진동대 시험을 활용한 구조물의 모드 형상에 따른 동적 p-y 곡선 특성 분석

Analysis of Dynamic p-y Curve Characteristics According to Mode Shape of Structure Using Shaking Table Tests

한재혁* · 안성노** · 윤형철*** · 정종원****

Han, Jae-hyeok*, Ahn, Seongnoh**, Yoon, Hyungchul***, and Jung, Jongwon****

Abstract

In the seismic design of pile foundations, a p-y curve representing the nonlinear behavior of the ground considering the dynamic load of the earthquake is required. Recently, p-y curve analyses reflecting the soil-structure interaction have been conducted, but studies on multilayer structures have not been investigated extensively. In this study, the p-y curve characteristics were analyzed, considering the influence of the ground-structure interaction based on the mode shape of the structure (no structure, single-story structure, and three-story structure) through shake table tests. It was found that (1) the bending moment and pile displacement increased with input acceleration, and (2) the maximum soil resistance and pile displacement occurred at the natural frequencies of each structure were observed. In addition, the bending moment, soil resistance, and p-y curve slope were higher in the single-story structure than in the three-story structure. The findings indicate that the seismic design simulated for a single-story structure is conservative.

Key words : p-y Curve, Shaking Table, Structure Mode Shape, Pile Foundation, Soil-structure Interaction

요 지

말뚝기초의 내진설계 시, 지진의 동적 하중을 고려한 지반의 비선형적 거동을 나타내는 p-y 곡선이 필요하다. 최근 지반-구조물 상호작용을 고려한 p-y 곡선 분석이 이루어지고 있으나, 다층 구조물을 활용한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 진동대 실험을 통해 구조물 모드형상(구조물이 부재, 단층 구조물, 3층 구조물)에 따른 지반-구조물 상호작용 영향을 고려한 p-y 곡선 특성을 분석하였다. 그 결과, (1) 입력가속도의 증가에 따른 휨모멘트 및 말뚝 변위의 증가, (2) 각 구조물의 고유진동수에서 최대 지반 반력 및 말뚝 변위 발생을 관찰하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 3층 구조물에 비해 단층 구조물의 경우 휨모멘트, 지반 반력 및 p-y 곡선의 기울기가 크게 나타났다. 이는, 단층 구조물로 모사한 내진설계가 보수적인 설계임을 나타낸다.

핵심용어 : p-y 곡선, 진동대, 구조물 모드 형상, 말뚝기초, 지반-구조물 상호작용

1. 서 론

전 세계적으로 최근 10년간 매년 규모 5 이상의 지진이

약 1,500건, 규모 7 이상의 지진이 약 10건 발생하고 있다(United States Geological Survey, 2020). 지진 발생 시 구조물의 변형 및 파괴로 인해 인명 및 재산피해가 발생한다. 이를 대비하기

*정회원, 충북대학교 토목공학부 석사과정(E-mail: hjh94522@chungbuk.ac.kr)

Member, M.S Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

**충북대학교 토목공학부 석사(E-mail: copoi2212@chungbuk.ac.kr)

M.S, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

***정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(Tel: +82-43-261-2404, E-mail: hyoon@chungbuk.ac.kr)

Member, Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

****교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

위해 구조물은 지진하중을 견디도록 내진설계가 이뤄져야 한다(ASCE/SEI 7-10, 2010). 구조물의 내진설계는 상부 구조물뿐만 아니라 기초 및 기초 아래 지반의 영향까지 고려해야 한다. 말뚝기초의 내진설계를 위해 실무에서는 말뚝에 작용하는 지진하중을 고려한 등가 정적해석법이 주로 사용되고 있다. 이때 지반의 비선형적 거동을 나타내는 p - y 곡선이 활용된다(Lim and Jeong, 2017). p - y 곡선은 횡 방향 하중에 의해 발생하는 말뚝의 변위(y)와 이에 대한 지반 반력(p)의 비선형 관계를 나타낸 곡선으로 지반의 깊이와 다짐 상태에 따라 다르게 표현된다(Kim et al., 2018). 다양한 지반과 하중 조건 하에서 p - y 곡선에 대한 선행 연구가 수행되어 왔다(Matlock, 1970; Reese et al., 1974; O'Neill and Murchison, 1983; API, 2010). 실험의 편이성 때문에 많은 연구들이 정적 또는 반복 하중을 말뚝 두부에 가하는 조건에서 수행되고 말뚝 변위와 지반 사이의 비선형 관계를 도출하고 있다(Angelides and Roësset, 1981). 하지만, 이러한 방법은 하중의 진폭이 증가함에 따라 발생하는 토질의 강성 감소와 동적 하중 하에서 발생하는 지반의 관성 및 감쇠를 평가할 수 없다. 따라서, 내진설계에 필요한 지진하중을 합리적으로 고려하기 어렵다는 단점을 나타내고 있다(Rovithis et al., 2009; Yoo et al., 2013; Lim and Jeong, 2018).

이에 최근 말뚝의 동적 p - y 곡선을 제안하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 또한, 현장 구조물과 동일한 조건을 묘사하기 위해 구조물의 상사 관계를 고려하여 진동대 실험을 수행하고 있다(Iai, 1989; Lee et al., 2019). Kim et al. (2018)은 말뚝 캡과 단자유도 무계추를 결합한 후 말뚝 캡 위치에 따른 동적 p - y 곡선의 변화를 구하였다. Lim and Jeong (2017)은 단말뚝과 무계추를 힌지 및 고정단 조건 2가지로 구별하여 사질토 지반에서의 실험을 수행하여 p - y 곡선을 제안하였다. Kang (2018)은 무리 말뚝 위 상부 구조물의 무계에 따른 p - y 곡선의 차이를 실험으로 구현하였으며, Choi and Ahn (2020)은 수치해석을 통해 무리 말뚝에 지진하중이 작용 시 무리 말뚝에 나타나는 간접 효과와 p - y 곡선 변화를 설명하였다. 현장 부지에서의 응력 변형 거동을 상사 조건만으로는 현장을 완벽하게 묘사할 수 없기 때문에, 이를 보완하기 위해 원심모형실험을 활용한 연구가 수행되어 왔다(Yoo et al., 2016; Van Ngo et al., 2018; Lee et al., 2019). 최근, 동적하중 조건에서 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려한 연구의 중요성이 강조되고 있는데, 실제 상부 구조물의 다자유도계 조건을 실험 모형에 적용한 사례는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 구조물이 없는 조건(W/O 구조물, Weight/Only), 단자유도계 구조물 조건(SDOF 구조물, Single degree of freedom) 및 다자유도 구조물 조건(MDOF 구조물, Multi degree of freedom)에서의 말뚝 동적 거동 특성을 진동대 모형실험의 수행을 통해 분석 및 이해하고자 한다.

Fig. 1. Configuration of Shaking Table Test

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1 진동대 시험 장비

Fig. 1은 진동대 실험 장비를 나타낸다. 진동대 실험 장비의 구성은 진동대의 가진 장비, 토조, 말뚝, 말뚝 캡 및 상부 구조물로 이루어져 있다. 최하단에 위치한 진동대의 가진 장비는 STC-V101 모델로 최대 가속도 1 g, 최대 변위 ± 100 mm까지 제어할 수 있다. 진동대 장치 위에 토조가 놓인다. 토조 내에는 지반이 조성되어 있고, 지반 내에 말뚝기초가 설치되어 있다. 지표면에 말뚝 캡이 말뚝과 결합되어 있으며, 그 위로 상부 구조물 모형이 위치한다.

2.2 토조 및 지반 조성

9개의 아크릴판으로 이뤄진 토조의 전체 크기는 높이 495 mm, 폭 600 mm 및 길이 600 mm이다. 토조 내부에는 알루미늄 단말뚝이 설치되어 있다. 현장 말뚝의 암반 근입 형태를 묘사하기 위해 토조 하단부에 20 mm 두께의 알루미늄 플레이트를 설치 및 고정하고, 알루미늄 플레이트에 말뚝을 결합하여 고정하였다. 말뚝 설치 후, 토조 내부에 흙을 70 mm씩 층다짐 하면서 채웠다. 말뚝 두부에 말뚝 캡을 결합하여 설치하였다. 말뚝 캡의 상부 표면은 지표면과 일치시켜 지반에 묻혀있는 형태를 묘사하였다. 실험에 사용한 흙 시료는 현장에서 채취한 화강풍화토이며, 물성치는 Table 1과 같다.

2.3 상사비 조건

본 연구에서는 Iai (1989)가 제안한 진동대 실험 상사조건을 적용하였다(Table 2). 상사비는 26.5이며, 탄성계수는

Table 1. Property of Weathered Residual Soil

Index		Sample
Sieve Analysis	D ₁₀	0.17
	D ₃₀	0.47
	D ₆₀	1.1
	C _u	6.47
	C _c	1.18
	Passing No. 4 sieve [%]	100
	Passing No. 200 sieve [%]	2.42
USCS		SP
Specific gravity		2.59
Unit weight [g/cm ³]		1.67

Table 2. Scaling Factor and Pile Properties

Classification	Scaling factor	Model	Prototype
Material	n/a	Aluminum 6061	Concrete
Pile length [cm]	λ	49	1,298.5
Diameter [cm]	λ	1.2	50
Thickness [cm]	λ	0.2	10
Elastic modulus [GPa]	λ	72.5	14

선행 연구를 참고하여 원형은 14 GPa, 모형은 72.5 GPa이다 (Kang, 2018).

사질토에 근입된 말뚝기초의 거동은 말뚝의 길이 및 지반 반력계수 등에 의해 영향을 받는다(Broms, 1964). Davisson (1970)이 제안한 값을 참고하여 사질토의 지반 반력 상수를 20,000 kN/m³로 가정하면, 본 연구에서 사용된 말뚝기초는 긴 말뚝기초로써 거동한다(Table 3).

2.4 실험 구성 및 모형 제원

Table 4는 실험에 사용한 sin 파의 가속도 및 주파수를 나타낸다. 실험에 사용된 말뚝은 외경 12 mm, 내경 10 mm, 길이 490 mm이다. 말뚝 캡은 폭 245 mm, 길이 245 mm, 두께 20 mm의 알루미늄으로 제작되었고, 말뚝 두부와 강결합 고정되었다. 말뚝 캡 상부의 구조물 모형은 교체가 가능하며, 3가지 조건으로 실험을 수행하였다. (1) 상부 구조물이 없는 조건(W/O 구조물), (2) 단자유도계 구조물(SDOF 구조물) 조건, (3) 다자유도계 구조물 조건(MDOF 구조물). SDOF 구조물 및 MDOF 구조물의 질량은 동일하다. Fig. 2는 실험에 사용된 단자유도계 구조물(SDOF 구조물), 다자유도계 구조물(MDOF 구조물), 지반내 설치된 말뚝 및 설치된 센서를 나타낸 모식도이다. 말뚝 휨 모멘트의 방향이 변화되는 변곡점과 최대 휨 모멘트 위치를 파악하기 위해 총 8개의 변형률

Table 3. Pile Analysis Condition (Broms, 1964)

Classification	Sand
Short pile	$\eta L < 2.0$
Immediate pile	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$
Long pile	$\eta L > 4.0$

$$\eta = \left(\frac{\eta_h}{EI} \right)^{\frac{1}{5}}$$

η_h : constant of subgrade reaction

L : Pile length

E : Modulus of elasticity

I : Geometrical moment of inertia

Table 4. Input for the Shaking Table Test

Case	Input acceleration [g]	Input frequency [Hz]
W/O structure	0.3, 0.4, 0.5	3~10
SDOF structure	0.3, 0.4	3~10
MDOF structure	0.3, 0.4, 0.5	3~10

계를 말뚝 표면에 부착하였다(Meymand, 1994). 진동대 실험 시 구조물의 거동을 확인하기 위해 토조 최하단 바깥쪽에 변위계(LVDT) 1개를 설치하였다. SDOF 구조물은 토조 하단과 말뚝 캡, 상부 구조물 최상단에 총 3개(Fig. 2(a)), MDOF 구조물은 토조 하단과 말뚝 캡, 상부 구조물의 각 층에 총 5개의 가속도계를 부착하였다(Fig. 2(b)).

3. 실험 결과 및 분석

3.1 깊이에 따른 휨 모멘트, 말뚝 변위

Fig. 2에 표시된 변형률계 위치에서 얻은 휨모멘트를 이용, 근입깊이에 대해 Spline 보간법을 활용하여 전체 깊이의 연속적인 휨모멘트를 산정하였다. Fig. 3은 말뚝에 최대 휨 모멘트가 나타날 때, 상부 구조물 별 깊이에 따른 휨 모멘트 분포를 나타낸다. 상부 구조물은 세 가지 조건(W/O 구조물, SDOF 구조물, MDOF 구조물)이고, 가속도는 0.3 g, 0.4 g이다. 모든 실험에서 휨 모멘트의 변곡점은 지표면으로부터 깊이 43.1 cm에서 나타났고, 이 지점에서 최대 휨 모멘트가 발생하였다. 휨 모멘트가 음(-)에서 양(+)방향으로 전환은 가속도 0.3 g에서 W/O 구조물은 깊이 18.6 cm, SDOF 구조물은 깊이 8.3 cm, MDOF 구조물은 깊이 14.5 cm에서 이루어졌다. 가속도 0.4 g에서는 W/O 구조물이 깊이 18.5 cm, SDOF 구조물은 깊이 10.1 cm, MDOF 구조물은 깊이 25.4 cm에서 휨 모멘트의 방향이 전환되었다. 이와 같은 휨 모멘트의 방향이 전환은 긴 말뚝 조건에서 말뚝의 변형 특성에 따라 말뚝의 상부와 하부의 거동 방향이 다르기 때문이다(Broms,

Fig. 2. Soil-Structure Interaction Model and Sensor Locations, (a) SDOF Structure, (b) MDOF Structure

1964). W/O 구조물, SDOF 구조물 및 MDOF 구조물을 포함한 말뚝에 발생하는 최대 휨 모멘트는 가속도 0.3 g에서 각각 33%, 18% 증가하였고, 가속도 0.4 g에서 각각 6% 증가, 11% 감소하였다. SDOF 구조물과 MDOF 구조물의 경우에는, 음(-)방향에서 입력가속도 0.3 g, 0.4 g 모두 SDOF 구조물의 휨모멘트가 크게 나타났다. 양(+)방향의 경우, 입력가속도가 0.3 g일 때, 깊이 7.8 cm에서 MDOF 구조물의

Fig. 3. Bending Moment of Piles by the Superstructure when the Magnitude of the Input Acceleration is (a) 0.3 g (b) 0.4 g

휨모멘트가 높지만, 깊이 5.2 cm에서 SDOF 구조물의 휨모멘트가 더 높게 나타났다. 가속도 0.4 g의 경우, 깊이 11.8 cm부터 MDOF 구조물의 휨모멘트 절댓값이 SDOF 구조물보다 더 높아진다. 이렇게 휨 모멘트의 차이를 보이는 이유는 상부 구조물의 모드형상에 의해 관성력과 고유주기에 따른 증폭이 다르기 때문이다(Ahn et al., 2021). 하지만, 세 가지 실험 조건 모두 가속도가 증가함에 따라 최대 휨 모멘트가 증가하는 경향을 보인다.

3.2 지반-구조물 시스템의 고유진동수

Fig. 4는 가속도 0.5 g, 깊이 11.8 cm에서 MDOF 구조물의 입력진동수에 따른 동적 p_y 곡선을 나타낸다. 입력진동수별 비교 결과, 진동수가 6 Hz에서 가장 큰 변위와 지반반력이 나타났다. 이는 MDOF 구조물 및 지반 시스템의 고유진동수가 6 Hz임을 의미하며 나머지 두 구조물에서도 동일하게 나타났다. 따라서, 고유진동수에서 공진현상이 발생 가능함은 기존 연구결과와 일치한다(Ahn et al., 2021). 또한, 고유진동수보다 진동수가 높아지면 변위는 감소하고, 지반반력은 증가하게 된다.

Fig. 5는 가속도 0.3 g, 깊이 11.8 cm에서 입력진동수의 변화에 따른 지반-구조물 시스템의 최대 지반반력을 나타낸다. 그 결과, 세 조건 모두 6 Hz에서 가장 큰 지반반력을 나타냈다. MDOF 구조물은 W/O 구조물보다 0.8배 지반반력이 감소하였다. 하지만, SDOF 구조물은 MDOF 구조물보다

Fig. 4. Dynamic p-y Curves of MDOF Structure Model

Fig. 5. Soil Resistance by Various Input Frequencies for Each Superstructure

약 5.6배 지반반력이 크게 나타났다. 이는 MDOF 구조물을 대신하여 SDOF 구조물에 의한 내진설계가 안정적인 측면에서 보수적인 설계임을 의미한다.

3.3 지반-구조물 상호작용 동적 p-y 중추 곡선

Fig. 6은 진동수가 3 Hz, 5 Hz, 7 Hz일 때, 깊이 5.2 cm, 11.8 cm, 31.4 cm의 동적 p-y 중추 곡선을 나타낸다. 각 점은 Fig. 4처럼 전체 시간에 대한 동적 p-y 곡선을 그렸을 때, 그 중 최댓값을 의미한다. SDOF 구조물은 깊이 5.2 cm에서 나머지 두 구조물 조건보다 기울기가 크게 나타나고, 깊이가 깊어질수록 기울기가 감소하였다. W/O 구조물 및 MDOF 구조물은 깊이 5.2 cm에서 SDOF 구조물에 비해 낮은 지반반력을 보이며 기울기가 작게 나타났다. 또한, 깊이가 깊어질수록 두 구조물 모두 지반반력이 높아지며 기울기도 소폭 증가하였다. 이는 깊은 곳보다 지표면 부근에서 말뚝의 변위가 상대적으로 크게 발생할 때 지반의 움직임이 말뚝의 움직임을 따라오지 못하면서 발생하는 지반-말뚝 분리현상이 나타나고, 지반이 깊어짐에 따라 하층이 지반에 분산되면서 분리현상이 줄어드는 것으로 판단된다(Ahn et al., 2021).

Fig. 6. Dynamic p-y Backbone Curve; Depth at (a) 5.2 cm, (b) 11.8 cm, and (c) 31.4 cm

4. 결 론

본 연구에서는 진동대 실험장치를 이용하여 사질토 지반에서의 상부 구조물 형상에 따른 동적 p-y 곡선을 분석하여 지반-구조물 상호작용의 영향을 확인하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 입력가속도가 증가함에 따라 휨모멘트와 말뚝 변위가 증가하였다. SDOF 구조물의 휨 모멘트 및 변위가 가장 크게 발생하였다.
- 세 가지 실험조건에서 지반에 근입된 말뚝의 고유진동수는 6 Hz로 동일하였다. 하지만, 상부구조물의 모드형상에 따라, 지반반력은 다르게 나타났다. 본 연구에서는 SDOF 구조물이 가장 큰 지반반력을 나타냈으며, MDOF

및 W/O 구조물은 비슷한 양상을 보였다.

- 지표면에 가까울수록 SDOF 구조물의 p-y 곡선의 기울기가 가장 크게 나타났다. 하지만, 깊이가 깊어질수록 세 조건에서의 p-y 곡선 기울기 차이는 감소하였다.
- 본 연구의 결과, SDOF 구조물로 모사한 내진설계는 보수적인 설계임을 나타내고 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(21CTAP-C152100-03).

References

- Ahn, S.N., Park, G., Yoon, H.C., Han, J.H., and Jung, J.W. (2021). Evaluation of soil-structure interaction in structure models via shaking table test. *Sustainability*, Vol. 13, pp. 4995.
- American Petroleum Institute (API). (2010). *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*.
- Angelides, D.C., and Roësset, J.M. (1981). Nonlinear lateral dynamic stiffness of piles. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. 11, pp. 1443-1460.
- ASCE/SEI 7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
- Broms, B.B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90, pp. 27-63.
- Choi, Y., and Ahn, J. (2020). Evaluation of p-y curves and p-multiplier of pile groups corresponding to sand properties change based on 3D numerical analysis. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, pp. 207-217.
- Davisson, M.T. (1970). Lateral load capacity of piles. *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Highway Research Board*, pp. 104-112.
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1 g gravitational field. *Soils and Foundation*, Vol. 29, pp. 105-118.
- Kang, H.S. (2018). *Dynamic behavior of pile group considering superstructure in sand ground*. Ph.D. dissertation, Chungbuk University.
- 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. 10, No. 19, pp. 35-41.
- Lee, M.J., Yoo, M.T., Park, J., and Min, K.C. (2019). Evaluation of lateral pile behavior under cyclic loading by centrifuge tests. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 35, pp. 39-48.
- Lim, H.S., and Jeong, S. (2017). Analysis of dynamic behavior of a single pile in dry sand by 1 g shaking table tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 7, No. 33, pp. 17-28.
- Lim, H.S., and Jeong, S. (2018). Simplified p-y curves under dynamic loading in dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 113, pp. 101-111.
- Matlock, H. (1970). *Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay*. Offshore Technology Conference.
- Meymand, P.J. (1994). *Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay*. Ph.D. dissertation, University of California, p. 75.
- O'Neill, M.W., and Murchison, J.M. (1983). *An evaluation of p-y relationships in sands*. University of Houston.
- Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*.
- Rovithis, E., Kirtas, E., and Pitilakis, K. (2009). Experimental p-y loops for estimating seismic soil-pile interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 7, pp. 719-736.
- United States Geological Survey. (2020). *Worldwide Earthquakes 2000-2019 table*. Retrieved September 7, 2021, from <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>
- Van Ngo, L., Kim, J.-M., Lim, J., and Lee, C. (2018). Foundation-soil-foundation interaction of shallow foundations using geo centrifuge: Experimental approach. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, pp. 25-35.
- 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.
- Yoo, M.T., Kwon, S.Y., and Lee, I.H. (2016). Development of dynamic p-y curve for jacked pile by centrifuge test. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, pp. 39-47.

Received	September 7, 2021
Revised	September 8, 2021
Accepted	September 16, 2021