

모형실험에 의한 사질토 지반에서의 군말뚝 거동에 관한 연구

유 남 재 · 김 영 길* · 이 명 옥** · 정 해 운***

A Study on the Behavior of Group Pile in Sandy Soil by Model Test

Nam-Jae Yoo · Young-gil Kim* · Myung-Wook Lee** · Hae-Woon Jeong***

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the bearing capacity, settlement and pile action of pile groups in cohesionless soil, based on a wide range of model test in laboratory. Model test were conducted with changing the variables affecting the behavior of group pile; Number of pile, Diameters, Spacings between piles and Arrangement of piles. Effects of these variables on group efficiency were investigated by analyzing test results. Test results were also compared with the existing analytical method and data obtained in-situ tests.

1. 서 론

말뚝기초를 설치하는 궁극적인 목적은 상부 구조물의 안정성을 확보하는 것이며, 이와같은 목적을 최소의 경비와 시간내에 달성하는 것이 연구의 목적이다. 시공관련 기술수준의 향상과 더불어 말뚝에 관한 이

론적인 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되어 왔지만 지반내에서 복잡하게 거동하는 말뚝 지지력에 대한 이해는 아직도 상당한 불확실성을 갖고 있는 부분으로 남아있는 실정이다.

말뚝기초를 설계함에 있어 극한지지력 및 침하량 산정은 가장 근본적이며 중요한 사항이다. 특히 군말뚝의 경우 정확한 극한지지력 및 침하량 산정에 어려움을 갖는다. 현재 말뚝시험으로 예측하고 있지만 지반내

강원대학교 토목공학과 부교수

* 강원대학교 토목공학과 박사과정

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

에서 복잡하게 거동하는 군말뚝의 파괴메카니즘을 추정하는 데는 아직 미흡하다.

이에 본 논문에서는 이러한 요구에 의하여 최소의 경비로 다양한 지반조건 및 시공상의 매개변수를 적용할 수 있는 축소된 모형실험을 통하여 사질토 지반에서의 군말뚝의 침하량 및 극한 지지력을 산정하여 기존의 이론식 및 실험 데이터와 비교 분석하여 시공상에 적용할 수 있는 신뢰성있는 자료를 제시하고자 한다. 모형실험을 통하여 얻은 하중-침하곡선을 분석하여 지반의 상대밀도, 말뚝의 직경, 간격, 및 배열을 변화시킨 상태에서 얻은 침하량 및 항복하중 값을 기존의 이론식 및 실험 데이터와 비교, 분석하였다.

침하량은 Poulos(1968)에 의해 제안된 상호 상관 계수를 이용한 군말뚝 침하량 산정방정식을 이용하여 모형실험을 통하여 얻은 값과 비교 하였다.

단일말뚝의 극한지지력은 일반적으로 선단지지력과 주변마찰력으로 분리하여 생각할 수 있는데, 선단지지력을 지배하는 변수인 N_q 값에 대한 기존의 극한지지력 값²⁰⁾과 비교하였으며, 군말뚝의 극한지지력은 다양한 기존의 실험 자료²¹⁾들과 비교 분석한 값들과 비교하는 방법으로 해석을 실시하였다.

2. 이론적 연구

2.1 하중-침하 곡선 분석

모형실험을 통하여 얻은 하중-침하 곡선을 분석하는 방법에는 이미 수십종에 달하는 실용적인 극한하중 판정법이 있지만 용이하지만은 않다. 또한 재하시험을 통해 얻은 하중-침하 곡선은 극한 하중상태까지 도달하지 않은 하중단계까지만 실시하여 극한 하중값을 실질적으로 관찰할 수 없다. 따라서 하중과 침하량의 관계가 변화되기 시작하는 하중을 구하는 관계로 항복하기 시작

하는 하중, 즉 항복하중 판정법으로 산정함이 타당하다.

우선 하중-침하량 관계로 부터 판정하는 방법은 하중과 침하량의 곡선으로부터 극한하중을 판정하는 방법과 하중 및 침하량의 좌표를 변환시켜 극한하중을 판정하는 방법의 두 가지로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 DIN 1054, British CP2004, Schenck 법, Buttler & Hay 법, 일본토질공학회기준등이 속하며, 이 외에도 Housel이 제안한 Tangent Elastic Limit 법¹⁷⁾, Rebound Elastic Limit 법, Davision이 제안한 Offset 법¹⁶⁾, Fuller & Hay가 제안한 Slope Criteria²⁰⁾ 법 등이 있다. 한편 후자의 경우는 Van der Veen의 $S\text{-log}(1-P/P_{max})$ 법¹⁸⁾, $\log P\text{-log} S$ 법¹⁹⁾, $S\text{-log} P$ 법 등이 있다.

따라서 본 연구에서는 비교적 타당성이 입증된 $\log P\text{-log} S$ 법을 적용하여 변곡점을 항복하중값으로 취하였다.

2.2 침하량 산정

Poulos(1968)와 Poulos & Mattes(1971)는 인접한 서로 다른 두개의 말뚝에서 하나의 말뚝의 침하는 다른 하나의 말뚝에 의해 침하에 영향을 받는다는 원리를 일반적인 군말뚝에 적용시켜 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\rho_k = \sum_{j=1, j \neq k}^n (\rho_{1j} P_j \alpha_{kj}) + \rho_{1k} P_k$$

여기서,

ρ_{1j} 는 단위하중 하에서의 단일말뚝 j 의 변위,

α_{kj} 는 간격에 따른 말뚝 j 에서의 k 에 의한 영향계수.

3. 실험 내용

3.1 개요

본 연구의 축소된 모형실험에서 지반으로 사용된 시료는 공기 건조된 주문진 표준사로서 기본적인 특성을 얻기 위하여 체분석, 최대, 최소 간극비 및 비중실험을 실시하였고 극한 지지력을 산정하기 위한 전단강도 정수를 구하기 위하여 삼축압축실험 및 직접전단실험을 실시하였다. 모형기초의 재하 실험에서 모형지반은 상대밀도를 45%, 80%로 형성하였으며 말뚝의 직경, 간격, 및 배열을 변화시켰다.

3.2 모형지반의 기본물성

본 연구에 실내물성시험을 통하여 얻은 모형지반(주문진 표준사)의 물리적 성질은 Table 1.과 Table 2.에 보인바와 같다.

Table 1. Basic Soil Properties

Grain Size Distribution	$D_{10}=0.21\text{mm}$ $C_u=1.19$ $C_g=1.01$
Maximum Dry Density	1.682 g/cm ³
Minimum Dry Density	1.384 g/cm ³
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6

Table 2. Soil Properties of Model Test

Parameter	Dry Density	Friction Angle
80%	1.612 g/cm ³	43.09°
45%	1.504 g/cm ³	35.56°

3.3 실험방법

본 모형실험에서는 500mm×500mm×600mm의 모형토조에 강사법을 사용하여 상대밀도 80, 45%의 균질한 모형지반을 조성하였으며, 직경 5, 7, 9mm의 모형 강봉말뚝을

간격(파일 직경의 2배, 3배, 5배) 및 배열(단말뚝, 1행×2열, 2×2, 2×3, 3×3, 3×4, 4×5, 5×5)을 변화시켰다. 모형 강봉말뚝은 편심하중을 줄이기 위하여 끝을 등그렇게 만들었다. 사질토지반에서는 균말뚝의 설치순서에 의해 위치별하중분담에 차이가 있으므로 현장에서 실시하는 방법으로 중앙에서 바깥쪽으로 설치하는 순서에 입각하였으며, 일정한 간격으로 구멍이 뚫린 함석판을 이용하여 일정한 말뚝간격을 유지하였다.

실험방법은 모형지반(높이 400mm)의 중앙에 모형말뚝(길이 200mm)을 설치하여 유압실린더를 사용하여 일정한 속도로 30mm 재하실험을 실시한다. 재하실험 중 모형말뚝의 침하량은 LVDT를 통하여 측정하고, 그에 대응하는 하중값은 Load Cell을 사용하여 얻은 데이터를 컴퓨터를 통하여 자동 저장시킨다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하중-침하 특성

모형 지반의 상대밀도, 말뚝의 직경, 간격, 배열을 변화시킨 상태에서 얻은 하중-침하 곡선은 전반적으로 일관성있는 곡선 형태를 가진다.

항복하중 값에서 비교한 곡선의 형태는 일반적으로 45%에 비하여 80%에서의 값이 동일한 조건하에서 크게 나타나며, 배열이 증가할 수록 역시 증가한다. 또한 직경, 간격이 증가할 수록 45%에서는 항복하중값이 증가하는 반면, 80%에서는 간격의 증가에 따라 항복하중 값이 감소하는 것을 볼 수 있다.

초기 접선 탄성계수는 45%에 비하여 80%에서 크게 나타내며, 변곡점 이후의 곡선에서도 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다.

4.1.1 단일 말뚝의 극한 지지력

일반적으로 단일말뚝의 극한지지력은 다음의 식과 같다.

$$Q_u = Q_p + Q_s = A_p \sigma'_{vq} N_q + p K_s \sum_{L=0}^{L=L} \sigma'_{vL} AL$$

여기서,

σ'_{vq} 는 말뚝 선단에서의 유효응력,

σ'_{vL} 는 말뚝길이에따른 연직유효응력,

K_s 는 지반응력 계수,

N_q 는 지지력 계수.

기존에 제안한 N_q 값에 의한 단일말뚝의 극한지지력과 실험을 통해 얻은 극한지지력을 비교한 결과는 Table 5.에 보는 바와 같다.

Table 5. Bearing Capacity of Single Pile
단위(kg)

상대밀도(%)	45			80			
	직경(mm)	5	7	9	5	7	9
Test		1.2	2.3	3	4.5	7.5	12
De Beer (1945)		3.0	5.7	9.2	18.6	36.4	60
Brinch Hansen(1961)		1.1	1.9	3	7.53	14.6	24
Caquot-Kerisel (1956)		1.2	2.2	3.4	5.19	10	16.4
Skempton, Yassin, Gibson (1953)		1	1.7	2.6	3	5.7	9.26
Vesic(1972)		1.1	2.0	3.1	1.7	3.2	5.1
Meyerhof (1976)		0.6	0.9	1.4	1.4	2.6	4.1
Coyle & Castello(1981)		0.3	0.7	1.2	1.1	3.1	6.0

4.1.2 군말뚝의 극한지지력

군말뚝기초의 지지력은 극한지지력은 일반적으로 다음식과 같이 효율로 나타낸다.

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

여기서,

η 는 군말뚝의 효율,

$Q_{g(u)}$ 는 군말뚝기초의 지지력,

$\sum Q_u$ 는 단일말뚝의 지지력×말뚝갯수.

Table 6. Efficiency of Group Pile

상대밀도	간격	직경(D)	효율
80%	2D	5mm	0.89
		7mm	0.91
		9mm	0.9
	3D	5mm	0.94
		7mm	0.93
		9mm	0.92
	5D	5mm	0.99
		7mm	0.99
		9mm	0.99
45%	2D	5mm	1.74
		7mm	1.7
		9mm	1.66
	3D	5mm	1.47
		7mm	1.45
		9mm	1.48
	5D	5mm	1.1
		7mm	1.09
		9mm	1.14

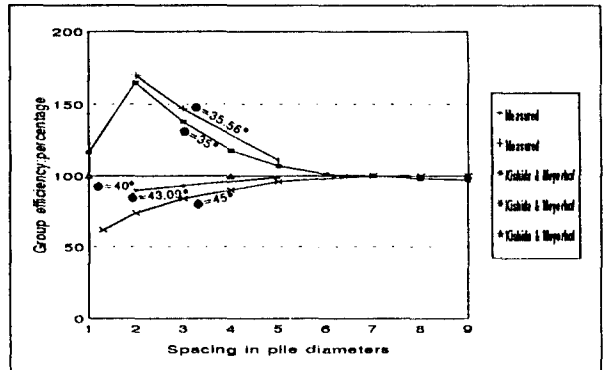


Fig. 1. Measured Values of Group Efficiency

4.2 결과분석

모형실험을 통하여 얻은 본 연구의 결과는 다음과 같다.

군말뚝의 침하량은 Poulos(1968)가 제안한 탄성이론²⁾에 의한 이론식과 비교하여 비교적 일치하였다. 이는 군말뚝에서 임의의 말뚝의 침하는 인접한 말뚝의 거동에 의하여 영향을 받는다는 기본가정으로 출발한 것이다.

단일말뚝의 극한지지력에 대한 기존에 제안한 N_q 값에 대한 선단지지력과 주변마찰력을 고려하여 계산한 값과 모형실험을 통하여 얻은 실험값을 비교한 결과 Brinch Hansen, Caquot -Kerisel, Vesic²⁰⁾에 의한 값의 범위 안에 있음을 알 수 있었다.

사질토 지반에서 군말뚝의 극한지지력은 일반적으로 효율값으로 나타내는데 상대밀도 및 말뚝간 간격의 변화에 의해 크게 영향을 받으며, 80%($\phi=43.09^\circ$)의 경우 전체적으로 1이하의 값을 갖으며 말뚝의 간격이 커질수록 효율이 커지며, 45%($\phi=35.56^\circ$)에서는 1이상의 값을 갖으며 말뚝의 간격이 커질수록 효율이 작아지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Kishida & Meyerhof²¹⁾의 실험결과와 비교하여 Fig.1에서 보여주는 것과 같이 45%에서 다소의 차이를 보여주지만 같은 경향을 볼 수 있다.

이는 사질토 지반에서 군말뚝의 효율은 지반이 조밀한 모래일 수록 횡방향 응력증가로 인한 입자파쇄 효과에 의해 ϕ 값이 낮아지고 느슨한 모래의 경우 말뚝간 상호작용에 의해 불력파괴에 의해 ϕ 값이 높아지는 것으로 추정된다.

5. 결 론

본 연구는 비점착성 사질토 지반에서의 군말뚝 모형실험에 관한 연구로서 모형지반의 상대밀도, 모형말뚝의 직경, 간격, 그리고 배열을 변화시킨, 매개변수적 모형실험을 실시하여 침하량, 극한지지력, 하중-침하 특성에 미치는 영향을 검토하였으며, 기존의 이론식 및 실험 데이터와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형실험을 통하여 측정된 군말뚝의 침하량은 Poulos가 제안한 식에 의한 계산값과 비교적 일치한다.
2. 단일말뚝의 극한지지력 값을 기존 의 이론식과 비교한 결과 Brinch Hansen, Caquot -Kerisel, Vesic 에 의한 값이 모형실험결과와 비교적 일치한다.
3. 군말뚝의 효율은 상대밀도 변화에 의해 크게 영향을 받으며, 지반의 상대밀도 80%에서 전체적으로 군 말뚝의 효율은 1이하의 값을 갖고, 상대밀도 45%에서는 효율이 1이상 의 값을 갖는다.
4. 군말뚝의 간격을 증가시킨 실험결과 지반의 상대밀도 45%에서는 효율이 감소하는 반면, 상대밀도 80%에서는 증가하는 것으로 나타난다. 이는 Kishida & Meyerhof의 실험결과와 유사한 경향을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] Meyerhof, G.G., "The ultimate bearing capacity of foundations," Geotechnique, Vol. 2, 1951, pp.301-332.
- [2] Poulos, H.G. and Davis, E.H., "Pile foundation Analysis and Design," John Wiley and Sons, 1980
- [3] Whitaker, T., "Experiments with model piles in groups," Geotechnique, Vol. 7, 1957, pp.147-167.
- [4] Vesic, A.S., "Experiments with instrumented pile groups in sand," ASTM. STP444, 1969, pp.177-222.
- [5] Kishida, H. and Meyerhof, G.G., "Bearing capacity of pile groups

- under eccentric loads in sand," Proc. 5th ICSMFE. Fol.2, 1965, pp.270-274.
- [6] Beredugo, Y.O., "An experimental study of the load distribution in pile groups in sand," Canadian Geotechnical Journal, Vol.3, No.3, 1966, pp.145-166.
- [7] Kishida, H., "Ultimate bearing capacity of piles driven into loose sand," Soils and Foundations, Vol.7, No.3, 1967, pp.20-29.
- [8] Vesic, A.S., "Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand," Proc. Symp. Bearing capacity of Fdns. Dukc university, 1967, pp.53-68.
- [9] Olson, F. and Flaot, K.S., "Piledriving formulas for friction piles in sand," Proc. ASCE. Vol. 93, No. SM6, 1967, pp.279-296.
- [10] Housel, W.S., "Pile load capacity estimates and test results," Proc. ASCE Vol. 92, No. SM4, 1966, pp.1-30.
- [11] Tejchman, A.F., "Model Investigation -s of pile groups in sand," Proc. ASCE No. SM2, 1973, pp.199-217.
- [12] Meyerhof, G.G., "Bearing capacity and settlement of pile foundations," Proc. ASCE. GT3, 1976, pp.197-223.
- [13] Coyle, H.M. and Castello, R.R., "New design Correlations for pile in sand," Proc. ASCE. GT7. 1981, pp.965-986.
- [14] Vesic, A.S., "Design of pile foundations," National Cooperation Highway Research Program, Report No.42, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1977.
- [15] Davisson, M.T., "Pile Load Capacity", Proceeding Design, Construction and Performance of Deep Foundation, ASCE, Seminar, Univ. of California Burkley, 1975.
- [16] Housel, W.S., "Pile Load Capacity: Estimates and Test Results", Jour. SMFD, ASCE, Vol. 92, No. SM4, 1966, pp.1-30.
- [17] Van der Veen, C. "Loading Test on An Unorthodox Concret Cuff Pile", Proc., 6th ICSMFE, Vol.2, 1965, pp.333-337.
- [18] De Beer, E.E., "The Scale Effect in The Transposition of The Results of Deep Sounding Tests on The Ultimate Bearing Capacity of Pile and Caisson Foundation", Geotechnique, Vol. 13, No.1, 1963, pp.39-75.
- [19] Fuller, F.M. and Hay, H.E., "Pile Load Test Including Quick-Load Test Method, Conventional Method & Interpretation", Highway Research Record, No.333, Transportation Research Board, Washington, 1970.
- [20] Prakash, S. and Sharma, H.D., "Pile foundations in Engineering Practice", John Wiley & Sons, 1990, pp.221-228.