

모래지반의 상대밀도에 따른 횡방향 반복재하 시 말뚝의 극한지지력 평가

Effect of Relative Density on Lateral Load Capacity of a Cyclic Laterally Loaded Pile in Sandy Soil

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 김 준 영² Kim, Joon-Young
이 승 환³ Lee, Seung-Hwan 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Pile foundations used as offshore support structures are dominantly subjected to cyclic lateral loads due to wind and waves. In this study, a series of cyclic lateral load tests were performed on a pre-installed aluminum flexible pile in sandy soil with three different relative densities (40%, 70% and 90%) in order to evaluate the effect of cyclic lateral loads on lateral load capacity of a pile. The cyclic lateral loads increased the lateral load capacity of a pile at 40% relative density, whereas they decreased it at 70% and 90% relative densities. This can be explained by the fact that the cyclic lateral loads slightly densified the surrounding soil in relatively loose sand (40%), while the surrounding soil was disturbed in relatively dense sand (70% and 90%). These effects were more obvious as the cyclic lateral load amplitude increased, being independent with the saturation. Also, from the test results, an empirical equation for the lateral load capacity of a cyclic laterally loaded pile in sandy soil was developed in terms of relative density of the soil and the cyclic lateral load amplitude.

요 지

해상구조물을 지지하는 말뚝기초는 바람, 조류, 파랑 등의 영향으로 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는다. 본 연구에서는 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 극한지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 서로 다른 세 가지 상대밀도(40%, 70%, 90%)로 조성된 모래지반에서 모형말뚝시험을 수행하였다. 상대밀도 40%로 조성된 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변 지반이 조밀해짐에 따라 횡방향 극한지지력이 증가하였다. 반면, 상대밀도 70%와 90%로 조성된 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변 지반의 교란효과로 인하여 횡방향 극한지지력이 감소하였다. 이러한 횡방향 극한지지력의 증가 및 감소효과는 횡방향 반복하중의 크기가 커질수록 더욱 명확하게 나타났으며, 모래지반의 포화 여부에는 큰 영향을 받지 않았다. 모형시험 결과를 활용하여 모래지반의 상대밀도, 횡방향 반복하중의 크기에 따른 말뚝의 횡방향 극한지지력 산정 식을 제안하였고, 이를 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝의 설계 시 활용 가능하도록 하였다.

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Eng. Research Institute, Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-7347, Fax: +82-2-873-2684, geolabs@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 해양에너지 개발 및 해저플랜트 건설의 증가로 해양건설시장이 확대되고 있다. 이에 따라 해상구조물의 수요가 증가하고 있으며, 안정적인 성능확보를 위한 설계 및 시공에 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해상구조물은 일반적으로 말뚝기초에 의해 지지되며, 육상구조물과 달리 구조물의 자중에 의한 연직하중은 비교적 작은 반면, 바람, 조류, 파랑 등에 의한 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는다. 따라서 해상구조물의 안정성 및 사용성을 확보하기 위해서는 횡방향 반복하중 재하 시 말뚝기초의 거동을 예측하고 이를 설계 지배인자로 활용할 필요가 있으며, 특히 횡방향 극한지지력의 적절한 평가 및 확보는 핵심적 설계고려사항이라 할 수 있다.

일반적으로 말뚝의 설계 시 활용되는 횡방향 극한지지력은 지반의 소성평형상태를 기반으로 극한수평토압의 크기 및 깊이별 분포를 정의하여 평가한다(Broms, 1964; Barton, 1982; Zhang et al., 2005). 즉, 말뚝이 횡방향 정적하중을 받을 때 발현되는 주변 지반의 저항력을 바탕으로 횡방향 극한지지력을 결정하는 것이다. 그렇지만 실제 해상구조물에 사용되는 말뚝기초는 횡방향 반복하중의 영향을 받으며, 기존 연구에 따르면 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 지지거동은 횡방향 정적하중을 받는 경우와 지반의 저항력 측면에서 상당한 차이를 보인다고 알려져 있다. Long and Vanneste(1994)는 34개의 현장말뚝시험 결과를 바탕으로 횡방향 반복하중이 다양한 상대밀도의 모래지반에 설치된 말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 말뚝에 횡방향 반복하중이 재하되면 p - y 곡선방법에서 지반의 저항력으로 활용되는 초기지반반력계수와 극한지반반력이 감소됨을 밝혔다. 또한 LeBlanc et al.(2010)과 Nicolai and Ibsen(2014)은 1g 모형말뚝시험을 수행하여 장기적인 횡방향 반복하중이 모래지반에 설치된 말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 평가하였다. Long and Vanneste(1994)의 연구와는 반대로, 말뚝에 재하되는 횡방향 반복하중이 주변 지반의 저항력을 증가시켜서 말뚝 두부에서 평가된 하중-변위 곡선의 초기 강성이 증가되는 현상을 확인하였다. 이와 같이 모래지반에 설치된 말뚝

에 작용하는 횡방향 반복하중은 말뚝 주변 지반의 저항력을 증가 혹은 감소시키며, 그 결과 말뚝의 횡방향 지지거동 및 극한지지력은 횡방향 정적하중이 재하되는 경우와 다르게 나타난다. 따라서 다양한 상태의 모래지반에 설치된 말뚝기초에 대해 횡방향 반복하중이 지지거동 및 지지력에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 설계에 반영할 필요가 있지만, 이와 관련한 연구는 부족한 실정이다. Paik(2010)은 1g 모형말뚝시험을 수행하여 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 극한지지력을 평가한 바 있으나, 이는 상대밀도 90%의 매우 조밀한 지반에서만 수행된 제한적인 결과였다.

이에 본 연구에서는 서로 다른 상대밀도(40%, 70%, 90%)로 조성된 모래지반에서 1g 모형말뚝시험을 수행하여 모래지반의 상대밀도에 따라 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 극한지지력에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 모형시험 결과를 바탕으로 모래지반의 상대밀도, 횡방향 반복하중의 크기에 따른 말뚝의 횡방향 극한지지력 산정 식을 제안하였고, 이를 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝의 설계 시 활용 가능하도록 하였다.

2. 모형말뚝시험 방법 및 조건

2.1 모형시험 장비

본 연구의 모형말뚝시험은 두께 20mm의 강화아크릴 판으로 제작된 폭 600mm, 길이 1800mm, 높이 1000mm의 직육면체 모형토조에서 수행되었다(Fig. 1). 모형시험 시 말뚝의 횡방향 거동이 서로 간섭을 일으키지 않는 설치간격이 말뚝직경의 10배임을 고려하여(Poulos and Davis, 1980; Rao et al., 1998), 모형토조에 말뚝을 동시에 4본 설치할 수 있도록 설계하였다. 또한 모형토조 하부에 나사형태의 모형말뚝 고정단을 설치하여 연암에 근입된 말뚝을 모사할 수 있도록 하였다.

알루미늄 파이프를 이용하여 모형토조에 동시에 설치 가능한 동일한 제원(외경 30mm, 두께 2mm, 길이 1400mm, 근입 깊이 950mm)의 말뚝 4본을 제작 및 활용하였다. 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 지지거동을 보다 현실적으로 모사하기 위하여 일반적으로 사용되는

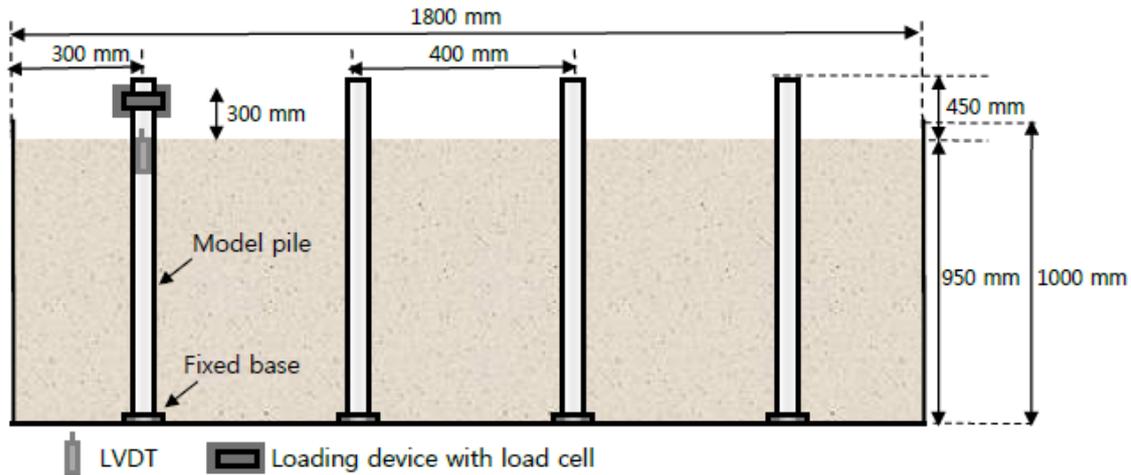


Fig. 1. The schematic diagram of model pile experiment set-up

Table 1. Material properties of model pile

	Scale factor	Prototype	Model ($\lambda=15$)
Outside diameter (mm)	λ	450	30
Thickness (mm)	λ	40	2
Length (mm)	λ	21000	1400
Embedment depth (mm)	λ	14250	950
Flexural rigidity (Ncm ²)	$\lambda^{4.5}$	2.29E+8	1.19E+3

연성의 강관말뚝을 원형(prototype)으로 선정하고 Iai(1989)의 1g 상사비를 적용시켜($\lambda=15$) 축소모사 하였다. 단, 모형말뚝 재질의 한계로 원형말뚝과 모형말뚝의 두께 및 휨강성(flexural rigidity)의 상사관계를 모두 만족시키는 것은 불가능하였다. 본 연구에서는 말뚝의 두께 보다는 휨강성이 횡방향 지지거동에 지배적인 영향을 미치므로, 이를 감안하여 모형말뚝의 두께를 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족하도록 하였다. 모형시험에 사용된 모형말뚝의 제원은 Table 1과 같다.

모형말뚝시험 시 횡방향 정적하중 및 횡방향 반복하중은 변위제어가 가능한 횡방향 재하장비를 활용하여 지표로부터 300mm 떨어진 지점에서 재하하였다. 모형말뚝시험이 진행되는 동안 모형말뚝에 재하되는 횡방향 하중 및 횡방향 변위를 측정하기 위하여 하중계(load cell) 및 변위계(LVDT)를 설치하였고, 정적 데이터로거(static data logger)를 활용하여 2초에 1회씩 측정하였다.

2.2 모형지반

본 연구에서는 모래시료 중 그 거동 및 특성이 널리 알려진 주문진 표준사를 사용하였다. 주문진 표준사의 공학적 특성을 평가하기 위하여 기본물성시험을 수행

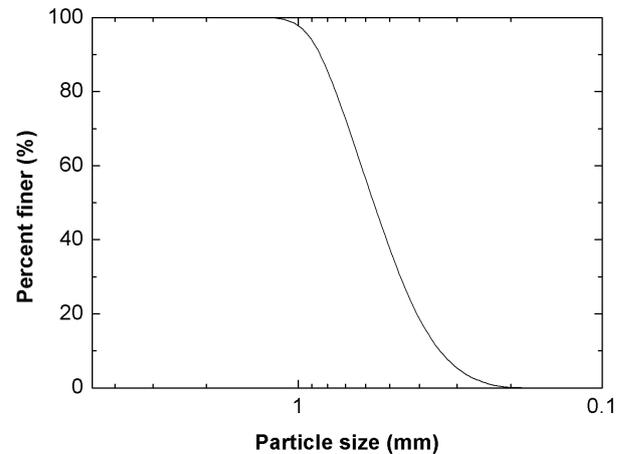


Fig. 2. Particle size distribution of Jumoonjin sand

Table 2. Index properties of Jumoonjin sand

USCS	SP	e_{max}	0.99
D_{10} (mm)	0.35	e_{min}	0.63
D_{50} (mm)	0.58	C_u	1.68
G_s	2.65	D_r (%)	40, 70, 90

하였고, 입도분포곡선과 기본물성값을 각각 Fig. 2와 Table 2에 나타냈다. 주문진 표준사는 통일분류법에 의해 SP(poorly graded sand)로 분류되고 평균유효입경(D_{50})은 0.58mm이다. Nunez(1988)에 따르면 말뚝의 외

경이 지반시료 평균유효입경의 45배보다 크면 입자의 크기효과(internal scale effect)를 무시할 수 있다고 알려져 있는데, 본 연구에서 사용된 모형말뚝의 외경은 주문진 표준사 평균유효입경의 약 52배로 이를 만족하였다.

모형지반은 다양한 상대밀도를 가지는 건조토 혹은 포화토 단일지반으로 조성하였다. 서로 다른 상대밀도에서 모형말뚝시험을 수행하기 위하여 상대밀도 40%, 70%, 90% 건조지반을 조성하였으며, 각각의 상대밀도는 느슨한 지반(loose), 약간 조밀한 지반(medium dense), 매우 조밀한 지반(very dense)을 대표한다. 모형지반은 일곱 층(150mm 씩 다섯 층, 100mm 씩 두 층)으로 나누어 조성하였다. 우선 각 층을 조성하는데 필요한 시료의 양을 층별 체적과 상대밀도를 고려하여 결정하고 시료를 준비하였다. 준비된 시료를 모형토조에 층별로 채우고, 공기압축기(air compressor)로부터 압축 공기를 전달받아 이를 다짐 에너지로 사용하는 에어샌드래머(air sand rammer) 장비를 활용하여 시료를 다짐으로써 목표한 상대밀도를 가지는 모형지반을 조성하였다. 이때, 상부 지반의 다짐 시 하부 지반의 밀도가 다소 증가하는 것을 고려, 이를 방지하기 위해 색모래로 각 층의 경계를 표시하고 층별 높이를 확인하며 다짐을 실시하였다. 또한 지반포화에 따른 영향을 평가하기 위하여 상대밀도 40%와 70% 포화지반을 조성하여 추가적인 시험을 수행하였는데, 이 때 시료를 7일 동안 물에 담가둔 뒤(soaked) 지반조성에 활용하여 입자 사이에 존재하는 공기의 영향을 최소화 하였다. 각각의 지반조성시 여러 위치에 알루미늄 캔을 설치하여 위치별 상대밀도를 측정하였고, 그 결과 모형지반의 균질성을 확인하였다.

2.3 모형시험 계획 및 조건

본 연구의 모형말뚝시험은 제원이 동일한 4본의 모형말뚝을 모형토조 하부에 고정시켜 설치하고 모형지반을 조성한 뒤 수행되었다. 우선 첫 번째 말뚝에 횡방향 정적하중을 재하하여 정적 횡방향 극한지지력 (H_{us})을 평가하였다. 그리고 나머지 세 말뚝에 각각 정적 횡방향 극한지지력의 20%, 40%, 60%에 해당하는 횡방향 하중을 20회 씩 양방향 반복재하한 후(Fig. 3) 횡방향 정적하중을 재하하여 반복하중의 효과를 고려한 말뚝의 횡방향 극한지지력 (H_{uc})을 평가하였다. Barton(1979)과 Hoadley et al.(1981)에 의하면 말뚝의 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 지지거동에 미치는 영향은 초기 반복재하 시 대부분 발생하며, 반복횟수 10~20회부터는 그 영향이 크지 않다고 알려져 있다. 이를 고려하여 횡방향 반복하중의 재하횟수는 20회로 결정되었고, 재하속도는 0.06mm/s로 과잉간극수압이 발생되지 않도록 충분히 천천히 재하하였다. 본 연구에서 수행된 모형말

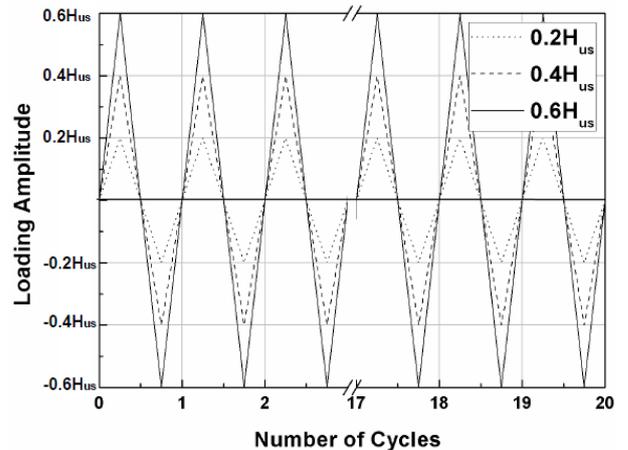


Fig. 3. Sequence of cyclic loading

Table 3. Experiment programs

State	D_r (%)	Saturation	Loading conditions (Number of cycles: 20)
Loose sand	40	X	Static Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$) and Static
		O	Static Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$) and Static
Medium dense sand	70	X	Static Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$) and Static
		O	Static Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$) and Static
Very dense sand	90	X	Static Cyclic ($0.2H_{us}$, $0.4H_{us}$, $0.6H_{us}$) and Static

독시험의 조건을 Table 3에 요약하였다.

3. 모형말뚝시험 결과 및 분석

모형말뚝시험 결과로 각 시험조건에 대한 횡방향 하중-변위곡선을 얻었고, 이를 바탕으로 말뚝의 횡방향 극한지지력을 평가 및 분석하였다. 횡방향 하중-변위 곡선으로부터 횡방향 극한지지력을 평가하는 기준은 여러 연구자들로부터 다양한 형태로 제안되어 왔는데 (Meyerhof et al., 1981; Davidson et al., 1982; Fleming et al., 1992) 본 연구에서는 말뚝 단면을 원형으로 가정하여 말뚝 직경의 10% 만큼 변위가 발생하였을 때를 극한상태로 간주하는 Fleming et al.(1992)의 파괴기준을 적용하였다.

3.1 정적 횡방향 극한지지력

Fig. 4는 말뚝에 횡방향 정적하중만을 재하 한 모형말뚝시험으로부터 평가된 횡방향 하중-변위 곡선이다. 앞서 언급한 바와 같이 Fleming et al.(1992)의 파괴기준을 적용하여 말뚝 직경의 10%(3mm)에 해당하는 변위가 발생했을 때의 횡방향 하중을 횡방향 극한지지력으로 평가하여 Table 4에 나타냈다. Table 4와 같이 말뚝의

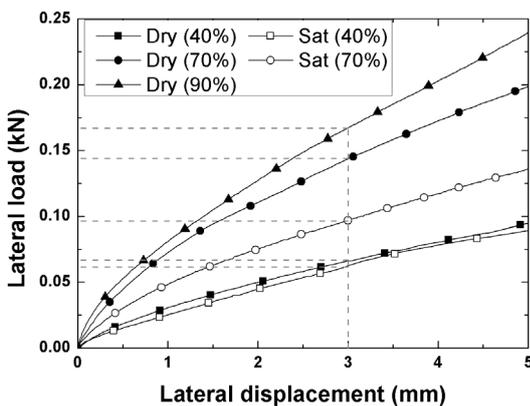


Fig. 4. Static lateral load-displacement curves

Table 4. Static and cyclic lateral load capacities

D_r (%)	40		70		90	
	Dry	Saturated	Dry	Saturated	Dry	
Static lateral load capacity, H_{us} (kPa)	0.0658	0.0608	0.1437	0.0968	0.1673	
Cyclic lateral load capacity, H_{uc} (kPa)	$H = 0.2H_{us}$	0.0705	0.0638	0.1330	0.0874	0.1455
	$H = 0.4H_{us}$	0.0840	0.0745	0.1238	0.0823	0.1318
	$H = 0.6H_{us}$	0.0883	0.0800	0.1196	0.0801	0.1226

정적 횡방향 극한지지력은 지반의 상대밀도가 커질수록 증가하는 경향을 보였으며, 지반의 포화 시 감소하였다. 이는 지반의 상대밀도가 증가할수록 지반의 유효구속압이 커지고 포화 시 지반의 단위중량 감소에 의해 유효구속압이 작아져, 말뚝이 설치된 지반의 횡방향 저항력이 증가 혹은 감소하기 때문으로 판단된다.

3.2 반복하중 재하 시 횡방향 극한지지력

앞서 언급한 바와 같이, 횡방향 반복하중 재하시험을 위한 하중의 크기는 평가된 정적 횡방향 극한지지력의 20%, 40%, 60% 수준으로 결정되었다. 이후, 결정된 크기의 횡방향 하중을 말뚝에 20회 씩 양방향 반복재하한 후 횡방향 정적하중을 재하하여, 반복하중의 효과를 고려한 말뚝의 횡방향 극한지지력을 평가하였다(Fig. 5). Fig. 5와 같이, 말뚝에 횡방향 하중이 반복적으로 재하 되면 말뚝-지반 사이에서 누적 영구수평변위가 발생되어 말뚝의 횡방향 지지력 평가 시 다소 영향을 미칠 수 있다. 그렇지만 본 연구에서는 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 극한지지력 평가 시 누적 영구수평변위에 대한 영향을 배제하였다. 본 연구에 적용된 양방향 반복재하 방법은 누적 영구수평변위의 크기가 한방향 반복재하에 비해 매우 작게 발생한다고 알려져 있어(Parry and

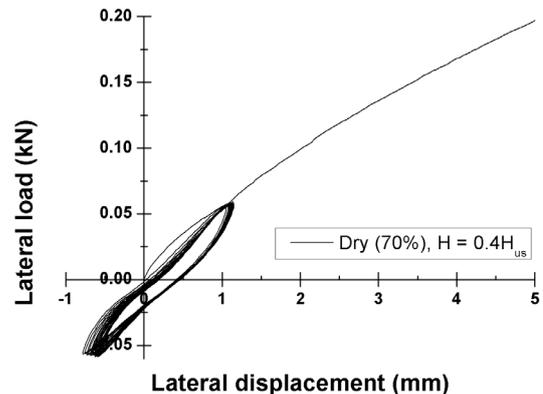


Fig. 5. Cyclic lateral load-displacement curves (Dry, $D_r=70\%$, $H=0.4H_{us}$)

Sanglamer, 1977; Barton, 1982; Paik et al., 2011) 그 영향이 크지 않으며, 실제 말뚝의 경우 횡방향 반복하중의 방향이 특정되어있지 않아 모형시험 시 발생된 영구수평변위를 지지력 평가에 포함하는 것이 현실적이지 않다고 판단하였기 때문이다. 따라서 Fig. 6과 같이 누적 영구수평변위의 영향을 배제한 뒤, 말뚝에 작용하는 횡방향 반복하중에 의한 지반의 저항력 변화를 독립적으로 평가하였다.

Fig. 6은 횡방향 반복하중 재하 후 수행된 횡방향 재

하시험으로부터 평가한 횡방향 하중-변위곡선을 정적 하중시험 결과와 함께 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 상대밀도 40% 모래지반에 설치된 말뚝이 횡방향 반복하중을 받는 경우 지반의 강성 및 강도가 증가하여 말뚝의 횡방향 극한지지력이 증가하였다. 반면 Fig. 6(c), (d), (e)는 상대밀도 70%와 90% 모래지반에 설치된 말뚝이 횡방향 반복하중을 받을 때 지반의 강성 및 강도가 감소하여 말뚝의 횡방향 극한지지력이 감소하는 현상을 보여준다. 이는 Baek et al.(2014)이 수

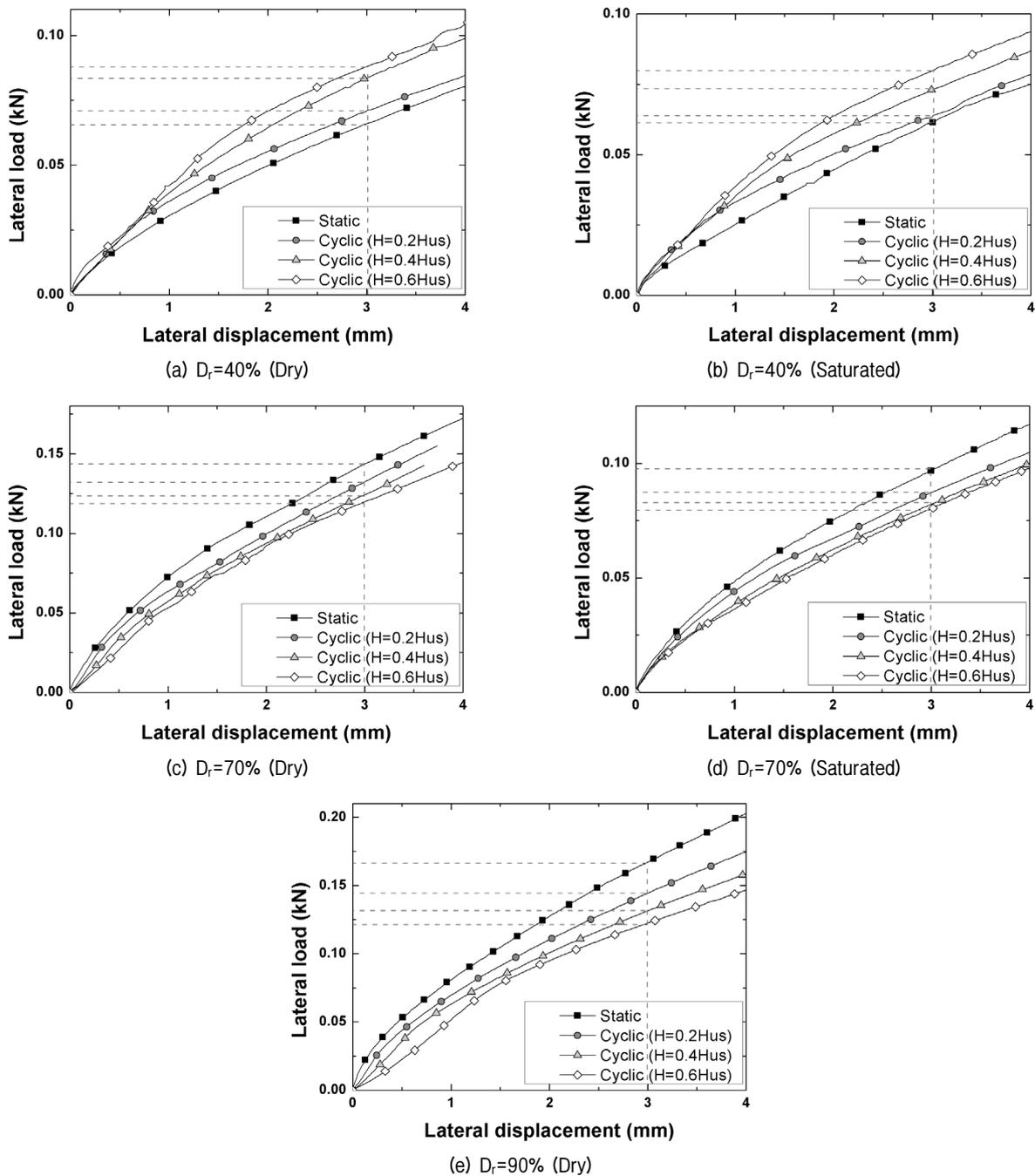


Fig. 6. Static and cyclic lateral load-displacement curve

행한 모래지반의 상대밀도에 따른 말뚝 깊이별 지지거동 평가 연구에서 밝혔듯이, 상대밀도 40%의 비교적 느슨한 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변지반이 원지반보다 조밀해지는 반면, 상대밀도 70%와 90%의 비교적 조밀한 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변 지반이 교란되어 지반의 지지능력이 감소하기 때문에 판단된다. 각각의 지반조건 및 하중조건 별로 평가된 횡방향 극한지지력은 Table 4와 같다.

횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 극한지지력에 미치는 영향을 보다 정량화하여 평가하기 위해서 각 시험조건 별로 평가된 반복하중 재하 시 횡방향 극한지지력을 동일 지반조건에서 평가된 정적 횡방향 극한지지력으로 나누어 정규화 된 횡방향 극한지지력 (H_{uc}/H_{us})으로 변환시켰다. Fig. 7은 정규화 된 횡방향 극한지지력을 정적 횡방향 극한지지력과 말뚝에 가해진 반복하중 크기 (H)의 비로 정의되는 정규화 된 횡방향 하중 (H/H_{us})과 함께 나타낸 것이다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 극한지지력에 미치는 영향은 횡방향 하중의 크기가 클수록 더 명확하게 나타났으며, 대체적으로 선형적인 관계를 가졌다. 또한 지반의 상대밀도가 높을수록 횡방향 극한지지력의 감소효과가 명확했으며, 지반의 포화여부는 횡방향 반복하중 효과 발현에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 횡방향 반복하중 재하 시 말뚝의 횡방향 극한 지지력 산정식 제안

본 연구의 모형말뚝시험 결과에서 확인할 수 있듯이,

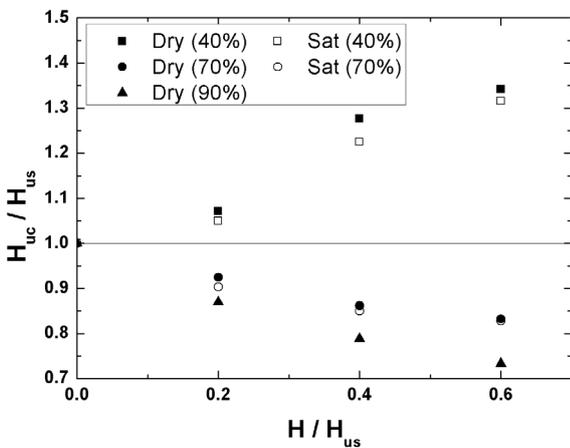


Fig. 7. Normalized cyclic lateral load capacity

횡방향 반복하중 재하 시 말뚝의 횡방향 극한지지력은 지반의 상대밀도와 횡방향 반복하중의 크기에 영향을 받으며 지반의 포화여부와는 큰 관련이 없었다. Fig. 7과 같이 정규화 된 횡방향 극한지지력은 횡방향 반복하중 크기와 대체적으로 선형의 관계를 가지므로, 식 (1)의 선형회귀식을 활용한 선형회귀분석을 수행하여 모래지반의 상대밀도, 횡방향 반복하중 크기에 따른 횡방향 극한지지력 산정식을 평가할 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이, 지반의 포화 여부는 횡방향 반복하중 효과 발현에 큰 영향이 없었기 때문에, 각 상대밀도 별로 선형회귀분석을 수행하였다.

$$H_{uc}/H_{us} = A + B(H/H_{us}) \quad (1)$$

$$H_{uc} = H_{us}[A + B(H/H_{us})] \quad (2)$$

선형회귀분석 결과, Fig. 8에 나타낸 것과 같이 각 상대밀도 별로 절편과 기울기를 평가하여 선형회귀식의 A와 B를 결정할 수 있었다. 수행된 회귀분석 결과를 식 (1)에 대입하고 식 (2)의 형태로 정리하여 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 설계 시 활용 가능한 횡방향 극한지지력 산정식을 제안하였다(Table 5).

Table 5의 산정식을 활용하면 느슨한 모래지반 ($D_r=40\%$), 약간 조밀한 모래지반 ($D_r=70\%$), 매우 조밀한 모래지반 ($D_r=90\%$)에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 극한지지력을 산정할 수 있다. 추가적으로, 본 연구에서 경험적으로 제안된 산정식의 신뢰성을 검증하기 위하여 Paik(2010)의 연구와 유사한 방법으로

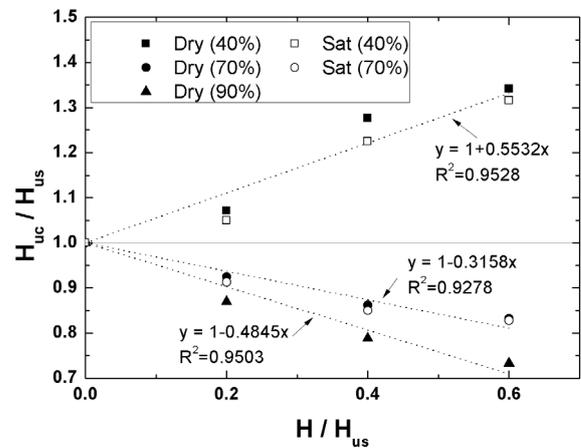


Fig. 8. Regression analysis of normalized cyclic lateral load capacity

Table 5. Empirical equations of cyclic lateral load capacity of pile foundation in sand

State	D_r (%)	Cyclic lateral load capacity, H_{uc} (kPa)
Loose sand	40	$= H_{us}[1+0.5532(H/H_{us})]$
Medium dense sand	70	$= H_{us}[1-0.3158(H/H_{us})]$
Very dense sand	90	$= H_{us}[1-0.4845(H/H_{us})]$

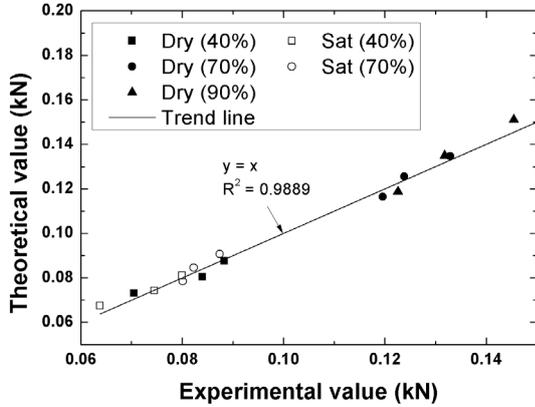


Fig. 9. Comparison between experimental values and theoretical values

모형말뚝시험으로 평가된 극한지지력과 제안된 산정식을 통해 계산된 극한지지력을 비교하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이, 제안된 횡방향 극한지지력 산정식을 통해 모형말뚝시험의 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 단, 본 연구에서 제안된 횡방향 극한지지력 산정식은 제한된 조건하에서 수행된 모형말뚝시험을 통해 평가된 것이므로, 보다 일반적인 경우에 적용하기 위해서는 추가적인 말뚝시험을 수행하여 이를 검증하는 과정이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 횡방향 극한지지력을 평가하기 위하여 1g 모형말뚝시험을 수행하였다. 이를 위하여 서로 다른 상대밀도 (40%, 70%, 90%)로 조성된 건조토 및 포화토 단일지반에서 횡방향 정적하중 및 반복하중 시험을 수행하여 횡방향 반복하중이 말뚝의 횡방향 극한지지력에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 상대밀도 40% 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 극한지지력은 정적 횡방향 극한지지력에 비해 증가하였고, 상대밀도 70%와 90%

모래지반에서는 감소하는 현상을 보였다. 이는 상대밀도 40%의 비교적 느슨한 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변지반이 원지반보다 조밀해지는 반면, 상대밀도 70%와 90%의 비교적 조밀한 모래지반에서는 횡방향 반복재하 시 말뚝 주변지반이 교란되어 지지능력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

- (2) 횡방향 반복하중에 의한 말뚝의 횡방향 극한지지력 증가 및 감소효과는 말뚝에 재하되는 횡방향 하중이 커질수록 더욱 명확하게 나타났으며, 반복하중 재하 시 횡방향 극한지지력을 동일 지반조건에서 평가된 정적 횡방향 극한지지력으로 나누어 평가한 정규화 된 횡방향 극한지지력은 반복재하하중의 크기와 대체적으로 선형적인 관계를 가졌다.
- (3) 지반의 상대밀도가 높을수록 횡방향 반복하중에 의한 말뚝의 횡방향 극한지지력 감소효과는 더 명확하게 나타났으며, 지반의 포화여부는 횡방향 반복하중 효과에 큰 영향을 미치지 않았다.
- (4) 모형말뚝시험 결과를 활용하여 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 횡방향 극한지지력을 평가할 수 있는 산정식을 제안하였다. 제안된 산정식으로 계산된 횡방향 극한지지력을 모형말뚝시험 결과와 비교한 결과 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 극한지지력을 비교적 정확히 예측하고 있음을 확인하였다.

이상의 결과는 모래지반에 설치되어 횡방향 반복하중을 받는 말뚝기초의 횡방향 지지거동 및 횡방향 극한지지력을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 기대되나, 말뚝에 횡방향 하중을 양방향으로 20회 씩 반복재하하여 수행된 결과로서 한방향 반복하중 혹은 장기적인 횡방향 반복하중을 지배적으로 받는 말뚝의 지지거동을 고려하는 데는 한계가 있다. 추후, 추가적인 모형말뚝시험을 통해 제시된 연구 결과와 산정식을 검증 및 보완한다면 보다 일반적인 경우에도 적용 가능할 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양개발용 수중건설로봇 사업단, PJT200539).

참고문헌 (References)

1. Baek, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.H., and Chung, C.K. (2014), "Effect of Relative Density of p-y Backbone Curves for Cyclic Lateral Load on Pile Foundations in Sandy Soil", *Proceeding of 33rd OMAE conference*, San Francisco, Vol.3, pp.1-6.
2. Barton, Y.O. (1979), "Lateral Loading of Model Piles in the Centrifuge", M.Phil. Thesis, University of Cambridge.
3. Barton, Y.O. (1982), "Laterally Loaded Model Piles in Sand: Centrifuge Tests and Finite Element Analyses", Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
4. Broms, B.B. (1964), "Lateral Resistnace of Piles in Cohesive Soils", *J. of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 90, No.2, pp.27-64
5. Davidson, H.L., Cass, P.G., Khilji, K.H., and McQuade, P.V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL-2197, EPRI, 324p.
6. 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.
7. Hoadley, P.J., Barton, Y.O., and Parry, R.H.G. (1981), "Cyclic Lateral Load on Model Pile in a Centrifuge", *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp.621-625.
8. 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.
9. LeBlanc, C., Houlsby, G.T., and Byrne, B.W. (2010), "Response of Stiff Piles in Sand to Long-term Cyclic Lateral Loading", *Geotechnique*, Vol.60, No.2, pp.79-90.
10. Long, J. and Vanneste, G. (1994), "Effect of Cyclic Lateral Loads on Piles in Sand", *J. of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.120, No.1, pp.225-244.
11. 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.
12. Nicolai and Ibsen (2014), "Small-scale Testing of Cyclic Laterally Loaded Monopiles in Dense Saturated Sand", *J. of Ocean and Wind Energy*, Vol.1, No.4, pp.240-245.
13. 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.
14. Paik, K.H. (2010), "Lateral behavior of Driven Piles Subjected to Cyclic Lateral Loads in Sand", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.12, pp.41-50 (in Korean).
15. Paik, K.H., Kim, Y.J., and Lee, S.Y. (2011), "Effects of Loading Method on the behavior of Laterally Cyclic Loaded Piles in Sand", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.3, pp.63-73 (in Korean).
16. Parry, R.H.G. and Sanglamer, A. (1977), *Laterally load tests on single model piles with radiographic observations*, Cambridge University Interim Report, CUED.C, Soils TR 36.
17. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980), *Piling foundation analysis and design*, John Wiley and Sons Inc., New York.
18. 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.
19. Zhang, L., Silva, F., and Grismala, R. (2005), "Ultimate Lateral Resistance to Pile in Cohesionless Soils", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.1, pp.78-83.

Received : March 4th, 2016

Revised : March 30th, 2016

Accepted : April 16th, 2016