

1g 진동대 실험을 통한 건조사질토에 근입된 단독말뚝의 동적 거동 분석

Analysis of Dynamic Behavior of a Single Pile in Dry Sand by 1g Shaking Table Tests

임 현 성¹ Lim, Hyun-Sung

정 상 섬² Jeong, Sang-Seom

Abstract

This paper presents the investigation of dynamic behavior of a single pile in dry sand based on 1g shaking table tests. The natural frequency of soil-pile system was measured, and then a range of loading frequency was determined based on the natural frequency. Additionally, the studies were performed by controlling loading accelerations, pile head mass and connectivity conditions between pile and cap. Based on the results obtained, relatively larger pile head displacement and bending moment occur when the loading frequency is larger than the natural frequency of soil-pile system. However, the slope of the p-y curve is smaller in the similar loading frequency. Also, it was found that inertia force like input acceleration and pile head mass, and relation of the natural frequency of soil-pile system and input frequency have a great influence on the slope of dynamic p-y curve, while pile head conditions don't.

요 지

본 연구에서는 건조사질토 지반에 근입된 말뚝의 동적 거동을 분석하기 위해 1g 진동대 실험을 수행하였다. 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 측정하고 후 고유 진동수를 기반으로 하중 진동수를 산정하고 이에 대한 거동을 분석하였다. 또한, 추가적으로 말뚝의 동적 거동에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위하여 입력 가속도, 상부하중, 말뚝 두부 구속 조건에 따른 거동을 분석하였다. 분석결과, 하중 진동수가 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수보다 큰 경우 상대적으로 말뚝 두부변위와 휨모멘트가 크게 발생하고 동적 p-y 곡선의 기울기가 작게 나타났다. 또한, 동적 p-y 곡선의 영향인자를 분석한 결과, 말뚝 두부구속조건은 동적 p-y 곡선의 기울기에 영향을 적게 끼침을 확인하였고, 입력가속도, 상부하중 등의 의한 관성력, 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 입력 진동수의 관계 그리고 지반조건이 동적 p-y 곡선의 기울기에 큰 영향을 끼치는 것으로 확인되었다.

Keywords : 1 g shaking table test, Natural frequency, Dynamic p-y curve, Dry sand, Single pile

1 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 세계 각지에서 규모 6.0 이상의 대규모 지진 및 지진해일 발생 횟수가 증가하여 많은 인명과 재산 피해가 발생하였다. 국내에서도 1988년 이후 지진발생빈도가 꾸준히 증가하고 있는 추세이며, 2016년 울산 해역에서 규모 5.0의 지진 및 경주지역에서 규모 5.8의 지진이 발생하여 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지대라고 할 수 없다. 지진에 의한 구조물의 변형 및 손상으로 인하여 인명 및 재산 피해를 발생시킬 수 있기 때문에 이에 대한 내진설계의 중요성이 점차 커지고 있다.

말뚝 기초의 내진설계에는 지진하중에 의한 말뚝에 작용하는 관성력을 추가적인 하중으로 작용시켜 해석하는 등가 정적 해석법이 주로 사용되고 있으며, 등가 정적 해석 시 수평하중을 받는 말뚝의 횡방향 거동을 해석하기 위하여 지반의 비선형거동을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 널리 이용되고 있다. p-y 곡선은 다양한 지반 조건에서 말뚝 두부에 정적 혹은 반복하중을 재하 하는 실험을 기반으로 개발되었다(Matlock, 1970; Cox et al., 1974, Reese et al., 1974, 1975; API, 1987; Murchison and O'Neil, 1984). 기존에 제시된 대부분의 p-y 곡선은 말뚝 두부에 정적인 하중 혹은 반복하중을 가하여 실험적으로 산정된 p-y 곡선으로 말뚝 상부에서의 관성력뿐만 아니라 말뚝 주위 지반의 영향이 함께 고려되어야 하는 동적 하중 조건에서는 적합하지 않다(Rovithis et al., 2009; You et al., 2013). 이를 극복하기 위해 동적 하중 조건을 고려한 말뚝의 p-y 곡선에 대한 연구가 진행되고 있다. Ting et al.(1986)은 말뚝 두부에 진동을 가하는 실험을 수행하여, 동적 p-y 곡선의 활선기울기는 하중 진동수에 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

NCHRP(National Cooperative Highway Research Program, 2001)에서는 수치해석 기법을 이용하여 동적 p-y 곡선을 제안하였으며, 지반-말뚝의 동적 거동은 말뚝지름, 지반의 전단파속도, 하중 진동수 등과 밀접한 관계가 있다고 분석하였다. 또한, El Naggar and Bentley(2000)는 지반의 감쇠효과 때문에 동적하중에 대한 지반의 저항력은 정적하중에 대한 지반 저항력 보다 더 증가하며, 동적 p-y 곡선은 하중 진동수에 의존적이라고 언급하였다.

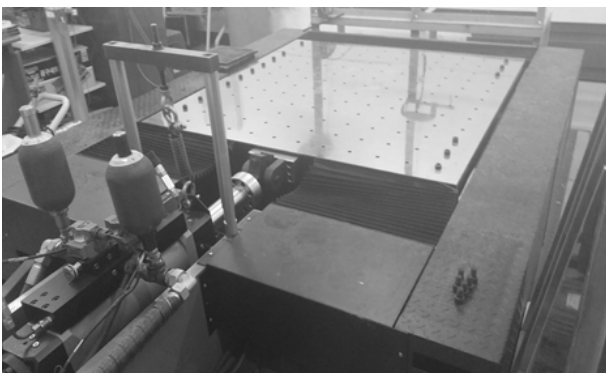
동하중이 작용하는 말뚝의 p-y 곡선은 하중 진동수의 큰 영향을 받고, 하중 진동수에 대한 영향은 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 밀접한 관계가 있다. 그러나 기존 연구(Dou and Byrne, 1996; Yang et al., 2009)에서는 하중 진동수 범위가 제한적으로 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 하중 진동수의 다양한 범위에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 1g 진동대 실험을 통해 다양한 하중 진동수가 작용하는 건조 사질토 지반에 근입된 말뚝에 대한 동적 거동을 분석하였다. 이를 위해 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 측정하고 고유 진동수를 기반으로 하중 진동수를 산정하여 다양한 진동수 범위에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 추가적으로 1) 입력가속도, 2) 상부하중, 3) 상대밀도, 4) 말뚝 두부 구속조건에 대한 영향에 대해 실험을 수행하여 분석하였다.

2. 1g 진동대 실험

2.1 실험장치

본 연구에서는 사질토에 근입된 단독말뚝의 동적 거동 분석을 위하여 1g 진동대 실험을 수행하였다. 실험에 사용



(a) 1 DOF shaking table



(b) Soil sample box

Fig. 1. Test apparatus

된 1 자유도 수평 진동대는 가로×세로가 1.5m×1.5m로서 최대 2ton 무게의 물체에 진동을 가할 수 있고 최대 입력 가속도 및 하중 진동수는 각각 1.1g, 50Hz이다(Fig. 1(a)). Fig. 1(b)는 실험 수행을 위한 모형토조를 나타낸다. 모형토조의 크기는 길이 120cm, 폭 60cm, 높이 80cm로 양 측면과 바닥면은 스틸로 제작 하였으며, 모형토조의 전, 후면은 실험 관찰 및 지반조성에 용이한 두께 2cm의 투명 PC로 제작하였다. 또한, 강성토조의 단점인 진동시 토조 벽면의 강성에 의한 파의 반사효과를 보완하기 위하여 5cm 두께의 스폰지를 토조의 양 측면에 설치하였다.

2.2 시료

본 실험에서 사용된 시료는 주문진 표준사로 통일본

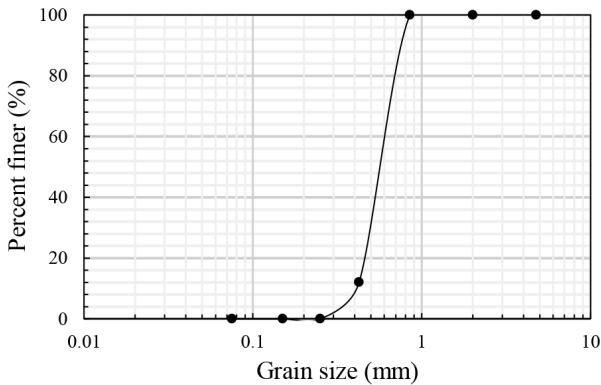


Fig. 2. Grain size distribution curves of Jumoonjin sand

Table 1. Physical properties of Jumoonjin sand

Physical properties	Symbol	Properties
Specific gravity	G_s	2.65
Max. dry density	γ_{dmax}	16.2 kN/m ³
Min. dry density	γ_{dmin}	13.6 kN/m ³
Effective particle size	D_{10}	0.38 mm
D30 particle size	D_{30}	0.49 mm
D60 particle size	D_{60}	0.61 mm
Uniformity coefficient	C_u	1.59
Coefficient of curvature	C_c	0.99
USCS	-	SP

Table 2. Scaling factors expressed in terms of the geometric scaling factor λ (lai, 1989)

Physical properties	Scaling factors	Physical properties	Scaling factors	Physical properties	Scaling factors
Mass density	1	Acceleration	1	Length	λ
Force	λ^3	Shear wave velocity	$\lambda^{0.5}$	Stress	λ
Stiffness	λ^2	Time	$\lambda^{0.5}$	Strain	1
Modulus	λ	Frequency	$\lambda^{-0.5}$	EI	λ^5

류법상 SP로 분류된다. 주문진 표준사는 지반의 거동을 비교적 명확히 알 수 있고 그 특성이 널리 알려져 있다. Fig. 2와 Table 1은 기본물성실험을 실시하여 산정된 주문진표준사의 입도분포곡선과 기본 물성을 나타낸다. 시료의 균등계수와 곡률계수는 각각 1.59, 0.99로 입도분포가 불량한 흙임을 알 수 있다. 시료의 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 16.2kN/m³, 13.6kN/m³으로 이를 이용하여 토조 내 지반을 조성하였다.

2.3 모형말뚝

1g 진동대 실험은 원심모형실험에 비해 상대적으로 단순화의 편의성과 저비용의 장점이 있으나 원형의 구속압을 재현할 수 없기 때문에 지반의 구성 거동이 달라질 수 있다(Gibson, 1996; Yang et al., 2009). 또한, 흙에 작용하는 구속압이 낮아 실제 현장에서 예상되는 거동과 달리 흙의 dilation 현상이 지배적으로 발생하여 흙의 강성 및 강도를 과대평가할 수 있다. 이를 최소화하기 위하여 본 실험에서는 원형의 거동을 모사하기 위해서 상사법칙을 적용하여 모형 말뚝을 제작하였다. 원형으로 가정한 모형 말뚝은 직경 1m, 두께 0.03m의 강관말뚝이며, 휨강성(EI)은 2,260,117kN·m²이다. 이때 지반의 비선형을 고려할 수 있는 동적 p-y 곡선을 작성하기 위하여 지반의 변형률이 크게 발생할 수 있도록 입력 가속도가 크게 사용되기 때문에 Iai(1989)의 상사법칙 Type 3을 적용하였다(Table 2). Table 3은 실험에 사용된 모형말뚝의 제원을 나타낸다. 모형 말뚝의 재료는 중공단면의 알루미늄 관(6061-T6)으로 제작되었다. 재료의 한계로 인하여 말뚝의 직경은 상사비를 적용할 수 없었으나 횡방향 거동에 중요한 영향을 미치는 휨강성(EI)에 대한 상사비를 만족시켰다. 말뚝의 길이는 Broms 이론에 의거하여 긴 말뚝 조건(long pile)을 만족하는 길이 64cm로 결정하였다(Table 4). 말뚝의 영향인자별 동적 거동 분석을 위하여 영향인자에 따른 모형 구조물을 제작하였다. 상부질량의 크기에 따른 말뚝의 동적 거동 분석을 위하여 말뚝 두부에 상부구조물을 강체로 제작하

Table 3. Pile properties

$\lambda = 23.43$

	Prototype	Model
EI (kN·m ²)	2,260,117	0.31995
Superstructure mass (kg)	125,000	9.7
D (cm)	100	2.0
t (cm)	3	0.2
L (cm)	1500	64

Table 4. Long pile condition (Broms, 1964)

	Sand	
Short pile	$\eta L < 2.0$	$\eta = \left(\frac{\eta_h}{ET} \right)^{\frac{1}{5}}$ L = pile length (m) η_h = constant of subgrade reaction E = elastic modulus (kN/m ²) I = moment of inertia (m ⁴)
Immediate pile	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$	
Long pile	$\eta L > 4.0$	

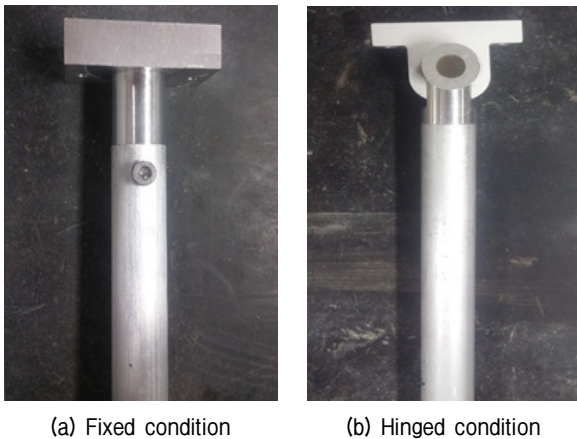


Fig. 3. Pile head connections

여 설치하였다. 상부구조물의 무게는 5~17kg으로 제작하였다. 또한, 말뚝 두부 구속조건에 따른 동적 거동을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 힌지단과 고정단을 제작하여 실험을 수행하였다.

2.4 실험방법

Fig. 4는 최종 완성된 실험 단면을 나타낸다. 말뚝 깊이별로 휨모멘트의 분포를 측정하기 위해서 스트레인 게이지를 깊이에 따라 진동대의 가진 방향으로 설치하였다. 그리고 자유장 지반의 변위를 측정하고 지반의 깊이별 가속도의 크기를 측정하기 위하여 지반 깊이에 따라 가속도계를 설치하였다. 말뚝 두부의 수평변위를 측정하기 위하여 상부구조물 양단에 LVDT를 설치하였으며 상부구조물의 가속도를 측정하기 위하여 상부구조

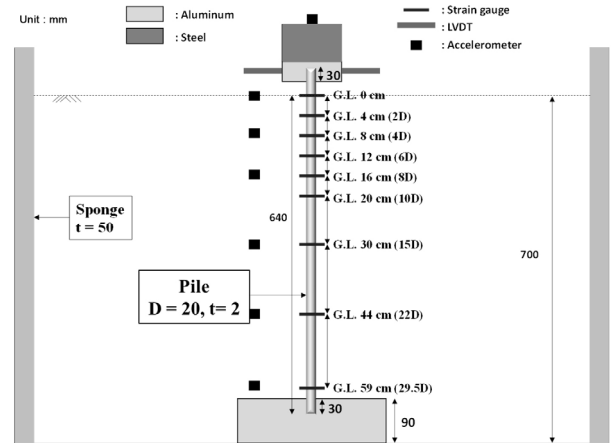


Fig. 4. The sectional view of 1g shaking table test

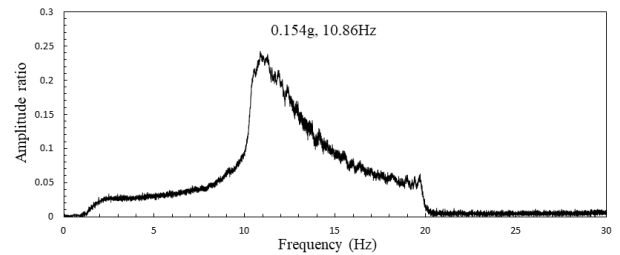


Fig. 5. The result of sweep test (0.154g, Dr 80%, mass 9.7kg)

물 상단에 가속도계를 설치하였다. 또한, 암반에 근입된 말뚝을 모사하기 위해 모형토조 바닥면에 9cm 두께의 알루미늄 플레이트를 설치한 후 말뚝 선단을 알루미늄 플레이트에 고정시켰다.

모형토조 내 지반은 진동다짐을 수행하여 목표 상대 밀도(D_r 40%, 80%)에 맞게 조성하였다. 사질토 지반을 층으로 나누어 층별로 진동다짐을 실시하여 지반을 조성하였으며, 이때 지반의 층수와 진동하중의 크기는 반복실험을 수행하여 목표 상대밀도에 맞는 최적의 값을 경험적으로 산정하여 지반을 균질하게 조성하였다. 실험을 수행한 진동하중은 가속도의 크기와 진동수 성분 변화가 용이한 정현파를 사용하였다. 진동하중은 약 5 초 동안 가해졌으며 입력 가속도의 크기는 0.098g~0.4g 까지 변화시켰다. 상대밀도 40%인 경우 0.3g을 초과하는 입력가속도에서는 지반침하가 발생하여 상대밀도 증가로 인해 실험결과에 영향을 끼칠 것으로 판단하여 입력가속도 0.3g까지만 실험을 수행하였다. 입력 진동수를 산정하기 위하여 sweep test를 수행하였으며 상부구조물에 설치된 가속도계를 통해 측정된 가속도를 이용하여 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 산정하였다. Fig. 5는 상대밀도 80%, 입력가속도 0.154g, 상부질량 9.7kg

Table 5. Test program

Test case	D_r (%)	Input acceleration (g)	Superstructure mass (kg)	Input frequency (Hz)
Input acceleration	80	0.098 ~ 0.4	9.7	$1.0f_n$
Superstructure mass	80	0.154	5 ~ 17	$1.0f_n$
Input frequency	80	0.154, 0.4	9.7	$0.4f_n \sim 1.6f_n$
Relative density	40, 80	0.154, 0.3	9.7	$1.0f_n$
Pile head condition	40	0.3	40	$1.0f_n$

조건에서의 sweep test 결과를 나타낸다. 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수는 약 10.86Hz임을 확인할 수 있다. 입력진동수에 따른 말뚝의 동적 거동 분석을 위하여 고유 진동수(f_n)을 기준으로 $0.4f_n \sim 1.6f_n$ 으로 입력진동수를 변화시켜 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 실험 조건은 Table 5와 같다.

2.4 동적 p-y 이력곡선 산정

동적 p-y 이력곡선은 단순보 이론(simple beam theory)을 기반으로 말뚝의 깊이별로 측정된 휨모멘트에 따라 산정 할 수 있다. 먼저, 깊이별 휨모멘트 분포 함수를 결정한 후 식 (1)과 같이 두 번 미분하여 지반 반력을 산정하고 식 (2)와 같이 두 번 적분하여 말뚝의 변위를 산정하였다.

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

$$y_{pile} = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \quad (2)$$

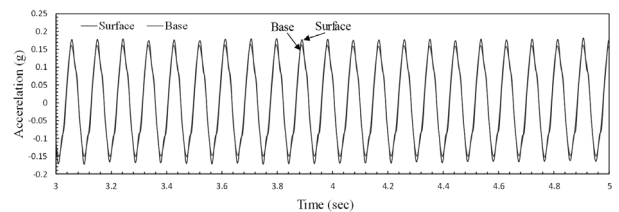
여기서, p 는 지반 반력, y_{pile} 는 말뚝의 변위, z 는 깊이, $M(z)$ 는 말뚝의 깊이별 휨 모멘트 분포 함수, EI 는 말뚝의 휨 강성을 나타낸다.

0.001초의 시간 간격 마다 산정된 말뚝의 휨모멘트 자료는 깊이별로 불연속적인 데이터이기 때문에 말뚝 깊이 에 따른 휨모멘트 분포함수를 결정하기 위하여 cubic spline 보간방법을 이용하였다(Dou and Byrne, 1996). 동적 p-y 곡선에서 y 는 지진과 같은 동적하중에 의하여 지반의 변위가 발생하기 때문에 정적 p-y 곡선과 달리 지반-말뚝의 상대변위가 되어야 한다(Yang et al., 2009). 따라서 말뚝 주변에 설치된 가속도계로 측정된 가속도를 두 번 적분하여 말뚝 주변 지반의 변위(y_{soil})를 산정하였다. 최종적으로 말뚝의 변위와 지반의 변위의 차를

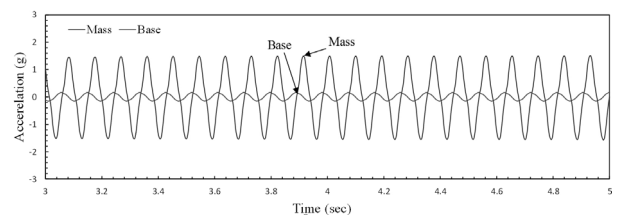
이용하여 동적 p-y 곡선의 y 를 산정하였다. 이와 같이 산정된 지반반력(p)와 변위(y)를 도시하여, 동적 p-y 이력곡선을 산정하였다.

3. 하중 진동수에 따른 말뚝의 동적 거동 분석

본 절에서는 하중 진동수와 고유 진동수에 따른 말뚝의 동적 거동 분석을 나타낸다. 먼저 대표적인 하나의 실험조건에 대한 말뚝의 동적거동을 분석하였다. 실험 조건은 입력 가속도 0.154g, 상부하중 9.7kg, 상대밀도 80%, 하중 진동수 $1.0f_n$ 이다. Fig. 6은 지반 및 기초구조물의 가속도 시간 이력 그래프를 나타낸다. Fig. 6(a)와 같이 바닥면에서 발생하는 최대 가속도는 0.159g이며 자유장 지표면의 최대가속도는 0.182g로 가속도 증폭이 발생하는 것을 확인 하였다. Fig. 6(b)와 같이 말뚝 상부 구조물의 최대가속도는 1.5g로 Fig. 6(a)에 비해 가속도 증폭이 더 크게 발생하는 것을 확인 하였다. 이는 하중 진동수가 지반-구조물 시스템의 고유 진동수와 일치하기 때문이다. 또한 Fig. 6(a)와 달리 약 90도의 위상차이가 발생하는 것을 확인 하였다. 이는 기초구조물의 동적



(a) Surface and base



(b) Mass and base

Fig. 6. Time histories of accelerations

거동이 지반의 거동인 아닌 지반-구조물 상호작용 시스템에 더 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다(Yoo et al., 2014). Fig. 7은 휨모멘트의 시간이력 그래프를 나타낸다. 지표면에서부터 최대 휨모멘트가 발생하는 지점까지 깊이에 따라 증가하다 최대 휨모멘트 지점 이후부터 깊이에 따라 감소하는 경향을 확인 하였다. Fig. 8은 깊이별 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 지표면 부근에서 지반반력은 작게 발생하고 깊이가 깊어질수록 지반반력이 증가하고 동적 p-y 곡선의 기울기가 증가하는 것을 확인 하였다. 이는 지표면 부근의 구속압이 작고 깊이가 깊어질수록 구속압이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, 하중 제하 부분에서 급격하게 지반반력이 감소하는 것을

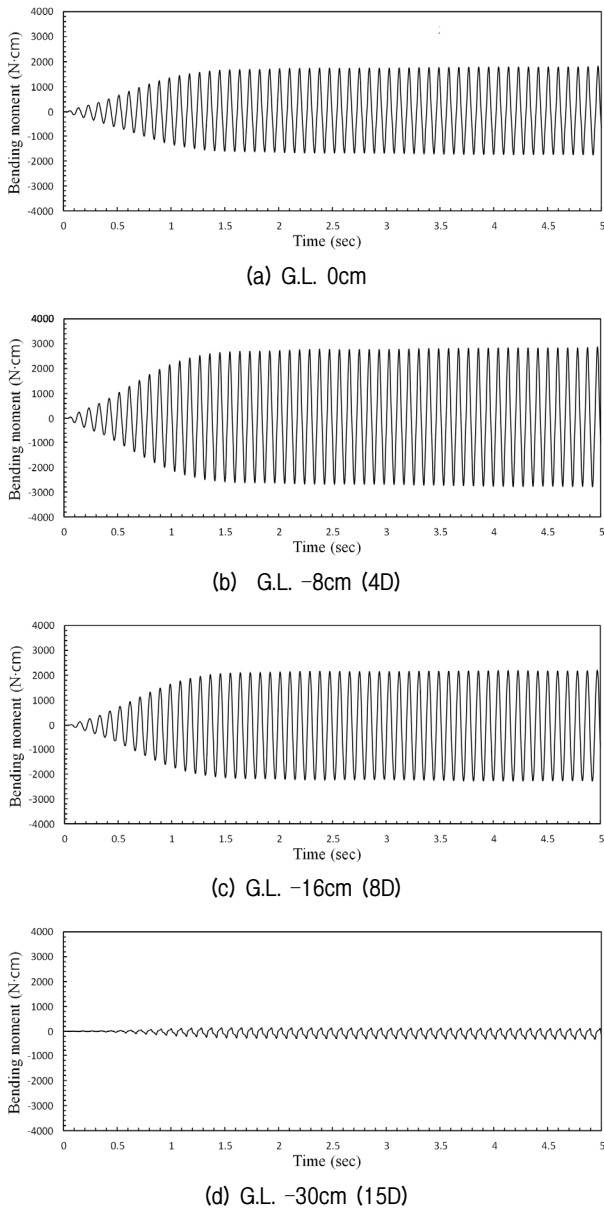


Fig. 7. Time histories of bending moments

확인 하였다. 이는 지반의 움직임이 말뚝의 움직임을 따라오지 못해 발생하는 지반-말뚝 분리(gapping) 현상 때문으로 판단된다(Dou and Byrne, 1996; Yang, 2009).

Fig. 9는 상대밀도 80% 및 입력가속도 0.098g~0.4g 일 때 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 하중 진동수의 비에 따른 말뚝 두부의 최대 수평 변위를 나타내며, Fig. 10은 입력가속도가 0.154g일 때 말뚝 두부의 최대 수평변위가 발생하는 시점의 깊이별 휨모멘트 분포를 나타낸다. 하중 진동수가 고유 진동수에 가까울수록 말뚝 두부의 최대 변위 및 휨모멘트의 크기가 증가함을 확인 하였다. 진동수 비 0.4f₀과 1.0f₀을 비교 했을 때 말뚝 두부 변위는 최대 약 10배 증가하였으며, 입력가속도가 0.154g일 때 최대 휨모멘트는 약 7배 증가하였다. 이는 고유 진동수에 가까울수록 공진현상이 발생하기 때문으로 판단된다(Dou and Byrne, 1996; Yang et al., 2009; Han et al., 2010). 또한, 하중 진동수가 고유 진동수보다

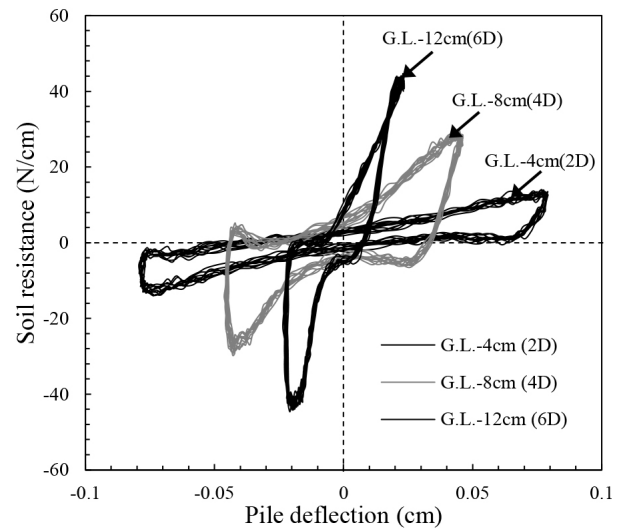


Fig. 8. Dynamic p-y curves at depths

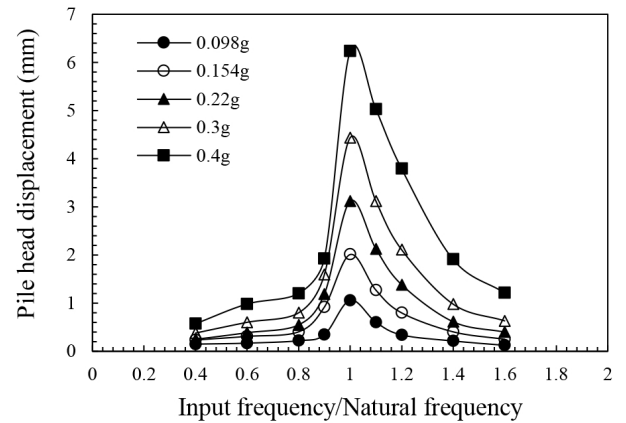


Fig. 9. Max. pile head displacement at various input frequency

클 때가 작을 때보다 고유 진동수를 기준으로 같은 비율에서 수평변위 및 휨모멘트가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 0.4g일 때 진동수 비 0.9 f_n 과 1.1 f_n 의 말뚝 두부 변위는 최대 약 2.6배 차이가 발생하고 0.154g일 때 최대 휨모멘트는 약 1.3배 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 각각 입력가속도 0.154g, 0.4 g일 때 지표면으로부터 4D(D:말뚝 직경) 깊이에서의 하중 진동수별 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 하중 진동수가 고유

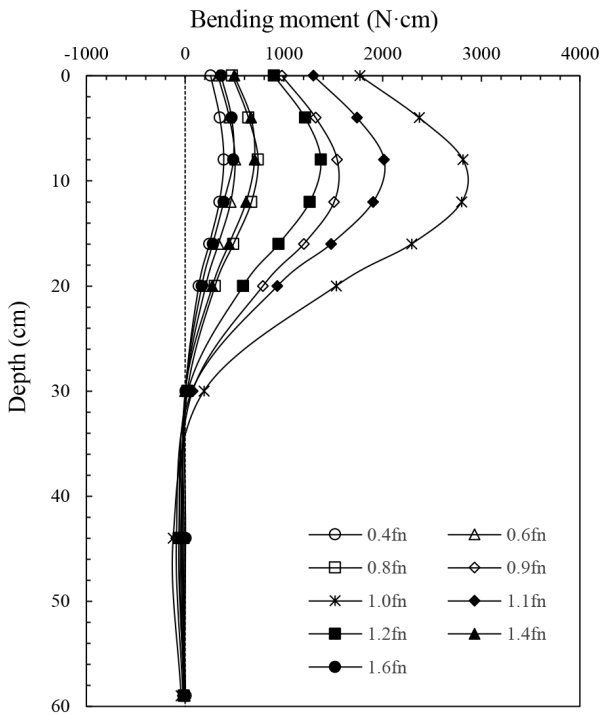


Fig. 10. Bending moment at max. pile head displacement

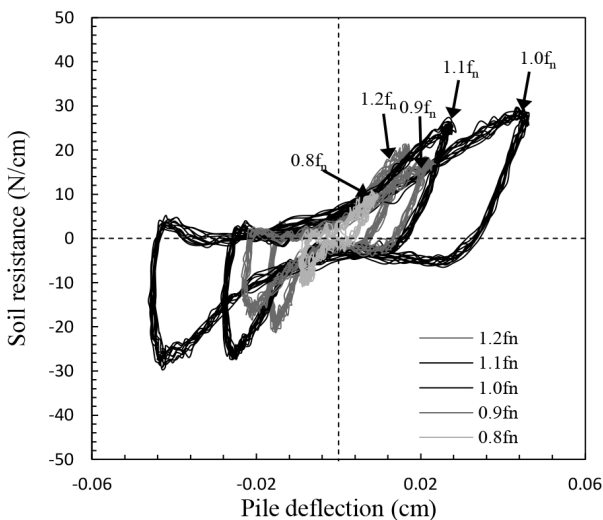
진동수에 가까울수록 공진현상이 발생하기 때문에 동적 p-y 곡선의 기울기 작아지고 지반반력 및 변위가 증가함을 확인 하였다. 이는 입력가속도가 큰 경우인 0.4g일 때 더 확연한 차이를 확인 하였다. 또한, 하중 진동수가 고유 진동수 보다 클 때가 작을 때보다 고유 진동수를 기준으로 같은 비율에서 동적 p-y 곡선의 지반반력 및 변위가 증가하는 것을 확인 하였다. 지반-말뚝 시스템의 고유진동수 인근 범위 내에서 하중 진동수 커질수록 구조물의 응답이 크게 발생하기 때문에 고유진동수를 기준으로 같은 비율에서 고유진동수보다 큰 하중 진동수가 상대적으로 p-y 곡선에서 지반반력, 말뚝 변위 및 휨모멘트가 크게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 입력 진동수의 관계가 동적 p-y 곡선에 큰 영향을 끼치며, 이를 반영한 동적 p-y 곡선의 제안이 필요할 것으로 판단된다.

4. 영향인자 분석

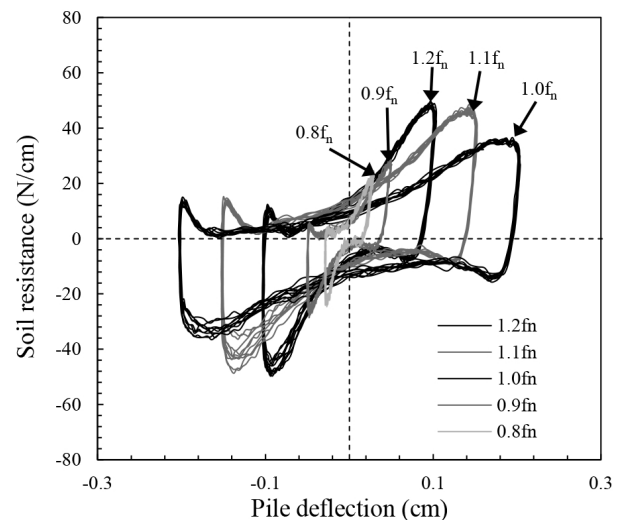
본 절에서는 건조사질토 지반에 근입된 단독말뚝의 동적 거동에 영향을 끼치는 인자를 분석하기 위해서 입력가속도, 상부하중, 상대밀도, 말뚝두부구속 조건에 대한 영향을 분석하였다.

4.1 입력가속도에 대한 영향

본 절에서는 상대밀도 80%, 하중진동수 0.154g 및 하중 진동수 1.0 f_n 일 때 입력가속도를 0.098g~0.4g까지 변



(a) Acceleration 0.154g



(b) Acceleration 0.4g

Fig. 11. Dynamic p-y curves at various input frequency (G.L. -8cm, 4D)

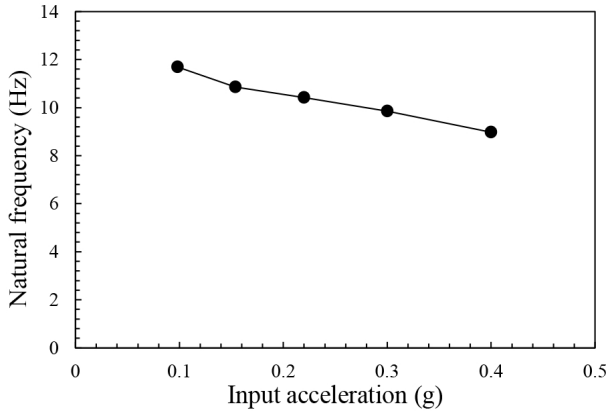


Fig. 12. Natural frequency of soil-pile structure at various input acceleration

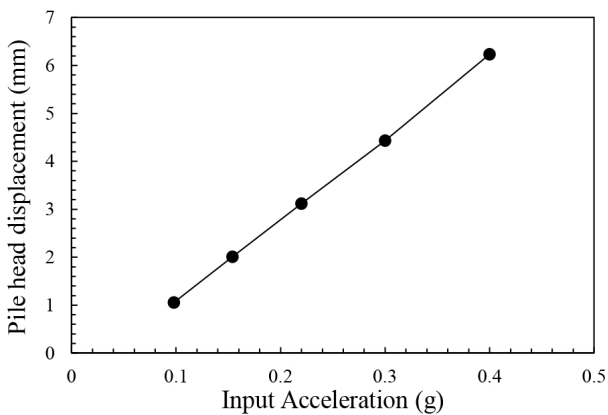


Fig. 13. Max. pile head displacement at various input acceleration

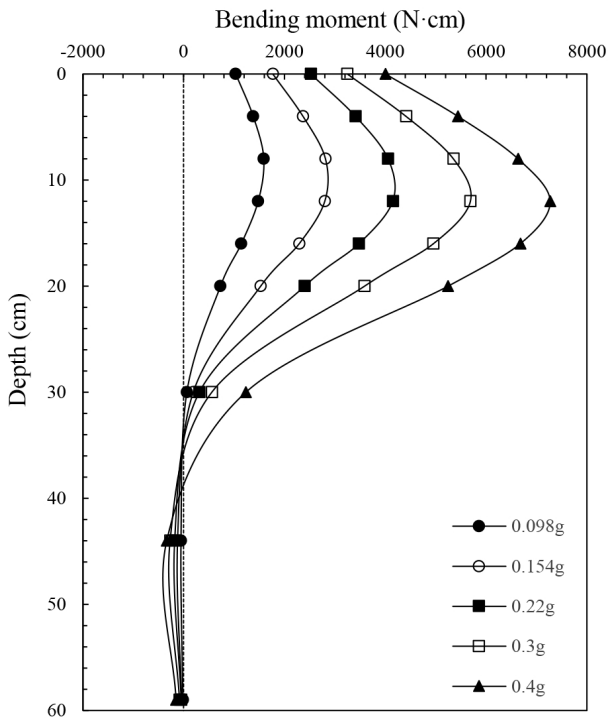


Fig. 14. Bending moment at max. pile head displacement

화시켰을 때의 결과를 나타낸다. Fig. 12는 입력가속도에 따른 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 나타낸다. 입력가속도가 증가할수록 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 감소하는 것을 확인 하였다. 이러한 결과는 Yang et al.(2010)이 보고한 입력가속도가 증가할수록 지반의 변형이 상대적으로 크게 발생하고, 이로 인해 지반의 탄성계수가 감소하기 때문에 고유 진동수가 감소한다는 연구결과와 동일한 것이다. Fig. 13과 Fig. 14는 입력가속도에 따른 말뚝 두부의 최대 수평변위와 말뚝 두부의 최대 수평변위가 발생하는 시점의 입력가속도에 따른 말뚝의 휨모멘트 분포를 나타낸다. 입력가속도가 커질수록 말뚝의 휨모멘트 및 말뚝 두부 변위가 증가하는 것을 확인 하였다. 입력가속도의 크기가 0.098g과 0.4g일 때를 비교하면 말뚝의 최대휨모멘트는 약 4.9배 정도 증가하였으며, 말뚝 두부 변위는 약 5.9배 증가하였다. 이는 입력 가속도가 증가할수록 말뚝의 관성력이 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 15는 입력가속도에 따른 말뚝의 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 입력가속도가 증가할수록 상부구조물에 더 큰 관성력이 작용하여 말뚝의 변위가 증가한다. 또한 지반반력은 말뚝의 변위와 같이 증가하다 점차 증가량이 감소함을 확인 하였다. 동적 p-y 곡선의 기울기는 입력가속도가 커질수록 점차 감소하는 것을 확인 하였다.

4.2 상부하중에 대한 영향

본 절에서는 상대밀도 80%, 입력가속도 0.154g 및 하중 진동수 $1.0f_n$ 일 때 상부하중을 5kg~17kg까지 변화

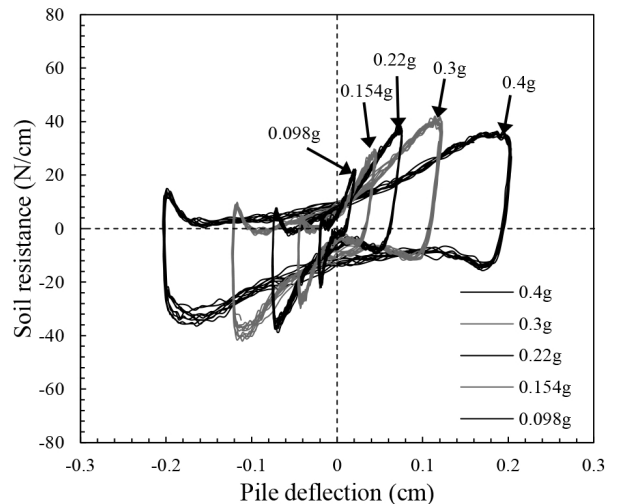


Fig. 15. Dynamic p-y curves at various input acceleration (G.L. -8cm, 4D)

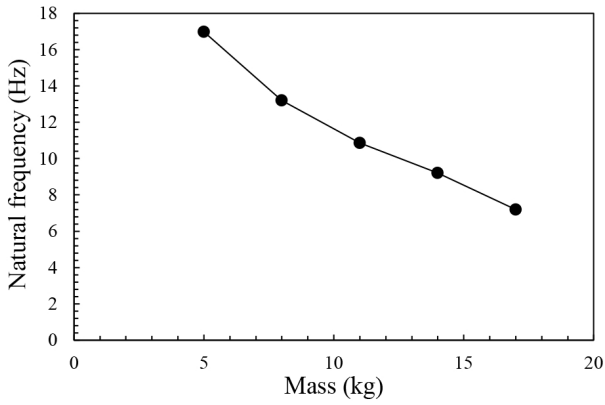


Fig. 16. Natural frequency of soil-pile structure at various superstructure mass

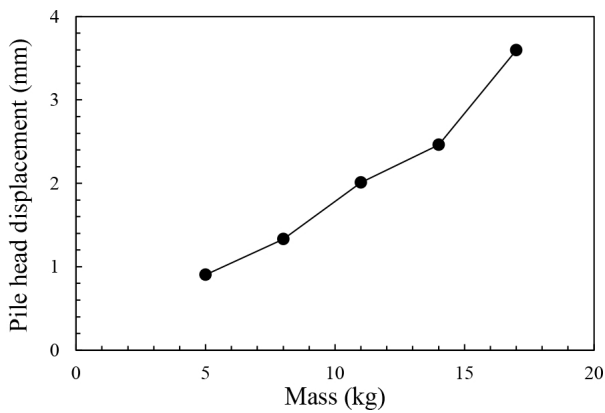


Fig. 17. Max. pile head displacement at various superstructure mass

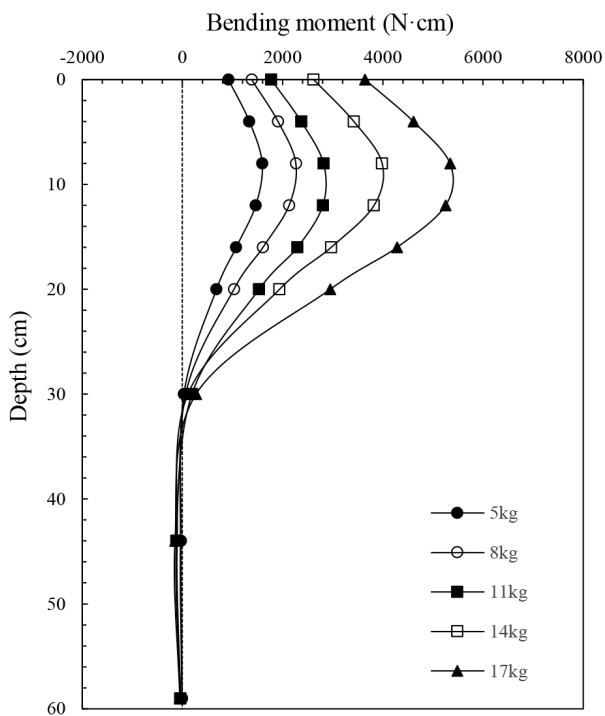


Fig. 18. Bending moment at max. pile head displacement

시켰을 때의 결과를 나타낸다. Fig. 16은 상부하중에 따른 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 나타낸다. 상부하중이 클수록 지반-말뚝 시스템 전체 무게가 증가하여 고유 진동수가 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 17과 Fig. 18은 상부하중에 따른 말뚝 두부의 최대 수평변위와 말뚝 두부의 최대 수평변위가 발생하는 시점의 상부하중에 따른 말뚝의 휨모멘트 분포를 나타낸다. 말뚝의 휨모멘트 및 말뚝 두부 변위가 각각 최대 약 3.4배, 3.9배 증가하는 것을 확인하였다. 이는 상부하중이 커질수록 말뚝의 관성력이 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 19는 상부하중에 따른 말뚝의 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 상부하중이 증가할수록 상부구조물에 더 큰 관성력이 작용하여 말뚝의 변위 및 지반반력이 증가하고 동적 p-y 곡선의 기울기도 증가하는 것을 확인 하였다.

4.3 지반의 상대밀도에 대한 영향

본 절에서는 입력가속도 0.154g, 0.3g 및 하중 진동수 1.0f_n 조건에서 상대밀도를 40%, 80%로 변화시켰을 때의 결과를 나타낸다. Fig. 20은 상대밀도가 40%, 80%일 때 입력가속도별 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 나타낸다. 상대밀도가 40%인 경우 80%인 경우 보다 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 작게 나타남을 확인 하였다. 이는 상대밀도가 높을수록 지반의 강성이 커지기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 21과 Fig. 22는 각각 입력가속도별 상대밀도가 40%인 경우와 80%인 경우의 최대 수평변위와 깊이별 휨모멘트를 나타낸다. 상대밀도가

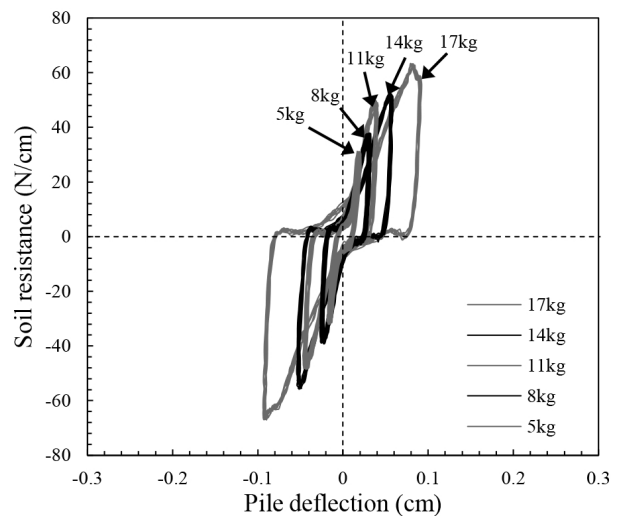


Fig. 19. Dynamic p-y curves at various superstructure mass (G.L. -8cm, 4D)

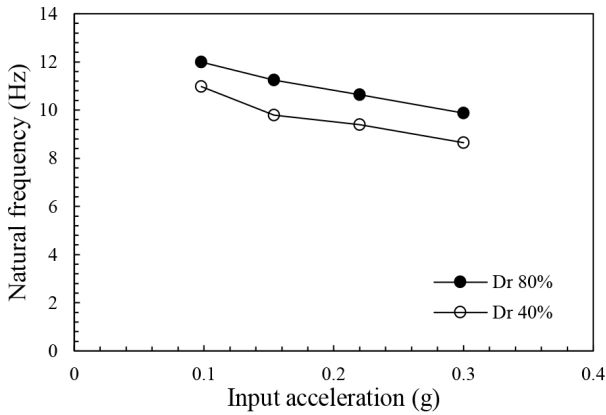


Fig. 20. Natural frequency of soil-pile structure at relative density

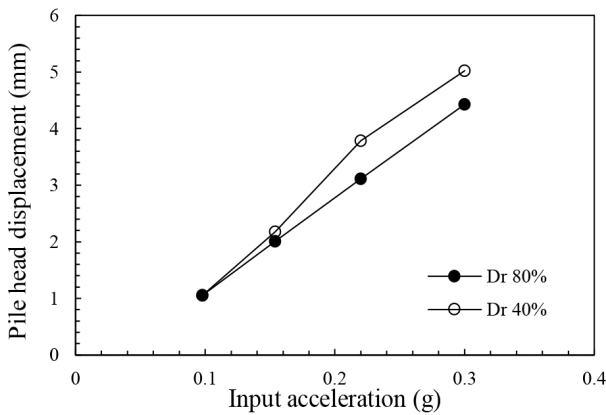


Fig. 21. Max. pile head displacement at relative density

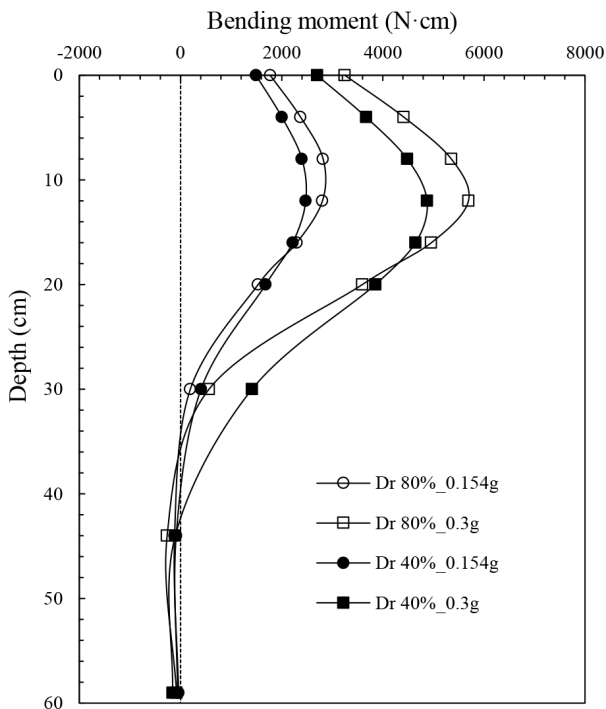


Fig. 22. Bending moment at max. pile head displacement

80%인 경우 40%인 경우보다 강성이 크기 때문에 변위가 최대 약 1.3배 더 적게 발생하는 것을 확인 하였다. 깊이별 휨모멘트를 분석한 결과 상대밀도 80%인 경우가 40%일 때 보다 최대 약 1.2배 크게 발생한다. 이러한 결과는 Kim et al.(2015)이 보고한 지반의 상대밀도가 클수록 극한수평지지력이 크기 때문에 말뚝에 발생하는 최대휨모멘트가 크다는 연구결과와 동일한 것이다. Fig. 23은 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 상대밀도 80%일 때가 40%일 때 보다 지반의 강성이 크기 때문에 동적 p-y 곡선의 지반 반력 및 기울기가 크기 나타나고 변위는 더 적게 발생함을 확인 하였다.

4.4 말뚝 두부구속 조건에 대한 영향

본 절에서는 상대밀도 40%, 입력가속도 0.3g 및 하중 진동수 $1.0f_n$ 조건에서 말뚝 두부 구속조건을 힌지단과 고정단으로 변화시켰을 때 결과를 나타낸다. Fig. 24는 말뚝 두부구속 조건이 힌지단, 고정단일 때 입력가속도 별 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 나타낸다. 말뚝 두부구속조건이 힌지단인 경우 고정단인 경우 보다 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 작게 나타남을 확인 하였다. 이는 구속조건이 고정단인 경우 말뚝 두부에서 횡방향 강성이 힌지단보다 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 25와 Fig. 26은 각각 입력가속도별 말뚝구속조건이 힌지단인 경우와 고정단인 경우의 최대 수평변위와 깊이별 휨모멘트를 나타낸다. 힌지단에서 약 2.7배 더 큰 변위가 발생하고 입력가속도가 증가할수록 그 차이는 더욱 커지는 것을 확인 하였다. 또한 고정단인 경

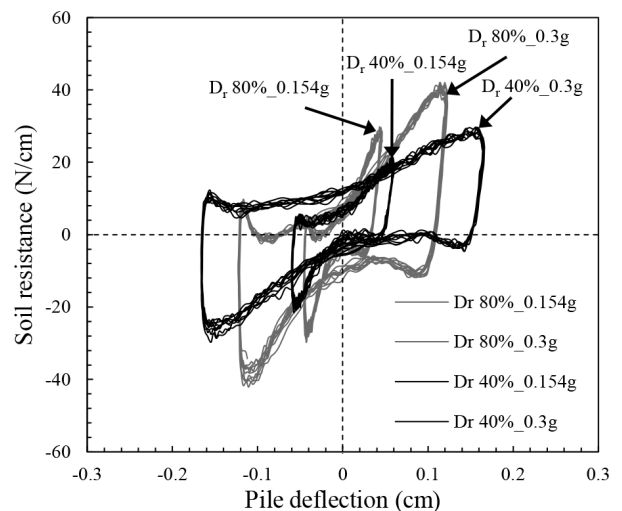


Fig. 23. Dynamic p-y curves at relative density (G.L. -8cm, 4D)

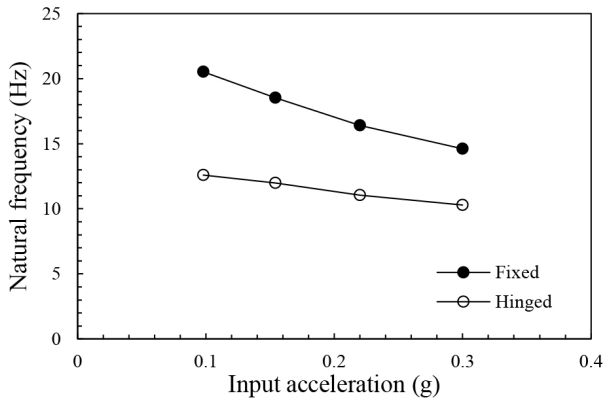


Fig. 24. Natural frequency of soil-pile structure at pile head condition

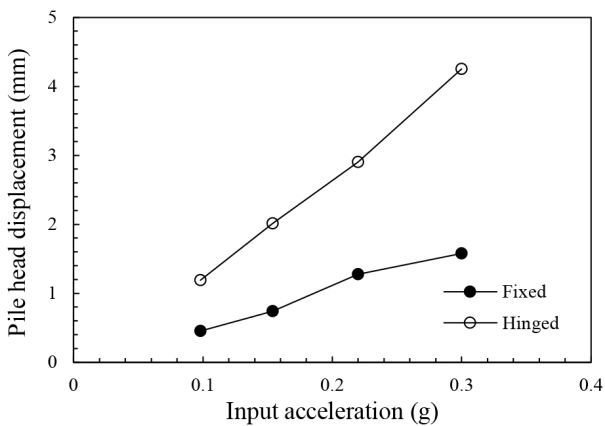


Fig. 25. Max. pile head displacement at pile head condition

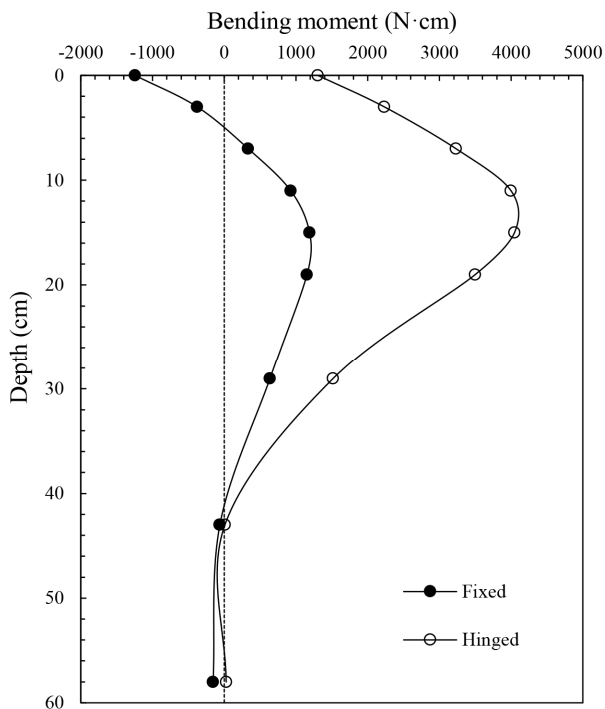


Fig. 26. Bending moment at max. pile head displacement

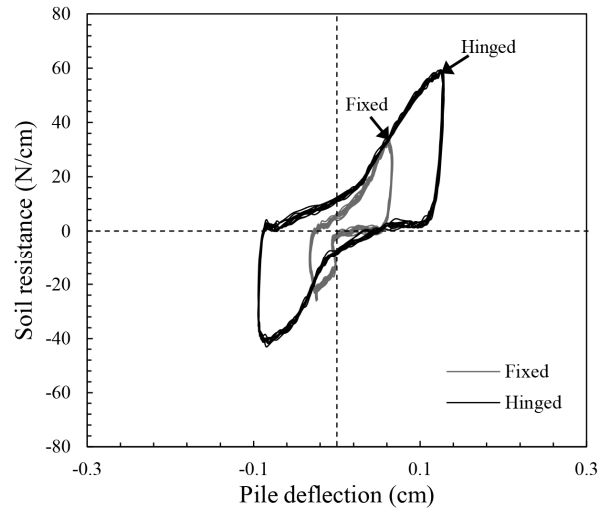


Fig. 27. Dynamic p-y curves at pile head condition (G.L. -11cm, 5.5D)

우 부모멘트가 발생함을 확인 하였다. Fig. 27은 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 말뚝의 변위 및 지반반력이 힌지 단에서 더 크게 발생하나 기울기의 차이는 거의 발생하지 않는 것을 확인 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 1g 진동대 실험을 통해 다양한 하중 진동수가 작용하는 건조 사질토지반에 근입된 말뚝에 대한 동적 거동을 분석하였다. 또한, 추가적으로 1) 입력가속도, 2) 상부하중, 3) 상대밀도, 4) 말뚝 두부 구속조건에 대한 영향의 조건 대하여도 실험 수행하여 분석하였다.

- (1) 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 일치하는 하중 진동수가 작용할 때 지반 및 기초구조물의 가속도 시간 이력을 분석한 결과 바닥면에서 발생하는 최대 가속도에 비해 말뚝 상부구조물의 최대가속도는 가속도 증폭으로 인하여 큰 가속도가 측정 되었다. 또한, 위상차이도 발생하는 것을 확인하여 기초구조물의 동적거동이 지반의 거동인 아닌 지반-구조물 상호작용 시스템에 더 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다.
- (2) 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 분석한 결과, 입력가속도 및 상부하중이 증가할수록 강성 및 질량의 영향으로 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 감소하였고, 말뚝 두부구속조건이 고정단인 경우 힌지단인 경우보다 횡방향 강성이 크기 때문에 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 증가함을 확인하였다.
- (3) 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 기준으로 동일한

비율의 하중 진동수를 비교한 결과, 하중 진동수가 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수보다 큰 경우 상대적으로 말뚝 두부변위와 휨모멘트가 크게 발생하고 동적 p-y 곡선의 지반반력 및 변위가 크게 발생한다.

- (4) 동적 p-y 곡선의 영향인자를 분석한 결과, 말뚝 두부구속조건은 동적 p-y 곡선의 기울기에 영향을 적게 끼침을 확인하였고, 입력가속도, 상부하중 등의 의한 관성력, 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 입력 진동수의 관계 그리고 지반조건이 동적 p-y 곡선의 기울기에 큰 영향을 끼침을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2014R1A2A1A11054606, No. 2011-0030040)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- American Petroleum Institute (API) (1987), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition, pp.68-71.
- Cox, W. R., Reese, L. C., and Grubbs, B. R. (1974), "Field Testing of Laterally Loaded Piles in Sand", *Proc. of the 6th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Paper OTC 2079.
- 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.
- El Naggar, M. H. and Bentley, K. J. (2000), "Dynamic Analysis for Laterally Loaded Piles and Dynamic p-y Curves", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.1166-1183.
- Gibson, A.D. (1996), "Physical Scale Modeling of Geotechnical Structures at One-g", Ph. D. Thesis, California Institute of Technology Pasadena, California.
- 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.
- Kim, B. C., Jeong, S. S., and Ko, J. Y. (2015), "Proposed Reduction Factor of Cyclic p-y Curves for Drilled Shafts in Weathered Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.2, pp. 47-63.
- Kim, D. H., Lee, T. G., and Kim, S. H. (2015), "Experimental Study on the Behavior Characteristics of Single Steel Pile in Sand Subjected to Lateral Loadings", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.5, pp.3548-3556.
- Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2009), "Analysis of Laterally Loaded Piles Using Soil Resistance of Wedge Failure Model", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.6, pp.59-72.
- Kim, Y. H., Jeong, S. S. and Lee, Y. G. (2007), "Effects of Lateral Pile Rigidity of Offshore Drilled Shafts by Developing p-y Curves in Marine Clay", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No.6, pp.37-51.
- Kim, Y. H., Jeong, S. S., and Won, J. O. (2009), "Effect of Lateral Rigidity of Offshore Piles Using Proposed p-y Curves in Marine Clay", *Journal of Marine Geosources and Geotechnology*, Vol.27, No.1, pp.53-77
- 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.
- Meymand P. (1998), "Shaking Table Model Test of Nonlinear Soil-pile-superstructure Interaction in Soft Clay", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Murchison, J. M. and O'Neil, M. W. (1984), "Evaluation of p-y Relationships in Cohesionless Soils", *Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, pp.174-191.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2001), "Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups", NCHRP Report 461, Transportation Research Board – National Research Council, pp.13-21
- 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.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1975), "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay", *Proc. of the 6th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 671-690.
- Rovithis, E., Kirtas, E., and Ptilakis, K. (2009), "Experimental p-y Loops for Estimating Seismic Soil-pile Interaction", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.7, No.3, pp.719-736.
- 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.
- Wilson, D. W. (1998), "Soil-pile-structure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay", Ph.D. thesis, University of California, Davis.
- Yang, E. K., Kwon, S. Y., Choi, J. I., and Kim, M. M. (2010), "Prediction of the Natural Frequency of Pile Foundation System in Sand during Earthquake", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.1, pp.45-54.
- 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.
- 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., Ha, J. G., Jo, S. B., and Kim, D. S. (2014), "Evaluation of seismic loading of pile foundation structure considering soil-foundation-structure interaction", *J. Earthquake Eng.*, Vol.18, No.3, pp.125-132.

Received : February 23rd, 2017

Revised : May 22nd, 2017

Accepted : June 7th, 2017