한국지반공학회논문집 제38권 6호 2022년 6월 pp. 17 ~ 28
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.38, No.6, June 2022 pp. 17 ~ 28

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2022.38.6.17

대형 진동대 실험을 이용한 다자유도 구조물의 관성 상호작용 평가

Evaluation of Inertial Interaction of a Multi-degree-of-freedom Structure during a Large-scale 1-g Shaking Table Test

채 종 훈[1] Chae, Jonghoon
윤 형 철[2] Yoon, Hyungchul
정 종 원[3] Jung, Jongwon

Abstract

The effect of the soil-structure interaction (SSI) on has been recently evaluated in shaking table tests. However, most of these tests were conducted on single-degree-of-freedom (SDOF) superstructures and a single-pile. This study investigates the inertial interaction effect of a multi-degree-of-freedom (MDOF) superstructure system with a group piles on a large-scale shaking table test. Whereas the SDOF superstructure system shows a single-frequency amplification tendency, the MDOF superstructure system exhibited amplification tendencies of the acceleration phase and frequency responses for multiple frequencies. In addition, the amplification phenomenon between the footing and the column-type superstructure exceeded that between the footing and the wall-type superstructure, indicating a greater inertial interaction effect of the column-type superstructure. The relationship between shear force and inertial force, the relative vertical and horizontal displacements on the footing was figured out. Also, the ananlysis of dynamic p-y curve at each depth was conducted. In summary, the MDOF and SDOP superstructure systems exhibited different behaviors and the column-type superstructure exerted a higher interaction effect than the wall-type superstructure.

요 지

동적 하중 재하시 지반-구조물 상호작용 확인을 위해 진동대 실험이 많이 시행됐으나, 대부분 단자유도 상부 구조물과 단말뚝을 적용한 진동대 실험이 주를 이루고 있다. 이에 본 연구에서는 다자유도 구조물과 군말뚝을 적용한 대형 진동대 실험을 통해, 상부 구조물의 관성 상호작용 영향을 분석하였다. 실험 결과, 단일 진동수에서의 증폭 경향을 나타내는 단자유도 구조물과는 다르게 다자유도 구조물에서는 다수의 진동수 구간에서 시간-가속도 발생 경향 및 응답 주파수의 유사성과 증폭 경향이 나타났다. 또한, 벽체 구조물에 비하여 기둥 구조물에서의 기초판과 상부 구조물과의 증폭현상이 더 크게 발생하여 기둥 구조물에 의한 관성 상호작용 효과가 더 큰 것으로 판단된다. 그리고 기초판에서의 전단력 및 관성력 관계, 상대 수직 변위 및 상대 수평 변위 관계와 심도별 동적 p-y 곡선에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과, 다자유도 구조물에서는 단자유도 구조물과는 상이한 거동을 나타내고 있으며, 벽체보다 기둥 구조물의 관성 상호작용의 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

1 정회원, 충북대학교 토목공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil Engrg., Chungbuk National Univ.)
2 비회원, 충북대학교 토목공학부 부교수 (Associate Prof., School of Civil Engrg., Chungbuk National Univ.)
3 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수 (Member, Prof., School of Civil Engrg., Chungbuk National Univ., Tel: +82-43-261-2405, jjung@chungbuk.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2022 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Keywords : Inertial interaction effect, Large scale 1g shaking table test, MDOF, Wall type and column type superstruture

1. 서 론

최근 지진으로 인한 피해는 건물뿐 아니라 말뚝기초에서도 발생하고 있다(Kansai Branch of Architectural Institute Japan, 1996; BTL Committee, 1998; Architectural Institute Japan, 2012). 액상화가 발생하지 않는 견고한 지반에서는 상부 구조물의 관성에 의한 말뚝 두부 피해가 크고, 액상화가 발생하는 지반에서는 지반변위에 의한 지중내 말뚝의 피해가 큰 것으로 나타났다(Suzuki, 2014). 지진으로 인한 말뚝의 변형 및 파괴에 미치는 원인을 평가하기 위해 지반-구조물 상호작용(SSI, Soil-Structure-Interaction)에 관한 연구가 진동대 실험과 원심모형실험을 통해 주로 이루어지고 있다(Feng and Wang, 2006; Goit et al., 2008; Yang et al., 2009a; Suzuki et al., 2010; Yang et al., 2010; Kim et al., 2018; Lim et al., 2017; Lee et al., 2019; Ahn et al., 2021).

동적 하중 작용 시 구조물의 동적 거동이 주변 지반에 따라 달라지는 지반-구조물 상호작용 효과는 말뚝기초로 지지되는 구조물의 동적 거동 평가에 있어 중요한 요소이다. 지반-구조물 상호작용은 크게 운동학적 상호작용(kinematic interaction)과 관성 상호작용(inertial interaction)으로 구분된다. 운동학적 상호작용은 지반과 기초와의 강성차이로 인해 기초 입력 운동(foundation input motion)이 자유장 지표면에서의 운동(free field motion)과 상이하게 발생하는 것이다. 그리고 관성 상호작용은 지진하중에 의해 발생한 구조물의 관성력이 기초-지반 간 상대변위를 유발하여 지반재료 감쇠(hysteretic soil damping)와 방사 감쇠현상(radiation damping)을 일으키는 현상을 의미한다(Wolf, 1985).

Yoo et al.(2012)은 모래 지반에서 모형 말뚝을 이용한 진동대 실험을 통해 운동학적 상호작용보다 관성 상호작용에 의한 영향이 지배적인 것으로 기술하였으며, Wilson(1998)은 말뚝 직경의 9배 이하 깊이에서는 운동학적 상호작용보다 관성 상호작용에 의한 말뚝 모멘트에의 영향이 큼을 확인하였다. 또한, Kim et al.(2018)과 Lee et al.(2019)은 상부 구조물로 인한 관성 상호작용은 기초판의 근입 및 크기에 따라 말뚝에의 변형에 큰 영향을 미치는 것을 진동대 실험을 통해 제시하였다.

모래 지반에 대한 대형 진동대 실험 결과에서 말뚝에 발생하는 변위와 모멘트를 구조물과 지반의 고유주기 측면에서 분석한 결과, Tokimatsu et al.(2005)는 상부 구조물의 고유주기가 지반의 고유주기보다 작을 경우, 지반의 변위는 상부 구조물의 관성력과 동일한 위상을 나타내고 견고한 지반일수록 상부 구조물의 관성력이 지배적인 것으로 제시하였다. 또한, Suzuki et al.(2014)의 연구 결과에 따르면 상부 구조물의 고유주기가 지반의 고유주기와 근접하거나 낮은 경우 관성력이 말뚝의 응력을 지배하는 것으로 나타났다.

Ahn et al.(2021)은 구조물이 없는 경우, 단자유도 및 다자유도 구조물의 경우로 나누어 단말뚝의 진동대 모형실험을 수치해석과 비교하였으며, 이를 통해 말뚝의 변위는 구조물이 없는 경우, 다자유도 구조물, 단자유도 구조물 순으로 크게 나타남을 제시하였다. 또한, Wolf (1985)는 단자유도 및 다자유도 구조물에 대한 모델 방정식을 통해 단자유도 구조물에서는 고유 진동수가 작을수록 더 큰 변위가 발생하나, 다자유도 구조물에서는 진동수의 변화에 따른 명확한 경향이 없음을 제시하였다.

상기와 같이 동적 하중 작용 시 지반과 구조물의 관성 상호작용에 관한 연구는 많이 수행되었으나, Table 1과 같이 대부분 단말뚝 기초의 단자유도 구조물에 대한 진동대 실험 연구 결과가 주를 이루고 있다.

일반적으로 대부분의 구조물은 단자유도가 아닌 다자유도 구조물의 형태를 가지며, 이의 형태도 벽체 혹은 기둥 구조물을 비롯하여 다양한 종류가 존재한다. 그리고 이러한 다자유도 구조물에 적용된 말뚝기초에서는 수평 지지력이 매우 중요한 요소이며, 상부 구조물의 관성력으로 발생한 수평력은 말뚝기초의 수평 지지력과 매우 밀접한 관련이 있다.

따라서, 본 연구에서는 동적 하중 재하시 벽체와 기둥 형태의 다자유도 구조물에 대한 지반-구조물 상호작용을 확인하기 위해 사질토 지반에서 대형 진동대 실험을 시행하였으며, 이를 통해 말뚝의 수평 방향 거동에 중요한 요소인 관성 상호작용 효과를 분석하였다.

Table 1. Model pile tests using 1g shaking table

Reference	Soil type	Superstructure	Pile type	Base motion	Shaking level
Feng and Wang (2006)	Saturated sand	Simple mass	Single	Uniform cyclic	0.3g
Han (2006)	Saturated sand	Simple mass	Single	Uniform cyclic	0.1g~0.2g
Goit et al. (2008)	Dry sand	Simple mass	Group	Uniform cyclic	0.2~2.0g
Yang et al. (2009a)	Dry, Saturated sand	Simple mass	Group	Uniform cyclic	0.154g~0.26g
Suzuki et al. (2010)	Dry sand	Simple mass	Group	Earthquake	0.03~0.8g
Yang et al. (2010)	Dry, Saturated sand	Simple mass	Single	Uniform cyclic	0.09g~0.4g
Kim et al. (2018)	Dry sand	Simple mass	Single	Earthquake	0.10g
Lim et al. (2018)	Dry sand	Simple mass	Single	Uniform cyclic	0.098g~0.4g
Lee et al. (2019)	Dry sand	Simple mass	Single	Earthquake	0.15g
Ahn et al. (2021)	Dry sand	3 story BLDG	Single	Uniform cyclic	0.3~0.5g

2. 축소 모형실험

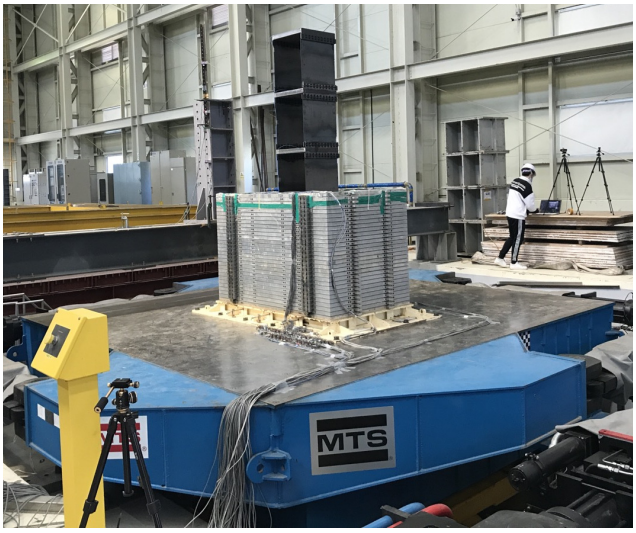
2.1 대형 진동대 실험 장치

본 연구에 사용된 대형 진동대는 부산대학교 지진방재센터 보유장비(미국, MTS Systems Corp.)로써 4기의 Accumulator Bank를 적용한 Blowdown 3자유도 시스템으로 최대 1.0g의 지진을 0.1～60Hz까지 적용할 수 있으며, 진동대의 크기는 5m×5m이다(Fig. 1(a)). 실험에 사용된 토조는 높이 4.5cm의 단일구조가 30층으로 조합된 적층 구조의 모형토조를 사용하였으며, 내부 크기는 폭 1.08m, 너비 1.88m, 높이 1.35m이다(Fig. 1(b)).

2.2 실험 조건 및 방법

본 축소모형실험에서는 Ahn et al.(2021)의 다자유도 구조물에 대한 선행연구 시 발생 변위가 기존 진동대 실험에 비해 크게 발생한 점을 고려하여, Lim and Jeong (2017), Yang(2009b), Han et al.(2010), Gibson(1996) 및 Meymand(1998)의 연구 결과를 바탕으로 Iai(1989)의 진동대 실험 상사법칙 중에 제3법칙을 적용하였다.

단자유도 구조물의 경우 상부 구조물을 단순 질량으로 변환하여 적용하므로, 상부 구조물과 말뚝에 대해 동일한 상사비 적용은 어려움이 없으나, 다자유도 구조물에서는 모형과 원형 말뚝의 탄성계수 차이가 상사비에 비해 작으므로 상부 구조물과 말뚝의 상사비를 동일하게 적용하는 것이 매우 어렵다. 따라서 기존 연구결과 (Ahn et al., 2021; Kang, 2018; Han et al., 2010; Yang, 2009b)를 참고하여 말뚝의 수평 방향 거동에 큰 영향을 미치는 말뚝의 휨 강성에 대한 상사비를 만족시키기 위해, 상부 구조물의 상사비 8과는 별도로 10의 상사비를



(a)

(b)

Fig. 1. Device set up of 1g large scale shaking table test

적용하여 가능한 한 동등한 휨 강성 상사비를 구현하였다(Table 2). 모형 말뚝은 알루미늄 재질로 제작하였고 길이는 1m, 직경 22mm, 두께 2mm로 적용하였다. 모형 말뚝의 탄성계수는 Kang(2018)의 일축 변형률 값 선행 연구를 참고하여 72.5GPa로 하였고, 원형 말뚝은 강관 말뚝으로 직경 250mm, 두께 12mm, 길이 10m의 제원을 설정하였다.

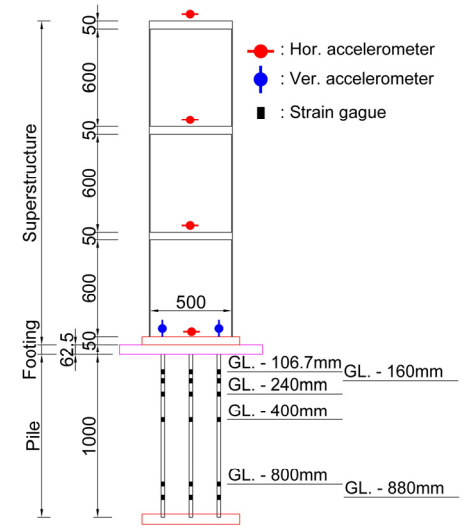
모형 구조물의 말뚝기초는 3×3 배열의 군말뚝으로 계획하였으며, 선단부의 암반근입을 모사하기 위해 토조 하단부 알루미늄 플레이트와 강 결합하여 고정시켰다(Fig. 1(b)). 기초판(footing)은 모형구조물의 상재하중을 고려하여 60cm×60cm×6.25cm(B×L×t)의 알루미늄 플레이트로 제작하였고 말뚝과 강 결합하여 말뚝 두부 고정상태를 모사하였다.

다자유도 구조물 종류에 따른 관성 상호작용의 차이를 확인하기 위해 상부 구조물은 Fig. 2(b), (c)와 같이 벽체 구조물과 기둥 구조물로 제작하였으며, 벽체 구조물은 지진하중 가진 방향의 직각 방향으로 벽체를 설치하여 그 영향을 확인하고자 하였다.

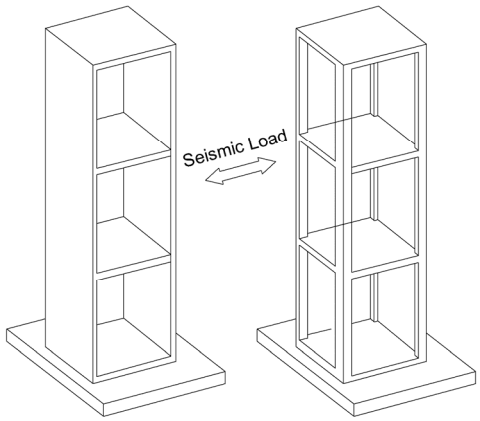
지진하중과 상부 구조물의 관성 거동으로 인해 발생하는 각 말뚝의 휨 변형률 분포를 측정하기 위해 7개의 변형률계를 설치하였다. 그리고 구조물의 각 층에는 수평 방향 가속도계를 설치하였으며, 기초판의 중앙부와 양측에 각각 1개의 수평 방향 가속도계와 2개의 수직 방향 가속도계를 설치하여 기초판의 상대 변위를 확인할 수 있도록 하였다(Fig. 2(a)).

실험에 사용된 모래는 Table 3과 같으며, 함수비 10.4%를 적용한 층다짐을 20cm마다 시행하여 상대밀도 95%의 조밀한 모래 지반을 조성하였다.

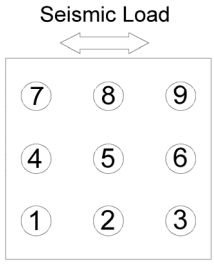
모형실험에 사용된 지진하중은 구조물에 미치는 다양한 주기적 특성에 의한 영향과 국내 지반 특성을 고려하기 위해, Fig. 3과 같이 여러 주파수 특성을 내포하고



(a) Schematic View



(b) Wall type (c) Column type



(d) Layout of piles

Fig. 2. Locations and type of sensors, model measurement (unit:mm), layout of pile

Table 2. Scaling factor

Classification		Scaling factor	Model	Prototype
Structure	Height	λ(=8)	2 m	16 m
	Area	λ^2(=64)	0.25 m^2	A=16.0 m^2
	Weight	λ^3(=512)	0.4 tonf / 0.335 tonf [1)]	205t onf / 172 tonf [1)]
Pile	Material	N/A	Aluminum 6061	Steel, SKK400
	Length	λ (=10)	1 m	10 m
	Elastic modulus	λ (=3)	72.5 GPa	210 GPa
	Flexural rigidity	λ^5(=30,000) [2)]	0.4601 kN·m^2	13.38 MN·m^2

주1) Wall type / Column type
주2) $\lambda^5(8^5=32,768) \fallingdotseq \lambda^5(10^4\times3=30,000)$

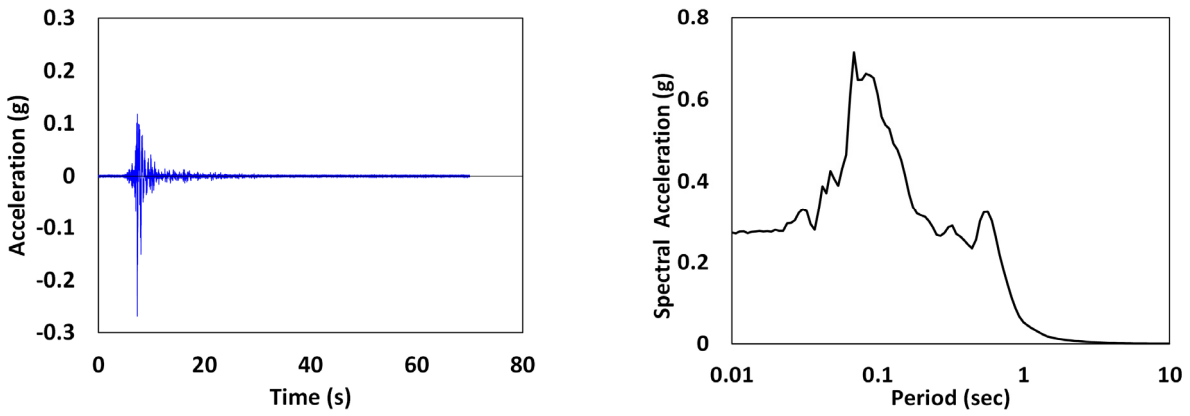


Fig. 3. Time series and response spectrum of Pohang earthquake

Table 3. Sand properties

Index		Value
Sieve analysis	D_{10}	0.50
	D_{30}	0.60
	D_{60}	1.00
	Cu	0.72
	Cg	1.67
	Passing No.4 (%)	97
	Passing No.200 (%)	3
USCS		SP
γ_{dmax}		16.7 kN/m^3
γ_{dmin}		13.2 kN/m^3
γ_d		16.5 kN/m^3

있으며 최근 국내에서 기록된 포항 지진파(포항(PHA2) 관측소)를 사용하였다.

2.3 동적 p-y 곡선

지반 위에 놓인 기초를 단위 면적당 작용하는 연직 하중과 변위와의 일정한 상관관계로 제안한 Winkler Foundation(Winkler, 1876)의 개념은 Hetenyi(1946)에 의해 축력과 수평력이 동시에 작용하는 말뚝기초를 4차 미분방정식으로 구현하였다. 이후 McClelland and Focht (1958)는 현장 수평 방향 재하시험을 통해 실내 삼축압축시험에서 산정된 구속압력과 변형률을 이용하여 비선형 p-y 곡선을 제안하였다. 이는 지반과 말뚝을 각각 비선형 스프링과 선형 요소로 모델링하고, 스프링의 강성은 Discrete Load-Transfer 개념을 이용한 비선형 p-y 곡선, 즉 BNWF(Beam on Nonlinear Winkler Founation) 개념으로 발전하였다.

상기와 같은 개념을 이용하여 Ting(1987)은 지반반력과 말뚝 변위를 산정하는 구체적인 비선형 p-y 곡선 작성 방법을 제시하였다. 즉, 말뚝의 변형률과 휨 강성(EI)을 이용하여 모멘트로 변환한 후(식 (1)), 말뚝 깊이에 따른 모멘트 분포곡선(M(z))을 작성한다. 그리고 이를 미분(식 (2))하여 전단력, 2번의 미분(식 (3))과 2번의 적분(식 (4))을 통해 각각 말뚝 깊이에 따른 횡 방향 지반반력(p)과 말뚝의 수평 변위(y)를 산정할 수 있다.

$$M(z) = \frac{EI \cdot \epsilon(z)}{y} \tag{1}$$

$$V(z) = \frac{dM(z)}{dz} \tag{2}$$

$$p(z) = \frac{d^2M(z)}{dz^2} \tag{3}$$

$$y(z) = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \tag{4}$$

여기서, E : 탄성계수
I : 단면 2차 모멘트
y : 도심 거리
z : 깊이
M(z) : z 깊이에서의 말뚝 모멘트
ε(z) : z 깊이에서의 말뚝 변형률
V(z) : z 깊이에서의 말뚝 전단력
p(z) : z 깊이에서의 지반반력
y(z) : z 깊이에서의 말뚝 수평 변위

제한된 개수의 변형률계를 이용하여 산정한 말뚝의 모멘트로부터 전단력, 지반반력 및 말뚝 변위를 산정하므로 미적분 계산의 어려움이 발생한다. 이에 말뚝의 연

속적인 모멘트 값을 추정하기 위해 모멘트 분포곡선식(polynomial regression 방법, cubic-spline 방법, quatric-spline 방법, quintic-spline 방법)이 여러 연구자에 의해 제안되었다(Wilson, 1998; Dou and Byrne, 1996; Yang et al.,2010; Yoo et al., 2013). Haiderali(2016)는 최근 이러한 방법의 신뢰도를 수치해석과 실 재하시험을 통해 연구하여 cubic-spline 방법이 가장 우수한 것으로 제안하였으며, 본 연구에서는 cubic-spline 방법을 적용하여 모멘트 분포곡선을 산정하였다.

실험 결과 분석시 내·외부 및 계측기기의 전기적 신호에서 발생할 수 있는 잡음의 제거가 필요하다. 본 연구에서는 MATLAB(2018)에서 제공하는 band-pass 필터링 방법(Yang et al., 2010; Yoo et al., 2013)과 경험적 Bayesian 방법(empirical Bayesian method)을 이용하여 잡음을 제거하였다.

3. 실험 결과

3.1 고유 진동수 분석 결과

지반과 구조물의 고유 진동수를 확인하기 위하여 sweep test를 구조물이 없는 경우, 벽체 구조물을 설치한 경우 및 기둥 구조물을 설치한 경우로 나누어 각각 white noise (random noise)를 적용하여 시행하였다. Fig. 4에 sweep test에서 단위 주파수 당 힘은 일정하고 넓은 범위의 주파수를 모두 포함하는 입력파를 이용하였다.

Sweep test 결과를 구조물이 없는 경우, 벽체 구조물 및 기둥 구조물을 설치한 경우에 대해 Fig. 5에 나타내었다. 구조물이 없는 경우, 기초와 지반의 고유 진동수는 4.5Hz 구간에서 단일 진동수를 나타낸다. 벽체 구조물 설치시에는 2.5Hz, 6.5Hz, 10Hz, 11.5Hz, 기둥 구조물 설치시에는 2.75Hz, 8.5Hz, 9.5Hz, 16.5Hz의 고유 진동수를 나타내고 있다. 본 실험에 적용된 다자유도 구조물의 경우, 단자유도 구조물이 갖는 단일 고유 진동수와는 상이하게 여러 개의 고유 진동수가 나타나고 있다. 또한, 구조물이 없는 경우에서 확인된 기초와 지반의 고유 진동수 4.5Hz는 Fig. 5(b)와 (c)에서 볼 수 있듯이 구조물 설치시 그 고유 진동수가 변화되었을 알 수 있다.

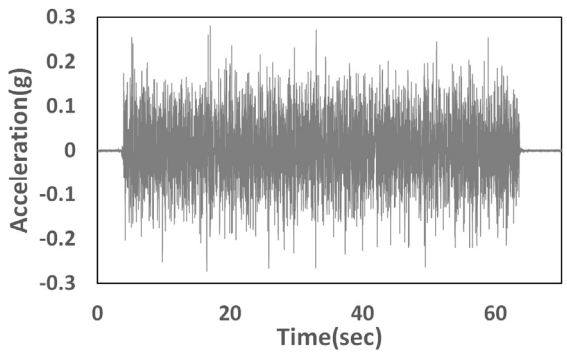


Fig. 4. White noise wave

3.2 시간-가속도 및 주파수 분석 결과

지진파 적용시 상부 구조물의 관성 상호작용에 의한 구조물과 말뚝기초에의 영향을 비교하기 위하여 진동대 하부, 기초판 및 상부 구조물에서의 시간-가속도와

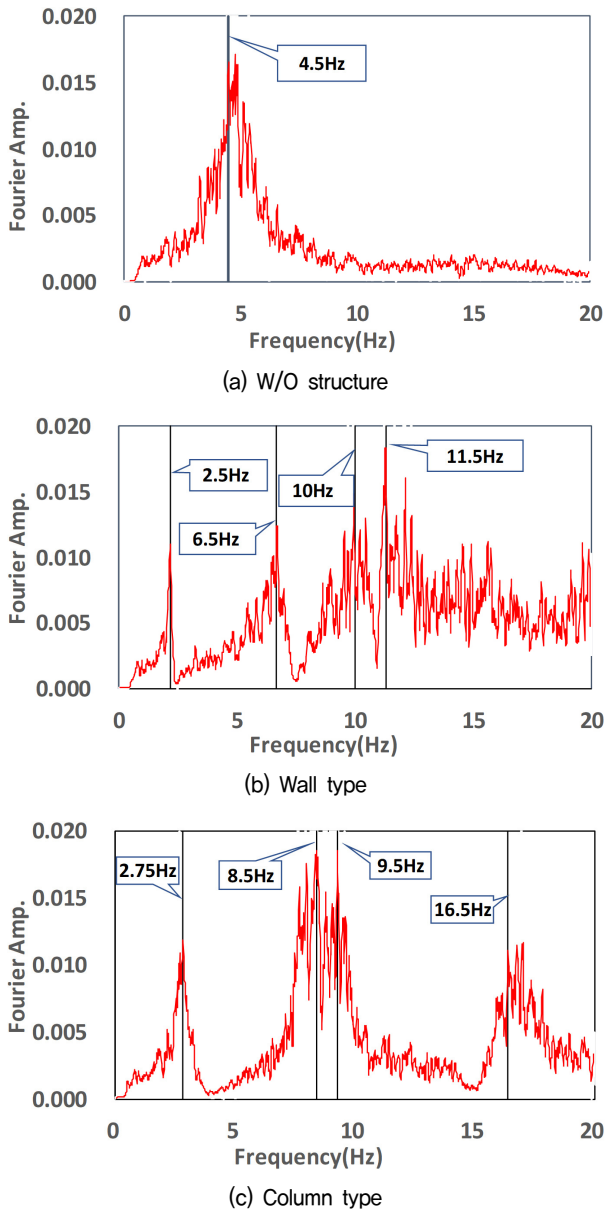


Fig. 5. Sweep test results

주파수 분석 결과를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

상부 구조물이 없는 경우 Fig. 6(a)와 같이 입력지진파와 기초판의 최대 가속도는 는 약 7.4초에서 최대 가속도를 나타내며 기초판에서의 가속도는 입력지진파에 비해 약 2.6배 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(b) 벽체 구조물에서는 입력지진파, 기초판 및 상부 구조물에서의 최대 가속도는 각각 7.3초, 7.4초 및 8.0초에서 나타나며, 각 위치에서의 가속도는 해당 시간에서의 입력지진파에 비하여 약 4.3배, 11.7배 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6(c) 기둥 구조물에서 입력지진파, 기초판 및 상부 구조물에서의 최대 가속도는 각각 7.4초, 7.7초 및 7.8초에서 나타나며, 각 위치에서의 가속도는 해당 시간에서의 입력지진파에 비하여 약 28.7배, 6.9배 증가하는 것으로 나타났다.

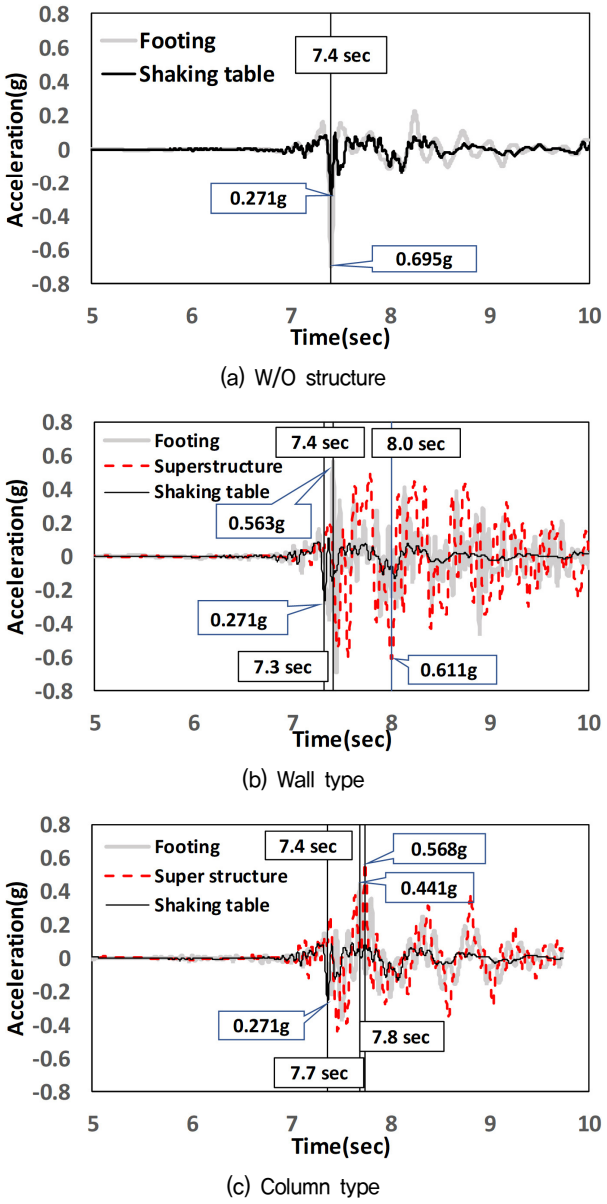


Fig. 6. Measured acceleration with time domain

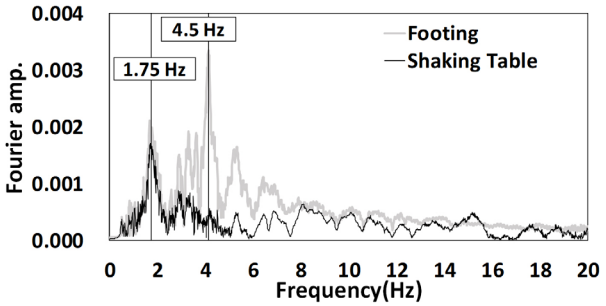
입력지진파에 대해 기초판과 상부 구조물에 대한 시간-가속도 분석 결과, 상부 구조물이 없는 경우 입력 지진파와 기초판에서의 가속도는 동일 시간대에서 최대값을 나타내어 유사한 발생 경향, 즉 동시 거동을 하는 것으로 판단된다. 벽체 구조물의 경우 기초판은 입력 지진파와 유사한 시간대에서 최고 가속도를 나타내나, 기초판과 상부 구조물은 서로 다른 시간대에서 최고 가속도를 나타내고 있어 관성력이 기초에 미치는 영향은 제한적일 것으로 보인다. 기둥 구조물의 경우 기초판은 입력 지진파와 다른 시간대에서 최고 가속도를 나타내고, 기초판과 상부 구조물은 유사한 시간대에서 최고 가속도를 나타내고 있어 관성력이 기초에 미치는 영향은 클 것으로 보인다.

Fig. 7(a) 상부 구조물이 없는 경우 입력 지진파는 1.75Hz에서 최대 응답을 나타내고 있으며, 기초판에서는 4.5Hz에서 최대 응답을 나타낸다. 1.75Hz 영역에서는 입력 지진파의 최대 응답과 기초판에서의 두 번째 응답이 일치하고, 4.5Hz 영역에서는 기초판에서의 응답이 입력 지진파 대비 우세함을 알 수 있다.

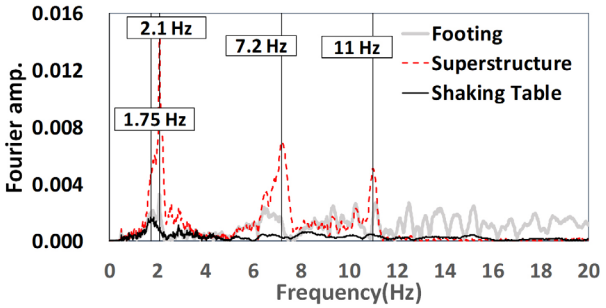
Fig. 7(b) 벽체 구조물의 경우, 입력 지진파와 기초판은 1.75Hz 구간에서 주파수 응답이 일치하고 이후 구간에서는 유사한 경향은 없는 것으로 보인다. 상부 구조물에서의 최대 응답 주파수는 2.1Hz, 7.2Hz, 11Hz 구간에서 발생하나 입력 지진파의 최대 응답은 1.75Hz에서 나타나고 있어 이로 인한 증폭은 거의 발생하지 않은 것으로 보인다. 또한, 기초판과 상부 구조물은 2.1Hz 구간을 제외하고 나머지 7.2Hz, 11Hz 구간에서의 상호 간 최대 응답 주파수 대역이 서로 일치하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(c) 기둥 구조물의 경우 입력 지진파와 기초판은 1.75Hz 구간에서 주파수 응답이 일치하고 이후 구간에서는 유사한 경향을 나타내고 있지 않다. 상부 구조물에서의 최대 주파수는 2~3Hz, 7Hz, 8Hz 구간에서 발생하나 입력 지진파의 최대 응답은 약 1.75Hz에서 최댓값을 나타내고 있어 입력 지진파로 인한 증폭은 거의 발생하지 않은 것으로 보인다. 그러나, 기초판과 상부 구조물의 경우 1.75Hz에서 응답 주파수 발생 경향이 유사하며, 7Hz, 8Hz 구간에서의 상호 간 최대 주파수 대역이 서로 일치하는 것을 알 수 있다.

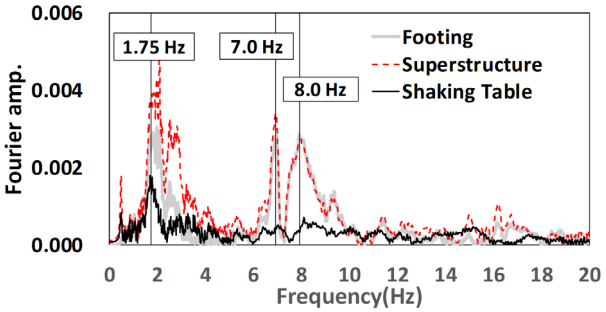
상부 구조물이 없는 경우, 1.75Hz에서 입력 지진파와



(a) W/O structure



(b) Wall type



(c) Column type

Fig. 7. Measured acceleration with frequency domain

기초판의 응답 주파수가 일치하여 일부 증폭이 발생할 것으로 보이나 지반과 기초의 고유 진동수이자 최대 응답 주파수인 4.5Hz 영역에서는 입력 지진파의 최대 응답이 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서, 입력 지진파에 의한 지반과 기초의 고유 진동수 구간에서 최대 응답이 발생하지 않아 입력 지진파로 인한 큰 증폭은 거의 발생하지 않은 것으로 보인다.

벽체 구조물의 경우, 입력 지진파와 기초판은 1.75Hz에서만 일치하고 상부 구조물과는 유사한 경향을 나타내고 있지 않다. 또한, 기초판과 상부 구조물은 2.1Hz에서 일치할 뿐 이외 구간에서는 유사한 경향이 없는 것으로 보인다. 따라서, 벽체 구조물에서는 입력 지진파로 인한 기초판에서의 증폭은 일부 발생하나 상부 구조물에의 영향은 제한적이다. 또한, 지진파로 인한 상부 구조물이 기초에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

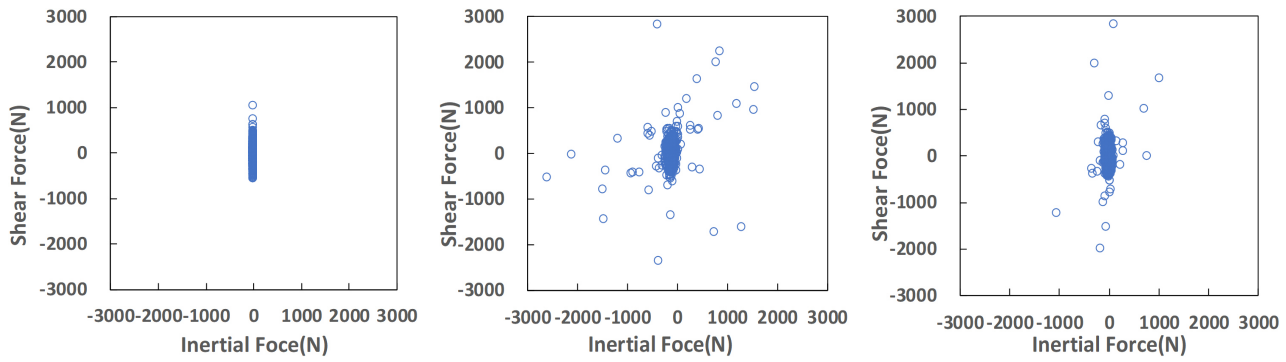
기둥 구조물의 경우, 입력 지진파는 기초판과는 1.75Hz에서 일치하고 상부 구조물과는 유사한 경향을 나타내고 있지 않다. 또한, 기초판과 상부 구조물은 1.75Hz를 포함하여 3개의 주파수 구간에서 유사한 발생 경향을 나타내고 있다. 따라서, 기둥 구조물에서는 입력 지진파로 인한 기초판에서의 증폭은 일부분 발생하며, 상부 구조물에의 미치는 영향은 제한적일 것으로 보인다. 그러나 상부 구조물과 기초판의 응답 경향이 상당히 유사하므로 상부 구조물이 기초에 미치는 영향은 매우 클 것으로 판단된다.

실험 결과, 상부 구조물이 없는 경우 정현파를 이용한 Yoo et al.(2012) 연구 결과와 기록 지진파를 이용한 Suzuki(2014), Tokimatsu(2005)의 연구 결과와 유사하게 입력 지진파와 기초판에서의 가속도 경향 및 주파수 응답 특성은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 기록 지진파를 이용하여 산정한 입력 지진파, 기초판 및 다자유도 상부 구조물의 응답 특성은 단자유도 상부 구조물에 대한 연구결과(Suzuki, 2014; Tokimatsu, 2005)와는 상이하게 나타나고 있다. 즉, 상부 구조물의 단일 고유 진동수에 따른 증폭 현상이 두드러지는 단자유도 구조물과 상이하게 다자유도 구조물은 여러 고유 진동수 구간에서 증폭 현상이 발생한다. 또한, 단자유도 구조물에서는 기초판과 상부 구조물이 유사한 주파수 대역에서 증폭 현상이 발생하는 반면, 다자유도 구조물에서는 구조물의 종류에 따라 증폭 현상이 달라지며 기둥 구조물에서의 증폭이 더 크게 발생함을 보여준다.

3.3 관성력, 전단력 및 상대 변위 분석 결과

기초판에서의 전단력은 식 (2)와 같이 말뚝 두부 변형률로부터 산정한 모멘트를 미분하여 산정한 각 말뚝의 전단력의 합으로 산정하였으며, 관성력은 상부 구조물의 질량과 최상층에서의 수평 방향 가속도계로부터 산정한 가속도의 곱으로 산정하였다. 이와 같은 방법으로 포항 지진파 가진 시간 동안 기초판에서의 전단력과 상부 구조물의 관성력과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

상부 구조물이 없는 경우, 관성력은 거의 작용하지 않고, 지진파로 인한 전단력은 작은 값을 나타낸다. 벽체 구조물의 경우 관성력과 전단력은 전반적으로 비례관계를 나타내고 있는 것으로 관찰되었으나, 기둥 구조물의 경우 관성력 대비 전단력의 증가가 더욱 두드러지는 것을 알 수 있다.



(a) W/O structure (b) Wall type (c) Column type

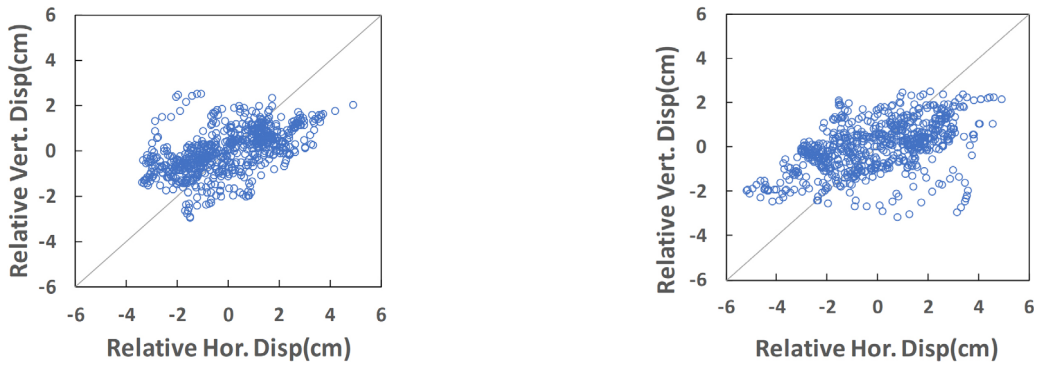
Fig. 8. Shear force and inertial force

단자유도 구조물에서의 관성력과 전단력의 관계는 일정한 비례관계를 나타내고 있으나(Suzuki, 2014), 다자유도 구조물에서는 입력 지진파에 따른 상부 구조물의 거동이 단순하지 않으므로 일정한 비례관계를 나타내지 않는 것으로 판단된다. 특히, 기둥 구조물의 경우 벽체 구조물에 비해 질량이 작아 관성력은 작게 발생함에도 전단력의 발생 경향은 더욱 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 6과 7에서와 같이 기둥 구조물에서는 상부 구조물과 기초판과의 응답 특성이 서로 일치하는 특성과 상당히 유사하게 상부 구조물의 작은 관성력에도 기초에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

Fig. 9는 포항 지진파 가진 시간 동안 기초판에서의 수평 방향 가속도계로부터 산정한 상대 수평 변위와 2개의 수직 방향 가속도계를 이용하여 산정한 상대 수직 변위를 함께 나타내었다.

전반적으로 수직 변위와 수평 변위는 일정한 비례관계를 나타내고 있으나, 수평 변위 발생 경향이 더욱 두드러진 것을 알 수 있다. 이는 입력 지진파로 인한 기초판의 거동이 요동운동(rocking motion)보다 병진운동(sway motion)으로 나타나고 있는 것으로 판단된다. 또한, 벽체 구조물에 비해 기둥 구조물의 수직 변위 대비 수평 변위 발생 경향이 다소 큰 것으로 나타나며 이는 Fig. 6~8에 대한 결과분석에서 언급한 바와 같이 지진하중 작용시 기초판과 상부 구조물의 상호작용으로부터 비롯된 것으로 판단된다. 즉, 벽체 구조물에서는 기초판과 상부 구조물이 서로 다른 시간대에서 최고 가속도를 나타내고 주파수 응답특성 일치 구간이 한정적이다. 그러나 기둥 구조물에서는 기초판과 상부 구조물이 유사한 시간대에서 최고 가속도를 나타내고 있을 뿐 아니라 주파수응답특성 일치 구간이 다수 발생한다. 따라서, 이러한 특성으로 인해 기둥 구조물의 작은 관성력에도 기초에의 수평 방향 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 10(a)에 말뚝의 깊이별 최대 수평 변위를 나타내었으며, 전반적으로 두부에서 최대 수평 변위를 나타내고 깊이 증가에 따라 변위는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 상부 구조물이 없는 경우에 비해 벽체 구조물은 약 1.4배, 기둥 구조물은 약 3.3배의 말뚝 두부 수

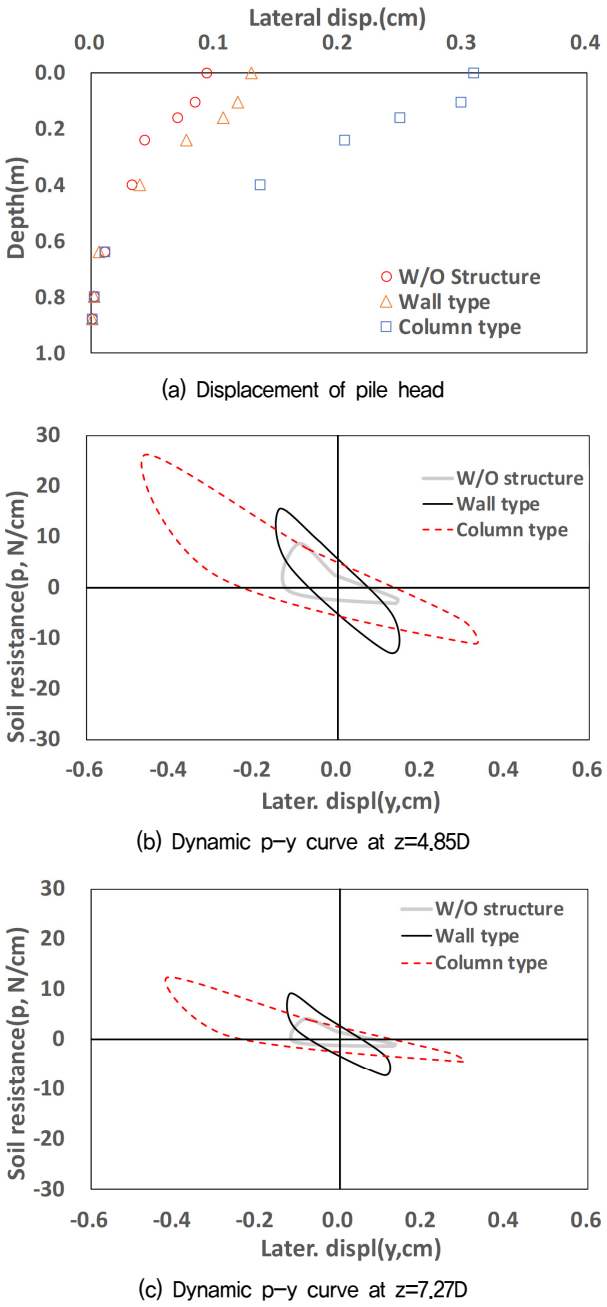


(a) Wall type (b) Column type

Fig. 9. Relative vertical and horizontal displacement of footing

평 변위 값을 나타내고 있다. 기둥 구조물에서의 상대적으로 큰 변위는 앞서 설명한 바와 같이 입력 지진파와 대비하여 기초판과 상부 구조물의 시간-가속도의 발생 경향과 응답 주파수의 유사성으로 인한 증폭 효과가 더 크게 발생한 것으로 판단된다. 즉, 기둥 구조물에서의 관성 상호작용 효과가 더 벽체 구조물에 비하여 크게 발현되는 것으로 판단된다.

Fig. 10(b)와 (c)에 깊이 4.85D와 7.3D에서의 동적 p-y 곡선을 나타내었다. 벽체 구조물, 기둥 구조물 및 상부 구조물이 없는 경우의 순으로 동적 p-y 곡선의 기울기



(a) Displacement of pile head

(b) Dynamic p–y curve at z=4.85D

(c) Dynamic p–y curve at z=7.27D

Fig. 10. Lateral displacement of pile and dynamic p–y curve

가 크게 나타났다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 기둥 구조물에서의 관성 상호작용이 벽체 구조물에 비해 말뚝 기초에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 다만, 상부구조물이 없는 경우의 동적 p-y 곡선은 일정한 이력곡선의 형태를 나타내지 못하고 있으며, 이는 상부 구조물의 관성에 의한 효과가 말뚝기초에 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

상부 구조물이 존재하는 경우에는 구조물이 없는 경우에 비하여 전반적으로 동적 p-y 곡선의 기울기는 크게 나타난다. 또한, 벽체 구조물의 경우 이력 곡선의 대칭이 잘 나타나고 있으나, 기둥 구조물에서는 이력 곡선의 대칭이 뚜렷이 나타나고 있지 않다. 이는 Fig. 9(b)와 같이 기둥 구조물에서의 수평 변위 발생 경향이 수직 변위에 대비하여 편측 방향으로 더 크게 나타나고 있으며, 이러한 영향이 동적 p-y 곡선에서도 나타난 것으로 판단된다. 또한, 이로 인하여 Fig. 10(a)에서의 말뚝 최대 수평 변위에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서, 기둥 구조물은 벽체 구조물에 비해 작은 관성력을 가지나 관성 상호작용의 효과는 벽체 구조물에 비하여 더 크게 나타나고 이로 인해 기초에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

기존 단자유도 구조물을 대상으로 한 진동대 실험 연구 결과를 참고하여 이번 연구에서는 실제 구조물의 형태인 다자유도 구조물에 대해서 사질토 지반상에 포항 지진파를 적용하여 대형 진동대 실험을 수행하였다. 구조물이 없는 조건, 벽체 구조물 및 기둥 구조물의 설치 조건에 대한 실험을 수행하여 다자유도 구조물의 관성 상호작용 효과를 다음과 같이 확인하였다.

(1) 포항 지진파를 적용한 기초판과 상부 구조물에서의 시간-가속도 발생 경향 및 응답 주파수 분석 결과, 구조물이 존재하지 않을 때는 기존 연구 결과와 동일하게 입력 지진파와 기초판의 가속도 경향 및 주파수 응답 특성은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 기존 단자유도 구조물에 대한 연구 결과와는 상이하게 다자유도 구조물에서는 다수의 진동수 구간에서 시간-가속도 발생 경향 및 응답 주파수의 유사성이 나타나는 것으로 관찰되었다. 그리고 단자유도 구조물이 갖는 단일 고유 진동수에서의 증폭과는

상이하게 다자유도 구조물에서는 다수의 고유 진동수 구간에서 가속도의 증폭 발생 경향이 나타남을 확인하였다. 또한, 기둥 구조물에서의 기초판과 상부 구조물간의 시간-가속도 발생 경향 및 주파수 응답의 유사성은 벽체 구조물보다 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

(2) 기초판에서의 전단력과 관성력이 일정한 비례관계를 나타내는 기존 단자유도 구조물의 연구 결과와는 상이하게 다자유도 구조물인 경우에는 전단력과 관성력 발생 경향은 단순한 비례 경향을 나타내지 않은 것으로 나타났다. 특히, 다자유도 기둥 구조물에서는 관성력이 작게 발생함에도 기초판에서의 큰 전단력으로 전달되어 말뚝기초에의 수평 방향 하중에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

(3) 포항 지진파로 인한 기초판의 상대 수직 변위 및 상대 수평 변위는 기존의 연구 결과와 유사하게 일정한 비례관계를 나타내고 있음을 알 수 있으나, 기둥 구조물에서는 벽체 구조물에 비하여 수평 방향으로의 변위 발생 양상이 더욱 우세함이 관찰되었다.

(4) 동적 p-y 곡선에 대한 분석 결과, 기둥 구조물에서의 큰 관성 상호작용으로 인하여 벽체 구조물의 동적 p-y 곡선의 기울기가 더 크게 나타났다.

(5) 위와 같이 다자유도 구조물의 관성 상호작용으로 인한 동적 거동은 단자유도 구조물과 상이함을 확인하였으며, 다자유도 구조물의 종류에 따라 그 거동이 다른 것으로 판단된다. 따라서, 단자유도 구조물에 대한 실험 결과와 이를 이용한 내진설계에서 다자유도 구조물의 관성 상호작용 효과를 반영할 수 있는 후속 연구를 통해 동적 거동에 대한 명확한 평가가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원(22CTAP-C164367-02) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2020R1A2C1012352)을 받아 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. 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 2021, 12, 4995.
2. Badoni, D. and Makris, N. (1996), “Nonlinear Response of Single Piles under Lateral Inertial and Seismic Loads”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, pp.29-43.
3. Dou, H. and Byrne, P.M. (1996), “Dynamic Response of Single Piles and Soil-pile Interaction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.80-96.
4. Feng, S. and Wang, J. (2006), “Research on Lateral Resistance of Pile in Saturated Sand under Shake Loading”, *Proceedings of the GeoShanghai Conference*, Shanghai, China, Geotechnical Special Publication, No.150, pp.490-497.
5. Gibson, A.D. (1996), “Phycical Scale Modeling of Geotechnical Structures at One-g”, Ph. D. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California.
6. Goit, C. S., Saitoh, M., Kawakami, H., and Nishiyama, S. (2008), Experimental Studies on Non-linear Response of Soil-pile-structure Systems Subjected to Strong Ground Motion, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering.
7. 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, Issue 5, pp.1453-1473.
8. Han, J.T., Yoo, M.T., Choi, J.I., and Kim, M.M. (2010), “A Study on the Dynamic Curves in Soft Clay by 1g Shaking Table Test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society, The Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.8, pp.67-75.
9. Hetényi, M. (1946), “Beams on Elastic Foundations”, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
10. Iai, S. (1989), “Similitude for Shaking Table Tests on Soil-structure-fluid Model in 1g Gravitational Field”, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.105-118.
11. Hwang, J.I., Kim, S.R., Jang, I.S., and Kim, M.M. (2004), “Verification of Similitude Law for 1g Shaking Table Tests through Modeling of Models”, *Journal of the Korean Geotechnical Society, The Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.9, pp.91-103.
12. Kang, H.S. (2018), “Dynamic behavior of Pile Group Considering Superstructure in Sand Ground”, Ph. D. Dissertation, Chungbuk National University, Korea.
13. 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.
14. Lee, H.K., Ahn, K.K., and Kang, H.S. (2019), “A Group Pile Effect on Changing Size of Pile Cap in Group Pile under Sand Soil in Earthquake”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.20, No.10, pp.39-46.
15. Lim, H.S. and Jeong, S.S. (2017), “Analysis of Dynamic behavior of a Single Pile in Dry Sand by 1g Shaking Table Tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society, The Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.7, pp.17-208.
16. Meymand, P.J. (1998), “Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-pile-superstructure Interaction in Soft Clay”, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley.
17. McClelland, B. and Focht, Jr., J.A. (1958), “Soil Modulus for Laterally Loaded Piles”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 129, pp.1049-1063.

18. Suzuki, H. and Tokimatsu, K. (2010), "Effects of Soil-Structure Interaction on Stress Distribution within a Pile Group under Multi-Dimensional Loading", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 19.
19. 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.
20. Ting, J.M. (1987), "Full-scale Cyclic Dynamic Lateral Pile Responses", *Journal of Geotechnical Engineering Divison*, ASCE, Vol.113, No.1, pp.30-45.
21. Tokimatsu, K., H., Suzuki, H., and Sato, M. (2005), "Effects of Inertial and Kinematic Interaction on Seismic behavior of Pile with Embedded Foundation", *Int. J. Soil Dyn. Earthq. Engl 25* (Special Issue), pp.75-762.
22. Wilson, D. W. (1998), "Soil-Pile-Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Clay", Ph. D. Dissertation, University of California, Davis.
23. Wolf, J. P. (1985), "Dynamic Soil-structure Interaction", Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Prentice-Hall.
24. Yang, E.K., Yoo, M.T., Kim, H.U., and Kim, M.M. (2009a), "Dynamic p-y Backbone Curves for a Pile in Saturated Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society, The Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.11, pp.27-38.
25. Yang, E.K. (2009b), "Evaluation of Dynamic p-y Curves for a Pile in Sand from 1g Shaking Table Tests", Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
26. Yang, E.K., Choi, J.I., Kwon, S.Y., and Kim, M.M. (2010), "Development of Dynamic p-y Backbone Curves for a Single Pile in Dense Sand by 1g Shaking Table Tests", *KSCE Journal of Civil Engineers*, 2011, Vol.15, No.5, pp.813-821.
27. Yoo, M.T., Jung, I.W., Kwon, S.Y., and Kim, M.M. (2012), "Evaluation of Inertial and Kinematic Forces on Pile Foundations under Seismic Loading by Centrifuge Tests", *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, International Association for Earthquake Engineering.
28. 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.

Received : February 7th, 2022
Revised : April 7th, 2022
Accepted : April 8th, 2022