

수평하중을 받는 2×2 무리말뚝의 실험적 거동 특성

Experimental Behavior Characteristics of 2×2 Group Pile under Lateral Loads

권 오 균¹ Kwon, Oh-Kyun

박 종 운² Park, Jong-Un

Abstract

In this study, the large scale laboratory model tests were executed to investigate the lateral resistance characteristics of 2×2 group pile under lateral loads according to the array method and installation angle of piles. The effect on the behavior of 2×2 group pile was also investigated through model tests varying the pile diameter and length, distance to pile top from the ground surface, center-to-center (CTC) length and surcharge etc. From these test results, it was found that the lateral resistance of 2×2 group pile of which piles were constructed slantly in both directions was greater than that of group pile of which piles were constructed vertically. And as a result of parameter tests on the lateral resistance of 2×2 group pile, it was found that the most important parameter was the pile length. As the embedment depth ratio (L/D) increased to 36.5 from 26.5, the lateral resistance increased 3~4 times or more. But the center-to-center (CTC) length, distance to pile top from the ground surface and surcharge did not affect much on the lateral resistance of group pile.

요 지

본 연구에서는 수평하중을 받는 연직 및 경사말뚝에 대하여 실내 대형 모형실험을 수행하여 무리말뚝의 배열방법과 경사각도에 따른 무리말뚝의 수평지지력 특성을 파악하였다. 또한 말뚝직경(D), 말뚝의 중심간격, 말뚝길이, 지반면 상부 말뚝돌출길이, 상재하중 등을 변화시켜 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하였다. 이러한 실험 결과로부터 수평하중을 받는 2×2 배열 무리말뚝의 경우, 말뚝을 수직으로 시공하는 것보다 양쪽으로 경사지게 시공하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다. 그리고 무리말뚝에서 수평지지력에 미치는 요소에 대한 실험 결과, 무리말뚝에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 말뚝길이인 것으로 나타났다. 근입깊이비(L/D)가 26.5에서 36.5로 커지면, 수평지지력이 3~4배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 말뚝 중심간격, 말뚝돌출길이 및 상재하중은 무리말뚝의 수평지지력에 큰 영향을 미치는 못하는 것으로 나타났다.

Keywords : Lateral resistance, 2×2 group pile, Laboratory model test, Embedment depth ratio

1 정회원, 계명대학교 건축토목공학부 토목공학전공 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Faculty of Architecture & Civil Engrg., Keimyung Univ., Tel: +82-53-580-5280, Fax: +82-53-580-5165, ohkwon@kmu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 대구공업대학교 토목조경과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg. & Landscape Architecture, Daegu Technical Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기초 구조물의 설계와 시공은 과거에 비하여 보다 많은 제약조건을 포함하며, 구조물의 대형화와 초고층화, 장대교량화 등의 경향이 두드러지며, 이에 따라 연직하중뿐만 아니라 수평하중에 대한 지지력 분담이 증대되는 추세이다. 말뚝기초 상부의 구조물이 토압, 풍압, 파력 등의 횡방향 하중을 받게 되면, 말뚝두부에서 과도한 수평변위와 모멘트가 동시에 발생하여 파괴에 도달할 수도 있다. 횡방향 하중이 작용하는 경우에 대한 대책 방안으로 교대나 교각, 부두 접안시설 등의 구조물에서 경사말뚝의 시공이 많이 시공되고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 말뚝기초에 대한 연구들은 대부분 연직하중에 대해서 수행되어 왔으며, 경사말뚝에 작용하는 수평하중에 대한 연구는 매우 미미한 실정이다. 구조물 기초로 경사말뚝을 설치하는 경우, 말뚝의 배열형태, 경사각도, 말뚝길이, 지반조건 등에 따른 경사말뚝의 거동특성은 아직까지 명확히 파악되지 않고 있는 실정이다. 또한, 시공 현장에서 경사말뚝은 공기 및 공사금액에도 많은 영향을 주게 되므로, 시공되는 말뚝들의 경사각도에 대한 거동 특성을 명확히 규명하는 것은 경제적인 말뚝설계에서 그 효과가 매우 크다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 말뚝길이 및 말뚝직경, 경사각도, 상재하중 등의 변화에 따른 말뚝기초의 거동 특성을 대형 실내 모형실험을 통하여 파악하고자 한다. 본 연구의 목적은 수평하중을 받는 2×2 무리말뚝에 대하여 경사각도에 따른 거동 특성과 최적의 경사배열방법을 파악하는데 있다.

경사말뚝의 거동에 관한 국내외 연구 경향을 살펴보면 다음과 같다. Awad and Petrasovites(1968)는 말뚝과 작용하중의 경사를 변화시킨 실험으로부터 경사말뚝의 저항력을 연직말뚝의 저항력에 대한 백분율의 형태로 제시하였다. Meyerhof(1973)는 경사진 말뚝의 축방향 인발하중에 대한 실험으로부터 사질토 지반에 적용할 수 있는 인발저항력 산정식을 제안하였으며, 경사진 말뚝에 대한 인발계수는 매입식 말뚝보다 타입식 말뚝의 경우가 더 클 수 있다고 보고하였다. Meyerhof and Ranjan(1973)은 축방향 하중을 받는 경사말뚝의 주면마찰력 계산 시 사용하는 토압계수는 연직말뚝의 토압계수보다 약간 클 수 있다고 하였다. 그리고 Das(1983)는 한계근입깊이 이상의 심도에서 말뚝의 주면마찰력은 일정한 값을 나타내는 현상과 수직인발말뚝에 대한 실험결

과로부터 경사말뚝의 한계근입깊이와 순극한인발력에 대해 제시하였다. Hanna and Afram(1986)은 연직말뚝과 경사말뚝에 대해 말뚝직경을 변화시킨 실내인발시험을 실시한 결과, 말뚝의 경사각도가 커질수록 말뚝의 인발저항력은 점차 작아진다고 발표한 바 있다.

경사말뚝에 대한 국내 연구결과를 살펴보면, Bac(1997)은 경사말뚝의 인발하중에 영향을 미치는 요인으로 말뚝표면의 거칠기가 가장 큰 영향을 미친다고 발표하였다. Kim(2001)은 경사말뚝의 모형실험을 통하여 지지력과 토압계수 사이의 관계를 파악하였고, Sung et al.(2003)은 압력토조를 이용하여 연직하중을 받는 경사말뚝의 경사각도에 따른 연직지지력에 대한 실험을 하였다.

그리고 수평하중을 받는 말뚝에 관한 대표적인 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Chang(1937)은 지반을 탄성체로 가정하여 말뚝의 단위면적당 작용하는 지반반력이 말뚝의 수평변위에 비례하여 발생한다고 제안하였다. Matlock and Reese(1960)는 지표면에서 횡하중과 모멘트를 받는 단독말뚝에 발생하는 모멘트와 변위를 결정하는 일반적인 해를 제시하였다. Broms(1964a, 1964b)는 말뚝의 수평저항에 대한 문제를 소성론으로 다루었으며, 사질토나 점성토 지반에 타설된 말뚝이 수평하중을 받는 경우 단위 길이에 대한 극한 지반반력의 다양한 분포를 가정하여 수평저항력을 예측하였다. Kim and Kim(1998)은 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동에 대한 말뚝의 근입깊이, 지반의 상대밀도, 하중재하속도, 말뚝두부의 구속조건, 시공방법 그리고 지반 내 이질층의 영향에 관하여 실험적인 연구를 수행하였다. Park(2012)은 수평하중을 받는 암반에 소켓 된 콘크리트말뚝에 대한 단말뚝과 무리말뚝의 거동특성을 대형 실내모형실험을 통하여 말뚝길이, 소켓 길이, 암반층 위에 포설된 모래지반의 상대밀도 등을 변화시킨 실험적인 연구를 수행하였다.

2. 모형실험

2.1 모형토조 및 모형지반

본 연구의 모형실험에서 사용된 모형토조는 2,200mm×2,000mm×4,000mm(가로×세로×높이)의 크기이고, 벽체는 10mm의 강판으로 제작되었으며, 변형방지를 위하여 벽체에 H-형강을 추가 보강하였다. 모형토조 내 모형지반의 최대 높이는 2m이고, 모형지반의 해체 및 조성이

편리하도록 앞쪽 부분은 분리가 가능하도록 제작되었다. 모형토조의 최상부에는 경사말뚝의 관입을 위하여 전·후, 좌·우의 방향으로 이동이 가능하도록 말뚝관입용 유압장치를 제작하여 설치하였다. 모형실험 조건에 준하여 연직방향(0°)과 양쪽방향으로 각각 7°, 11.3°의 각도로 정확하게 말뚝을 관입할 수 있도록 말뚝관입용 유압장치를 설계하였다.

모형실험에 사용된 모래는 경상북도 성주지역의 낙동강에서 채취하였으며, No. 10 체를 통과시킨 시료만을 건조한 모래로 비중은 2.63이고, 통일분류법상 입도분포가 나쁜 모래(SP)이다. 본 모형실험에 사용된 사질토 지반의 강도정수는 상대밀도 50% 조건에서 직접전단시험으로부터 내부마찰각 24.9°, 점착력 21.7kPa로 나타났다.

2.2 모형말뚝 및 부대장치

모형실험에 사용된 말뚝은 직경(D) 34mm, 두께(t) 3mm의 강관으로 제작하였다. 수평하중에 의한 말뚝의 휨모멘트와 무리말뚝의 각 말뚝에 작용하는 축방향 분력을 파악하기 위하여 모형말뚝 내부에 일정한 깊이마다 변형률게이지(Strain Gauge)를 부착하여 모형실험을 실시하였다. 변형률게이지가 부착된 말뚝은 일체형으로 길이가 1,240mm(약 36.5D)이고, 말뚝길이에 따른 무리말뚝의 거동변화를 비교하기 위하여 말뚝직경의 약 26.5배인 길이 900mm의 말뚝을 추가로 제작하였다. 또한 말뚝직경에 따른 무리말뚝의 거동변화를 비교하기 위하여 직경 48.6mm의 말뚝도 추가 제작하였다. 직경 48.6mm인 말뚝의 길이는 직경 34mm인 말뚝의 길이와 동일하게 1,240mm로 제작하였다. 모형실험에 사용된 말뚝은 압력배관용 강관(품명 E.R.W Steel Pile)으로 인장강도는 43,567MPa, 항복점은 27,773MPa, 탄성계수는 21,407 GPa이다. 말뚝을 연결하는 두부 플레이트는 SS400 재질의 두께 18mm인 강판으로 인장강도는 약 61,000MPa이고, 탄성계수는 약 20,000GPa이다. 모형실험에 사용된 모든 말뚝의 제원은 Table 1에 상세히 나타나 있다.

본 모형실험은 여러 조건으로 배열된 무리말뚝들이 상부에서 플레이트와 연결되어 하나의 실험체가 완성된다. 말뚝과 연결되는 플레이트는 두께 18mm의 강판이고, 구조물기초설계기준 해설(Korean Geotechnical Society, 2009)을 참조하여 최소한의 모형말뚝 중심간격은 2.5D 기준이고, 플레이트 측면과 말뚝중심의 최소간격은 말뚝직경의 1.25배로 결정하였다. Fig. 1은 모형실험에 사용된 두부 플레이트를 보여준다.

2.2 모형지반의 조성

실험에 사용된 모형지반은 상대밀도가 중간 정도인 사질토 지반이고, 모형지반 조성 시 깊이별로 상대밀도가 일정하게 전체 지반에 조성되어야 하므로 낙하높이를 적절하게 조정하여 강사법으로 모형지반을 조성하였다. 본 실험을 시작하기 전에 수차례 예비실험을 통하여 모래가 강사되는 낙하높이와 상대밀도 사이의 관계를 파악하였고, 이 결과로부터 중간 정도의 상대밀도 지반(40~50%)에 해당하는 강사 낙하높이를 70~120cm로 결정하였다. 이때 5개의 체를 겹쳐서 만든 다음, 그 위에 모래를 강사하여 모형지반을 조성하였다. 모형지반은 4개 층으로 나누어 조성하였고, 먼저 가장 낮은 위치에 5점으로 제작된 체를 위치시키고, (-)210~(-)160cm 높이까지 모래를 균등하게 강사하여 하부지층을 조성

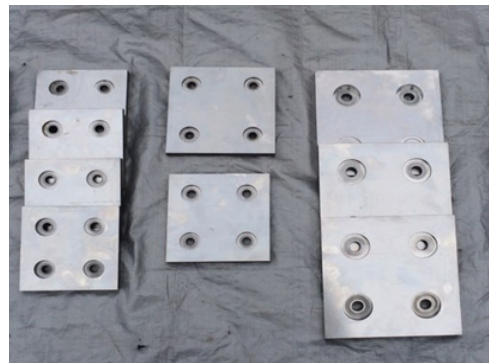


Fig. 1. Photograph of pile head plate

Table 1. Specification of model pile

Pile type	Diameter (D) (mm)	Thickness (t) (mm)	Length (L) (mm)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Young's modulus (kgf/cm ²)
Pile attached with strain gauges	34.0	3	900	3979.6	2,100,000
	34.0	3	1,240		
	48.6	3	1,240		
Plain pile	48.6	3	1,240		

하였다. 그 후에 다음 단계의 위치에 동일한 체를 설치하고, 지표면 아래 (-)160~(-)100cm 높이까지 조성하였고, 3단계 위치에서는 (-)100~(-)50cm 높이까지 조성하였으며, 4단계 위치에서 (-)50cm~최종 지표면까지 모래를 강사하여 모형지반을 조성하였다. 이렇게 조성된 모형지반의 상대밀도를 확인하기 위하여 일정한 깊이마다 캔을 미리 설치하였으며, 모형실험이 완료된 후에 지반을 해체하면서 캔을 꺼내어 상대밀도를 확인하였다. 여기서 캔은 모형말뚝을 관입하는데 방해가 되지 않도록 말뚝이 설치되지 않는 모형토조 가장자리의 4개

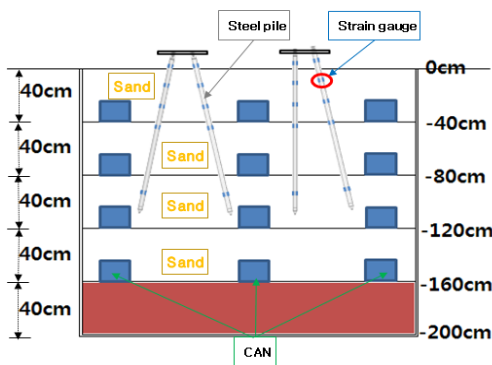
지점에 각각 3개씩 일정한 높이별로 설치하였다. Fig. 2는 모형지반의 조성이 완료된 모습을 나타내고, Fig. 3(a)는 깊이별 캔의 위치를 나타내며, (b)는 모형실험이 종료된 후 측정된 모형지반의 상대밀도를 나타내며, 측정된 상대밀도는 45~55%의 범위로 나타났다.

2.3 모형말뚝의 관입

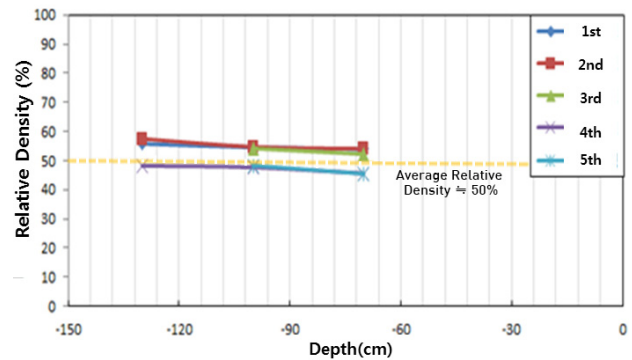
모형말뚝은 유압식 말뚝관입장치(Fig. 4 참조)를 이용하여 지반 속에 설치되며, 이 장치는 전·후, 좌·우의



Fig. 2. Photograph of completed model ground



(a) Position of cans



(b) Measured relative densities according to depth

Fig. 3. Position of cans and measured relative densities of sands after testing



(a) 0°



(b) 7°



(c) 11.3°

Fig. 4. Penetration units according to installation angle

4방향으로 이동이 가능하도록 제작되었으며, 모형토조의 최상부에 설치되어 있다. 본 연구에서는 oo현장에서 말뚝설치 시 시공 공정의 시간단축 효과와 수치해석을 통한 가장 효율적인 경사각도로 평가된 $\pm 11.3^\circ$ 의 경사각도를 기준으로 하였으며, 말뚝의 설치각도의 영향을 파악하기 위하여 설치각도 0° (연직방향), $\pm 7^\circ$ 로 모형말뚝을 관입할 수 있도록 관입장치를 제작하였다. 모형말뚝은 계획된 모형실험 조건에 따라 정확한 경사로 지반에 설치되어야 하므로, 먼저 말뚝이 설치되는 위치에 가이드판과 가이드 시스템을 연결하고, 경사방향을 일정하게 유지시키는 가이드 시스템(Fig. 4에서 푸른색의 강관 형태)에 모형말뚝을 위치시켰다. 다음으로 상부에서 각 조건의 경사각도에 따라 말뚝과 유압식 관입장치의 방향이 일치되도록 조절하여 정확한 위치에 고정시킨 후, 압입하여 모형말뚝을 설치하였다. 관입 후 수준측량 장비인 레벨을 이용하여 모든 말뚝의 돌출길이(지표면에서부터 말뚝두부까지의 거리)가 동일하게 정확히 맞추고, 모형말뚝들의 상부에 플레이트를 연결하여 모형실험 준비를 완료하였다. Fig. 5는 모형지반에 말뚝이 관입되는 과정을 보여 준다.

2.4 모형실험 조건

본 연구의 모형실험 조건들은 2×2 배열에서 무리말뚝의 거동 특성을 분석하기 위하여 모형말뚝이 설치되는 경사방향을 0° (연직), $\pm 7^\circ$, $\pm 11.3^\circ$, 연직과 경사방향의 조합 등으로 다양하게 변화시켜 모래지반(Relative Density $\approx 50\%$)에서 수평재하실험을 실시하였다. 모형실험은 말뚝직경(D) 34mm, 말뚝의 중심간격 2.5D, 말뚝길이 36.5D, 지반면 상부 말뚝 돌출길이 5D를 기본 실험조건으로 설정하였고, 말뚝직경 48.6mm, 말뚝의 중심간격 3D, 말뚝길이 26.5D, 말뚝 돌출길이 3D, 상재하중(연직 무리말뚝의 항복하중의 20%) 재하 등의 조건에 대해서도 모형실험을 수행하였다. 또한 무리말뚝에 대한 수평하중 재하 시 각 말뚝별 거동 특성과 하중전이 거동을 파악하기 위하여 말뚝 내부에 일정한 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 6(a)는 모형실험의 개략도를 보여 주고, (b)는 말뚝의 배열 형태를 보여 준다. 그리고 모형실험 조건변화 및 실험기호는 Table 2에 자세히 나타나 있다.

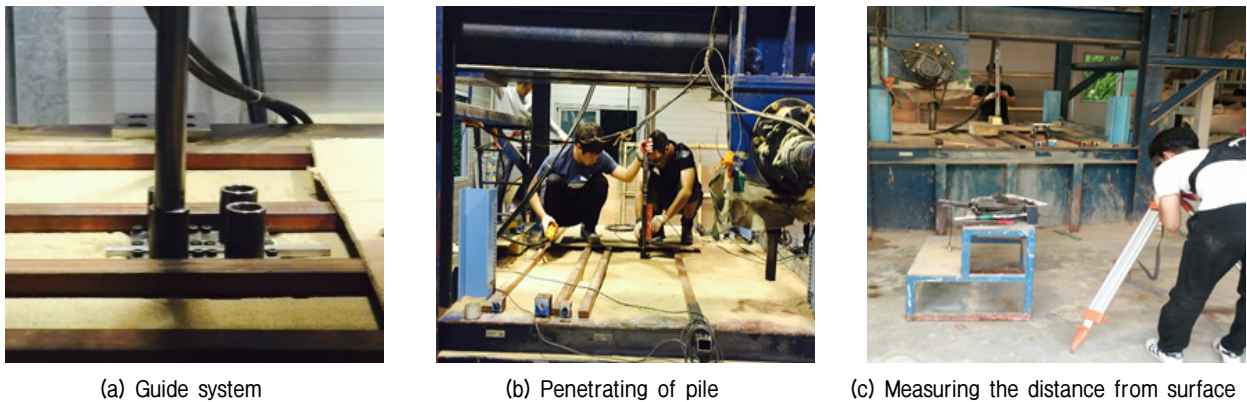


Fig. 5. Photograph of pile penetrating

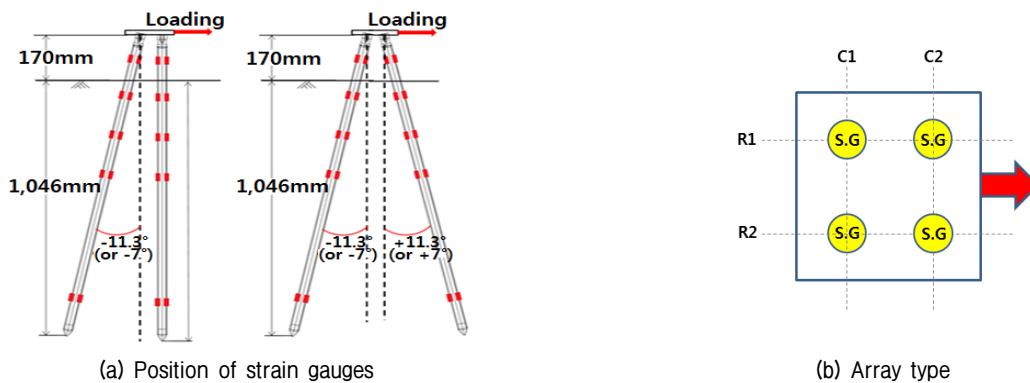


Fig. 6. Schematic diagram of lateral pile load test and array type

Table 2. Summary of test program

Diameter (D)	CTC (C)	Length (L)	Distance (F)	Surcharge (W)	Inclined angle (left, right)	Test name	
34mm	2.5D	36.5D	5D	0	(0°, 0°)	C2.5D_ L36.5D_F5D (0°, 0°)	
					(-11.3°, +11.3°)	C2.5D_ L36.5D_F5D (-11.3°, +11.3°)	
					(0°, +11.3°)	C2.5D_ L36.5D_F5D (0°, +11.3°)	
					(-11.3°, 0°)	C2.5D_ L36.5D_F5D (-11.3°, 0°)	
					(-7°, +7°)	C2.5D_ L36.5D_F5D (-7°, +7°)	
34mm	2.5D	36.5D	5D	20% of Yield load (W)	(0°, 0°)	C2.5D_ L36.5D_F5D_W20% (0°, 0°)	
					(-11.3°, +11.3°)	C2.5D_ L36.5D_F5D_W20% (-11.3°, +11.3°)	
		3D	0	(0°, 0°)	C2.5D_ L36.5D_F3D (0°, 0°)		
				(-11.3°, +11.3°)	C2.5D_ L36.5D_F3D (-11.3°, +11.3°)		
	26.5D		(0°, 0°)	C2.5D_ L20D_F5D (0°, 0°)			
			(-11.3°, +11.3°)	C2.5D_ L20D_F5D (-11.3°, +11.3°)			
	3.0D	36.5D	5D		(0°, 0°)	C3.0D_ L36.5D_F5D (0°, 0°)	
					(-11.3°, +11.3°)	C3.0D_ L36.5D_F5D (-11.3°, +11.3°)	
	48.6mm	2.5D	36.5D	5D	0	(0°, 0°)	C2.5D_ L36.5D_F5D_D48.6 (0°, 0°)
						(-11.3°, +11.3°)	C2.5D_ L36.5D_F5D_48.6 (-11.3°, +11.3°)

2.5 하중재하

본 연구의 모형실험에서 하중재하는 말뚝들과 일체화된 상부 플레이트의 중심에서 수평 인발하중을 재하하는 방법으로 실시하였다. 모형실험에 사용된 하중재하장치는 Mini-UTM(동일시마츠사 제품)을 이용하였고, 지그와 크로스헤드가 상부로 이동하며 최대 9.8kN(1,000 kgf)의 하중을 가할 수 있으며, 와이어를 무리말뚝의 두부 플레이트에 연결하여 인발하였다. 두부 플레이트와 수평재하장치가 와이어로 연결되어 있으므로 와이어의 탄성변형을 최소화하기 위하여 두부 플레이트에 직접 연결된 로드셀로 수평하중을 측정하였으며, 재하속도는 2mm/min이다.

하중재하 방법은 모형말뚝들과 두부 플레이트를 강

결 연결한 후에, 두부 플레이트의 중심부와 미니 UTM을 와이어로 연결하여 수평 인발하중을 재하하였다. 수평변위는 와이어 변위계(CDP-50)를 하중재하 반대방향의 두부 플레이트 2개 지점에 연결하여 측정하였고, 수평재하실험 동안 두부 플레이트의 수직방향 변위를 측정하기 위하여 2개소에 스프링타입 변위계(LVDT)를 플레이트 윗면에 설치하였다. 무리말뚝에 작용하는 수평인발하중, 각 말뚝의 두부와 선단에 설치된 로드셀, 일정 깊이에 설치된 변형률 게이지의 변형율, 와이어 변위계와 LVDT의 변위 등의 데이터는 수평재하실험 동안 데이터로거에 자동으로 기록되어 저장되며, 하중재하 동안 하중-변위 그래프를 작성하면서 수평재하실험 종료 여부를 결정하였다. 수평재하실험 모습이 Fig. 7에 나타나 있다.

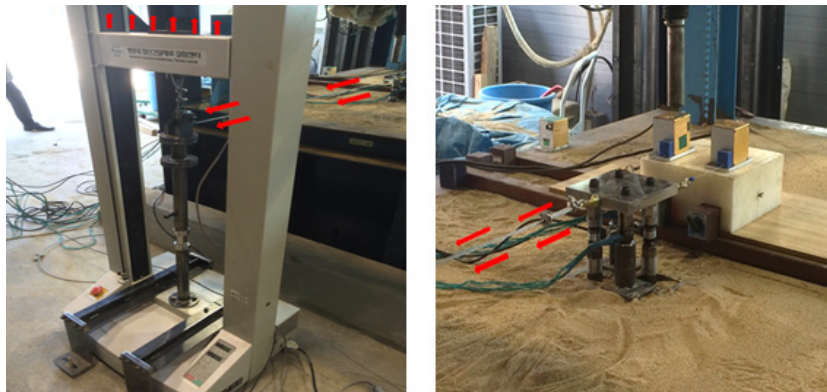


Fig. 7. Photograph of lateral pile load test

2.6 계측장치

본 연구에서는 무리말뚝에 대한 수평재하실험에서 말뚝두부 플레이트의 수평 및 수직변위, 말뚝깊이별 변형율, 말뚝 두부와 선단에서의 하중 등을 측정하였다. 수평하중에 따른 모형말뚝의 수평변위는 와이어 변위계(CDP-50)를 하중재하 반대방향의 플레이트의 양쪽 2개 지점에 연결하여 측정하였으며, 와이어 변위계(CDP-50)는 측정범위가 0~500mm로 다른 변위계에 비하여 측정 범위가 크며, 팽창과 축소에 대한 변위를 모두 측정할 수 있는 장점이 있다. 말뚝의 수직방향 변위를 측정하기 위하여 2개소에 스프링타입 변위계(LVDT)를 플레이트 윗면에 설치하여 플레이트의 수직변위를 측정하였으며, 실험에 사용된 스프링 타입의 변위계(LVDT)는 일본 동경측기사(TML) 제품으로 측정범위가 0~50mm와 0~100mm의 두 종류이다.

3. 모형실험 결과 및 분석

3.1 무리말뚝의 배열조건에 따른 거동 비교

본 연구에서는 수평하중을 받는 연직 및 경사말뚝에 대하여 경사각도에 따른 무리말뚝에서 말뚝의 경사배열 방법, 말뚝의 경사각도에 따른 거동특성 등의 내용을 파악하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험 조건들은 2×2 무리말뚝에서 모형말뚝이 설치되는 경사각도를

0°, ±7°, ±11.3°의 여러 조합으로 변화하였고, 각 조건에 대하여 수평재하실험을 실시하여 거동 특성을 파악하였다. 각 모형실험의 조건 및 수평재하실험으로부터 구한 항복하중과 항복하중에서의 수평변위가 Table 3에 나타나 있다. 수평하중을 받는 말뚝의 항복하중은 수평재하실험으로부터 얻은 수평하중-수평변위 곡선에 대하여 De Beer 방법(Park et al., 2009), Terzaghi-Yelink 방법(Park et al., 2009), Mansur-Kaufmann 방법(Baugrundinstitut Stuttgart, 1980; Park et al., 2009) 등을 적용하여 검토하였으며, 본 연구에서는 Mansur-Kaufmann 방법이 가장 적합한 방법인 것으로 나타났다. 이 방법은 수평하중-수평변위 곡선에서 초기 부분과 후반부의 직선부분에서 접선을 그어서 서로 교차하는 지점의 하중을 항복하중으로 결정하는 방법이다.

말뚝배열 2×2의 무리말뚝에서 말뚝의 경사각도를 변화시킨 조건에 대하여 모형실험을 실시한 결과가 Table 3과 Fig. 8에 나타나 있다. 수평하중-수평변위 곡선으로부터 양쪽방향으로 각각 ±11.3°의 경사각도로 설치된 Case 2 조건의 항복하중이 3.50 kN으로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 양쪽방향으로 각각 ±7°의 경사각도로 설치된 Case 5 조건의 항복하중이 3.42 kN이며, 그 차이는 그리 크지 않았다. 이에 비하여 0°와 +11.3°의 경사각도로 설치된 Case 3 조건의 항복하중이 2.72 kN으로 가장 작게 나타났다. 이상의 결과로부터 말뚝배열 2×2인 무리말뚝의 조건 중에서, 양쪽방향으로 ±11.3° 경사지게 설치된 무리말뚝의 항복하중이 다른 조건들

Table 3. Results of lateral pile load tests

Pile condition		Test No.	Array condition	Yield load (kN)	Lateral displacement (mm)
2×2 array	Standard condition	Case 1	(0°, 0°)	3.00	14.0
		Case 2	(-11.3°, +11.3°)	3.50	12.2
		Case 3	(0°, +11.3°)	2.72	16.0
		Case 4	(-11.3°, 0°)	2.80	14.0
		Case 5	(-7°, +7°)	3.42	14.1
	Changing condition	Case 6	(0°, 0°), W=20%	2.71	8.2
		Case 7	(-11.3°, +11.3°), W=20%	3.40	12.3
		Case 8	(0°, 0°), F=3D	2.72	15.7
		Case 9	(-11.3°, +11.3°), F=3D	3.51	12.5
		Case 10	(0°, 0°), L=20D	0.68	8.0
		Case 11	(-11.3°, +11.3°), L=20D	1.00	10.0
		Case 12	(0°, 0°), C=3D	2.43	9.7
		Case 13	(-11.3°, +11.3°), C=3D	1.90	16.2
		Case 14	(0°, 0°), D=48.6mm	2.28	12.2
		Case 15	(-11.3°, +11.3°), D=48.6mm	1.65	19.0

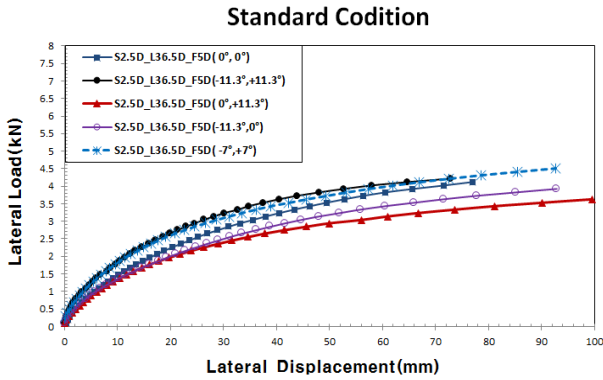


Fig. 8. Lateral load-displacement curves according to pile installation angle

보다 더 크게 나타나 가장 큰 수평하중을 지지하는 것으로 나타났으며, 한쪽 방향으로만 경사지게 설치되고 다른 한쪽은 연직으로 설치된 무리말뚝의 항복하중은 두 경우 모두 연직으로 설치된 무리말뚝 보다 더 작게 나타났다. 그렇지만 각 조건에서 항복하중이 발생하는 수평 변위는 12.2~16.0mm로 비슷하게 나타났다.

이러한 결과로부터 2×2 무리말뚝에 수평하중이 작용하는 경우, 말뚝이 모두 연직으로 설치된 경우에 비하여 양쪽방향으로 경사지게 설치된 무리말뚝의 항복하중이 더 크게 나타났다. 수평하중을 받는 무리말뚝의 경우, 말뚝을 연직으로 시공하는 것보다 양쪽 외곽으로 경사지게 시공하는 것이 수평하중에 더 유리할 것으로 판단된다.

3.2 무리말뚝의 거동 특성에 영향을 미치는 요소

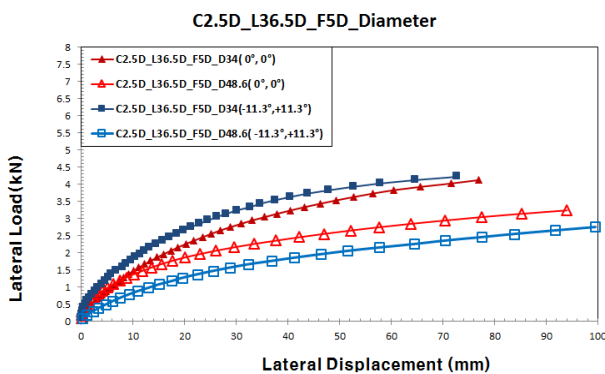
3.2.1 말뚝직경의 영향

말뚝직경에 대한 무리말뚝의 거동을 파악하기 위하

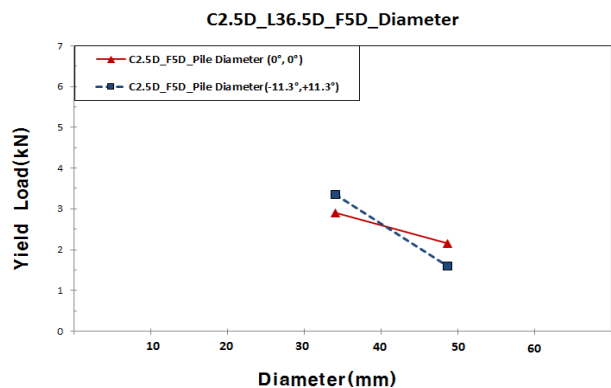
여 직경 34mm의 말뚝과 직경 48.6mm의 말뚝에 대하여 연직으로 설치된 말뚝과 양쪽으로 ±11.3°경사지게 설치된 경우에 대하여 모형실험을 실시하였다. 다른 실험 조건은 동일하고 말뚝직경만 변화시킨 경우에 대한 실험 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. 직경이 34mm인 경우 근입깊이비는 연직의 경우 31.5이고, ±11.3°경사진 경우 30.8이며, 자유장의 길이 5D인 반면에, 직경 48.6mm 말뚝의 경우에 근입깊이비는 약 22로 감소하고, 자유장의 길이가 약 3.5D로 감소하게 된다. 여기서, 말뚝 돌출길이(distance to pile top from the ground surface)는 지표면에서부터 말뚝두부 플레이트까지의 거리이다. 말뚝직경이 34mm에서 48.6mm로 커지면, 말뚝 돌출길이가 5D에서 약 3.5D로 감소하지만, 이것의 영향은 그리 크지 않는 것으로 판단되어 무시하였다. 두 가지 경우 모두 말뚝직경이 큰 경우의 항복하중이 작게 나타났다. 모든 말뚝이 연직으로 설치된 연직 무리말뚝보다 양쪽으로 경사진 무리말뚝에서 지지력이 더 크게 감소되는 것으로 나타났다. 그러나 일반적으로 말뚝직경이 커지면, 수평지지력도 증가하여야 하는데, 모형실험 결과에서는 반대로 수평지지력이 오히려 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 실험오류로 판단된다.

3.2.2 말뚝 중심간격의 영향

무리말뚝에서 말뚝과 말뚝사이의 중심간격(Center-to-center, CTC)이 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직경 34mm의 말뚝에 대하여 중심간격이 2.5D와 3.0D인 경우에 대한 모형실험을 실시하였다. 다른 실험 조건은 동일하고 말뚝 중심간격만 변화시킨 경우에 대한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10(a)는

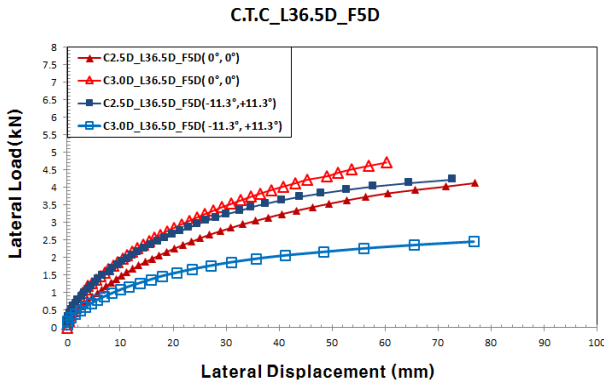


(a) Lateral load-displacement curve

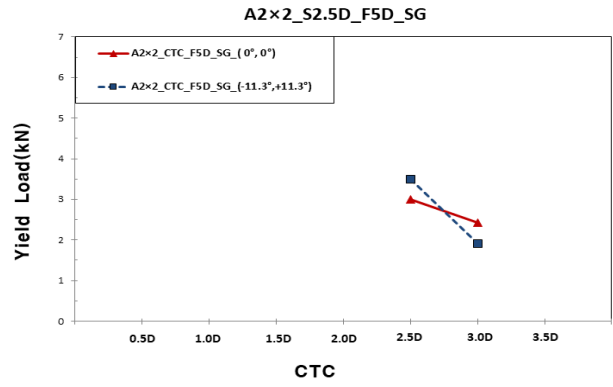


(b) Yield load according to pile diameter

Fig. 9. Effect of pile diameter on lateral resistance of 2×2 group pile



(a) Lateral load-displacement curve



(b) Yield load according to CTC

Fig. 10. Effect of pile CTC on lateral resistance of 2×2 group pile

수평하중-수평곡선을 나타내고, Fig. 10(b)는 말뚝 중심 간격에 따른 무리말뚝의 항복 수평하중을 나타낸다. 연직 무리말뚝과 경사 무리말뚝의 경우 모두 말뚝 중심간격이 2.5D에서 3.0D로 커지면, 수평지지력이 감소하는 것으로 나타났다.

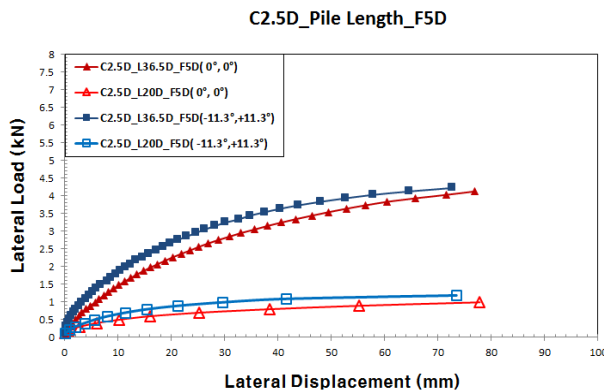
3.2.3 말뚝길이의 영향

말뚝길이가 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 말뚝길이가 36.5D와 26.5D인 말뚝($\phi 34\text{mm}$)을 이용하여 동일한 실험조건에서 말뚝길이만 다르게 변화시킨 경우에 대한 모형실험 결과가 Fig. 11(a)에 나타나 있다. 모든 말뚝이 연직으로 설치된 경우와 양쪽 방향으로 $\pm 11.3^\circ$ 경사지게 설치된 경우 모두 말뚝길이가 길어지면, 지지력이 증가하는 것으로 나타났으며, 증가하는 비율은 거의 비슷하게 나타났다. Fig. 11(b)는 말뚝 길이에 따른 연직 무리말뚝과 양쪽으로 경사진 무리말뚝의 항복 수평하중을 비교한 것이다. 연직의 무리말뚝에서 말뚝의 근입깊이비(L/D)가 26.5에서 36.5로 커지

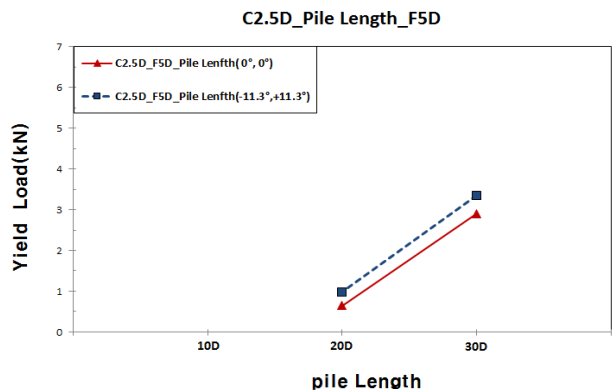
면, 항복 수평하중은 0.68kN에서 3.00kN으로 약 4.4배 증가하였고, 양쪽 방향으로 $\pm 11.3^\circ$ 로 설치된 경우 항복 하중은 1.00kN에서 3.50kN으로 약 3.5배 증가하는 것으로 나타났다. 이 그림에서 보는 바와 같이 말뚝길이가 길어지면 항복 수평하중은 증가하고, 증가하는 비율은 두 경우에서 비슷하게 나타났다. 이러한 결과로부터 수평하중을 받는 무리말뚝의 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 말뚝길이인 것으로 판단된다.

3.2.4 말뚝 돌출길이의 영향

무리말뚝에서 말뚝체가 지반면 위로 돌출된 경우, 지표면에서 말뚝두부 플레이트까지의 거리가 말뚝 돌출 길이이다. 말뚝 돌출길이가 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 본 연구에서는 말뚝 돌출길이가 5D인(170mm) 조건과 3D(102mm)인 조건에 대하여 동일한 실험조건에서 모형실험을 실시하였으며, 그 결과가 Fig. 12(a)에 나타나 있다. 그리고 Fig. 12(b)는 말뚝 돌출길이에 따른 무리말뚝의 항복 수평하중을 비교한

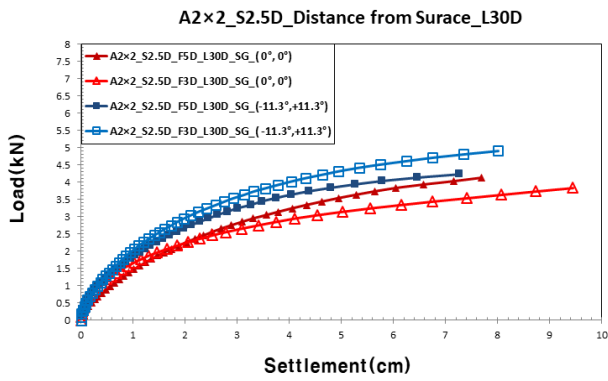


(a) Lateral load-displacement curve

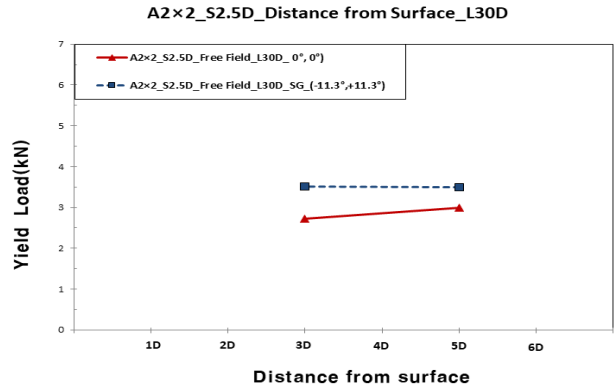


(b) Yield load according to pile length

Fig. 11. Effect of pile length on lateral resistance of 2×2 group pile



(a) Lateral load-displacement curve



(b) Yield load according to distance from surface

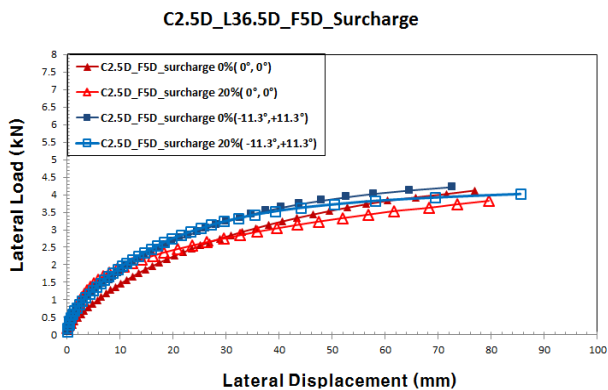
Fig. 12. Effect of distance to pile top from ground surface on lateral resistance of 2×2 group pile

것이다. 연직의 무리말뚝에서 말뚝 돌출길이가 3D에서 5D로 넓어지면, 항복 수평하중은 다소 증가하는 것으로 나타났지만 그 차이는 크지 않고, 양쪽 방향으로 $\pm 11.3^\circ$ 로 설치된 경우의 항복 수평하중은 거의 비슷하게 나타났다. 이러한 결과로부터 말뚝 돌출길이는 수평하중을 받는 무리말뚝의 지지거동에 다소 영향을 미치지만, 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

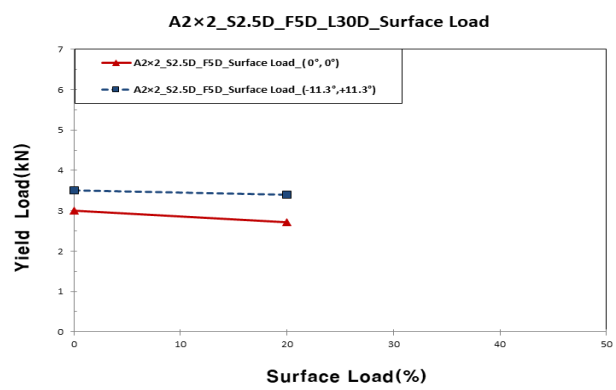
3.2.5 상재하중의 영향

본 연구에서는 무리말뚝 두부 플레이트에 놓인 상재하중이 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동일한 실험조건에 대하여 상재하중이 없는 경우와 상재하중이 있는 경우에 대한 모형실험을 실시하였다. 그리고 동일한 조건의 무리말뚝에 대하여 연직으로 작용하는 하중에 대한 항복하중을 실험을 통하여 산정하였으며, 이렇게 산정된 항복하중의 20%에 해당하는 값을 상재하중의 크기로 결정하였다. 모형실험에서 상재하중의 재하는 2×2 배열 무리말뚝의 상부 플레이트에

동일한 크기의 강판을 제작하여 연결하는 방법으로 이루어졌으며, 이러한 방법으로 실험을 실시한 결과가 Fig. 13(a)에 나타나 있다. 연직으로 설치된 말뚝과 양쪽으로 $\pm 11.3^\circ$ 경사지게 설치된 경우 모두 상재하중이 작용하면, 지지력이 약간 감소하는 것으로 나타났으며, 그 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 13(b)는 상재하중에 따른 연직의 무리말뚝과 양쪽으로 경사진 무리말뚝의 항복 수평하중을 비교한 것이다. 연직 무리말뚝의 20%에 해당하는 상재하중을 재하하면, 연직으로 설치된 경우의 항복 수평하중은 3.00kN에서 2.71kN으로 약간 감소하였고, 양쪽방향으로 $\pm 11.3^\circ$ 로 설치된 경우의 항복 수평하중도 3.50kN에서 3.40kN으로 약간 감소하는 것으로 나타나지만 그 차이는 그리 크지 않았다. 이러한 결과로부터 수평하중을 받는 무리말뚝에서 상재하중의 영향은 수평지지력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



(a) Lateral load-displacement curve



(b) Yield load according to surcharge

Fig. 13. Effect of surcharge on lateral resistance of 2×2 group pile

4. 결 론

본 연구에서는 수평하중을 받는 2×2 배열의 연직 및 경사 무리말뚝에 대하여 실내 대형 모형실험을 수행하여 무리말뚝의 배열방법, 경사각도 및 여러 요소들이 무리말뚝의 지지력에 미치는 영향을 파악하였다. 여러 조건에 따른 무리말뚝의 거동 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 표준실험 조건을 결정하였으며, 이 조건은 상대밀도가 보통인 사질토 지반(상대밀도는 약 50% 정도), 말뚝직경(D) 34mm, 말뚝과 말뚝사이의 중심간격 2.5D, 말뚝길이 1,240mm(근입깊이비는 연직의 경우 31.5 이고, ±11.3°경사진 경우 30.8입), 말뚝 돌출길이 5D (170mm)인 경우이다. 이 조건에 대하여 말뚝 설치 각도를 연직, ±7° 및 ±11.3°로 변화시켜서 무리말뚝에 대한 모형실험을 실시하였다. 그리고 여러 요소들이 무리말뚝의 거동에 영향을 파악하기 위하여 표준실험 조건에서 말뚝직경 48.6mm, 말뚝사이의 중심간격 3D, 말뚝길이 900mm(26.5D), 말뚝 돌출길이 102mm(3D) 등으로 변화시킨 조건에 대해서도 모형실험을 실시하였다. 이와 같이 다양한 조건의 모형실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝이 설치된 경사각도에 따른 2×2 배열 무리말뚝에 대한 실험 결과로부터, 양쪽 방향으로 각각 -11.3°, +11.3°의 경사각도로 설치된 조건의 지지력이 가장 크게 나타났고, 한 방향으로만 경사지게 관입된 무리말뚝의 지지력은 연직 무리말뚝보다 작게 나타났다. 수평하중을 받는 2×2 배열 무리말뚝의 경우, 말뚝을 수직으로 시공하는 것보다 양쪽으로 경사지게 시공하는 것이 더 유리할 것으로 판단된다.
- (2) 연직 무리말뚝과 양쪽 경사 무리말뚝에서 말뚝사이의 중심간격(CTC)이 2.5D에서 3.0D로 넓어지면, 무리말뚝의 수평지지력은 감소하는 경향을 나타냈다.
- (3) 말뚝길이 변화에 따른 모형실험 결과, 연직 무리말뚝과 양쪽 경사 무리말뚝의 경우 모두 말뚝길이가 900mm(26.5D)에서 1,240mm(36.5D)로 길어지면, 수평지지력이 3~4배 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 수평하중을 받는 무리말뚝의 수평지지력에 말뚝길이가 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (4) 말뚝 돌출길이 변화에 따른 모형실험 결과, 말뚝 돌출길이가 102mm(3D)에서 170mm(5D)로 넓어지면,

양쪽 경사 무리말뚝의 수평지지력은 거의 비슷하게 나타났고, 연직무리말뚝의 지지력은 약간 증가하는 것으로 나타났지만 그 차이는 크지 않으므로, 말뚝 돌출길이가 무리말뚝의 거동에 미치는 영향은 크지 않는 것으로 판단된다.

- (5) 상재하중 유무에 따른 모형실험 결과, 연직 무리말뚝의 경우와 양쪽 경사 무리말뚝의 경우 모두 상재하중이 작용하면 지지력이 약간 감소하는 것으로 나타났지만, 그 차이는 그리 크지 않아서 상재하중이 무리말뚝의 지지력에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Awad, A. and Petrasovits, G. (1968), "Considerations on the Bearing Capacity of Vertical and Batter Piles Subjected to Forces Acting in Different Directions", *Proceedings of the 3rd Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Budapest, pp. 484-497.
2. Bae, W.S. (1997), *Pullout Behaviors of Inclined Piles in Sand*, Master thesis, Chungbuk National University (in Korean).
3. Baugrundinstitut Stuttgart (1980), *Institut Fur Grundbau Bodenmechanik*, Stuttgart: Mitteilung, pp.61-65.
4. Broms, B. B. (1964a), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", *ASCE*, Vol.90, No.2, pp.27-63.
5. Broms, B. B. (1964b), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *ASCE*, Vol.90, No.3, pp.123-156.
6. Chang, Y. L. (1937), "Lateral Pile Loading Test", *ASCE*, 102, pp. 272-278.
7. Das, B. M. (1983), "A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles", *Soils and Foundation*, Vol.23, No.3, pp.122-126.
8. Hanna, A.M. and Afram, A. (1986) "Pull-out Capacity of Single Batter Piles in Sands", *Canadian Geotech. J.*, Vol.23, No.3, pp. 387-392.
9. Kim, J.H. (2001), *An Experimental Study on Bearing Capacity of Battered Pile*, Master thesis, Keimyung University (in Korean).
10. Kim, Y.S. and Kim, B.T. (1998), "Model Tests on the Characteristics of Lateral Behavior of Steel Pipe Pile in Homogeneous and Nonhomogeneous Soil Conditions", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.14, No.6, pp.153-166 (in Korean).
11. Korean Geotechnical Society (2009), *Design Specification of Foundation of Structures and Explanation*, Goomibook, Seoul (in Korean).
12. Matlock, H. and Reese, L. C. (1960), "Generalized Solution for Laterally Loaded Piles", *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.86, No.5, pp.63-91.
13. Meyerhof, G.G. (1973), "Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles", *8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, pp.167-172.
14. Meyerhof, G.G. and Ranjan, G. (1973), "The Bearing Capacity of Rigid Piles under Inclined Loads in Sand. II: Batter Piles", *Canadian Geotech. J.*, Vol.10, pp.71-85.

15. Park, J. U. (2012), *A Study on Behavior Characteristics of Concrete Pile under Lateral Loads*, PhD thesis, Keimyung University (in Korean).
16. Park, Y.H., Kim, S.H., Kim, N.Y., and Yook, J.H. (2009), *Foundation Engineering Practice and Integral Abutment Bridge*, Construction Guide Co., Seoul, pp.31-32 (in Korean).
17. Sung, I.C., Lee, M.H., Choi, Y.K., and Kwon, O.K. (2013), “A

Study on the Vertical Bearing Capacity of Batter Piles Subjected to Vertical Load”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No.2, pp.49-55 (in Korean).

Received: October 19th, 2017

Revised : June 15th, 2018

Accepted: June 15th, 2018