

다층지반 하에서 수평하중을 받는 말뚝의 회전점 Rotation Point of Laterally Loaded Pile Under Multi Layered Soil

강병준¹⁾, Beongjoon Kang, 경두현¹⁾, Doohyun Kyung, 홍정무¹⁾, Jungmoo Hong, 이준환²⁾, Junhwan Lee

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ.

²⁾ 연세대학교 토목공학과 부교수, Associate Prof., School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ.

SYNOPSIS : Piles and pile foundations have been in common use since very early times. Usually function of piles is to carry load to a depth at which adequate support is available. Another important use of piles is to furnish lateral support and nowadays it is getting highlighted due to the wind load, lateral action of earthquake, and so on. After Broms (1964), many researchers have been suggested methods for estimating lateral capacity of pile. But each method assumes different earth pressure distribution and lateral earth pressure coefficient and it gives confusion to pile designers. Lateral earth pressure, essential in lateral capacity estimation, influenced by pile's behavior under lateral load. Prasad and Chari (1999) assumed the rotation point of pile and suggested an equation of ultimate lateral load capacity. In this study, we investigate the depth of rotation point in both homogeneous soil and multi layered soil, and compare to the estimation value by previous research. To model the pile set up in the sand, we use the chamber and small scale steel pile, and rain drop method. Test results show the rotation point is formed where the Prasad and Chari's estimation value, and they also show multi layered condition affects to location of rotation point to be scattered.

Key words : laterally loaded pile, rotation point, the multi layered soil condition,

1. 서 론

말뚝은 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 널리 사용된다. 말뚝의 수평지지력은 연직 압축지지력에 비해 상대적으로 일시적인 작용하중에 대한 지지력 요소로 간주되어 왔으나, 최근 풍하중이나 지진 등의 수평 작용력의 영향을 고려한 설계의 필요성이 부각되고 있다. 기존의 연구 결과들을 살펴보면 수평하중을 받는 말뚝의 거동 해석은 수평지지력과 이를 산정하기 위한 수평토압의 분포에 초점이 맞추어져 있다. Broms (1964)는 수평하중을 받는 말뚝의 거동을 주변지반의 단일 수평 상태를 토대로 한 간략법을 제안하였다. 따라서 극한수평토압의 분포는 그림 1(b)와 같이 삼각형 형태로 나타나며, 말뚝 선단부에는 집중하중이 작용한다고 가정한다. 이에 반해 Brinch 와 Hansen (1961), Petrasovits 와 Award (1972) 그리고 Meyerhof 등 (1981)은 수평하중이 작용할 때 말뚝 선단부로부터 일정 깊이 위의 회전점을 가정함으로써 (각 그림 1(a),(c),(e)) 회전점 이하에서 극한 수평토압의 역전현상이 발생한다고 가정하여 보다 실질적인 토압분포를 고려하고자 하였다. 그림 1(e)와 같이 Prasad 와 Chari (1999)는 말뚝의 회전점의 깊이 a 를 말뚝의 길이와 하중작용거리에 의한 식으로 제안하였다.

$$a = [-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}] / 2.1996 \quad (1)$$

여기서 L 과 e 는 각각 말뚝의 근입깊이와 하중작용거리이다. 이상의 각 연구들은 그 대상이 모두 균일지층내에서의 말뚝의 거동에 국한되어있으며, 지층조건의 영향은 고려되어있지 않다. 본 연구에서는 모형토조실험을 통해 말뚝에 수평 하중이 작용할 때의 회전점의 형성 위치를 기존 연구와 비교하고, 더 나아가 다층지반조건의 영향을 분석하였다.

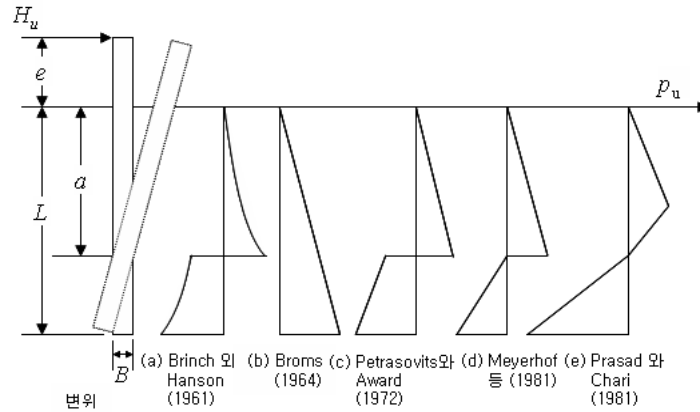


그림 1. 수평하중을 받는 말뚝에 작용하는 극한수동토압의 분포

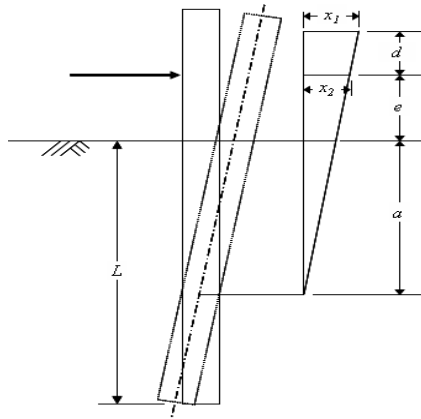
2. 모형토조실험

2.1 지층조성 및 지반조건

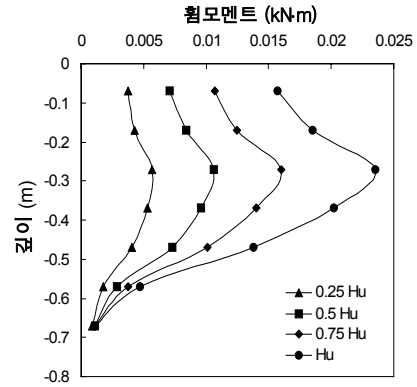
수평하중을 받는 말뚝의 회전점을 분석하기 위하여 모형강관말뚝을 이용한 실내모형시험을 수행하였다. 실험에 사용된 토조는 직경 77 cm, 높이 121 cm이며 모형지반 조성을 위해 주문진 표준사가 사용되었다. 말뚝이 근입되는 지반은 최하부의 50 cm와 22 cm씩 세 층으로 구분되어, 최하부 지층은 조밀한 상태로 하였으며 그 위 말뚝이 근입되는 지층은 조밀한 상태 (상대밀도 92% 이하 D로 표현) 혹은 느슨한 상태 (상대밀도 52% 이하 L로 표현)의 지층을 조합하여 총 8가지의 지반조건을 실험에 적용하였다. 즉 실험을 실시한 지반조건 중 LLL과 DDD는 각각 상대밀도 52%의 느슨한 지층과 92%의 조밀한 지층만으로 구성된 균일지반이며, LDD의 경우 최하층은 느슨한 지층으로, 나머지 두 층은 조밀한 지층으로 구성된 불균일 지반이다.

2.2 말뚝의 회전점 측정 방법

실험에 사용된 모형 말뚝은 총 길이 90 cm에 직경 6 cm의 강재 말뚝으로서 실제 지반에 근입되는 길이는 66 cm이다. 말뚝에는 하중 재하시 변형률을 측정하기 위한 스트레인 게이지가 말뚝의 전면과 후면에 대칭으로 부착되었다. 수평재하장치는 유압잭과 로드셀로 구성되어 있으며 토조의 상단면에서 10 cm 위에 버팀보와 함께 설치하였고 수평재하장치의 반대편에는 말뚝의 수평변위를 측정하기 위한 LVDT가 설치되었다. 수평하중을 받는 말뚝의 회전점은 먼저 다음 그림 2(a)와 같이 말뚝 상부의 변위차와 LVDT사이의 간격과의 기하학적 관계를 통해 측정하였으며 또한 분석적 방법으로서 그림 2(b) 스트레인 게이지에 읽힌 말뚝의 변형률 값으로부터 계산된 휨모멘트 분포 곡선을 이용하는 방법을 사용하였다.



(a) 말뚝 상부의 변위차를 이용한 방법



(b) 휨모멘트값을 이용한 방법

그림 2. 말뚝의 회전점 측정 방법

말뚝 상부의 변위차를 이용한 말뚝의 회전점 측정 방법은 그림에서 보이는 바와 같이 하중 재하 후에도 말뚝의 형상은 일직선에 가깝다고 가정한 다음 수평하중을 받는 말뚝의 기하학적 형상으로부터 간단한 비례식을 통해 얻을 수 있다.

$$x_1 : (d + e + a) = x_2 : (e + a) \quad (2)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 LVDT 1과 2로부터 얻은 수평변위 측정치이며, d 는 LVDT 사이의 간격이다. e 와 a 는 앞 식 (1)에서와 같이 각각 하중작용거리와 지표면으로부터 말뚝 회전점까지의 거리이다.

또 Matlock 과 Ripperger (1956)는 휨모멘트 분포곡선을 3차 다항식으로 커브피팅 (curve fitting) 하고 이를 2차 미분함으로서 말뚝의 회전점을 구하는 다음과 같은 해석적 방법을 제안하였다.

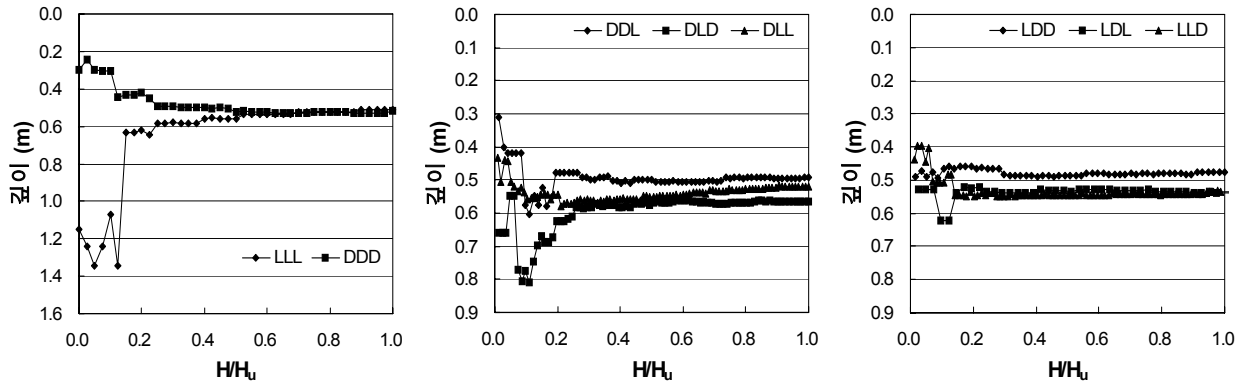
$$M(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3)$$

$$P(x) = \frac{d^2M}{dx^2} = 6ax + 2b \quad (4)$$

여기서 $M(x)$ 와 $P(x)$ 는 각각 지표면으로부터의 깊이 x 에 따른 말뚝의 휨모멘트와 단위수평저항력이며 a , b , c , 그리고 d 는 커브피팅 과정에서 얻어지는 상수이다. 즉 단위수평저항력 P 가 0이 되는 지점이 말뚝의 회전점이 된다.

3. 실험 결과

말뚝 상부의 변위차를 이용한 회전점 측정 결과 말뚝의 회전점은 하중 재하 초기에는 일정하지 않으나, 극한하중의 20% 정도에 해당하는 하중부터는 일정한 지점에 점차 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 각 지반조건별로 수평하중의 증가에 따라 회전점이 형성되는 추이는 다음 그림 3과 같다.



(a) 균일지반 (b) 다층지반/ 최하층이 조밀 (c) 다층지반/ 최하층이 느슨

그림 3. 지반조건별 회전점 형성추이

Matlock 과 Ripperger (1956)의 해석적 방법으로 구한 말뚝의 회전점은 평균값이 지표면으로부터 57.5 cm (근입깊이의 87.1%)이었고, 표준편차는 5.1 cm로 앞의 변위차를 이용한 결과 (표준편차 2.9 cm)보다는 더 분산되는 결과를 나타냈다. 말뚝 회전점 측정치와 휨모멘트 분포곡선을 이용한 분석적 방법으로 추정된 말뚝의 회전점은 각 지표면 이하 51.6 cm 과 57.5 cm이다. 앞서 언급된 Prasad 와 Chari의 제안식에 본 연구에서의 실험조건을 대입한 말뚝 회전점의 예측값은 50.0 cm (근입깊이의 75.6%)로서 말뚝의 변위차를 이용하여 구한 말뚝 회전점 측정값과 거의 같았으나, 분석적 방법으로 구한 회전점은 실제 측정결과나 식에 의한 예측 지점보다 다소 낮게 위치하는 것을 알 수 있다. 균일지반 상태인 지층조건 LLL에서의 결과값은 지표면에서 51.1 cm 아래이고 또 하나의 균일지반 상태인 지층 조건 DDD에서의 결과값은 49.7 cm로 느슨한 지층조건인 경우 (LLL)가 조밀한 지층조건 (DDD)일 때 보다 더 낮은 위치에 회전점이 형성되었으나 그 차이는 크지 않았다. 지층조건 DDL-LLD의 경우 회전점 위치는 지표면으로부터 56.5-47.5 cm의 범위에 분포하였으며 근입깊이 (66 cm)의 85.6-72.0%에 해당하는 위치이다. 이로부터 다층지반에서 회전점의 위치는 불명확하며 따라서 공식화하는 것에도 무리가 따를 것으로 보인다.

4. 결 과

모형 실험을 통해 수평 하중이 가해졌을 경우의 말뚝의 회전점을 관찰한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 지층을 상중하로 나누고 각 지층별로 느슨한 모래 혹은 조밀한 모래를 채워 총 8가지의 지층조건을 구성하였다. 말뚝 상하부의 변위차로부터 말뚝의 회전점을 측정된 결과 말뚝의 회전점의 평균값은 Prasad와 Chari의 제안식에 의한 예측값과 근접한 위치에 형성되었다.
- (2) Matlock과 Ripperger (1956)의 해석적 방법에 따라 말뚝의 회전점을 추정한 결과 변위차를 이용한 측정 결과보다 더 분산되는 결과를 나타냈고, 회전점은 측정값보다 더 낮은 곳에 위치하였다.
- (3) 균일한 지층조건일 경우 회전점 위치는 Prasad와 Chari의 식에 의한 예측치와 거의 동일하였다. 느슨한 지층조건인 경우가 조밀한 지층조건일 때보다 더 낮은 위치에 회전점이 형성되었으나 그 차이는 크지 않았다.
- (4) 다층지반조건에서 회전점의 위치는 균일지반 조건과 편차가 있었으며 경향성도 찾기 어려워 회전점의 위치를 공식화 하기엔 무리가 따를 것으로 보인다.

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. Matlock, H., and Ripperger, E. A. (1956), "Procedures and instrumentation for tests on a laterally loaded pile", *In Proceedings 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bureau of Engineering Research, University of Texas, Special Publication 29, pp 1-29
3. 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
4. Prasad, Y. V. S. and Chari, T. R. (1999), "Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils", *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp.21-29