

사질토지반에서 콘관입저항치 q_c 에 의한 단말뚝의 극한수평단위지지력 평가

Estimation of Ultimate Lateral Resistances of Piles Using CPT Cone Resistance in Sand

김민기¹ Kim, Min-Kee

경두현² Kyung, Doo-Hyun

홍정무² Hong, Jung-Moo

이준환³ Lee, Jun-Hwan

Abstract

In this study, CPT-based methodology for estimating the ultimate lateral resistance, p_u , is proposed and verified for lateral loaded piles in sandy soil. Preexistent methods estimating the ultimate lateral resistance, p_u , and the ultimate lateral capacity, H_u , of pile have been based on the vertical effective stress, relative density, and the coefficient of lateral earth pressure. Similarly, cone resistance q_c in pure sandy soil is expressed by those essential factors. As correlation between p_u and q_c are normalized with average effective stress σ_m , estimation methodology for the lateral loaded pile of p_u in sandy soil is proposed. The method is verified by calibration chamber test results in pure sand. The standard derivation of estimated p_u is 0.279, and COV (Coefficient Of Variation) of estimated p_u is 0.272. These results showed that the estimated p_u s by the method are analogous with the measured p_u s in calibration chamber test.

요 지

본 연구에서는 CPT 결과인 콘관입저항치 q_c 값을 이용하여 말뚝의 극한수평단위지지력을 산정법을 제안하고자 한다. 이는 기존의 지반물성평가를 이용하여 평가되어 오던 간접적인 방법과 비교하여, 현장측정치의 직접적 적용을 위한 극한수평단위지지력 산정법 개발을 목표로 하고 있다. 점착력이 없는 사질토 지반을 대상으로 측정된 콘관입저항치 q_c 값은 사질토지반에서 중요한 요소인 상대밀도, 연직응력, 수평응력에 대한 함수로 표현되며, 이는 기존에 제안되어온 극한수평지지력의 산정에 고려되는 요소들과 유사하다. 이러한 역학적 유사성을 바탕으로 CPT 결과를 이용한 극한수평단위지지력 산정식을 제안하였다. 이는 점착력이 없는 사질토에 대상으로 하고 있으며, 그에 대한 해석을 위해 해석대상지반을 대상으로 제안된 산정식의 신뢰성을 확보하였다. 극한수평단위지지력의 측정값과 예측값에 따른 비교에 대해 표준편차는 0.279를 보였으며, COV는 0.272의 값을 보여 측정된 극한수평단위지지력과 대체적으로 유사한 결과를 보였으며, 전반적으로 제안식에 의해 예측된 극한수평단위지지력이 실내모형실험을 통한 측정값에 근접함을 알 수 있다.

Keywords : Cone penetration test, Lateral loaded pile, Sandy soil, Ultimate lateral capacity, Ultimate lateral resistance

1 정회원, 신우지오엔지니어링 대리 (Member, Deputy Manager, ShineWoo Geo Engrg., Co.)

2 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., Junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 수평하중을 받는 말뚝은 p-y곡선 등을 이용하여 허용수평변위를 산정하는 허용수평지지력방법과 토압이론에 근거하여 말뚝주변지반의 극한상태를 가정하는 극한수평지지력방법으로 구분되어 해석되고 있다. 극한상태에서의 극한수평지지력은 말뚝의 강성이 지반의 강성에 비해 상대적으로 매우 커 지반에서의 변형으로 인한 지반의 파괴상태를 가정하고 있으므로, 극한수평지지력은 지반의 특성치로 적용될 수 있는 해당지반의 수평토압계수와 깊이별로 나타나는 유효연직응력의 관계로 산정된다(Broms 1964; Reese 등 1974; Barton 1982; Fleming 등 1992; Prasad와 Chari 1999; Zhang 등 2005). 본 연구에서는 짧은 현장타설말뚝을 대상으로 하고 있어 이에 대한 대표적인 극한수평지지력 산정법인 Broms(1964) 방법을 적용하기로 하였다. Broms(1964) 방법은 극한수평단위지지력의 분포가 선형으로 증가하는 형태를 기반으로 하고 있으며, 상대적으로 타 방법에 비해 극한수평지지력을 산정하기 쉬워 현장에서 많이 사용되고 있는 방법이다.

현재 실무에서 적용되는 지반조사 방법은 매우 다양하나, 대표적으로 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 깊이방향으로 연속적인 자료를 얻을 수 있으며, 비교적 실제 현장의 지반상태를 잘 구현하는 것으로 알려져 있는 콘관입시험(CPT)을 토대로 극한단위수평지지력 평가법을 제안하고자 한다. CPT관입에 따른 콘관입저항치는 연직응력과 수평응력으로 주어지는 응력상태와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 말뚝의 수평지지력 또한 지반의 응력상태에 크게 좌우되므로, 이에 상응하는 상관관계도 존재할 수 있음을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘관입저항치인 q_c 를 적용하여 보다 실제적인 극한수평단위지지력을 산정하고, 이를 실내모형실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 수평재하시 짧은 단독말뚝의 극한수평단위지지력

극한수평단위지지력(Ultimate Lateral Resistance)은 수평하중을 받는 짧은 단독말뚝에 의해 말뚝 주변지반에 변위가 발생하는 과정에서 극한상태에 도달하면서 발생하는 단위수평저항력이다. 따라서 극한수평단위지

지력(Ultimate Lateral Capacity)의 정확한 평가는 전체적인 수평지지력 결정을 위해 매우 중요한 요소이다. Broms(1964)에 따르면 말뚝은 선단부를 중심으로 회전하게 되므로 지표면에서 최초로 극한상태에 도달하는 변위가 발생하며, 극한수평단위지지력은 지표면에서 말뚝의 깊이방향으로 전달되는 경향을 보인다. 말뚝의 수평변위가 일정 범위를 넘어가게 되면 해당 말뚝이 극한상태에 도달했다고 판단하며, 극한상태에서 말뚝이 주변지반으로부터 받는 수평지지력을 극한수평지지력이라고 한다.

그림 1에 나타난 바와 같이 현장에서 주로 사용되고 있는 Broms(1964)의 방법은 말뚝의 회전점이 말뚝 선단부에서 작용한다고 가정하고 있으며, 극한수평단위지지력은 선형적으로 발달한 삼각형 분포를 가지게 된다. 극한수평단위지지력 p_u 는 일반적으로 짧은 단독말뚝이 관입된 해당지반의 수동토압계수와 깊이별로 나타나는 유효연직응력 σ'_v 의 관계로 나타낸다.

$$p_u = 3K_p \sigma'_v \quad (1)$$

이 때, K_p 는 수동토압계수이며, σ'_v 는 유효연직응력이다.

식 (1)에 나타난 Broms 방법에 의하면, 말뚝의 극한수평단위지지력은 지반의 내부마찰각으로부터 주어지는 수동토압계수와 유효연직응력의 함수로부터 산정되고 있어, 실질적으로 지반에 존재하는 초기유효수평응력의 영향은 고려되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 이준환 등(2007)에서 제안한 수평응력보정계수 C_F 를 적용하

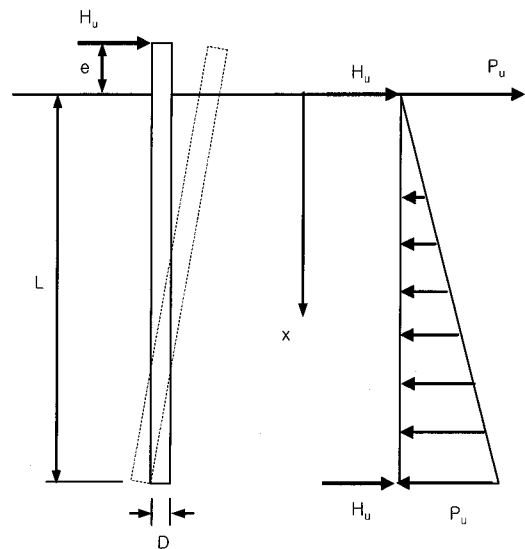


그림 1. Broms 방법에 따른 수평재하시 말뚝에 작용하는 극한수평단위지지력

고자 한다. 수평응력보정계수는 극한수평단위지지력에 대한 수평응력의 효과를 반영하기 위해 적용되었으며, 정지토압계수 K_0 과 내부마찰각 ϕ 에 의한 다음과 같은 함수로 정의된다.

$$C_F = \left(\frac{K_0}{1 - \sin\phi} \right)^{0.6} \quad (2)$$

일반 정규압밀상태의 지반에서는 Jaky(1944)가 제안한 공식($K_0=1-\sin\phi$)을 적용하게 되므로 기존의 평가법과 동일한 결과를 나타낸다. 하지만 이준환 등(2007)에 따르면 비정규압밀상태의 지반에서는 정지토압계수 K_0 가 Jaky의 공식을 따르지 않으므로, 동일한 연직응력을 갖는 지반을 대상으로 하더라도 수평응력의 크기에 따라 다른 극한수평지지력이 산정된다.

3. CPT결과를 이용한 단말뚝의 극한수평단위지지력

3.1 콘관입저항치와 극한수평단위지지력의 관계

사질지반에서의 CPT가 관입됨에 따른 지반변형형상의 이론적인 모델은 Vesic(1972)에 의한 공동확장해석을 기반으로 한다. 콘관입저항치인 q_c 값은 대상지반을 구성하는 모래입자의 고유 물성치와 지반상태에 많은 연관성을 지니고 있다. 특히 이들의 관계는 모래입자의 구조와 사질토의 구성상태(Mitchell 1993) 뿐 아니라, 조밀도, 그리고 응력상태에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Salgado 등(1997)은 순수 사질토를 대상으로 하여 q_c 값은 다음과 같이 지반특성치의 함수로 표현될 수 있다고 하였다.

$$q_c = Q_c(D_R, \sigma_v, \sigma_h) \quad (3)$$

이 때, Q_c = 고유 물성치에 의해 구성되는 함수, D_R = 관입되기 전의 상대밀도, σ_v, σ_h = 연직응력과 수평응력이다.

기존에 제안되어 온 극한수평지지력 산정방법들은 극한수평지지력을 산정하기 위해 극한수평단위지지력을 사용하였으며, 극한수평단위지지력은 수동상태를 가정하여 수동토압계수 K_p 와 연직응력 σ_v 에 의해 산정되어 진다. 또한 수평응력에 대한 영향을 고려하기 위해 도입된 수평응력보정계수에 적용되는 내부마찰각 ϕ 의 영향도 적용되어진다. 따라서 극한수평단위지지력은 다

음과 같은 함수로 표현될 수 있다.

$$p_u = p(K_p, \sigma_v, \sigma_h, D_R) \quad (4)$$

이 때, p = 극한수평단위지지력을 산정하는 함수이다. 상대밀도 D_R 은 Bolton(1986)에 의해 내부마찰각과의 함수로 정의되므로, 극한수평단위지지력은 식 (3)에 의한 콘관입저항치 q_c 값과 유사한 형태를 갖는다.

3.2 Broms(1964)에 따른 CPT결과를 적용한 극한수평단위지지력 산정식

본 연구에서는 q_c 값과 극한수평단위지지력의 관계를 알아보기 위해 다양한 상태의 해석대상지반을 선정하여 비교분석하고자 한다. 해석대상지반은 순수사질토지반($c=0$)으로 구성되어 있으며, 상대밀도와 마찰각, 그리고 지반의 응력조건 등을 다양하게 형성하여 실제 지반에서 구현될 수 있는 조건들로 나타내고자 하였다. 표 1은 q_c 값을 산정하기 위해 적용된 다양한 상대밀도와 정지토압계수 K_0 을 나타내었으며, 각 조건에 대한 콘관입저항치 q_c 는 공동확장해석(Salgado 1993)에 의해 산정되었다. 상대밀도는 일반적으로 느슨한 상태로 표현될 수 있는 30%에서 매우 조밀한 상태로 나타나는 90%까지 대상으로 하고 있으며, 또한 다양한 현장응력상태를 반영하고자 K_0 값을 변화시켜 해석에 적용하였다.

극한수평단위지지력(p_u)은 앞서 설명되어진 바와 같이 실무적으로 널리 사용되고 있는 Broms의 방법을 토대로 하였으며, 수평응력에 대한 영향을 고려하기 위해 수평응력보정계수를 적용하였다. 극한수평단위지지력은 깊이에 따라 산정된 연직응력에 대해 각각 상대밀도와 정지토압계수를 달리 적용하여 산정하였다. 또한, 극한수평단위지지력은 해당 상대밀도의 조건 하에서 Bolton(1986)에 의해 산정된 마찰각이 적용되었으며, 해석에 적용된 유효연직응력 σ_v' 값은 50kPa, 100kPa, 150kPa으로 구성되었다.

수정된 극한수평단위지지력 p_u 값과 산정된 q_c 값과의 관계를 나타내기 위해 일반적인 삼축압축상태에서의 평균응력 σ_m 값을 도입하였다. 극한수평단위지지력에 주요한 영향을 미치는 토압계수에 대한 영향을 적용하기 위

표 1. q_c 값을 산정하기 위한 상대밀도 D_R 와 정지토압계수 K_0

상대밀도 D_R	30%, 50%, 70%, 90%
정지토압계수 K_0	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

해 연직응력과 수평응력의 평균인 평균응력 σ_m 값으로 q_c 값을 나누었다. 그림 2는 각 극한수평단위지지력과 콘관입저항치 q_c , 그리고 평균응력 σ_m 에 따른 관계를 나타내었다. 수정된 극한수평단위지지력 p_u 는 콘관입저항치 q_c 와 유사한 계수로 구성되어 있으므로 이들을 정규화하였으며, 콘관입저항치 q_c 는 연직응력과 수평응력에 따른 함수로 표현되어 이를 평균응력 σ_m 으로 나누어주었다. 그림 2에 따르면 전반적으로 높은 유사성으로 지수함수로써 표현되고 있다. 수정된 극한수평단위지지력 p_u 값과 산정된 q_c 값의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$p_u = 0.0411 \frac{q_c^{0.4911}}{\sigma_m^{-0.6089}} \quad (5)$$

그림 2에서 보는 바와 같이 연직응력의 변화에 따른 각 극한수평단위지지력은 식 (5)에 의해 R^2 값이 0.9491에 해당하는 높은 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 실내모형 수평재하실험을 통한 검증

4.1 실내모형토조실험

본 연구에서 극한수평지지력을 산정하기 위해 적용한 실내모형시험들(Chari와 Meyerhof 1983; Meyerhof와 Sastry 1985; Meyerhof와 Sastry 1987; Park 2006)은 모형토조를 이용하여 축소모형 강관 단말뚝을 대상으

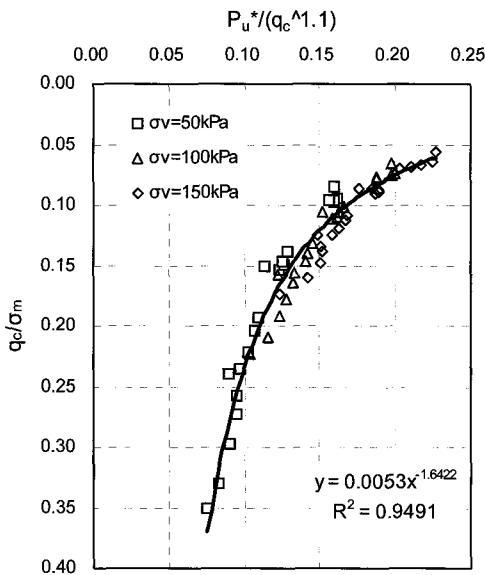


그림 2. 수정된 극한수평단위지지력 p_u 값과 q_c 값의 관계

로 하며, 점착력이 없는 사질토 지반을 형상화하기 위해 모래를 강사시켜 모형토조 내의 지반을 균질한 지반조건으로 적용하였다. 표 2와 3은 모형토조와 모형말뚝의 제원을 나타낸 것이다. 각 모형말뚝은 원형강관으로 구성되어 있다. 모형말뚝은 말뚝주변지반의 강성에 비해 월등히 큰 강성을 가지고 있어 Broms(1964)의 단말뚝 기준에 적합하다. 모형말뚝의 변형율을 측정하기 위하여 말뚝의 전, 후면에 변형율게이지를 부착하였다. Chari와 Meyerhof(1983), Meyerhof와 Sastry(1985), 그리고 Meyerhof와 Sastry(1987)는 유효경 D_{10} 이 0.38mm이며 균등계수 C_u 가 2.8인 실리카 모래를 사용하여 실험하였다. Park (2006)은 유효경 D_{10} 이 0.41mm이며 균등계수 C_u 가 1.24인 주문진 표준사를 사용하였다. 표 4는 Park(2006)에서 사용된 주문진 표준사의 물성을 나타낸 것이다. 그림 3은 모형토조 내에 균질한 사질토를 형성하기 위해 강사하는 모습을 나타낸 것이다. 상부에서 모래를 강사시켜 중간의 호퍼를 통해 균질한 상대밀도를 갖는 사질토지반을 형성할 수 있다. Park(2006)은 다양한 지반응력조

표 2. 모형토조의 구성

	Chari와 Meyerhof 1983 Meyerhof와 Sastry 1985 Meyerhof와 Sastry 1987	Park 2006
직경	100cm	77cm
높이	160cm	121cm
정지토압계수	0.32	0.27, 0.4, 0.7, 1.0
상대밀도	20%	55%, 86%

표 3. 모형말뚝의 구성

	Chari와 Meyerhof 1983, Meyerhof와 Sastry 1985, Meyerhof와 Sastry 1987	Park 2006
직경	7.4cm	6cm
길이	110cm	90cm
두께	0.7cm	0.37cm
물헌 깊이	95cm	70cm

표 4. Park(2006)에서 사용된 주문진표준사의 주요 물성치

입도분포	주문진표준사의 물성치
통과중량백분율 10% D_{10} (mm)	0.41
균등계수 C_u	1.24
곡률계수 C_c	0.97
최대 간극비 e_{max}	0.948
최소 간극비 e_{min}	0.596
최대 건조단위중량 γ_{dmax} (kN/m^3)	16.15
최소 건조단위중량 γ_{dmin} (kN/m^3)	13.23
통일분류(Unified System Astm D2487)	SP

건을 모사하기 위해 토조 내의 구속응력조건을 토조에 부착된 멤브레인을 통한 공기압을 가하여 적용하였다. Chari와 Meyerhof(1983), Meyerhof와 Sastry(1985), 그리고 Meyerhof와 Sastry(1987)는 수평응력의 조절이 불가능하여 특정응력조건 하의 실험을 수행하였다. 각 시험들은 말뚝이 설치되기 전에 CPT가 수행되었으며, 해석 말뚝은 현장타설말뚝을 대상으로 하였다. CPT의 결과인 q_c 프로파일을 적용하여 깊이에 따른 극한수평단위 지지력이 각 예측식별로 산정되었으며, 수평재하 편심 거리를 적용한 극한수평지지력을 산정하였다. 수평말뚝 재하시험 결과에 의한 극한수평지지력은 각 예측식들에 의한 극한수평지지력 결과와 비교, 분석하였다.

모형토조시험에서의 CPT 결과인 q_c 값은 토조의 크기 효과에 기인하여 현장에서 측정된 q_c 값과 다르므로 콘의 크기와 상대밀도에 따른 크기 효과를 고려해야 한다 (Salgado 등 1997). Salgado 등(1997)에 의하면, 크기 효과에 영향을 미치는 요소들은 상대밀도와 응력조건, 해당지반을 구성하는 모래의 초기 조건들이다. 그림 4는 각 논문에서 수행된 CPT 결과에 적용될 크기 효과에 대한 그래프를 보이고 있다. Chari와 Meyerhof(1983), Meyerhof와 Sastry(1985), 그리고 Meyerhof와 Sastry(1987)에서 사용된 콘의 직경은 3.3cm이며, Park(2006)에서 사용된 콘의 직경은 1.6cm이므로, 크기 효과에 의한 $q_{c,cc}/q_{c,ff}$ 는 각각 0.56, 0.60으로 적용되었다. 이는 모형토조 내에서 측정된 q_c 값이 실제현장에서 측정된 q_c 값보다 작음을 나타내고 있어, 각 수치를 각 논문의 CPT 결과에 나누어 적용하였다.

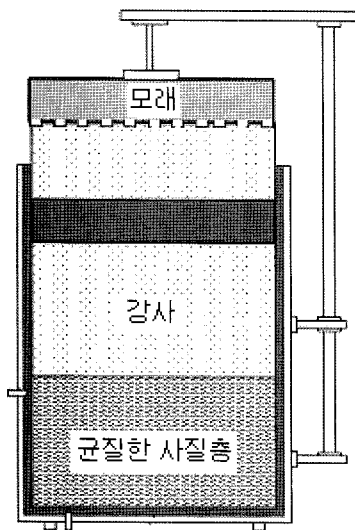


그림 3. 모형토조 내 균질한 사질층 형성모형

4.2 극한수평단위지지력의 비교 및 검증

그림 5는 각 논문에서 수행된 실내모형시험 결과에서 측정된 q_c 값과 산정된 p_u 값의 깊이에 따른 분포를 나타낸 것이다. Park(2006)은 총 6개의 실험이 수행되었으며, 상대밀도 55%조건 하에서 적용된 응력조건이 $\sigma_v=100kPa$, $\sigma_h=40kPa$ 인 실험이 1회, 상대밀도 86%조건 하에서 적용된 응력조건이 $\sigma_v=60kPa$, $\sigma_h=40kPa$ 인 실험, $\sigma_v=100kPa$, $\sigma_h=40kPa$ 인 실험, $\sigma_v=100kPa$, $\sigma_h=70kPa$ 인 실험, σ_v

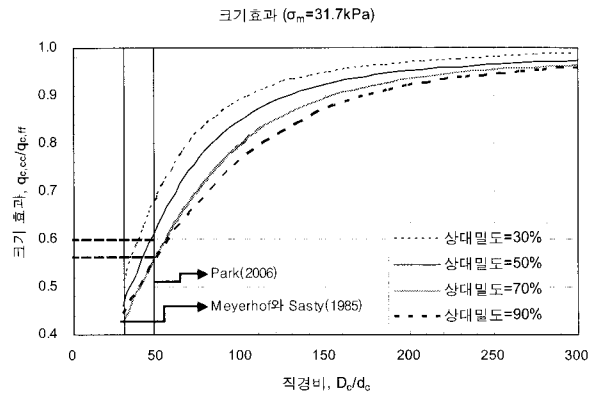
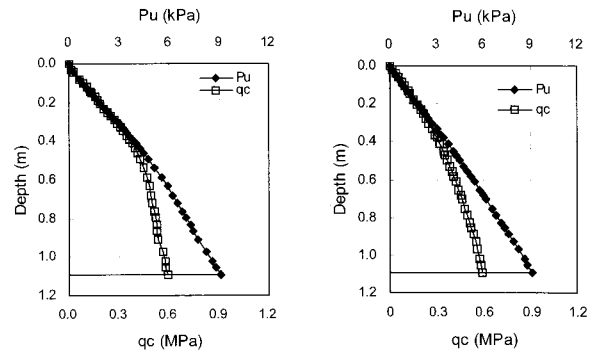
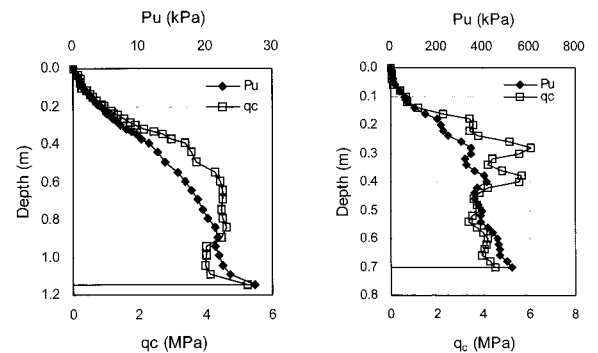


그림 4. 상대밀도와 직경비에 따른 크기 효과의 고려(Salgado 1998)



(a) Chari와 Meyerhof(1983)

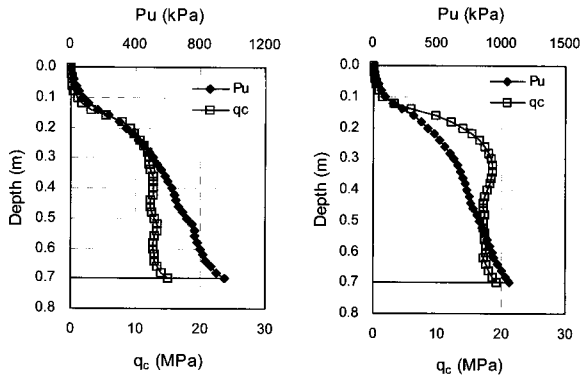
(b) Meyerhof와 Sastry(1985)



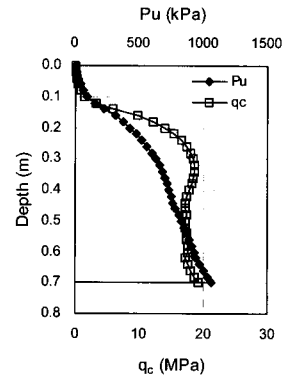
(c) Meyerhof와 Sastry(1987)

(d) Park(2006) ($D_R=55%$, $\sigma_v=100kPa$, $\sigma_h=40kPa$)

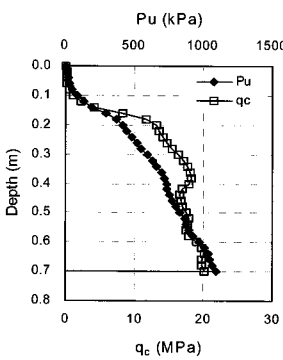
그림 5. q_c 값과 예측식에 의해 산정된 p_u 값의 깊이에 따른 비교(계속)



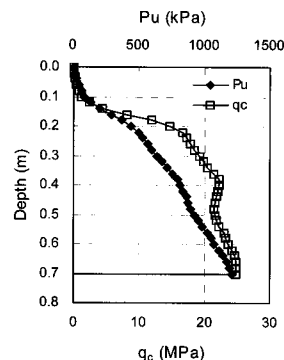
(e) Park(2006) ($D_R=86\%$ $\sigma_v=60\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$)



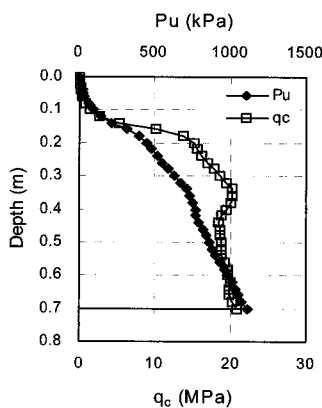
(f) Park(2006) ($D_R=86\%$ $\sigma_v=100\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$)



(g) Park(2006) ($D_R=86\%$ $\sigma_v=100\text{kPa}$, $\sigma_h=70\text{kPa}$)



(h) Park(2006) ($D_R=86\%$ $\sigma_v=100\text{kPa}$, $\sigma_h=100\text{kPa}$)



(i) Park(2006) ($D_R=86\%$ $\sigma_v=160\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$)

그림 5. q_c 값과 예측식에 의해 산정된 p_u 값의 깊이에 따른 비교

=100kPa, $\sigma_h=100\text{kPa}$ 인 실험, $\sigma_v=160\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 실험으로 5회가 수행되어 도합 6회의 실험을 본 연구에서 적용하였다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 Broms에 따른 예측식의 극한수평단위지지력 p_u 값들을 각 깊이별 q_c 값에 대해 실질적인 증가형태를 나타내는 분포형식으로 적용하였다. 그로 인해 기존의 Broms(1964)에서 적용되는 삼각형 분포형태와 유사하지만 q_c 값에 따른 변

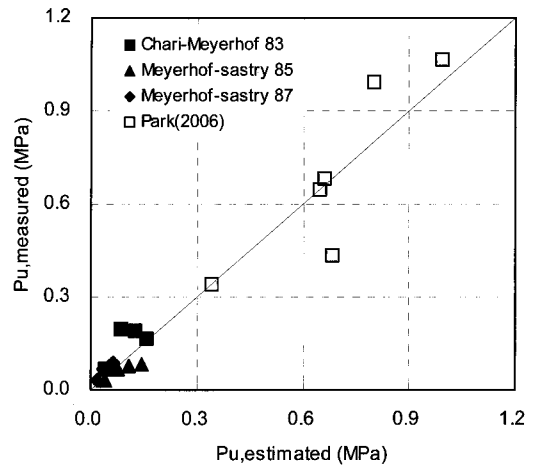


그림 6. 예측식의 결과와 측정결과의 극한수평단위지지력 비교

화를 직접적으로 반영할 수 있다.

그림 6은 식 (5)에 따라 산정된 극한수평단위지지력 p_u 값들을 실제 모형말뚝실험에서 측정된 극한수평단위지지력 p_u 값들과 비교하였다. 여기서 제안식에 따른 극한수평단위지지력 p_u 값을 $p_{u,estimated}$ 라 하고, 실험에 의해 측정된 극한수평단위지지력 p_u 값을 $p_{u,measured}$ 라고 하였다. Chari와 Meyerhof(1983)와 Meyerhof와 Sastry(1985), Meyerhof와 Sastry(1987), 그리고 Park(2006)에 따른 결과값은 각 저자의 이름으로 표기되어 있다.

극한수평단위지지력의 측정값과 예측값에 따른 비교에 대해 표준편차는 0.372를 보였으며, COV는 0.404의 값을 보였다. Meyerhof(1983)와 Meyerhof와 Sastry(1985) 그리고 Meyerhof와 Sastry(1987)에 의한 각 깊이에서의 극한수평단위지지력들은 측정된 극한수평단위지지력과 대체적으로 유사한 결과를 보였으며, Park(2006)에 의한 극한수평단위지지력은 넓은 범위에 걸쳐 측정된 극한수평단위지지력에 대해 일정한 유사성을 보이는 경우가 많았다. 전반적으로 제안식에 의해 예측된 극한수평단위지지력이 실내모형실험을 통한 측정값에 근접함을 알 수 있다.

5. 결론

기존의 극한수평단위지지력을 산정하는 방법들은 전반적으로 연직응력과 수동토압계수에 의한 함수형태로 적용되는 경우가 대부분이다. 실제 극한수평단위지지력은 연직응력과 지반의 토압계수 뿐만 아니라 수평응력과 지반의 조밀도에 따라서도 많은 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 연속적인 지반물성파악이 가능한 CPT의

q_c 프로파일을 통해 실제적인 극한수평단위지지력을 산정하고자 하였다. 공동확장이론에 따르면 q_c 는 연직응력과 수평응력, 상대밀도 등의 조건에 대응하는 것으로 나타나며, 이를 바탕으로 다양한 지반응력조건과 상대밀도 등에 의해 변화하는 극한수평단위지지력을 산정하는 예측식들을 제시하였다. 예측식은 기존에 제시된 Broms의 극한수평단위지지력 산정방법과 연계되어 제안되었으며, 각 응력조건과 상대밀도 조건에 따른 극한수평단위지지력 산정결과와의 비교에서 Broms에 따른 예측식은 R^2 값이 0.9491을 보여 상당히 유사함을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 식을 검증하기 위해 실내모형실험을 수행한 여러 논문들에 의한 결과를 바탕으로 예측식을 검증하였다. 각 실내모형실험들은 모형토조 내에 다양한 지반조건을 구현하였으며, 각 결과에 따른 예측식과의 비교, 검증이 이루어졌다. 전반적으로 예측식과 실내 모형실험의 결과값의 유사성이 높은 것으로 확인되었으며, 기존의 Broms에 따른 방법에서 얻을 수 있는 극한수평단위지지력을 q_c 값을 통해서도 대단히 합리적인 결과가 도출될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성욱 (2007), “응력상태를 고려한 사질토지반에 관입된 말뚝의 극한수평지지력 분석 및 평가”, *한국지반공학학회논문집*, 제 23권, 제 4호, pp.161-167.
- Barton, Y. O. (1982), “Laterally loaded model piles in sand: Centrifuge tests and finite element analyses”, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- 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.
- Chari, T. R. and Meyerhof, G. G. (1983), “Ultimate capacity of rigid piles under inclined load in sand”, *Canadian Geotechnical J.*, 18(2), 849-854.
- Fleming, W. G., Weltman, A. J., Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), “Piling Engineering”, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc.
- Jaky, J. (1944), “The coefficient of earth pressure at rest”, *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, pp.355-358
- Meyerhof, G. G. and Sastry, V.V.R.N. (1985), “Bearing capacity of rigid piles under eccentric and included loads.” *Canadian Geotechnical J.*, 22(3), 267-275.
- Meyerhof, G. G. and Sastry, V.V.R.N. (1987), “Full-displacement pressuremeter method for rigid piles under lateral loads and moments.” *Canadian Geotechnical J.*, 24(4), 471-478.
- Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.
- Park, Y. S. (2006), “Estimation of load bearing capacity of single pole foundation for transmission structure in sand”, Univ. of Yonsei, Seoul.
- 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.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974), “Analysis of laterally loaded piles in sand” *Proc. of 6th Offshore Technology Conf.* Vol.2, pp.473-483.
- Salgado, R. (1993), “Analysis of penetration resistance in sands”, PhD thesis, Univ. of California, Berkeley, California.
- 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.
- Vesic, A. S. (1972), “Expansion of cavities in infinite soil mass”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Proc. the American Society of Civil Engineers, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.
- 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.

(접수일자 2008. 7. 16, 심사완료일 2008. 10. 20)