

## CPT결과를 이용한 사질토지반에 관입된 짧은 단일말뚝의 극한수평단위지지력 산정

### Estimation of Ultimate Lateral Resistance for Lateral Loaded Short Piles Using CPT Results in Sand.

김민기<sup>1)</sup> Min-Kee Kim, 황성욱<sup>1)</sup> Sung-Wook Hwang, 경두현<sup>1)</sup> Du-Hyun Kyung, 이준환<sup>2)</sup> Jun-Hwan Lee

<sup>1)</sup> 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 부교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

**SYNOPSIS** : In this study, Estimate solutions of ultimate lateral resistances for lateral loaded piles are proposed using cone penetration values,  $q_c$  values, as CPT results. Cone penetration values,  $q_c$  values measured on clean sand layers, are represented by factors for relative densities, axial stresses, and lateral stresses which are important on analysis of sandy soil layers. Also, these factors are same factors to consider existed estimations of ultimate lateral capacity. In this study, estimation of ultimate lateral capacity for lateral loaded piles using CPT results is proposed, and this estimation is verified by adequate analysis for effective reliability.

**Key words** : Cone Penetration Test, Sandy Soil, Lateral Loaded Pile, Ultimate Lateral Resistance, Ultimate Lateral Capacity

## 1. 서 론

짧은 단독말뚝의 수평지지력은 과거에 일시하중으로 작용하는 경우에 대해 고려되어 왔지만, 최근 들어 다양한 주변환경에 의한 작용하중들을 포함하는 설계가 늘고 있어 연직지지력 뿐 아니라 수평지지력에 대한 관심도 늘어나고 있다. Broms(1964)는 단독말뚝을 말뚝의 단면2차모멘트와 말뚝의 길이를 비교함으로써 짧은 말뚝과 긴 말뚝으로 구분하였다. 일반적으로 짧은 단독말뚝은 말뚝의 주변부의 파괴를 가정하여 극한수평지지력을 산정하는 방법을 적용하며, 긴 단독말뚝은 p-y곡선을 적용한 허용지지력 방법을 적용한다. Broms(1964)가 사질토지반에서 단말뚝과 장말뚝의 극한수평지지력을 산정하는 이론적인 방법을 제시한 이래로 많은 저자들에 의해 단말뚝의 극한수평지지력을 산정하는 방법들이 등장하였다(Petravits와 Award 1972; Prasad와 Chari 1999; Zhang 등 2005). Broms(1964)는 사질토지반에서 말뚝 선단을 중심으로 말뚝이 회전한다고 가정하여 수평단위지지력분포를 제안하였다. 극한수평단위지지력에 대한 연구 및 실내시험들이 다양하게 진행되었다(Chari와 Meyerhof 1983; Meyerhof와 Sasty 1985; Prasad와 Chari 1999). Broms(1964)의 방법은 단순하고 적용하기 쉽기 때문에 현장에서 짧은 말뚝 설계에 자주 사용되고 있어 본 연구에서는 이 방법을 바탕으로 대표적인 원위치시험인 CPT의  $q_c$ 프로파일을 적용하여 극한수평토압과 극한수평지지력을 비교하고자 하였다.

Broms(1964)에 의한 극한수평지지력 산정방법은 수동토압계수와 연직응력에 많은 영향을 받는 것으로 설계해 왔지만, 최근 연구에 따르면 실제 현장의 응력조건을 보여주는 정지토압계수와 수평응력이 수평재하시 말뚝의 거동에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다(이준환 등 2007). 이에 대한 영향을 고

려하기 위해 기존의 극한수평지지력 산정방법에 수평응력보정계수를 도입하였다. 실제 현장의 수평응력과 지반 물성치의 실제적인 적용을 위해 대표적인 원위치시험인 CPT를 적용하고자 하며, 기존의 극한수평지지력 판정방법과 CPT의  $q_c$ 프로파일을 적용한 방법과의 비교, 검증을 수행하고자 한다.

## 2. 수평재하말뚝의 극한수평토압과 극한수평지지력

짧은 단독말뚝의 극한수평토압은 짧은 말뚝에 극한수평하중이 작용하여 말뚝 주변지반이 변형되면서 발생하는 수동토압과 주동토압에 의해 적용되는 수평토압이며, 극한수평지지력은 이 때 말뚝이 주변지반으로부터 받는 수평지지력을 극한수평지지력이라고 한다. Broms(1964)에 따르면 짧은 단독말뚝의 경우 회전점이 말뚝 선단부에서 작용한다고 가정하고 있으며, 그로 인해 극한수평토압은 우측방향에서 선형적으로 발달한 삼각형 분포를 가지게 된다. 사질토 지반의 조밀도나 해당지반의 응력조건 등에 따른 지반상태의 적용성이 떨어지므로, 이준환 등(2007)에서 제안한 수평응력보정계수를 적용하여 비교하였다. 극한수평토압은 일반적으로 말뚝이 관입된 해당지반의 수동토압계수와 깊이별로 나타나는 유효연직응력  $\sigma_v'$ 의 관계로 나타나며, 수평응력보정계수를 적용한 수정된 Broms의 극한수평토압  $P_u^*$ 은 다음식과 같이 산정된다.

$$P_u^* = 3K_p \sigma_v' \times C_F \quad (3)$$

이 때,  $K_p$ 는 수동토압계수이며,  $\sigma_v'$ 는 유효연직응력,  $C_F = \left( \frac{K_0}{1 - \sin\phi} \right)^{0.6}$ 이다.

사질토 지반의 조밀도나 해당지반의 응력조건 등에 따른 지반상태를 적용하여 CPT의  $q_c$ 프로파일을 적용한 극한수평토압과 극한수평지지력의 산정식이 제안(김민기 2008)되어, 본 연구에서는 이에 따른 극한수평토압과 극한수평지지력을 수정된 Broms의 극한수평토압과 극한수평지지력과의 비교 분석을 실시하고자 한다. 수정된 극한수평단위지지력  $P_u^*$ 값과 산정된  $q_c$ 값의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_u^* = 0.0411 \frac{q_c^{0.4911}}{\sigma_m^{-0.6089}} \quad (8)$$

이 때,  $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 이다.

## 3. 실내모형토조시험

본 연구에서는 사질토지반에서의 다양한 지반조건을 적용하고자 박영수(2006)에 의해 진행된 실내모형시험들을 적용하였다. 각 실험들은 구속응력이 가해진 토조 내에 말뚝이 설치되기 전에 CPT가 수행되었으며, 해석말뚝은 현장타설말뚝 중 천공말뚝을 대상으로 하였다. 극한수평지지력을 산정하기 위해 적용한 실내모형시험들(박영수 2006)은 축소모형 강관 단독말뚝을 대상으로 하며, 모형토조 내의 지반을 균질한 지반조건으로 적용하기 위해 일정하게 모래를 강사시켰다. 실내모형시험들은 CPT 결과와 하중변위곡선이 측정되어 하중변위곡선으로부터 극한상태를 파악할 수 있으며, 또한 깊이에 따라 토압계 결과가 측정되어 해당깊이에서의 극한수평단위지지력의 비교가 가능하다. CPT는 모형토조의 중앙에서 시험되었으며, 구속압이 가해진 후의 지반을 대상으로 시행되었다.  $q_c$ 가 적용된 극한수평토압과 극한수평지지력은 CPT의 결과인  $q_c$  프로파일을 적용하여 깊이에 따른 극한수평토압을 산정하였으며, 수평재하 편심거리를 적용한 극한수평지지력을 산정하였다. 모형토조시험에서의 CPT 결과인  $q_c$ 값과 자유장에서 측정된  $q_c$ 값은 서로 경계조건이 다르므로 콘의 크기와 상대밀도에 따른 크기 효과를 고려해야 한다

(Salgado 등 1997). Salgado(1997)에 따르면 박영수(2006)에서 사용된 콘의 직경은 1.6cm이므로, 크기 효과에 의한  $q_{c,cc}/q_{c,ff}$ 는 각각 0.60으로 산정되어 적용하였다.

#### 4. 극한수평토압과 극한수평지지력의 비교, 분석

그림 1은 실내모형시험(박영수 2006) 결과에서 측정된  $q_c$ 값과 산정된  $P_u$ 값의 깊이에 따른 분포를 나타낸 것이다. 수평재하실험이 총 6회 수행되었으며, 상대밀도 55%조건 하에서 적용된 응력조건이  $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 실험이 1회, 상대밀도 86%조건 하에서 적용된 응력조건이  $\sigma_v=60\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 실험,  $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 실험,  $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=70\text{kPa}$ 인 실험,  $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=100\text{kPa}$ 인 실험,  $\sigma_v=160\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 실험으로 5회가 수행되어 도합 6회의 실험을 본 논문에서 적용하였다. 그림 1은 실내모형실험 결과중 상대밀도 조건 86%,  $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ 에 대한 실험결과를 보이고 있다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 CPT의 결과는 선형적으로 증가하지 않으며, Broms에 의한 극한수평토압은 이를 적용하지 못함을 확인할 수 있다.

그림 2는 각 실험조건에 따라 적용된 극한수평지지력을 적용하였으며,  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력과 수정된 Broms 방법에 따른 극한수평지지력을 비교하였다. 상대적으로  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력이 기존의 방법에 따른 극한수평지지력에 비해 측정된 극한수평지지력과 유사한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 특히 표준편차와 COV(분산계수)는  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력은 0.13, 0.15인데 비해, 수정된 Broms 방법에 따른 극한수평지지력은 0.37, 0.53로 나타나  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력 산정방법이 더욱 적용성이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

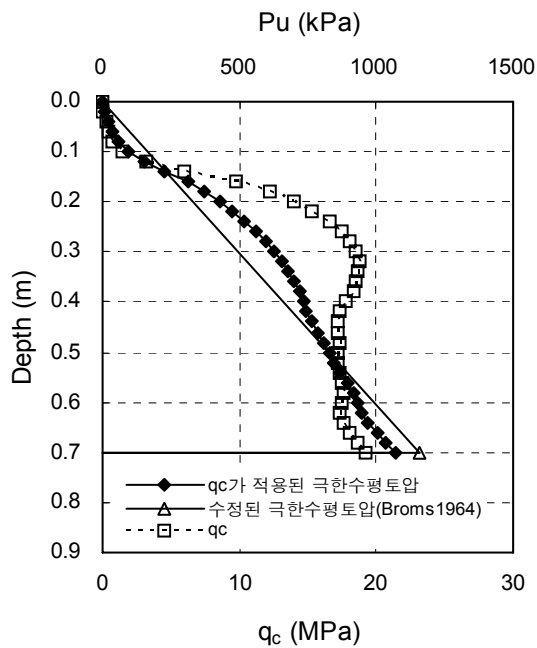


그림 1. 극한수평토압

( $D_R=86\%$   $\sigma_v=100\text{kPa}$ ,  $\sigma_h=40\text{kPa}$ )

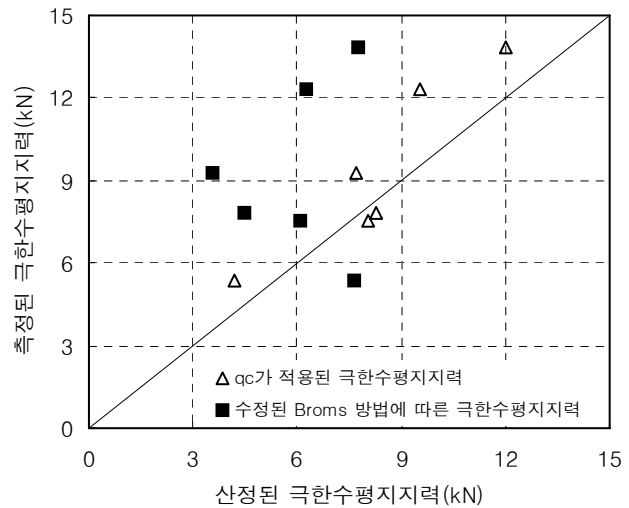


그림 2. 극한수평지지력

## 5. 결론

본 연구에서는 Broms(1964)가 제안한 극한수평단위지지력 산정방법을 대상으로 하여, 콘관입치  $q_c$  값을 사용한 수평재하말뚝의 극한수평토압과 극한수평지지력을 비교, 분석하였다. 이 두 방법을 비교, 분석하기 위하여 실내모형실험을 적용하여 실제 지반응력조건 하에서의 적합성을 확인하고자 하였다. 실내모형실험은 모형토조 내에 다양한 지반조건을 구현하였으며, 각 결과에 따른 예측식과의 비교, 검증이 이루어졌다. 극한수평토압에 대한 비교를 통해 상대적으로  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력이 기존의 방법에 따른 극한수평지지력보다 깊이에 따른 지반응력과 지반의 조밀도에 따른 변화를 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한 극한수평지지력에 따르면 상대적으로  $q_c$ 가 적용된 극한수평지지력이 기존의 방법에 따른 극한수평지지력에 비해 측정된 극한수평지지력과 유사한 값을 보이며, 수정된 Broms의 극한수평지지력보다 표준편차와 COV가 60~70%가량 낮은 값을 보여 실제적으로 유리한 결과를 나타내었다.

## 참고문헌

1. 김민기, 이준환 (2008), "사질토지반에 관입된 짧은 단독말뚝의 극한수평단위지지력과 극한수평지지력 분석", 한국지반공학회 논문집(제출중)
2. 박영수 (2006), "Estimation of load bearing capacity of single pole foundation for transmission structure in sand", 연세대학교, 학위논문.
3. 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성욱 (2007), "응력상태를 고려한 사질토지반에 관입된 말뚝의 극한수평지지력 분석 및 평가", 한국지반공학회논문집, 제 23권, 제 4호, pp. 161 - 167.
4. 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.
5. Chari, T. R. and Meyerhof, G. G. (1983). "Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 849 - 854.
6. Meyerhof, G. G., and Sastry, V. V. R. N. (1985), "Bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads.", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 267 - 276.
7. 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.
8. 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.
9. Salgado, R., Mitchell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1997), "Cavity Expansion and penetration resistance in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 344 - 354.
10. 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.