

등가변형을 이용한 테이퍼 말뚝의 지지력 산정

Bearing Capacity Estimation of Tapered Pile Using Step-wise shape

전성남¹⁾, Sung-Nam Jun, 서경범²⁾, Kyoung-Bum Seo, 이준환³⁾, Jun-Hwan Lee

¹⁾ 연세대학교 공학대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, estimate solution of ultimate axial capacity for axial loaded pile is proposed using step-wised shape. This is verified for effective applying on realistic factor by calibration chamber tests. Estimation method of ultimate axial capacity in this study is verified by calibration chamber test. The results of ultimate axial capacity through this proposed method have sufficiently low standard derivations and COVs. Also, this is verified through test that method is similarly resulted with measured values.

Keywords : Cone penetration test, Step-wised shape, Ultimate axial capacity

1. 서론

최근 건설구조물의 대형화로 인한 상부구조물의 하중이 증가하는 말뚝의 연직압축지지력은, 구조물의 안정성과 변형성에 큰 영향을 미치는 중요한 요소로 간주되고 있다. 구조물에 가해지는 하중이 말뚝을 통해서 지반의 지지층에 전달되는 과정을 살펴보면, 말뚝에 가해지는 연직력과 수평력, 그로 인해 발생하는 모멘트의 크기는 말뚝의 두부에서 가장 크고 말뚝의 선단에 가까워질수록 점차 감소하게 된다. 따라서 말뚝에 전달되는 각종 하중요소의 분포와 그에 필요한 말뚝의 소요단면을 고려할 때 말뚝의 두부에서 단면이 가장 크고 선단으로 갈수록 단면이 작아지는 테이퍼형말뚝(tapered pile)이 말뚝의 구조적인 안정성과 경제성 측면에서 유리한 형태라 할 수 있다(Zil'berberg와 Shersnev 1990, El Naggar와 Wei 1999). 국내에서는 테이퍼말뚝에 대해 백규호 등 (2007)이 모래지반에서 비배토 테이퍼말뚝의 연직거동 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 이준환 등(2007)이 원통형 및 테이퍼 말뚝의 하중-침하특성 및 CPT 지지력상관계수에 대한 연구를 수행하여 CPT결과를 이용하여 지지력을 추정하고, 모형말뚝재하시험에 사용된 동일 시료조건에 대해 콘관입시험을 실시하여 이를 통해 CPT지지력상관계수를 도출하였다.

위와 같이 최근 국내의 경우 테이퍼말뚝에 대한 시험이 증가하고 있으나, 테이퍼말뚝과 같이 깊이별 단면형태의 변화나 지반의 밀도변화에 따른 영향을 고려한 설계법을 이용하여 실무에서 쉽게 지지력을 구하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 원위치 시험방법 중 사용빈도가 점차 증가하고 있으며, 시험오차가 타 시험법에 비해 적은 것으로 간주하고 있는 콘관입시험(Cone Penetration Test; CPT)를 대상으로 CPT의 시험 결과로부터 획득한 q_c 값을 적용하여 테이퍼형 말뚝의 지지력산정법을 제안하고자 한다. 이를 위해 등가변형을 이용한 테이퍼 말뚝의 극한지지력을 산정하는 방법을 제안하고, 실내모형토조시험 결과에 기초하여 등가원형말뚝의 극한지지력과 비교 검토하고자 한다.

2. 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력

원통형말뚝의 주면마찰력은 지반의 수평응력에만 영향을 받고 선단지지력은 수평 및 연직응력 모두에 영향을 받는다는 사실과 말뚝이 침하하면 주면하중은 곧바로 극한치에 도달하고 선단하중은 계속 증가한다는 사실을 고려할 때 테이퍼말뚝의 주면마찰력의 주면에는 원통형말뚝에 작용하는 순수한 의미의 주면마찰력 뿐만 아니라 어느 정도의 선단지지력 요소가 함께 작용하기 때문이다(백규호 등 2007). 그림 1에 나타나 있듯이 테이퍼 말뚝의 주면마찰력은 경사진 주면의 연직성분에 작용하는 마찰력 성분($Q_{s,z}$)과 수평성분에 작용하는 압축지지력의 성분($Q_{b,z}$)으로 구성되어 있다.

본 논문에서는 주면마찰력의 수평, 수직성분의 영향을 고려하여 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력을 산정하는 공식을 식 (1), 식 (2)와 같이 제안하였으며 그 계산과정은 다음과 같다.

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

$$Q_s = \sum(q_{s1} A_s + q_{s2} A_w) = \sum(c_s q_{c,i} A_{s,i} + c_b q_{c,i} A_{w,i}) \quad (2)$$

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

여기서, Q_b 와 Q_s 는 선단지지력 및 주면마찰력, q_b 와 q_{s1} , q_{s2} 는 단위 선단지지력 및 주면마찰력, c_b 는 CPT 선단지지력 상관계수, c_s 는 CPT주면마찰력 상관계수, $q_{c,avg}$ 는 말뚝선단 부근에서의 평균 콘지지력, $q_{c,i}$ 는 각 지지층에서의 평균 콘지지력, B_n, B_{n-1} 은 각각의 말뚝직경, A_{wi} 는 각 원형말뚝의 선단면적의 차이이다. 상관계수 c_b 와 c_s 는 말뚝지지력을 결정하는 중요한 계수로서, 본 논문에서는 CPT지지력 상관계수로 명명하고자 한다. c_b 와 c_s 값은 각 방법별로 상이한 값이 제안되어 왔으며, 지반상태 및 말뚝조건 등이 영향인자로 간주된다.

- ① 그림 2와 같이 콘지지력의 영향을 고려하여 깊이에 따라 말뚝을 나눈다.
- ② 등가변형된 각 말뚝에서 길이와 테이퍼 각(α)을 곱하여 각 말뚝의 B_1, B_2, B_3, B_4 의 값을 결정한다. 이때 각각의 말뚝 선단과 두부의 직경을 합한 평균값이 $B_1 \sim B_4$ 의 값과 서로 일치해야 한다는 점이다.
- ③ 식 (1)과 (2)에 의해 각각의 말뚝에 대한 선단지지력과 주면마찰력을 구한다.

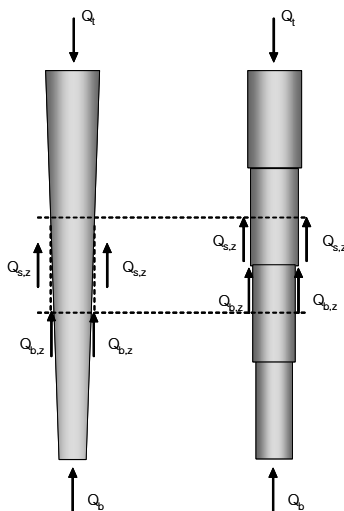


그림 1. 테이퍼말뚝의 등가원형말뚝으로 변환한 지지력

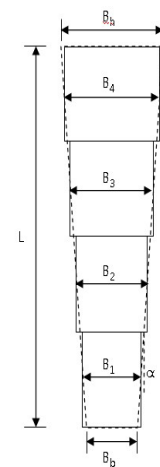


그림 2. 등가원형말뚝의 지지력 산정 모형화

3. 실내모형토조시험

본 연구에서는 사질토지반에서의 다양한 지반조건을 적용하고자 박영수(2006)에 의해 진행된 실내모형시험 CPT 결과와 하중변위곡선을 활용하였다. 실내모형시험은 무배토말뚝을 형상화하여 현장타설말뚝 중 천공말뚝을 대상으로 하였으며, 모형말뚝은 원형강관으로 구성되어 있다. 모형토조 내의 지반은 균질한 지반조건으로 적용하기 위해 일정하게 모래를 강사 시켰다. 각 시험들은 말뚝이 설치되기 전에 CPT가 수행되었으며, CPT의 결과인 q_c 값을 적용하여 극한지지력이 산정되었다. CPT는 모형토조의 중앙에서 시험되었으며, 구속압이 가해진 후의 지반을 대상으로 시행되었다. 모형토조시험에서의 CPT 결과인 q_c 값과 자유장에서 측정된 q_c 값은 서로 경계조건이 다르므로 콘의 크기와 상대밀도에 따른 크기 효과를 고려해야 한다(Salgado 등 1998). 박영수(2006)에서 사용된 콘의 직경은 1.6cm이므로, 크기 효과에 의한 $q_{c,cc}/q_{c,ff}$ 는 0.4 ~ 0.7의 값으로 산정되었다. 본 논문에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 각 수치를 CPT 결과에 나누어 적용하였다.

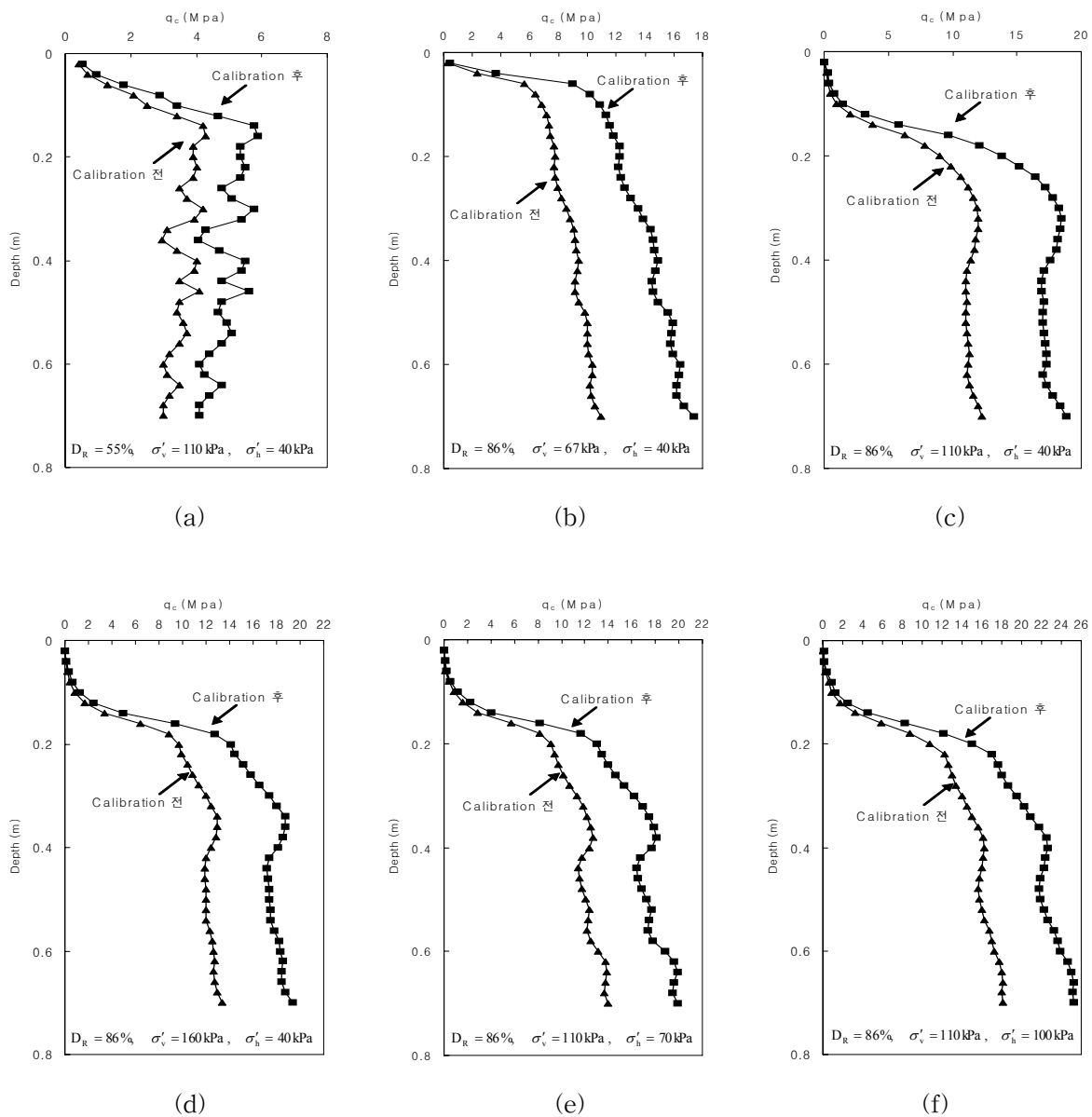
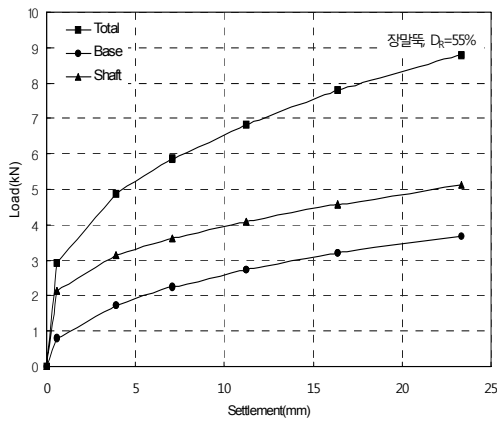


그림 3. Calibration 전, 후의 q_c 값

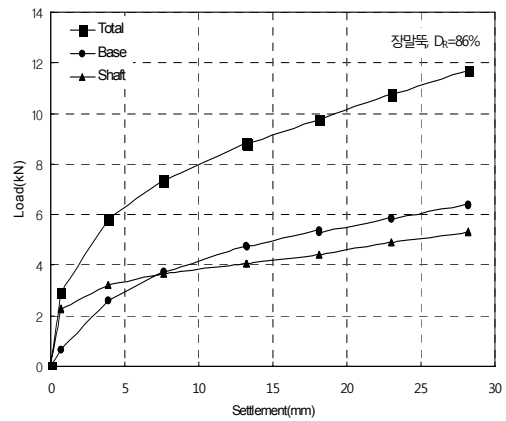
4. 지지력의 예측값과 측정값의 비교, 분석

그림 4는 실내모형시험(박영수 2006) 결과에서 측정된 하중변위곡선을 나타낸 것이다. 실내모형시험에서 수행된 시험은 상대밀도 55%조건 하에서 적용된 응력조건이 $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 시험이 1회, 상대밀도 86%조건 하에서 적용된 응력조건이 $\sigma_v=67\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 시험, $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 시험, $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=70\text{kPa}$ 인 시험, $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=100\text{kPa}$ 인 시험, $\sigma_v=160\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$ 인 시험으로 각 1회씩 5회가 수행되어 도합 6회의 시험을 본 논문에서 적용하였다.

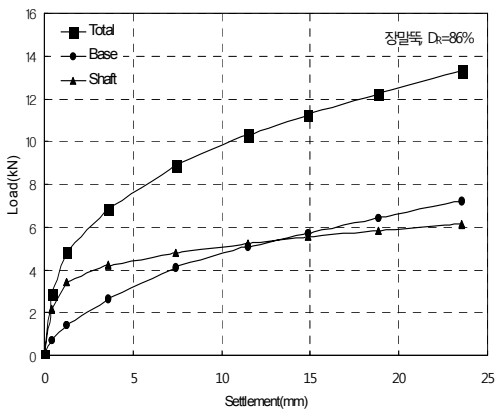
그림 5는 시험조건에 따라 적용된 극한지지력을 적용하였으며, 식 (1)과 식 (2)에 따라 제안방법에 의해 예측된 극한지지력 Q_t 값을 모형말뚝시험에서 측정된 극한지지력과 비교한 것이다. 여기서 제안방법 따른 극한지지력 Q_t 값을 $Q_{t,estimated}$ 라 하고, 시험에 의해 측정된 극한지지력 Q_t 값을 $Q_{t,measured}$ 라고 하였다. 각 지반조건에 따른 결과값은 각각의 이름으로 표기되어 있다. 표 1에서 나타나 있듯이 극한 지지력의 측정값과 예측값에 따른 비교에 대해 전반적으로 표준편차는 0.121의 값을 갖으며, 분산계수(COV : Coefficient Of Variance)는 0.04의 값을 보임을 알 수 있다.



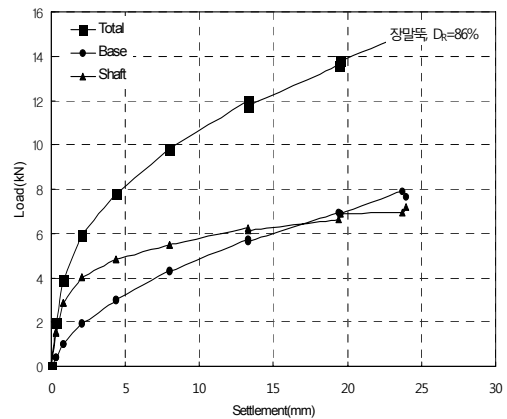
(a) $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$



(b) $\sigma_v=67\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$

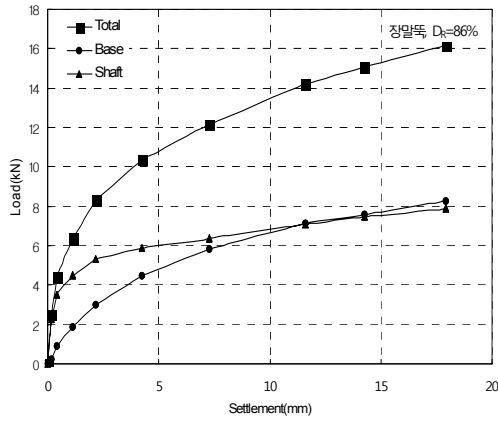


(c) $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$

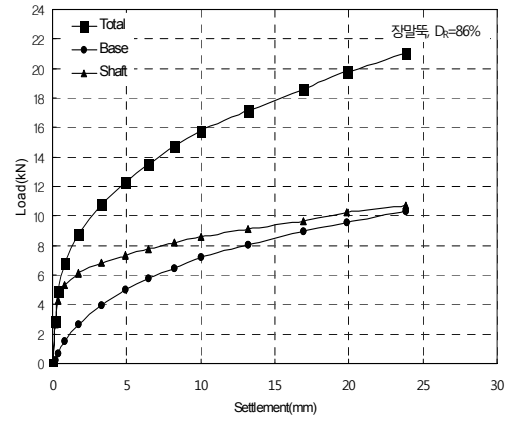


(b) $\sigma_v=160\text{kPa}$, $\sigma_h=40\text{kPa}$

그림 4. 하중변위곡선 (계속)



(c) $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=70\text{kPa}$



(b) $\sigma_v=110\text{kPa}$, $\sigma_h=100\text{kPa}$

그림 4. 하중변위곡선

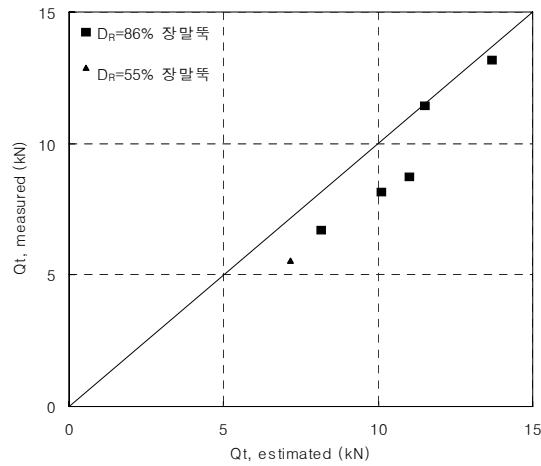


그림 5. 극한 지지력 비교

표 1. 극한지지력 비교에 따른 표준편차와 분산계수

구 분	표준편차	분산계수
장말뚝	0.121	0.04

5. 결론

본 연구에서는 콘관입치 q_c 값을 사용하여 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력을 산정하는 방법을 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안된 q_c 를 적용한 극한지지력을 실내모형시험을 수행한 결과로부터 얻은 극한지지력과 비교하여 본 연구에서 제안된 방법의 적용성을 확인하였다.

제안한 방법에 따른 극한지지력의 결과값이 실내모형시험의 극한지지력값과 비교했을 때 전반적으로 작은 표준편차와 분산계수를 보였다. 그러므로 등가변형을 이용한 테이퍼말뚝의 지지력 산정 방법은 실제적으로 유효한 극한지지력 산정방법이라 판단된다.

참고문헌

1. 백규호, 이준환, 김대홍 (2007), "모래지반에 현장타설된 테이퍼 말뚝의 연직거동 특성", 한국지반공학 회논문집, 제23권, 제8호, pp.35-45.
2. 이준환, 백규호, 김대홍, 김민기, 황성욱 (2007) "원통형 및 테이퍼말뚝의 하중-침하특성 및 CPT지지력 상관계수", 한국지반공학회논문집, 제23권, 제4호, pp.59-68.
3. 박영수 (2006), "Estimation of Load Bearing Capacity of Single Pole Foundation for Transmission Structure in Sand", 연세대학교, 석사학위논문.
4. 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.
5. Salgado, R., Mitchell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration Chamber size effects on penetration resistance in sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 124, No. 9, pp.878-888.
6. Zil'berg, S.D. and Sherstnev, A.D. (1990), "Construction of Compaction Tapered Pile Foundation", Soil Mech. and Foundation. Eng., Vol.27, No.3, pp.96-101.