

동적 수평하중에 의한 단일 경사말뚝의 거동특성

Behaviour Characteristics of Single Batter Pile under Dynamic Lateral Loads

김 지 성¹ Kim, Jiseong
노 정 섭² Noh, Jeongseob
강 기 천³ Kang, Gi-Chun

Abstract

The purpose of this study is to investigate the behavior of a single batter pile with repeated lateral loading through model tests. Repeated loads were applied in one direction and two directions, and lateral resistance and bending moment were analyzed by varying the relative density of the ground. As a result, lateral resistance and maximum bending moment were increased in the order of Out batter, Plumb, and In batter when one-way and two-way dynamic lateral loads were applied. The depth at the maximum bending moment was more deeper with the loading. The moments at bottom layer were decreased in the order of Out batter, Plumb, and In batter but upper moments were increased with the same order. Also, various bottom and upper moments were small when the two-way dynamic lateral load was applied compared to one-way lateral load.

요 지

본 연구는 모형시험을 통해 반복수평하중이 작용하는 단일경사말뚝의 거동 특성을 파악하고자 한다. 반복하중은 일방향과 양방향으로 작용 시켰으며, 지반의 상대밀도를 달리하여 수평저항력과 휨모멘트의 변화 등을 분석하였다. 그 결과, 일방향 및 양방향 반복수평하중이 작용할 경우 Out batter, Plumb, In batter 순으로 수평저항력과 최대 휨모멘트는 증가하였다. 최대 휨모멘트 발생위치는 일방향 보다 양방향 반복수평하중을 가할 때 조금 더 깊은 곳에서 나타났다. 또한, 상층의 모멘트는 Out batter, Plumb, In batter 순으로 모멘트가 증가하나 하층의 경우 Out batter, Plumb, In batter 순으로 감소하였고 일방향에 비해 양방향 반복수평하중이 작용할 때 상·하층의 모멘트 변화가 작게 나타났다.

Keywords : Dynamic Lateral load, Batter pile, Lateral resistance, Bending moment

1. 서 론

말뚝은 기초구조물 중에서 상부구조물의 하중을 하

부지반에 안정하게 전달·지지하기 위하여 가장 널리 사용되는 구조물이다. 말뚝이 구조물의 토압, 풍압, 파력, 토사유동에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝머리에

1 정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Cadastre & Civil Eng., Vision College of Jeonju)

2 비회원, 경기방재연구소 차장 (Deputy Head of Dept., Gyeonggi Disaster Management Institute)

3 정회원, 경상대학교 토목공학과 공학연구원 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engng., Engrg. Research Institute, Gyeongsang National Univ., Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, gkang@gnu.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 연직력뿐만 아니라 반복수평하중과 모멘트가 동시에 작용하게 된다. 특히 지진에 의하여 발생하는 수평하중은 매우 크고, 해안 구조물의 경우에 있어서는 파도에 의하여 발생하는 수평반복하중은 말뚝의 거동에 중요한 영향을 미친다. 그로 인해 발생하는 말뚝기초의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 영향을 미치므로 반복수평하중을 받는 말뚝의 해석과 설계는 매우 중요하다 (Hong, 2017).

수평력을 받는 말뚝 중에서 경사말뚝의 경우는, 교대나 교각기초 또는 인발하중에 대한 대책방안으로서 많은 시공이 이루어지고 있다. 모래지반에서 경사말뚝의 거동과 지지력에 영향을 미치는 인자에 대한 이해와 수평거동에측연구가 경제적인 설계와 상부구조물의 안정을 위해 필수적이다.

반복수평하중이 작용하는 말뚝에 대한 연구로는 Broms (1964)는 수평력을 받는 말뚝-지반계의 파괴형태를 고찰하여, 말뚝의 휨 강성과 근입길이 및 지반강성에 의해 말뚝을 분류하고, 점성토와 사질토로 나누어 말뚝의 극한 수평저항력을 구하는 방법을 제안하였으며, 사질지반에서 40cycle 이상의 반복재하를 할 때 휨이 2배 이상 증가되고 그 이후의 반복에서는 더 이상의 휨 증가는 없다고 하였다. Poulos(1982)는 정적반복 하중을 받는 점토속의 얇은 직사각형 단일말뚝에 대해 반복횟수에 따른 수평변위와 모멘트 관계, 깊이에 따른 모멘트 등을 연구하였다. Shintaro and Toyoaki(1994)는 지반반력 매체를 점탄성 Winkler 모델에 기초하여 수평반복하중에 의한 단일말뚝의 거동에 관해서 연구하였다. Lin and Lian(1999)는 20개의 실물크기 말뚝시험을 통하여 사질지반에 반복수평하중이 작용할 경우 말뚝 거동양상을 말뚝의 매설형태와 매입길이, 지반의 상대밀도와 반복재하 방법에 따라 분석하였다. Paik and Park(2010)은 해상풍력발전기초로 사용되는 단일말뚝이 반복수평하중을 받는 경우 말뚝의 거동 특성을 연구하여 말뚝의 영구수평변위와 영구회전각을 예측할 수 있는 산정식을 제안하였다. Baek et al.(2017)은 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 모형시험을 통해 누적 영구수평변위를 최초 재하 시 발생한 영구수평변위로 정규화한 영구변위를 평가하였으며, 모래지반의 상대밀도, 횡방향 반복하중의 재하횟수에 관한 식으로 나타내었다.

경사말뚝에 관한 연구로는 Matsuo(1938, 1939)가 15°와 30° 경사진 말뚝의 수평저항력의 시험결과 연직말뚝의 수평저항력이 경사말뚝보다 크다는 결론을 얻었으

며, Tschebotarioff(1953)가 가력방향으로 경사진 말뚝의 수평저항력이 가력 반대방향으로 경사진 말뚝보다 크다고 발표하였다. 그리고 Kubo(1965)는 유사한 시험을 통해 연직말뚝보다 경사말뚝의 수평저항력이 크고 가력방향으로 경사진 말뚝의 수평지지력이 가장 크다고 발표하였다. Petrasovits and Awad(1968)는 말뚝과 하중의 경사방향을 달리한 시험을 통해 연직말뚝과 경사말뚝의 지지력 차이는 수평지반 반력계수의 차이로 결론지었다. Mayerhof and Ranjan(1973)과 Mayerhof and Yalcin(1993)은 더욱 더 폭넓은 시험을 통하여 수평지지력에 영향을 미치는 인자들을 흙의 입자구조, 말뚝의 경사각도, 하중방향 등으로 규정하여 발표하였다. 또한 최근 말뚝에 작용하는 다양한 하중조건에 따른 연구들이 진행되고 있는데 Choi and Nam(2012)의 Bi-Directional과 Lee and Kim(2013)의 수직하중과 횡방향 하중을 동시에 받는 말뚝에 대한 연구들이 진행 되고 있다.

이렇듯 그동안의 대부분의 연구는 연직말뚝의 반복수평하중과 경사말뚝의 수평하중에 대한 연구가 이루어졌고 경사말뚝에 대한 반복수평하중에 대한 연구는 미진한 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 모형시험을 통하여 반복수평하중이 작용하는 단일경사말뚝의 저항거동특성을 파악하기 위하여 말뚝의 경사각과 수평재하방향을 변화시켜 시험을 행하였다. 경사말뚝의 거동특성은 토질특성, 말뚝의 휨강성, 말뚝의 경사각, 수평재하방향 등에 영향을 받는다. 그러나 모형시험은 영향을 주는 인자들을 모두 고려할 수 없으므로 본 연구에서는 토질조건과 모형말뚝의 휨강성은 일정하게 하고, 경사말뚝의 경사각과 수평재하방향을 변화시켜가면서 시험을 행하였다.

2. 모형시험

모래지반에서 반복수평하중을 받는 단일경사말뚝의 거동 특성을 파악하기 위한 시험 장치는 Fig. 1과 같다. 모형 시험에 사용된 강체 토조 크기는 500×1400×1000mm의 강재로 제작하였으며 이는 말뚝과 토조 벽면사이의 간섭이 일어나지 않는 5D(말뚝직경의 5배) 이상으로서 충분한 경계거리를 유지하였다. 시험에 사용된 모형말뚝은 선단이 폐쇄된 동관으로 Fig. 2와 같으며 제원은 Table 1과 같다. 모형말뚝 선정 시 상사관계를 고려하기 위해 원형의 동관을 사용하였고 Iai(1989)의 1g 상사비를 적용시켜 축소모사 하였다. 하지만 모형말뚝 재질의

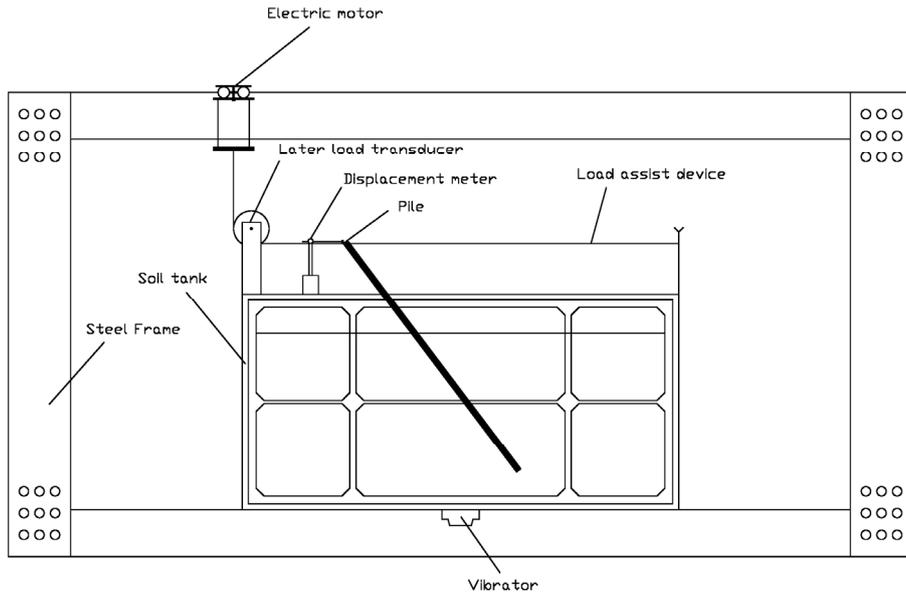


Fig. 1. Layout of model test apparatus

Table 1. Characteristics of model pile

Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	E (MN/mm ²)	I (cm ⁴)	EI (MN·cm ²)
940	28.6	1.27	12.25	1.02027	12.4983

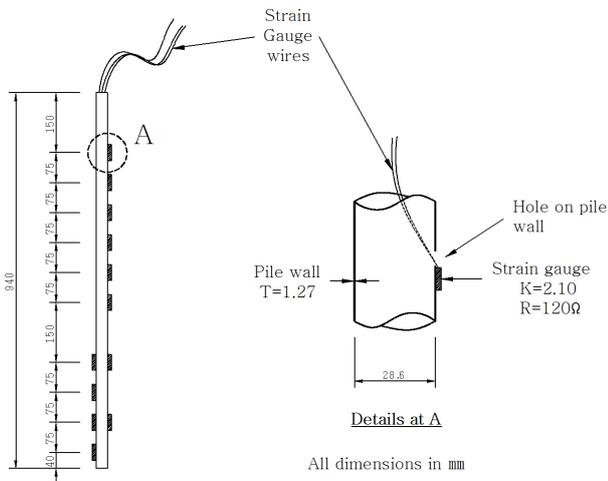


Fig. 2. Model pile

한계로 두께 및 휨강성 모두 상사관계를 만족시킬 순 없었다. 본 연구에서는 말뚝의 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향인자임을 감안해 말뚝의 두께를 1.27mm로 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족토록 하였다.

본 시험에 사용된 모형말뚝의 장단을 판별하기 위하여 Broms(1965)가 제안한 말뚝분류법을 이용하였다. Table 2에서 지반의 상대밀도 값을 이용하여 지반변형성능 계수(n_h)값을 정하고 그 값을 식 (1)에 대입하여 특성값(η)을 구한다. 구해진 η 값에 말뚝의 근입깊이(L)를 곱해

Table 2. Average values of n_h by Broms (1965)

Soil type	n_h (N/cm ³)	
	Dry or moist sand	Loose
Medium		5.39 ~ 6.84
Dense		14.7 ~ 17.64
Submerged sand	Loose	0.98 ~ 1.372
	Medium	3.43 ~ 4.41
	Dense	8.82 ~ 1.176

Table 3. Distinction of pile length by Broms (1965)

Description	Sand	Clay
Short pile	$\eta L \leq 2.0$	$\beta L \leq 2.25$
Medium pile	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$	-
Long pile	$\eta L > 4.0$	$\beta L > 2.25$

Table 4. Result of pile distribution

Relative	η	ηL	Result
Loose	0.04356	3.57192	Medium pile
Medium	0.05471	4.48622	Long pile
Dense	0.06643	5.44726	Long pile

Table 3에서 말뚝의 장단을 판별할 수 있다. 그 결과 본 시험에 사용된 말뚝은 Table 4와 같이 주변지반의 상대 밀도에 따라서 총 3가지의 형태로 결정되었다.

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (1)$$

지반의 재료는 낙동강 유역의 합천사로, 기진 상태에서 #4번체를 통과한 모래를 사용하였으며, 지반재료의 함수비는 0.08%이었다. 물리적 성질은 Table 5와 같고 입도 곡선은 Fig. 3과 같다. 지반의 상대밀도를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 모형 지반 하부에 밀도 측정 용기를 매설하여 모래를 포설한 후 토조 저면에 설치된 진동

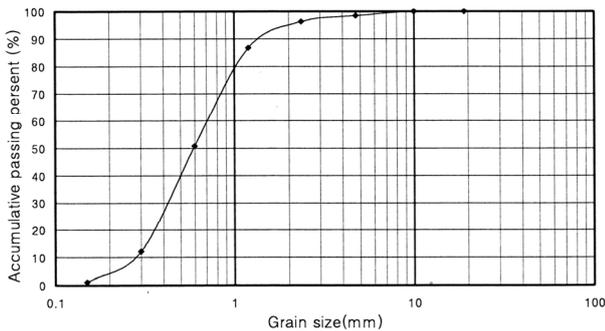


Fig. 3. Grain size distribution curve for Hapcheon sand



Fig. 4. Measuring the relative density

Table 5. Physical properties of Hapcheon sand

Property	Symbol	Value
Max. void ratio	e_{max}	0.79
Min. void ratio	e_{min}	0.58
Max. dry density	$\gamma_{dmax} (KN/m^3)$	15.78
Min. dry density	$\gamma_{dmin} (KN/m^3)$	13.92
Specific gravity	G_s	2.54
Average grain size	D_{50}	0.59
Effective grain size	D_{10}	0.28
Uniformity coefficient	C_u	2.50
Coefficient of gradation	C_g	0.92
Fineness modulus	F.M.	2.59

모터로 2, 15, 90초의 진동을 주어 상대밀도를 측정하였다. 그 결과 측정된 모형지반의 상대밀도는 Table 6과 같다.

반복수평하중이 작용하는 단일경사말뚝의 거동특성을 파악하기 위한 모형시험의 방법은 먼저 Fig. 5(a)와 같이 말뚝거치대를 이용하여 모형말뚝을 거치한다. 토조위에 #4 망을 50mm간격으로 2겹으로 설치하고 강사장치를 이용해 모래를 포설한다(Fig. 5(b)). 모형지반을 균등한 임의 밀도로 만들기 위해 토조 밑 진동모터를 작동시켜 일정시간 동안 진동다짐 한 후 지표면을 고른다(Fig. 5(c)). 말뚝 거치대를 분리한 후 말뚝에 수평력이 가해지도록 수평력 변환장치를 설치한 후(Fig. 5(d)) 변위계와 수평유지장치를 설치한다. 말뚝두부의 수평변위를 1mm/min 속도로 재하하면서 계측한다(Fig. 5(e)). 재하 후 하중을 제하하여 말뚝을 탄성 회복시킨다. 일정시간 방치 후 다시 하중을 가한다.

모형시험의 조건에서 지하수의 영향은 무시하였으며, 말뚝 두부에 작용하는 하중은 수평하중만 존재하고, 하중은 지속적으로 작용한다. 말뚝두부는 자유이며 시험 종류는 Table 7과 같다.

말뚝에 작용하는 하중의 작용방향에 따라 지반-말뚝 상호작용 거동의 양상이 다양하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 하중의 재하방향을 일방향(One-way)과 양방향(Two-way)으로 나누어 재하방향에 따른 지반-말뚝의 거동을 검토하고자 한다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 반복수평하중에 의한 말뚝두부변위와 수평저항력의 관계

Fig. 6은 단일경사말뚝에서 일방향으로 반복적인 수평하중이 작용할 때 재하 및 제하 상태에 따라 반복 횟수별 말뚝 두부변위와 수평저항력의 관계를 상대밀도(Dr)별로 나타낸 것이다. 일방향 하중을 받을 경우 변위에 따른 수평저항력의 변화는 상대밀도가 증가할수록

Table 6. Relative density in test ground

Vibrating time (sec)	Range of values of Dr (%)	Avg. Dr (%)	Classification
2	29.26~32.15	31	Loose
15	50.51~54.70	53	Medium
90	69.06~75.55	72	Dense



(a) Installing the model pile



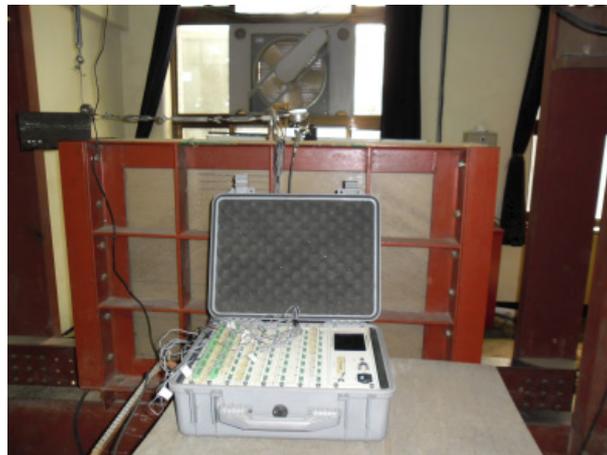
(b) Installing the #4 sieve and spraying the sand



(c) Forming the model ground



(d) Installing the displacement measuring instrument



(e) Starting measurement

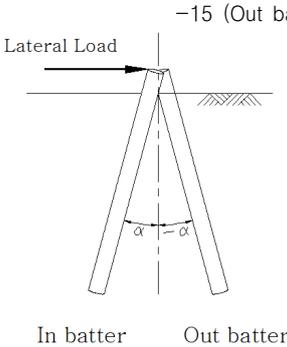
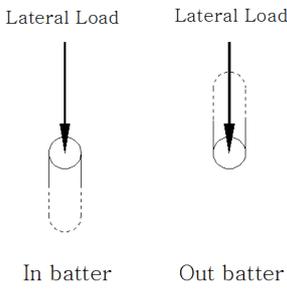
Fig. 5. Model test method

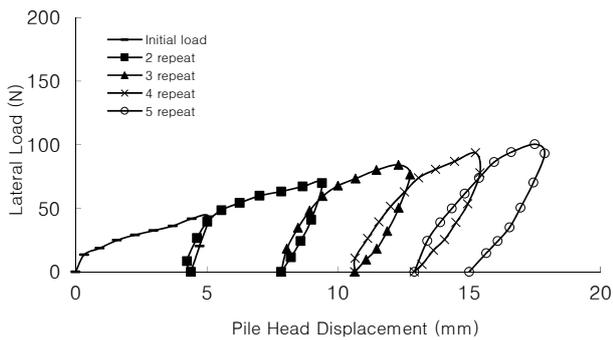
크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 초기 변위 이후부터 최종 반복하중까지 변형량은 상대밀도가 높을수록 작게 나타났다. 이는 조밀한 지반 일수록 느슨한 지반보다 재하하는 적은 변위가 발생하고, 제하 단계에서 더 회복됨을 알 수 있다. 그리고 Out batter 말뚝에서 보다

In batter 말뚝에서 변위에 따른 수평저항력의 변화가 크게 나타났다.

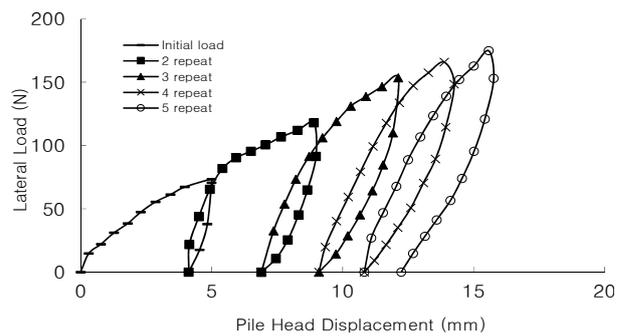
말뚝에 의해 전달되는 수평력에 의해 발생하는 지반 다짐 효과는 느슨한 지반일수록 크게 나타나므로 지반의 강도 증진에 영향을 미쳐 최대 수평저항력 변화가

Table 7. The summary of test cases in model test

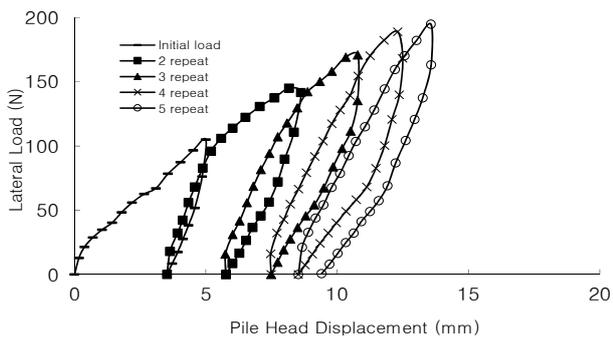
	One-way			Two-way		
Number of repeat	5 repeat			5 cycle		
Dr (%)	31	53	72	31	53	72
Batter angle (Degrees)						
Pile head-deflection	5 mm					
Velocity	1 mm/min					
Load-duration	Initial load → unload					
	Zero → load					
	Load → unload					



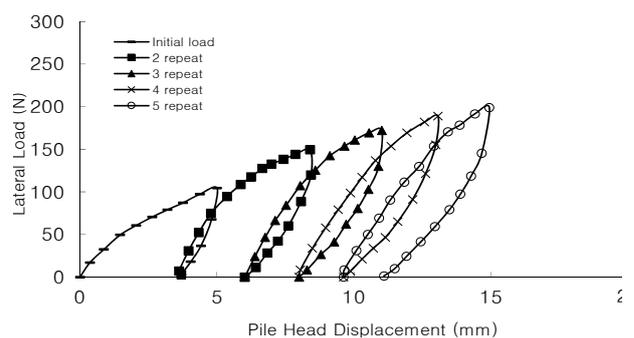
(a) Out batter pile, Dr=31°



(b) Out batter pile, Dr=53°



(c) Out batter pile, Dr=72°



(d) Plumb pile, Dr=31°

Fig. 6. Relation of the pile head displacement and lateral load according to the number of repeats (One way) (Continued)

큰 것으로 생각되어진다.

Fig. 7은 단일경사말뚝에서 양방향으로 반복수평하중이 작용할 때의 말뚝 두부변위에 따른 수평저항력을 나타낸 것이다. 말뚝에 양방향으로 정(+)-부(-) 하중 작

용이 반복되면 말뚝 주변의 지반은 파괴와 성형을 반복하게 된다. 그리고 양방향 반복하중은 말뚝의 최대변위가 발생하기까지 초기보다 느슨해진 변형된 지반 다짐 효과를 가져오며, 하중이 반복될수록 수평저항력이 감

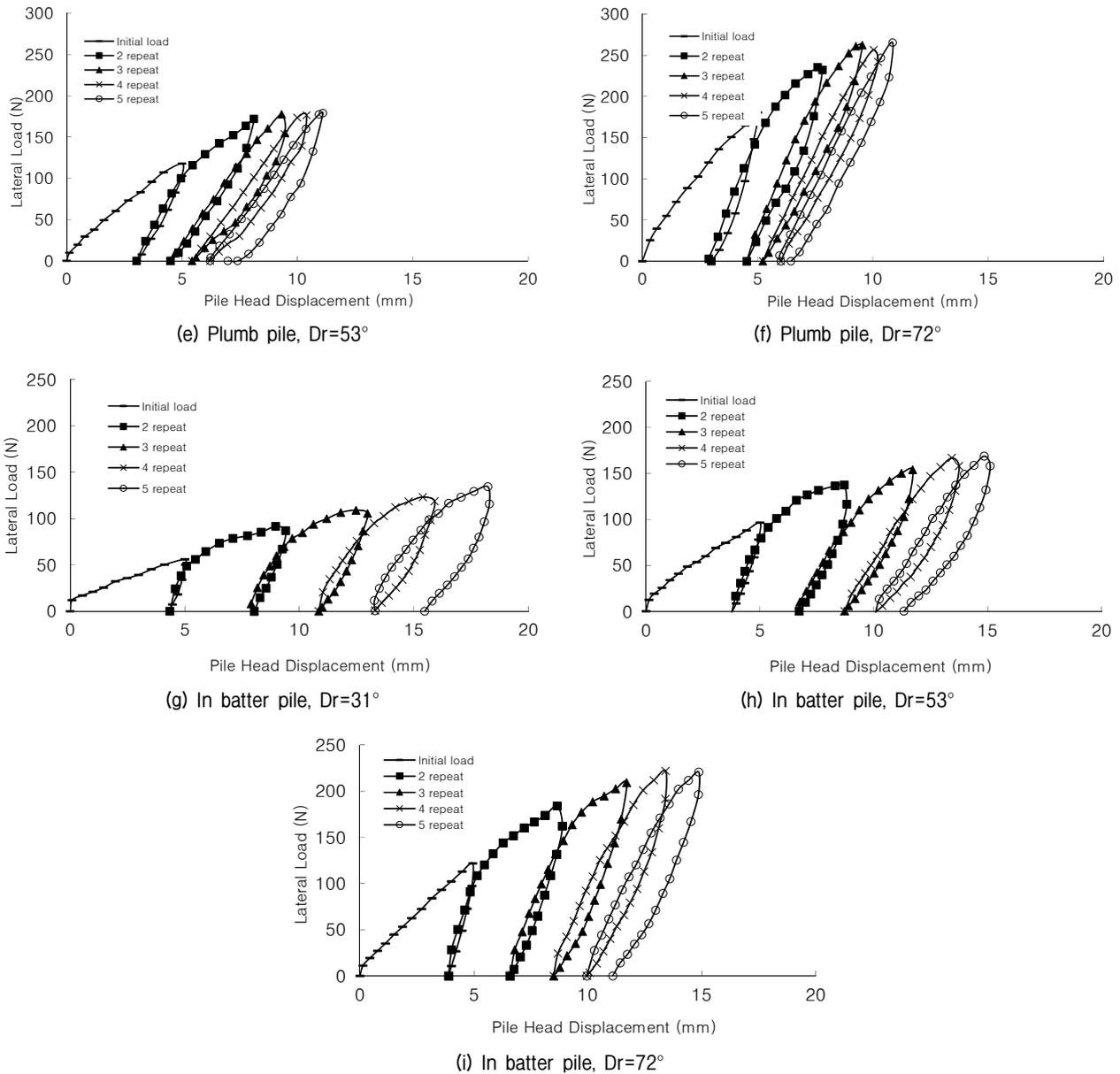


Fig. 6. Relation of the pile head displacement and lateral load according to the number of repeats (One way)

소하기 때문에 기울기는 점차 완만해진다. 그리고 지반 파괴에 의한 회복변형이 말뚝의 초기 위치로 돌아오지 못한 상태에서 하중이 반복되기 때문에 그래프는 정하중 작용시 오른쪽으로, 부하중 작용시 왼쪽으로 기울어지는 경향을 보이게 된다.

3.2 반복수평하중에 의한 모멘트 변화

Figs. 8, 9는 반복 횟수별 모멘트의 변화를 말뚝 각도에 따라 조밀한 지반과 느슨한 지반으로 나누어 나타낸 것으로, 각 단계(재하→제하)에서 말뚝 두부의 최대 변위(5mm)시 발생하는 모멘트 변화를 나타낸 것이다.

측정된 모멘트 값은 말뚝에 부착한 Strain gauge의 압축변형률로 계산하였으며, 적용식은 Rollins et al.(1998)이 제안한 식 (2)를 이용하였다.

$$M = \frac{E \cdot I \cdot \epsilon}{d} \quad (2)$$

여기서, ϵ : 압축변형률

EI : 모형말뚝의 휨강성

d : 모형말뚝의 반경

최대 휨모멘트(M_{max}) 발생위치는 일방향 보다 양방

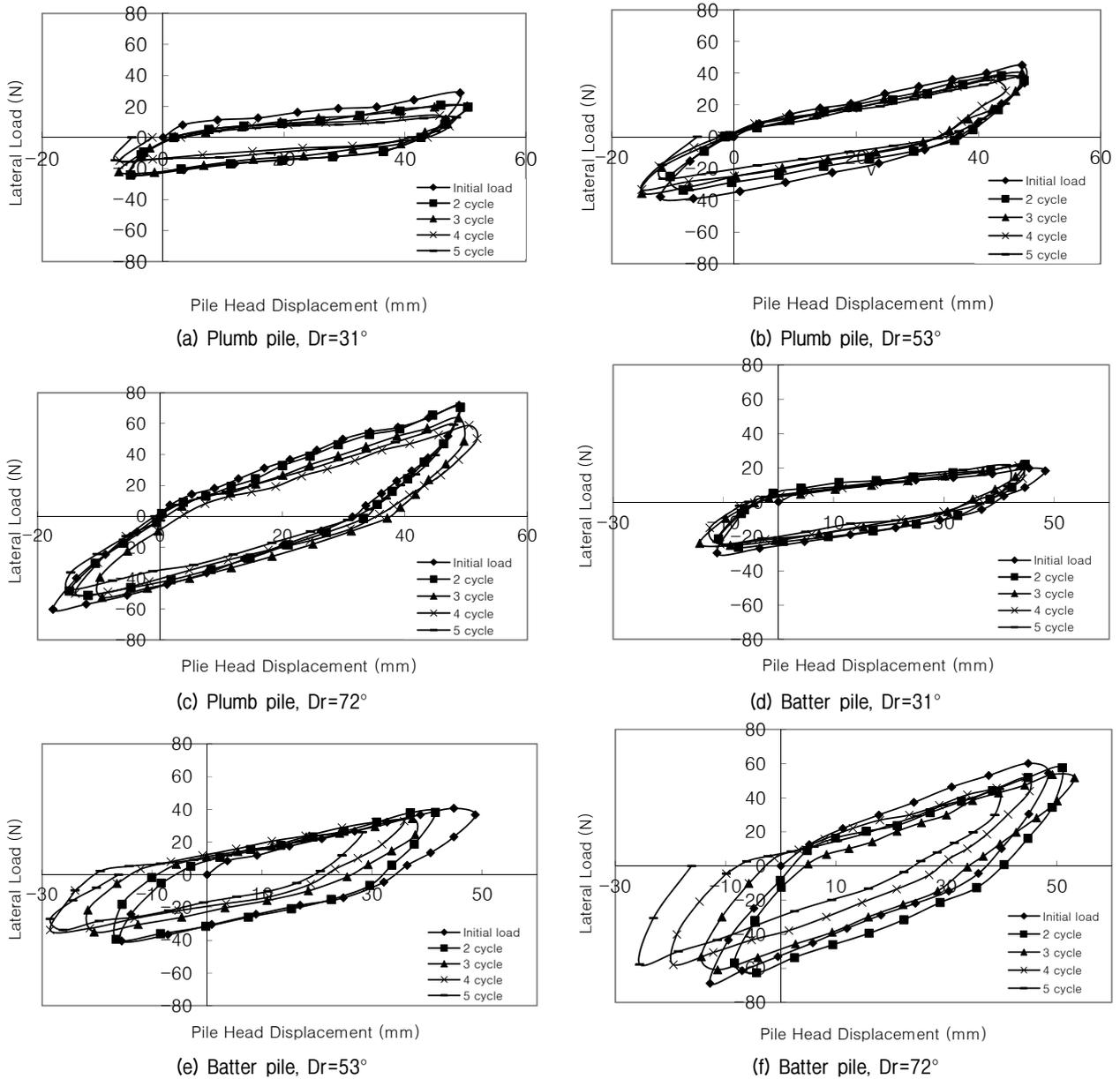


Fig. 7. Relation of the pile head displacement and lateral load according to the number of cycles (Two way)

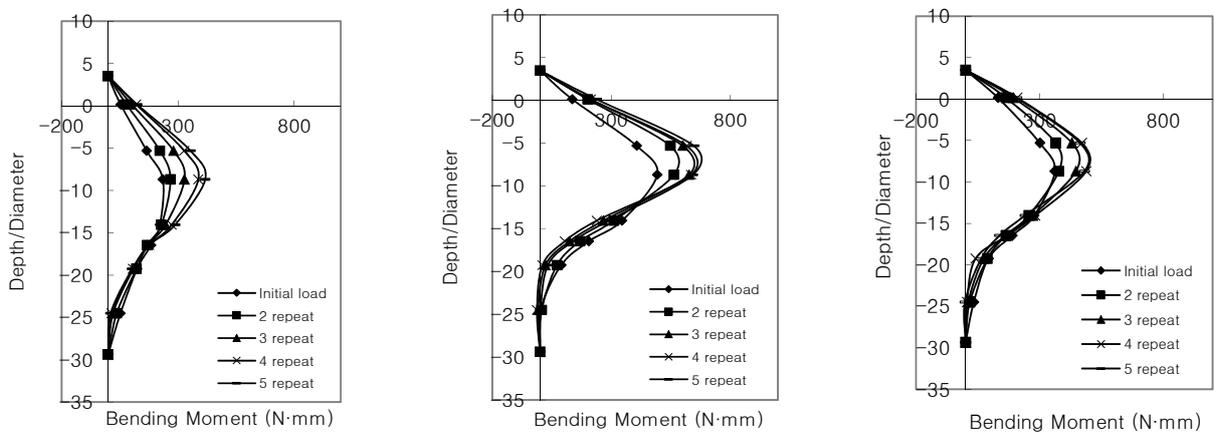


Fig. 8. Relation of the bending moment and depth ratio according to the number of repeats (One way) (Continued)

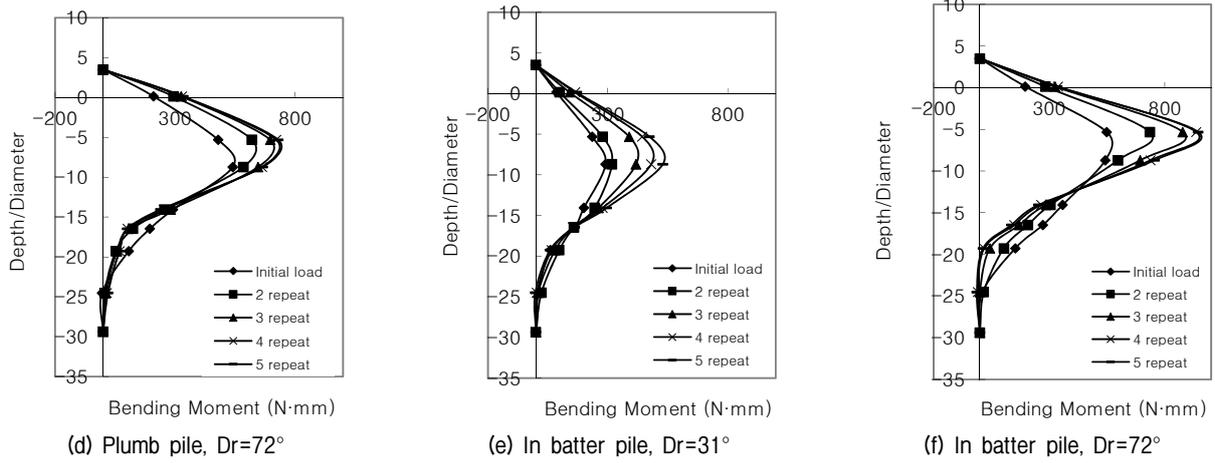


Fig. 8. Relation of the bending moment and depth ratio according to the number of repeats (One way)

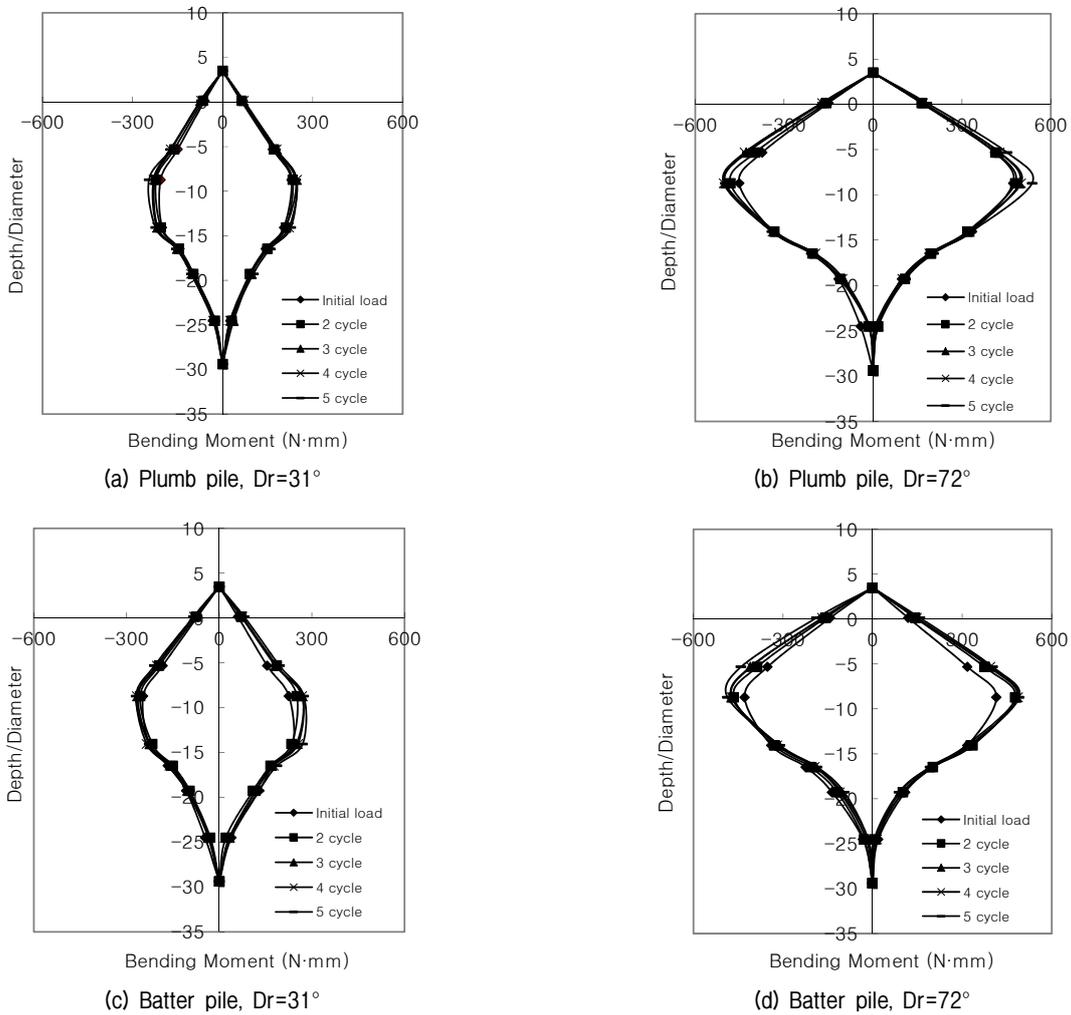


Fig. 9. Relation of the bending moment and depth ratio according to the number of cycles (Two way)

향에서 하중을 가할 때 조금 더 깊은 곳에서 나타났다. 일방향에서는 하중이 반복될수록, Out batter, Plumb, In batter 순으로 최대 휨모멘트는 증가하였다. 양방향에서는 Out batter, Plumb, In batter 순으로 최대 휨모멘트는

증가하나, 하중이 반복되더라도 최대 휨모멘트는 크게 변하지 않았다.

이는 일방향일 경우 수동 영역은 하중이 반복될수록 계속적인 압축으로 인하여 지반의 강도가 증진하지만,

양방향일 경우 반복적인 다짐만 일어날 뿐 동일지반에서는 하중이 반복되더라도 지지력 변화가 크게 없기 때문이다.

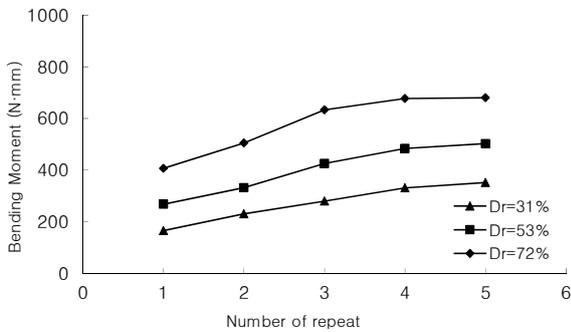
3.3 층별 모멘트 변화

Figs. 10, 11은 상층부와 하층부의 휨모멘트 변화를 말뚝의 각도에 따라 반복 횟수별로 나타낸 것이다. 상층부와 하층부는 최대 휨모멘트 발생위치를 기준으로 표현하였고 상층부는 지표에서 말뚝 직경의 5D, 하층은 19D의 깊이를 대표점으로 하여 모멘트 변화 양상을 나타내었다.

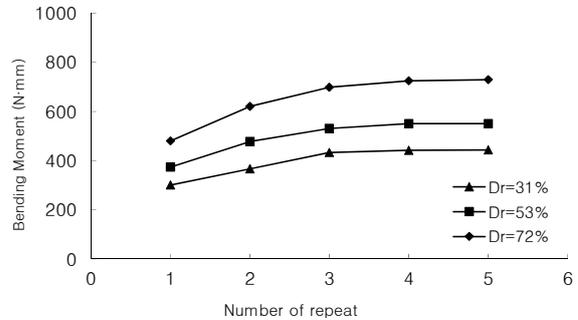
일방향 반복하중이 작용할 경우 상층 모멘트는 하중

이 반복될수록 증가한다. 또한 Out batter, Plumb, In batter 순으로 상층 모멘트는 증가한다. 그러나 하층 모멘트는 Out batter, Plumb, In batter 순이나 반복이 증가할수록 감소하고 있다. 이는 상층에서는 말뚝두부변위에 따라 초기 지반 수동영역이 계속적인 압축으로 인해 모멘트가 증가하지만, 하층은 하중이 반복될수록 모멘트 전이점을 중심으로 말뚝 선단부의 고정효과는 점점 감소함에 따라 모멘트도 감소하게 된다.

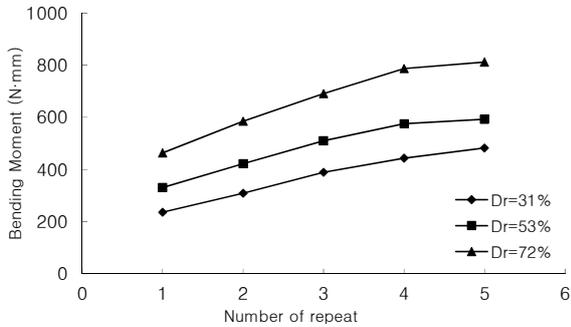
양방향으로 하중이 작용할 경우 상층, 하층 모두 정하중일 때 증가하지만, 부하중일 때에는 감소함을 알 수 있다. 또한, 조밀한 지반일수록 모멘트 변화는 하중의 반복 횟수가 증가할수록 크게 나타난다. 양방향일 일방향에 비해 상층의 모멘트 변화가 작은 것은 양방향은



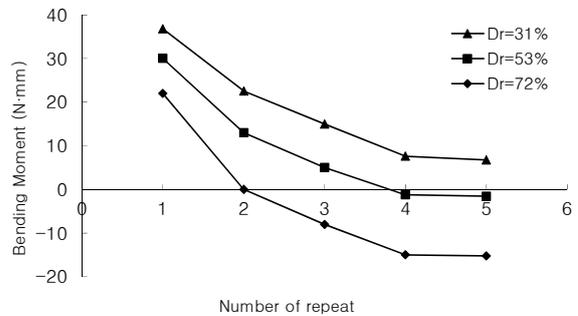
(a) Out batter pile, upper-layer



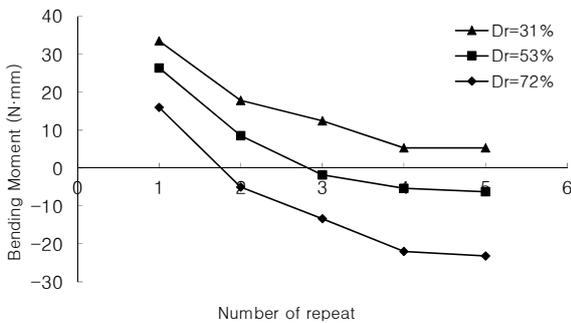
(b) Plumb pile, upper-layer



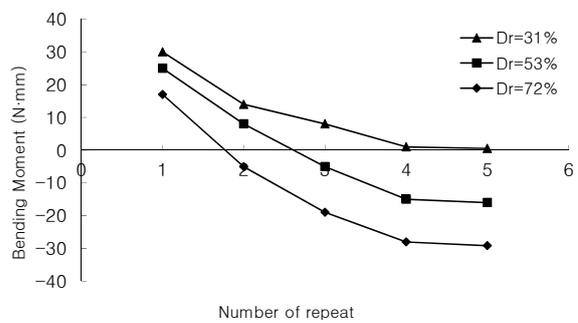
(c) In batter pile, upper-layer



(d) Out batter pile, lower-layer



(e) Plumb pile, lower-layer



(f) In batter pile, lower-layer

Fig. 10. Relation of the number of repeat and bending moment according to the relative density (One way)

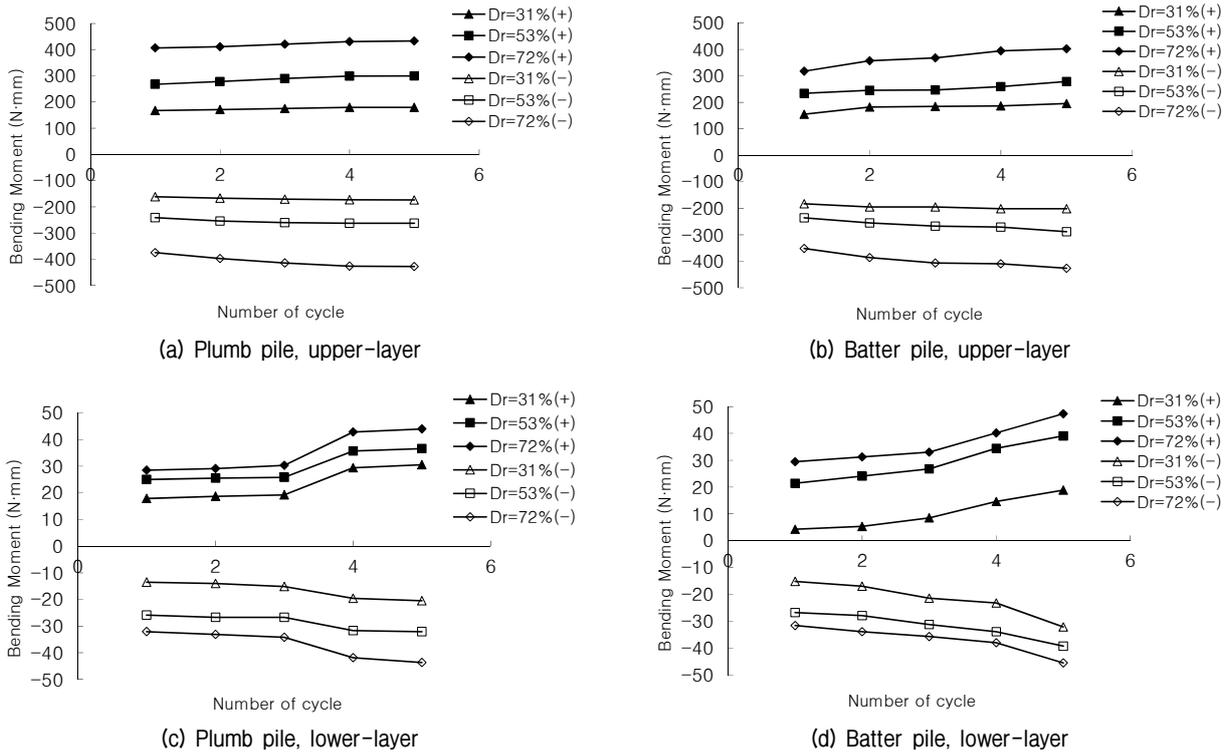


Fig. 11. Relation of the number of cycle and bending moment according to the relative density (Two way)

말뚝 주변의 함몰과 다짐이 반복적으로 발생하므로 일 방향에 비해 모멘트 변화가 작다. 또한 하층도 양방향으로 하중이 작용할 때 함몰과 채움의 반복으로 인해 일 방향에 비해 모멘트 변화가 작음을 알 수 있다.

3.2 기존 연구와의 비교

Figs. 12, 13은 Zhang, McVay, Lai(1999)가 원심모형 시험을 통해서 얻은 시험의 결과 값과 본 시험을 통해서 얻은 결과 값을 말뚝의 경사각도와 지반의 상대밀도에 따라 비교하여 나타낸 그림이다.

Zhang 등에 의해 행하여진 원심모형시험에 사용된 모

형지반의 재료는 자연건조모래이며, 지반조성은 느슨한 지반($Dr=36\%$)과 중간조밀지반(55%) 2가지로 조성했다. 사용된 모형말뚝은 알루미늄으로 제작하였고 재원은 Table 8과 같다. 본 연구와 같은 방법으로 말뚝을 설치한 후 지반을 형성하였고 경사말뚝의 각도는 3가지(-14.04° , 0° , 14.04°)이다.

느슨한 지반과 중간, 조밀지반 모두 Zhang 등의 시험

Table 8. Characteristics of model pile used in Zhang's experiment

Shape	Length (mm)	Wide (mm)	Material	Distribution
Square	304	9.5	Aluminium	Long pile

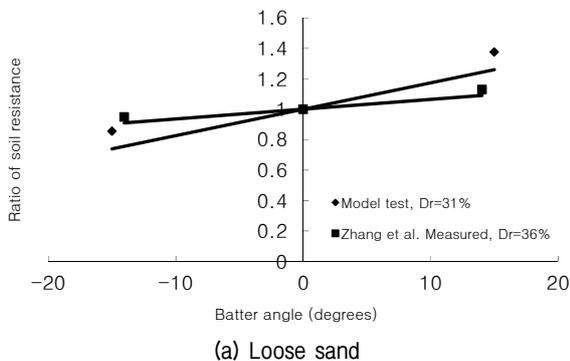
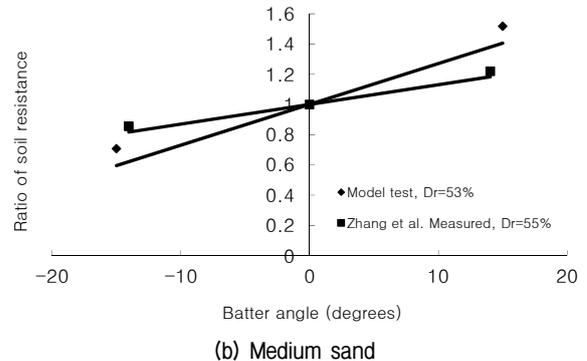


Fig. 12. Ratio of soil resistance comparison of Zhang et al's measurement and model test



값에 비해 말뚝 각도에 따른 하층의 증가비가 크게 나타났다. 지반의 조건과 말뚝조건이 달라 직접적인 비교는 어려우나, 그 경향은 비슷하게 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 모래지반에서 반복수평하중에 따른 단일경사말뚝의 거동특성을 모형시험을 통하여 분석하였으며, 그에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 일방향 및 양방향 반복수평하중이 작용할 경우 반복 횟수가 증가할수록 수평저항력은 증가하고, Out batter, Plumb, In batter 순으로 수평저항력이 증가함을 보였다.
- (2) 일방향 및 양방향 반복수평하중이 작용할 경우 Out batter, Plumb, In batter 순으로 최대 휨모멘트는 증가하였고 최대 휨모멘트 발생위치는 일방향 보다 양방향 반복수평하중을 가할 때 조금 더 깊은 곳에서 나타났다.
- (3) 일방향 및 양방향 반복수평하중이 작용할 경우 상층의 모멘트는 Out batter, Plumb, In batter 순으로 모멘트가 증가하나 하층의 경우 Out batter, Plumb, In batter 순으로 감소하였고 일방향에 비해 양방향 반복수평하중이 작용할 때 상·하층의 모멘트 변화가 작게 나타났다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1C1B5017461).

참고문헌 (References)

1. Baek, S. H., Kim, J. Y., Lee, S. H., and Chung, C. K. (2017), "Evaluation of Permanent Lateral Displacement of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Sandy Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.2, pp.17-26
2. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.90, No.SM2:27-63.
3. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.90, No.SM3:123-156.
4. Broms, B. B. (1965), "Design of Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.91,

- No.3. SM3:79-99.
5. Choi, Y. and Nam, M. S. (2012), "Case Study of Load Capacities for Bi-Directional Pile Load Tests", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.4, No.1, pp.5-10.
6. Hong, W. P. (2017), *Laterally Loaded Pile: Active and Passive Piles*, Circom, p.320
7. 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.
8. Kubo, K. (1965), "Experimental Study of the behaviour of Laterally Loaded Piles", *Proceeding of the 6th international Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*, Motrial, Que., Vol.2, pp.275-279.
9. Lee, J. and Kim, D. (2013), "Reviewing Load Response of Piles Subjected to Combined Axial and Lateral Loads", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.5, No.4, pp.15-24.
10. Limin Zhang, Michael C. Mcvay, and Peter W. Lai (1999), "Centrifuge Modeling of Laterally Loaded Single Battered Piles in Sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.1074-1080.
11. Lin, S. S. and Liao, J. C. (1999), "Permanent Strains of Piles in Sand due to Cyclic Lateral Loads", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.9, pp.798-802.
12. Matsuo, H. (1938), "Test on the Lateral Resistance of Piles", Report No.42, Research Institute of Civil Engineering, Ministry of Home Affairs, Japan.
13. Matsuo, H. (1939), "Test on the Lateral Resistance of Piles", Report No.46, Research Institute of Civil Engineering, Ministry of Home Affairs, Japan.
14. Meyerhof, G. G. and Ranjan G. (1973), "The Bearing Capacity of Rigid Piles under Inclined Loads in Sand. II : Batter Piles", *Cadian Geotechnical Fournal J.* Vol.10, pp.71-85.
15. Meyerhof, G. G. and Yalcin, A.S. (1993), "Behavior of Flexible Batter Piles under Eccentric and Inclined Loads in Layered Soil", *Cadian Geotechnical Fournal*, Vol.30, pp.247-256
16. Paik, K. H. and Park, W. W. (2010), "Permanent Defor Mations of Piles in Sand Under Cyclic Lateral Loads", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.11, pp.63-73
17. Petrasovits, G. and Awad, A. (1968), "Consideration on the Bearing Capacity of Vertical and batter Piles Subjected to Forces Acting in Different Directions", *Proceedings 3rd Budapest Conf. Soil Mech Found. Engg.* Akademiac Kiado, Budapest, pp.483-497.
18. Poulos, H. G. (1982), "Single Pile Response to Cyclic Lateral Load", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.108, No.3, pp.355-375.
19. Rollins, K. M., Peterson, K. T., and Weaver, T. J. (1998), "Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.6, pp.468-478.
20. Shintaro Yao and Toyoaki Nogami (1994), "Lateral Cyclic Response of Pile in Viscoelastic Winkler Subgrade", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.120, No.4, pp.758-775.
21. Tschebotarioff, G. P. (1953), "The resistance to the lateral loading of single piles and of pile groups", *ASTM Special Technical Publication*, No.154, pp.38-51.

Received : August 9th, 2017

Revised : September 19th, 2017

Accepted : September 20th, 2017