한국지반공학회논문집 제25권 2호 2009년 2월 pp. 37 ~ 44

수평토압분포를 고려한 CPT기반의 말뚝극한수평지지력 산정

Estimation of Ultimate Lateral Load Capacity Using CPT Results Considering Lateral Soil Pressure Distribution

김 민 기[1] Kim, Min-Kee　　경 두 현[2] Kyung, Doo-Hyun
홍 정 무[2] Hong, Jung-Moo　　이 준 환[3] Lee, Jun-Hwan

Abstract

In this study, estimation methodology for the pile of ultimation lateral resistance, p_u, and ultimate lateral capacity, H_u, is based on the CPT cone resistance q_c. Preexistent methodologies for ultimate lateral resistance and ultimate lateral capacity have been generally represented with relative density, vertical effective stresses, and various K_0 values which are important for analyzing sandy soil. These methodologies, however, did not consider the horizontal effective stress and the effects of construction site conditions. Therefore, CPT-based methodology for the estimation of the ultimate lateral pile load capacity H_u was proposed. Calibration chamber test results were analyzed and compared with calculated results. The proposed estimation methodology for the pile of p_u can be effectively utilized as alternative to preexistent methods.

요 지

본 연구에서는 대표적인 원위치현장시험인 CPT의 콘관입치 q_c값을 이용하여 말뚝의 극한수평단위지지력과 극한수평지지력을 산정하는 예측식들을 제안하고, 검증하였다. 일반적으로 기존의 극한수평단위지지력과 극한수평지지력은 사질토지반에서 중요한 요소인 상대밀도, 연직응력, 그리고 다양한 토압계수들에 대한 함수로 표현하여 왔다. 하지만 이들은 수평응력에 대한 영향을 고려하지 않았으며, 말뚝 주변지반이 단일층으로 구성되어 있다고 가정하여 실제 현장에서의 영향을 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 영향을 고려할 수 있는 CPT결과를 이용한 극한수평단위지지력 산정식과 극한수평지지력을 산정하는 방법을 제안하였다. 이는 순수사질토에 대상으로 하고 있으며, 그에 대한 해석을 위해 적합한 대상지반을 대상으로 제안된 산정식의 신뢰성을 확보하였다.

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

1. 서 론

일반적으로 극한상태의 수평지지력은 단말뚝, 또는 강성말뚝과 장말뚝, 또는 탄성말뚝으로 구분하여, 말뚝 주변지반에 따라 지반 반력계수가 변하는 p-y곡선에 따른 수평하중의 허용수평변위를 산정하는 허용수평지지력 방법과 토압이론에 근거하여 말뚝주변지반의 극한상태를 가정한 극한수평지지력방법으로 구분하여 해석하고 있다. 극한수평지지력 방법은 말뚝이 관입된 해당 지반의 수동토압계수와 깊이에 따른 유효연직응력을

1 정회원, 신우지오엔지니어링 대리 (Member, Deputy Manager, ShineWoo Geo Engrg., Co.)
2 학생회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., 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 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

적용하여 산정하는 과정을 주로 따른다(Broms 1964; Reese 등 1974; Barton 1982; Fleming 등 1992; Prasad와 Chari 1999; Zhang 등 2005). Brinch Hansen(1961)은 일반적인 c-φ'지반에서 극한수평지지력을 예측하였으며, Broms(1964)는 사질토지반에서 말뚝 선단을 중심으로 말뚝이 회전한다고 가정하여 극한수평단위지지력분포를 제안하였다. Broms가 제안한 선형 극한수평단위지지력분포와는 달리 Reese 등(1974)는 지표면 부근에 쐐기형 파괴가 발생하여 깊이별로 다양한 극한수평단위지지력이 산정됨을 제안하였다. 또한 Prasad와 Chari(1999)는 다양한 실내실험결과를 통해 실제 토압분포에 유사한 토압분포형태를 제안하였다. 그러나 각 방법들은 저자들에 따라 제안된 극한수평단위지지력의 분포형식이 다르며, 수평단위지지력을 구하는 데에 있어 각기 다른 수평토압계수를 적용하고 있는 문제점을 가지고 있다.

일반적으로 원위치현장시험인 콘관입시험(CPT: Cone Penetration Test)은 깊이방향으로 연속적인 계측결과를 보이며, 사질토에 적용할 수 있는 상대밀도나 다양한 응력상태에 따른 결과값을 보인다(Salgado 등 1997). 김민기 등(2008)은 콘지지력 q_c값을 이용한 극한수평단위지지력 p_u의 평가를 수행하였다. 이 방법은 깊이별로 연속적인 지반상태를 반영하여, Broms(1964)의 극한수평단위지지력 p_u의 산정방법보다 현장상태의 실제적인 적용이 가능함을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 이론적인 토압분포형태를 구현한 Petrasovits와 Award(1972)의 방법과 보다 실제적인 토압분포형태를 적용한 Prasad와 Chari(1999)의 방법을 대상으로 콘지지력 q_c을 이용한 극한수평단위지지력 p_u를 평가하고, 그에 따른 각 극한수평지지력을 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 수평재하시 짧은 단독말뚝의 극한수평지지력

극한수평단위지지력(Ultimate Lateral Resistance)은 극한상태에서의 말뚝 주변지반에 발생하는 토압이며, 극한수평지지력(Ultimate Lateral Capacity)은 말뚝의 수평변위가 극한상태를 나타내는 일정 범위를 넘어서게 될 때 말뚝이 주변지반으로부터 받게 되는 수평지지력을 말한다. 짧은 단독말뚝의 극한수평단위지지력 p_u와 극한수평지지력 H_u는 일반적으로 정적평형조건으로부터 구할 수 있다. 이 때, e = 말뚝재하지점으로부터 지면까지의 거리이다.

그림 1에 따르면, 수평력을 받는 짧은 단독말뚝이 말

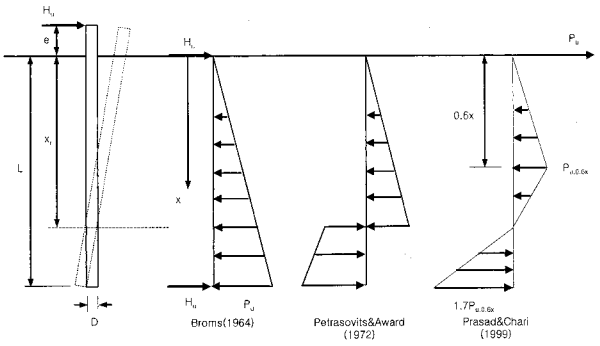


그림 1. 수평재하시 단말뚝의 극한수평지지력

뚝주변지반으로부터 받게 되는 극한수평단위지지력의 깊이에 따른 분포는 여러 저자에 따라 다르게 적용되고 있음을 알 수 있다. Broms(1964)의 방법은 말뚝의 선단에서 말뚝이 회전한다고 가정하고 있으며, 극한수평단위지지력은 우측방향에서 선형적으로 발달한 삼각형 분포를 가지게 된다. Broms(1964)에 따른 극한수평단위지지력은 말뚝이 관입된 해당지반의 수평응력계수와 깊이별로 나타나는 유효연직응력 σ_v'의 관계로, 다음식과 같이 산정된다.

$$p_u = 3K_p\sigma_v' \tag{1}$$

이 때, K_p는 수동토압계수이며, σ_v'는 유효연직응력이다.

Petravits와 Award(1972)의 방법은 말뚝의 회전점을 고정시키지 않고, 시행착오법을 적용하여 회전점까지의 거리를 산정한다. 이 때 수동토압계수의 형태는 $(3.7K_p$-$K_a)$로 나타나며, K_a는 주동토압계수이다.

$$p_u = (3.7K_p - K_a)\sigma_v' \tag{2}$$

실제 지반에서의 극한수평단위지지력의 분포를 적합하게 모사한 Prasad와 Chari(1999)방법은 토압계수에 해당하는 값을 $10^{(1.3tan\phi+0.3)}$로 적용하였다. Prasad와 Chari (1999)방법은 x_r을 지표면에서부터 말뚝의 회전점까지의 거리로 정의하고, $0.6x_r$에서 최대 극한수평단위지지력이 발생한다고 판단하였으며, x_r에서의 극한수평단위지지력을 0으로 고정하고 L에서의 극한수평단위지지력을 최대 극한수평단위지지력의 1.7배하여 그 사이의 구간을 선형으로 처리하였다.

$$p_u = 10^{(1.3tan\phi+0.3)}\sigma_v' \tag{3}$$

현재 제안되어 있는 극한수평단위지지력을 결정하는 방법들은 유효연직응력과 수동토압계수를 적용하고 있으며, 지반의 수평응력에 따른 영향이 고려가 되어 있지 못하다. 수평응력은 해당지반의 조밀성에 따른 지반상태에 따라 그 적용성이 달라지기 때문에 본 논문에서는 이준환 등(2007)에서 제안한 수평응력보정계수 C_F를 적용하고자 하며, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_F = \left(\frac{K_0}{1-\sin\phi} \right)^{0.6} \tag{4}$$

여기서 K_0은 원위치 현장응력 σ_v'과 σ_h'에 의한 토압계수이다. 일반적인 사질토의 경우, 실험을 통한 경험식으로 제안된 Jaky(1944)의 공식(=1-sinϕ)이 성립하지만, 조밀한 모래의 경우 지반의 다짐영향에 의해 정지토압이 실제보다 작게 산정된기 때문에(Sherif 1984), 이를 보정하기 위해 수평응력보정계수 C_F를 적용하였다. 이에 극한수평단위지지력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

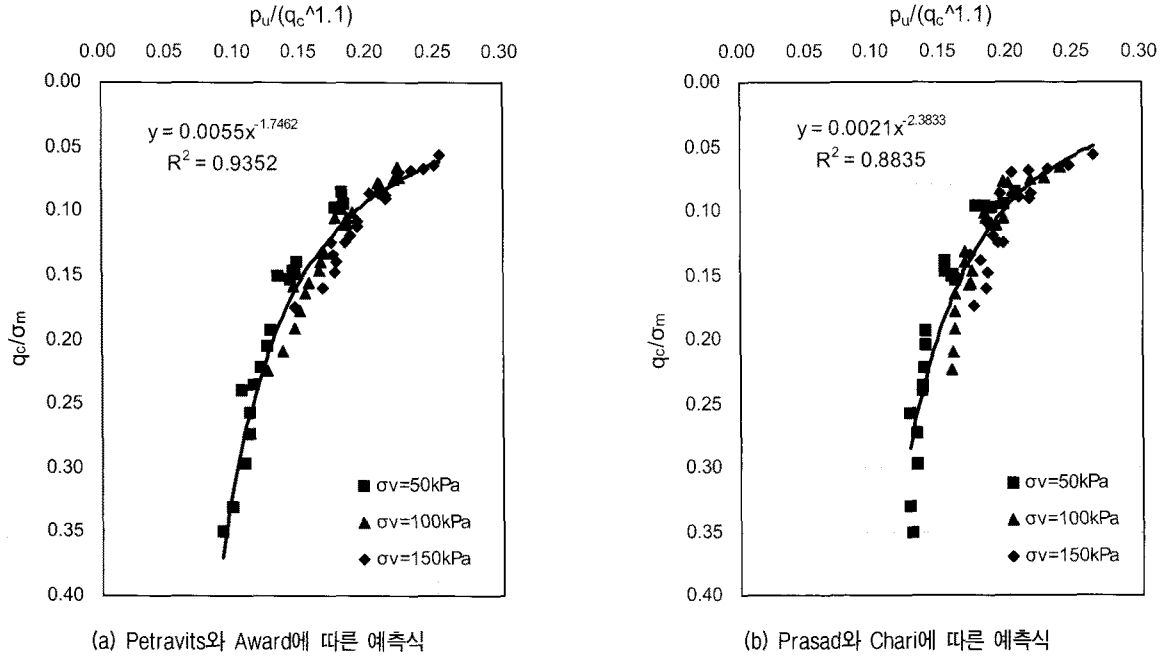
$$p_u = C_F \times K_p \times \sigma_c \tag{5}$$

3. CPT결과를 이용한 단말뚝의 극한수평지지력

김민기 등(2008)에 따르면, 사질토지반에서의 CPT 결과인 q_c값은 정지토압계수와 연직응력, 수평응력, 그리고 상대밀도에 따라 일정한 함수로 나타나며, 극한수평단위지지력이 콘관입치 q_c값과 특정한 관계가 있음을 확인하고, Broms(1964)에 따른 극한수평단위지지력과 q_c값과의 관계를 나타내었다. 그러나 최근 연구결과(Prasad와 Chari 1999; Zhang 등 2005)에 따르면 실제 실내모형실험 결과는 Broms(1964)에 따른 극한수평단위지지력과 그 분포와 상이한 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 실제적인 극한수평단위지지력의 분포를 적용하고자 Petrasovits와 Award(1972)와 Prasad와 Chari (1999)에서 제안한 극한수평단위지지력과 그 분포를 도입하였다.

그림 2는 Petrasovits와 Award(1972)와 Prasad와 Chari (1999)에 따른 각 극한수평단위지지력과 콘관입치 q_c, 그리고 평균응력 σ_m에 따른 관계를 나타내었다. 수정된 극한수평단위지지력 p_u값는 콘관입치 q_c와 유사한 계수로 구성되어 있으므로 이들을 정규화하였으며, 콘관입치 q_c는 연직응력과 수평응력에 따른 함수로 표현되어 이를 평균응력 σ_m으로 나누어주었다. 또한 수평응력에 대해 보정하고자 수평응력보정계수를 적용하였다. 본 논문에서는 이에 따른 극한수평단위지지력 p_u값과 산정된 q_c값의 관계를 다음과 같은 식으로 나타내고자 한다.

$$p_u = A \frac{q_c^B}{\sigma_m^C} \tag{6}$$



(a) Petravits와 Award에 따른 예측식 (b) Prasad와 Chari에 따른 예측식

그림 2. 수정된 극한수평단위지지력 p_u값과 산정된 q_c값의 관계

표 1. p_u - q_c의 상관계수 A, B, C

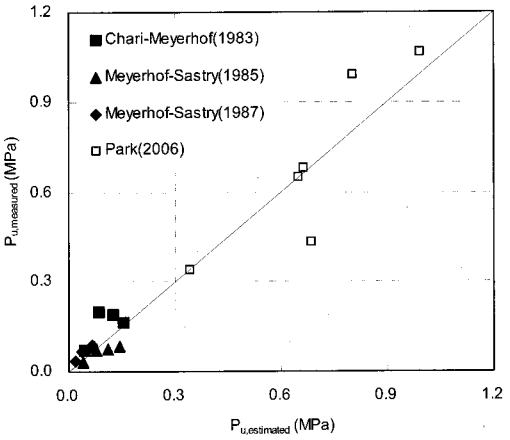
	Broms에 따른 예측식	Petravits와 Award에 따른 예측식	Prasad와 Chari에 따른 예측식
A	0.041	0.051	0.075
B	0.491	0.527	0.680
C	−0.609	−0.573	−0.419

이 때, A, B, C = 수정된 극한수평단위지지력 p_u값과 산정된 q_c값의 상관계수이며, 이에 대한 각 방법에 따른 수치는 표 1에 나타나 있다.

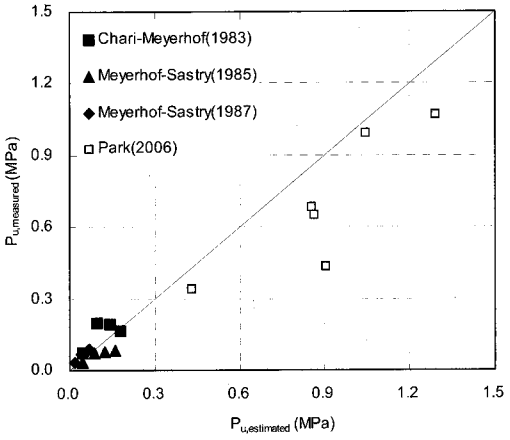
4. 실내모형 수평재하실험을 통한 극한수평지지력 분석 및 검증

본 연구에서는 문헌에서 실시된 여러 실내모형시험들(Chari와 Meyerhof 1983; Meyerhof와 Sastry 1985; Meyerhof와 Sastry 1987; Park 2006)의 결과를 바탕으로 극한수평지지력을 검증하였다. 본 연구에 적용된 실내모형실험들은 축소모형 강관 단말뚝을 대상으로 하였으며, 사질토 지반을 형상화하여 토조 내의 지반을 균질한 지반조건으로 적용하였다. 여기서 Salgado 등(1997)에 따라 모형토조내에서의 q_c값은 상대밀도에 따른 크기효과를 고려하였다. 극한수평단위지지력을 산정하기 위해 실내모형토조실험에서 수행된 결과를 바탕으로 기초적인 분석을 수행하여, 실제 해석에 포함되는 물성치들을 파악하였다. 각 CPT 결과의 q_c값을 앞서 제안한 식들에 적용하여 극한수평단위지지력 p_u값을 산정하고, 이를 이용하여 최종적으로 극한수평지지력 H_u값을 산정하였다. Prasad와 Chari(1999)에 따른 예측식은 깊이에 따른 q_c값의 변화를 극한수평단위지지력 p_u값의 분포에 적용하고자 기존 선형구간의 예측 p_u값을 비례적으로 감소하는 계수를 곱하여 회전점에서는 '0'의 값을 갖도록 변형하는 방법을 사용하였다.

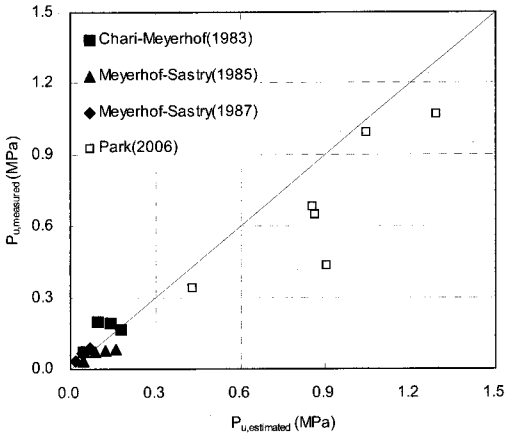
그림 3과 4는 실내모형실험에 따른 극한수평단위지지력과 극한수평지지력의 측정값과 예측값에 따른 비교를 나타낸 것이다. Chari와 Meyerhof(1983)와 Meyerhof와 Sastry(1985) 그리고 Meyerhof와 Sastry(1987)는 상대적으로 작은 극한수평단위지지력값들을 보였으며, Park (2006)은 다양한 응력상태에 따라 상대적으로 큰 극한수평단위지지력을 보였다. 그림 3과 4를 통해 극한수평단위지지력의 경향과 극한수평지지력의 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 실내모형실험에 따른 극한수평단위지지력과 극한수평지지력의 실측값과 예측값의 비교는



(a) Broms에 따른 예측식

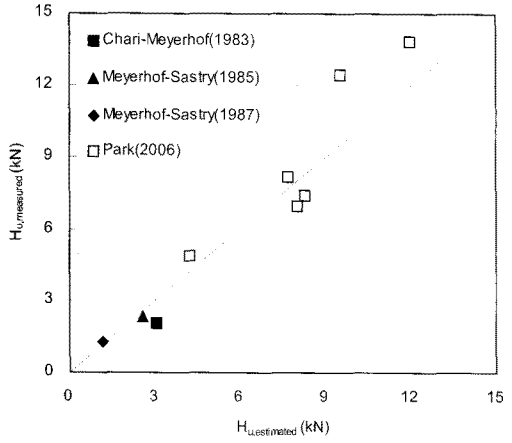


(b) Petravits와 Award에 따른 예측식

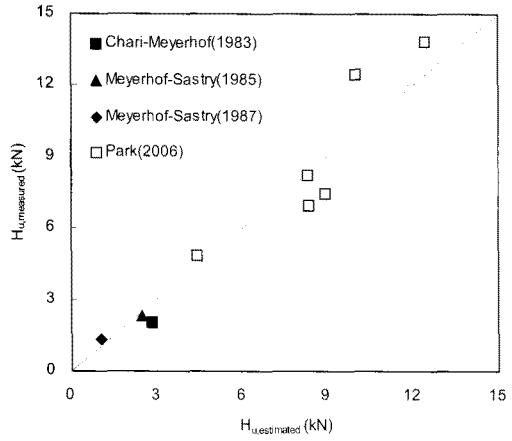


(c) Prasad와 Chari에 따른 예측식

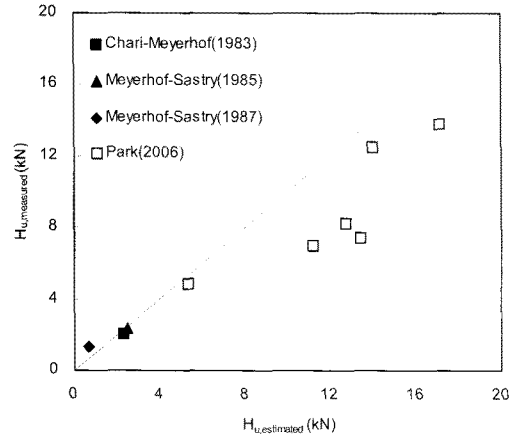
그림 3. 실내모형실험에 따른 각 예측식의 결과에 의한 극한수평단위지지력 비교



(a) Broms에 따른 예측식



(b) Petravits와 Award에 따른 예측식



(c) Prasad와 Chari에 따른 예측식

그림 4. 실내모형실험에 따른 각 예측식의 결과에 의한 극한수평지지력 비교

각각 표 2, 3에 나타났다. 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

표 2. 실내모형실험에 의한 극한수평단위지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

	표준편차	분산계수(COV)
Broms에 따른 예측식	0.372	0.404
Petravits와 Award에 따른 예측식	0.466	0.427
Prasad와 Chari에 따른 예측식	0.764	0.681

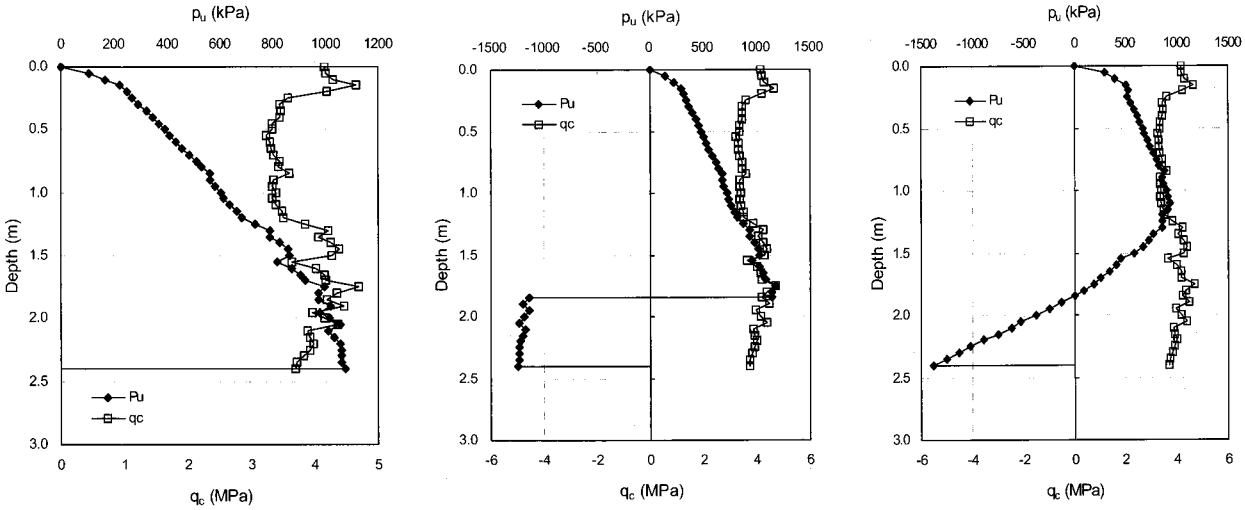
표 3. 실내모형실험에 의한 극한수평지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

	표준편차	분산계수(COV)
Broms에 따른 예측식	0.222	0.217
Petravits와 Award에 따른 예측식	0.202	0.196
Prasad와 Chari에 따른 예측식	0.379	0.307

측정된 극한수평단위지지력에 대해 일정한 유사성을 보이는 경우가 많았다. Park(2006)의 극한수평단위지지력의 예측값들이 측정값에 비해 22%~42%가량 큰 결과를 보이는 경우가 일부 있지만, 이 외에 전반적으로 제안식에 의해 예측된 극한수평단위지지력이 실내모형실험을 통한 측정값에 근접함을 알 수 있다.

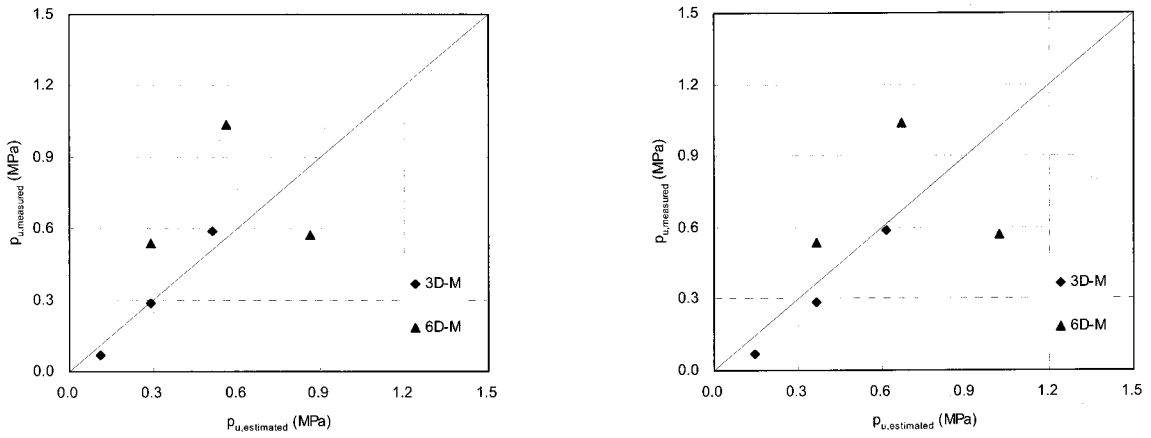
5. 현장시험을 통한 극한수평지지력 분석

예측식에 대한 실제적인 검증을 위해 전북 익산지역에서 현장시험을 수행하였다. 현장시험에서 수행된 말뚝은 총 세 가지로 말뚝길이 2.4m의 수평재하시험 1회와 말뚝길이 1.2m, 2.4m의 모멘트재하시험 각 1회이다. 말뚝직경은 0.4m이며, 대상말뚝은 현장타설말뚝으로 구성되었다. 대상지반은 상부에 실트질 점토층이 2m, 그 후로는 실트질 모래층으로 구성되어 있으며, 실험을 위해 상부의 실트질 점토층 2m를 제거하고, 실트질 모래층으로 구성된 지반을 대상으로 말뚝실험을 수행하였다. 천공을 실시하여 해당 공에 말뚝을 설치하였으며, 지표면 위치에 반력하중을 가할 수 있는 구조물을 통해 수평재하시험을 실시하였다. 모멘트재하시험은 지표면으로부터 상부로 2m연장한 말뚝의 머리부분에 수평으로 하중을 가해 실시하였다. 실트질 모래층의 단위중량은 14.5kN/m^{3}이며, 상대밀도는 30-35%로 측정되었다. 삼축압축실험을 통해 측정된 내부마찰각은 35.4°로 나타났다. 또한 Kyle 등(2006)의 현장시험결과 중에서 단독말뚝의 CPT 결과를 이용하여 극한수평지지력을 산정하였고 이에 상응하는 실제 시험을 통해 산정된 말뚝의 극한수평지지력과 비교하여 추가하였다.

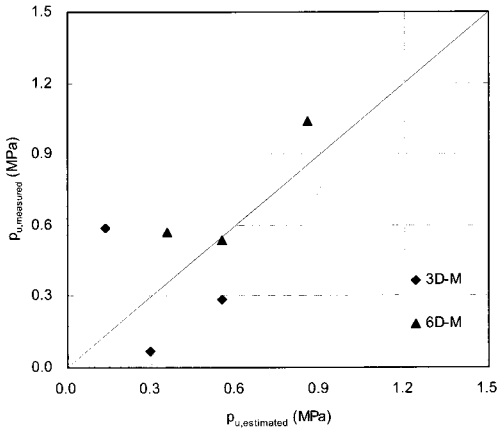


(a) Broms에 따른 예측식 (b) Petravits와 Award에 따른 예측식 (c) Prasad와 Chari에 따른 예측식

그림 5. 현장시험에 따른 각 예측식에 의한 극한수평단위지지력 분포 및 콘관입시험결과



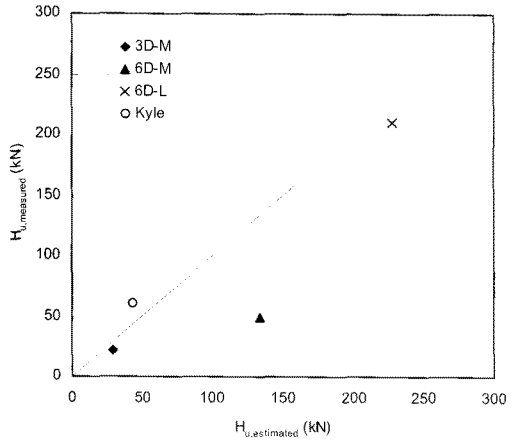
(a) Broms에 따른 예측식 (b) Petravits와 Award에 따른 예측식



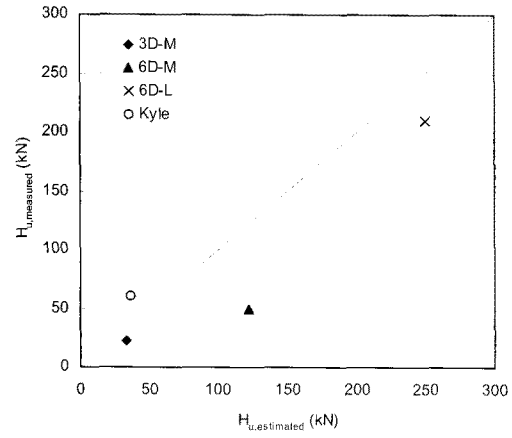
(c) Prasad와 Chari에 따른 예측식

그림 6. 현장시험에 따른 각 예측식의 결과에 의한 극한수평단위지지력 비교

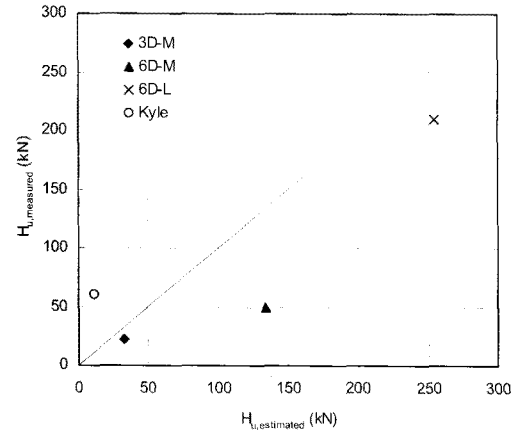
3D-M은 말뚝길이 1.2m의 모멘트재하시험 결과를 나타내며, 6D-M은 말뚝길이 2.4m의 모멘트재하시험 결과를 나타낸다. 6D-L은 말뚝길이 2.4m의 수평재하시험 결과를 나타낸다. 그림 5는 현장시험 중 6D-L의 시험결과에 따른 극한수평단위지지력 분포와 콘관입시험결과를 나타낸 것이다. 콘관입시험 결과에 따르면 지반이 균질



(a) Broms에 따른 예측식



(b) Petravits와 Award에 따른 예측식



(c) Prasad와 Chari에 따른 예측식

그림 7. 현장시험에 따른 각 예측식의 결과에 의한 극한수평지지력 비교

한 사질토로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그림 6, 7은 현장시험에 따른 극한수평단위지지력과 극한수평지지력의 측정값과 예측값에 따른 비교를 나타낸 것이다. 현장시험에 따른 극한수평단위지지력과 극한수평지지력에 의한 비교는 표 4, 5에 나타났다. 예측식에 따른 극한

표 4. 현장시험에 의한 극한수평단위지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

	표준편차	분산계수(COV)
Broms에 따른 예측식	0.535	0.732
Petravits와 Award에 따른 예측식	0.681	0.752
Prasad와 Chari에 따른 예측식	1.308	1.250

표 5. 현장시험에 의한 극한수평지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

	표준편차	분산계수(COV)
Broms에 따른 예측식	0.858	0.590
Petravits와 Award에 따른 예측식	0.767	0.535
Prasad와 Chari에 따른 예측식	1.024	0.737

수평단위지지력과 측정값과의 비교를 보면 6D-M의 결과에서 일정한 범위의 흩어짐이 관찰된다. 극한수평지지력의 분포 또한 다른 결과들에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였지만 비교적 분산도가 감소한 결과를 보였다. 해당 현장시험의 결과들은 제시된 식의 핵심적인 부분을 합리적인 방법을 통해 검증해 내었으며, 앞으로 더 다양한 시험을 통해 제시된 식의 다양한 적용성을 도출할 필요성을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 CPT에 의한 결과인 q_c값을 사용하여 다양한 지반응력조건과 상대밀도 등에 의해 변화하는 극한수평단위지지력을 산정하는 예측식들을 제시하였다. 이 예측식들은 기존에 제시된 세 가지 산정방법과 각각 연계하여 제시되었으며, 이를 검증하기 위해 실내모형시험과 현장시험에 의한 결과를 대상으로 예측식들을 검증하였다. 본 연구에 적용된 실내모형시험들은 모형토조 내에 다양한 지반조건을 나타내었으며, 각 결과에 따른 예측식과의 비교, 검증이 이루어졌다.

제안된 Broms(1964)에 따른 예측식과 Petravits와 Award (1972)에 따른 예측식은 R^2값이 0.95, 0.94에 이를 정도로 유사했으며, Prasad와 Chari(1999)에 따른 예측식은 R^2값이 0.89를 보여 제안된 식에 상당히 근사한 값을 보였다. 제안식들에 대한 검증을 위해 실내모형실험과 현장시험에 의한 결과를 비교, 검증하였다. 실내모형시험은 Broms(1964)에 따른 예측식이 측정값보다 약간 작은 결과를 보였으나 그와 반대로 Prasad와 Chari(1999)에 따른 예측식에 의한 결과는 측정값보다 약간 큰 결과를

보여 대비를 이루었다. Petravits와 Award(1972)에 따른 예측식은 상대적으로 표준편차와 COV가 적은 결과를 보였다.

또한 현장시험 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안된 식을 검증하였다. 현장시험은 전북익산지역을 대상으로 하였으며, 그 외에도 문헌을 통한 결과를 추출하여 검증에 도입하였다. 앞서의 실내모형실험과 유사하게 극한수평단위지지력은 상대적으로 분산 정도가 컸지만 극한수평지지력을 산정하면 그 분산 정도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각 위치에서의 지반의 물성 변화에 따라 예측식과의 차이가 약간 발생할 수는 있으나, 이러한 변화를 포함하는 극한수평지지력을 산정하면 지반의 변화에 따른 영향을 보완하게 되는 것으로 판단되어진다.

참 고 문 헌

1. 김민기, 경두현, 홍정무, 이준환 (2008), "사질토지반에서 콘관입 저항치 q_c에 의한 단말뚝의 극한수평단위지지력 평가", *한국지반공학회논문집*(11월 게재확정).
2. 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성옥 (2007), "응력상태를 고려한 사질토지반에 관입된 말뚝의 극한수평지지력 분석 및 평가", *한국지반공학회논문집*, 제23권, 제4호, pp.161-167.
3. Barton, Y. O. (1982), "Laterally loaded model piles in sand: Centrifuge tests and finite element analyses", Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
4. Brinch Hansen, J. (1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", *Danish Geotechnical Institute*, Copenhagen, Bulletin No.12, pp.5-9.
5. 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.
6. Chari, T. R., and Meyerhof, G. G. (1983), "Ultimate capacity of rigid piles under inclined load in sand", *Canadian Geotechnical J.*, 18(2), pp.849-854.
7. Fleming, W. G., Weltman, A. J, Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), "Piling Engineering", 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc.
8. Jaky, J. (1944), "The coefficient of earth pressure at rest", *Journal of the Society of Hungarian Archtects and Engineers*, pp.355-358.
9. Kyle, M. R., Ryan, J. O., Jeffery, J. E., Derek, H.J., Kimball, G. O., and Brian, H. G. (2006), "Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Load tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.10, pp.1262-1271.
10. 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), pp.267-275.
11. 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), pp.471-478.
12. Mitchell, J. K. (1993), "Fundmentals of soil behavior", John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.
13. Park, Y. S. (2006), "Estimation of load bearing capacity of single pole foundation for transmission structure in sand", Univ. of Yonsei, Seoul.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Salgado, R. (1993), "Analysis of penetration resistance in sands", Ph.D. thesis, Univ. of California, Berkeley, California.
18. 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.
19. Sherif, M. A., Fang, Y. S., and Sherif, R. I. (1984), "K_A and K_0 behind rotating and Non-yielding walls", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.GT1, pp.41-56.
20. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundarions Division*, Proc. the American Society of Civil Engineers, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.
21. 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. 8. 8, 심사완료일 2009. 2. 23)