 후속 연구가 필요할 것으로 보인다.

## References

1. American Petroleum Institute (API) (1987), Recommended practice for planning, Designing and constructing fixed offshore platforms, API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition.
2. AASHTO (2000), Bridge design specifications, Washington, D.C.
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. Dou, H. and Byrne, P. M. (1996), Dynamic response of single piles and soil-pile interaction, Canadian Geotechnical Journal,

- Vol. 33, No. 1, pp. 80~96.
5. Han, J. T., Yoo, M. T., Choi, J. I. and Kim, M. M. (2010), A study on the dynamic p-y curves in soft soil by 1g shaking table tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 8, pp. 67~75 (In Korean).
  6. Iai, S. and Sugano, T. (1999), Soil-structure interaction studies through shaking table tests, *Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, P.S. Seco e Pinto ed., Lisbon, Portugal, Vol. 1, pp. 365~370.
  7. 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).
  8. Kim, S. R., Kim, S. H., Chung, C. K. and Kim, M. M. (2002), The evaluation of dynamic group pile effect by the analysis of experimental p-y curves, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 127~132 (In Korean).
  9. Matlock, H. (1970), Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay, *Proc. of the 2nd Annual Offshore Technology Conference*, Vol. 1, Houston, Texas, pp. 577~594.
  10. Murchison, J. M. and O'Neill, M. W. (1984), Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils, *Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, pp. 174~191.
  11. Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. (1974), Analysis of laterally loaded piles in sand, *Proc. of the 6th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Vol. 2, No. 2080, pp. 473~484.
  12. Reese, L. C., Wang, S. T., Arrellaga, J. A. and Hendrix, J. (1996), GROUP version 4.0 for Windows users' manual, Ensoft, Inc. Austin, Tex.
  13. Rovithis, E., Kirtas, E. and Pitilakis, K. (2009), Experimental p-y loops for estimating seismic soil-pile interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 719~736.
  14. 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.
  15. Ting, J. M., Kauffman, C. R. and Lovicsek, M. (1987), Centrifuge static and dynamic lateral pile behaviour, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 198~207.
  16. US Army (1993), Design of pile foundations, *Technical Engineering and Design Guides No. 1*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
  17. Yang, E. K., Choi, J. I., Han, J. T. and Kim, M. M. (2010), Evaluation of dynamic group pile effect in sand by 1g shaking table tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 8, pp. 77~88 (In Korean).
  18. Yang, E. K., Yoo, M. T., Kim, H. U. and Kim, M. M. (2009), Dynamic p-y backbone curves for a pile in saturated sand, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 11, pp. 27~38 (In Korean).
  19. Yoo, M. T., Cha, S. H., Choi, J. I., Han, J. T. and Kim, M. M. (2012), Evaluation of dynamic group pile effect in dry sand by centrifuge model tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 67~77 (In Korean).