

등가변형을 이용한 테이퍼 말뚝의 지지력 산정

Estimation of Axial Load Capacity for Tapered Piles Using Equivalent Transformation

전 성 남¹ Jun, Sung-Nam

서 경 범² Seo, Kyung-Bum

송 원 준³ Song, Won-Jun

이 준 환⁴ Lee, Jun-Hwan

Abstract

In this study, a method using equivalent transformation for estimation of the axial load capacity of tapered piles is proposed. While preexistent methods for estimating the axial load capacity of tapered piles have been based on the effect of soil state and taper angle, a new design method is proposed considering cone resistance q_c and equivalent transformation in sand. Through tapered pile simplified by using equivalent transformation, a new method for quick and easy estimation of the axial load capacity of tapered pile is proposed for practical use. In order to verify the proposed method, calibration chamber test and field test were conducted. In calibration chamber test, comparison of estimated axial load capacity with measured one showed that the standard deviation and COV (Coefficient Of Variation) of estimated Q_u is 0.05~0.121, 0.04~0.05 respectively. For field test, axial load capacity by proposed method shows 2.5% under-estimation in comparison with measured value. As a result, it is found that proposed method produces satisfactory predictions for tapered piles.

요 지

본 연구에서는 등가변형을 이용하여 테이퍼 말뚝의 지지력을 산정하는 방법을 제안하였다. 지반조건과 테이퍼각도를 고려하여 지지력을 산정하던 기존의 방법과 달리, 테이퍼말뚝의 지지력산정시 콘관입시험 결과를 활용하도록 하였다. 이때 테이퍼말뚝은 등가변형을 이용하여 형태를 단순화 시켰으며 이를 통해 실무에서 비교적 쉽게 지지력을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 검증을 위해 실내시험과 현장시험을 실시하였다. 실내모형시험 결과로부터 측정된 극한지지력과 본 연구에서 제안된 방법에 의한 예측값을 비교한 결과 표준편차는 0.05~0.121, COV는 0.04~0.05의 값을 보여 대체적으로 유사한 결과를 보였으며, 현장시험은 약 2.5%의 오차를 보여 측정값에 근접함을 알 수 있었다. 그 결과 제안된 지지력 산정법은 테이퍼말뚝의 지지력을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

Keywords : Axial load capacity, Cone resistance, Equivalent transformation, Tapered pile

1. 서 론

말뚝은 상부구조물의 하중을 지반으로 전달하는 기

능을 가지는 한편, 일종의 구조부재로서 구조물의 일부분이라고도 볼 수 있다. 따라서 말뚝은 기초구조 내에 서 구조부재로서 기능할 때에 유발되는 응력에 견디도

1 코오롱건설(주) 토목사업본부 주임 (Assistant Section Chief, Civil Construction & Business Division, KOLON E&C CO., LTD.)

2 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Ph. D Candidate, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

록 설계되어야 한다. 구조물에 가해지는 하중은 말뚝을 통해서 지반의 지지층에 전달되게 되는데, 말뚝의 두부에서 가장 크고 말뚝의 선단에 가까워질수록 점차 감소하게 된다. 말뚝의 하중전이특성과 그에 필요한 말뚝의 최적단면을 고려할 때 말뚝의 두부에서 선단으로 갈수록 말뚝의 단면이 작아지는 테이퍼말뚝이 말뚝의 구조적인 안정성과 경제적인 측면에서 최적의 말뚝형태라는 연구결과가 발표되어 있다(Zil'berberg와 Sherstnev 1990, El Nagggar와 Wei 1999). 그러나 원통형말뚝의 경우와 달리 현재까지 테이퍼말뚝의 연직거동에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어져왔다. 이준환 등(2007)은 가압토조의 실내모형시험을 통해 평균직경과 근입깊이가 동일한 경우 모래지반에서의 테이퍼말뚝의 지지력이 원통형말뚝보다 크다는 연구결과를 발표하였다. 테이퍼말뚝은 원통형말뚝보다 말뚝의 지지력측면에서 유리한 것으로 나타났으나 테이퍼말뚝에 대한 연구결과가 충분치 못하고 관련 설계기준이 정립되지 않은 탓에 현재까지 테이퍼말뚝의 현장 시공사례는 극히 드문 실정이며, 따라서 실무에서 널리 활용되지 못하고 있다.

현장타설 말뚝의 지지력 산정은 크게 기초지반의 역학적 특성을 나타내는 물성치를 이용하는 방법과 표준관입시험(SPT)이나 콘관입시험(CPT)과 같은 현장시험 결과를 직접 적용하는 방법으로 구분될 수 있다. 암반에 시공되는 현장타설 말뚝은 주로 암반의 역학적 특성을 좌우하는 강도 및 강성도를 토대로 지지력의 산정이 이루어지나, 사질토 지반과 같은 일반적인 기초지반의 경우 시료채취의 어려움으로 인해 현장시험에 의한 방법이 더 효과적으로 간주된다.

본 연구에서는 원위치 시험방법중 사용빈도가 점차 증대하고 있으며, 시험오차가 타 시험법에 비해 작은 것으로 평가받고 있는 CPT 결과를 활용하여 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정법을 제안하였다. 이는 실무에서 테이퍼형상을 엄격히 고려하는데 많은 제한이 따르므로 간단하면서 유용한 방법을 도출하기 위함이다. 또한 실내모형토조시험과 현장말뚝재하시험을 실시하여 본 연구에서 제안된 방법에 의한 지지력을 측정값과 비교, 검토 하였다.

2. CPT를 이용한 말뚝 지지력 산정

CPT 결과를 이용한 말뚝 기초의 지지력 평가는 많은 학자들에 의해 다양한 방법들이 제시되어 왔다(Aoki와

Velloso 1975, Schmertmann 1978, Bustamante와 Ganeselli 1982, Philipponnat 1980). 국내의 경우 CPT는 주로 연약지반에서의 지반조사와 설계정수 도출을 위해 활용되고 있으나, 국외적으로는 기초설계분야에서도 매우 활발히 적용되고 있다. CPT 결과를 이용한 말뚝지지력 산정은 다음과 같은 형태의 식을 통해 이루어진다.

$$Q_b = q_b A_b = (c_b q_{c,avg}) A_b \quad (1)$$

$$Q_s = \sum q_s A_s = \sum (c_s q_{c,i}) A_s \quad (2)$$

여기서, Q_b 와 Q_s 는 선단지지력 및 주면마찰력, q_b 와 q_s 는 단위 선단지지력 및 주면마찰력, c_b 는 CPT 선단지지력 상관계수, c_s 는 CPT 주면마찰력 상관계수, $q_{c,avg}$ 는 말뚝선단 부근에서의 평균 콘지지력, $q_{c,i}$ 는 각 지지층에서의 평균 콘지지력이다. 상관계수 c_b 와 c_s 는 말뚝지지력을 결정하는 중요한 계수이다. c_b 와 c_s 값은 각 방법별로 상이한 값이 제안되어 있으며, 지반상태 및 말뚝조건 등이 영향인자로 간주된다(이준환 등 2007).

CPT 결과를 이용한 말뚝기초의 지지력 평가법 중, 설계실무에서 빈번히 적용되는 대표적인 방법은 LCPC방법(Bustamante와 Ganeselli 1982)이며 지지력 산정식은 다음과 같다.

$$q_b = K_b q_{c,avg} \quad (3)$$

$$q_s = \frac{q_{c,i}}{K_s} \quad (4)$$

여기서, K_b 는 흙의 종류와 말뚝의 형식에 영향을 받는 지지력 계수, K_s 는 마찰계수이다.

LCPC방법은 지지력 산정에 있어 보다 구체적인 영향요소를 포함하며, 말뚝의 종류 또한 다양한 형식으로 구분되어 있다. LCPC 방법 이외에도 Aoki와 Velloso(1975), Schmertmann(1978), Philipponnat(1980)에 의한 방법 또한 실무에서 빈번히 적용되고 있으며, 각 방법별로 상관계수의 값과 콘지지력의 결정을 위한 영향범위가 달리 정의되어 있다.

현재 제시되어 있는 대부분의 설계과정은 단일 원통형이나 사각형말뚝 등을 대상으로 하고 있다. 테이퍼말뚝의 경우, 실무적용을 위한 세부적인 연구성과는 상대적으로 미흡한 편이나, 지금까지 선단지지력 및 주면마찰력의 증가효과에 대한 연구가 일부 수행되어 왔다(Robinsky와 Morrison 1964, Rybnikov 1990, Wei와 El Nagggar 1998). Rybnikov(1990)에 따르면, 동일한 길이의

테이퍼형 말뚝의 경우 원형말뚝에 비해 20~30% 정도 큰 지지력을 나타냈으며, 테이퍼의 각도가 클수록 제작 비용은 증가하지만 충분히 큰 지지력을 추가적으로 얻을 수 있어 경제성을 확보할 수 있음을 보였다. CPT를 이용한 대부분의 지지력 평가방법들은 말뚝의 재질이나 시공방법에 따른 영향은 일부 반영하고 있으나, 테이퍼 형식과 같이 깊이별 단면형태의 변화나 지반의 밀도의 변화에 따른 영향은 고려되어 있지 않다. 이는 이러한 말뚝의 형식이 현재 보편적으로 사용, 설치되지 않기 때문이라 판단되나, 현장 및 시공조건외 다양화와 지반상태의 열악화 등에 대비한 테이퍼형 말뚝의 적용은 지지 성능의 효율화를 위해 고려될 수 있는 조건이므로(Wei와 El Nagggar 1998), 이에 대한 연구검토가 필요하다.

3. 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정

원통형 말뚝의 경우 주면하중은 작은 침하에도 그 값이 극한치에 도달하는 마찰력 성분으로만 구성되어 있지만 테이퍼말뚝은 경사진 주면에 마찰력과 함께 침하량이 커질수록 그 크기가 계속 증가하는 압축력 성분으로 구성되어 있다(이준환 등 2007). 이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 등가변형을 이용하여 테이퍼 말뚝의 형태를 변화하였을 경우, 주면마찰력을 경사진 주면의 연직방향에 작용하는 마찰력 성분($Q_{s,z}$)과 수평방향에 작용하는 압축지지력의 성분($Q_{b,z}$)의 합으로 나누어

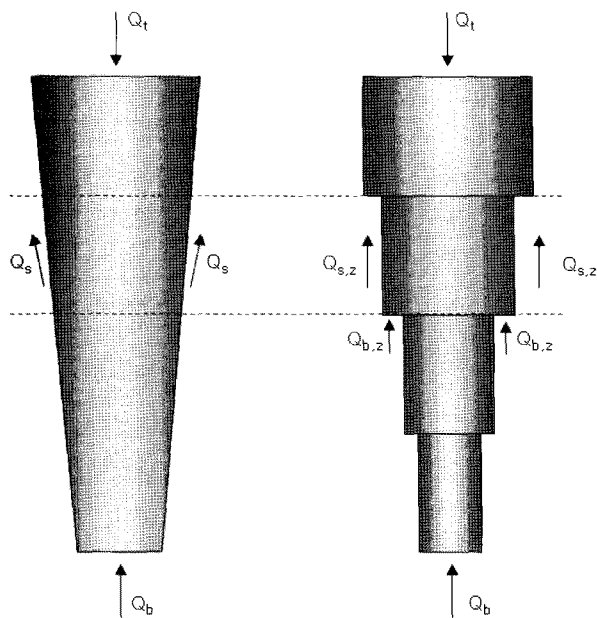


그림 1. 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 매커니즘

서 고려하였다(그림 1). 캐나다 기초설계기준(Canadian foundation engineering manual, Canadian Geotechnical Society 1992)에서는 테이퍼 각도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향을 고려하지 않고 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 산정하였다. El Nagggar와 Sark(2000)는 Kodikara와 Moore(1993)의 제안식에 테이퍼계수(taper effect factor)를 적용하여 테이퍼말뚝의 주면마찰력을 산정하였고 테이퍼계수를 활용한 계산결과는 실측치와 큰 차이를 보이지 않음을 보고하였다. 그러나 이들 지지력 산정법들은 모두 항타말뚝에 대한 것으로 현장타설 말뚝에는 적용이 불가능할 뿐만 아니라 합리적인 설계 기준의 부재로 인해 실무에서 널리 사용되지 못하고 있는 실정이다. 또한 테이퍼형식과 같이 깊이별 단면형태의 변화나 지반의 밀도 변화에 따른 영향을 고려한 설계를 실무에서 직접 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 등가변형을 이용한 테이퍼 말뚝의 지지력 산정식을 주면마찰력의 수평, 수직성분의 영향을 고려하여 식 (5), (6)과 같이 제안하였다.

$$Q_b = q_b A_b = (c_b q_{c,avg}) A_b \quad (5)$$

$$Q_s = (q_s A_s + q_w A_w) = \sum (c_s q_{s,i} A_{s,i} + c_w q_{w,i} A_{w,i}) \quad (6)$$

$$A_{w,i} = \frac{\pi}{4} (B_n^2 - B_{n-1}^2)$$

여기서, B_n , B_{n-1} 은 각각의 말뚝직경, A_w 는 말뚝의

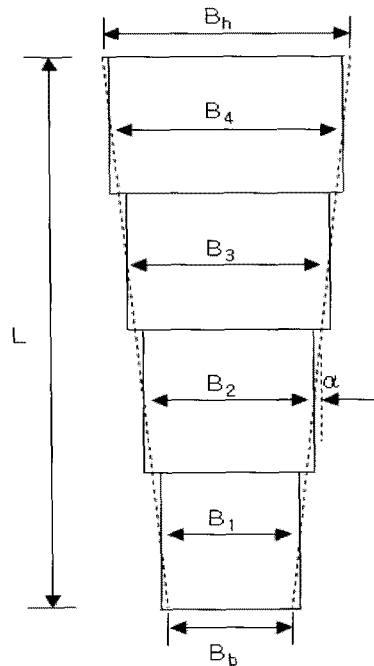


그림 2. 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정 모형

계단부 선단면적, $A_{s,i}$ 는 각 말뚝의 주면면적, $A_{w,i}$ 는 각 원형말뚝의 선단면적의 차이이다.

선단지지력 및 주면마찰력을 결정하는 계산과정은 다음과 같다.

- ① 그림 2와 같이 콘지지력의 영향을 고려하여 깊이에 따라 말뚝길이를 결정한다.
- ② 각 말뚝 길이에 테이퍼 각(α)을 곱하여 각 말뚝의 $B_1 \sim B_4$ 의 값을 결정하고, 두부로 갈수록 말뚝의 직경이 증가하는 등가변형 테이퍼말뚝을 구성한다.
- ③ 식 (5)와 (6)에 의해 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 구한다.

4. 실내모형 연직재하시험을 통한 검증

4.1 실내모형 토조시험

모형토조시험은 실제 현장을 모형화하여 시험자가 원하는 지반조건을 만족하는 시험을 수행할 수 있으며, 시험결과 또한 비교적 높은 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다. 실제 현장의 지반상태를 재현하는 방법으로는 원심모형기(centrifuge)를 사용하는 방법과 내부에 압력을 가할 수 있는 모형토조(calibration chamber)를 이용하는 방법이 있다. 일반적으로 원심모형기를 이용하는 방법은 실제 현장의 지반조건을 만족하는 상태로 재현하여 시험이 가능하나, 유지비가 비싸고 제작, 사용이

불편하다는 단점이 있다. 모형토조는 상대적으로 장치의 제작과 조작이 간편한 반면, 지반의 깊이에 따른 응력분포를 재현하는 것이 힘든 단점이 있으나 지반조건에 따른 말뚝의 거동을 규명하기 위해 다양한 시험이 수행되었으며, 그에 따른 시험결과는 상당히 높은 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다(O'Neil과 Raines 1991).

본 연구에서 활용한 Park(2006)의 실내시험에 사용된 모형토조는 그림 3에 나타난 바와 같이 직경 77cm, 높이가 121cm인 원통형 철제 토조로 구성되어 있다. 상부가 덮개로 밀폐된 토조의 밀면과 측면에 두 개의 고무막(membrane)을 설치하였으며 압력조절기를 통해 밀면과 옆면의 공기압을 독립적으로 조절할 수 있도록 하였다. 이를 통해 다양한 응력조건을 가지는 모형지반을 구현할 수 있으며, 수직 및 수평토압의 크기 제어를 통해 다양한 토압계수(K_0) 조건하에서 시험이 가능하다. 또한 토조내의 사질지반을 균질한 상대밀도와 내부마찰각조건으로 조성하기 위해, 토조내의 지면과 일정한 높이에서 건조된 모래를 낙하시켜 토조내의 지반을 동일한 지반조건으로 조성하는 고정강사장치(mass spreader)가 사용되었다.

모형말뚝 재하시험에는 경사각이 각각 1°, 1.5°인 테이퍼말뚝이 사용되었으며, 각 말뚝의 세부세원은 표 1에 나타나 있다. 모형말뚝의 변형률을 측정하기 위해 장말뚝의 경우 전면과 후면에 각각 9개, 단말뚝의 경우 각각 6개의 변형률 게이지(strain gauge)를 대칭으로 부착하였다. 장말뚝의 경우 말뚝의 하부에서 하중전이가 더 급격히 발생하기 때문에 하단부에는 변형률 게이지를 4cm 간격으로 촘촘히 부착하였고, 상단부에서는 간격을 넓혀서 10cm 간격으로 부착하였으며 단말뚝의 경우에는 1cm 간격으로 동일하게 부착하였다. 또한 그림 4에서와 같이 말뚝의 선단부에는 말뚝의 선단지지력을 독립적으로 측정하기 위하여 4개의 변형률 게이지를 이용한 하중계(load cell)를 제작하여 부착하였다. 선단하중계와 주면마찰력이 작용하는 말뚝 외벽간의 연결부위에 생기는

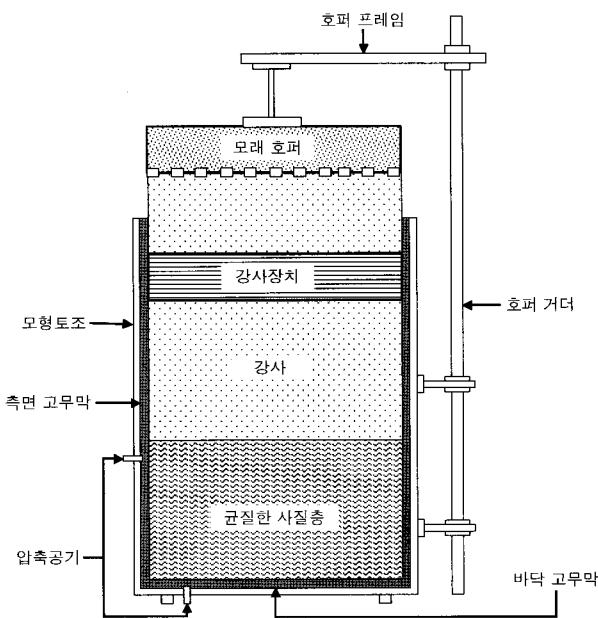


그림 3. 모형토조의 구성도

표 1. 말뚝의 제원(Park 2006)

구 분	장말뚝	단말뚝
각도	1°	1.5°
직경	두부 : 7.13cm 선단 : 4.6cm	두부 : 6.78cm 선단 : 5.1cm
길이	90cm	56cm
두께	두부 : 0.23cm 선단 : 0.31cm	0.3cm
근입깊이	70cm	36cm

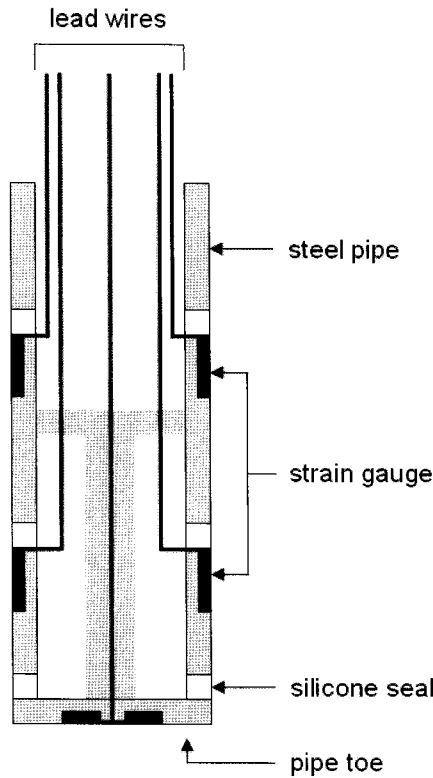


그림 4. 말뚝 선단부 상세도

빈 공간은 실리콘으로 채움으로써 선단지지력이 말뚝의 주변마찰력에 영향을 미치는 것을 방지하도록 하였다.

4.2 극한지지력의 비교 및 검증

본 연구에서 콘관입치 q_c 값을 바탕으로 등가변형을

이용한 테이퍼말뚝의 지지력을 산정하는 방법을 제안하였다. 제안방법 검증을 위해 실내모형시험의 재시험 결과값($Q_{t, measured}$)과 예측값($Q_{t, estimated}$)을 비교해서 실제 지반응력 조건하에서 적합성을 확인하고자 하였다. Park(2006)의 시험은 말뚝의 종류와 각 지반조건에 따라 장, 단말뚝, 상대밀도, 수직응력, 수평응력을 고려하여 실시하였으며 세부적인 사항은 표 2에 나타내었다.

지지력 산정시 시험지반의 가장 신뢰성 있는 상관계수를 이용하기 위해서 각각의 지반조건에 대한 상관계수를 Park(2006)의 CPT 결과를 활용하여 다음 식 (7)과 (8)에 의해 산정하였으며 이를 정리하여 표 3에 나타내었다.

$$c_b = \frac{q_b}{q_{c,avg}} \quad (7)$$

$$c_s = \frac{q_s}{q_{c,i}} \quad (8)$$

등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정을 위해 콘지지력의 영향을 고려하여 테이퍼 말뚝을 8개로 나누었다. 이때 각 말뚝은 테이퍼 각에 따라 각각의 직경이 증가하는 원통형말뚝으로 구성된다. 선단지지력의 경우 식 (7)로부터 얻어진 c_b 에 8개로 분할된 말뚝 중 선단부 구간의 CPT 평균값과 선단면적을 곱하여 산정하였다. 주변마찰력은 경사진 주면의 연직성분에 작용하는 마찰력성분($Q_{s,z}$)과 수평성분에 작용하는 압축지력성분(Q_{bz})의 합으로 나타낼 수 있는데, $Q_{s,z}$ 는 식

표 2. 모형말뚝재시험의 지반조건과 말뚝조건(Park 2006)

상대밀도, D_R (%)	수직응력, σ_v (kPa)	수평응력, σ_h (kPa)	정지토압계수, K_0	시험말뚝
86	60	40	0.66	장말뚝
	100	40	0.4	장, 단말뚝
	160	40	0.25	장말뚝
	100	70	0.7	장말뚝
	100	100	1.0	장말뚝
55	100	40	0.4	장, 단말뚝

표 3. 지반조건에 따른 c_b 와 c_s

상대밀도, D_R (%)	수직응력, σ_v (kPa)	수평응력, σ_h (kPa)	c_b	c_s
86	60	40	0.094	0.002
	100	40	0.115	0.002
	160	40	0.121	0.002
	100	70	0.106	0.003
	100	100	0.095	0.003
55	100	40	0.230	0.006

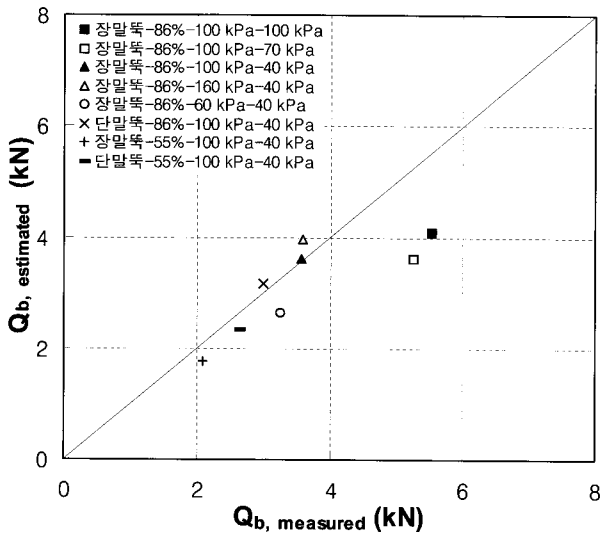


그림 5. 제안방법과 재하시험의 선단지지력 비교

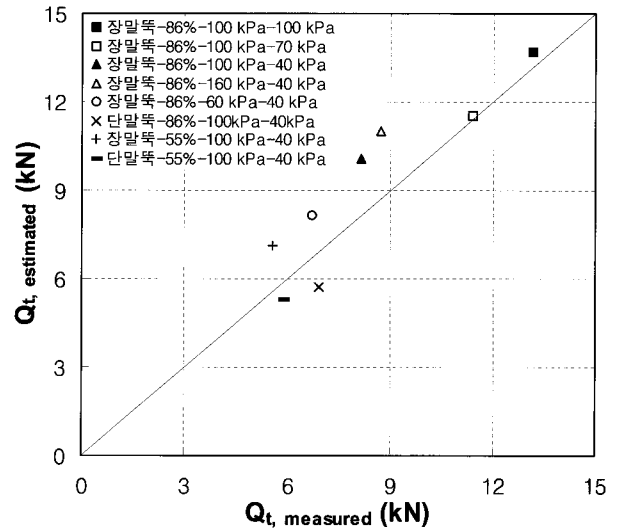


그림 7. 제안방법과 재하시험의 전체지지력 비교

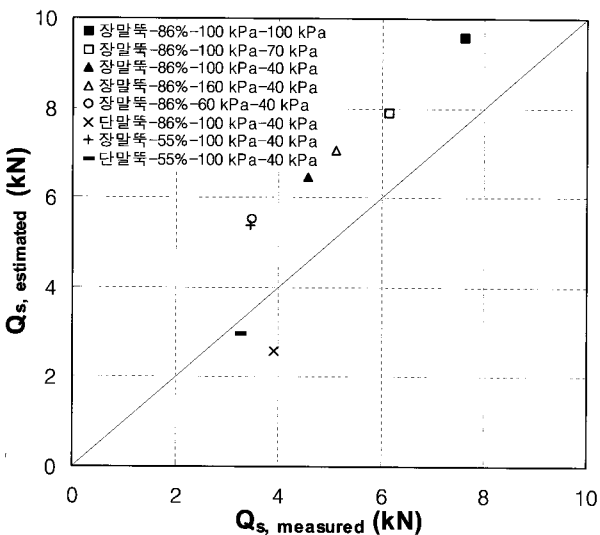


그림 6. 제안방법과 재하시험의 주면마찰력 비교

표 4. 극한지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

구 분	표준편차	분산계수(COV)
장말뚝	0.121	0.04
단말뚝	0.05	0.05

D_R 가 55%, 86%이고 σ_v 이 100kPa, σ_h 이 40kPa인 말뚝 모두 예측값은 측정값에 근접한 결과를 보였다.

그림 6은 주면마찰력의 예측값과 측정값을 비교한 것이다. 장말뚝의 경우 D_R 가 55%, 86%인 지반 모두 예측값이 결과값보다 다소 크게 측정되었으며, 단말뚝은 예측값이 결과값보다 작게 측정되었다.

그림 7은 전체지지력의 예측값과 측정값을 비교한 것이다. 예측값에 대한 측정값의 비에 대한 표준편차와 분산계수(COV)는 표 4에 나타난 바와 같다. 표준편차는 각각의 말뚝에 대하여 0.05~0.121의 분포를 갖으며, COV는 0.04~0.05의 범위를 보임을 알 수 있다. 장말뚝의 경우 제안방법에 따른 예측값은 결과값에 비해 상대적으로 큰 결과를 보였으며 단말뚝의 경우 상대적으로 작은 결과를 보였지만, 실제적으로는 두 경우 모두 신뢰할만한 결과라고 할 수 있다.

5. 현장시험결과를 이용한 비교 분석

본 연구는 검증용 위해 Lee 등(2009)의 현장시험 결과를 활용하였다. 현장은 익산지역에 위치하고 있으며 한국전력의 강관주 철탑 기초의 설계기준을 수립하기 위한 연구의 일환으로 조성되었다. 말뚝 설치 전 CPT가 수행되었으며, 현장타설말뚝은 철근콘크리트로 구성되

(8)로부터 얻어진 c_s 에 분할된 말뚝 구간에서의 CPT 평균값과 주면면적을 곱하여 산정하였으며, Q_{bz} 는 c_b 와 분할된 말뚝 구간에서의 CPT 평균값에 각 말뚝의 선면적과 그 위 말뚝의 선단면적 차를 곱하여 산정하였다.

등가변형을 이용한 지지력 산정방법에 따른 선단지지력의 예측값과 측정값을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 장말뚝의 경우 상대밀도(D_R)가 86%이고 수평응력(σ_h)이 40kPa, 수직응력(σ_v)이 60, 160kPa인 지반조건과 D_R 가 55%이고 σ_v 이 100kPa, σ_h 이 40kPa인 지반조건에서 테이퍼말뚝의 지지력 예측값은 측정값에 근접한 결과를 보였다. 그리고 D_R 가 86%, σ_v 이 100kPa로 일정할 때 σ_h 이 70, 100kPa로 증가한 경우에는 예측값이 측정값보다 작게 산정되었다. 단말뚝의 선단지지력의 경우

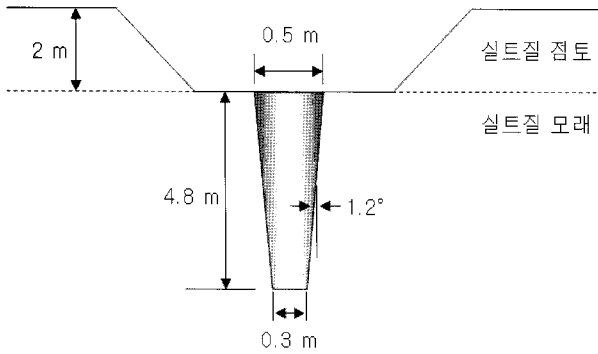


그림 8. 말뚝재하시험 개요도

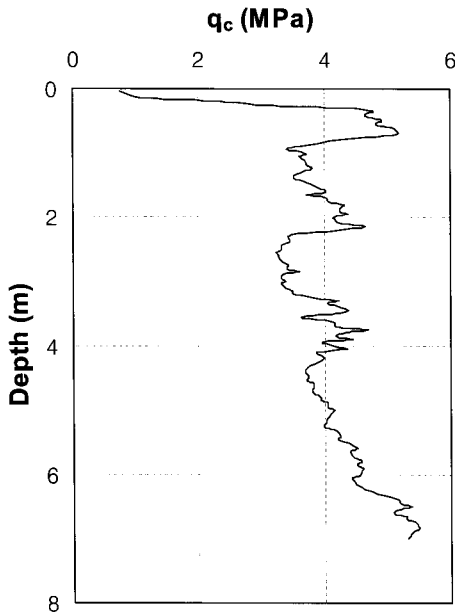


그림 9. 현장시험의 CPT 결과

어 있다.

대상 지반은 지표면으로부터 2m가량이 실트질 점토층으로 구성되어 있으며, 2m이하는 실트질 모래층으로 구성되어 있다. 이에 따라 실제 현장시험은 상부 2m에 해당하는 실트질 점토층을 제거한 후에 점토질 모래층에서 시험이 수행되었다. 그림 8은 현장시험에서의 연직재하말뚝의 설치모습을 나타낸 것이다. 시험에서 수행된 테이퍼말뚝은 선단직경이 0.3m, 두부 직경이 0.5m이며, 길이는 4.8m이다. 테이퍼말뚝은 테이퍼각도가 1.2°로 시공되었으며, 시험말뚝에는 하중전이특성을 조사하기 위해 다수의 스트레인게이지를 부착하였다.

테이퍼 말뚝의 현장시험은 한 차례 수행되었으며, 콘관입시험과 말뚝길이 4.8m의 연직재하시험이 수행되었다. 시험은 충분한 변위가 발생할 때 까지 진행되었으며, 각 재하 단계별로 상세한 측정이 이루어져 극한상태에서의 변위와 지지력의 측정을 수행하였다. 그림 9는 테이퍼

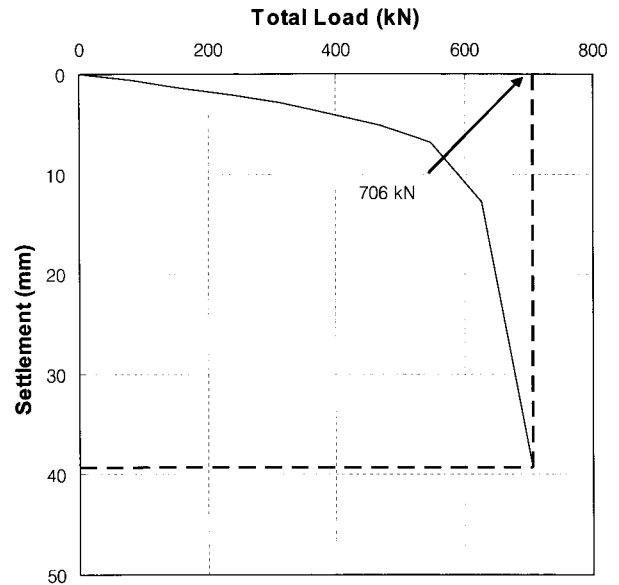


그림 10. 현장재하시험에서 측정된 전체하중-침하량 곡선

말뚝의 위치에서 측정된 CPT결과이다. 시험말뚝의 선단과 주변부에 대한 대표 콘 저항력 q_c 는 각각 5.25MPa와 4.35MPa이다.

그림 10은 현장에 설치된 테이퍼말뚝에 대한 재하시험에서 얻어진 하중-침하량곡선을 나타낸 것이다. 말뚝의 두부가 평균직경의 10%만큼 침하했을 때 말뚝의 두부에 가해지는 하중을 전체지지력으로 간주하는 파괴기준을 적용하였다(Franke 1991). 그 결과 테이퍼말뚝의 전체지지력은 706kN으로 결정되었다.

본 연구에서 제안한 등가변형을 이용하여 산정한 테이퍼말뚝의 선단지지력은 133kN, 주변마찰력은 557kN, 전체지지력은 690kN을 나타내었다. 산정방법은 먼저 4.8m의 테이퍼 말뚝을 1.2m 간격의 말뚝으로 나누었으며, 각각의 말뚝길이에 테이퍼 각을 곱하여 각 말뚝의 직경이 0.325m, 0.375m, 0.425m, 0.475m로 증가하는 말뚝을 구성하였다. 여기서 각 말뚝의 연결부 주변마찰력은 마찰력 성분($Q_{s,z}$)과 압축지지력의 성분(Q_{bz})의 합으로 나누어 계산하였다. 지지력 산정 시 가정한 c_b , c_s 값은 LCPC 방법을 적용하였으며 그 값은 각각 0.35, 0.0167이다. 본 연구에서 제안한 방법은 현장 측정치에 비해 약 2.5% 낮은 결과를 보였으며, 이는 상당히 유효한 결과라 판단된다.

6. 결론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

CPT 결과를 활용하여 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력을 산정하는 방법을 제안하였다. 이 제안방법은 테이퍼말뚝과 같이 깊이별 단면형태의 변화나 지반의 밀도변화에 따른 영향을 고려한 기존 방법과는 다르게 등가변형을 이용하여 테이퍼 말뚝의 지지력을 실무적으로 비교적 쉽고 정확하게 예측할 수 있는 방법이다.

본 연구에서 제안한 콘관입치인 q_c 값을 이용해 극한 지지력을 산정하는 방법은 실내모형시험과 현장시험을 통해 검증하였으며, 제안방법에 따른 실내모형시험의 재하시험 측정값과 예측값의 표준편차는 0.05~0.121, COV는 0.04~0.05의 분포를 보여 상당히 유사한 값을 보였다.

또한 현장시험을 통해 검증한 테이퍼말뚝의 극한 지지력은 706kN으로 본 연구의 제안방법으로 산정한 지지력 690kN과 유사한 결과를 나타냈으며, 이를 통해 현장 활용의 적합성을 검증하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정 방법은 합리적이며 사용이 간편한 극한지지력 산정방법이라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 연구비지원에 의해 수행된 “복합기초시스템 도입을 통한 특수지반 내 송전철탑기초 설계최적화 및 신공법 개발”의 연구결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성욱 (2007), “원통형 및 테이퍼말뚝의 하중-침하특성 및 CPT지지력상관계수”, 한국지반공학 회논문집, 제23권, 제4호, pp.59-68.
- Aoki, N. and Velloso, D. A. (1975), “An Approximate Method to Estimate The Bearing Capacity of Piles”, Proceedings of 5th Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bueno Aries, Vol.1, pp.367-376.
- Bustamante, M. and Gianselli (1982), “Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetration CPT”, Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol.2, pp.493-500.
- Canadian Geotechnical Society (1992), Canadian Foundation Engineering Manual, 3rd Ed., pp.283-289.
- El Naggar, M. H. and Wei, J. Q. (1999), “Axial Capacity of Tapered Piles Established From Model Tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.1185-1194.
- El Naggar, M. H. and Sark, M. (2000), “Evaluation of Axial Performance of Taper Piles from Centrifuge Tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.1295-1308.
- Franke, E. (1991), “EUROCODE Safety Approach as Applied to Single Pile”, Proc. of 4th International DFI Conference, Balkema, Rotterdam, pp.13-18.
- Kodikara, J. K. and Moore, I. D. (1993), “Axial Response of Tapered Piles in Cohesive Frictional Ground”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.4, pp.675-694.
- Lee, J. H., Paik, K. H., Kim, D. H., Hwang, S. W. (2009), “Estimation of Axial Load Capacity for Tapered Piles Using CPT Results”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, accepted on 2009.
- O'Neill, M. W. and Raines, R. D. (1991), “Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.117, No.8, pp.1208-1226.
- Park, Y. S. (2006), “Estimation of Load Bearing Capacity of Single Pole Foundation for Transmission Structure in Sand”, Master Thesis, Yonsei University, Seoul.
- Philipponnat, G. (1980), “Methode Prtique de Calculd’un Pieu Isole a L’aide du Penetrometre Statique”, *Geotechnique*, Vol.10, pp.55-64.
- Robinsky, E. I. and Morrison, C. F. (1964), “Sand Displacement and Compaction around Model Friction Piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1, No.2, pp.81-93.
- Rybnikov, A. M. (1990), “Experimental Investigation of Bearing Capacity of Bored-Cast-In-Place Tapered Piles”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.27, No.2, pp.48-52.
- Schmertmann, J. H. (1978), “Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design”, U.S. Department of Transportation, FHWA-TS-78-209.
- Wei, J. and El Naggar, H. (1998), “Experimental Study of Axial Behaviour of Tapered Piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.4, pp.641-654.
- Zil'berberg, S. D. and Sherstnev, A. D. (1990), “Construction of Compaction Tapered Pile Foundation”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.27, No.3, pp.96-101.

(접수일자 2009. 4. 1, 심사완료일 2009. 8. 6)