

원심모형 실험을 이용한 반복하중을 받는 모노파일 거동 평가

Evaluation of Lateral Pile Behavior under Cyclic Loading by Centrifuge Tests

이 명 재 ¹	Lee, Myungjae	유 민 택 ²	Yoo, Mintaek
박 정 준 ³	Park, Jeongjun	민 경 찬 ⁴	Min, Kyungchan

Abstract

This study investigated the lateral behavior of monopile embedded in the dry sand through cyclic lateral loading test using a centrifuge test. The sand sample for the experiment was the dry Jumunjin standard sand at 80% relative density and the friction angle of 38°. In the experimental procedure, firstly, it was determined the static lateral bearing capacity by performing the static lateral loading test to decide the cyclic load. This derived static lateral bearing capacity values of 30%, 50%, 80%, 120% were determined as the cyclic lateral load, and the number of cycle was performed 100 times. Through the results, the experiment cyclic p-y curve was calculated, and the cyclic p-y backbone curve by depth was derived using the derived maximum soil resistance point by the load. The initial slope at the same depth was underestimated than API (1987) p-y curves, and the ultimate soil resistance was overestimated than API (1987) p-y curves. In addition, the result of the comparison with the suggested dynamic p-y curve was that the suggested dynamic p-y curve was overestimated than the cyclic p-y backbone curve on the initial slope and soil resistance at the same depth. It is considered that the p-y curve should be applied differently depending on the loading conditions of the pile.

요 지

본 연구는 원심모형실험을 이용해 건조 사질토 지반에 근입된 모노파일의 수평 반복하중에 대한 거동을 연구하였다. 실험에 사용된 지반 시료는 상대밀도 80%에서 마찰각이 38°인 건조 주문진 표준사를 사용했다. 실험 과정은 우선 반복하중의 크기를 결정하기 위해 정적 하중 실험을 수행하여 극한하중을 결정하였다. 이를 통해 도출된 극한 하중 값의 30%, 50%, 80%, 120%를 반복하중의 값으로 결정하였고, 반복횟수는 100회로 수행되었다. 이 결과를 통해 실험 반복하중 p-y 곡선을 산정하였고 도출된 하중 별 최대 지반반력점들을 이용하여 깊이 별 반복하중 p-y 중추곡선을 도출하였다. 이를 기존 p-y 곡선과 비교 결과, 동일 깊이에서 초기기울기가 API(1987) p-y 곡선보다 과소평가가 되었으며, 극한지반반력은 과대평가되었다. 또한, 동적 p-y 곡선과 비교하였을 때, 동일 깊이에서의 반복하중 p-y 중추곡선의 초기기울기와 지반반력이 작게 평가되었다. 이는 말뚝이 받는 하중 조건에 따라 p-y 곡선을 다르게 적용해야 할 것으로 판단된다.

Keywords : Centrifuge test, Cyclic load, Monopile, Dense sand, Cyclic p-y backbone curve

1 정회원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

2 정회원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5490, thezes03@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

4 비회원, (주)천경기업 팀장 (Team Manager, CHUN KYUNG Industrial Co., Ltd)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현재 수직하중을 받는 말뚝 거동에 대한 연구는 국내 외적으로 많은 연구가 수행되어 있으며, 수평하중에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 외력에 의해 수평하중을 받는 말뚝은 축 하중을 받는 말뚝보다 모멘트를 더 크게 받는다. 이런 이유로 수평하중을 받는 말뚝의 거동 연구가 필요하다. Achmus et al.(2009)은 수치해석을 통해 100~10,000회의 반복하중을 받는 모노파일의 장기 거동을 연구하였다. Møller and Christiansen(2011)은 축소모형을 이용해 모노파일의 정적, 반복하중 실험을 수행하여 이를 수치해석과 비교하였다. Kim et al.(2015)는 SWM(Strain Wedge Model)를 이용해 모노파일에 대해 수평하중을 $1\sim 10^5$ 회 반복 재하하여, 반복횟수가 증가함에 따라 말뚝 두부 변위와 초기기울기에 대해서 연구하였다. Peralta(2010)는 상대밀도 40%와 60%인 사질토에서 직경 60mm인 말뚝에 대해 한 방향 반복하중 실험을 수행하였다. 다양한 하중 크기를 이용하였으며, 반복 횟수는 10,000회를 실시하였다. Roesen et al.(2012)은 상대밀도 78%와 87%인 사질토 지반에서 직경 60mm인 말뚝을 이용하여 반복하중 실험을 수행하였으며, 반복 횟수는 46,000회를 적용하였다. Gerber and Rollins(2008)은 직경 324mm인 강재 말뚝에 대해 반복하중 실험을 수행하여 p-y 곡선을 도출하였다. Fan and Long(2005)은 p-y 곡선이 말뚝 직경 변화에 의한 영향을 연구하였으며, 말뚝 직경에 따른 영향은 미미한 것으로 보고하였다. 말뚝의 횡방향 지지거동을 분석하는데 p-y 곡선을 사용하고 있다. 여기서 p는 지반반력, y는 말뚝의 변위를 의미한다. 현재 보편적으로 사용하고 있는 p-y 곡선은 API 방법(1987)으로, 점토(Matlock, 1970) 및 사질토(Cox et al., 1974)에서의 정적, 반복하중 실험결과를 활용하여 제안된 p-y 곡선 결정법이다. 이 외에도 p-y 곡선의 종류는 Reese(1974) p-y 곡선과 NCHRP(2001) p-y 곡선 등이 있다. 그러나 이런 p-y곡선들은 주로 직경 1m 이하의 소구경 말뚝에 대한 실험들의 결과를 바탕으로 제안되었기 때문에, 풍력터빈의 기초구조물과 같은 대구경 말뚝의 지지거동을 예측하는 데에는 한계가 있다. 또한, 1g 중력장 상태에서의 축소모형 실험은 말뚝의 원형 형상만을 상사관계에 맞춰 실험을 수행하였기 때문에, 실제 지반 자중에 의한 응력변형 거동이 원지반과 다른 거동을 나타내는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 원심모형실험을 통한 여러 연구가 이루어졌다. Choo and

Kim(2015)은 직경이 6m인 말뚝의 거동에 대해 한방향 반복하중을 적용해 실험을 수행하였다. 그 결과 기존의 p-y 곡선 방법보다 초기지반반력계수와 극한지반반력이 작게 평가된다는 것을 보고하였다. Haigh and Bolton(2010)은 원심모형실험으로 반복수평하중에 대한 모노파일의 secant stiffness의 영향을 분석하였다. Yoo et al.(2013)는 원심모형실험을 이용해 건조사질토에 관입된 모형알루미늄말뚝을 진동대 실험으로부터 동적 p-y 곡선을 제안하였다. 그러나 동적 p-y 곡선은 진동대를 이용해 지진하중에 의해 도출된 결과이므로 말뚝 상부에 작용하는 반복하중에 대한 설계에 있어 사용하기에는 한계가 있다.

이런 많은 연구에도 불구하고, 횡방향 하중을 받는 말뚝에 일관성 있는 결과들이 부족한 실정이며, 대구경 말뚝에 적용하기에는 어렵다. 이에 본 연구는 원심모형 실험을 통해 건조사질토에 관입된 양방향 반복하중을 받은 모노파일의 거동을 분석하였다. 모노파일은 상사비를 적용했을 시 직경이 3.3m이고 반복하중은 말뚝 두부에 가했다. 실험을 통해 반복하중 p-y 중추곡선을 도출하였고, 기존의 p-y 곡선과 비교하였다.

2. 원심모형실험 조건

원심모형실험은 대우건설기술연구소의 원심모형실험기를 이용해 수행하였으며, 원심모형실험기는 회전반경 3m, 11.76kN의 무게로 100g의 원심가속도까지 가속할 수 있다. 또한, 원심모형실험기 위에 놓인 토조는 최대 하중 가속도를 모형 기준으로 94.2g로 수행하였으며, 반복하중실험에 사용된 주파수는 0.125Hz로 입력하였다. 실험에 사용된 토조의 재질은 바닥과 세 옆면이 알루미늄합금으로 제작됐다. 앞면은 플라스틱 재질의 4cm 두께인 판으로 구성되었고 이를 통해 지반의 상태를 볼 수 있게 제작하였다. 정적 하중 실험에 사용한 토조 크기는 길이 80cm, 폭 20cm, 높이 50cm이며, 반복하중실험에 사용된 토조 크기는 길이 80cm, 폭 60cm, 높이 50cm이다. Fig. 1은 실험에 사용된 토조 전경이다.

2.1 지반 물성치 및 말뚝 제원

지반 구성에 사용된 모래는 통일분류법(USCS)으로 SP로 분류되는 주문진 표준사를 사용했다. 주문진 표준사의 입도 분포 곡선은 Fig. 2와 같다. 원심모형실험에



Fig. 1. Soil box (a) Static loading test, (b) Cyclic loading test

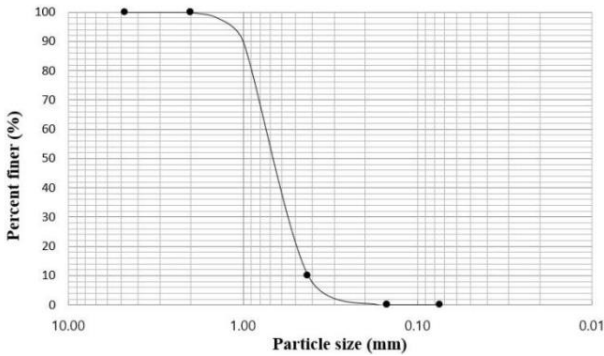


Fig. 2. Jumunjin sand particle size distribution

Table 1. Properties of soil

USCS	SP
Maximum unit weight (kN/m^3)	16.6
Minimum unit weight (kN/m^3)	13.3
Coefficient of uniformity (C_u)	1.68
Specific gravity (G_s)	2.65
Relative density (%)	80
Friction angle ($^\circ$)	38

서는 입자 크기 영향의 고려도 중요하다. Ovesen(1979)은 말뚝 직경이 유효 입경의 30배 이상이면 원심모형시험에서의 시료 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다고 보고했다. 본 연구에서 사용된 말뚝 직경은 주문진표준사의 유효 입경보다 약 87배 크기 때문에 입자 크기에 영향이 없는 것으로 판단하였다. 시험에 사용된 주문진 표준사의 비중(G_s)은 2.65이며, 최대건조단위중량은 16.6kN/m^3 , 최소건조단위중량은 13.3kN/m^3 으로 측정되었다. 내부 마찰각은 직접전단시험을 통해 상대밀도가 80%일 때 38° 로 측정되었다. Table 1은 주문진표준사의 물성치이다.

시험에 사용된 말뚝의 재질은 탄성계수가 70GPa 인 알루미늄으로 제작된 모형 모노파일이다. 모형 모노파일의 길이는 639mm 이며, 외경과 내경은 각각 35mm , 29mm , 그리고 두께가 3mm 인 알루미늄관으로 제작되었다. 모형 모노파일의 근입깊이는 424mm 이다. 시험은 중력가속도 $94.2g$ 로 수행했기 때문에, 모형 모노파일을 원형스케일로 환산하였을 때 근입깊이 40m , 총 길이 60m , 외경과 내경은 각각 3.3m , 2.7m 인 강재 모노파일로 모사하였다. 말뚝 제원은 Table 2와 같다.

2.2 정적 하중 시험(Static loading test)

Fig. 3은 계측기를 포함한 시험의 단면이다. 깊이에 따른 말뚝 거동을 분석하기 위해 지표면에서 깊이 약 0 ,

Table 2. Pile specification

Classification	Model pile	Scale factor	Prototype pile
Material	Aluminum	n/a	Steel
Pile length (m)	0.639	λ	60
Embedment depth (m)	0.424	λ	40
Outer diameter (m)	0.035	λ	3.3
Elastic modulus (GPa)	70	1	210
Moment of Inertia (m^4)	3.89×10^{-8}	λ^4	1.02
Flexural rigidity ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	2.73	λ^4	2.15×10^8
Load (N)	1.0	λ^2	8,873.6

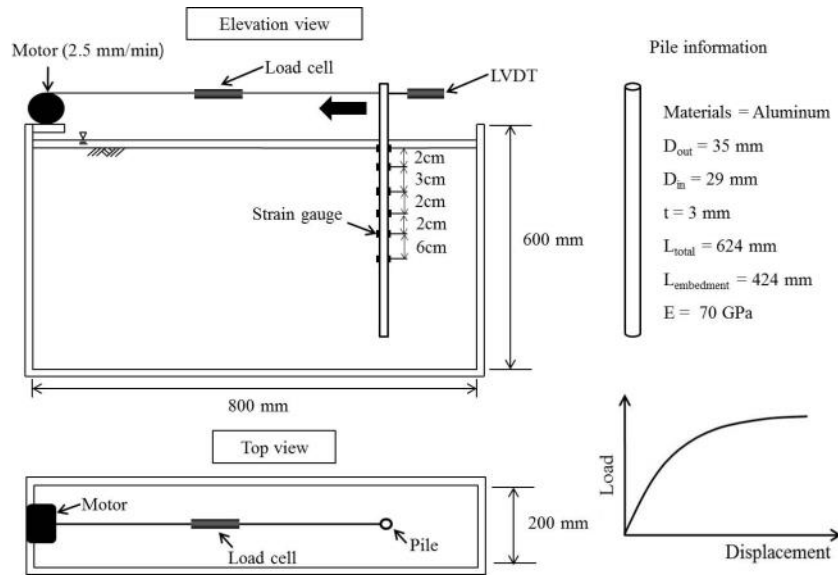


Fig. 3. Static loading test cross section diagram

Table 3. Static loading test conditions (Prototype scale)

Test	Penetration depth (m)	Motor speed (mm/min)	Relative density (%)
Static loading test	40	2.5	80

2, 5, 7, 9, 15m로 말뚝 양쪽에 변형률계(Strain gauge)를 총 12곳 부착하였다. 실험은 모형 말뚝 상부에 LVDT (Linear variable Differential Transformer)와 하중계(Load cell)를 설치하여 말뚝 두부에서 변위와 하중을 측정하였다. 실험 방법은 와이어를 모터와 모형모노파일 두부에 연결하여 당기는 형식으로 수행하였으며, 일정한 속도(2.5mm/min)로 변위를 제어하였다. 지반 경계면의 영향을 고려하여 모노파일이 재하되는 방향으로는 말뚝지름의 10배 이상의 간격을 확보하였다. 이는 말뚝 직경의 10배 이상에서 서로 영향을 주지 않는다는 Remaud(1999)의 연구에 만족한다. 지반의 상대밀도는

균질한 지반을 조성하기 위해 강사 장치를 이용해 80%로 조성하였다. Table 3에는 정적 하중 실험조건을 정리하였다.

2.3 반복하중 실험(Cyclic loading test)

반복하중 시스템은 Peng et al.(2006)이 연구한 시스템을 토대로 고안하였다. Peng et al.(2006)이 사용한 반복하중 시스템은 1g에서만 수행할 수 있게 설계되었기 때문에 ng 상태에서는 내구성이 떨어진다. 그러므로 본 실험에서 사용된 반복하중 시스템은 Fig. 4와 같이 원심

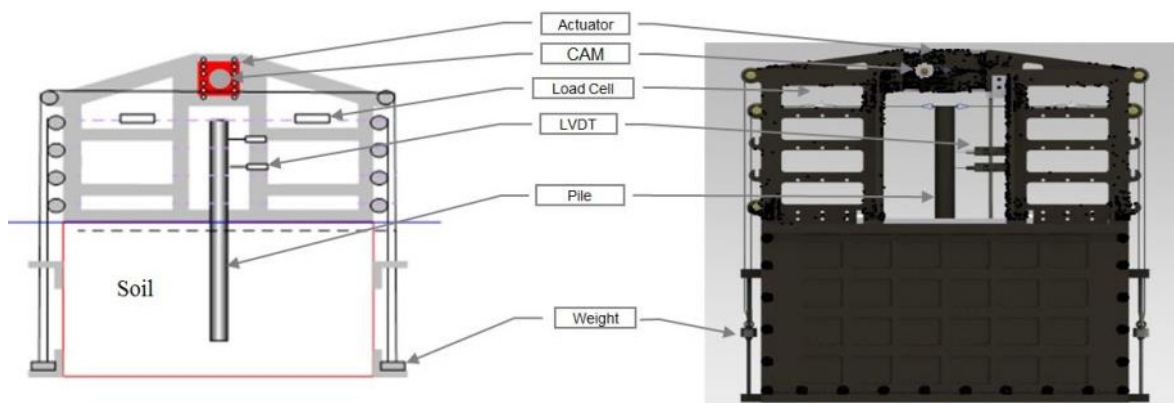


Fig. 4. Cyclic loading system

모형실험에서 중력가속도를 견딜 수 있게 개선하였으며, 실제 지반 응력을 모사 할 수 있게 됐다. 원심모형실험용 반복하중 시스템은 양측에 달린 무게추의 무게를 독립적으로 조절하여 양방향으로 다양한 하중을 재하할 수 있고 캠 방식을 사용하여 캠의 원 운동에 따라 회전속도와 반복 주기를 조절할 수 있다.

Fig. 5는 반복하중 실험에 사용된 계측기를 포함한 단면도이다. 정적 하중 실험과 같은 깊이에 말뚝 거동을 분석하기 위해 변형률계(Strain gauge)를 매설 깊이 0, 2, 5, 7, 9, 15, 20 그리고 25m에 양쪽으로 총 16곳 깊이에 부착하였다. 실험은 모형 모노파일 두부에 LVDT (Linear Variable Differential Transducer)와 하중계(Load cell)를 각각 2개소 설치하여 반복수평하중과 변위를 측정하였다. 이때에도 지반의 경계면 영향을 줄이기 위해서 토조와 말뚝 이격을 말뚝 직경의 10배 이상으로 했다. Table 4에는 반복하중 실험조건을 정리하였다. ‘C’는 반복하중실험, ‘80’은 지반의 상대밀도(%), ‘1416’은

94.2g 상태에서의 반복수평하중(kN)의 크기를 의미한다. 반복하중실험의 지반 조성은 강사 장치를 이용해 80%로 조성하였다. 반복하중 주기는 0.125Hz로 8초 동안 캠의 원운동이 1회로 운동하도록 설정하였다. 반복하중의 크기는 정적하중 실험에서 구한 극한하중을 이용해 극한하중의 30%, 50%, 80%, 120%로 총 4 가지의 하중을 산정하여 실험을 수행하였다.

3. 원심모형실험 결과

정적 하중 실험을 통해 극한 하중을 산정하였다. 극한하중은 Fleming et al.(1992)이 제안한 말뚝직경 10%에서 대한 변위에서 구했으며, 그 결과 4,722kN으로 결정됐다(Fig. 6). 이를 통해 반복하중 실험에 적용될 반복하중을 계산하였다. 지금부터 제시되는 시험 결과들은 Table 1에 정리된 상사비를 적용하여 나타냈다.

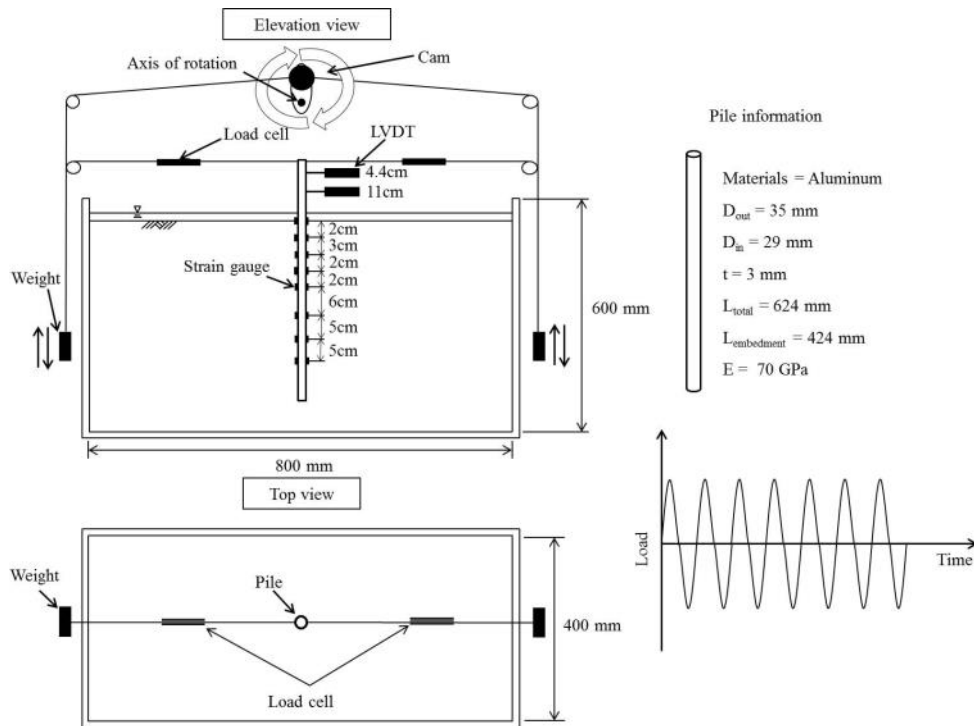


Fig. 5. Cyclic loading test cross section diagram

Table 4. Cyclic loading test conditions (Prototype scale)

Case	Embedment depth (m)	Load (kN)	Frequency (Hz)	Relative density (%)
C-1416	40	1,416	0.125	80
C-2361		2,361		
C-3777		3,777		
C-5666		5,666		

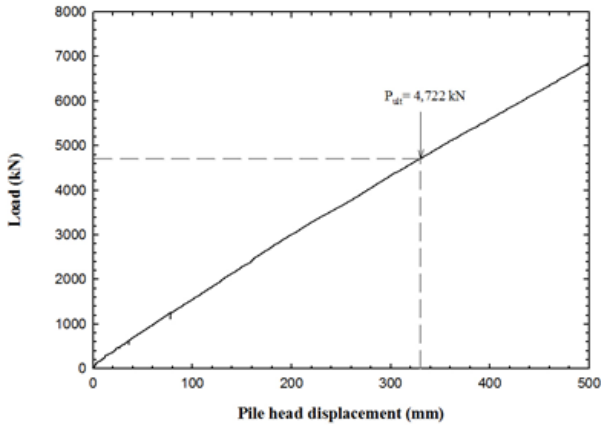


Fig. 6. Load-pile displacement curve

3.1 p-y 곡선 작성 방법

각 깊이마다 말뚝의 양 옆에 부착한 변형률계를 통해 측정된 변형률(ϵ)의 평균 값을 이용하여 말뚝 깊이 별 모멘트를 구하여 분포 곡선을 도출하였다. 이를 식 (1)과 같이 빔 이론 식을 이용해 지반반력, p 와 말뚝의 변위, y 를 산정하였다. 깊이 별 측정된 모멘트는 cubic spline 보간법을 적용하여 구하였다(Dou and Byrne, 1996).

지반반력 p 를 구하기 위해선 깊이에 따른 모멘트 곡선을 2번 미분하여야 하며, 말뚝의 변위 y 를 구하기 위해선 모멘트를 말뚝의 휨 강성으로 나누어 2번 적분하여 구하여야 한다.

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

여기서, p : 지반반력(kN/m), y : 말뚝 변위(m), EI : 말뚝의 휨강성(kN·m²), $M(z)$: 깊이에 따른 모멘트 분포 곡선(kN·m)

3.2 실험 반복하중 p-y 곡선 결과

깊이에 따라 매설된 변형률계의 측정된 값으로 깊이 별 반복하중 p-y 곡선을 도출하였다. Fig. 7은 식 (1)로 도출된 깊이 2m에서의 실험 반복하중 p-y 곡선을 나타냈다. 반복하중 횟수가 증가할수록 실험 p-y 곡선의 지반반력은 증가하고 말뚝 변위는 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 모든 깊이에서 동일하게 확인됐다. 하중이 작용하는 말뚝 전면부에서는 반복하중에 의해 재하와 제하가 발생하며, 제하 시에 발생한

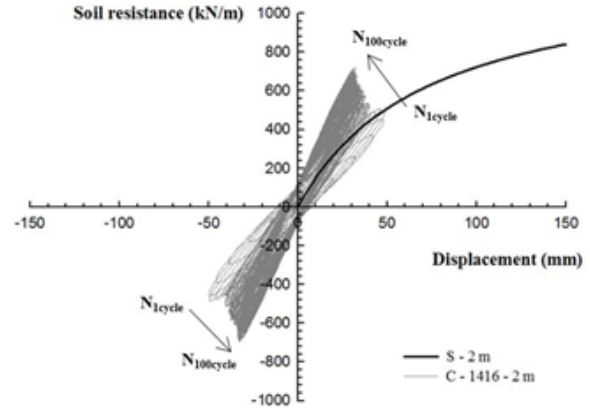


Fig. 7. Comparison of static p-y curve with the cyclic p-y curves at 2 m depth

말뚝과 지반의 틈새에 주변의 모래가 채워지게 된다. 이로 인해 반복하중이 재하 될수록 말뚝 인접 지반이 조밀해지는 현상이 발생하게 되고, 이는 지반반력 증가 및 변위 감소를 유발하게 된다. 이런 현상은 Møller and Christiansen(2011), Qin and Guo(2016), 그리고 Rosquoet et al.(2007)에서도 유사한 연구결과가 보고된 바 있다. 또한 정적 p-y 곡선과 초기 반복하중 재하에서의 실험 반복하중 p-y 곡선을 비교하면 유사한 거동이 나타났다. 그러나 반복횟수가 증가할수록 실험 반복하중 p-y 곡선의 지반반력이 정적 p-y 곡선보다 커지는 것으로 분석됐다. 이는 앞선 설명과 같이 반복횟수가 증가할수록 말뚝 인접 지반이 조밀해지는 현상으로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 반복하중 시에 100번째 반복횟수에 대한 p-y 곡선을 깊이별로 나타낸 결과이다. 이 결과 깊이가 깊어짐에 따라 변위는 감소하고, 지반반력이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 실제 지반에서 깊이가 깊어질

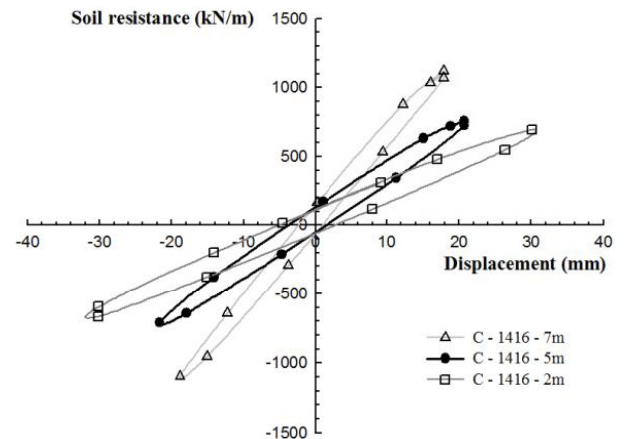


Fig. 8. $N_{cycle} = 100$, experimental cyclic p-y curve

수록 강도가 커지는 경향과 일치하는 것으로 분석됐다.

Fig. 9는 깊이 2, 5, 7m에 따른 하중별 반복하중 p-y 곡선을 나타낸 것이다. 반복하중은 총 4가지로 재하 하였으며, 100번째 반복횟수에 대한 결과를 도출하였다. 반복하중 증가에 따라 말뚝의 변위와 지반반력이 증가하는 경향이 분석되었다. 또한, 깊이가 깊어질수록 초기 기울기와 지반반력이 증가하였다. 극한하중의 30%와 50%에서는 지반반력계수가 일정한 것으로 변화가 없어 보였지만 극한하중의 120%에서는 지반반력계수가 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 극한하중보다 더 큰 반복하중에 의해 지반이 파괴되어 지반반력계수가 감소

하는 것으로 분석됐다.

7m 보다 깊은 깊이에서 실험결과들은 분석에서 제외하였다. 그 이유로는 더 깊은 깊이에서는 지반반력과 말뚝의 변위에 의미 있는 변화가 없었기 때문이다. 실험에 사용된 말뚝은 Broms(1964)에 의해 긴 말뚝에 해당되며, 반복하중에 의해 7m 이상의 깊이에서는 말뚝에 대한 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

4. 분석 및 고찰

4.1 반복하중 p-y 중추곡선 도출

본 연구는 풍력기초에서 사용되고 있는 대구경 모노파일에 대한 반복하중 p-y 곡선으로부터 반복하중에 대한 깊이별 반복하중 p-y 중추곡선을 도출하였다. 반복하중 p-y 곡선의 산정 방식은 실험으로 구한 하중 크기별 최대 지반반력 점들을 산정하고, 이 점들을 쌍곡선 식으로 외삽하여 반복하중 p-y 곡선을 도출하였다(Ting et al., 1987; Yang et al., 2009, Yoo et al., 2013). 중추곡선을 도출하는데 사용된 쌍곡선 식은 Kondner(1963)가 제안한 식 (2)의 쌍곡선 식을 이용하였다.

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

여기서, p_u 는 극한지반반력(kN/m), k_{ini} 는 초기지반반력계수(kN/m³), y 는 말뚝의 변위(m)

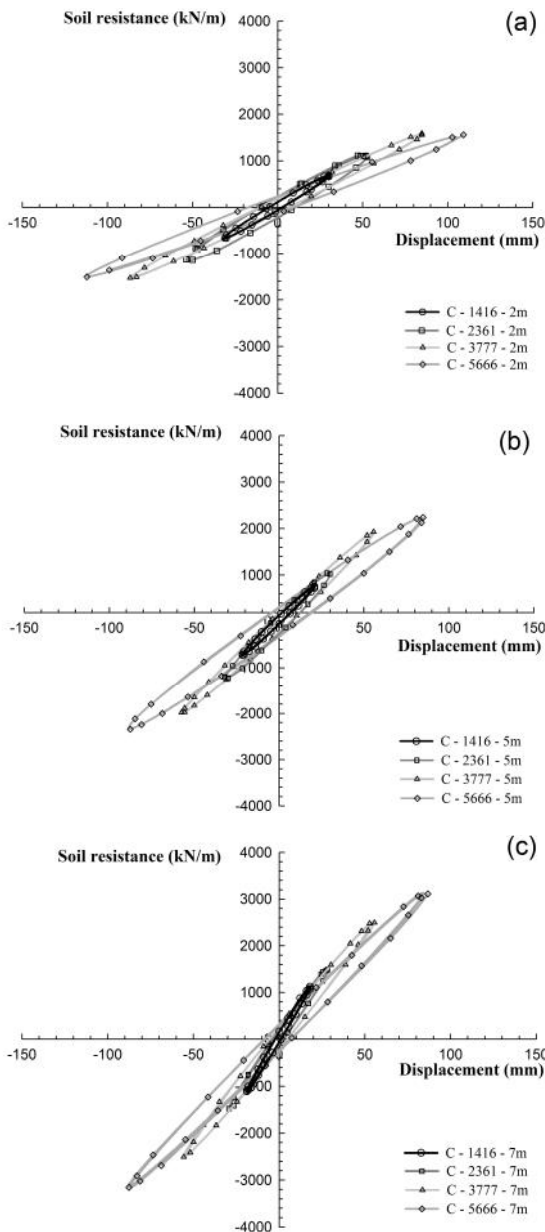


Fig. 9. Cyclic p-y curve by load (a) depth = 2 m, (b) depth = 5 m, (c) depth = 7 m

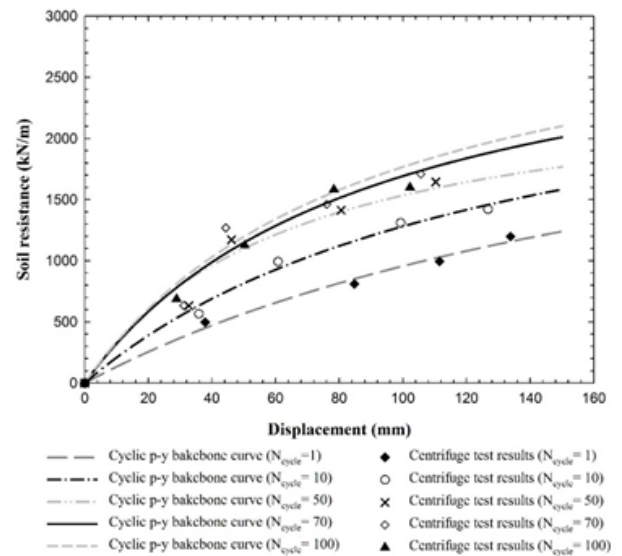


Fig. 10. Cyclic p-y backbone curve with cycle number at depth of 2 m

Fig. 10은 깊이 2m에서 반복횟수에 따른 반복하중 p-y 중추곡선이다. 반복횟수는 1, 10, 50, 70 그리고 100회 일 때의 값으로 반복하중 p-y 중추곡선을 도출하였다. 반복횟수가 증가할수록 반복횟수별 반복하중 p-y 곡선의 형태는 반복횟수가 100회일 때 반복하중 p-y 곡선으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 반복횟수가 100회일 때 지반반력을 최대지반반력으로 가정하였다.

반복하중 p-y 중추곡선의 경우 제하-재제하 횟수에 따라 지반반력이 증가하는 경향이 나타났으며, 말뚝의 장기거동을 파악하기 위해 지반반력과 변위가 수렴하는 100번째 반복횟수를 적용하는 것이 타당하다고 판단되어 최종적으로 Fig. 11과 같이 중추곡선을 제시하였다.

4.2 하중 조건에 따른 p-y 곡선 비교

일련의 실험을 통해 도출된 정적 p-y 곡선 및 반복하중 p-y 중추곡선을 기존에 사용되고 있는 API(1987) 방

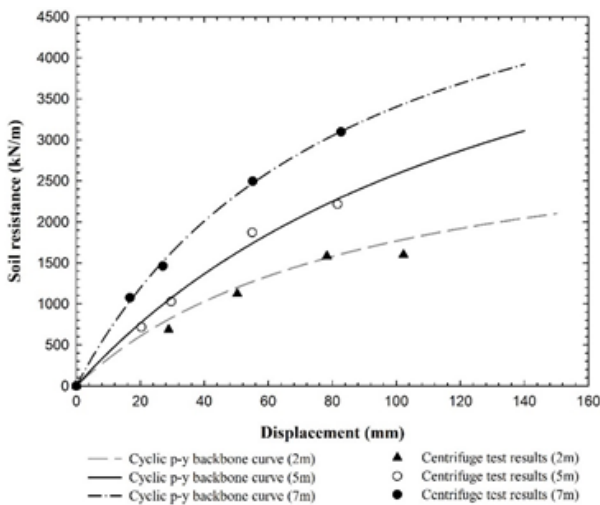


Fig. 11. $N_{cycle} = 100$, cyclic p-y backbone curve

법과 Yoo et al.(2013)이 제안한 동적 p-y 곡선과 비교하였다. 동적 p-y 곡선 식은 진동대 실험을 통해 말뚝 직경, 상대밀도, 입력 가속도 진폭 및 주파수를 변수로 하였으며, 단말뚝에 대해 원심모형실험을 수행하여 제안하였다. 제안한 동적 p-y 곡선 식은 다음 Table 5와 같이 정리하였다.

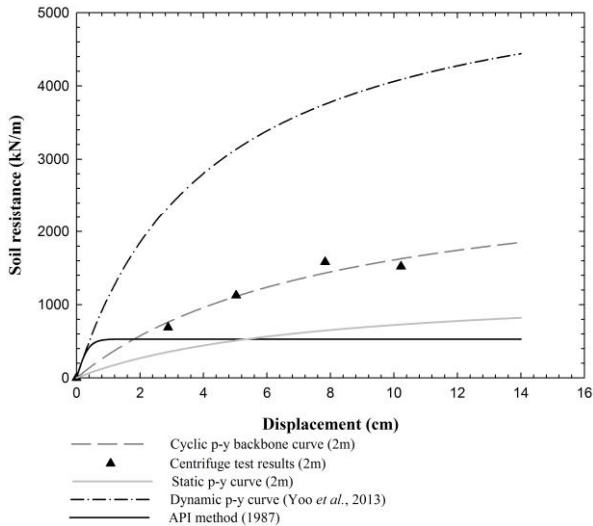
Fig. 12는 상대밀도 80%에서 도출된 정적 p-y 곡선 및 반복하중 p-y 중추곡선을 기존 API 반복하중 p-y 곡선 및 Yoo et al.(2013)이 제안한 동적 p-y 곡선을 각각 깊이 2, 5, 7m에 대해 비교하였다.

정적 p-y 곡선과 반복하중 p-y 곡선 비교하면 반복하중 p-y 곡선이 정적 p-y 곡선보다 초기 기울기와 지반반력이 크게 평가된다. 이는 앞선 설명과 같이 반복하중의 제하-재제하로 인해 말뚝 인접 지반이 조밀해지는 현상에 의한 것으로 분석되며, 하중 조건에 따라 지반 변형 차이가 발생하고 이로 인해 지반-말뚝 상호작용이 변화하는 것을 의미한다.

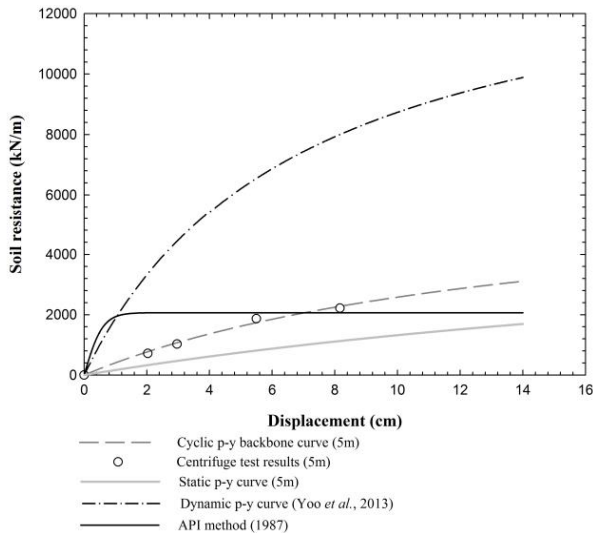
API 반복하중 p-y 곡선과 반복하중 p-y 곡선을 비교하면 API 반복하중 p-y 곡선의 초기 기울기가 실험결과를 과대평가하고 있으며, 극한 지반반력은 과소평가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 극한 지반 반력의 경우 깊이에 따라 깊이 2m에서는 말뚝 직경의 0.5% 변위 수준에서부터, 깊이 7m에서는 말뚝 직경의 3.5% 변위 수준에서부터 API 반복하중 p-y 곡선이 지반 반력을 과소평가하였다. 이는 말뚝의 탄성 변형영역이 1%(Bridge design criteria, 2008)인 것을 고려하면, 얕은 깊이에서는 탄성 영역에서부터 지반 반력을 과소평가하고 있음을 의미한다. 이런 차이가 발생한 원인은 API 방법의 경우 정적 실험으로부터 구한 극한 지반반력에 깊이에 따른 감소계수를 0.9로 일정하게 적용하고 있으며, 특히 대구경 말뚝에서는 초기 기울기가 과대평가되고 있기 때문이다(Choo and Kim, 2015; Finn and Dowling, 2015; Alderlieste, 2011; Yoo and Kwon, 2018). 또한 API 방법

Table 5. Suggested dynamic p-y backbone curve by dynamic centrifuge test (Yoo et al., 2013)

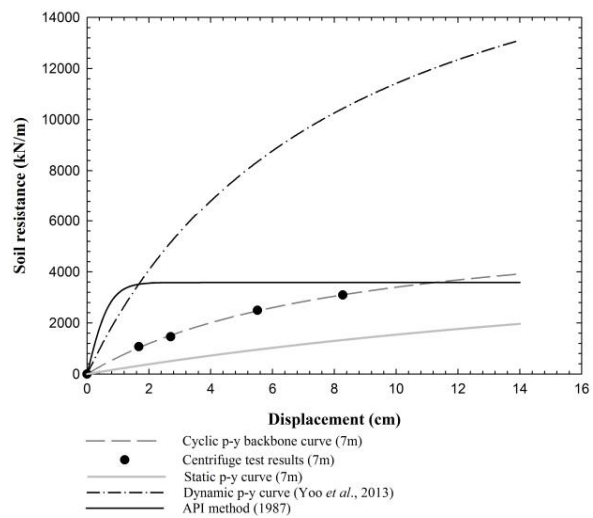
Dynamic p-y backbone curve	$p = \frac{1}{\frac{p_u}{k_{mi}} + \frac{y}{p_u}}$	$k_{mi} = \frac{kp_u}{p_u - K\frac{D}{100}}$
	The initial modulus of subgrade reaction	The ultimated subgrade reaction
Loose sand	$K = 4.26DP_a \left(\frac{\sigma'_a}{P_a}\right)^{0.5}$	$p_u = 12.5DK_p\gamma'z^{0.90}$
Dense sand	$K = 7.29DP_a \left(\frac{\sigma'_a}{P_a}\right)^{0.5}$	$p_u = 13.3DK_p\gamma'z^{1.02}$



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Comparison with preceded p-y curve (API p-y curve, dynamic p-y curve (Yoo et al., 2013) (a) Depth = 2 m, (b) Depth = 5 m, (c) Depth = 7 m

은 초기기울기가 깊이별로 선형으로 증가하지만, 실제 지반은 깊이에 따라 비선형으로 증가하는 경향을 고려해야한다(Lesny and Wienmann, 2006).

동적 p-y 곡선과 비교한 결과, 동적 p-y 곡선의 지반 반력과 초기기울기가 반복하중 p-y 곡선보다 크게 평가되었다. 이는 하중 조건의 차이로 인한 이유라 판단된다. 반복하중의 경우 가해진 하중이 말뚝 두부에 작용하였지만, 동적하중의 경우 지반의 진동에 의해 하중이 말뚝 두부가 아닌 말뚝 전체에 작용하였기 때문이다. 이를 토대로 내진설계 시 반복하중 p-y 곡선을 적용하게 된다면 과다 설계를 초래할 것으로 사료된다.

일련의 결과를 바탕으로 하중 조건에 따른 p-y 곡선 거동의 차이가 크게 발생한다는 것을 확인 할 수 있었다. 설계 시에 하중 조건을 고려하여 p-y 곡선을 적용하는 것이 필수적이라고 판단되며, 합리적인 적용이 이루어지지 않을 경우 설계에 있어 과대평가 혹은 과소 평가의 우려가 있을 것으로 생각된다.

5. 결 과

본 연구는 상대밀도 80%인 건조 사질토에 근입한 모형모노파일에 대한 수평거동을 원심모형실험기를 이용하여 실험을 수행하였다. 정적 하중 실험을 통해 극한하중을 산정하였고 이를 통해 반복 하중 실험을 수행하여 반복하중 p-y 중추곡선을 도출하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 실험 반복하중 p-y 곡선은 반복횟수가 증가함에 따라 말뚝 주변 지반이 조밀해지는 현상으로 인해 지반반력이 증가함에 따라 변위가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 최대지반반력은 100번째 반복횟수에서 수렴하는 것으로 가정하여, 최대지반반력 점들을 이용해 Kondner(1963)가 제안한 쌍곡선 함수로 반복하중 p-y 중추곡선을 도출했다.
- (2) API 반복하중 p-y 곡선과 반복하중 p-y 곡선을 비교하면 API p-y 곡선의 초기 기울기가 실험 결과를 과대평가하고 있으며, 극한 지반반력은 과소평가하는 것을 확인 할 수 있다. 특히 극한 지반 반력의 경우 깊이에 따라 깊이 2m에서는 말뚝 직경의 0.5% 변위 수준에서부터, 깊이 7m에서는 말뚝 직경의 3.5% 변위 수준에서부터 API p-y 곡선이 지반 반력을 과소 평가하였다. 이는 말뚝의 탄성 변형영역이 1%(Bridge

design criteria, 2008)인 것을 고려하면, 얇은 깊이에서는 탄성 영역에서부터 지반 반력을 과소평가하고 있음을 의미하며, 위험측 설계를 야기할 수 있다.

- (3) Yoo et al.(2013)이 제안한 동적 p-y 곡선과의 비교 결과, 동일 깊이에서 동적 p-y 곡선의 초기기울기와 극한지반반력이 크게 평가됐다. 이런 차이는 하중 조건에 따라 발생하는 것으로 분석된다. 반복하중의 경우 말뚝 두부에 하중이 작용되지만, 동적 하중의 경우 지반의 진동으로 인해 말뚝 전체에 하중이 작용되기 때문이다. 이 결과, 말뚝에 작용하는 하중 형태를 고려하여 동적 p-y 곡선과 반복하중 p-y 곡선을 다르게 사용해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업(PK1903A4) 및 국토교통부 교통물류연구사업(18TLRP-B134108-02)의 연구비지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- Achmus, M., Kuo, Y. S., and Abdel-Rahman, K. (2009), "Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral Load", *Computers and Geotechnics*, Vol.36, No.5, pp.725-735.
- Alderlieste, E. A. (2011), "Experimental Modelling of Lateral Loads on Large Diameter Mono-Pile Foundations in Sand", Master's thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherland.
- American Petroleum Institute (API), (1987), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition.
- Barton, Y., Finn, W., Parry, R., and Towhata, I. (1983), "Lateral Pile Response and Py Curves from Centrifuge Tests", Offshore Technology Conference.
- Choo, Y. W. and Kim, D. (2015), "Experimental Development of the p-y Relationship for Large-Diameter Offshore Monopiles in Sands: Centrifuge Tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.1, 04015058.
- Cox, W. R., Reese, L. C., and Grubbs, B. R. (1974), "Field testing of laterally loaded piles in sand", Offshore Technology Conference.
- 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.
- Fan, C. C. and Long, J. H. (2005), "Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand", *Computers and Geotechnics*, Vol.32, No.4, pp.274-289.
- Finn, W. L. and Dowling, J. (2015), "Modelling Effects of Pile Diameter", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53, No.1, pp.173-178.
- Gerber, T. M. and Rollins, K. M. (2008), "Cyclic py curves for a pile in cohesive soil", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, pp.1-10.
- Kim, K., Nam, B. H., and Youn, H. (2015), "Effect of Cyclic Loading on the Lateral Behavior of Offshore Monopiles Using the Strain Wedge Model", *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Korean Society of Civil Engineers (2008), "Bridge Design Criteria", p.750 (in Korean)
- Kondner, R. L. (1963), "Hyperbolic Stress-strain Response: Cohesive Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.89, No.1, pp.115-144.
- Lesny, K. and Wiemann, J. (2006), "Finite element modelling of large diameter monopiles for offshore wind energy converters", *Geo Congress*.
- Li, Z., Haigh, S., and Bolton, M. (2010), "Centrifuge Modelling of Mono-pile under Cyclic Lateral Loads", *Physical Modelling in Geotechnics*, pp.965-970.
- Møller, I. F. and Christiansen, T. (2011), "Laterally Loaded Monopile in Dry and Saturated Sand—Static and Cyclic Loading", Master Project, June.
- Matlock, H. (1970), "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Offshore Technology in Civil Engineering's Hall of Fame Papers from the Early Years*, pp.77-94.
- Ovesen, N. K. (1979), "The Scaling Law Relationship", *Proceedings of the 7th European conference on soil mechanics and foundation engineering*, 4, pp.319-323.
- Peng, J. R., Clarke, B., and Rouainia, M. (2006), "A Device to Cyclic Lateral Loaded Model Piles", *Geotech. Test. J.*, Vol.29, No.4, pp.1-7.
- Peralta, P. (2010), "Investigations on the Behavior of Large Diameter Piles under Long-Term Lateral Cyclic Loading in Cohesionless Soil", Ph. D thesis, Leibniz University, Germany.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, pp.95-105.
- Remaud, D. (1999), "Piles under lateral forces: experimental study of piles group", University of Nantes, France.
- Ting, J. M., Kauffman, C. R., and Lovicsek, M. (1987), "Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile behaviour", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, No.2, pp.198-207.
- Yang, E. K., Jeong, S. S., Kim, J. H., and Kim, M. M. (2009), "Dynamic P-Y Backbone Curves from 1-G Shaking Table Tests", Proc 88th Transport Res Board Ann Mtg, Washington DC, CD-ROM.
- 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, No.7, pp.1082-1102.
- Yoo, M. T. and Kwon, S. Y. (2018), "Comparison of Lateral Pile behavior under Static and Dynamic Loading by Centrifuge Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.7, pp. 51-58.

Received : May 7th, 2019

Revised : May 21st, 2019

Accepted : May 26th, 2019