

## 실내모형 실험을 통한 수평재하말뚝의 회전점 산정 Estimation of Rotation Point of Laterally Loaded Piles through Laboratory Test

황성욱<sup>1)</sup>, Sung-Wook Hwang, 홍정무<sup>2)</sup>, Jung-Moo Hong, 이준환<sup>3)</sup>, Jun-Hwan Lee

<sup>1)</sup> (주)에이티맥스 계측엔지니어링 사업본부 팀장, Headquarters, Dept. of Civil Engineering, ATMACS

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>3)</sup> 연세대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

**SYNOPSIS** : In this study, to analyze the rotation point of piles, the laboratory lateral load test was performed. The lateral load bearing capacity is one of the important factor related with structure failure directly. Analyzing rotation point in different soil condition, relative density and stress condition, leads more accurate ultimate lateral bearing capacity. Also, reliability was analyzed about established 예측식 as applying to tapered pile. As a result, the established prediction was suitable to cylinder pile, but not to tapered pile.

**Key words** : laterally loaded pile, rotation point, relative density, stress condition, 실린더, 테이퍼

### 1. 서 론

말뚝은 상부구조물에 의한 수직하중을 하부지반에 전달시켜 지지하는 역할 뿐만 아니라, 토압, 풍압, 파력 및 지진에 등 수평하중에 대해서도 충분한 지지력을 발휘해야 한다. 이로 인해 극한수평지지력에 대한 평가는 교량, 송전탑 등 다양한 구조물에 대한 주요설계인자로 평가되고 있다. 말뚝의 극한수평지지력 평가는 가장 보편적인 Broms(1964) 방법 이외에도 Petrasovits & Award(1972), Barton(1982), Prasad & Chari(1999), 그리고 Zhang(2005) 등에 의해 다양하게 제안되어왔다. 이들 평가법에 있어 토압의 역전현상이 발생하는 회전점은 극한수평지지력 산정에 있어서 매우 중요한 요소이며, 정확한 회전점 산정이 곧 극한수평지지력의 정확한 평가로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 사질토 지반에서 충분한 강성을 가진 말뚝의 회전점을 측정함으로써, 기존 방법에서 가정하고 있는 회전점의 타당성을 분석하고자 하였으며, 실제의 말뚝거동을 통해 비교하고자 한다. 또한 지반의 구속압 및 상대밀도를 변수로 각 경우에 대한 말뚝의 회전점을 측정함으로써, 지반물성에 따른 변화를 평가, 분석하고자 한다.

### 2. 사질토 지반에서의 수평재하시험

연직재하상태의 말뚝은 연직방향으로 침하를 일으키지만 수평재하의 경우에 말뚝은 지반의 반작용으로 인해 가력방향에 따라 회전하는 경향이 있다. 이러한 수평말뚝의 역학적 거동을 바탕으로 Petrasovits & Award(1972), Prasad & Chari(1999), Brinch Hansen(1986)등은 수평재하시 말뚝의 회전점을 고려하여 말뚝의 극한지지력 평가법을 제안하였다. 이들 평가법들은 모두 강성말뚝에 대한 단위수

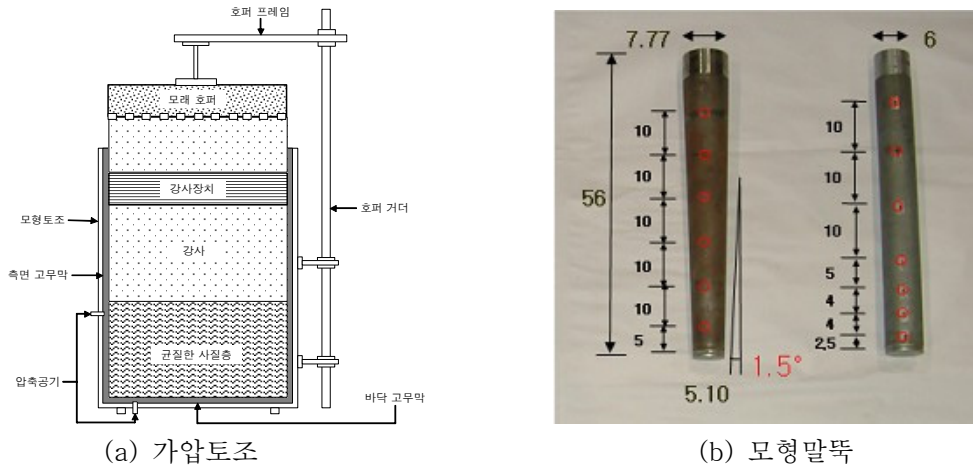


그림 1. 가압토조 및 모형말뚝

평지지력 분포를 나타내므로, 본 연구에서도 강성말뚝을 대상으로 수평재하실험을 수행하였으며, 이를토대로 말뚝의 회전거동분석을 실시하였다. 말뚝의 강성평가로는 Brom 이론에 의거,  $L < 2/\eta$ 의 강성조건으로 모든 실험 상태에서 강성임을 판정하였다. 시험말뚝을 가압토조의 가운데 지점에 세우고, 유압자키를 이용하여 수평방향의 힘을 말뚝에 가하였다. 수평하중을 받는 말뚝의 변위 측정을 위해 그림 2(a)와 같이 말뚝의 두부에 약 10cm 간격으로 2개의 변위계(LVDT)를 설치하였다. 하중을 가하면서 그림 2(b)와 같이 가력반대방향에 수직으로 설치한 변위계(LVDT) 2개의 연장선을 말뚝의 선단부까지 연결하여 각 하중단계별 회전점을 산정하였다.

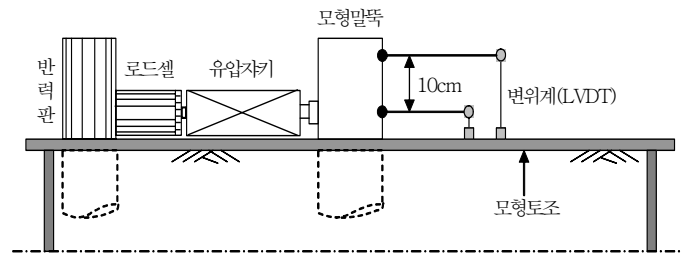


그림 2. 수평재하장치 및 변위측정방법

수평재하시 말뚝은 반드시 변형을 일으키지만 본 연구에서 사용한 말뚝은 실험의 연속성을 고려하여 만든 강성말뚝이며, 수평재하시 말뚝 자체의 변형이 크지 않다는 가정하에 회전점을 산정하였다. 또한 본 연구에서는 가정한 조건 아래에서 얻은 회전점의 결과를 바탕으로 Prasad & Chari(1999), Brinch Hansen(1986)에 의하여 제안된 말뚝의 회전점 구하는 방법과 비교해 보았다. Prasad & Chari(1999)에 대한 방법은 다음과 같다.

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

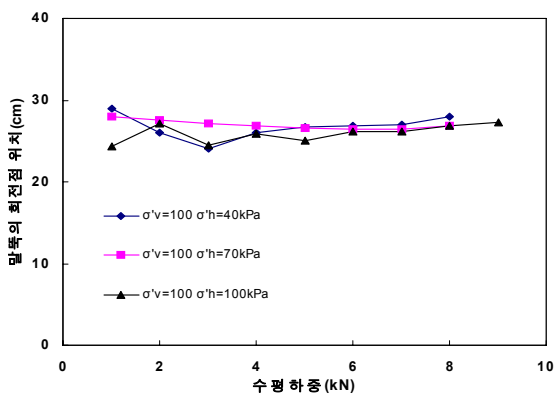
여기서,  $e$  = 재하지점에서부터 지면까지의 거리,  $L$  = 근입깊이를 나타낸다. Brinch Hansen(1986)의 극한수평지력을 이용한 시행착오법에 의한 회전점은 다음과 같이 모멘트 평형관계로부터 산정하였다.

$$H_u e + \int_0^{x_r} P_u z ddz - \int_{x_r}^L P_u z ddz = 0 \quad (2)$$

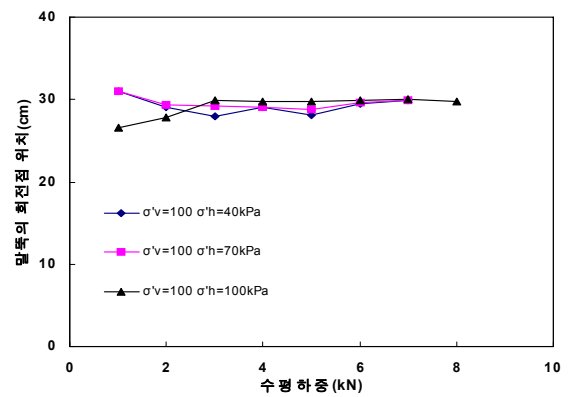
여기서,  $d$  = 말뚝 직경,  $x_r$  = 수평재하시 말뚝의 회전점을 나타낸다.

### 3. 수평재하말뚝의 회전점 산정 및 분석

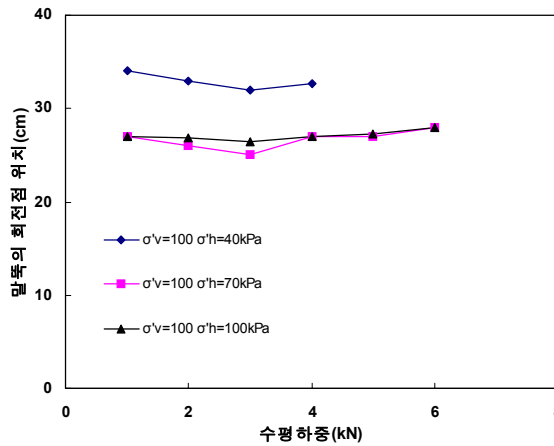
그림 3은 각 단계별 수평재하시 말뚝의 회전점의 위치 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 원통형 말뚝의 경우, 수평재하시 상대밀도, 구속응력의 변화에도 불구하고 회전점은 근입깊이 약 25~30cm 지점에서 비교적 일정한 한 지점을 기점으로 회전하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 하중이 증가할수록 어느 한 지점으로 수렴한다는 것도 쉽게 알아볼 수 있다. 수렴과정에 있어서 수평유�효응력이 상대적으로 작은 조건  $\sigma'_h=40\text{kPa}$ 에서는 수평하중재하 초기 단계에서 말뚝의 회전점이 극한상태에서의 회전점보다 지표면에서 보다 깊게 측정된 것을 알 수 있다. 반대로  $\sigma'_h=100\text{kPa}$ 에서는 극한상태의 회전점보다 높게 측정되어 점차 내려가는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 상대밀도의 차이에서도 상대적으로 작은 상대밀도를 구성된 지반에서 말뚝의 회전점이 깊이 측정됨을 볼 수 있었다. 그림 3(a),(b)의 회전점 변화를 토대로, 극한응력상태에서의 말뚝회전점을 표 1에 나타내었다.



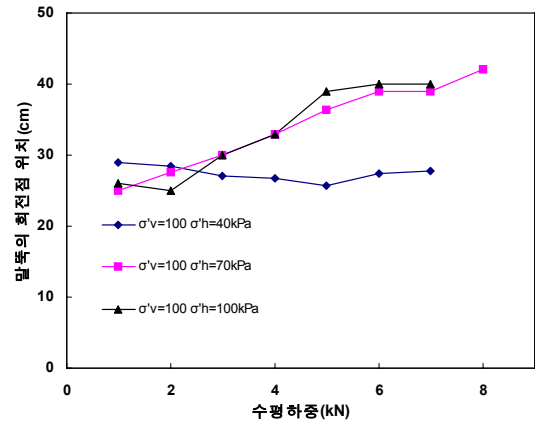
(a) 원통형  $D_R = 86\%$



(b) 원통형  $D_R = 55\%$



(c) 테이퍼형  $D_R = 86\%$



(d) 테이퍼형  $D_R = 55\%$

그림 3. 말뚝의 회전점 변화

표 1. 원통형 말뚝의 회전점 발생지점

	실측값(cm)	Brinch Hansen 예측값(cm)	Prasad & Chari 예측값(cm)
근입깊이	36	36	36
회전점 발생지점	10	9.5	9.02

표 1은 실지로 측정된 결과와 Brinch Hansen(1986)과 Prasad & Chari(1999)의 방법에 의해 산정된 예측결과를 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 실험 결과 실측된 말뚝의 회전점의 위치는 제안된 예측값의 회전점 위치와 매우 유사함을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 말뚝의 회전점은 본 연구에서 고려한 모든 조건 즉 상대밀도, 응력조건의 변화와는 무관하며 전반적으로 선단에서 약 10cm 올라온 부분에서 말뚝이 회전하고 있음을 보여주었다. 하중단계별로 각각의 다른 회전점이 산정되지만, 극한상태일 때를 기준으로 실측값은 말뚝의 선단으로부터 10cm 떨어진 지점에서 수렴하였다. 말뚝의 회전점이 항상 일정하다는 기존의 상식과 달리 어느 한 지점으로 수렴한다는 것은 말뚝이 회전거동만을 보인 것이 아니라는 결론을 내릴 수 있다. 즉, 하중재하 초기에 말뚝이 병진운동을 함으로써 지반 내에서 자리를 잡고, 그 이후에 한 회전점을 중심으로 회전한다는 잠정적인 결론을 내렸다. 그러나 테이퍼형 말뚝의 회전점을 실측해 본 결과, 원통형 말뚝 거동은 찾아볼 수 없었으며, 이는 Brinch Hansen(1986), Prasad & Chari(1999)의 제안식이 원통형 말뚝에만 국한되어 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결론은 테이퍼형 말뚝의 극한수평지지력 평가에서는 새로운 제안식 연구의 필요성을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사질토 지반에 근입되어 있는 현장타설말뚝을 실내모형실험으로서 재현하여 수평재하 실험을 실시하였다. 이를 위해 지반의 응력을 다양하게 조절할 수 있는 가압토조를 이용하였으며 강성 말뚝기초 거동의 중요한 영향인자인 상대밀도와 다양한 조건에서 말뚝의 거동에 대한 실험을 실시 하였으며 선행 연구자들의 실험결과 및 제안식과 비교 분석하였다. 이에 본 연구 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 강성말뚝이라고 가정하고 회전점을 측정해본 결과, 지반의 상대밀도나 지반의 응력조건에 따라 약간의 차이를 보였으나, 평균적으로 지표면 25cm아래 지점, 말뚝두부로부터 약 3D(D = 말뚝 직경)지점에서 일정한 지점을 기준으로 말뚝이 회전하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 원통형 말뚝에 대해서는 Prasad & Chari(1999), Brinch Hansen(1986)의 제안식의 회전점 위치가 실측값과 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Barton, Y. O. (1982), "Laterally Loaded Model Piles in Sand: Centrifuge Tests and Finite Element Analyses", Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
2. Brinch-Hansen, J. (1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", *Danish Geotechnical Institute*, Copenhagen, BulletinNo.12, pp.5~9.
3. 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.
4. Hardin, B.O. and Black, W.L.(1966), "Sand Stiffness under Various Triaxial Stresses", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.92, No.2, pp.27~42.
5. Petravits, 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.
6. 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.
7. 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.