

조밀한 포화 실트질 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 p - y 거동 평가

Assessment of p - y Behaviors of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Saturated Dense Silty Sand

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 최 창 호² Choi, Changho
조 진 우³ Cho, Jinwoo 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Piles that support offshore wind turbine structures are dominantly subjected to cyclic lateral loads of wind, waves, and tidal forces. For a successful design, it is imperative to investigate the behavior of the cyclic laterally loaded piles; the p - y curve method, in which the pile and soil are characterized as an elastic beam and nonlinear springs, respectively, has been typically utilized. In this study, model pile tests were performed in a 1 g gravitational field so as to investigate the p - y behaviors of cyclic laterally loaded piles installed in saturated dense silty sand. Test results showed that cyclic lateral loads gradually reduced the overall stiffness of the p - y curves (initial stiffness and ultimate soil reaction). This is because the cyclic lateral loads disturbed the surrounding soil, which led to the decrement of the soil resistance. The decrement effects of the overall stiffness of the p - y curves became more apparent as the magnitude of cyclic lateral load increased and approached the soil surface. From the test results, the cyclic p - y curve was developed using a p - y backbone curve method. Pseudo-static analysis was also performed with the developed cyclic p - y curve, confirming that it was able to properly predict the behaviors of cyclic laterally loaded pile installed in saturated dense silty sand.

요 지

해상풍력 구조물을 지지하는 말뚝기초는 바람, 파랑, 조류 등에 의한 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는다. 해상풍력 구조물의 안정적인 성능확보를 위해서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 지지거동을 적절히 평가해 설계에 적용할 필요가 있으며, 말뚝 및 지반을 각각 탄성빔과 비선형 스프링으로 가정하는 p - y 곡선방법이 가장 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 조밀한 포화 실트질 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 p - y 거동을 평가하기 위해서, 1g 모형말뚝시험을 수행했다. 모형시험 결과, 말뚝에 횡방향 반복하중 재하 시 p - y 곡선의 강성(초기 기울기 및 최대지반반력)이 점차 감소했다. p - y 곡선의 강성감소는 반복하중의 크기가 크고 지표면에 가까운 위치에서 더 명확하게 나타났는데, 상기조건에서 말뚝 주변지반의 교란효과가 크게 발생해 지반의 지지능력이 더욱 크게 감소했기 때문이다. 모형시험 결과를 활용해 조밀한 포화 실트질 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초

1 정회원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)
2 정회원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech., Tel: +82-31-910-0785, Fax: +82-31-910-0031, chchoi@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정회원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)
4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Seoul National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 p - y 곡선을 제안했다. 등가정적해석을 통해 예측된 말뚝거동을 모형시험결과와 비교한 결과, 제안된 식을 통해 비교적 조밀하고 포화된 실트질 모래지반에서 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 지지거동을 적절히 평가할 수 있음을 확인했다.

Keywords : Cyclic lateral load, Dense silty sand, Model pile test, Offshore pile foundation, p - y curve

1. 서론

최근 해상풍력발전 단지개발 프로젝트가 서남해안 및 제주 해역을 중심으로 진행 중에 있으며, 대형 해상 풍력터빈을 지지하기 위한 지지구조물(substructure)에 대한 연구가 다양하게 진행 중에 있다. 해상풍력 구조물의 경우 자중에 의한 연직하중은 비교적 작은 반면, 바람, 파랑, 조류 등에 의한 횡방향 반복하중이 지배적이다. 따라서 해상풍력 구조물의 안정적인 성능확보를 위해서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 횡방향 지지거동을 평가하여 이를 지배적인 설계인자로 활용할 필요가 있다.

말뚝의 횡방향 지지거동을 평가하기 위한 다양한 방법 중, 지반-말뚝 사이에서 발생하는 지반반력(p)과 변위(y) 관계를 깊이에 따라 정의하는 p - y 곡선방법이 가장 널리 적용된다. p - y 곡선방법은 말뚝 및 지반을 각각 탄성빔(elastic beam)과 비선형 스프링(nonlinear spring)으로 가정해 지반-말뚝 시스템(soil-pile system)을 모델링하며, 비선형 스프링은 p - y 곡선의 초기기울기(initial stiffness)와 최대지반반력(ultimate soil resistance)로 정의된다. 현재까지 API(1987)에 의해 추천된 O'Neill and Murchinson(1983)의 p - y 곡선(이하 API p - y 곡선)이 사질토 지반에서 가장 일반적으로 적용되어 왔다. API p - y 곡선은 횡방향 반복하중효과를 고려하기 위해서, 정적 시험 시 평가된 극한지반반력에 감소계수 0.9를 일정하게 적용하고 있다.

그러나 API p - y 곡선은 제한된 조건에서 수행된 현장 시험으로 부터 제안된 것으로, 평가대상의 현장조건(지반, 말뚝, 하중조건 등)이 다른 경우 말뚝의 횡방향 지지거동을 정확하게 예측할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 많은 연구자들(Kim et al., 2004; Kim et al., 2008; Choo and Kim, 2016; Baek et al., 2018; Lee et al., 2019)이 다양한 조건에서 모형말뚝시험을 수행해 사질토 지반에 설치된 말뚝의 p - y 거동을 평가하기 위한 연구를 수행해왔다. Kim et al.(2004)과

Kim et al.(2008)은 모형말뚝에 횡방향 정적하중을 재하하여, 말뚝의 설치방법(installation method) 및 직경이 말뚝의 p - y 거동에 미치는 영향을 평가했다. 또한 Choo and Kim(2016)과 Lee et al.(2019)은 원심모형시험을 통해 대구경 말뚝의 p - y 거동을 분석하여 API p - y 곡선과의 차이를 보였고, Baek et al.(2018)은 지반의 상대밀도에 따라 다르게 나타나는 반복하중효과를 p - y 거동에 고려하기 위한 방법을 제안했다.

이처럼 많은 연구자들이 사질토 지반에 설치된 말뚝의 p - y 거동을 평가해 왔지만, 대부분 통일분류법(USCS)에 따라 미세입자가 거의 없는 모래(SP)로 분류되는 지반에서 수행된 연구를 바탕으로 도출된 결과였다. 실트질 모래(SM)와 같이 미세입자가 포함된 사질토를 대상으로 수행된 말뚝의 p - y 거동평가 연구는 매우 부족한 실정으로, 실트질 모래지반에 설치된 말뚝의 횡방향 지지거동 평가 시에도 SP로 분류되는 사질토 지반을 대상으로 제안된 p - y 곡선을 적용해 왔다. 그러나 사질토 지반의 입자크기는 지반의 지지거동에 큰 영향을 미치므로(Lamb et al., 1979), 지반-말뚝 상호작용 거동(soil-pile interaction behavior)도 다르게 나타난다. Han et al.(2010)은 사질토 지반의 입자크기가 탄성영역 내에서 강성차이를 발현시켜 유사한 상대밀도를 가진 두 지반(주문진 표준사 및 호주산 세사)에서 도출된 p - y 곡선의 초기기울기가 2~3배 다르게 평가되므로, 사질토의 종류에 관계없이 대표 p - y 곡선을 사용하는 현행 설계방법에 문제가 있음을 지적한 바 있다. 즉, 실트질 모래지반에 설치된 말뚝의 지지거동을 적절히 평가하기 위해서는, 실트질 모래지반에 설치된 말뚝을 대상으로 제안된 p - y 곡선을 설계에 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 국내 서남해안 해상풍력 실증단지 부지로 선정된 전라북도 부안군 안마도-위도 사이에 분포하는 조밀한 포화 실트질 모래지반을 모사한 모형지반에서 1g 모형말뚝시험을 수행했다. 모형시험결과를 바탕으로 말뚝의 p - y 거동을 분석한 뒤 반복하중효과가 포함된 p - y 곡선을 제안하였고, 이를 조밀한 포화 실트

질 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 지지거동 평가 시 활용할 수 있도록 했다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 수행된 모형말뚝시험 방법 및 조건을 설명하고, 3절에서는 모형시험 결과를 분석했다. 4절에서는 시험결과를 바탕으로 p - y 곡선을 제안 및 검증하며, 본 연구의 요약 및 결론은 5절에서 서술했다.

2. 모형말뚝시험 방법 및 조건

2.1 모형시험 장비

본 연구의 모형말뚝시험은 서울대학교 지반대학원 토조실험실에 위치한 너비 600mm, 길이 1800mm, 높이 1,200mm의 직육면체 모형토조에서 수행되었다(Fig. 1).

모형토조의 네 측면은 두께 20mm의 투명한 강화아크릴로 제작되어 모형지반 조성 시 지층높이를 육안으로 확인할 수 있도록 하였다.

Table 1은 본 연구에 적용된 원형(prototype)과 모형(model) 말뚝의 제원을 나타낸다. 모형시험의 크기효과(size effect)를 고려하기 위하여 국내외 해상풍력단지 프로젝트(스코틀랜드 Beatrice Offshore Wind Farm 등)에서 기초구조물로 적용되는 강관말뚝을 원형으로 선정하고, 여기에 Iai(1989)의 1g 상사비를 적용하여 축소 모사 하였다. 모형말뚝은 외경 30mm, 두께 1mm, 길이 1,400mm인 알루미늄 파이프로 제작했다. 실제 현장에서 사질토 지반의 주면마찰력이 충분하지 않는 등의 이유로 말뚝을 암반에 근입시켜 선단지지력을 발현시키는 설계형태가 일반적임을 고려해, 하단(선단)에 고정단(fixed base)을 부착하고 이를 모형토조 바닥면에 고

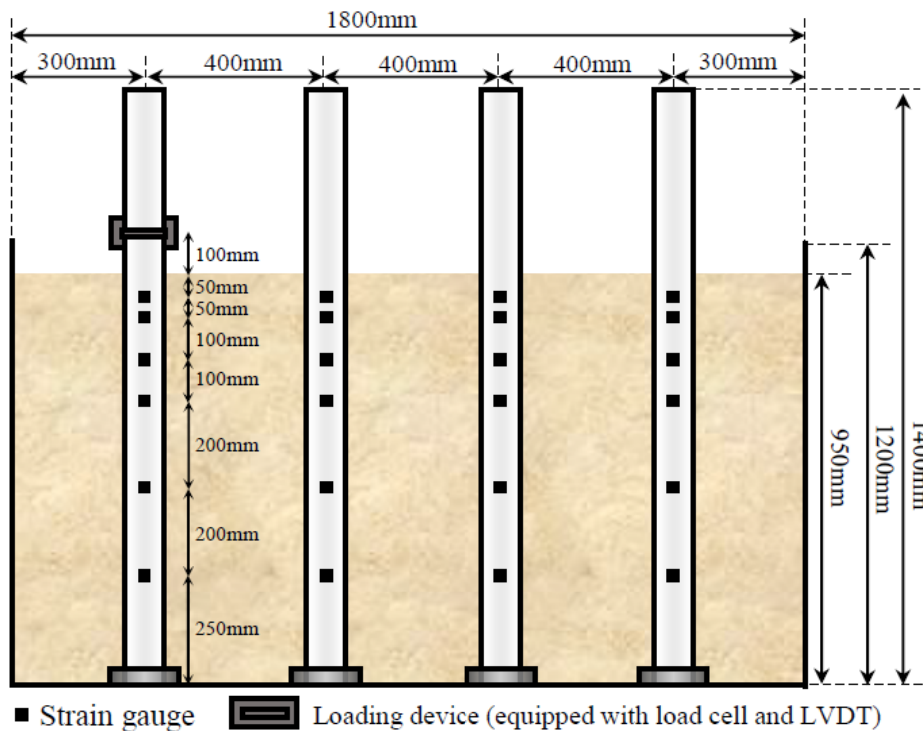


Fig. 1. Schematic drawing of the model pile test (cross-sectional view)

Table 1. Material properties of prototype and model piles

	Scale factor	Prototype	Model ($\lambda=15$)
Outside diameter (mm)	λ	450	30
Length (mm)	λ	21,000	1,400
Embedded depth (mm)	λ	14,250	950
Thickness (mm)	λ	20	1
Elastic modulus (GPa)	λ	210	70
Flexural rigidity (Ncm ²)	$\lambda^4.5$	1.31E+11	6.71E+05

정시켜 암반근입을 모사할 수 있도록 했다. 적용할 수 있는 모형말뚝 재질의 한계로 원형과 모형의 탄성계수, 두께, 휨강성(flexural rigidity)의 상사관계를 동시에 만족시키는 것은 불가능했다. 본 연구에서는 말뚝의 탄성계수 및 두께 보다는 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향을 미치는 점을 고려하여(Yang, 2009; Choi et al., 2015; Baek et al., 2018), 탄성계수가 70GPa인 알루미늄 파이프의 두께를 1mm로 조절하여 원형과 모형의 휨강성 상사관계를 만족하도록 했다.

Rao et al.(1998)에 따르면, 말뚝이 횡방향 하중을 받을 때 지지거동의 영향반경은 말뚝중심으로부터 직경의 10배로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 인접한 말뚝의 중심간격 및 말뚝중심으로부터 모형토조 벽체까지의 거리가 300mm(적용된 모형말뚝의 외경 30mm의 10배) 이상이 되도록 설계했다. 즉, Fig. 1과 같이 모형토조에 동일한 재원을 가지는 말뚝을 동시에 4본 설치한 뒤 모형말뚝시험을 수행할 수 있었다.

횡방향 정적하중 및 횡방향 반복하중은 변위제어가 가능한 횡방향 재하장치를 통해 지표로부터 100mm 높이에서 재하했고(횡방향 재하장치의 바닥면으로부터 재하중심까지의 높이 고려), 말뚝의 두부회전을 구속하지 않는 두부자유조건(free-head condition)이 적용되었다. 모형말뚝에 횡방향 하중 재하 시 재하장치에 부착된 하중계(load cell)와 변위계(linear variable differential transformer, LVDT)를 통해 횡방향 하중 및 변위를 측정했다. 또한 지표면으로부터 깊이 50, 100, 200, 300, 500, 700mm에 해당하는 위치의 모형말뚝 표면에 변형률계(strain gauge)를 부착하고 변형률을 측정하여 깊이별 지지거동 평가(p - y 거동)에 활용했다. 본 연구의 모형말뚝시험은 정적인 조건에서 수행되었으므로, 하중, 변위, 변형률은 정적 데이터로거(static data logger)를 활용하여 2초에 1회씩 측정했다.

2.2 모형지반

본 연구에서는 국내 서남해안 해상풍력 실증단지 조성을 위해 전라북도 부안군 안마도-위도 사이(이하 대상지역)에서 수행된 지반조사 결과를 참고하여 모형지반을 결정했다(KEPRI, 2016). Fig. 2에 표시된 여섯 위치의 모래층에서 수행된 시추조사 결과 및 각 위치의 표층지반(지표로부터 0~15m)에서 채취된 시료의 입도 분포분석 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다. 대상지역의 표층지반은 지표로부터 13.0~34.0m 깊이까지 비교적 조밀한 모래층(보통~매우 조밀)으로 구성되어 있으며, 모래층은 통일분류법(USCS)에 따라 실트질 모래(SM) 혹은 소성성이 낮은 실트(ML)로 분류되는 것으로 나타났다. 즉, 14.25m(14,250mm)의 근입깊이를 가지는 원형강관말뚝이 대상지역에 설치되는 경우(Table 1 참고), 실트질 모래 혹은 소성성이 낮은 실트로 분류되는 조밀한 모래층에 근입될 것임을 확인할 수 있다.



Fig. 2. Borehole location on the target site(Jeollabuk-do, South Korea)

Table 2. Borehole test results at the target site

Borehole No.	Depth (m)	SPT N values (blow/cm)	Soil packing (Meyerhoff, 1956)
BH1	0.0~32.0	28/30~50/24	Compact to Very dense
BH2	0.0~34.0	14/30~50/18	Compact to Very dense
BH3	0.0~15.7	38/30~50/14	Dense to Very dense
BH4	0.0~13.0	15/30~50/14	Compact to Very dense
BH5	0.0~13.5	4/30~50/26	Loose to Very dense
BH6	0.0~27.0	26/30~50/13	Compact to Very dense

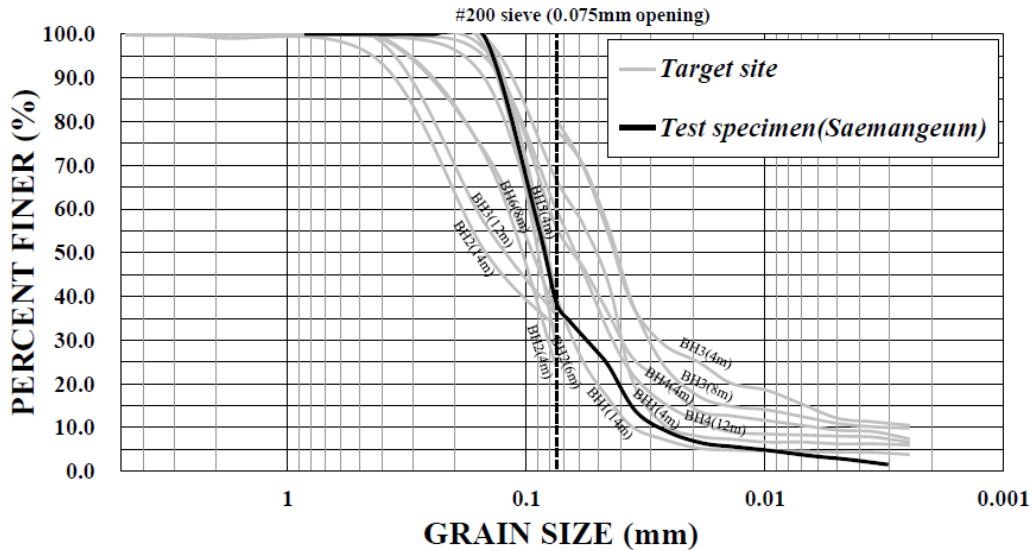


Fig. 3. Particle size distribution of the target site and test specimen sampled in the Saemangeum area of South Korea

본 연구에서는 해상에 위치한 대상지역의 지반시료를 다량으로 확보하는 것이 어려운 상황을 고려하여, 대상지반을 모사할 수 있는 유사시료를 새만금 매립현장 (전라북도 부안군 소재)에서 채취하여 활용했다. 새만금 매립현장에서 채취한 지반시료(이하 새만금시료)의 입도분포곡선과 기본물성은 각각 Fig. 3 및 Table 3과 같다. 새만금시료는 입도분포곡선이 대상지역 표층시료 입도분포곡선의 중간정도에 위치하는 실트질 모래로, 평균유효입경(D_{50})이 0.08mm 였다.

새만금시료를 상대밀도 70%로 조성해 비교적 조밀한 상태인 대상지반을 모사했다(Table 2 참고). 삼축압축시험을 수행한 결과 마찰각은 36.8° 로 평가되었다(점착력 0 가정). 모형지반은 총 깊이 950mm에 대해 일곱 층(150mm 씩 다섯 층, 100mm 씩 두 층)으로 나누어 조성되었다. 우선 모형지반의 각 층을 조성하는데 필요

한 건조시료의 양을 층별 체적과 상대밀도를 고려하여 계산하고 준비한 뒤, 포화 및 입자 사이에 존재하는 공기의 영향을 최소화하기 위한 목적으로 시료를 10일 간 물에 담가두었다(soaked). 이후 실제 현장지반 매립방법(reclamation technique)과 유사하게 짚은 모래를 물로 채워진 토조에 층층히 채우고 램머(rammer)로 다지는 방식으로 지반을 조성했다(Yang, 2009).

2.3 모형시험 계획 및 조건

Table 4는 본 연구에서 수행된 6회의 모형말뚝시험 조건을 나타낸다. 앞서 언급한바와 같이 모형토조 및 모형말뚝의 제원과 말뚝의 횡방향 지지거동 영향반경을 고려할 때, 최대 4본의 말뚝을 동시에 설치할 수 있었다. 따라서 말뚝을 모형토조 하부에 고정시켜 설치하고 모

Table 3. Index properties of Saemangeum silty sand

USCS	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	G_s	$\gamma_{d(max)}$ (t/m^3)	$\gamma_{d(min)}$ (t/m^3)
SM	0.03	0.08	3.42	2.67	1.61	1.19

Table 4. Summary of the test program

Test no.	Relative density (%)	Loading condition	Loading rate (mm/s)
T1	70	Monotonic lateral loading	0.03
T2		Cyclic lateral loading ($0.3H_{us}$)	
T3		Cyclic lateral loading ($0.6H_{us}$)	
T4		Cyclic lateral loading ($0.9H_{us}$)	
T5		Cyclic lateral loading ($1.3H_{us}$)	
T6		Monotonic lateral loading	

형지반을 조성하는 과정을 총 2번 반복하여 모형말뚝시험을 수행했다(T1~T4 및 T5와 T6).

첫 번째 모형지반 조성 시, 우선 한 본의 말뚝에 횡방향 정적하중을 재하하여 횡방향 극한지지력(H_{us}) 및 횡방향 정적하중 재하 시 p - y 곡선을 평가했다(T1). 이후 나머지 세 본의 말뚝에 각각 횡방향 극한지지력의 30%, 60%, 90%에 해당하는 하중($0.3H_{us}$, $0.6H_{us}$, $0.9H_{us}$)을 20회 씩 양방향 반복재하하여(Fig. 4), 각각의 조건에 대한 p - y 중추곡선을 평가했다(T2~T4). 두 번째 모형지반 조성 시, 한 본의 말뚝에는 평가된 횡방향 극한지지력의 130%에 해당하는 하중($1.3H_{us}$)을 20회 씩 양방향 반복재하하여(Fig. 4), p - y 중추곡선을 평가했다(T5). 나머지 한 본의 말뚝에는 횡방향 정적하중을 재하하여 횡방향 극한지지력을 평가하고, 이를 첫 번째 모형지반에서 얻은 값과 비교해 두 지반의 균질성을 확인하였다(T6). Barton(1979)에 따르면 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 지지거동에 미치는 영향은 초기 반복재하 시 대부분 발생하며, 반복횟수 10~20회부터는 그 영향이 크지 않다고 알려져 있다. 이를 고려해 횡방향 반복하중 재하횟수가 20회로 결정되었고, 모형지반에 과잉간극수압이 발생되지 않도록 0.03mm/s 의 속도로 충분히 천천히 재하했다.

3. 모형말뚝시험 결과 및 분석

본 장에서는 우선 횡방향 정적하중 재하시험 결과(횡방향 하중-변위 곡선)를 분석해 반복재하하중의 크기를 결정하고 횡방향 정적하중 재하 시 p - y 곡선을 평가했다. 이후 횡방향 반복하중 재하 시 p - y 중추곡선을 평가하여 반복하중이 말뚝의 p - y 거동에 미치는 영향을 분석했다.

3.1 횡방향 하중-변위 곡선

Fig. 5는 횡방향 정적하중 재하시험 결과(T1과 T6)로부터 얻어진 모형말뚝의 횡방향 하중-변위 곡선이다. 횡방향 하중-변위 곡선으로부터 횡방향 극한지지력을 평가하는 기준은 여러 연구자들(Meyerhof et al., 1981; Davidson et al., 1983; Fleming et al., 1992)로부터 다양하게 제안되어 왔는데, 본 연구에서는 횡방향 변위가 말뚝 직경의 10% 만큼 발생했을 때를 극한상태로 간주하는 Fleming et al.(1992)의 기준을 적용했다.

첫 번째 모형지반 조성 시 수행된 정적하중 재하시험 결과(T1), 모형말뚝 직경의 10%(3mm)에 해당하는 변위가 발생했을 때의 횡방향 하중인 170N이 횡방향 극한지지력으로 평가되었고, 이 하중의 30%, 60%, 90%, 130% 수준인 51N, 102N, 154N, 222N이 횡방향 반복하중의 크기로 결정되었다. 또한 두 번째 모형지반에서 수행된 정적하중 재하시험 결과(T6), 횡방향 극한지지력이 T1과 약 0.3%의 차이만 보일 뿐 거의 유사하게 나타남을 통해, 두 모형지반이 거의 균질하게 조성되었음을 간접적으로 확인했다.

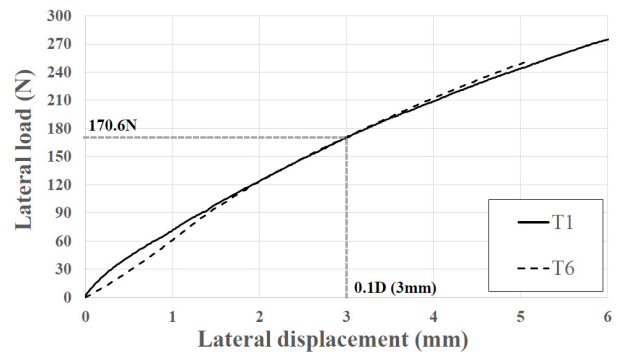


Fig. 5. Monotonic lateral load and lateral displacement curve

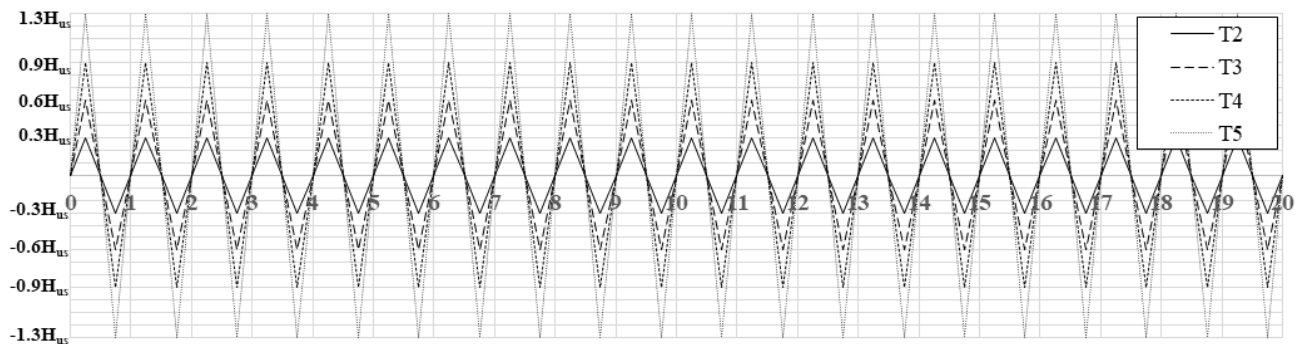


Fig. 4. Sequence of two-way cyclic lateral loading

3.2 횡방향 정적하중 재하 시 p - y 곡선

지표면으로부터 깊이 50, 100, 200, 300, 500, 700mm 에 해당하는 위치의 모형말뚝 표면에 부착된 변형률계 (strain gauge)로부터 변형률을 측정하고, 간단한 빔이론 (Heyenyi, 1946)을 통해 깊이별 p - y 곡선을 도출했다(식 (1)~(3)). 우선 식 (1)을 통해 측정된 변형률을 모멘트로 변환했다.

$$M = \frac{EI\epsilon}{x} \quad (1)$$

여기서, E , I , x 는 각각 말뚝의 탄성계수, 단면 2차 모멘트, 중립축까지의 거리를 의미하고, M , ϵ 는 각각 모멘트와 변형률을 의미한다. 변형률계가 부착된 불연속적 위치(discrete location)에서 얻어진 모멘트를 통해 말뚝 근입깊이(z)에 대해 연속적인 모멘트 함수($M(z)$)를 구하기 위한 보간법은 다항식 방법, Cubic spline 방법, 가중 잔차(Weighted residual) 방법 등이 있다. 본 연구에서는 말뚝의 횡방향 지지거동 평가를 위한 여러 연구(Scott, 1980; Dou and Byrne, 1996; Yang, 2009; Baek et al., 2018)에서 적용되었던, Cubic spline 보간법을 적용해 깊이별 연속적인 모멘트 함수를 구했다. 구해진 깊이별 모멘트 함수를 식 (2)와 같이 두 번 미분해 지반반력(p)을, 식 (3)과 같이 말뚝의 휨강성으로 나눈 뒤 두 번 적분해 변위(y)를 산정하여 p - y 곡선을 도출했다.

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

$$y = \iint \frac{M(z)}{EI} dz \quad (3)$$

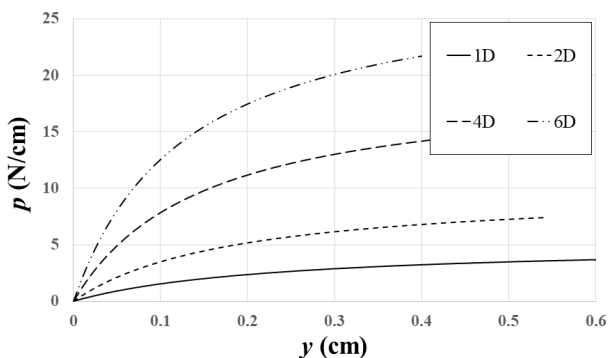


Fig. 6. Experimental p - y curves of a model pile subjected to monotonic lateral load

Fig. 6은 앞서 기술한 과정을 통해 얻어진 횡방향 정적하중 재하 시 p - y 곡선을 나타낸다. p - y 곡선은 비선형 쌍곡선 형태이며, 깊이가 증가할수록 지반의 구속압이 증가해 p - y 곡선의 강성(기울기 및 최대값)이 커지는 것으로 나타났다. Fig. 7은 모형시험결과와 API(1987) 방법을 통해 구한 p - y 곡선을 함께 도시한 것인데, API p - y 곡선은 말뚝의 변위가 상대적으로 작은 경우에는 지반반력을 과대평가하고, 변위가 큰 경우의 지반반력은 과소평가했다. 특히 횡방향 극한지지지력 발현 시 발생된 변위를 Fig. 7의 그래프에 세모로 표시(triangle symbol)했는데, 해당변위 수준에서는 API p - y 곡선이 모형시험 시 지반반력을 유사 혹은 과대평가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 말뚝은 횡방향 극한지지지력보다 훨씬 낮은 수준의 하중을 받음을 고려할 때, API 방법은 사용하중 조건 하에서 말뚝의 횡방향 지지력을 과대평가할 가능성이 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 Kim et al.(2004), Kim et al.(2008), Yang (2009), Baek et al.(2018)과 유사하게, 지반의 비선형 응력-변형률 관계를 나타내기 위해 널리 적용되는 Kondner (1963)의 쌍곡선 식(식 (4))을 활용하여 실험적으로 얻어진 p - y 곡선의 초기기울기(k_{ini})와 최대지반반력(p_u)을 정량적으로 도출했다. 식 (4)를 바탕으로, 실험적으로 얻어진 깊이별 p - y 곡선과 가장 유사한 형태를 보이는 최적곡선(best-fit curve)을 찾는 과정을 통해 깊이별 k_{ini} 과 p_u 를 도출했다(Fig. 8).

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}} \quad (4)$$

Fig. 6에 나타낸 p - y 곡선의 깊이에 따른 강성증가 경향에서도 알 수 있듯이, k_{ini} 과 p_u 는 지표면으로부터 깊어질수록 증가했다. 본 연구에서는 Palmer and Thompson (1948)이 제안한 식 (5)와 Kim et al.(2004)이 제안한 식 (6)을 활용하여, 깊이별로 도출된 k_{ini} 과 p_u 를 피팅했다 (curve-fitting).

$$k_{ini} = n_h z^n \quad (5)$$

$$p_u/D = AK_p \gamma' z^m \quad (6)$$

여기서, z 는 지표면으로부터의 깊이(m), D 는 말뚝직경 (m), K_p 와 γ' 는 각각 지반의 Rankine 수동토압계수 및 유

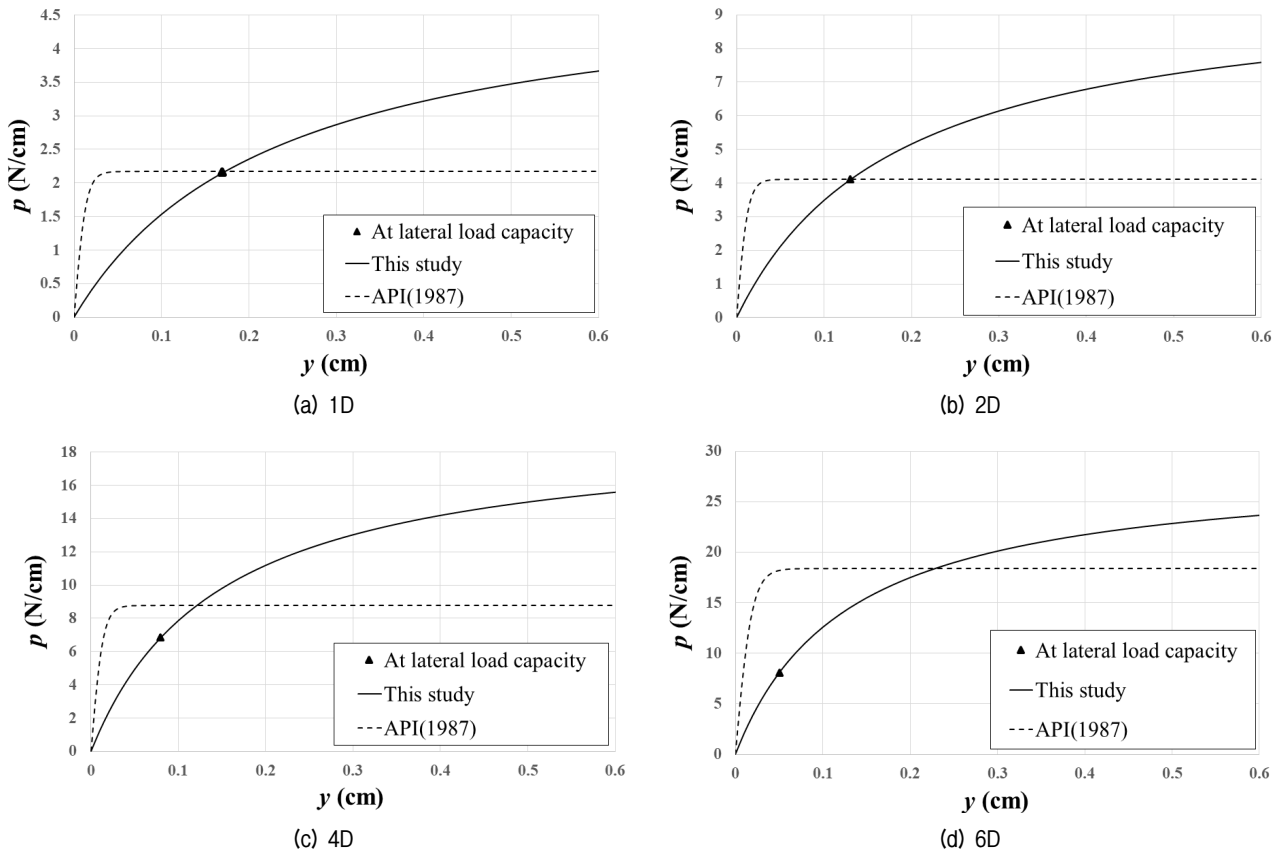


Fig. 7. Comparison between experimental p-y curves and API (1987) method

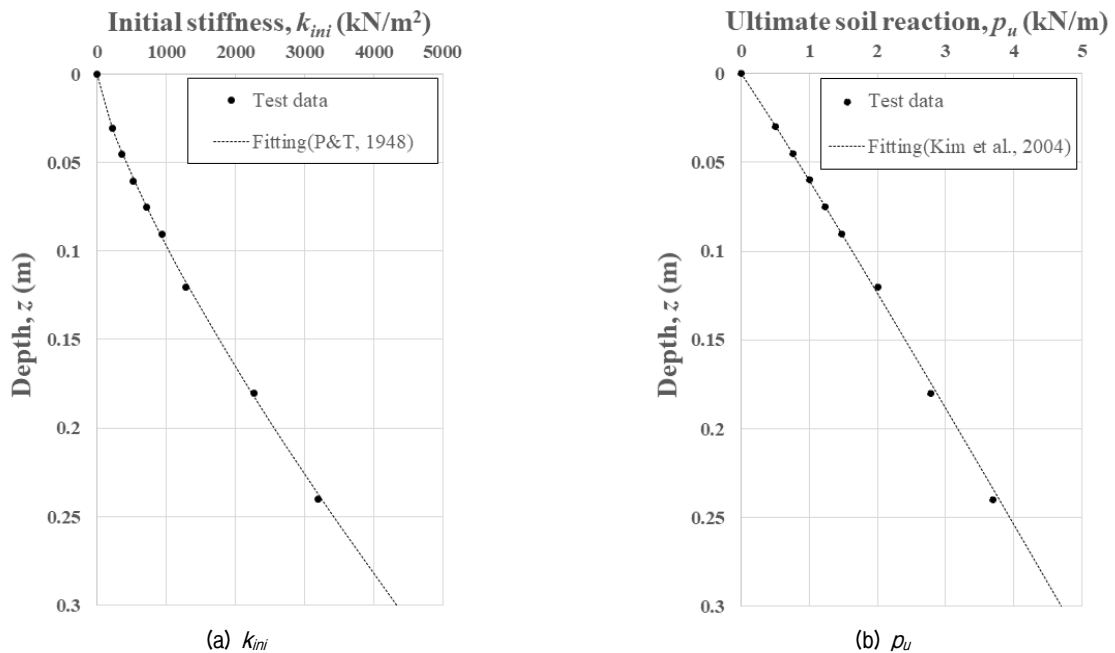


Fig. 8. Initial stiffness (k_{ini}) and ultimate soil reaction (p_u) along with the depth

효단위중량(kN/m^3), m_h 는 수평지반반력 상수(kN/m^3), A , n , m 은 무차원의 곡선결정계수(curve-fitting parameters)를 의미한다. 식 (5)와 (6)의 z , D , K_p , γ 는 시험조건으로부터, k_{ini} 및 p_u 는 모형시험결과로부터 깊이(z)에 따라

얻어지는 값이며, 이를 통해 최적의 n_h , A , n , m 을 도출한다.

식 (5)와 (6)에 시험조건(D , K_p , γ)과 깊이(z)에 따라 얻어진 k_{ini} 및 p_u 를 대입하고 대수평면(logarithm plane)

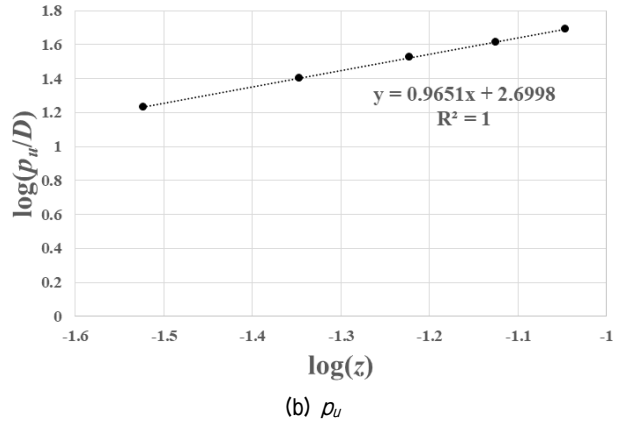
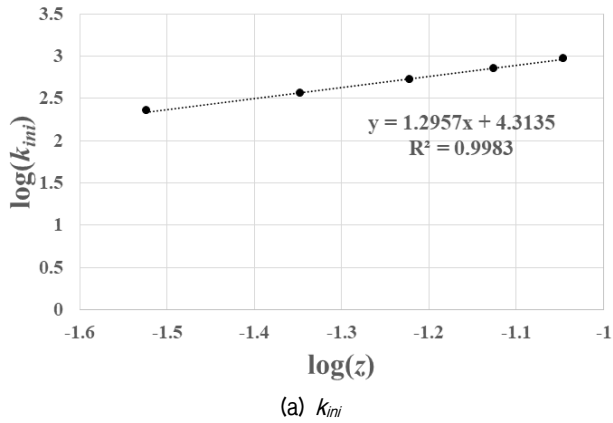


Fig. 9. Linear regression analysis for Initial stiffness (k_{ini}) and ultimate soil reaction (p_u)

에서 선형회귀분석(linear regression analysis)을 수행하여, Fig. 9와 같이 최적식을 도출해 n_h , A , n , m 을 산정했다. 이상의 과정은 Kim et al.(2008)에 보다 상세히 기술되어있다. 깊이에 따른 k_{ini} 및 p_u 평가결과, 식 (5)의 n_h 와 n 은 각각 $20,582\text{kN/m}^3$ 과 1.30, 식 (6)의 A 와 m 은 각각 13.02와 0.95로 결정되었다. 상기 값을 식 (5)와 (6)에 대입해서 정리한 식 (7)과 (8)을 통해 p - y 곡선의 초기기울기 및 최대지반반력을 결정할 수 있으며, 이는 비교적 조밀한 포화 실트질 모래지반에 설치되어 횡방향 정적하중을 받는 말뚝의 지지거동 평가 시 활용될 수 있을 것이다.

$$k_{ini} (kN/m^2) = 20582z^{1.30} \quad (7)$$

$$p_u (kN/m) = 13.02DK_p\gamma' z^{0.95} \quad (8)$$

3.3 횡방향 반복하중 재하 시 p - y 곡선

횡방향 정적하중 재하 시 p - y 곡선 평가와 유사한 과정을 통해(식 (1)~(3)), 반복하중 재하 시 p - y 곡선을 도출했다. Fig. 10는 횡방향 극한지지력의 60%에 해당하는 하중을 반복재하 할 때, 말뚝직경의 2배 깊이에서 도출된 p - y 곡선을 정적하중 재하 시 p - y 곡선과 함께 나타낸 것이다. 말뚝에 횡방향 반복하중이 재하됨에 따라 p - y 곡선의 강성이 감소하여, 동일한 변위(y)에서 발현될 수 있는 지반반력(p)의 크기가 작아지는 것으로 나타났다. 이는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변지반이 교란(재하방향의 지반은 융기(bulged)되고, 재하 반대방향의 지반은 주동(active) 상태에 놓이는 현상이 반복)되어 지반의 지지능력이 감소되기 때문으로 판단된다. Baek et

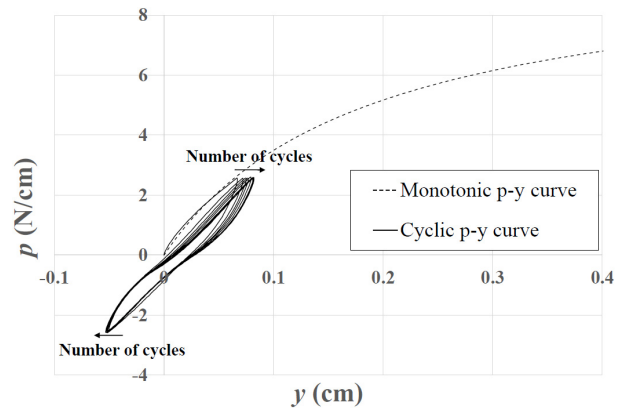


Fig. 10. Monotonic and cyclic p - y curves ($0.6H_{us}$) of a model pile (depth=2D)

al.(2015)은 반복하중효과의 지배적인 요소가 지반의 상대밀도이며, 조밀한 모래지반(SP)에서 횡방향 반복하중 재하 시 p - y 곡선의 초기기울기가 감소한다고 밝혔는데, 이와 동일한 경향을 보여주었다. 모든 시험조건에 대해 강성감소 효과는 반복하중 재하 초기에 가장 크게 나타났고 반복횟수 7~10회 이후로는 미미한 수준(반복재하에 따른 할선강성의 변화가 0.5% 이내)이었는데, 반복횟수 10~20회부터는 횡방향 반복하중의 영향이 크지 않다는 Barton(1979)의 연구결과와 일치했다.

Fig. 11은 반복횟수 20번째에 해당하는 횡방향 하중 재하 시 p - y 곡선과, 동일한 깊이에서의 정적 p - y 곡선을 함께 나타낸 것이다. 반복하중효과로 인해 p - y 곡선의 강성이 감소하는 경향을 확인할 수 있었는데, 특히 반복하중의 크기가 크고 지표면에 가까운 깊이에서 그 효과가 명확하게 나타났다. 상기조건에서 말뚝 주변지반의 횡방향 변위(및 교란효과)가 크게 발생해 지반의 지지능력이 더욱 크게 감소하기 때문으로, 반복하중효과에

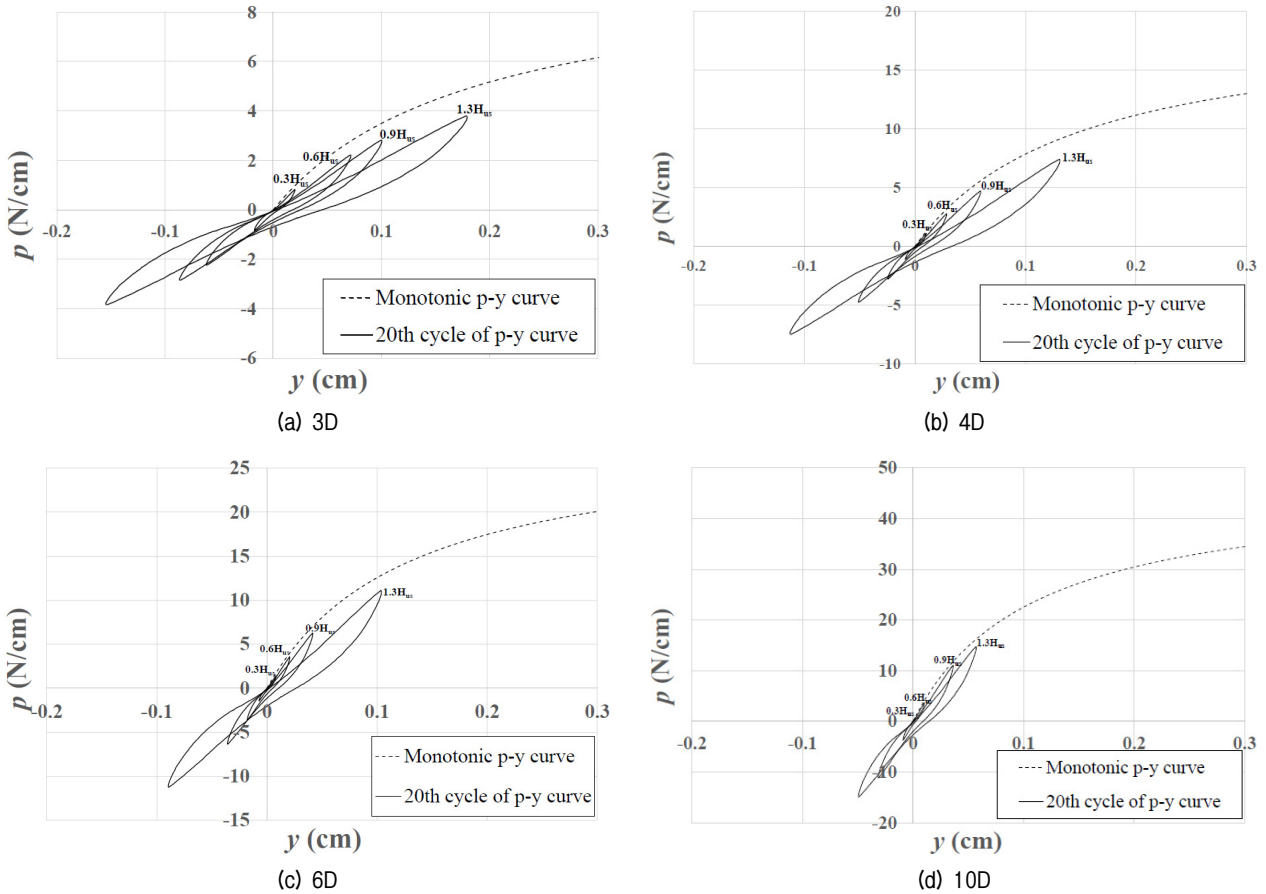


Fig. 11. 20th cycle of p-y curves of a model pile

대한 정량적인 분석은 4절에 보다 자세히 기술하였다.

이상과 같은 반복하중효과(p - y 곡선의 강성감소)는 반복하중에 의해 말뚝의 횡방향 지지능력이 감소함을 뜻한다. 따라서 정적재하시험을 통해 제안된 p - y 곡선을 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝설계에 적용하는 경우, 말뚝지지력의 과대평가 혹은 변위 및 모멘트를 과소 평가할 우려가 있을 것으로 판단된다.

4. 횡방향 반복하중 재하 시 말뚝의 p - y 곡선

본 연구에서는 Ting et al.(1987)이 제시한 p - y 중추곡선 방법(p - y backbone curve method)을 통해 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 등가정적해석(pseudo-static analysis) 시 활용할 수 있는 p - y 곡선을 제안했다. p - y 중추곡선 방법의 적용과정은 다음과 같다.

Fig. 12에 나타낸바와 같이, 20번째 반복재하 시 p - y 곡선의 최대지반반력 점들을 깊이별로 네 개씩 구했다 (반복하중 크기별로 도출). 즉, Fig. 11에 나타낸 각각의 p - y 루프(loop) 꼭지점이 Fig. 12의 최대지반반력 점

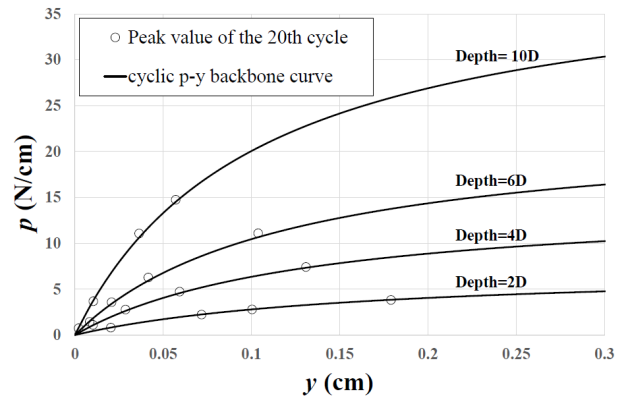


Fig. 12. Peak values of the 20th cycle of p-y curves and their backbone curves

된다. 최대지반반력 점들을 정적 p - y 곡선 제안 시 활용된 쌍곡선 식(식 (4))으로 외삽해 반복하중에 대한 p - y 중추곡선(cyclic p - y backbone curve)을 도출했다. 도출된 p - y 중추곡선은 반복하중효과가 포함된 것으로, 앞서 제안한 정적 p - y 곡선과 마찬가지로 초기기울기와 최대지반반력으로 정의된다. 깊이에 따라 다르게 나타나는 반복하중효과를 정량적으로 고려하기 위해서, p - y 중추

곡선의 초기기울기($k_{ini(c)}$)와 최대지반반력($p_{u(c)}$)을 각각 동일한 깊이에서 평가된 정적 p - y 곡선의 k_{ini} 와 p_u 로 정규화 했다. Fig. 13은 정규화 된 초기기울기($k_{ini(c)}/k_{ini}$) 및 최대지반반력($p_{u(c)}/p_u$)을 정규화 된 깊이(z/D)에 대해 나타낸 것이다.

횡방향 반복하중에 의한 p - y 곡선의 강성감소는 지표면 주변에서 최대이고 깊이가 깊어질수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. 지표면을 기준으로 p - y 곡선의 초기기울기 및 최대지반반력이 약 80% 및 70% 수준으로 감소해, 초기기울기에 비해 최대지반반력이 더 크게 감소했다. 이는 반복하중의 크기가 클수록 반복하중효과가 명확해져, p - y 곡선의 후반부(즉, 최대지반반력)에 미치는 영향이 더 크기 때문으로 판단된다. 모형시험 시 횡방향 변위가 발생하지 않은 임계깊이(infinite depth)인 16D 이하에서는 정규화 된 초기기울기 및 최대지반반력이 1로 수렴해 반복하중효과가 없을 것으로 분석되었고, 이는 임계깊이 하부에서는 횡방향 하중의 영향이 미미함을 나타낸다.

본 연구에서는 정규화 된 초기기울기 및 최대지반반력을 각각 반복하중계수(cyclic load factor) c_i 와 c_p 로 정의하고, Fig. 13을 바탕으로 정규화 된 깊이의 함수인 식 (9), 식 (10)로 나타냈다($R^2=0.99$). 식 (9)와 (10)은 16D

보다 얇은 깊이에서만 유효하며 16D 보다 깊은 깊이에는 모두 1을 적용한다.

$$c_i = k_{ini(c)}/k_{ini} = 0.0125(z/D) + 0.7928 \quad (z/D \leq 16) \quad (9)$$

$$c_p = p_{u(c)}/p_u = 0.0181(z/D) + 0.7032 \quad (z/D \leq 16) \quad (10)$$

이상을 종합하면 반복하중 재하 시 p - y 곡선의 초기기울기($k_{ini(c)}$)는 식 (7)과 식 (9)의 곱으로, 최대지반반력($p_{u(c)}$)은 식 (8)과 식 (10)의 곱으로 산정할 수 있다. 산정된 $k_{ini(c)}$ 와 $p_{u(c)}$ 를 쌍곡선 식 (4)에 대입하면 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 등가정적해석(pseudo-static analysis)을 위한 p - y 곡선을 구할 수 있다(식 (11)).

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini(c)}} + \frac{y}{p_{u(c)}}} \quad (11)$$

제안된 p - y 곡선의 적용성을 평가하기 위하여 상용소프트웨어 LPILE 11.0을 활용해 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 등가정적해석을 수행하고, 이를 모형시험결과 및 API p - y 곡선과 비교했다. Fig. 14는 모형말뚝이 횡방향 극한지지력의 30%, 60% 수준의 반복하중을 받을 때 예측된(제안된 p - y 곡선 및 API p - y 곡선) 깊이별 변위 및 모멘트를 모형시험결과와 함께 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안한 p - y 곡선은 모형시험결과를 비교적 잘 예측하는 반면, API p - y 곡선은 말뚝의 깊이별 변위 및 모멘트를 과소평가했다. 이는 API p - y 곡선이 반복하중에 의한 강성감소를 고려하기 위해서 정적시험 시 평가된 극한지반반력에 감소계수 0.9(즉, 90% 수준)를 일정하게 적용하는데, 모형시험에 따르면 초기기울기 및 최대지반반력이 최대 80% 및 70% 수준까지 감소하기 때문이다.

이상의 등가정적해석 결과를 종합하면, 본 연구에서 제안된 p - y 곡선을 통해 비교적 조밀하고 포화된 실트질 모래지반에서 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 지지거동을 적절히 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 API p - y 곡선은 말뚝의 횡방향 지지능력을 과대평가하므로 이를 설계에 적용하는 경우 위험 측 결과를 초래할 수 있어, 조밀한 포화 실트질 모래지반에서 적용 시 주의가 필요한 것으로 나타났다. 단, 본 연구에서 제안된 식은 1g 조건하에서 수행된 축소모형시험을 통해 제안된 것이므로, 보다 일반적인 경우에 적용하기 위해서는

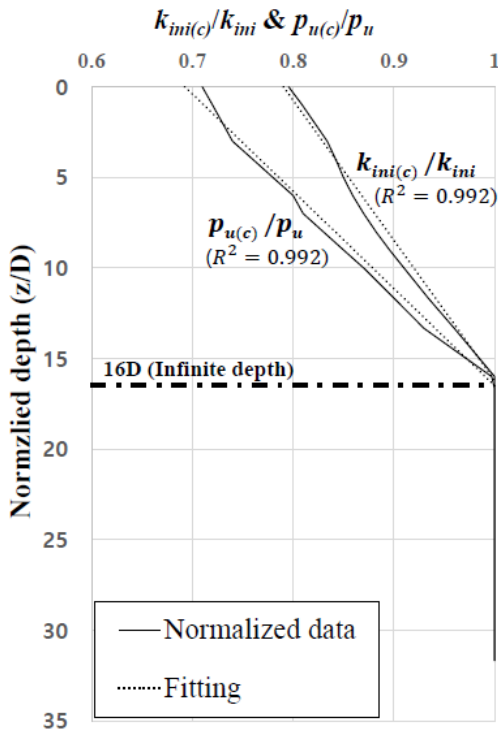
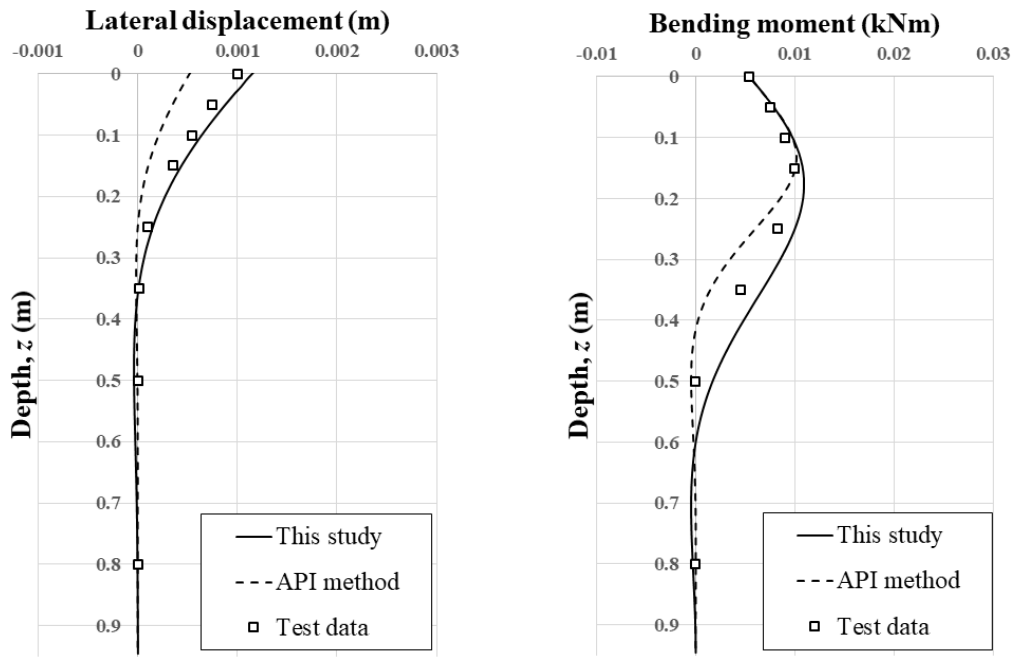
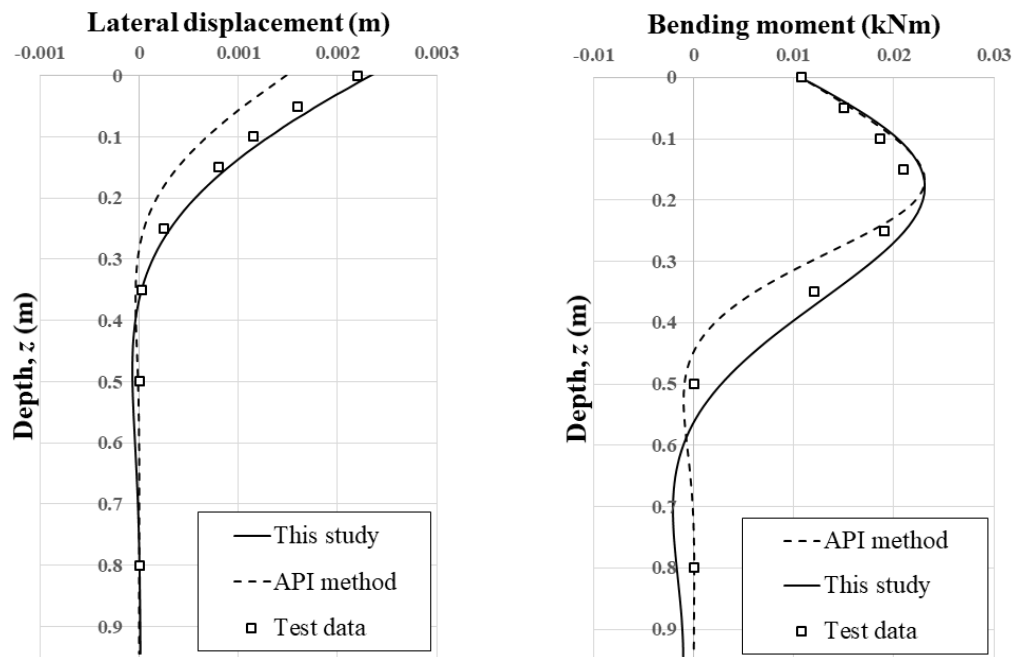


Fig. 13. Normalized initial stiffness (k_{ini}) and ultimate soil reaction (p_u) along with the depth



(a) $0.3H_{us}$



(b) $0.6H_{us}$

Fig. 14. Pseudo-static analysis results and the test data

추가적인 말뚝시험(현장재하 시험 등)을 수행해 이를 검증하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 조밀한 포화 실트질 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 p - y 거동을

평가하기 위해서, 1g 모형말뚝시험을 수행했다. 상대밀도 70%로 조성된 포화 실트질 모래지반에 모형말뚝을 설치하고 서로 다른 네 가지 크기($0.3H_{us}$, $0.6H_{us}$, $0.9H_{us}$, $1.3H_{us}$)의 횡방향 하중을 20회 씩 반복재하 해 횡방향 반복하중이 말뚝의 p - y 거동에 미치는 영향을 평가했고, 다음과 같은 결론을 도출했다.

- (1) 말뚝에 횡방향 반복하중 재하 시 $p-y$ 곡선의 강성(초기 기울기 및 최대지반반력)이 감소했다. $p-y$ 곡선의 강성감소효과는 반복하중 재하 초기에 가장 크게 나타났고 반복횟수 7~10회 이후로는 미미한 수준이었다. 특히 반복하중의 크기가 크고 지표면에 가까운 위치에서 그 효과가 더 명확하게 나타났는데, 상기조건에서 말뚝 주변지반의 교란효과가 크게 발생해 지반의 지지능력이 더욱 크게 감소했기 때문이다.
- (2) 반복하중에 대한 $p-y$ 중추곡선의 초기 기울기 및 최대지반반력을 각각 동일한 깊이에서 평가된 정적 $p-y$ 곡선의 초기 기울기 및 최대지반반력으로 정규화해, 반복하중효과를 정량적으로 평가했다. 지표면을 기준으로 $p-y$ 곡선의 초기 기울기 및 최대지반반력이 최대 80% 및 70% 수준으로 감소해, 초기 기울기에 비해 최대지반반력이 더 크게 감소했다. 모형시험 시 횡방향 변위가 발생하지 않은 한계깊이 (16D) 이하에서는 정규화 된 초기 기울기 및 최대지반반력이 1로 수렴하는 것으로 나타나, 한계깊이 이하로는 반복하중효과가 미미했다.
- (3) 모형시험결과를 활용해 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 등가정적해석 시 활용할 수 있는 $p-y$ 곡선을 제안했다. 제안된 $p-y$ 곡선을 적용한 등가정적해석을 통해 예측된 말뚝거동을 모형시험결과와 비교한 결과, 제안된 식을 통해 비교적 조밀하고 포화된 실트질 모래지반에서 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 지지거동을 적절히 평가할 수 있음을 확인했다. 반면 API $p-y$ 곡선은 모형말뚝의 횡방향 지지능력을 과대평가하는 것으로 나타나, 포화된 실트질 모래지반에 설치된 말뚝기초의 설계에 적용하는 경우 주의가 필요한 것으로 나타났다.

본 연구결과는 비교적 조밀하고 포화된 실트질 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 횡방향 지지거동을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 국내 서남해안 해상풍력 실증단지 예정부지의 실트질 모래지반을 모사해 수행된 결과로서, 제안된 $p-y$ 곡선은 향후 해상풍력단지 건설 시 말뚝의 횡방향 지지거동 평가를 위한 기초자료로 적용될 수 있다. 다만, 이상의 결과는 1g 조건하에서 수행된 축소모형시험을 통해 도출되었고, 현장에서 적용되는 말뚝의 설치방법(항타 혹은 압입 등)을 고려하지 못했다. 또한 횡방향 하중

을 20회 반복재하해 도출한 결과로, 장기적인 관점에서 말뚝의 거동을 예측하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 실제 말뚝의 설치방법을 모사한 추가적인 모형말뚝 시험 혹은 현장검증연구를 통해 이러한 한계를 보완한다면, 연구결과의 적용성을 보다 강화할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20183010025540).

참고문헌 (References)

1. American Petroleum Institute (2007), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platformsworking stress design: API recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD), API.
2. Baek, S. H., J. Y. Kim, S. H. Lee, and C. K. Chung (2015), "Effect of Cyclic Lateral Loads on p-y Curve for Pile Foundations in Saturated Sand", *Proceeding of 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Big Island, Hawaii, pp.983-988.
3. Baek, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.H., and Chung, C.K. (2018), "Development of the Cyclic p-y Curve for a Single Pile in Sandy Soil", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.36, No.3, pp.351-359.
4. Barton, Y.O. (1979), Lateral Loading of Model Piles in the Centrifuge, M.Phil. Thesis, University of Cambridge.
5. Choi, J.I., Yoo, M.T., Yang, E.K., Han, J.T., and Kim, M.M. (2015), "Evaluation of 1-G Similitude Law in Predicting Behavior of a Pile-Soil Model", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.33, pp.202-211.
6. Choo, Y.W. and Kim, D. (2016), "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, p.04015058.
7. Davidson, H.L., Cass, P.G., Khilji, K.H., and McQuade, P.V. (1982), Laterally loaded drilled pier research, Report EL-2197, EPRI, p. 324.
8. Dou, H. and Byrne, P.M. (1996), "Dynamic Response of Single Piles and Soil Pile Interaction", *Can. Geotech. J.*, Vol.33, pp.80-96.
9. Fleming, W.G., Weltman, A.J., Randolph, M.F., and Elson, W.K. (1992), *Piling Engineering*, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York.
10. Han, J.T., Yoo, M.T., Yang, E.K., and Kim, M.M. (2010), "Evaluation of Particle Size Effect on Dynamic Behavior of Soil-pile System", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.49-58 (in Korean).
11. Heyenyi, M. (1946), *Beams on elastic foundation*, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
12. Iai, S. (1989), "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", *Soil and Foundations*,

- Vol.29, No.1, pp.105-118.
13. Kim, B.T., N.K. Kim, W.J. Lee, and Y.S. Kim. (2004), "Experimental Loadtransfer Curves of Laterally Loaded Piles in Nak-Ding River Sand", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.4, pp.416-425.
 14. KEPRI (2016), Test Bed for 2.5GW Off-shore Wind Farms at Yellow Sea, Design Basis Final Report (in Korean).
 15. Kondner, R. L. (1963), "Hyperbolic Stress-strain Response: Cohesive Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 87, No.1, pp.115-144.
 16. Kim, T.S., Jeong, S.S., and Kim, Y.H. (2008), "A Study on the p-y Curves by Small-Scale Model Tests", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.1, pp.41-51 (in Korean).
 17. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
 18. Lee, M.J., Yoo, M.T., Park, J., and Min, K. (2019), "Evaluation of Lateral Pile behavior under Cyclic Loading by Centrifuge Tests", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.6, pp.39-48 (in Korean).
 19. Meyerhof, G.G., Mathur, S.K., and Valsangkar, A.J. (1981), "Lateral Resistance and Deflection of Rigid Wall and Piles in Layered Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.159-170.
 20. Nunez, I.L. (1988), "Driving and Tension Loading of Piles in Sand on a Centrifuge", *Proceeding International Conference Centrifuge 88*, Paris, Corte, J.K. (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.353-362.
 21. O'Neill, M. W. and J. M. Murchison (1983), An evaluation of p-y relationships in sands, Report PRAC 82.41-1 to American Petroleum Institute, University of Houston, Houston.
 22. Palmer, L.A. and J.B. Thomson (1948), "The Earth Pressure and Deflection along the Embedded Lengths of Piles Subjected to Lateral Thrust", *Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, pp.156-161.
 23. Rao, S.N., Ramakrishna, V.G.S.T., and Rao, M.B. (1998), "Influence of Rigidity on Laterally Loaded Pile Groups in Marine Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No.6, pp.542-549.
 24. Scott, R.F. (1980), Analysis of centrifuge pile tests; simulation of pile driving. Report for the American Petroleum Institute OSAPR Project 13, California Institute of Technology, Pasadena, California.
 25. Ting, J. M., C. R. Kauffman, and M. Lovicsek (1987), "Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile behavior", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.198-207.
 26. Yang, E. K. (2009), Evaluation of dynamic p-y curves for a pile in sand from 1 g shaking table tests, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University.

Received : October 30th, 2019
 Revised : November 12th, 2019
 Accepted : November 13th, 2019