

이층지반에 설치된 무리말뚝의 동적 거동 분석

Analysis of Dynamic Behavior on Group Piles in Two-Layered Sandy Ground

김 흥 태¹⁾ · 강 흥 식²⁾ · 정 구 식³⁾ · 안 광 국[†]

Heungtae Kim · Hongsig Kang · Kusik Jeong · Kwangkuk Ahn

Received: September 7th, 2023; Revised: September 11th, 2023; Accepted: September 22nd, 2023

ABSTRACT : The dynamic behavior of the group piles supporting the superstructure in an earthquake is influenced by different complex dynamic mechanisms by the inertia force of the superstructure and the kinematic force of the ground. In an earthquake, The dynamic p-y curve is used to analyze the dynamic behavior of the pile foundation in consideration of the interaction of the ground, pile foundation, and superstructure due to the inertia force and the kinematic force. Most of the research has been conducted in order to confirm the dynamic p-y curve of the pile foundation by applying to the pile foundation installed on the single layered ground consisting of sand and clay, but the research for the multiple layered ground is insufficient. In this study, 1g shaking table tests were conducted to analyze the effect of the strata ratio of the top and bottom ground of the two layered sandy ground which has different relative densities on the dynamic behavior of group piles supporting the superstructure. The result shows that the maximum acceleration in the ground, the pile cap, and the superstructure increases as the strata ratio increases, and the location of the maximum bending moment of the pile foundation is changed. In addition, it was confirmed that the slope of the dynamic p-y curve of the pile foundation increased and decreased according to the strata ratio.

Keywords : Two layered ground, Relative density, Group piles, Dynamic p-y curve

요 지 : 지진 시 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동은 상부구조물의 관성력과 지반의 운동력에 의해 서로 다른 복잡한 동적 메커니즘에 영향을 받는다. 지진 시 상부구조물의 관성력과 지반의 운동력에 의한 지반, 말뚝기초, 상부구조물의 상호작용을 고려하여 말뚝기초의 동적거동을 분석하는 방법으로 동적 p-y 곡선이 사용되고 있다. 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 대부분의 연구는 사질토 및 점성토로 이루어진 단일지반에 설치된 말뚝기초를 대상으로 확인되었을 뿐 다층지반에 설치된 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반의 상·하 지반의 지층비가 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 1g 진동대 모형실험을 수행하였다. 그 결과 지층비가 증가할수록 지반, 말뚝캡, 상부구조물에서의 최대가속도는 증가하고, 말뚝기초의 최대휨모멘트의 발생 위치는 변화하는 것으로 나타났다. 그리고 말뚝기초의 동적 p-y 곡선의 기울기는 지층비에 따라 감소 및 증가하는 것으로 확인되었다.

주요어 : 이층지반, 상대밀도, 무리말뚝, 동적 p-y 곡선

1. 서 론

국내의 다양한 건설 현장에서 상부구조물을 지지하는 하부구조물로서 말뚝기초가 널리 사용되고 있다. 말뚝기초는 상부구조물의 하중을 지지할 뿐만 아니라 풍력, 파력, 토압, 지진 등과 같은 수평하중도 지지하여야 한다. 특히, 수평하중으로 인한 말뚝기초의 과도한 변위는 말뚝기초뿐만 아니라 상부구조물에도 피해를 줄 수 있어 수평하중을 받는 말뚝기초의 해석은 말뚝기초의 안전한 설계를 위해 중요한 검토 요인 중 하나이다.

수평하중을 받는 말뚝기초의 해석방법은 극한평형법(Brons, 1964a; Broms, 1964b), 지반반력해석법(Chang, 1973), 탄성 해석법(Poulos, 1971), 비선형해석법(Reese & Matlock, 1956) 이 대표적으로 사용되고 있으며, 이 중 지반의 비선형 거동을 고려할 수 있는 비선형해석법인 p-y 곡선 법이 수평하중을 받는 말뚝기초의 해석방법으로 많이 사용되고 있다.

지진 시 상부구조물을 지지하는 말뚝기초의 동적거동은 상부구조물의 관성력과 지반의 운동력에 의한 서로 다른 복잡한 동적 메커니즘에 영향을 받으며, 이러한 영향은 말뚝기초에 피해를 줄 수 있다. 지진 시 상부 구조물의 관성력과

1) Managing Director, Jeepyoung Construction

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)

지반의 운동력에 따른 지반, 말뚝기초, 상부구조물의 상호 작용을 고려하여 말뚝기초의 동적거동을 분석하는 방법으로 동적 p-y 곡선이 사용되고 있다. 동적 p-y 곡선은 정적 및 반복 하중 조건에서 제안된 기존 p-y 곡선과 비교하여 지진하중을 받는 말뚝기초의 거동을 합리적으로 모사할 수 있다(Yoo et al., 2013; Lim & Joung., 2017; Tran et al., 2020).

지진하중을 받는 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위하여 Yang et al.(2009) 및 Lim & Jeong(2017)은 1g 진동대 모형실험을 통해 사질토 지반에 설치된 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하였으며, Han et al.(2010)은 점성토지반에 설치된 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하였다. Yoo et al. (2013)은 동적 원심모형실험을 통해 느슨한 모래 지반에 설치된 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하였으며, Naguyen et al.(2018)은 원심모형실험을 통해 경사진 모래 지반에 설치된 단독말뚝 및 무리말뚝의 동적 p-y 곡선을 확인하였다. 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 이상의 연구들은 사질토 및 점성토로 이루어진 단일지반에 설치된 말뚝기초를 대상으로 확인되었으나 대부분 건설 현장에서는 단일 지반이 아닌 다층지반으로 이루어져 있어 지반의 성질이 서로 다른 다층지반에 설치된 말뚝기초의 동적 p-y 곡선을 확인하기 위한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반의 상·하지반의 지층비가 상부 구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 1g 진동대 모형실험을 수행하였다.

2. 1g 진동대 모형실험

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반의 상·하지반의 지층비가 상부 구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위한 1g 진동대 모형실험은 Fig. 1과

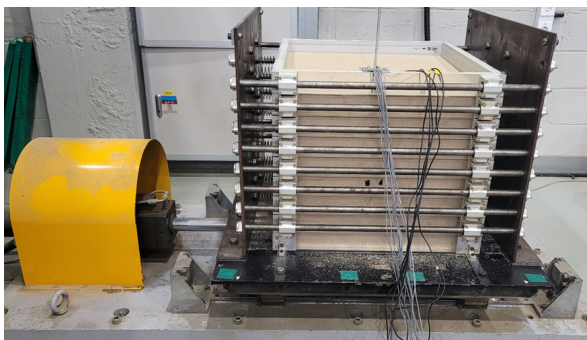


Fig. 1. Shaking table device

같은 모형실험장치를 사용하였으며, 모형지반을 조성하기 위한 모델박스는 지반의 분리거동과 모델박스 벽면에서 발생하는 반사파를 방지하기 위하여 9개의 단일 구조와 스크링으로 조합된 폭 50cm, 길이, 50cm, 높이 49cm의 내부 크기를 갖는 Fig. 2와 같은 모델박스를 모형실험에 사용하였다.

모형실험을 위한 상사비는 기존 연구(Yang et al., 2009; Han et al., 2010; Kim et al., 2018)와 유사하게 휨강성에 대한 상사법칙을 고려하였으며(Iai, 1989), 모형말뚝으로 사용된 중공형 알루미늄 파이프의 휨강성을 고려해 30.9의 상사비를 모형실험에 적용하였다.

상부구조물은 국내의 지진특성(Yoon et al., 2006)을 고려하여 고유주기가 0.25초인 단주기 특성을 갖는 1자유도 모형 상부구조물을 Fig. 3(a)와 같이 제작하여 모형실험에 적용하였다. 무리말뚝은 기성 콘크리트 말뚝(500D)을 고려하여 말뚝 중심간격은 3D, 말뚝의 배열은 3×3 정방향인 무리말뚝을 원형으로 Fig. 3(b)와 같이 상사비를 고려해 모형 무리말뚝을 제작해 모형실험에 적용하였다. 모형 무리말뚝에 사용된 말뚝은 외경 12mm, 두께 2mm인 중공형 알루미늄 파이프를 사용하였으며, 말뚝캡은 강체거동을 위해 알루미늄 판재를 사용하였다. 상부구조물과 말뚝캡의 연결 및 말뚝캡과 말뚝의 연결은 강결 조건으로 연결하였으며, 말뚝과 모델박스 하부는 한지 조건으로 연결하였다.

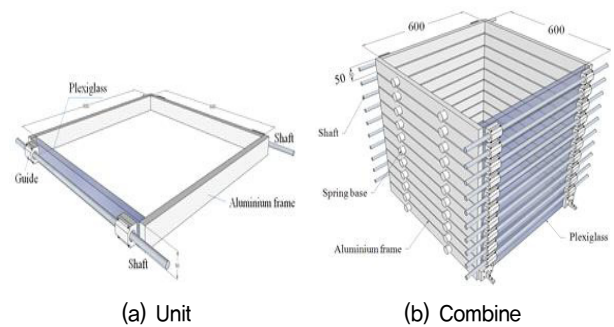


Fig. 2. Model box



(a) Superstructure



(b) Group piles

Fig. 3. Model superstructure and group piles

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반을 조성하기 위해 사용된 시료는 Table 1과 같은 물리적 특성을 갖는 주문진 표준사를 사용하였으며, 이층지반은 Kim & Kang(2022)이 고려한 지층비(strata ratio, p)를 사용해 조성하였다. 지층비는 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에서 상부지반의 높이를 전체지반의 높이로 나눈 값으로 정의된다. 이층지반을 구성하는 상·하부지반의 상대밀도는 주문진 표준사의 최대 건조단위중량과 최소건조단위중량을 고려하여 상부지반은 60%의 상대밀도를 갖는 지반으로 하부지반은 80%의 상대밀도를 갖는 지반으로 정적 다짐을 통해 조성하였다. 이층지반을 구성하는 상·하부지반의 지층비는 Table 2와 같은 조건으로 모형지반의 전체 높이(H_{total} , 45cm)를 고려하여 상부지반의 높이가 $0H_{total}$, $0.2H_{total}$, $0.4H_{total}$, $0.6H_{total}$ 이 되도록 모형 이층지반을 각각 조성하여 모형실험에 적용하였다.

Table 1. Jumunjin standard sand

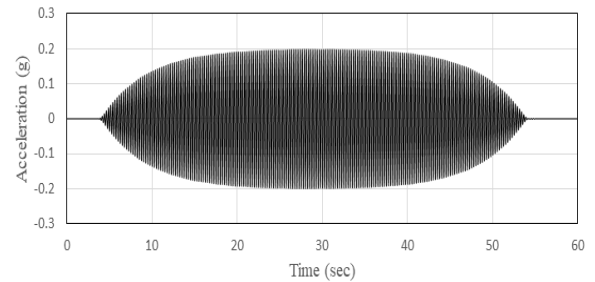
Classification	Value
D10 (mm)	0.32
Cu	1.65
Cs	1.43
$\gamma_{d_{max}}$ (kN/m ³)	16.66
$\gamma_{d_{min}}$ (kN/m ³)	13.33
USCS	SP

Table 2. Condition of model ground

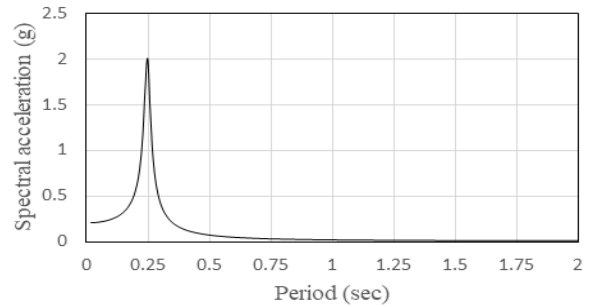
Strata ratio (p)	Layered ground	Relative density (%)
0	H_{total}	80
0.2	Top: $0.2H_{total}$	60
	Bottom: $0.8H_{total}$	80
0.4	Top: $0.4H_{total}$	60
	Bottom: $0.6H_{total}$	80
0.6	Top: $0.6H_{total}$	60
	Bottom: $0.4H_{total}$	80

무리말뚝의 동적거동을 확인하기 위한 입력지진파는 상부구조물의 고유주기와 동일한 고유주기를 갖는 Fig. 4와 같은 정현파를 모형실험에 적용하였으며, 지진하중은 0.2g를 적용하였다.

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반의 상·하부지반의 지층비가 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위한 1g 진동대 모형실험은 Fig. 5와 같이 조성되도록 ① 무리말뚝의 말뚝선단을 모델박스 바닥에 연결한 후, ② 지층비에 따라 소요 상대밀도를 갖는 이층지반이 조성되도록 모델박스 내에 모래를 나누어 투입하고 정적다짐을 수행하여 모형지반을 조성하고 모델박스에 지층비



(a) Time history



(b) Response spectrum

Fig. 4. Input acceleration

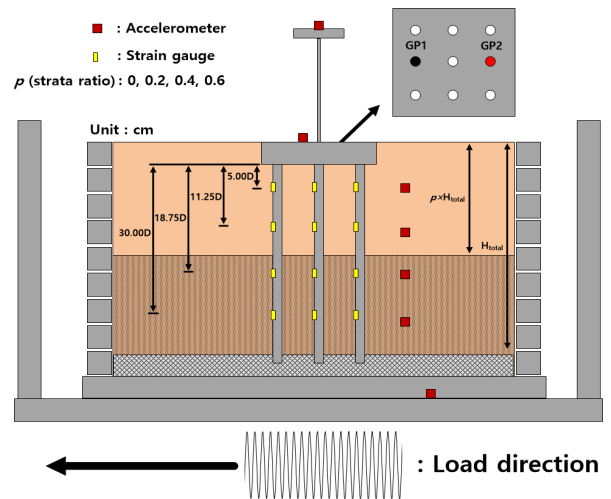


Fig. 5. Schematic of model test

에 따라 소요 상대밀도를 갖는 이층지반이 조성되도록 모래를 10회에 나누어 투입하고 정적다짐을 수행하여 모형지반을 조성하였다. 모형지반 조성이 완료된 후, ③ 무리말뚝과 말뚝캡 및 상부구조물을 연결하고 입력지진파를 적용하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 이층지반의 지층비 별로 수행하였으며, 지반, 무리말뚝, 상부구조물의 동적거동을 확인하기 위하여 지반, 말뚝캡, 상부구조물에는 가속도계를 말뚝에는 변형율계를 설치하여, 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반의 상·하부지반의 지층비가 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 지층비에 따른 가속도 변화

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에 설치된 상부구조물을 지지하는 말뚝의 가속도 거동은 지층비와 관계없이 Fig. 6과 같이 입력지진파의 가속도 거동과 유사하게 나타났으나 최대가속도는 지층비에 따라 다르게 나타났다. 지반에서의 가속도는 지층비를 고려하기 위해 지표면으로부터 5.00D, 11.25D, 18.75D 위치에서의 가속도를 확인하였다. 지층비에 따른 지반, 말뚝캡, 상부구조물에서의 최대가속도를 분석하기 위해 지반, 말뚝캡, 상부구조물에서의 최대가속도를 Fig. 7과 같이 지층비에 따라 비교하였다.

Fig. 7(a)와 같이 상부구조물에서의 최대가속도는 입력지진파에 비해 4.61-4.85배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8과 같이 입력지진파와 동일한 고유주기에 의한 공명현상에 의한 영향 때문인 것으로 보인다. 그리고 지층비에 따른 상부구조물에서의 최대가속도는 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할 수록 2.2-5.3% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지층비가 증가할수록 지반이 느슨해짐에 따라 상부구조물에 연결된 말뚝기초를 구속하는 지반 강성의 감소로 인해 상부구조물의 관성거동이 증가하였기 때문인 것으로 보인다.

말뚝캡에서의 최대가속도는 Fig. 7(b)와 같이 입력지진파에 비해 1.06-1.09배 증가하는 것으로 나타났으나, 상부구조물의 최대가속도에 비해 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지반에 근입된 말뚝이 지반과 일체거동함에 따라 상부구조물의 경우와 다르게 공명현상이 발생하지 않았기 때문인 것으로 보인다(Fig. 8). 지층비에 따른 말뚝캡에서의 최대가속도는 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 0.3-2.5% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지층비가 증가할수록 지반이 느슨해짐에 따라 말뚝캡을 구속하는 지반 강성의 감소 및 증가하는 상부구조물의 관성거동에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

지반에서의 최대가속도는 Fig. 7(c)와 같이 입력지진파에 비해 1.02-1.08배 증가하는 것으로 나타났으며, 말뚝캡의 경우와 유사하게 상부구조물의 최대가속도에 비해 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝캡의 경우와 유사하게 공명현상이 발생하지 않았기 때문인 것으로 보인다(Fig. 8). 지층비에 따른 지반에서의 최대가속도는 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 지표면으로부터 5.00D 위치에서는 0.5-1.1% 증가, 11.25D 위치에서는 0.2-2.0% 증가, 18.75D 위치에서는 0.1-1.6% 증가하는 것으로 나타

났다. 이는 기존 연구(Jeong et al., 2023)와 유사하게 상대밀도가 높은 지반에 비해 상대밀도가 낮은 지반에서 가속도 증폭 현상이 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

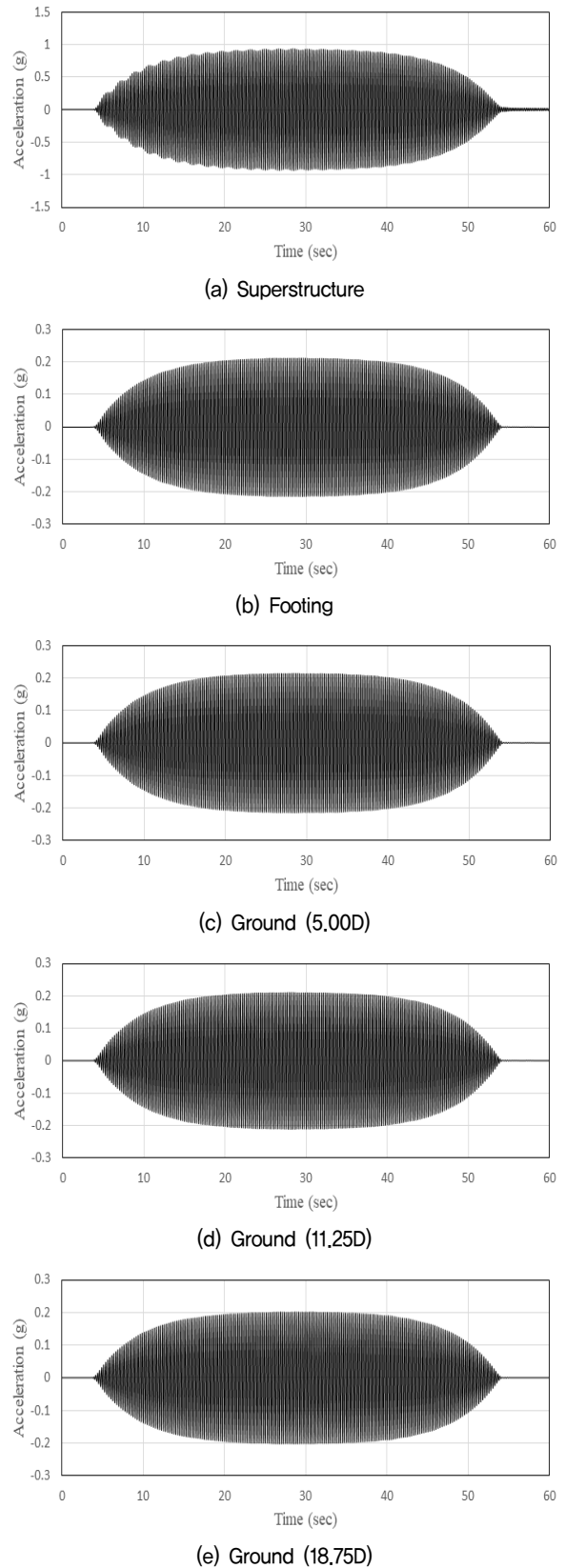
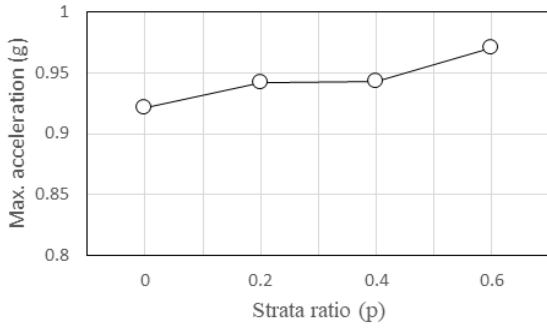
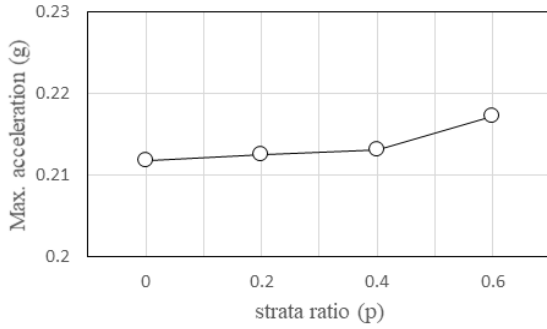


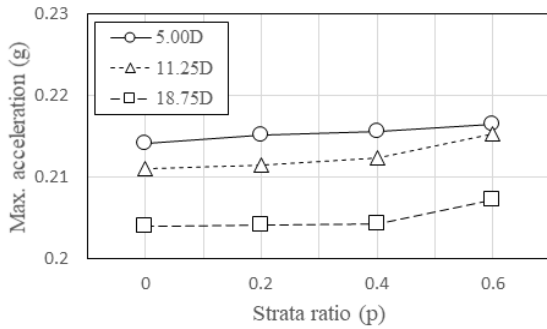
Fig. 6. Time history of acceleration (Input acc=0.20g, $\rho=0.4$)



(a) Superstructure



(b) Footing



(c) Ground

Fig. 7. Max. acceleration with strata ratio

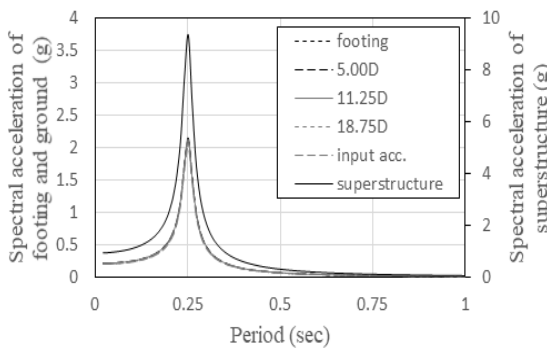
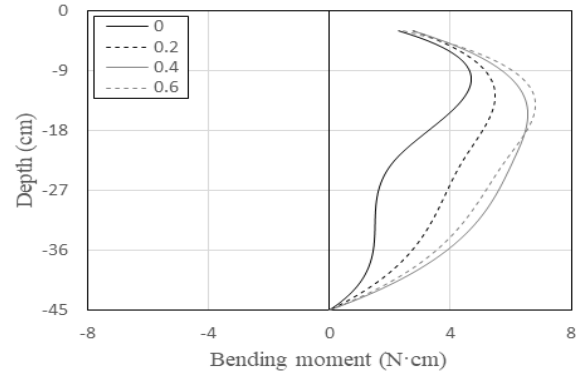


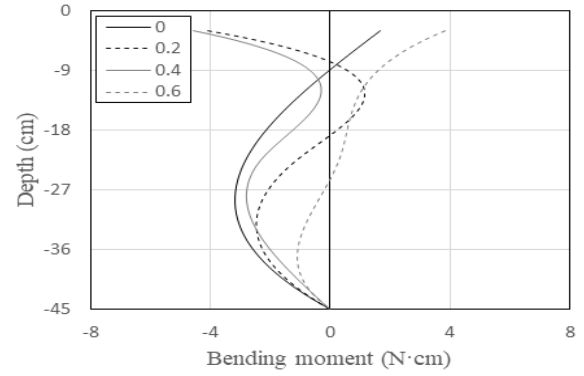
Fig. 8. Response spectrum of superstructure, footing and ground (Input acc=0.20g, $\rho=0.4$)

3.2 지층비에 따른 말뚝기초의 휨모멘트 변화

지진 시 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에서 상·하 지반의 지층비가 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 휨모



(a) GP1



(b) GP2

Fig. 9. Bending moment distribution

멘트에 미치는 영향을 확인하기 위해 최대 휨모멘트가 발생된 시점의 무리말뚝 내 GP1 및 GP2에서 깊이에 따른 휨모멘트 분포를 Fig. 9와 같이 지층비에 따라 비교하였다.

Fig. 9와 같이 무리말뚝 내 말뚝기초의 위치에 따른 휨모멘트 분포는 서로 다르게 나타났으며, GP1에서의 최대 휨모멘트는 GP2에서의 최대 휨모멘트에 비해 1.33-1.78배 크게 나타났다. 그리고 최대 휨모멘트 발생 위치는 GP1의 경우 말뚝기초 내에서 발생했지만, GP2의 경우는 지층비에 따라 말뚝기초의 두부 및 말뚝기초 내에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구(Yang, 2009; Kim et al., 2018)와 유사하게 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동은 상부구조물의 관성거동 및 관성거동에 의한 회전운동에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

지층비에 따라 무리말뚝 내 말뚝기초의 최대 휨모멘트 및 최대 휨모멘트 발생 위치는 GP1의 경우는 Fig. 9(a)와 같이 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 최대 휨모멘트는 16.7-44.9% 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 휨모멘트 발생 위치는 25.5-38.2% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 상부구조물의 관성거동과 지층비 증가에 따른 지반 강성의 감소에 의한 영향 때문인 것으로 보인다. 그리고 지층비에 따라 GP2의 경우는 Fig. 9(b)와 같이 지층비가 0

인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 최대 휨모멘트는 19.6-43.1% 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 휨모멘트 발생 위치는 지층비가 0인 경우 말뚝기초 내에서 지층비가 0.2, 0.4, 0.6의 경우는 말뚝두부에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 지층비의 증가에 따른 지반 강성의 감소와 상부구조물의 관성거동에 의한 회전운동과 지반운동에 의한 영향이 복합적으로 발생하였기 때문인 것으로 보인다.

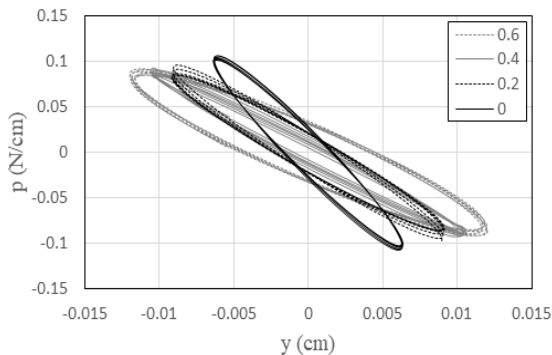
3.3 지층비에 따른 말뚝기초의 동적 p-y 곡선

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에서 상하지반의 상하지반의 지층비가 무리말뚝의 동적 p-y 곡선에 미치는 영향을 확인하기 위하여 무리말뚝 내 GP1과 GP2에서 산정한

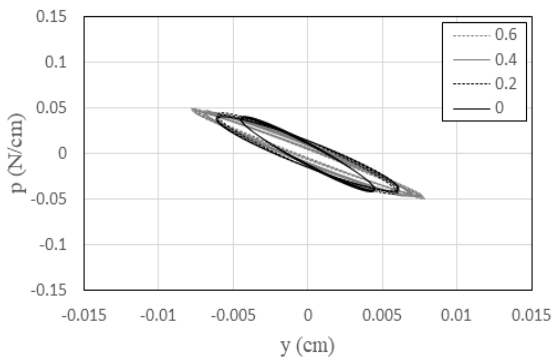
동적 p-y 곡선을 말뚝기초의 깊이 별로 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 지층비에 따라 비교하였다. 무리말뚝 내 말뚝기초의 동적 p-y 곡선은 기존 연구 방법(Yang, 2009; Han et al., 2010, Kim et al., 2018)을 고려하여 무리말뚝 내 말뚝기초에서 확인한 변형율을 이용하여 산정하였다.

무리말뚝 내 말뚝기초의 동적 p-y 곡선은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 말뚝기초의 변위가 증가하면 지반반력도 증가하는 경향으로 나타났으며, 무리말뚝 내 말뚝기초의 위치, 말뚝기초의 깊이, 지층비에 영향을 받는 것으로 나타났다.

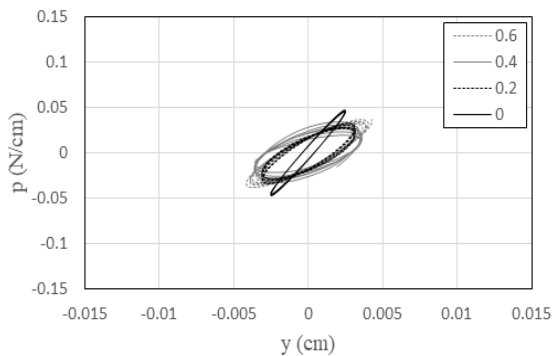
무리말뚝 내 말뚝기초의 위치에 따라 GP1과 GP2의 변위 방향이 다르게 나타났으며, 동적 p-y 곡선의 할선 기울기는 GP2가 GP1에 비해 1.00-4.02배 크게 나타났다. 이는 상부구조물의 관성거동과 관성거동으로 인한 상부구조물의 회전



(a) 5.00D

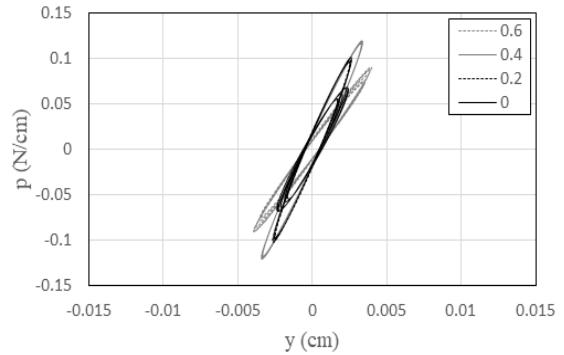


(b) 11.25D

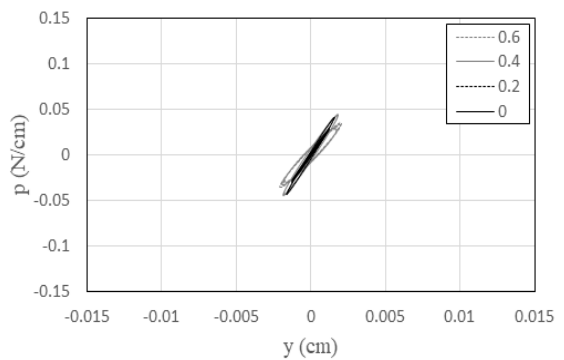


(c) 18.75D

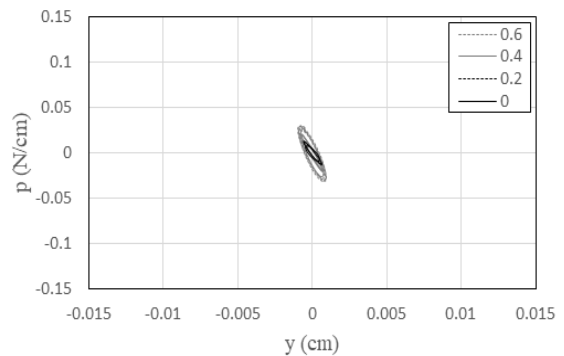
Fig. 10. Dynamic p-y loop of GP1



(a) 5.00D



(b) 11.25D



(c) 18.75D

Fig. 11. Dynamic p-y loop of GP2

운동에 의한 영향으로 상부구조물과 연결된 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전으로 말뚝기초 인근 지반을 구속하여 지반강성 및 GP2의 변위 방향에 영향을 미친 것으로 보인다(Ahn, 2003; Kim et al., 2018).

말뚝기초의 깊이에 따른 동적 p-y 곡선의 할선 기울기는 GP1의 경우는 깊이에 따라 지표면으로부터 5.00D 위치에서의 할선 기울기가 11.25D 위치에서의 할선 기울기보다 19.8-82.8% 크게 나타났으나, 18.75D 위치에서의 할선 기울기보다 0.7-16.3% 작게 나타났다. 이는 상부구조물의 관성거동으로 인한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전으로 인근 지반을 구속하여 지반강성을 증가시켰기 때문인 것으로 보인다. 그리고 GP2의 경우는 GP1의 경우와 다르게 깊이에 따라 말뚝기초의 동적 p-y 곡선의 할선 기울기는 19.8-56.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 GP1의 경우와 유사하게 상부구조물의 관성거동으로 인한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전이 인근 지반을 구속시켜 지반강성을 증가시키거나 상부구조물의 관성거동에 의한 영향이 말뚝기초의 깊이가 깊어짐에 따라 감소하였기 때문인 것으로 보인다.

지층비가 따른 말뚝기초의 동적 p-y 곡선의 할선 기울기는 GP1의 경우는 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 지표면으로부터 5.00D 위치에서는 37.5-54.6% 감소, 11.25D 위치에서는 20.9-30.8% 감소, 18.75D 위치에서는 43.4-52.6% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지층비가 증가할수록 지반강성이 감소하기 때문인 것으로 보인다. 그리고 GP2의 경우는 GP1의 경우와 다르게 지층비가 0인 경우를 기준으로 지층비가 증가할수록 지표면으로부터 5.00D 위치에서는 22.9-33.6% 증가하다 지층비가 0.6인 경우는 19.9% 감소, 11.25D 위치에서는 0.7-10.0% 증가하다 지층비가 0.6인 경우는 27.7% 감소, 18.75D 위치에서는 5.00D 및 11.25D 위치에서와 다르게 10.4-74.9% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 GP1의 경우와 유사하게 지층비가 증가할수록 지반강성은 감소하나 상부구조물의 관성거동으로 인한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전에 의한 지반 구속효과 및 지반운동으로 인한 다짐효과에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에의 상하지반의 지층비가 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 이층지반의 지층비를 0, 0.2, 0.4, 0.6으로 변화시켜 1g 진동대 모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지층비가 증가하면 상부구조물, 말뚝캡, 지반에서의 최대 가속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지층비가 증가할수록 지반이 느슨해짐에 따라 무리말뚝을 구속하는 지반강성의 감소와 상대밀도가 높은 지반에 비해 상대밀도가 낮은 지반에서 가속도 증폭 현상(Jeong et al. (2003))이 크게 나타났기 때문인 것으로 보인다.
- (2) 무리말뚝 내 말뚝기초의 최대 휨모멘트는 지층비가 증가하면 16.7-44.9% 증가하는 것으로 나타났으나 최대 휨모멘트의 발생 위치는 무리말뚝 내 말뚝기초의 위치에 따라 GP1에서는 말뚝기초 내에서, GP2에서는 말뚝기초 두부에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 지층비의 증가에 따른 지반 강성의 감소, 상부구조물의 관성거동에 의한 회전운동 그리고 지반운동에 의한 영향이 복합적으로 발생하였기 때문인 것으로 보인다.
- (3) 무리말뚝 내 말뚝기초의 동적 p-y 곡선의 할선 기울기는 지층비가 증가하면 무리말뚝 내 GP1에서의 할선 기울기는 감소하는 반면 GP2에서의 할선 기울기는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지층비가 증가함에 따라 지반 강성은 감소하나 상부구조물의 관성거동으로 인한 말뚝캡 및 말뚝기초의 회전에 의한 지반 구속 효과, 지반운동에 의한 다짐 효과가 복합적으로 발생하였기 때문인 것으로 보인다.
- (4) 이상과 같이 서로 다른 상대밀도를 갖는 이층지반에서 상·하지반의 지층비는 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 동적 거동에 영향을 미치는 것으로 확인됨에 따라 다층지반에 설치되는 상부구조물을 지지하는 무리말뚝의 정확한 내진설계를 위해서는 지층비뿐만이 아닌 상대밀도와 같은 지반의 다양한 성질을 고려한 추후 연구가 필요할 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. Broms, B.B. (1964a), Lateral resistance of piles in cohesive soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63.
3. Broms, B.B. (1964b), Lateral resistance of piles in cohesionless soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156.
4. Chang, Y.L. (1937), Lateral pile-loading tests, ASCE, Vol. 102, pp. 272-278.
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 clay by 1 g shaking table tests, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 26,

- No. 8, pp. 67~75 (In Korean).
6. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soilstructure fluid model in 1 g gravitational field, *Soil and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
 7. Jeong, S. G., Kim, H. Y. and Kim, D. H. (2023), Earthquake Amplification for Various Multi-Layer Ground Models, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 33, No. 2, pp. 293~305 (In Korean).
 8. Kim, J. S. and Kang, G. C. (2022), Behavioral characteristics of a single pile according to the relative density of two-layered soil during lateral loads, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 1, pp. 193~199 (in Korean).
 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. Lim, H. S. and Joeng, S. S. (2017), Analysis of dynamic behavior of a single pile in dry sand by 1g shaking table test, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 7, pp. 17~28 (In korean)
 11. 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.
 12. Poulos, H.G. (1971), Behavior of laterally loaded piles:I-single piles, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, ASCE*, Vol. 97, No. SM5, pp. 711~731.
 13. Reese, L.C. and Matlock, H.L. (1956), Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth, *Proc., 8th Texas Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, TX, pp. 1~41.
 14. 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)
 15. 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).
 16. Yang, E. K., Jeong, S. S., Kim, J. H. and Kim, M. M. (2009), Dynamic p-y Backbone Curves from 1g Shaking Table Tests, *Proceeding of 88th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, D.C., CD-Rom.
 17. Yoo, M. T., Choi, J. I., Han, J. T. and Kim, M. M. (2013), Dynamic p-y curves for dry sand from centrifuge tests, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 1082~1102.
 18. 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).