

형상계수를 이용한 사질토 지반에 타설된 테이퍼말뚝의 지지력 산정

Calculation of Bearing Capacity of Tapered Drilled Shafts in Cohesionless Soils Using Shape Factor

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

이 준 환² Lee, Jun-Hwan

Abstract

Fourteen calibration chamber tests were performed using one cylindrical and two tapered piles with different taper angles to investigate the changes of the bearing capacity of tapered piles with soil state and taper angle of piles. The results of calibration chamber tests show that the ultimate base resistance of tapered piles increases with increasing mean stress and relative density of soil. It also increases with increasing taper angle for medium sand, but with decreasing taper angle for dense sand. The ultimate shaft resistance of tapered piles increases as vertical and horizontal stresses, relative density and taper angle increase. Based on the results of model pile load tests, a new design method with shape factors for estimation of the bearing capacity of tapered piles is proposed considering the effect of soil state and taper angle on bearing capacity of tapered piles. In order to check the accuracy of predictions calculated using the new method, middle-scale field pile load tests were also conducted on cylindrical and tapered drilled shafts in clayey sand. Comparison of calculated values with measured ones shows that the new design method produces satisfactory predictions for tapered piles.

요 지

지반조건과 말뚝의 테이퍼각도가 테이퍼말뚝의 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위해서 원통형말뚝과 테이퍼각도가 다른 두 개의 테이퍼말뚝을 이용해서 모형말뚝재하시험을 수행하였다. 시험결과에 따르면 지반의 평균응력과 상대 밀도가 커지면 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력은 증가하였고, 말뚝의 테이퍼각도가 커짐에 따라 느슨한 지반에서는 말뚝의 단위 선단지지력이 증가하였으나 조밀한 지반에서는 단위 선단지지력이 반대로 감소하였다. 그리고 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 수평 및 연직응력과 상대밀도, 말뚝의 테이퍼각도가 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 모형말뚝재하시험의 결과에 근거해서 형상계수를 포함한 테이퍼말뚝의 지지력 산정식을 제안하였고, 이 제안식에서는 지반조건과 테이퍼각도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향이 고려되었다. 제안한 지지력 산정식에 대한 정확도를 검증하기 위해서 점토질 모래지반에 설치된 중간규모의 원통형말뚝과 테이퍼말뚝에 대한 현장재하시험이 실시되었고, 이때 측정된 지지력이 제안식에서 얻은 예측치와 비교되었다. 그 결과 제안된 지지력 산정식은 테이퍼말뚝의 지지력을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

Keywords : Axial load capacity, Calibration chamber test, New design method, Shape factor, Tapered pile

1 정회원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Kwandong Univ., pkh@kwandong.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근에 경제발전과 함께 국민들의 환경에 대한 의식이 고취되면서 도심지 주변에서 건설공사로 인한 각종 소음과 진동에 대한 규제가 더욱 강화되었다. 그 결과 향타말뚝과 같은 배토말뚝의 사용이 제한되고 현장타설말뚝과 같은 비배토말뚝의 시공이 급증하고 있으며, 이러한 경향은 도심지일수록 더욱 분명해지고 있다. 그러나 비배토말뚝은 동일 조건하에 있는 배토말뚝에 비해 지지력이 작고 시공비가 많이 소요된다는 단점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 비배토말뚝의 단점을 해결하기 위해서 몇몇 연구자들은 말뚝의 형상변화를 통한 지지력 증대 방안에 대해서 연구하였고, 그 결과 테이퍼말뚝이 개발되어 지난 20-30년 동안 현장에서 사용되어 왔다. 특히 몇몇 시험결과들은 말뚝의 하중전이특성과 그에 필요한 말뚝의 최적단면을 고려할 때 말뚝의 두부에서 선단으로 갈수록 말뚝의 단면이 작아지는 테이퍼말뚝이 말뚝의 구조적인 안정성과 경제적인 측면에서 최적의 말뚝형태라는 연구결과를 보고하였다(Zil'berberg와 Sherstnev 1990, El Naggar와 Wei 1999, Sakr 등 2004).

원통형말뚝의 경우와 달리 현재까지 테이퍼말뚝의 연직거동에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어져 왔다. Norlund(1963)와 D'Appolonia와 Hribar(1963), Zil'berberg와 Sherstnev(1990)는 모래지반에서 테이퍼말뚝의 지지력은 평균 직경과 근입깊이가 동일한 원통형말뚝보다 크다는 현장재하시험의 결과를 보고하였고, Robinsky(1964)와 Wei와 El Naggar(1998), El Naggar와 Wei(1999), El Naggar와 Sakr(2000)는 느슨한 모래지반에 대한 가압토조와 원심모형시험을 통해서도 동일한 시험결과를 발표하였다. 또한 El Naggar와 Wei(1999), El Naggar와 Sakr(2000), Sakr 등(2004)은 모형시험을 통해서 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 말뚝의 극한주면마찰력이 증가한다는 연구결과를 얻었고, Zil'berberg와 Sherstnev (1990)는 현장에서 원통형말뚝을 테이퍼말뚝으로 대체함으로써 말뚝 지지력의 증가에 따른 시공 본수 절감으로 인해 기초공사비가 약 50% 절감되었다는 시공사례를 보고하였다.

이와 같이 테이퍼말뚝은 원통형말뚝보다 말뚝의 지지력과 시공비 측면에서 유리한 것으로 알려져 있으나 시공과정에서 어려움과 지지력 산정을 위한 합리적인 설계기준의 부재로 인해 실무에서 널리 사용되지 못하고

있는 것이 현실이다. 캐나다 기초설계기준(CFEM, Canadian Geotechnical Society 1992)에서는 테이퍼각도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향을 고려하지 않고 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 산정하고 있으며, Kodikara와 Moore(1993)는 공동확장이론에 근거해서 테이퍼말뚝의 주면마찰력을 산정하였다. 또한 El Naggar와 Sakr(2000)는 Kodikara와 Moore의 제안식에 테이퍼계수(taper effect factor)를 적용해서 테이퍼말뚝의 주면마찰력을 산정하였고, 이렇게 얻어진 계산결과는 실측치와 큰 차이를 보이지 않음을 보고하였다. 그러나 이들 지지력 산정법들은 모두 향타말뚝에 대한 것으로 비배토말뚝에는 적용이 불가능할 뿐만 아니라 몇몇 시험결과(백규호 등 2007, Sakr 등 2004)는 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력도 말뚝의 테이퍼각도에 따라 달라진다는 것을 보였음에도 불구하고 기존에 보고된 어떠한 지지력 산정법도 이러한 연구결과를 반영하지 않고 있다.

본 논문에서는 모래지반에서 지반조건과 말뚝의 테이퍼각도가 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 미치는 영향을 조사하기 위해서 원통형말뚝과 테이퍼각도가 다른 두 개의 테이퍼말뚝에 대한 모형말뚝재하시험을 가압토조에서 수행하였다. 그리고 모형시험의 결과에 근거해서 비배토 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 산정할 수 있는 형상계수를 포함한 지지력 산정식을 제안하였다. 제안식에 대한 정확도를 검증하기 위해서 점토질 모래지반에 설치된 중규모 원통형말뚝과 테이퍼말뚝에 대한 현장말뚝재하시험을 수행하였고, 제안된 지지력 산정식으로부터 얻어진 지지력 예측치를 현장시험에서 측정된 지지력과 비교하였다.

2. 모형말뚝재하시험

2.1 지반조성과 모형말뚝

모형말뚝재하시험을 위한 모형지반은 대기중에서 건조된 주문진 표준사를 이용해서 55%와 86%의 상대밀도로 조성되었다. 이 모래는 통일분류법에서 SP로 분류되는 것으로, 비중은 2.63이고 최대 및 최소간극비는 각각 0.95와 0.60이었다. 그리고 삼축압축시험으로부터 상대밀도가 55%와 86%인 지반의 최대마찰각은 35.0°와 37.5°로 측정되었다.

모형지반은 그림 1과 같이 직경이 775mm이고 높이가 1250mm인 가압토조에 낙사법(raining method)으로

구성되었다. 모형시험에서 현장타설말뚝의 거동을 재현하기 위해서 먼저 6회의 강사를 통해 60cm 높이의 모형지반을 조성한 후 가이드 프레임을 이용해서 토조의 중심부에 모형말뚝을 거치하고 말뚝의 선단과 지반간의 완전 밀착을 위해서 모형말뚝을 모형지반에 5cm 압입하였다. 그 이후 나머지 65cm 높이의 모형지반을 낙사법으로 추가 조성하였으며, 이때 모형말뚝의 최종 관입깊이는 70cm 였다. 지반조성이 완료된 후 가압토조의 바닥과 측면에 설치된 고무막에 일정 크기의 압축공기를 17시간 동안 가함으로써 모형지반을 일정한 응력상태로 압밀시켰다.

모형말뚝재하시험에는 그림 2와 같이 원통형말뚝(C)

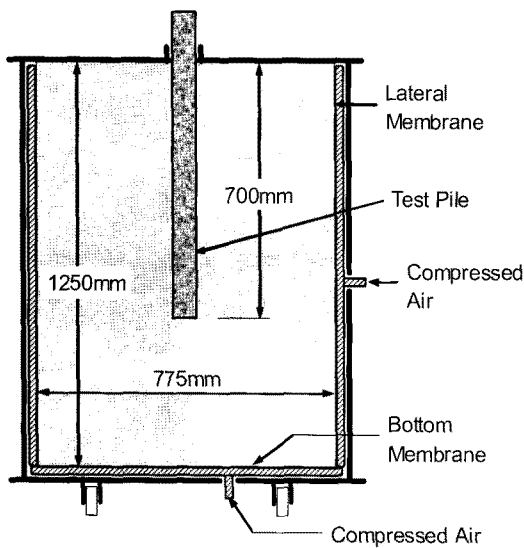


그림 1. 모형시험에 사용된 가압토조의 개략도

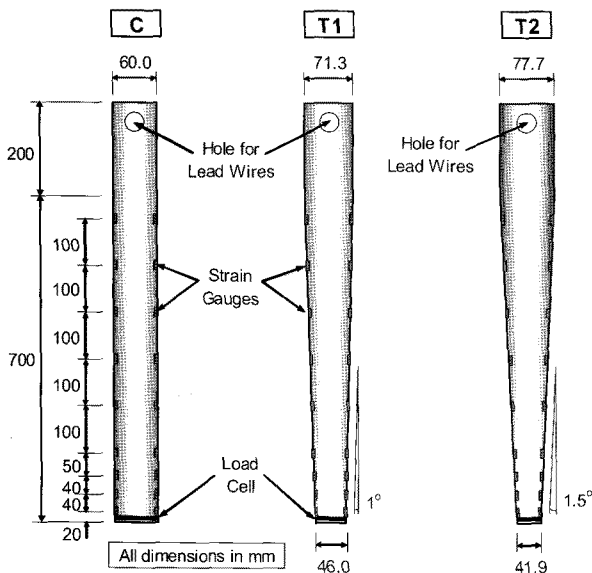


그림 2. 모형말뚝의 구조 및 제원

과 테이퍼각도가 1°와 1.5°인 테이퍼말뚝(T1과 T2)이 사용되었다. 모든 모형말뚝은 관입깊이가 700mm이고 관입된 말뚝의 평균 직경이 60mm가 되도록 세부 제원을 결정하였고, 말뚝의 선단부에는 4개의 스트레인게이지를 이용해서 자체 제작한 하중계를 설치하였다. 따라서 재하시험이 진행되는 동안 각 하중단계별 모형말뚝의 선단하중은 말뚝 선단에 부착된 하중계로부터 직접 측정하였고, 주변하중은 말뚝의 두부에 가해지는 전체 하중과 선단하중의 차이로부터 얻어졌다. 그리고 모형말뚝의 선단에 작용하는 하중이 주변으로 전달되는 것을 막기 위해서 선단하중계와 말뚝 주변간에 5mm의 틈새를 유지하였고, 이 부분은 실리콘으로 메워졌다.

2.2 시험방법

모형말뚝재하시험은 표 1과 같이 응력상태와 상대밀도가 각기 다른 6가지의 지반조건에서 모형말뚝의 종류를 바꿔가면서 총 14회를 수행하였다. 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 지지력 비교를 위해 원통형말뚝(C)과 테이퍼각도가 1.0°인 테이퍼말뚝(T1)을 이용해서 상대밀도가 86%인 지반의 응력상태를 5가지로 변화시키면서 10회의 모형시험을 수행하였다. 그리고 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 지지력 변화를 조사하기 위해서 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ 와 $\sigma'_h = 40\text{kPa}$ 로 압밀된 $D_R = 55\%$ 인 지반에서 말뚝 C와 T1에 대한 모형시험을, 그리고 테이퍼각도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위해서 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ 와 $\sigma'_h = 40\text{kPa}$ 로 압밀된 $D_R = 55\%$ 와 86%인 지반에서 테이퍼각도가 1.5°인 테이퍼말뚝(T2)에 대한 모형시험을 추가로 수행하였다.

모형말뚝재하시험은 시험말뚝의 두부 침하량이 평균 직경의 40%에 해당하는 24mm에 도달할 때까지 계속되었다. 재하시험이 수행되는 동안 말뚝의 전체지지력은 모형말뚝의 두부에 설치된 하중계에 의해서 측정되었고, 각 하중단계별 말뚝의 침하량은 말뚝 두부에 대칭으

표 1. 모형말뚝재하시험의 지반조건과 말뚝조건

상대밀도 (%)	연직응력 (kPa)	수평응력 (kPa)	Ko	시험말뚝
86	55.9	39.2	0.7	C, T1
86	98.1	39.2	0.4	C, T1, T2
86	147.1	39.2	0.27	C, T1
86	98.1	68.6	0.7	C, T1
86	98.1	98.1	1.0	C, T1
55	98.1	39.2	0.4	C, T1, T2

로 설치된 2개의 LVDT에 의해 측정되었다. 또한 재하 시험이 진행되는 동안 하중계와 LVDT, 말뚝에 부착된 스트레인게이지의 값들은 데이터로거(data logger)를 통해서 측정하였다.

3. 모형말뚝재하시험 결과

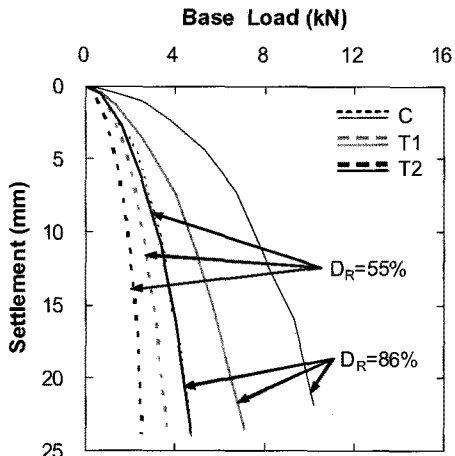
3.1 하중-침하량 곡선

그림 3은 압밀응력이 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ 과 $\sigma'_h = 40\text{kPa}$ 이고 $D_R = 55\%$ 와 86% 인 모형지반에 설치된 시험말뚝 C, T1, T2의 선단하중과 주면하중, 전체하중에 대한 하중-침하량 곡선을 보인 것이다. 그림 3(a)에서 보듯이 일정한 침하량에서 말뚝의 선단하중은 테이퍼각도가 커짐에 따라 감소하는데, 이것은 테이퍼각도에 따라 말뚝의 선단면적이 감소하기 때문으로 나타났다. 반면 그림 3(b)와 같이 말뚝의 주면하중은 테이퍼각도에 따라 증가하였다. 그리고 말뚝의 두부가 2mm가량 침하했을 때 원통형말뚝의 주면하중은 극한값에 도달한 반면 테이퍼말뚝의 주면하중은 재하시험이 종료될 때까지도 계속 증가하였다. 이것은 원통형말뚝의 주면하중은 작은 침하에도 그 값이 극한치에 도달하는 마찰력 성분으로만 구성된 반면 테이퍼말뚝은 경사진 주면에 마찰력과 함께 침하량이 커질수록 그 크기가 계속 증가하는 압축력 성분으로 구성되어 있기 때문이다.

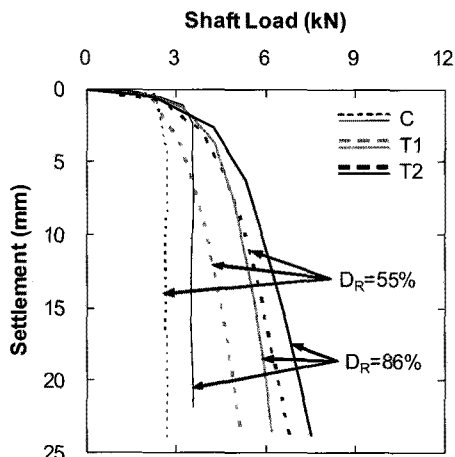
또한 그림 3(c)에서는 말뚝의 테이퍼각도에 따른 전체하중의 변화를 볼 수 있다. 느슨한 지반에서는 테이퍼각도가 커질수록 테이퍼말뚝의 전체하중이 증가하지만, 조밀한 지반에서는 테이퍼각도가 커질수록 말뚝의 전체하중이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 조밀한 지반에서는 말뚝의 전체하중에서 선단하중이 차지하는 비중이 큰 반면, 느슨한 지반에서는 전체하중에서 주면하중이 차지하는 비중이 크기 때문이다(백규호 등 2007). 이러한 시험결과는 느슨한 모래지반에서 테이퍼각도가 커질수록 테이퍼말뚝의 전체지지력이 증가한다는 Wei와 El Naggari(1998)와 Sakr 등(2004)의 시험결과와 일치하는 것이다.

3.2 단위 선단지지력과 단위 주면마찰력

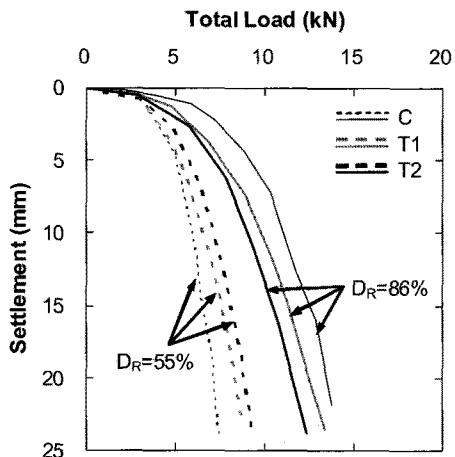
그림 4는 지반의 평균응력과 상대밀도, 말뚝의 테이퍼각도에 따른 말뚝의 단위 선단지지력 q_b 의 변화를 보인 것이다. 시험말뚝의 단위 선단지지력과 단위 주면마찰력은 말뚝이 평균 직경의 10%에 해당하는 6mm만큼 침하했을 때 말뚝에 작용하는 단위 면적당 선단하중과 주면하중으로 결정하였다. 그림 4(a)와 (b)에 따르면 말뚝 C와 T1의 단위 선단지지력은 지반의 평균응력 σ_m 이



(a) 선단하중



(b) 주면하중

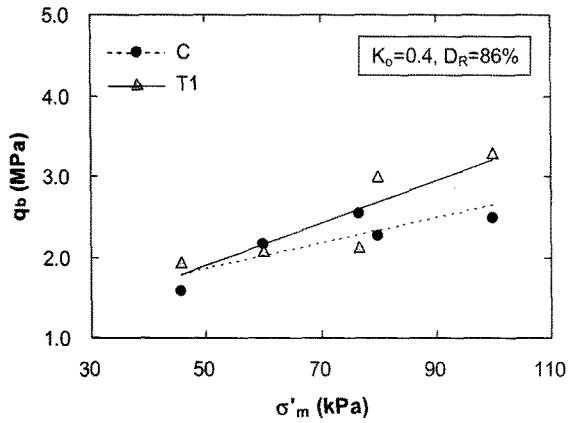


(c) 전체하중

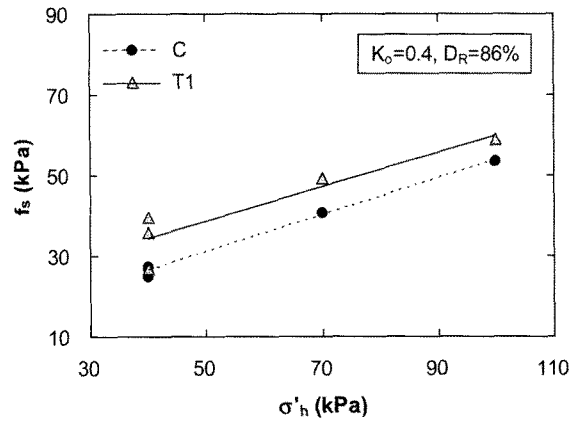
그림 3. 모형시험에서 측정된 하중-침하량 곡선

커질수록 그리고 상대밀도가 커질수록 증가하였다. 이것은 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력은 말뚝 선단에 작용하는 연직 및 수평응력 모두에 영향을 받는 것을 의미한다. 또한 지반이 느슨한 경우에는 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 단위 선단지지력이 증가하지만 조밀한 경우에는 테이퍼각도가 커질수록 단위 선단지지력이 감소하는 경향을 보였다.

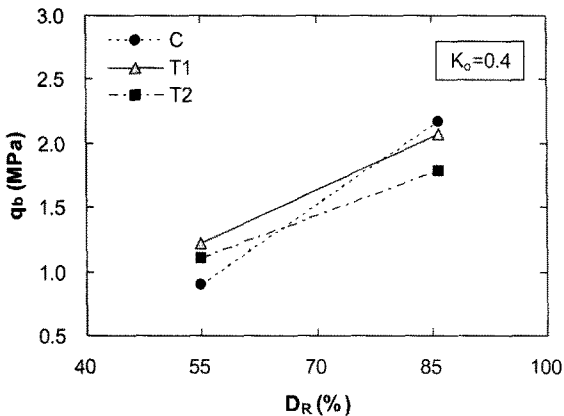
그림 5는 지반의 수평응력과 상대밀도, 말뚝의 테이퍼각도가 말뚝 C와 T1의 단위 주면마찰력 f_s 에 미치는 영향을 보인 것이다. 그림 5(a)와 (c)에서 보듯이 말뚝 C와 T1의 단위 주면마찰력은 지반의 수평응력과 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 증가하였다. 그리고 지반의 연직응력에 따른 말뚝의 단위 주면마찰력 변화는 그림 5(a)에서 $\sigma'_h = 39.2\text{kPa}$ 에 찍힌 3개의 점으로 표시되는



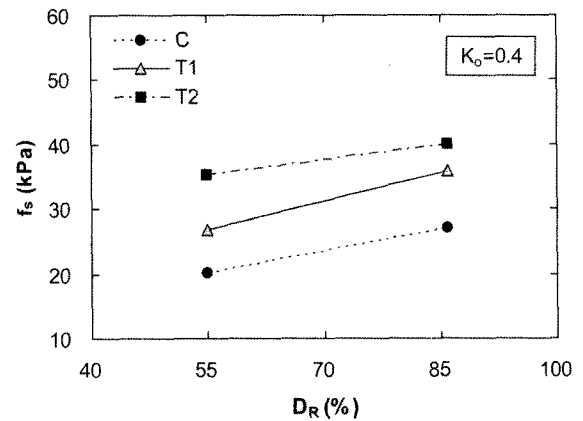
(a) 평균압밀응력



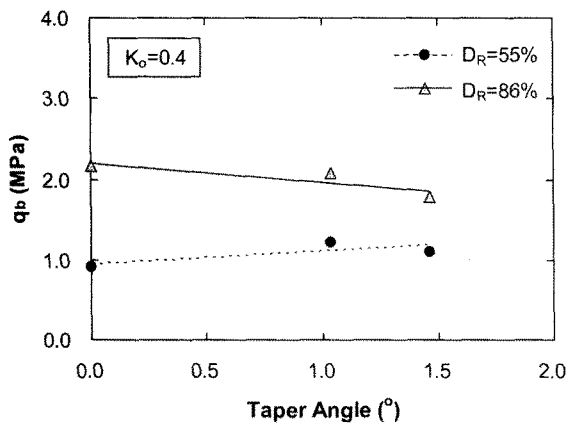
(a) 수평응력



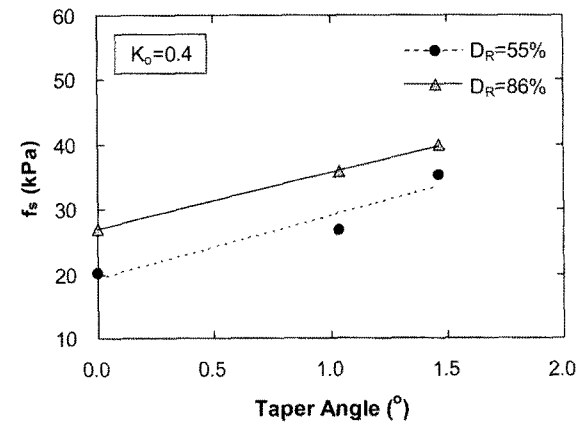
(b) 상대밀도



(b) 상대밀도



(c) 말뚝 테이퍼각도



(c) 말뚝 테이퍼각도

그림 4. 지반조건과 테이퍼각도가 단위 선단지지력에 미치는 영향

그림 5. 지반조건과 테이퍼각도가 단위 주면마찰력에 미치는 영향

테 말뚝 T1의 경우에는 이들 3개의 점이 중복되어 있지 않고 연직응력이 클수록 말뚝의 단위 주면마찰력이 상부에 위치하는 반면 말뚝 C에 대해서는 3개의 점들이 한 점에 중복되어 있다. 이것으로부터 원통형말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 연직응력과 무관하게 일정한 값을 유지하는 반면 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 연직응력이 커질수록 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5(b)와 같이 말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 상대밀도가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 테이퍼말뚝의 지지력에 대한 형상계수

모형말뚝재하시험에 사용된 모든 시험말뚝의 관입깊이와 평균 직경은 동일하므로 동일한 지반조건하에서 측정된 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 지지력이 다른 것은 말뚝의 형상이 다르기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력과 단위 주면마찰력에 대한 형상계수 SF_b 와 SF_s 를 식 (1)과 같이 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력 및 단위 주면마찰력의 비로 정의하였다.

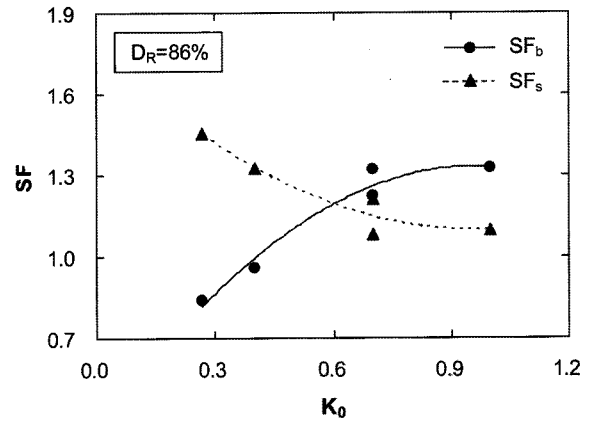
$$SF_b = \frac{q_{b,T}}{q_{b,C}} \quad (1a)$$

$$SF_s = \frac{f_{s,T}}{f_{s,C}} \quad (1b)$$

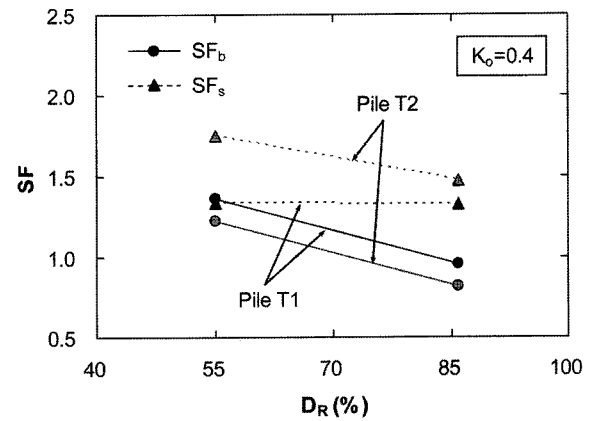
여기서 $q_{b,C}$ 와 $q_{b,T}$ 는 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력이고, $f_{s,C}$ 와 $f_{s,T}$ 는 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력이다.

그림 6은 지반의 응력상태와 말뚝의 테이퍼각도에 따른 SF_b 와 SF_s 의 변화를 보인 것이다. 그림 6(a)에 따르면 지반의 정지토압계수 K_0 가 커짐에 따라 SF_b 는 급격히 증가하다가 $K_0 > 0.8$ 에서는 SF_b 값이 일정한 값으로 수렴하였다. 반면 지반의 K_0 가 커짐에 따라 SF_s 는 급격히 감소하다 그 감소율은 지속적으로 작아져서 $K_0 > 0.8$ 에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 그림 6(b)는 지반의 상대밀도가 커질수록 SF_b 와 SF_s 가 감소하고, $D_R = 55\%$ 에서는 SF_b 가 1.0보다 크지만 $D_R = 86\%$ 에서는 SF_b 가 1.0보다 작음을 보여준다. 그러나 SF_s 는 지반의 상대밀도와 무관하게 항상 1.0보다 큰 것으로 나타났다. 또한 그림 6(c)에서 보듯이 $D_R = 55\%$ 의 경우에 SF_b 는 테이퍼각도가 커질수록 증가하지만 $D_R = 86\%$ 의 경우에

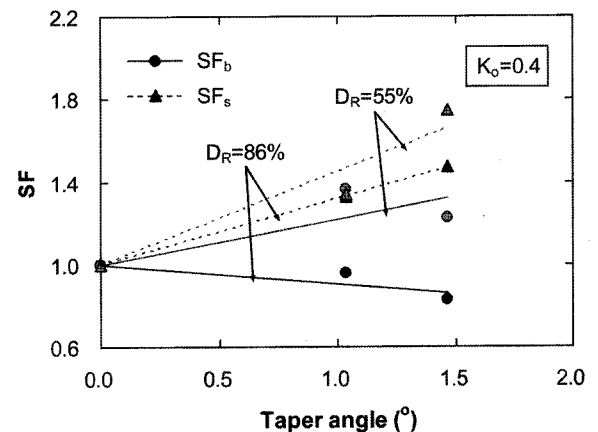
는 테이퍼각도가 커질수록 감소하였다. 그리고 SF_s 는 지반의 상대밀도와 무관하게 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 증가하였다. 따라서 이상의 시험결과에 근거할 때 테이퍼말뚝의 지지력을 정확히 산정하기 위해서는 지반조건 뿐만 아니라 말뚝의 테이퍼각도도 함께 고려해야 함을 알 수 있다.



(a) 정지토압계수



(b) 상대밀도



(c) 말뚝 테이퍼각도

그림 6. 지반조건과 테이퍼각도가 테이퍼말뚝의 형상계수에 미치는 영향

4. 형상계수를 포함한 지지력 산정식

$$A = 0.508(D_R)^{1.5} \ln(K_0) + 0.357 \quad (2)$$

4.1 선단지지력

그림 7(a)는 말뚝의 단위 선단지지력에 대한 형상계수 SF_b 와 테이퍼각도의 관계를 보인 것이고, 그림 7(b)는 지반의 상대밀도와 정지토압계수 K_0 에 따른 그림 7(a)에 보인 추세선의 기울기 A 의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 보듯이 $D_R = 86\%$ 의 경우 $K_0 \leq 0.4$ 일 때에는 테이퍼각도가 커질수록 SF_b 가 감소하지만 $K_0 \geq 0.7$ 일 때에는 테이퍼각도가 커질수록 SF_b 도 증가하였다. 그러나 $K_0 = 0.4$ 인 경우라 할지라도 $D_R = 55\%$ 일 때에는 테이퍼각도가 커질수록 SF_b 가 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 그림 7(a)에 보이는 말뚝의 테이퍼각도와 SF_b 의 관계를 $SF_b = 1 + A\alpha$ 과 같은 1차 함수로 표시할 때 그림 7(b)와 같이 추세선의 기울기 A 는 $(D_R)^{1.5} \ln(K_0)$ 와 직선 관계에 있으며, 이것은 다음과 같이 표현될 수 있는 것으로 나타났다.

여기서 D_R 은 백분율(%)로 표시된 지반의 상대밀도이다. 그리고 식 (2)를 그림 7(a)에 보이는 시험결과의 추세선 식인 $SF_b = 1 + A\alpha$ 에 대입하면 SF_b 는 식 (3)과 같이 지반의 상대밀도와 정지토압계수, 말뚝의 테이퍼각도의 함수로 표현된다.

$$SF_b = 1 + [0.508(D_R)^{1.5} \ln(K_0) + 0.357]\alpha \quad (3)$$

여기서 α 는 도($^\circ$) 단위로 표시된 말뚝의 테이퍼각도이다. 따라서 SF_b 가 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력 비로 정의되는 것을 고려하면 테이퍼말뚝의 선단지지력 $Q_{b,T}$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_{b,T} = q_{b,T} A_b = (q_{b,C} SF_b) A_b \quad (4)$$

여기서 A_b 는 테이퍼말뚝의 선단면적이다.

4.2 주면마찰력

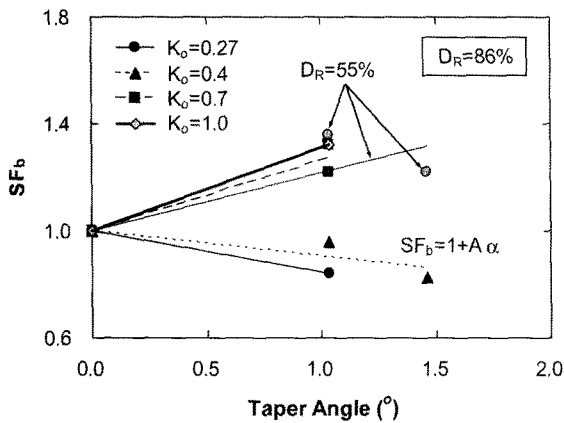
SF_b 의 경우와 마찬가지로 그림 8(a)는 말뚝의 단위 주면마찰력에 대한 형상계수 SF_s 와 테이퍼각도의 관계를 보인 것이고, 그림 8(b)는 그림 8(a)에 보이는 추세선의 기울기 B 와 지반의 상대밀도 및 정지토압계수간의 관계를 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서 보듯이 말뚝의 테이퍼각도가 커짐에 따라 SF_s 는 증가하였고, 테이퍼각도와 SF_s 의 관계는 $SF_s = 1 + B\alpha$ 의 형태로 표시될 수 있었다. 또한 그림 8(a)에 보이는 추세선의 기울기 B 는 식 (5)와 같이 지반의 상대밀도와 정지토압계수의 함수로 표현될 수 있는 것으로 나타났다(그림 8(b)).

$$B = [0.063 - 0.226 \ln(K_0)](D_R)^{-1} \quad (5)$$

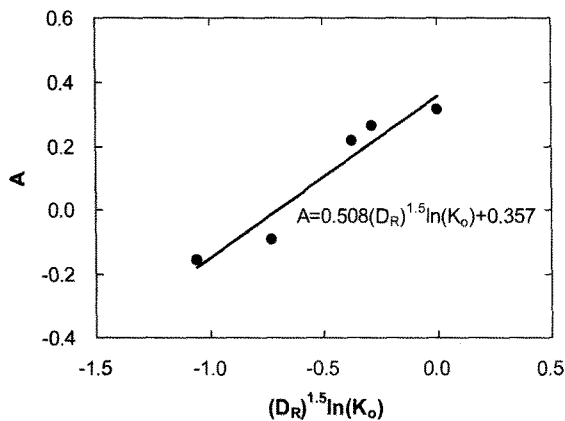
한편 식 (5)를 그림 8(a)의 추세선 식인 $SF_s = 1 + B\alpha$ 에 대입하면 식 (6)과 같이 SF_s 는 지반의 상대밀도와 정지토압계수, 말뚝의 테이퍼각도의 함수로 표현될 수 있다.

$$SF_s = 1 + [0.063 - 0.226 \ln(K_0)] \frac{\alpha}{D_R} \quad (6)$$

따라서 테이퍼말뚝에서 마찰력이 작용하는 주면면적을 A_s 라 할 때 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 다음과 같이 계

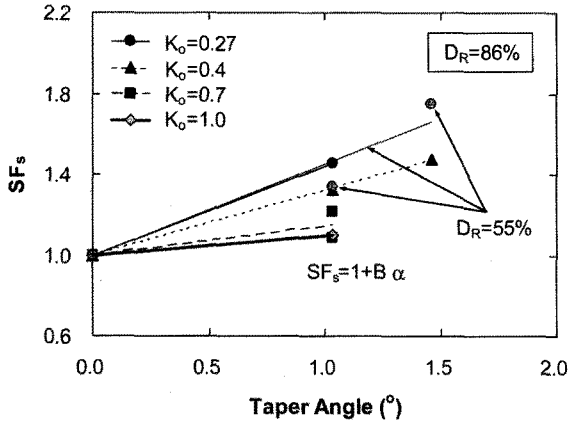


(a) 테이퍼각도에 따른 변화

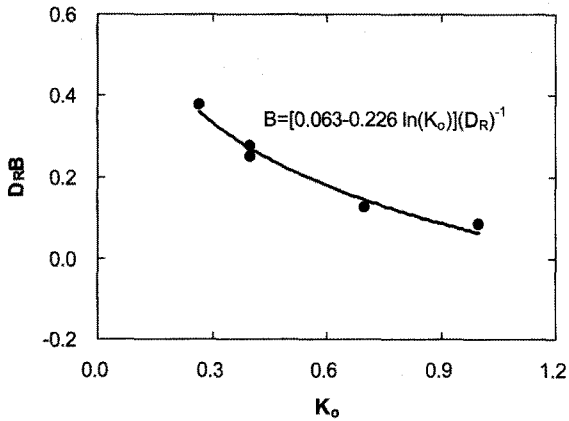


(b) 지반조건에 따른 변화

그림 7. 테이퍼각도와 지반조건에 따른 SF_b 의 변화



(a) 테이퍼각도에 따른 변화



(b) 지반조건에 따른 변화

그림 8. 테이퍼각도와 지반조건에 따른 SF_s의 변화

산될 수 있다.

$$Q_{s,T} = f_{s,T} A_s = (f_{s,C} SF_s) A_s \quad (7)$$

5. 제안식에 대한 정확도 검증

5.1 현장재하시험

본 논문에서 제안된 지지력 산정식에 대한 정확도를 검증하기 위해서 전라북도 익산에서 중규모의 원통형 말뚝과 테이퍼말뚝에 대한 현장재하시험을 수행하였다. 현장지반은 2m 두께의 실트질 점토층과 14m 두께의 점토질 모래층으로 구성되었고, 지하수위는 지표면으로부터 8m 깊이에 위치하였다. 현장에 대한 지반조사를 위해서 콘관입시험이 수행되었고, 그림 9에서 보듯이 시험말뚝의 선단과 주변부에 대한 대표 콘저항력 q_c 는 각각 5.25MPa과 4.35MPa이었다.

시험말뚝은 지표면 상부에 위치하는 2m 두께의 실트

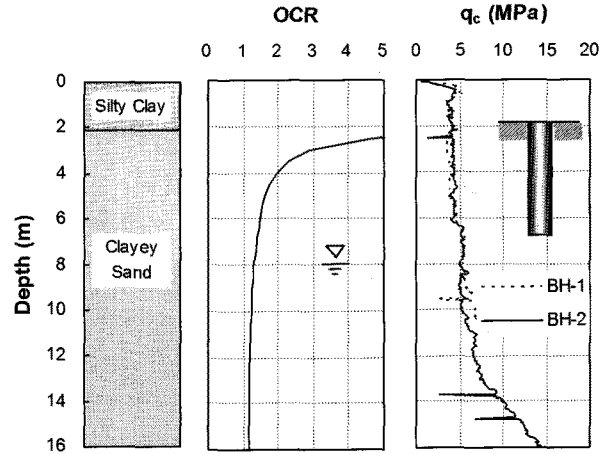


그림 9. 현장 시험부지에 대한 지반조사 결과

질 점토층을 제거한 후에 점토질 모래층에 설치되었다. 지하수위보다 위쪽에 위치하는 점토질 모래층의 전체단 위중량은 18.1 kN/m^3 이었고 비중은 2.73, 함수비는 24.9%였다. 그리고 삼축압축시험에서 측정된 점토질 모래의 최대 및 한계마찰각은 각각 35.4° 와 31.0° 였다.

한편 시험말뚝의 설치를 위해서 2m 두께의 실트질 점토층을 제거함에 따라 그 하부에 존재하는 점토질 모래층은 과압밀상태로 존재하게 되며, 이렇게 과압밀된 모래층의 정지토압계수 K_0 는 Mayne과 Kulhawy(1982)가 제안한 식 (8)로부터 계산될 수 있다.

$$K_0 = (1 - \sin \phi) \text{OCR}^{\sin \phi} \quad (8)$$

이때 실트질 점토층의 제거로 인한 말뚝 선단과 주변부에서 평균 과압밀비(OCR)는 각각 1.39와 1.78이고 식 (8)로부터 계산된 말뚝 선단과 주변부에서 점토질 모래지반의 K_0 는 각각 0.51과 0.59이었다. 또한 Salgado와 Prezzi(2007)는 CPT에서 측정된 콘관입저항을 이용해서 지반의 상대밀도를 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$D_R = \frac{\ln\left(\frac{q_c}{P_A}\right) - 0.4947 - 0.1041\phi_c - 0.841 \ln\left(\frac{\sigma_h}{P_A}\right)}{0.0264 - 0.0002\phi_c - 0.0047 \ln\left(\frac{\sigma_h}{P_A}\right)} \leq 100\% \quad (9)$$

여기서 q_c 는 CPT에서 측정된 콘관입저항이고, P_A 는 기준압력($=100 \text{ kPa}$), σ_h 는 유효수평응력, ϕ_c 는 한계상태 마찰각을 나타낸다. 따라서 식 (9)에 의하면 현장시험이 수행된 점토질 모래지반의 평균 상대밀도는 45%로 평

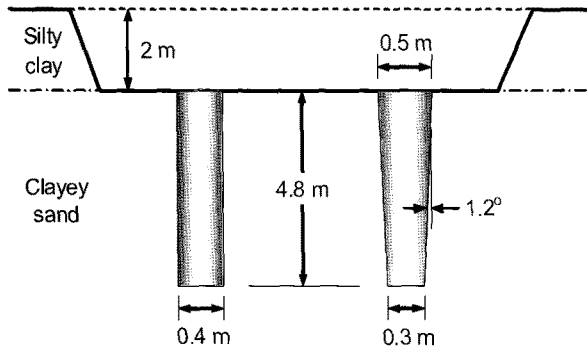


그림 10. 현장말뚝재하시험 개요도

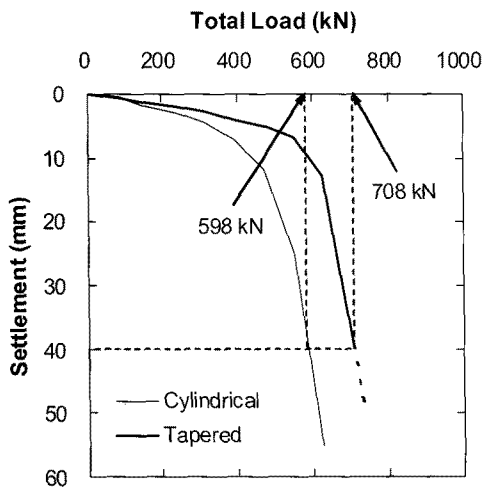


그림 11. 현장재하시험에서 측정된 전체하중-침하량 곡선

가되었다.

평균 직경이 400mm이고 길이가 4.8m인 원통형말뚝과 테이퍼말뚝으로 구성된 시험말뚝은 그림 10에서 보듯이 모래에 가까운 점토질 모래지반에 설치되었다. 시험말뚝은 케이싱이나 벤토나이트액을 사용하지 않고 오거를 이용해서 성형한 굴착공에 철근망을 삽입하고 콘크리트를 타설하는 방법으로 시공되었다. 특히 테이퍼말뚝은 테이퍼각도가 1.2°로 특수 제작된 오거를 이용하여 시공하였으며, 이렇게 시공된 테이퍼말뚝의 선단과 두부의 직경은 각각 300mm와 500mm였다. 그리고 모든 현장 시험말뚝에는 하중전이특성을 조사하기 위해 다수개의 스트레인게이지를 부착하였으나 말뚝을 설치하는 과정에서 이들의 상당수가 파손됨으로써 말뚝의 지지력을 선단지지력과 주변마찰력으로 분리해서 측정하지 못하였다. 따라서 선단지지력과 주변마찰력에 대한 개별 제안식의 정확도는 검증하지 못하였고 말뚝의 전체지지력을 이용해서 제안된 지지력 산정식에 대한 정확도를 간접적으로 검증하였다.

그림 11은 현장에 설치된 원통형말뚝과 테이퍼말뚝

에 대한 재하시험에서 얻어진 전체하중-침하량 곡선을 나타낸 것이다. 이 현장시험 결과에 말뚝의 두부가 평균 직경의 10%만큼 침하했을 때 말뚝의 두부에 가해지는 하중을 전체지지력을 간주하는 파괴기준을 적용하였다. 그 결과 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 전체지지력은 각각 598kN과 708kN으로 결정되었다. 그리고 현장에 설치된 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력과 단위 주변마찰력에 대한 형상계수 SF_b 와 SF_s 는 식 (3)과 (6)으로부터 각각 1.30과 1.48로 계산되었다.

5.2 제안식을 이용한 지지력 산정

제안된 지지력 산정식을 이용해서 테이퍼말뚝의 지지력을 계산하기 위해서는 식 (4)와 (7)에서 알 수 있듯이 먼저 동일 조건하에서 원통형말뚝의 단위 선단지지력과 단위 주변마찰력을 계산해야만 한다. 따라서 현장 재하시험과 동일한 조건하에 있는 원통형말뚝의 지지력은 Bustamante와 Gianeselli(1982)가 제안한 LCPC방법으로부터 산정하였으며, CPT결과를 이용한 지지력 산정식은 일반적인 형태는 다음과 같이 표시된다.

$$q_{b,C} = c_b q_{cb} \quad (10a)$$

$$f_{si,C} = c_{si} q_{ci} \quad (10b)$$

여기서 c_b 와 c_{si} 는 CPT에서 측정된 q_c 를 단위 선단지지력과 i 번째 층에서 단위 주변마찰력으로 전환시켜주는 계수이고, q_{cb} 와 q_{ci} 는 말뚝 선단부와 i 번째 층에 대한 대표 q_c 값이다.

Bustamante와 Gianeselli(1982)는 지반조건과 말뚝의 설치방법에 따라 각기 다른 값의 c_b 와 c_{si} 를 제안하였고, 보통 다짐도의 점토질 모래지반에 설치된 현장타설말뚝에 대한 c_b 와 c_{si} 는 각각 0.375와 0.0143이었다. 따라서 식 (10)과 식 (4)와 (7)로부터 계산된 원통형말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 각각 247.4kN과 374.8kN이었고, 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 각각 181.2kN과 556.1kN이었다. 그 결과 제안식으로부터 산정된 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 전체지지력은 각각 622.2kN과 737.3kN으로 두 경우 모두 현장 측정치보다 약 4% 컸으며 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 전체지지력 비는 1.18로 현장시험에서 측정된 두 시험말뚝의 전체지지력 비와 동일하였다. 따라서 기존의 지지력 산정식 중에서 원통형말뚝의 단위 선단지지력과 단위 주변마찰

력을 정확하게 계산할 수 있는 산정식을 제안식에서 $q_{b,c}$ 와 $f_{s,c}$ 로 이용한다면 테이퍼말뚝의 지지력을 비교적 정확히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

6. 결론

지반조건과 말뚝의 테이퍼각도가 테이퍼말뚝의 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위해서 원통형말뚝과 테이퍼각도가 다른 두 개의 테이퍼말뚝을 이용한 모형말뚝재하시험을 가압토조에서 수행하였다. 모형시험의 결과에 따르면 느슨한 모래지반에서는 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 전체지지력이 증가하지만 조밀한 지반에서는 테이퍼각도가 커질수록 전체지지력이 감소하는 것으로 나타났다. 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력은 지반의 상대밀도와 평균응력이 커질수록 증가하는 경향을 보였고, 지반이 느슨할 때에는 테이퍼각도가 커짐에 따라 증가하는 반면 지반이 조밀할 때에는 반대로 감소하였다. 또한 테이퍼말뚝의 단위 주변마찰력은 지반의 연직 및 수평응력과 상대밀도, 말뚝의 테이퍼각도가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

또한 모형말뚝재하시험의 결과에 근거해서 원통형말뚝 뿐만 아니라 테이퍼말뚝의 지지력도 산정할 수 있는 새로운 지지력 산정식을 제안하였다. 이 제안식에서는 형상계수를 도입함으로써 지반조건 뿐만 아니라 말뚝의 테이퍼각도가 지지력에 미치는 영향도 고려하였다. 새롭게 제안된 지지력 산정식에 대한 정확도 검증을 위해서 점토질 모래지반에서 중규모의 현장재하시험을 수행하였고, 현장시험에서 측정된 지지력을 제안식에서 얻어진 예측치와 비교하였다. 그 결과 기존의 지지력 산정식 중에서 원통형말뚝의 지지력을 정확하게 산정할 수 있는 산정식을 형상계수를 고려한 새로운 지지력 산정식에 사용한다면 테이퍼말뚝의 지지력은 비교적 정확히 예측될 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 1회의 현장시험 결과만을 이용해서 제안된 지지력 산정식의 정확도를 검증하였기 때문에 본 연구결과를 일반 설계에 적용하기 위해서는 보다 다양한 조건에서 수행한 현장시험 결과들을 이용해서 제안식의 정

확도를 검증하는 작업이 추가로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. 백규호, 이준환, 김대홍 (2007), “모래지반에서 비배토 테이퍼말뚝의 연직거동 특성”, *한국지반공학회논문집*, 제23권, 제8호, pp. 35-45.
2. Bustamante, M., and Gianeselli, L. (1982), “Pile Bearing Capacity Prediction by Means of Static Penetrometer CPT”, *Proc. 2nd European Sym. on Penetration Testing*, Vol.2, pp.493-500.
3. Canadian Geotechnical Society (1992), *Canadian Foundation Engineering Manual*, 3rd Ed., pp.283-289.
4. D'Appolonia, E. and Hribar, J. A. (1963), “Load Transfer in Step-Tapered Piles”, *J. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE*, Vol.89, No.SM3, pp.1-34.
5. El Naggar, M. H. and Wei, J. Q. (1999), “Axial Capacity of Tapered Piles Established from Model Tests”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.36, No.6, pp.1185-1194.
6. El Naggar, M. H. and Sakr, M. (2000), “Evaluation of Axial Performance of Taper Piles from Centrifuge Tests”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.37, No.6, pp.1295-1308.
7. Kodikara, K. K. and Moore, I. D. (1993), “Axial Response of Tapered Piles in Cohesive Frictional Ground”, *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol.119, No.4, pp.675-693.
8. Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982), “Ko-OCR Relationships in Soil”, *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol.108, No.6, pp.851-872.
9. McCarthy, D. F. (1998), *Essentials of Soil Mechanics and Foundations*, 5th Ed., Prentice-Hall.
10. Norlund, R. L. (1963), “Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soils”, *J. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE*, Vol.89, No.SM3, pp.1-34.
11. Robinsky, E.I., Sagar, W.L. and Morrison, C.F. (1964), “Effect of Shape and Volume on the Capacity of Model Piles in Sand”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.1, pp.189-204.
12. Sakr, K., El Naggar, M. H. and Nehdi, M. (2004), “Load Transfer of FRP Composite Tapered Piles in Dense Sand”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.41, No.1, pp.70-88.
13. Salgado, R. and Prezzi, M. (2007), “Computation on Cavity Expansion Pressure and Penetration Resistance in Sands”, *Int. J. of Geomechanics*, Vol.7, No.4, pp.251-265.
14. Wei, J. and El Naggar, M. H. (1998), “Experimental Study of Axial Behavior of Tapered Piles”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.35, No.4, pp.641-654.
15. Zil'berberg, S. D. and Sherstnev, A. D. (1990), “Construction of Compaction Tapered Pile Foundation”, *Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol.27, No.3, pp.96-101.

(접수일자 2008. 5. 6, 심사완료일 2008. 12. 9)