

사질토 다층지반에 관입된 말뚝의 수평 거동 및 수평 지지력 특성 The behavior and capacity of lateral loaded pile characteristics in multi-layered sand

경두현¹⁾, Doohyun Kyung, 강병준²⁾, Beongjoon Kang, 홍정무³⁾, Jungmoo Hong, 이준환⁴⁾, Junhwan Lee

- 1) 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.
- 2) 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.
- 3) 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.
- 4) 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.

개요(SYNOPSIS) : Ultimate lateral loaded pile capacity is influenced by soil conditions. Methods of calculating ultimate lateral loaded pile capacity in homogeneous soil were suggested by a lot of previous researchers.(Broms 1964, Petrasovits & Award 1972, Prasad & Chari 1999, Zhang et al. 2005) There is only few homogeneous soil in actual condition, however, it could be not conviction that the methods from previous researchers are correct in multi-layered soil.

In this study, the variation of ultimate lateral loaded pile capacity was analyzed in the various multi-layered conditions, ultimate lateral loaded pile capacity was calculated by the methods from previous researchers. For this study, the Lateral Pile Load Tests (LPLT) were performed in calibration chamber, the soil was composed by 3 layers and each layers had a various relative density. The results of LPLT were compared with calculated results from the previous researchers.

주요어(Key words) : Multi-layered sand, Ultimate lateral capacity, Pile, Lateral behavior, Sand

1. 서론

최근 건설구조물의 대형화로 인하여, 기초구조물에 작용하는 하중은 복잡하고 다양해지게 되었으며, 기초 구조물의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 말뚝의 수평지지력은 연직지지력에 비해 상대적으로 일시적인 작용하중에 대한 지지력 요소로 간주되어 왔으나, 최근 풍하중이나 지진 등 수평작용력의 영향을 고려한 설계의 필요성이 부각되고 있다. 따라서 수평지지력의 특성에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있고, 실제로 상대밀도가 동일한 지층으로 이루어진 단일지반에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 이러한 연구결과가 다층지반에 적용시켜도 타당한 결과가 나올 것인가에 대한 명확한 해답은 쉽게 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 수평하중을 받는 말뚝을 대상으로 다층 사질토지반에서 나타나는 말뚝의 거동 및 수평 지지력 특성을 분석하였다. 분석된 모형실험의 지반조성은 상이한 상대밀도를 갖는 3개의 지반 층을 배

열하여 다양한 경우의 다층지반상태를 조성하였다. 본 논문에서는 사질토 다층 지반의 조성상태에 따라 다르게 나타나는 수평지지력 특성을 분석하고, 다층지반에서의 수평작용력에 대한 말뚝거동을 전반적으로 분석하였다.

2. 극한 수평지지력 산정

2.1 회전점을 고려하지 않은 극한 수평지지력 산정 방법

2.1.1 Broms 방법

Broms(1964)는 수평하중에 의한 말뚝의 회전점을 고려하지 않고 말뚝 주변의 단일 수평상태를 토대로 한 간략법을 제안하였다. Broms(1964)에 의하면 극한수평토압의 분포가 그림 1 (a)에서 보는 바와 같이 삼각형의 형태로 주어지며, 말뚝선단부에는 집중하중이 작용하는 것으로 가정하고 있다. Broms의 간략법에 사용되는 극한수평단위지지력은 다음과 같다.

$$P_u = 3K_p \sigma_v \quad (1)$$

여기서 P_u = 극한수평단위지지력, $K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$, σ_v = 연직응력이다. 극한수평단위지지력 분포를 이용하여 수평토압을 산정하고, 지면을 기준으로 모멘트를 취하면, 극한수평지지력 H_u 를 산정할 수 있다.

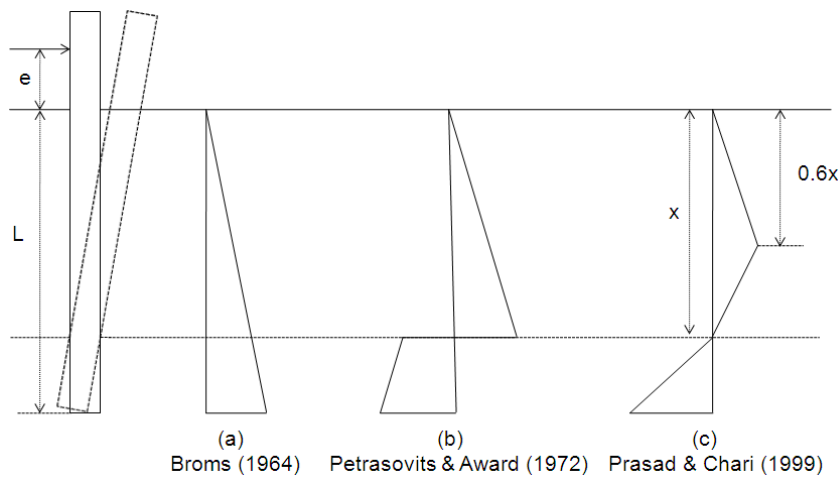


그림 1. 극한수평단위지지력 분포곡선

2.2 회전점을 고려한 극한 수평지지력 산정 방법

2.2.1 Petrasovits and Award 방법

그림 1 (b)에서 나타난 바와 같이 Petrasovits and Award(1972)는 수평하중 작용시 특정 깊이에서 나타나는 말뚝의 회전점을 중심으로 극한수평토압의 역전이 발생한다고 가정하고 있으며, 적용되는 극한수평단위지지력은 다음과 같다.

$$P_u = (3.7K_p - K_a) \sigma_v \quad (2)$$

여기서 $K_u = \tan^2(45 - \phi/2)$ 이다. 극한수평단위지지력 분포를 이용하여 수평토압을 산정하고, 회전점을 기준으로 모멘트를 취하면, 극한수평지지력(H_u)을 산정할 수 있다.

2.2.2 Prasad and Chari 방법

Prasad and Chari(1999)의 방법에서는 극한단위 수평지지력 분포가 말뚝의 회전점까지의 거리 x 과 $0.6x$ 의 지점에서의 변화를 반영하였고, 말뚝의 선단에는 $0.6x$ 에서의 단위극한수평토압의 1.7배의 토압이 발생하는 분포를 이용하였다. Prasad and Chari(1999)에 의해 제안된 말뚝 회전점까지의 거리는 다음과 같다.

$$d_r = [-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}] / 2.1996 \quad (3)$$

여기에서 L 과 e 는 각각 말뚝의 근입길기와 하중작용거리이다. Prasad and Chari에 의한 $0.6x$ 까지의 극한수평단위지지력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_u = sK_p\sigma_{v,0.6x'} = 10^{(1.3\tan\phi + 0.3)}\gamma x \quad (4)$$

여기에서 s = 단면형상계수 (원형=0.8, 사각형=1.0), $\sigma_{v,0.6x'}$ = 지표면으로부터 $0.6x$ 깊이에서의 유효연직응력, ϕ = 내부마찰각이다. 극한수평단위지지력 분포를 이용하여 수평토압을 산정하고, 회전점을 기준으로 모멘트를 취하면, 극한수평지지력(H_u)을 산정할 수 있다.

2.2.3 Zhang et al. 방법

Zhang et al.(2005) 방법은 기본적으로 Prasad and Chari(1999)의 방법과 동일한 형식을 취하고 있으나, 말뚝에 작용하는 극한수평토압의 요소를 수직분력과 전단분력으로 구분하여, 말뚝주변에 대해 각각의 적분량으로 전체 지지력을 정의하고 있다. Zhang et al.에 의한 $0.6x$ 까지의 극한수평단위지지력은 다음과 같다.

$$P_u = \eta K_p^2 \sigma_{v,0.6x'} + \xi K \sigma_{v,0.6x'} \tan\phi \quad (5)$$

여기에서 η 과 ξ 는 말뚝의 단면형상에 따른 형상계수로 표 1과 같고, K = 수평토압계수를 의미한다. 극한수평단위지지력 분포를 이용하여 수평토압을 산정하고, 회전점을 기준으로 모멘트를 취하면, 극한수평지지력(H_u)을 산정할 수 있다.

표 1. 말뚝형상계수

말뚝단면형상	η	ξ
원형	0.8	1.0
사각형	1.0	2.0

3. 모형토조실험

3.1 실험개요

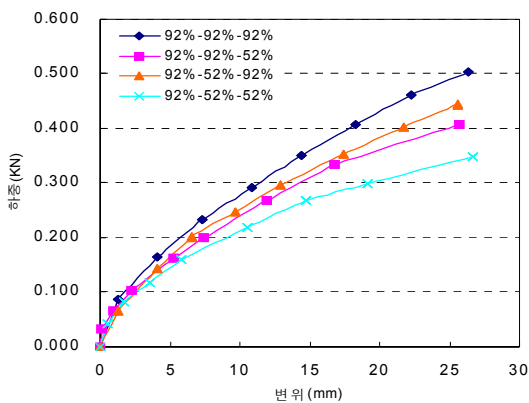
본 연구를 위해 모래질 지반을 대상으로 모형토조에서 말뚝의 수평재하시험을 수행하였다. 실험에 사

용된 토조는 직경 77cm, 높이 121cm 이고, 사용된 모형말뚝은 직경이 6cm, 길이가 90cm이다. 말뚝이 근입된 길이는 66cm 이며, 표 2에서 나타난 바와 같이 본 실험에서는 강사장치를 이용하여 상대밀도 92% 혹은 52%를 갖는 22cm의 3개의 지반층을 조성, 총 8개의 지반을 조성하였다. 지반을 구성하는 모래로는 주문진 표준사를 사용하였다.

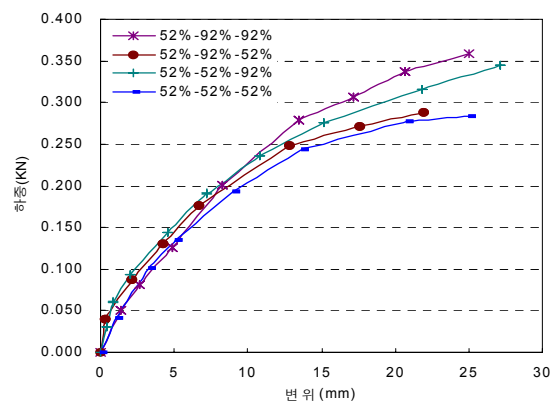
표 2. 다층지반조성상태

지반종류	상대밀도 (D_R)				다층지반조성도
	1	2	3	4	
92%-92%-92%	92%	92%	92%	92%	
92%-92%-52%	92%	92%	52%	92%	
92%-52%-92%	92%	52%	92%	92%	
92%-52%-52%	92%	52%	52%	92%	
52%-92%-92%	52%	92%	92%	92%	
52%-92%-52%	52%	92%	52%	92%	
52%-52%-92%	52%	52%	92%	92%	
52%-52%-52%	52%	52%	52%	92%	

그림 2는 실험에서 얻어진 하중-변위량 곡선을 나타낸다. 그림 2의 각각의 하중-변위량 곡선은 최하층-중간층-최상층의 관계로 표시되었으며, 그림 2 (a)는 최하층의 상대밀도가 92%일 경우를, 그림 2 (b)는 최하층의 상대밀도가 52%일 경우를 나타낸다. 말뚝의 극한수평지지력을 산정하는데 있어서 변형량의 기준은 GAI Consultant Inc. (1982) 와 Haldar et al.(1997)가 제안한 말뚝이 2° 만큼 기울었을 때를 기준으로 하였다.



(a)



(b)

그림 2. 수평하중을 받는 말뚝의 하중-변위량 곡선

표 3는 각 지반에서의 극한수평지지력 값을 나타낸다. 극한수평지지력 측정 결과 최하층이 동일한 상대밀도를 갖는 지반일 때, 중간층이 52%, 최상층 92%일때의 경우가 반대의 경우보다 우세한 극한수평 지지력이 발생하는 것으로 나타났다. 모든 다층지반의 전체 지지력 측정 결과를 비교해 볼 때, 지지력 발현에 있어서 최하층지반의 영향이 큰 것으로 나타났는데, 동일한 양의 상대밀도 92%의 지반층이 준

재한다 할지라도 최하층에 92%의 지반층이 존재할 때, 최하층에 52%의 지반층이 존재할 때 보다 큰 지지력이 측정되었다.

표 3. 극한수평지지력 실측치

지반종류	92%-92%-92%	92%-92%-52%	92%-52%-92%	92%-52%-52%
실측된 극한수평지지력 (kN)	0.487	0.378	0.436	0.339
지반종류	52%-92%-92%	52%-92%-52%	52%-52%-92%	52%-52%-52%
실측된 극한수평지지력 (kN)	0.332	0.294	0.329	0.281

그림 3은 Broms(1964), Petrasovits & Award(1972), Prasad & Chari(1999), Zhang et al.(2005)의 방법으로 예측된 극한수평지지력 값과 실험에서²를 기준으로 실측된 극한수평지지력 값을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 Zhang et al(2005)에 의한 방법을 통한 극한수평지지력이 실측값에 가장 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Zhang등이 사용한 Prasad & Chari에 의해 제안된 극한수평단위지지력의 분포가 실제의 토압 분포와 유사한 형태이고, 극한수평토압의 요소를 수직분력과 전단분력으로 구분한 것이 주요한 것으로 사료된다. 반면, Broms(1964), Petrasovits & Award(1972), Prasad & Chari(1999)의 경우 실측값보다 다소 높은 값이 예측되었는데, 그 크기는 Broms(1964), Petrasovits & Award(1972), Prasad & Chari(1999)의 순서로 더 높은 값이 예측되는 것으로 나타났다.

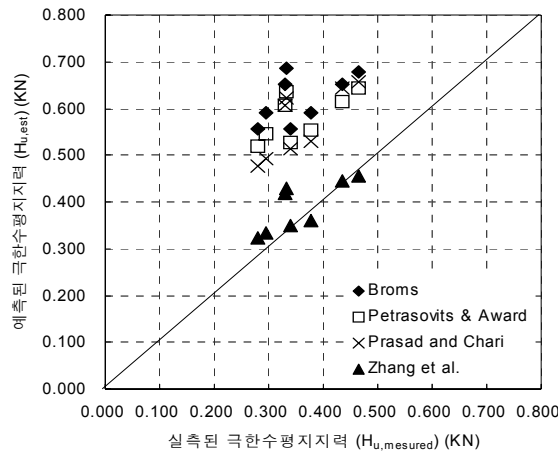


그림 3. 극한수평지지력 실측치와 예측치 비교

4. 결론

본 연구에서는 사질토로 구성된 다층지반에서의 말뚝의 극한수평지지력을 측정하고, 이를 다양한 예측방법을 통하여 예측된 값들과 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 다층지반에서의 말뚝의 극한수평지지력 측정결과 말뚝이 근입된 지반의 최하층의 상대밀도가 같은 상태에서 중간층의 지반이 52% 이고, 최상층의 지반이 92%일때의 경우가 반대의 경우보다 우세한 극한수평지지력을 갖는 것으로 나타났으며, 이는 다양한 예측식을 통하여 산정한 결과와 같은 결과이다.
2. 모든 다층지반의 전체 지지력 측정 결과를 비교해 볼 때, 지지력 발현에 있어서 최하층지반의 영향이 큰 것으로 나타났다.
3. 수평지지력예측결과 Brom(1964), Petrasovits & Award(1972), Prasad & Chari(1999), Zhang et al.(2005)의 방법 순서로 실측값보다 다소 높은 값이 산정되는 것으로 나타났다.
4. 다층지반에서의 말뚝의 극한수평지지력을 산정하기위해 사용된 다양한 방법 중에서 Zhang의 방법

이 실험결과와 가장 일치함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “교각급속시공을 위한 하부기초의 연구”의 결과중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Broms, B. B. (1964), “Lateral resistance of piles in cohesive soils”, Journal of soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.90, No.2, pp.27-64
2. GAI Consultant Inc. (1982), “Laterally loaded drilled pier research Vol. 2”. Research documentation GAI Report EL-2197, Research project 1280-1, California.
3. Haldar, A., Chari, T. R., and Prasad, Y. V. S. N. (1997), “Experimental and analytical investigation of directly embedded steel pole foundation”. Canadian Electricity Association, Montreal, Que., Research report CEA384T971.
4. Petrasovits, G. and Award, A. (1972), “Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil”, Proc. Of 5th European conf. on SMFE, Vol.3, pp.407-412.
5. Prasad, Y. V. S. and Chri, T. R. (1999), “Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soil”, Soils and Foundations, Vol.39, No.2, pp.21-29
6. Zhang, L., Silva, F., and Grismala, R. (2005), “Ultimate lateral resistance to pile in cohesionless soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol.131, No.1, pp.78-83