모래지반에서 연직하중을 받는 단독경사말뚝의 경사각도와 상대밀도에 따른 연직지지력에 관한 연구

A study on the vertical bearing capacity according to the inclination angle of single batter piles and the relative density of sand under vertical loads

윤성규* · 김지성** · 강민수*** · 강기천****

Yun, Seong-Kyu*, Kim, Jiseong**, Kang, Minsu***, and Kang, Gichun****

Abstract

This study analyzed the increase in the compressive bearing capacity of single-sloped piles according to the relative density and inclination angle when the batter piles are subjected to a vertical load in non-adhesive sand. An experiment was conducted with inclination angles of 0, 10, 20, 30, and 40, and the relative density of sandy soil was divided into 31% (loose), 53% (medium), and 72% (dense) and compared with the results of the earlier research. As a result of the experiment, when the relative density of the ground was medium and dense, the bearing capacity was greater than that of the vertical pile (0°) at all angles. The tendency noted was that the bearing capacity of the pile increased from vertical to 20° and gradually decreased after 20°. The same tendency was also exhibited by loose sandy soil, but with less bearing capacity than the vertical pile (0°) except for 20°.

Key words : Batter Pile, Vertical Load, Bearing Capacity

요 지

본 연구는 비점착성 사질토 지반에서 단독경사말뚝이 연직하중을 받을 때, 상대밀도 및 경사각에 따른 단독경사말뚝의 압축지지력의 증가 양상을 분석하였다. 경사각을 각각 0°, 10°, 20°, 30°, 40°로 선단폐쇄동관말뚝을 매입하였으며, 사질토의 상대밀도를 31%(느슨), 53%(중간), 72%(조밀)로 구분하여 실험을 실시하여 기존의 관련 연구 결과와 비교하였다. 실험 결과 지반의 상대밀도가 중간과 조밀인 경우 모든 각도에서 연직말뚝(0°)의 지지력보다 큰 지지력을 나타내었다. 그 경향은 말뚝의 각도가 연직에서 20°까지는 지지력이 증가하였고, 20° 이후에는 점차 감소하였다. 느슨한 경우도 같은 경향을 보였지만 20°를 제외하고 모두 연직말뚝(0°)보다 적은 지지력을 나타냈다.

핵심용어 : 경사말뚝, 연직하중, 지지력

1. 서 론

말뚝은 양질의 지반층이 깊은 곳에 있는 경우, 상부구조물

의 하중을 양질의 지반층에 전달하기 위하여 가장 널리 사용되고 있으며, 단면적에 비하여 길이가 매우 긴 부재를 말한다.

*정회원, 경상국립대학교 공학연구원 학술연구교수(E-mail: tjdrb330@gnu.ac.kr)
Member, Research Prof., Engrg. Research Institute, Gyeongsang National University

**정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수(E-mail: kimjs@jvision.ac.kr)
Member, Assistant Professor, Department of Cadastre & Civil Engineering, Vision College of Jeonju

***국토안전관리원 안전진단본부 과장(E-mail: tempest1240@kalis.or.kr)
Manager, Safety Diagnosis Division, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety

****교신저자, 정회원, 경상국립대학교 공과대학 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University

최근에는 구조물의 중량화 및 대형화와 건설현장의 부지 확보의 어려움에 의하여 악조건 지반에서 구조물을 시공하는 사례가 많아져 말뚝의 중요성과 관심이 많아지고 있다. 또한 콘크리트 말뚝의 관입이 어려운 굳은 지반에 말뚝을 관입해야 할 필요성이 커지면서 강 말뚝의 시공 사례가 많아지고 있다. 현재까지 연직말뚝의 거동특성에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 반면에 경사말뚝은 교대 및 옹벽 등에 많이 이용되고 있지만 경사말뚝에 대하여 현재까지 수행된 연구들은 대부분 인발력이나 수평하중에 의한 변위 관계에 대해서만 주로 이루어져 왔다.

Petravits and Awad (1968)는 하중의 작용방향을 변화시킨 실험으로부터 경사말뚝의 하중을 연직말뚝의 하중에 대한 백분율의 형태로 제시하였다(Fig. 1). Meyerhof (1973)는 경사진 말뚝의 축방향 인발하중에 대한 실험으로부터 사질토지반에 적용할 수 있는 인발저항력 산정식을 제안하였고 경사진 말뚝에 대한 인발계수는 매입식 말뚝보다 타입식 말뚝의 경우가 더 클 수 있다고 하였다. Meyerhof and Ranjan (1973)은 축방향 하중을 받는 경사말뚝의 주면마찰력 계산 시 사용하는 토압계수는 연직말뚝의 토압계수보다 약간 클 수 있다고 추정 하였다. Das (1983)는 주면 마찰력이 일정하다는 가정하에 상대밀도에 따른 경사말뚝의 한계깊이비를 제안하였다. Hanna and Afram (1986)은 연직말뚝과 경사말뚝에 대해 말뚝의 직경을 다르게 하여 실내인발시험을 실시하였고, 그 결과 말뚝의 경사각도가 커질수록 말뚝의 인발저항력은 점차 작아진다는 것을 확인하였다. Bae (1997)은 경사말뚝의 인발하중에 영향을 미치는 요인으로 말뚝표면의 거칠기가 가장 큰 영향을 미친다는 것을 검증하였다. Kim (2001)은 경사말뚝의 모형실험을 통하여 지지력과 토압계수(K) 값의 변화를 분석하였으며, Sung (2002)은 압력토조

를 이용하여 연직하중을 받는 경사말뚝의 경사각도에 따른 연직지지력에 대한 실험하였다. Manoppo (2010)는 균질한 사질토에서 수평하중을 받는 경사말뚝의 지지력에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같이 경사말뚝에 대하여 현재까지 수행된 연구들은 대부분 인발력이나 수평하중에 의한 변위 관계에 대해서만 주로 이루어져 왔다. 경사말뚝이 인발이나 수평력을 지지하기 위해 시공해 오고 있으나 연직압축하중을 받는 경우가 많으므로 압축거동에 대한 하중과 변위 사이의 관계에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 모형시험을 통해 사질토 지반에서 단독경사말뚝이 연직하중을 받을 때, 지반의 상대밀도를 31%(느슨), 53%(중간), 72%(조밀) 및 말뚝의 경사각을 각각 0°, 10°, 20°, 30°, 40°로 달리하여 단독경사말뚝의 압축지지력의 증가 양상을 분석하였다.

2. 모형시험

모래지반에서 연직하중을 받는 경사말뚝의 거동 특성을 파악하기 위한 시험 장치는 Fig. 2와 같다. 모형 시험에 사용된 토조는 500 × 1,400 × 1,000 mm의 강재로 제작하였으며 이는 말뚝과 토조 벽면사이의 간섭이 일어나지 않는 5D (말뚝직경의 5배) 이상으로서 충분한 경계거리를 유지하였다. 시험에 사용된 모형말뚝은 선단이 폐쇄된 동관으로 Fig. 3과 같으며 그 제원은 Table 1과 같다. 모형말뚝은 상사관계를 고려하여 원형의 동관을 사용하였고 Iai (1989)의 1 g 상사비를 적용시켜 축소모사 하였다. 또한, 말뚝의 휨강성이 말뚝거동에 지배적인 영향인자임을 감안해 말뚝의 두께를 1.27 mm로 조절하여 휨강성의 상사관계를 만족도록 하였다. 지반의 재료는 대한민국의 낙동강 유역에서 채취된 시료로써 #4번체를 통과한 모래를 사용하였고 함수비는 0.08%이었다. 시료에 대한 물리적 성질과 입도곡선은 Table 2와 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 지반의 밀도를 측정하기

Fig. 1. Compare the Vertical Bearing Capacity of Piles (Petravits and Awad, 1968)

Fig. 2. Schematic Diagram of Test Setup

위해 Fig. 5와 같이 모형 지반 하부에 밀도 측정 용기를 매설하여 모래를 포설한 후 토조 저면에 설치된 진동모터로

Fig. 3. Model Pile

Table 1. Characteristics of Model Pile

L (mm)	D (mm)	T (mm)	E (MN/cm ²)	I (cm ⁴)	EI (MN · cm ²)
940	28.6	1.27	12.25	1.02027	12.4983

Table 2. Physical Properties of HAPCHEN Sand for Model Test

Property	Symbol	Value
Max. void ratio	e_{max}	0.79
Min. void ratio	e_{min}	0.58
Max. dry density	γ_{dmax}	15.78
Min. dry density	γ_{dmin}	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

2, 15, 90초의 진동을 주어 상대밀도를 측정하였다. 그 결과 측정된 모형지반의 상대밀도는 Table 3과 같다.

연직하중이 작용하는 단독경사말뚝의 거동특성을 파악하기 위한 모형실험 방법은 다음과 같다, ①먼저 Fig. 6(a)와 같이 말뚝거치대를 이용하여 모형말뚝을 일정한 경사로 거치한다. ②토조 위에 #4 망을 50 mm 간격으로 2겹 설치하고 강사장치를 이용해 모래를 포설한다(Fig. 6(b)). ③모형지반을 균등한 임의 밀도로 만들기 위해 토조 밑 진동모터를 작동시켜 일정시간 동안 진동다짐 한 후 말뚝거치대를 분리한다(Fig. 6(c)). ④수직 · 연직변위계 및 각종 계측기를 설치한다. ⑤말뚝두부의 연직변위는 1 mm/min 속도로 말뚝의 변위가 최대 25 mm 또는 연직하중 20 kN까지 계측한다(Fig. 6(d)). ⑥재하 후 하중을 제하여 말뚝의 탄성을 회복시킨다.

모형시험 조건에서 지하수의 영향은 무시하였으며, 말뚝 두부는 자유이며 말뚝선단은 폐쇄하였다. 말뚝 두부에 작용하는 하중은 연직하중만 고려하였다. Table 4는 본 연구에서 수행된 모형시험 조건을 나타내고 있다.

Fig. 4. Grain Size Distribution Curve for HAPCHEN Sand

Fig. 5. Molds for Measuring Relative Density

Table 3. Relative Density in Test Ground

Vibrating time (sec)	Range (%)	Avg. (%)
2	29.26~32.15	31
15	50.51~54.70	53
90	69.06~75.55	72

(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

Fig. 6. Model Test Method

Table 4. The Summary of Test Cases in Model Test

D_r (%)	31	53	72
Batter angle (Degrees)	$\alpha = 0, 10, 20, 30, 40$		
Pile head-deflection	25 mm		
Velocity	1 mm/min		
Load limit	1,960 N		

Table 5. Resulting of Test

	Relative density					
	$D_r = 31\%$		$D_r = 53\%$		$D_r = 72\%$	
	Yield stress (N)	Rate of increment (%)	Yield stress (N)	Rate of increment (%)	Yield stress (N)	Rate of increment (%)
0°	934	100	986	100	1,283	100
10°	813	87	1,121	114	1,370	107
20°	996	107	1,378	140	1,921	150
30°	904	97	1,242	126	1,766	138
40°	757	81	1,133	115	1,496	117

3. 시험결과 및 분석

본 연구에서는 모래지반에 설치된 연직하중을 받는 경사 말뚝의 하중-변위 관계로부터 경사각도와 모래지반의 상대 밀도에 따른 압축지지력의 증가 양상을 분석하였다. 그 결과는 Table 5와 같다.

3.1 상대밀도에 따른 말뚝 경사별 연직변위와 연직하중과의 관계

Fig. 7은 상대밀도에 따른 말뚝 경사별 연직하중과 연직변위의 관계를 나타낸 것이다. Indian Standard 2911 (2010)을 기준으로 한 1.2 cm에 해당하는 하중의 2/3를 허용하중이라 하였고 이 허용하중을 값을 추출하여 Fig. 8과 같이 상대밀도별 경사말뚝의 하중을 연직말뚝의 하중에 대한 백분율의 형태로 제시하였다. 상대밀도와 관계없이 경사각이 20°일

때 가장 큰 지지 저항값을 나타냈다. 느슨한 지반의 경우 경사각이 20°일 때 연직 말뚝의 경우보다 107%까지 지지력이 증가하였으며 이외의 각도에서는 연직말뚝의 경우보다 작은 지지력을 나타냈다. 중간과 조밀 지반에서는 연직에서부터 20° 전후까지 최대 140%, 150%의 지지력이 증가하는 양상을 보이다 20° 이후에 차츰 감소하는 양상을 나타냈다. 이는 말뚝의 경사각이 증가함에 따라 말뚝의 선단부의 선단 지지력은 감소하나 말뚝의 주변 마찰력이 증가하게 되는데 그 값의 차이로 인해 20° 부근에서 변곡점이 발생하는 위치로 이러한 그래프 형상이 나타나는 것으로 사료된다.

3.2 경사에 따른 상대밀도별 연직변위와 연직하중과의 관계

Fig. 9는 연직하중을 받는 단독경사말뚝에서 경사에 따른 상대밀도별 말뚝 두부의 연직 변위와 연직하중의 관계를

Fig. 7. Relation of Vertical Load and Pile Head Vertical Displacement Due to the Batter Angle

Fig. 8. Comparison of Load Capacity of batter Pile with Relative Density and Slope Angle

Fig. 9. Relation of Vertical Load and Pile Head Vertical Displacement Due to the Relative Density

나타낸 것이다. 연직변위와 연직하중의 관계 그래프는 2차 함수 곡선으로 나타냈으며, 말뚝이 동일한 경사각에서 연직

하중이 받을 때 상대밀도가 증가 할수록 큰 지지 저항값을 나타내고 있으며, 이는 동일한 선단지지력에도 말뚝의 주변

마찰력의 증가로 인해 지지력이 상승한 것으로 사료된다. 일정한 조밀한 지반의 경사말뚝이 상대밀도가 느슨 상태에서 흙 보다 약 2배 정도의 연직 저항값을 나타냈다.

4. 기존 연구를 통한 결과 분석

경사말뚝의 본질은 수평하중에 저항하는 것이기 때문에 연직하중을 적용한 연구는 세계적으로 많지 않으며, 본 연구와 같이 단독경사말뚝에 연직하중이 작용하는 기존의 연구는 아래의 3가지 연구들이 유일하다.

Petrasovits and Awad (1968)는 말뚝과 하중의 방향을 달리하여 많은 실험을 수행했다. 각각의 경우에 대하여 연직 말뚝에 대한 하중을 기준으로 Fig. 1같은 결과를 제시하였다. Sung (2002)은 상대밀도 50%의 모래지반, 말뚝길이/말뚝직경(L/D)을 25의 조건에서 경사말뚝의 경사각을 0°, 5°, 10°, 20°로 변화시켜 모형실험을 실시하였다. Mohammed et al. (2016)은 연직하중을 받는 경사말뚝에 대하여 상대밀도를 40%, 60%, 80%로 L/D를 15, 20, 25로 변화시켜 모형실험을 실시하였다. Fig. 10은 경사말뚝의 하중을 연직말뚝의 하중에 대한 백분율의 형태로 제시하였다. 이를 통해 연직하중을 받는 단독경사말뚝에 대한 기존 연구의 결과와 본 연구의 결과를 통해 다양한 조건에서 지지력 증가비에 대한 특징을 확인 할 수 있다. 완벽히 동일한 조건에서의 실험이 아니기 때문에 직접적인 비교 보다는 아래와 같은 경향을 제시 할 수 있다.

실험조건에 관계없이 20° 내외에서 최대 지지력증가를 나타내었다. 본 연구의 상대밀도 72%일 때 연직말뚝의 경우보다 150%로 가장 큰 지지력이 증가하였으며, 가장 작은 지지력 증가 또한 본 연구의 상대밀도 31%일 때 106%로 나타났다.

Figs. 11(a)~(c)의 각각을 통해 상대밀도가 증가할수록 최대지지력이 증가하는 것을 알 수 있으며, 상대밀도가 동일한 조건이 아니라 직접적인 비교는 힘들지만 각 실험 중 가장 비슷한 상대밀도를 비교한 경우, Fig. 12와 같이 L/D가

Fig. 10. Summary of Existing and this Research

(a)

(b)

(c)

Fig. 11. Variation in Pile Load Capacity with the Angle of battered Under Different Relative Densities

Fig. 12. Relationship for Increase Ratio of Pile Load Capacity with the Angle of battered Under L/D

Fig. 13. Relationship between Bearing Capacity and Resistance According to the Location of the Inflection Point

증가할수록 최대 지지력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 특히 본 연구뿐만 아니라 기존연구에서도 각 실험별 중간지반(약 50~60%)의 경우가 조밀지반(약 70~80%) 경우보다 10°와 40°에서의 지지력이 크게 나타나는 결과를 보였다. 이는 경사말뚝에 수직하중이 작용할 경우 지반의 상대밀도 및 말뚝의 경사각에 따라 말뚝내의 회전절점의 위치가 변화하며, 이때 회전절점의 위치에 따라 말뚝 아래에서 말뚝을 지지하는 지반영역(A)과 말뚝 상부에서 말뚝의 상승을 저항하는 지반영역(B)의 범위가 변화하는 것으로 판단된다. Fig. 13은 동일한 경사각에서 전체를 10으로 보았을 때 회전절점을 기준으로 A영역과 B영역을 나타낸 것으로, 지반의 상대밀도가 중간인 지반이 조밀한 지반보다 저항력이 크게 나온 이유도 이 때문 인 것으로 사료되며 기존 연구들에서도 이와 같은 역전현상이 발생하였다.

5. 결 론

비점착성 사질토 지반에서 단독경사말뚝이 연직하중을 받을 때, 상대밀도 및 경사각에 따른 저항 거동특성에 대해 실내모형실험을 수행하였고, 기존 연구와 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 말뚝의 지지력은 중간과 조밀 지반의 경우 연직에서 20°까지는 지지력이 증가하는 경향을 보였고, 20°보다 큰 각도의 경우에는 지지력이 점차 감소했다.
2. 느슨한 지반의 경우 20°를 제외하고 모두 연직 말뚝보다 적은 지지 저항값을 나타냈다.
3. 말뚝의 경사각이 동일한 경우 상대밀도가 클수록 지지력이 증가하였다.
4. 한편, 말뚝의 경사각이 10°, 40°인 경우 중간지반에서 지지력 증가율이 조밀한 지반에서의 증가율보다 크게 나타났다.

5. 말뚝길이/말뚝직경(L/D)은 15, 25, 32로 증가시켰을 때 연직지지력의 증가는 L/D가 커질수록 증가하는 경향을 보였다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2020R1A6A3A01096183).

References

- Bae, W.S. (1997). *Pullout behavior of inclined piles in sand*. Master's thesis, Chungbuk National University.
- Das, B.M. (1983). A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles. *Soils and Foundations, Japan*, Vol. 23, No. 3, pp. 198-199.
- Hanna, A.M., and Afram, A. (1986). Pull-out Capacity of Single Batter Piles in Sand. *Canadian Geotech. J.*, Vol. 23, No. 3, pp. 387-392.
- Iai, S. (1989). Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1 g Gravitational Field. *Soil and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
- Indian Standard 2911. (2010). *Code of practice for design and construction of pile foundations*.
- Kim, J.H. (2001). *An Experimental Study on Bearing Capacity of Battered Pile*. Master's thesis, Keimyung University.
- Manoppo, F.J. (2010). Behaviour of the ultimate bearing capacity of single flexible batter pile under horizontal loads in homogeneous sand. *Dinamika TEKNIK SIPIL*, Vol. 10, No. 2, pp. 116-119.
- Meyerhof, G.G. (1973) Uplift Resistance of Inclined Anchors and piles. *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, USSR*, Vol 2, No. 1, pp. 162-172.
- Meyerhof, G.G., and Ranjan, G. (1973). The Bearing Capacity of Rigid Piles under Inclined Loads in Sand. II: Batter Piles. *Can. Geotech. J.*, Vol. 23, pp. 387-392.
- Mohammed, A.A., Falah, H.R., and Khaldoun, S.A. (2016). Bearing capacity of batter piles embedded in sandy soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 529-532. doi: 10.1080/19386362.2016.1203094
- Petrasovits, G., and Awad, A. (1968). Consideration on the Bearing Capacity of vertical and batter piles Subjected to forces acting in different directions. *Proceedings*

of the 3rd Budapest Conferences on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Budapest, Hungary, pp. 15-18.

Sung, I.C. (2002). *A Study on the Vertical Bearing Capacity according to Inclination of the Batter Piles subjected to Vertical Load*. Department of Civil Engineering, Graduate School Kyungsung University.

Received	■	April 12, 2021
Revised	■	April 14, 2021
Accepted	■	April 30, 2021