

원심모형 실험을 이용한 압입말뚝에 대한 동적 p-y 곡선 산정

Development of Dynamic p-y Curve for Jacked Pile by Centrifuge Test

유 민 택¹ Yoo, Min-Taek
권 선 용² Kwon, Sun-Yong
이 일 화¹ Lee, Il-Hwa

Abstract

In this study, dynamic centrifuge tests in dry sand were conducted in order to evaluate the effect of pile installation on the dynamic p-y curve. According to the result of the pile installation effect on the dynamic p-y backbone curves, the subgrade resistance of a jacked pile in 40 g was found to be greater than that of a jacked pile in 1 g and a preinstalled pile in 1 g. It was also found that differences of the subgrade resistance decrease with the depth of the pile. Applicability of dynamic p-y backbone curve for the bored pile proposed by preceded researcher was evaluated by comparing with the result of centrifuge tests. In addition, dynamic p-y backbone curve for jacking/driven pile was developed by modifying that for the bored pile.

요 지

본 연구에서는 말뚝 설치 방법에 따른 동적 p-y 곡선의 차이를 분석하기 위하여, 1g 상태에서 지반 조성 전 설치한 말뚝과 지반 조성이 완료된 후에 1g 상태에서 압입하여 설치한 말뚝, 그리고 40g의 원심 가속도 조건에서 압입시킨 말뚝에 대해 동적 원심모형 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 얻은 각 모형 말뚝의 동적 p-y 곡선의 최대지반반력을 이용하여 동적 p-y 중추곡선(Backbone curve)을 쌍곡선 함수로 나타내었다. 말뚝 설치 방법에 따른 동적 p-y 중추곡선 분석 결과, 40g 조건에서 압입한 말뚝이 1g 상태에서 압입한 말뚝 및 지반 조성 전 설치 말뚝에 비해 말뚝에 작용하는 지반반력이 크게 평가되었으며, 이러한 지반반력의 차이는 깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다. 일련의 p-y 곡선 결과를 바탕으로 기존에 제안된 현장타설말뚝에 대한 동적 p-y 중추곡선의 적용성을 평가하고, 이를 수정한 압입 및 항타 말뚝에 대한 동적 p-y 곡선 산정식을 개발하였다.

Keywords : Dynamic p-y curve, centrifuge test, pile installation effect, jacked pile, bored pile

1. 서 론

현재 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선을

이용한 말뚝 기초의 등가 정적 해석이 내진 설계 시 널리 사용되고 있다. 그러나, 아직까지 지진 하중 조건에 대한 동적 p-y 곡선이 명확히 정립되어 있지 않기 때문

¹ , (Member, Researcher, Korean Railroad Research Institute)

² , (Member, Senior Researcher, Samsung C&T, Tel: +82-2-2145-6497 Fax: +82-2-2145-6456, paulsy.kwon@samsung.com, Corresponding author,)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

에, 정적 p-y 곡선을 일부 수정하여 사용하거나, 말뚝머리에 반복하중을 가하여 얻은 p-y곡선을 실무에서 사용하고 있는 실정이다. 최근, Yoo et al.(2013)은 동적 원심 모형실험으로부터 구한 동적 p-y 중추곡선을 제안한 바 있으나, 모형실험 말뚝을 단일한 방법(말뚝 설치후 지반 조성)으로 설치한 데 따른 제약이 있다.

Dyson et al.(1998)과 McVay et al.(1994)은 원심모형 실험을 이용한 수평 정재하실험을 통해, 말뚝의 설치 방법에 따른 말뚝의 횡방향 거동을 분석한 바 있다. Dyson et al.(1998)은 160g의 원심가속도 조건에서 다양한 말뚝 설치 방법에 따른 지반-말뚝 시스템의 횡방향 강성을 비교하였는데 그 결과로서 160g 원심 가속도 조건에서 항타하여 설치한 말뚝, 160g 조건에서 유압 장치를 이용하여 압입한 말뚝, 1g 조건에서 압입한 말뚝, 그리고 1g 상태에서 지반 조성 전 설치한 말뚝 순서로 횡방향 강성이 작게 나타난다고 보고하였다. McVay et al. (1994)의 실험에서는 48g의 원심가속도 조건에서 항타하여 설치한 말뚝의 횡방향 강성이 1g 상태에서 항타하여 설치한 말뚝에 비해 크게 측정되었다. 또한 Bonab et al.(2007)은 원심모형 실험을 이용한 충격하중실험을 통해 말뚝 설치 방법에 따른 말뚝의 횡방향 거동을 분석하였다. 이 실험 결과에 의하면, 1g 상태에서 항타하여 설치한 말뚝의 공진주파수가 1g 상태에서 유압 장치를 이용하여 압입한 말뚝과 지반 조성 전 설치한 말뚝의 공진주파수에 비해 크게 나타났다.

이상의 실험 결과들을 종합하여 보면 항타 및 압입에 의해 지반-말뚝-시스템의 횡방향 강성은 증가하며 말뚝을 항타하여 설치한 경우가 압입하여 설치한 경우에 비해 횡방향 강성 증가 효과가 더 크다. 그러나, 이러한 원심모형실험 결과들은 정적 하중 또는 충격 하중 조건에서 이루어진 실험에서 얻은 것으로서 지진 하중을 받는 말뚝의 거동 해석에 사용하기에는 무리가 있다.

이에 본 연구에서는 1g 상태에서 지반 조성 전 설치한 말뚝과 지반 조성이 완료된 후에 1g 상태에서 압입

하여 설치한 말뚝, 그리고 40g의 원심 가속도 조건에서 압입시킨 말뚝에 대해 동적 p-y곡선을 얻기 위한 원심 모형 실험을 수행하였으며 실험 결과로부터 얻은 말뚝 설치 방법별 동적 p-y 곡선을 비교 분석하였다. 또한 Yoo et al.(2013)이 원심모형실험을 통해 제안한 현장타설말뚝에 대한 동적 p-y 중추곡선의 적용성을 평가하였으며, 나아가 기존 동적 p-y 곡선을 수정하여 압입말뚝에 대한 동적 p-y 곡선 산정식을 개발하였다.

2. 원심모형실험 개요 및 절차

본 연구에서는 팔길이가 5m이고, 최대 2,400kg의 무게를 100g의 원심가속도까지 올릴 수 있는 KAIST 동적 원심모형실험기를 이용하여 원심가속도 40g 조건에서 실험을 수행하였으며 4자유도 in-flight 로봇을 이용하여 말뚝을 압입하였다(Kim et al., 2013a, 2013b). 실험에 사용된 토조는 ESB(Equivalent Shear Beam) 상자로 토조의 크기는 길이 0.49m, 폭 0.49m, 높이 0.63m이며, 높이 방향으로 6cm 두께의 띠모양 요소들이 고무 버클로 연결되어 있어 지반 진동하에서 토조가 지반과 함께 변형을 일으켜 토조 가장자리에서의 반사파 발생을 줄여주도록 되어 있다(Lee et al., 2013).

실험에 사용된 모형 말뚝은 외경 10mm, 두께 1mm의 알루미늄관이며(Fig. 2), 모형말뚝의 제원은 Table 1과 같다. 모형 지반은 Hammer Crusher 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사로 조성하였으며 사용된 규사의 입도 분포 곡선 및 물리적 특성은 Fig. 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 말뚝 직경은 지반 조성에 사용된 규사 평균 입경(D₅₀)의 약 46배로 말뚝 직경이 평균 입경(D₅₀)의 35배 이상이 되면 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen(1979)의 연구 결과를 만족한다.

실험은 3개의 모형 말뚝(Fig. 2)을 하나의 ESB(Equivalent Shear Beam) 모형상자에 설치하여 수행하였는데 모형 제작 방법은 다음과 같다.

Table 1. Properties of the model piles

	Model	Similitude Law ($\lambda=40$)	Prototype
Diameter (mm)	10	λ	400
Thickness (mm)	1	λ	40
Length (mm)	350	λ	14,000
Penetration Depth (mm)	300	λ	12,000
Flexural stiffness (kgf·cm ²)	20,043	λ^4	5.1×10^{10}

1. 지반을 조성하기 전 3개의 모형 말뚝 중 하나를 ESB 박스 상단부에 나일론 줄로 연결하여 고정시킨다. 이는 모래 강사시 모형말뚝이 움직이지 않도록 고정시켜 주는 역할을 한다. 모형 말뚝의 위치는 ESB 박스 하단부에서 50mm의 간격을 유지하도록 한다.
2. 강사장치를 이용하여 70%의 균일한 상대밀도를 갖도록 규사를 0.35 높이까지 강사한다.
3. 강사가 완료 되면 미리 설치해 놓은 모형말뚝에서 나일론 줄을 제거한다. 이 모형 말뚝은 지반조성 전 설치한 말뚝의 동적 거동 평가에 이용된다. 강사가 완료된 지반의 표면을 고르게 한 후, 1g 상태에서 로봇을 이용하여 두 번째 모형 말뚝을 압입시킨다. 말뚝의 압입속도는 지반교란을 최소화하기 위해 로봇의 최저 압입 속도인 0.5mm/s로 한다.

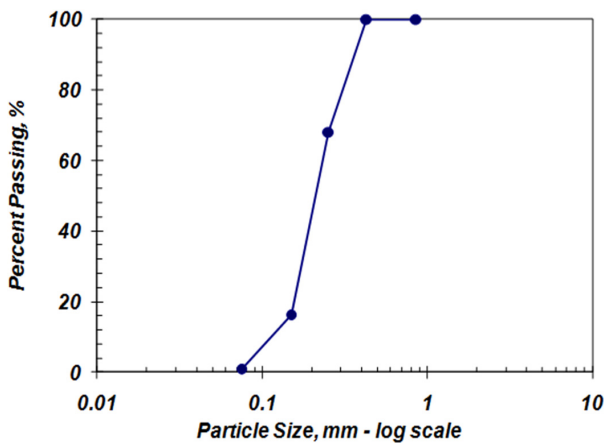


Fig. 1. Particle size distribution curve of model soil

Table 2. Model soil properties

Soil	Silica sand
Soil classification (USCS)	SP
Max. dry unit weight, $\rho_{d,max}$ (t/m^3)	1.65
Min. dry unit weight, $\rho_{d,min}$ (t/m^3)	1.24
Specific gravity (G_s)	2.65
Coefficient of curvature (C_c)	1.11
Coefficient of uniformity (C_u)	1.96
Plasticity index (PI)	NP
D_{50} (mm)	0.22

Table 3. Test program

Input acceleration	Pile installation method	Input frequency	Relative density
0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g	Pre-installed, jacking in at 1 g condition, jacking in at 40 g condition	1 Hz	70%

이 때 모형말뚝 사이의 간격은 0.15m로써 말뚝간의 간격이 말뚝 직경의 10D 이상이면 말뚝 상호간에 서로 영향을 주지 않는다는 Remaud(1999)의 연구 결과를 만족시킨다.

4. 이후, 원심가속도 40g 조건에서 세 번째 모형말뚝을 0.5mm/s의 속도로 압입시킨다. 이 경우 역시 모형말뚝 간 거리는 0.15m를 유지하도록 한다.

최종적으로 완성된 실험 단면은 Fig. 2와 같다. 말뚝 단면의 양쪽에는 5쌍의 변형율계를 부착하여 진동 중에 발생하는 말뚝 깊이별 모멘트를 측정하였으며 가속도계를 말뚝 상부질량과 변형율계의 위치와 동일한 지반 내에 설치하여 말뚝과 지반의 가속도 응답을 측정하였다. 모형말뚝에 부착한 변형율계는 모형말뚝을 압입시킬 때 말뚝 표면에 발생하는 강한 마찰력을 견디어낼 수 있도록 에폭시로 코팅하여 단단하게 부착하였다.

모형 제작이 완료된 후, 원심가속도 40g 상태에서 진동하중을 입력하여 말뚝의 동적 거동을 살펴보았다. 진동하중은 가속도 크기와 진동수 변화가 용이한 정현파를 이용하였고, 가속도의 크기는 원형 기준 0.1g~0.4g를 적용하여 원형 기준으로 약 20초간 진동을 가하였다. 진동하중 진동수는 가진 진동수중에 가장 작은 1Hz를 적용하였으며, 이는 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유진동수를 고려하여 비선형 변위를 확인하기 위하여 설정하였다(Table 3).

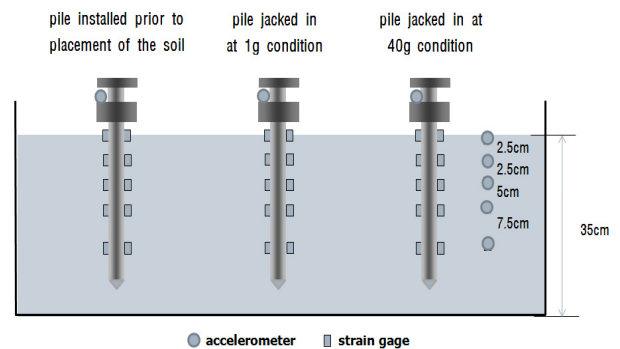


Fig. 2. Layout of test (Model scale)

3. 원심모형실험 결과

3.1 동적 p-y 곡선 작성 방법

진동대 실험에서 얻은 변형율계 측정값으로부터 말뚝의 깊이별 모멘트 분포 곡선을 결정하고 식 (1)과 같은 보 이론에 따라 지반반력 p 와 말뚝 변위 y_{pile} 을 산정하였다. 깊이별 모멘트 분포 곡선은 총 5곳의 깊이에서 측정된 모멘트 자료에 cubic spline 보간 방법을 적용하여 구하였다(Dou and Byrne, 1996).

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

여기서, EI : 말뚝의 휨강성, z : 깊이, $M(z)$: 깊이에

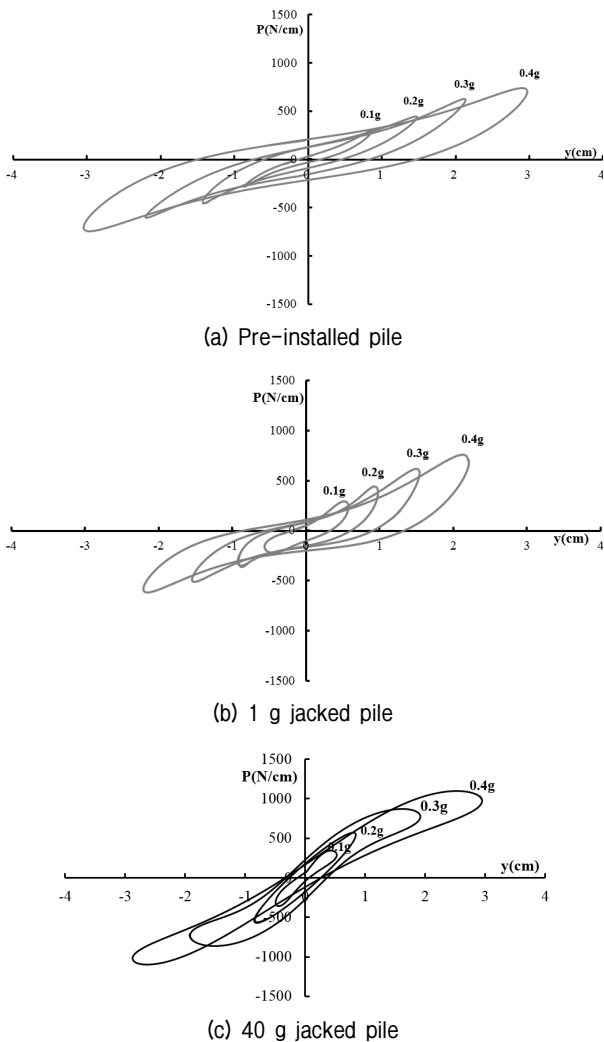


Fig. 3. Experimental dynamic p-y loop with input accelerations at depth of 1D

따른 모멘트 분포 곡선

동적 p-y 곡선을 구성하는 y 는 정적 p-y 곡선에서와는 다르게 지진 하중에 의한 지반 변위가 발생하므로 지반-말뚝 간의 상대 변위가 되어야 한다. 따라서 y 를 구하기 위해서는 식 (1)에서 구한 y_{pile} 에서 지반 변위 y_{soil} 을 빼주어야 한다. 이 때 y_{soil} 은 각 높이에서 측정된 가속도 자료를 2번 적분하여 구하였다.

3.2 깊이 별 p-y 곡선

본 실험에서 얻은 모든 결과는 상사비 40을 적용하여 원형의 값으로 나타내었다. 실험 결과를 살펴보면, 입력 하중의 크기가 증가할수록 상부 구조물에서 발생하는 관성력이 증가하여 상부 하중 관성력에 의한 말뚝의 변위가 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 p-y 곡선은 말뚝 변위가 증가할수록 지반 반력의 증가량이 감소하는 비선형 거동을 보인다. Fig. 4를 보면 가속도 크기가 증가함에 따라 각 입력 가속도 수준에서의 할선 기울기가 감소하는 것을 알 수 있는데 이로부터 본 실험에서 구한 실험 동적 p-y 곡선이 비선형 거동을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 또한 1g 조건에서 말뚝을 설치 및 압입

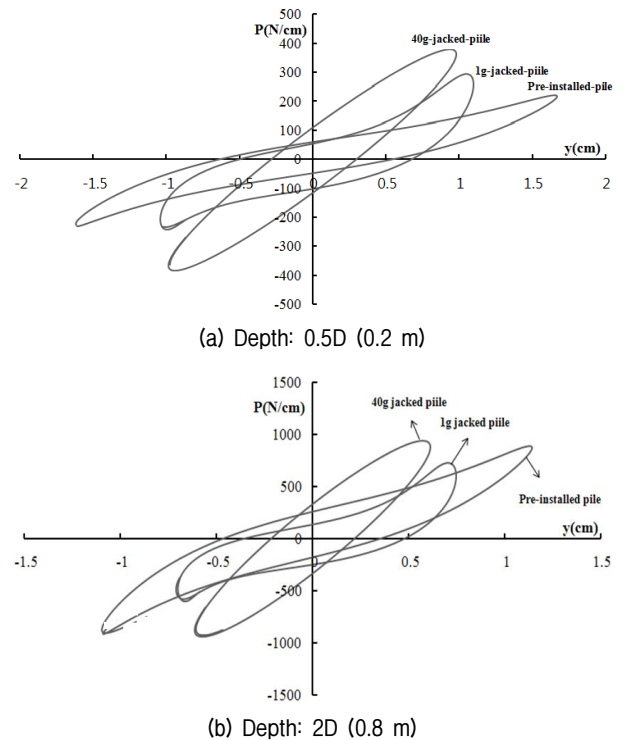


Fig. 4. Experimental dynamic p-y loop with installation methods (0.2 g, 1 Hz)

한 Fig. 3(a)와 (b)의 경우 지반의 움직임이 말뚝의 움직임을 따라오지 못해 지반반력이 거의 없는 것으로 나타나는 지반-말뚝 분리(Gapping) 현상(Dou and Byrne, 1996)을 확인 할 수 있다. 반면, 40g 조건에서 말뚝을 압입한 Fig. 3(c)의 경우에는 이러한 현상이 나타나지 않았다. 일반적으로, 상대 밀도가 높고 지반의 구속압이 클수록 지반과 말뚝이 함께 거동하여 지반-말뚝 분리 현상이 잘 일어나지 않는 경향을 보이는데, 이로부터 40g 조건에서 압입한 말뚝 주변의 지반이 다른 말뚝들에 비해 주변 지반이 조밀해졌음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 원형 기준으로 진동수 1Hz, 가속도 크기 0.2g의 정현파를 입력하여 얻은 깊이 0.2m(말뚝직경의 0.5배)와 0.8m(말뚝직경의 2배)에서의 말뚝의 설치 방법 별 동적 p-y 곡선들을 동시에 나타내었다. 이 그림에서 보면, 40g 조건에서 압입한 말뚝의 횡방향 강성이 가장 크고, 그 다음이 1g 조건에서 압입한 말뚝이며, 그리고 지반 조성 전 설치한 말뚝의 횡방향 강성이 가장 작다. 지반 조성 후에 말뚝을 압입한 경우가 말뚝을 설치한 후에 지반을 조성한 경우에 비해 횡방향 강성이 크게 나타나는 이유는 말뚝을 압입하는 동안 주변 지반이 조밀해지는 등 주변지반의 응력 상태가 변하기 때문이다(Dyson et al., 1998; Bonab et al., 2007). 그리고, 40g 조건에서 압입한 말뚝의 강성이 1g 조건에서 압입한 말뚝의 강성에 비해 크게 나타나는 이유는 1g 조건에서는 말뚝 압입시 쉽게 발생하는 지반의 팽창이 40g 조건에서는 구속압에 의해 억제되어 압입시 발생하는 응력상태의 변화가 40g 조건에서 더 크게 발생하기 때문으로 판단된다.

3.3 동적 p-y 중추곡선 산정방법

말뚝 설치 방법에 따른 동적 p-y 거동의 비교를 위하여 동적 p-y 중추곡선을 구축하였다. 이 중추곡선은 실험에서 구한 깊이별 동적 p-y 곡선에서 최대 지반반력 점을 찾아낸 후, 이점들을 Kondner(1963)가 제안한 쌍곡선 함수로(식 (2)) 연결하여 완성하였다(Ting et al., 1987; Yang et al., 2009; Yoo et al., 2013).

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{mi}} + \frac{y}{p_u}} \quad (2)$$

여기서, k_{mi} = 초기기울기

p_u = 극한지반반력

y = 지반 말뚝 상대 변위

3.4 말뚝 설치 방법에 따른 동적 p-y 중추곡선 비교

Fig. 5에 동적 p-y 중추곡선을 나타내었다. 이 그림에서 보면 40g 조건에서 압입한 말뚝, 1g 조건에서 압입한 말뚝, 지반 조성 전 설치한 말뚝 순서로 횡방향 강성이 크게 평가되며 이러한 강성 차이는 깊이가 깊어짐에 따라 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 깊이가 깊어짐에 따라 구속압이 커지면서 말뚝 설치 효과에 따른 영향이 감소되기 때문으로 판단된다.

이러한 깊이별 횡방향 강성차이의 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 p-y 중추곡선의 극한지반반력(P_u)과 지반반력계수(K) 값을 비교하였다. 여기서 지반반력계수는 도로교 설계기준(2001)에서 정한 말뚝의 탄성한계인 말뚝 직경 1%에서의 p-y 곡선의 할선 기울기이다. 그 결과 말뚝 직경의 0.5배(0.2m) 깊이에서의 극한지반반력이 40g 조건에서 압입한 말뚝과 1g 조건에서 압입한 말뚝에서 지반 조성 전 설치한 말뚝에 비해 각각 75%, 30% 정도 큰 값을 나타냈으며, 지반반력계수값은 40g 조건에서 압입한 말뚝과 1g 조건에서 압입한 말뚝에서 지반 조성 전 설치한 말뚝에 비해 각각 164%, 56% 큰 값을 나타냈다. Table 4에 이러한 말뚝 설치 방법에 따른 극한지반반력과 지반반력계수값의 차이를 깊이별로 정리하였다. 깊이가 말뚝 직경의 2배 이내의 깊이에서 극한지반반력 및 지반반력계수 값의 차이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 깊이가 말뚝 직경의 2배가 되면 극한지반반력의 차이가 거의 발생하지 않았다. 또한, 깊이가 말뚝 직경의 3배가 되면 지반반력계수값의 차이 역시 10%이하로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

지반 조성 전 설치한 말뚝의 경우 말뚝 설치시 주변 지반의 교란 효과가 크지 않은 현장타설말뚝의 조건을 모사하며, 40g 조건에서 압입하는 말뚝은 말뚝 설치시 주변 지반이 조밀해지는 압입 및 항타 말뚝 조건을 근사적으로 모사하고 있다고 볼 수 있다. 따라서 압입 및 항타말뚝에 대한 동적 횡방향 거동 평가를 수행할 때 깊이가 말뚝 직경의 3배 이내의 조건에서는 지반 조성 전 설치한 말뚝에 대한 동적 원심 모형실험을 통해 제안된 동적 p-y 곡선(Yoo et al., 2013)의 강성을 수정하여 사용할 필요가 있다고 판단된다.

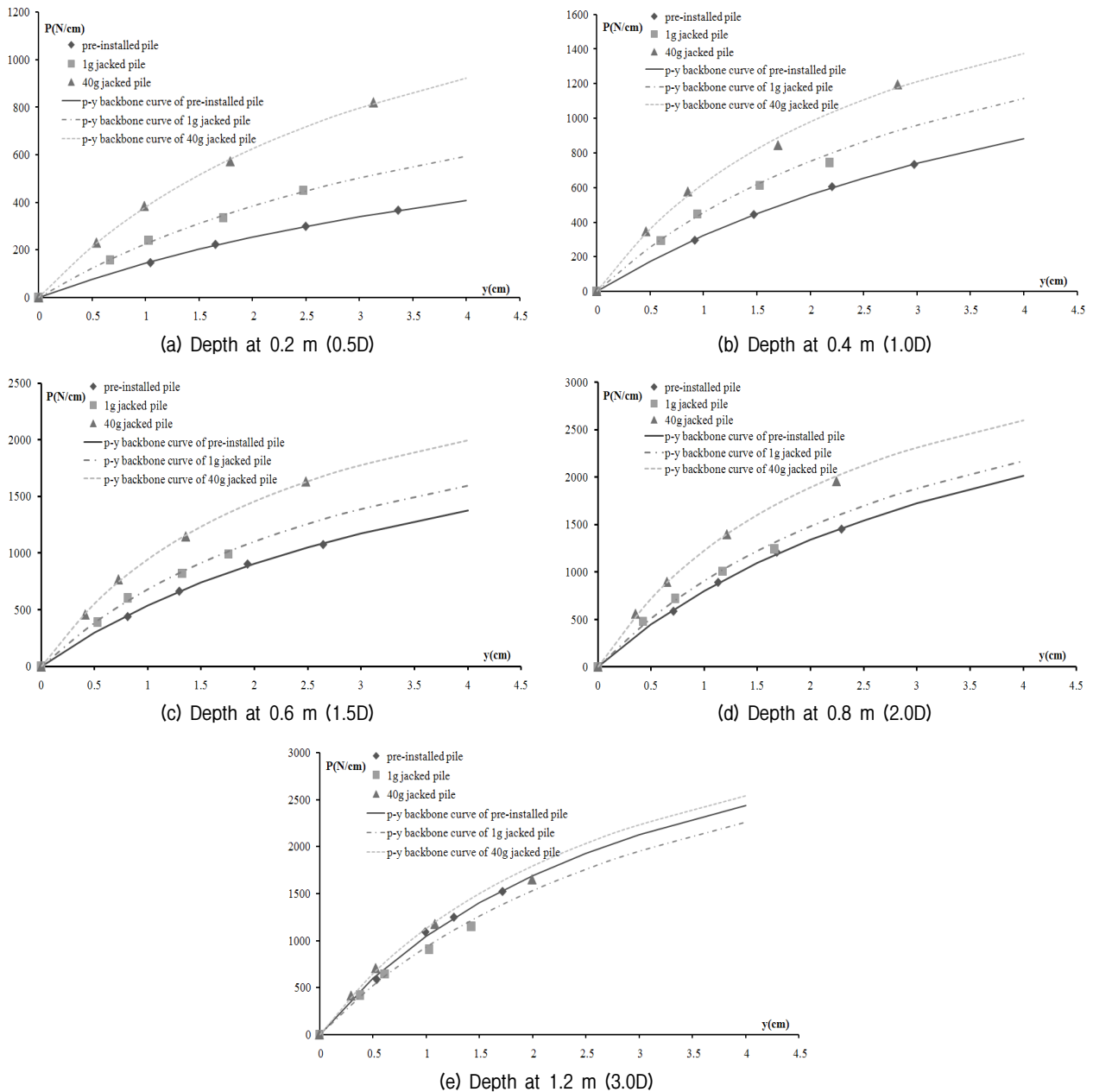


Fig. 5. Ultimate subgrade reaction points with depth and regression analysis results

Table 4. The stiffness ratio between pre-installed pile and jacked piles with depth

Depth (D : diameter of the pile)	The ultimate subgrade reaction (p_u) (N/cm)		The modulus of subgrade reaction (K) (N/cm^2)	
	Jacking in at 40 g condition,	Jacking in at 1 g condition,	Jacking in at 40g condition,	Jacking in at 1 g condition,
0.5D (0.2 m)	1.75	1.30	2.64	1.56
1D (0.4 m)	1.10	1.03	1.93	1.41
1.5D (0.6 m)	1.11	1.01	1.75	1.26
2D (0.8 m)	1.03	1.03	1.52	1.12
3D (1.2 m)	1.00	0.99	1.08	0.89

4. 압입 말뚝의 동적 p-y 중추곡선 산정식 개발

중추곡선을 이용하여 아래와 같이 압입 말뚝의 동적 p-y 곡선을 산정하였다.

Yoo et al.(2013)이 제시한 현장타설말뚝의 동적 p-y

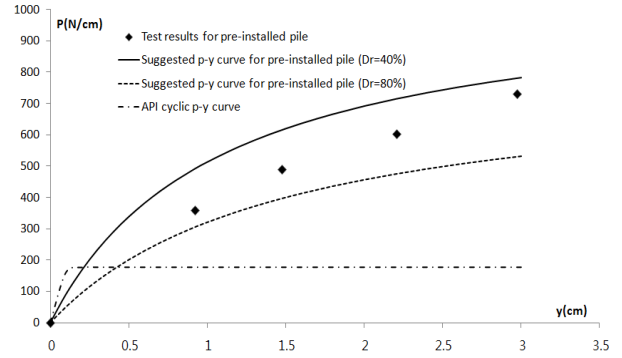
4.1 동적 p-y 중추곡선 산정식(Yoo et al., 2013)

3장에서 언급한 바와 같이 현장타설말뚝을 모사하는 지반 조성 전 설치한 말뚝과 압입말뚝을 모사한 40g 조건에서의 압입 말뚝 사이에 p-y 거동의 차이가 있음을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 실험이 제한된 실험 조건에 대해 수행되었기 때문에 Yoo et al.(2011)이 제안한 p-y 중추곡선을 이용하여 간접적으로 압입말뚝에 대한 p-y 중추곡선을 산정하였다.

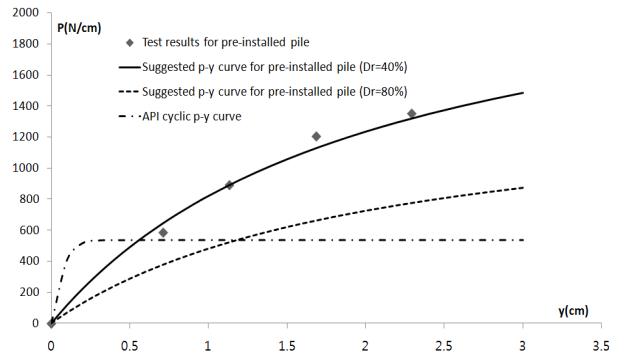
Yoo et al.(2011)은 지반 조성 전 설치한 3가지 직경을 가지는 모형 말뚝을 대상으로 원심모형 실험을 수행하고 단말뚝에 대한 동적 p-y 중추곡선을 3.3절의 식 (2)와 같은 쌍곡선 함수로 나타내었다. Yoo et al.(2011)이 제안한 동적 p-y 중추곡선은 지반 조성 전 설치한 말뚝에 대한 실험을 통해 제안되어 말뚝 설치시 주변 지반의 변화가 크지 않은 현장타설말뚝에 적합하며, 초기기울기(k_{ini})와 극한지반반력(p_u)을 결정하기 위한 경험식은 마찰각과 구속압의 함수로 Table 5에 나타난 바와 같이 지반조건에 따라 제안되었다.

4.2 현장타설말뚝의 p-y 중추곡선

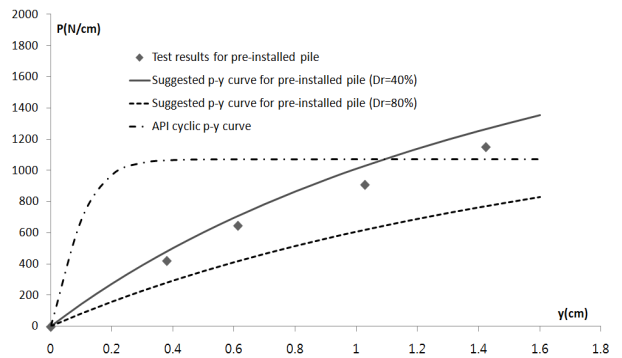
Yoo et al.(2013)이 제안한 식을 이용하여 압입말뚝에 대한 p-y 곡선을 제안하기에 앞서 기존 동적 p-y 중추곡선의 적용성을 검증하기 위하여 지반 조성 전 설치 말뚝에 대한 실험 결과와 비교하였다. 또한 내진설계를 위한 등가정적 해석 시에 널리 이용되는 반복하중에 대한 API p-y 곡선과도 비교하였다. Fig. 6에서 나타나듯이, 지반 조성 전 설치 말뚝의 최대반력점은 느슨한 지반과 조밀한 지반에 대한 기존 동적 p-y 중추 곡선 사이의 값을 보이고 있다. 이는 실험에서 조성된 지반의 상



(a) At the depth of 1 diameter (0.4 m)



(b) At the depth of 2 diameter (0.8 m)



(c) At the depth of 3 diameter (1.2 m)

Fig. 6. Suggested dynamic p-y curve for pre-installed pile and maximum subgrade reaction of pre-installed pile with depth

Table 5. Existing dynamic p-y curve for pre-installed pile (Yoo et al., 2013)

Dynamic p-y curve	$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}}, \quad k_{ini} = \frac{Kp_u}{p_u - K \frac{D}{100}}$	
	Subgrade reaction modulus K (N/cm ²)	The ultimate subgrade reaction p_u (N/cm)
Loose sand	$K = 4.26DP_a(\frac{\sigma'_a}{P_a})^{0.5}$	$p_u = 12.5DK_p\gamma'z^{0.90}$
Dense sand	$K = 7.29DP_a(\frac{\sigma'_a}{P_a})^{0.5}$	$p_u = 13.3DK_p\gamma'z^{1.02}$

Pile diameter : D (cm); confining pressure : σ'_a (N/cm²); depth : z (cm); unit weight : γ' (N/cm³); Rankine coefficient of passive earth pressure : K_p ; atmosphere pressure : P_a (N/cm²)

대 밀도가 70%로 p-y 곡선이 제안된 상대밀도 사이의 값을 가지기 때문이며 상대적으로 가까운 상대밀도인 상대밀도 80%에 대한 p-y 곡선과 더 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 깊이가 깊어질수록 상대밀도 80%에 대한 p-y 곡선에 더 가깝게 거동하였는데 이는 깊이가 깊어질수록 지반이 조밀해지는 경향을 보였기 때문으로 판단된다. 또한 반복하중에 대한 API p-y 곡선의 경우 비선형영역에서의 동적 횡방향 지반반력을 크게 과소 평가하는 것으로 나타났으며 이는 기존의 연구 결과와 일치한다(Yang et al.(2009), Yoo et al.(2009)). 일련의 실험 결과로 Yoo et al.(2013)이 제안한 동적 p-y 곡선이 현장타설말뚝의 횡방향 동적 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 판단되며 이를 수정하여 압입말뚝에 대한 p-y 중추곡선을 산정하였다.

4.3 압입 말뚝의 p-y 중추곡선 산정식

앞서 설명한 바와 같이 설치 방법에 따라 말뚝의 횡방향 동적 p-y 거동에 차이가 발생하며, 압입말뚝에 대해 현장타설말뚝과 동일한 p-y 곡선을 사용하는 것은

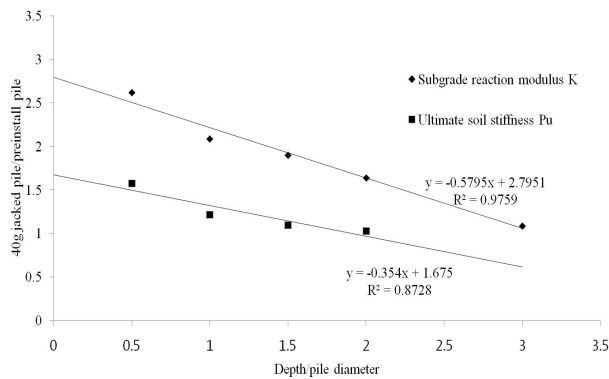


Fig. 7. Regression analysis result of K and Pu with depth

Table 6. Suggested dynamic p-y curve for jacked pile

Dynamic p-y curve	$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{mi}} + \frac{y}{p_u}}, \quad k_{mi} = \frac{Kp_u}{p_u - K \frac{D}{100}}$	
	Subgrade reaction modulus K (N/cm ²)	The ultimate subgrade reaction p_u (N/cm)
Loose sand	$K = 4.26ADP_a \left(\frac{\sigma'_a}{P_a}\right)^{0.5}$	$p_u = 12.5BDK_p \gamma' z^{0.90}$
Dense sand	$K = 7.29ADP_a \left(\frac{\sigma'_a}{P_a}\right)^{0.5}$	$p_u = 13.3BDK_p \gamma' z^{1.02}$

Pile diameter : D (cm); confining pressure : σ'_a (N/cm²); depth : z (cm); unit weight : γ (N/cm²); Rankine coefficient of passive earth pressure : K_p ; atmosphere pressure : P_a (N/cm²); A, B : Increasing factor for driven pile;

지반반력을 과대 평가 할 수 있다. 이에 현장 구속압 조건(40g 조건)에서 압입한 말뚝과 지반 조성전 설치말뚝 사이의 강성차이를 이용하여 기존 동적 p-y 중추곡선 (Yoo et al., 2013)을 기본으로 한 압입말뚝에 대한 동적 p-y 곡선 계산식을 산정하였다.

Fig. 7은 40g 조건에서 압입한 말뚝과 지반 조성 전 설치한 말뚝의 깊이별 지반반력계수 및 극한지반반력 차이를 나타낸 그림이다. 지반반력계수와 극한지반반력 모두 깊이가 깊어질수록 작아지는 경향성을 보이며 깊이와 지반강성이 높은 상관성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 선형 회귀 분석을 통해 얻은 선형 회귀식을 이용하여 깊이 별 지반반력계수와 극한지반반력의 강성증가계수를 식 (3), (4)와 같이 산정할 수 있다. 강성증가계수는 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보이며 1을 초과하여서는 안 된다. 산정한 강성증가 계수를 기존의 동적 p-y 곡선식에 적용하여 Table 6과 같이 압입말뚝에 대한 동적 p-y 곡선 식을 산정하였다. 또한, 압입말뚝에 작용하는 지반반력이 항타말뚝에 작용하는 지반반력 보다 작게 발생하며(Dyson et al., 1998) 이에 본 연구에서 제안하는 압입말뚝에 대한 p-y 곡선은 항타말뚝에 대한 동적 p-y 곡선의 하한 곡선으로 이용할 수 있다. 물론 실제 압입 말뚝의 p-y 곡선은 항타 말뚝의 지반반력을 과소 평가 할 수 있으며 이는 횡방향 말뚝 설계시 다소 보수적인 설계를 야기하는 한계가 있다. 그러나 제안된 동적 p-y 곡선을 항타말뚝에 대한 동적 p-y 곡선으로 이용할 경우, 기존 현장타설말뚝 동적 p-y 곡선에 비해 항타말뚝의 거동을 보다 잘 예측할 수 있으며 말뚝의 과다 설계를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

$$A = -0.58 \frac{z}{D} + 2.80 (A \geq 1) \quad (3)$$

$$B = -0.35 \frac{z}{D} + 1.68(B \geq 1) \quad (4)$$

여기서, z = 깊이

D = 말뚝 직경

A = 지반반력계수(K)에 대한 강성 증가 계수

B = 극한지반반력(P_u)에 대한 강성 증가 계수

5. 결론

본 연구에서는 동적 원심모형실험을 이용하여 말뚝 설치 방법에 따른 말뚝의 동적 횡방향 거동 차이에 대해 알아보았다. 지반 조성 전 설치한 말뚝, 1g 조건에서 압입한 말뚝 그리고 40g 조건에서 압입한 말뚝에 대해 실험을 수행하였으며 실험에서 얻은 말뚝의 동적 p-y 곡선을 통해 설치 방법에 따른 말뚝의 횡방향 거동차이를 분석하였고, 기존 동적 p-y 곡선을 이용하여 말뚝 설치 방법을 고려한 동적 p-y 곡선을 도출하였다.

- (1) 동적 p-y 곡선 산정 결과 압입말뚝의 횡방향 강성이 지반 조성 전 설치 말뚝보다 최대 150% 이상 크게 나타났으며, 이러한 말뚝 설치 방법에 따른 강성차이는 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타냈다.
- (2) 말뚝 설치 조건 별 동적 p-y 중추곡선 비교 결과, 40g 압입말뚝과 1g 압입말뚝의 지반반력계수(K)가 지반 조성전 설치 말뚝 보다 각각 최대 164%, 56% 크게 산정되었으며, 최대 지반반력의 경우, 40g 압입말뚝과 1g 압입 말뚝이 지반 조성전 설치 말뚝보다 각각 최대 70%, 30% 크게 산정되었다.
- (3) 기존 Yoo et al.(2013)이 제안한 동적 p-y 곡선 및 반복하중에 대한 API 곡선을 본 실험의 지반 조성 전 설치 말뚝에 대한 실험결과와 비교한 결과, Yoo et al.(2011)이 제안한 p-y 곡선이 실험 결과를 20% 이내로 예측하며 주변 지반의 변화가 크지 않은 현장 타설 말뚝의 거동을 합리적으로 예측한다고 판단된다.
- (4) 말뚝 설치 방법에 따른 강성증가계수를 말뚝직경에 따른 깊이에 대한 함수로 산정하였으며, 이를 이용하여 현장타설말뚝에 적합한 기존 동적 p-y 곡선(Yoo et al., 2011)을 수정한 압입 및 항타 말뚝에 대한 실험 동적 p-y 곡선을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “연약지반구간 교량대체를 위한 침하억제공법 개발(15RTRP-B067919-03)”과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Yang, E.K., Yoo, M.T., Kim, H.W., and Kim, M.M. (2009), “Dynamic p-y Backbone Curve in Saturated Sand Deposit”, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.11, pp.27-38.
2. Yoo, M.T., Yang, E.K., Kim, H.W., and Kim, M.M. (2009) “Estimation of Dynamic Group Pile Effect in Fine Sand”, *KGS Fall Conference 2009*, CD-Rom.
3. Bonab, MH, Chazelas, JL, and Levacher, D (2007), “Procedures Used for Dynamically Laterally Loaded Pile Tests in a Centrifuge”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No.1, pp.60-68.
4. Dou, H. and Byrne, PM (1996), “Dynamic Response of Single Piles and Soil-pile Interaction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp.80-96.
5. Dyson, GJ and Randolph, MF (1998), “Installation Effects on Lateral Load-transfer Curves in Calcareous Sands”, *Proceedings of the international conference centrifuge 98*, Vol.11, pp.545-550.
6. Kim DS, Kim NR, Choo YW, and Cho GC (2013a), A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea, *KSCE J Civ Eng*, 17 (1):77-84. doi:10.1007/s12205-013-1350-5.
7. Kim DS, Lee SH, Choo YW, and Perdrat J (2013b), Self-balanced earthquake simulator on centrifuge and dynamic performance verification. *KSCE J Civ Eng*, 17 (4):651-661. doi:10.1007/s12205-013-1591-3.
8. Kondner, RL (1963), “Hyperbolic Stress-strain Response:Cohesive soils”, *J. Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, 87(1), pp. 115-144.
9. Korean Society of Civil Engineers (KSCE) (2001), “Bridge Design Criteria of Korea”.
10. Lee SH, Choo YW, and Kim DS (2013), Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44:102-114. doi:10.1016/j.soildyn.2012.09.008/
11. McVay, M, Bloomquist, D, Vandendinde, D, and Clausen, J (1994), “Centrifuge Modeling of Laterally Loaded Pile Groups in Sands”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.2, June 1994, pp.129-137.
12. Ovesen, NK (1979), “The Scaling Law Relationship”, *Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, Vol.4, pp.319-323.
13. Remaud, D. (1999), “Piles Under Lateral Forces: Experimental Study of Piles Group”, *Ph.D. Thesis*, University of Nantes, France, 328.
14. Ting, JM, Kauffman, CR, and Lovicsek, M (1987), “Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile behaviour”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.198-207.
15. 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, Issue 7, pp.1082-1102.

Received: January 7th, 2016

Revised : February 23rd, 2016

Accepted: February 24th, 2016