

## 지반층 변화에 따른 수평하중을 받는 말뚝의 거동 특성

### The behavior characteristic of the laterally loaded pile installed in multi-layered soil

경두현<sup>1)</sup>, Doohyun Kyung, 홍정무<sup>1)</sup>, Jungmoo Hong, 이준환<sup>2)</sup>, Junhwan Lee

<sup>1)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.

<sup>2)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ.

**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) 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, ultimate lateral capacities were estimated from artificial multi-layered soils and were measured from lateral load test that were composed by various soil conditions. The influence of layered soil conditions were confirmed by comparing with two results.

**Keywords** : Multi-layered sand, Ultimate lateral capacity, Pile, Lateral behavior, Sand

## 1. 서론

말뚝의 수평지지력은 연직지지력에 비하여 상대적으로 일시적인 작용하중에 대한 지지력요소로 간주되어 왔다. 그러나, 최근 풍하중이나 지진하중 등 수평작용력의 영향을 고려한 설계의 필요성이 부각되고 있으며, 실제로 수평하중을 받는 말뚝에 대한 연구는 많은 연구자들을 통하여 진행되어왔다. (Broms 1964, Petrasovits & Award 1972, Prasad & Chari 1999) 그러나, 이러한 연구의 대부분은 단일지반을 대상으로 이루어지고 있으며, 다층지반에 적용시킬 경우 방법에 따라 크고 작은 문제점이 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 다층지반에 관입된 수평하중을 받는 말뚝을 대상으로하여 지반층의 구성 및 상대밀도 변화에 따른 기존 방법의 지지력 특성 및 지반층의 영향을 분석하였다. 또한, 다층지반에 관입된 말뚝의 수평재하시험을 실시하여 실험 결과와 이론으로부터 도출된 결과를 비교, 분석하였다.

## 2. 극한수평지지력의 산정

### 2.1 극한수평지지력 산정 방법의 적용

극한수평지지력을 산정하기 위해서는 극한단위수평지지력분포가 결정되어야 하며, 말뚝거동전체의 힘 모멘트 평형조건에 따라 극한수평지지력을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 다층지반의 극한수평지지력을 산정하기 위해 Broms(1964)의 방법, Petrasovits & Award(1972)의 방법, Prasad & Chari(1999)의 방법을 이용하였다. 말뚝의 극한단위수평지지력분포형상은 그림 1과 같으며, 각 방법은 다음과 같이 나

타난다.

$$p_u = K_u \sigma_v \quad (1)$$

여기서,  $K_u = 3K_p$  (Broms 1964),  $3.7K_p - K_u$  (Petrasovits & Award 1972),  $10^{(1.3 \tan \phi + 0.3)}$  (Prasad & Chari 1999)  $\sigma_v$  = 연직응력이다.

기존의 말뚝의 극한수평지지력을 산정하는 방법은 단일지반을 대상으로 하는 방법이나, 본 연구에서 대상으로 하는 지반은 단일지반과 각기 다른 지반층으로 조성된 다층지반이므로, 극한수평지지력을 산정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. Broms(1964)의 방법과 Petrasovits & Award(1972)의 방법의 경우, 다층지반을 구성하는 각 지반층에 해당되는 물성의 적용이 직접 이루어 질 수 있으므로, 각 지반층의 물성을 고려하여 말뚝의 극한단위수평지지력을 산정하고, 모멘트의 힘평형을 이용하여 극한수평지지력을 산정하였다.

Prasad & Chari(1999)의 방법의 경우, 말뚝의 상위지반으로부터 0.6x까지는 극한단위수평지지력 분포를 가정하고 있으나, 0.6x 이하에서는 상위지반의 물성을 이용하여, 극한수평지지력을 산정하고 있으므로, 0.6x 이후의 지반의 물성을 고려할 수 없는 문제점이 있다. 따라서, 상위지반으로부터 0.6x까지는 각 지반층에 해당되는 물성을 적용하여 극한단위수평지지력을 산정하였고, 0.6x 이후로부터 회전점까지는 회전점에서의 극한단위수평지지력이 0이 된다는 가정 아래, 동일한 기울기로 감소시켜 주었다. 회전점 이후로부터 선단까지의 극한단위수평지지력 분포는 최하층에서 발생하게 되므로, 최하층의 물성을 이용하여 0.6x까지의 극한단위수평지지력을 가정하고 그 값의 1.7배한 값이 선단에서 발생하는 것으로 추정하였다. 따라서, 단일지반의 경우 Prasad & Chari(1999)의 분포형상을 그대로 따르며, 다층지반의 경우에도 각 지반층의 변화를 고려하여 극한수평지지력을 산정할 수 있도록 하였다.

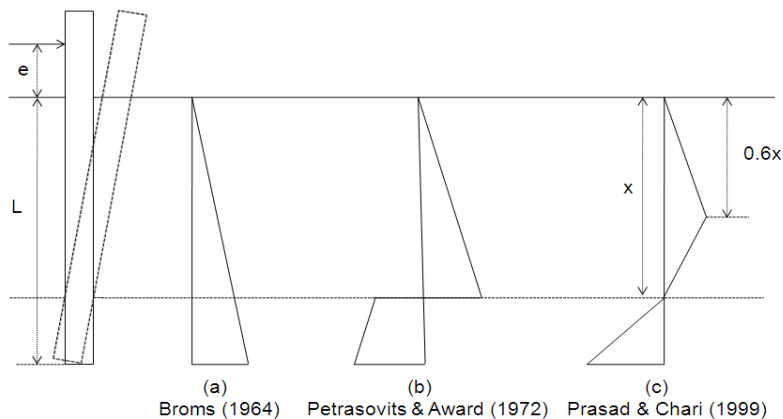


그림 1. 극한수평단위지지력 분포곡선

## 2.2 지반층의 변화에 따른 극한수평지지력의 특성

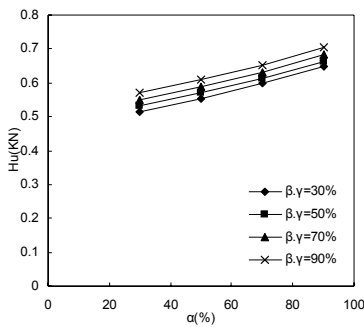
앞서 언급한 산정방법은 단일지반을 대상으로 제안된 방법으로, 다층지반에 적용시킬 경우 적절한 결과가 도출될 것인가에 대해 확답할 수 없다. 본 연구에서는 상대밀도 30%, 50%, 70%, 90%의 지반층이 배치되었을 경우의 각 방법에 따른 지반층의 변화에 따른 극한수평지지력 변화를 확인하였다. 가정된 말뚝은 직경 6cm, 근입깊이 66cm, 하중작용거리 14cm를 갖는 것으로 하였으며, 각 지반층의 강도특성은 실험에서 고려한 지반의 물성을 토대로 추정하였으며, 그 값은 표 1와 같다.

표 1. 가정된 지반층의 강도특성

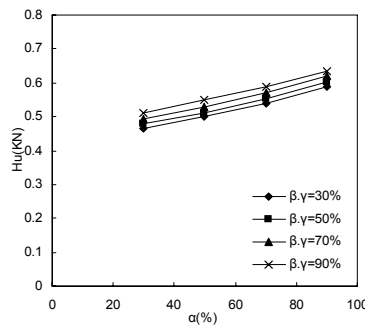
상대밀도( $D_R$ ) (%)	단위중량 ( $kN/m^3$ )	점착력 ( $kg/cm^2$ )	내부마찰각 ( $\phi$ )
30	14.00	0	33.15°
50	14.52	0	34.63°
70	15.15	0	36.11°
90	15.80	0	37.60°

그림 2, 그림 3, 그림 4는 상기의 산정된 극한수평지지력의 최상층, 중간층, 최하층의 상대밀도 변화에 따른 극한수평지지력의 증가량을 나타내는 그림으로  $\alpha$ 는 최상층의 상대밀도를  $\beta$ 는 중간층의 상대밀도를  $\gamma$ 는 최하층의 상대밀도를 나타낸다.

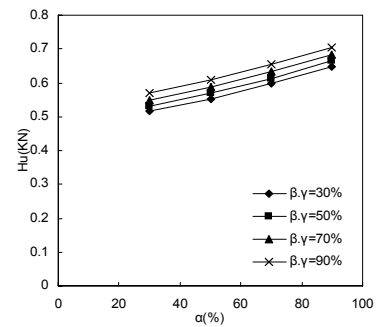
최상층의 상대밀도의 변화에 따른 극한수평지지력의 변화는 그림 2에서 나타난 바와 같이 최상층의 상대밀도가 증가함에 따라 극한수평지지력이 일정부분 증가하는 것으로 예측하고 있었으며, 그 크기는 상대밀도가 40% 증가함에 따라, Broms(1964)의 경우 15.15%, Petrasovits & Award(1972)의 경우 14.20%, Prasad Chari(1999)의 경우 20.49% 증가하는 것으로 나타났다.



(a) Broms(1964)



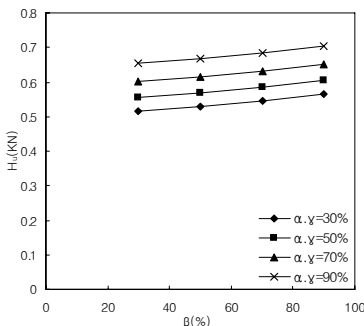
(b) Petrasovits & Award(1972)



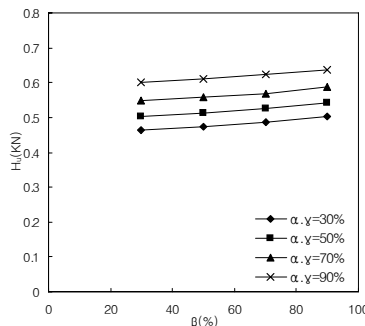
(c) Prasad & Chari(1999)

그림 2. 최상층의 변화에 따른 기존방법의 극한수평지지력 특성

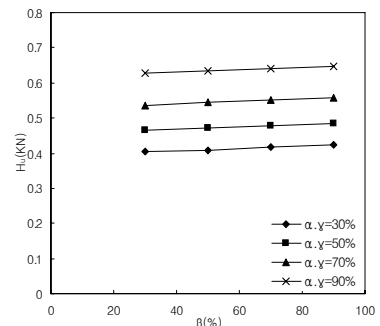
중간층의 상대밀도의 변화에 따른 극한수평지지력의 변화는 그림 3에 나타난 바와 같이 중간층의 상대밀도가 증가함에 따라 극한수평지지력이 다소 증가하는 것으로 예측하고 있으나, 그 크기는 Broms(1964)의 경우 5.49%, Petrasovits & Award(1972)의 경우 4.73%, Prasad Chari(1999)의 경우 2.65% 으로 최상층에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다.



(a) Broms(1964)



(b) Petrasovits & Award(1972)



(c) Prasad & Chari(1999)

그림 3. 중간층의 변화에 따른 기존방법의 극한수평지지력 특성

최하층의 상대밀도의 변화에 따른 극한수평지지력의 변화는 그림 4에 나타난 바와 같이 최하층의 상대밀도가 증가함에 따라 극한수평지지력이 거의 증가하지 않는 것으로 예측하고 있었으나, Prasad & Chari(1999)의 방법만이 일정부분 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 크기는 Prasad Chari(1999)의 경우 6.04%으로 최상층에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다.

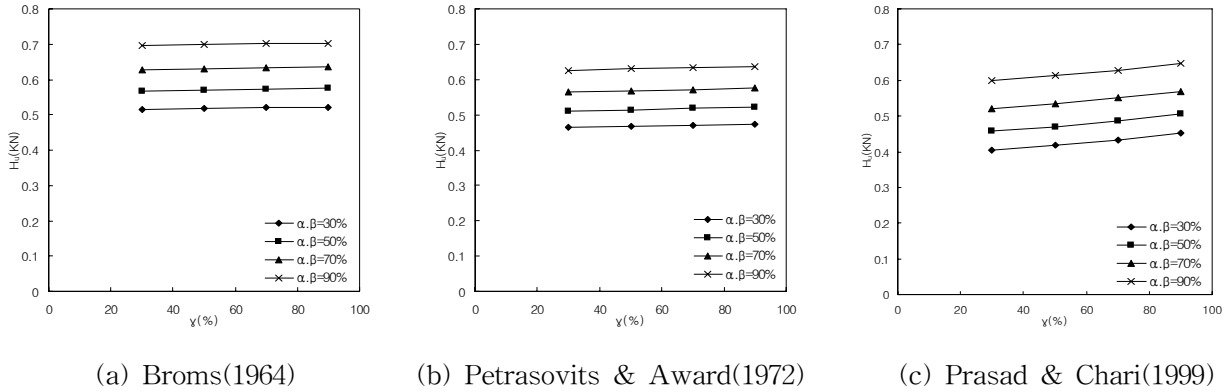


그림 4. 최하층의 변화에 따른 기존방법의 극한수평지지력 특성

### 3. 모형토조실험

#### 3.1 실험개요

본 연구를 위해 모래질 지반을 대상으로 모형토조에서 말뚝의 수평재하시험을 수행하였다. 실험에 사용된 토조는 직경 77cm, 높이 120cm 이고, 사용된 모형말뚝은 직경이 6cm, 길이가 90cm이다. 말뚝이 근입된 길이는 66cm 이며, 표 2에서 나타난 바와 같이 상대밀도 92% 혹은 52%를 갖는 22cm의 3개의 지반층을 조성하였다. 말뚝근입깊이 이후의 기초지반으로는 92%의 상대밀도를 갖는 지반이 50cm 조성되어, 총 8개의 지반을 조성하였다. 지반을 구성하는 모래로는 주문진 표준사를 사용하였다.

표 2. 다층지반조성상태

지반종류	상대밀도 ( $D_R$ )			
	최상층	중간층	최하층	기초지반
92%-92%-92%	92%	92%	92%	92%
52%-92%-92%	52%	92%	92%	92%
92%-52%-92%	92%	52%	92%	92%
52%-52%-92%	52%	52%	92%	92%
92%-92%-52%	92%	92%	52%	92%
52%-92%-52%	52%	92%	52%	92%
92%-52%-52%	92%	52%	52%	92%
52%-52%-52%	52%	52%	52%	92%

#### 3.2 극한수평지지력 측정 결과

그림 5는 실험에서 얻어진 하중-변위량 곡선을 나타낸다. 그림 5의 각각의 하중-변위량 곡선은 최상층-중간층-최하층의 관계로 표시되었으며, 지반층의 변화에 따른 하중-변위량 곡선을 확인하기 위해, 그림 5(a)는 최상층의 상대밀도가 변하는 경우를, 그림 5(b)는 중간층의 상대밀도가 변하는 경우를, 그림 5(c)는 최하층의 상대밀도가 변하는 경우를 나타내었다. 말뚝의 극한수평지지력을 산정하는데 있어서 변

형량의 기준은 GAI Consultant Inc. (1982) 와 Haldar et al.(1997)가 제안한 말뚝이 2° 만큼 기울었을 때를 기준으로 하였다.

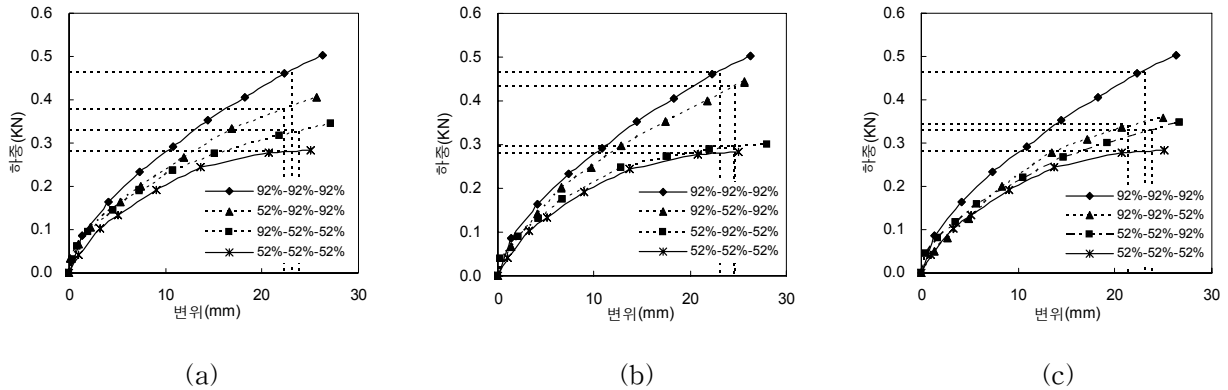


그림 5. 수평하중을 받는 말뚝의 지반층의 변화에 따른 하중-변위량 곡선

지반전체의 상대밀도가 높을수록, 큰 극한수평지지력을 갖는 것으로 나타났으며, 최상층과 최하층의 상대밀도가 변화할 때 중간층의 상대밀도가 변화할 때 보다 상대적으로 큰 지지력 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 말뚝거동의 하중-변위곡선을 통하여 산정된 극한수평지지력은 표 3에 표시하였다.

표 3. 극한수평지지력 실측치

지반종류	92%-92%-92%	52%-92%-92%	92%-52%-92%	52%-52%-92%
실측된 극한수평지지력 (kN)	0.465	0.378	0.436	0.326
지반종류	92%-92%-52%	52%-92%-52%	92%-52%-52%	52%-52%-52%
실측된 극한수평지지력 (kN)	0.343	0.293	0.326	0.280

### 3.3 지반층의 변화에 따른 극한수평지지력 특성

그림 6은 본 실험에서 배치한 지반층의 변화에 따른 극한수평지지력의 변화추이를 보여주는 그림이다. 그림 6(a)는 최상층의 지반상태가 다른 경우(Case 1)를 나타내고 있고, 그림 6(b)는 중간층의 지반상태가 다른 경우(Case 2)를 나타내고 있으며, 그림 6(c)는 최하층의 지반상태가 다른 경우(Case 3)를 나타내고 있다.

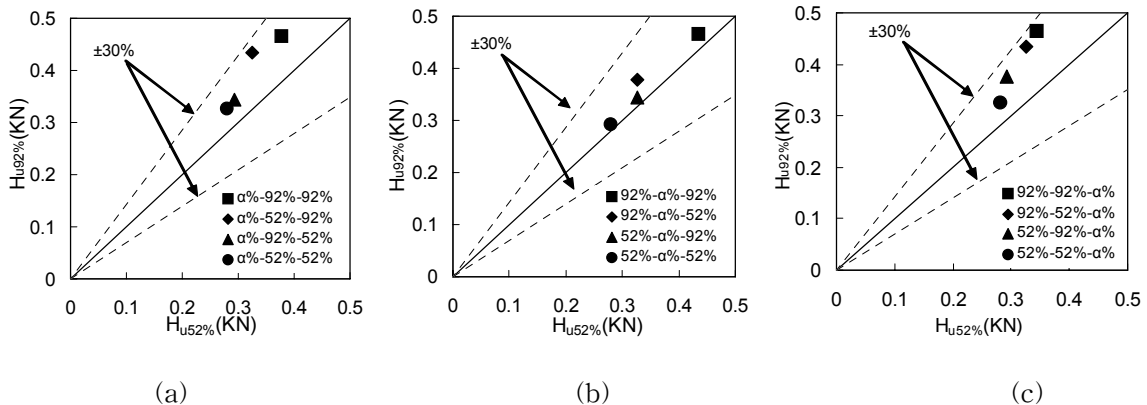


그림 6. 실측된 다층지반의 지반층의 변화에 따른 극한 수평지지력 특성

본 실험의 결과 그림 6에 나타난 바와 같이, 중간층의 지반상태가 다른 경우(Case 2) 극한수평지지력 차이는 8.21% 으로 큰 차이가 발생하지 않았다. 그러나, 최상층의 지반상태가 다른 경우(Case 1)와 최하층의 지반상태가 다른 경우(Case 2)에 있어서는 극한수평지지력의 차이가 있었으며 그 크기는 Case 1의 경우 상대밀도 92%의 지반층을 포함했을 때, 52%의 지반층을 포함했을 때 보다 평균적으로 약 22% 큰 극한수평지지력 갖는 것으로 나타났고, Case 3의 경우 평균적으로 약 28% 상대적으로 큰 극한수평지지력을 갖는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 단일지반을 대상으로 하는 기존의 말뚝의 극한수평지지력 산정방법을 이용하여, 가정된 다층지반에서의 말뚝의 극한수평지지력을 산정 하고, 실험결과와 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 기존방법을 통한 다층지반의 극한수평지지력을 산정한 결과 Broms(1964)의 방법과 Petrasovits & Award(1972)의 방법은 지반층의 물성변화에 따라 유사한 극한수평지지력 변화특성을 보이며, 지반층의 변화량에 대한 극한수평지지력의 변화량은 최상층, 중간층, 최하층의 순서로 큰 것으로 확인되었다.
2. 기존방법을 통한 다층지반의 극한수평지지력을 산정한 결과 Prasad & Chari(1999)의 방법은 지반층의 변화량에 대한 극한수평지지력의 변화량을 최상층, 최하층, 중간층의 순서로 크게 예측하고 있는 것으로 확인되었다.
3. 실험을 통한 지반층의 변화량에 대한 극한수평지지력의 변화량은 최하층, 최상층, 중간층의 순서로 큰 것으로 나타났으며, 그 크기는 28%, 22%, 8%로 나타났다.
4. 극한수평지지력 산정을 위한 기존방법은 지반층의 변화에 대한 극한수평지지력의 변화량 예측을 실제 측정되는 것 보다 과소하게 평가하고 있었으며, 특히 최하층지반의 물성변화에 따른 극한수평지지력의 변화는 실제보다 매우 과소하게 평가되고 있었다. 따라서, 다층지반의 극한수평지지력을 산정하는데 있어서 지반층의 변화에 따른 조건 변화를 보다 세밀하게 반영시킬 수 있는 방법이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “교각급속시공을 위한 하부구조의 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