한국지반공학회논문집 제23권 8호 2007년 8월 pp. 69 ~ 76

모래지반에서 테이퍼 각도가 테이퍼말뚝의 연직거동에 미치는 영향

Influence of Taper Angle on Axial Behavior of Tapered Piles in Sand

백 규 호[1] Paik, Kyu-Ho
이 준 환[2] Lee, Jun-Hwan
김 대 홍[3] Kim, Dae-Hong

Abstract

Axial behavior of tapered piles is affected by taper angle, stress state of soils, soil frictional angle and pile-soil interface friction angle. In this paper, a series of model pile load tests were performed using a calibration chamber in order to investigate the effect of taper angle on the axial response of cast-in-place tapered piles in sand. According to results of the tests, as taper angle of piles increased, the shaft load capacity of piles increased but its base load capacity decreased. The unit base load capacity of piles increased with increasing taper angle for medium sand but decreased for dense sand. The ratio of shaft to total load capacity increased with increasing taper angle and with decreasing relative density of soils. The test results also showed that total load capacity per unit pile volume increased with increasing taper angle for medium sand, but it decreased for dense sand. Therefore, it can be stated that tapered piles are economically more beneficial for medium sand than for dense sand.

요 지

테이퍼말뚝의 연직거동은 지반의 응력상태와 내부마찰각, 말뚝의 벽면마찰각, 말뚝의 테이퍼 각도에 영향을 받는다. 본 논문에서는 테이퍼 각도가 말뚝의 연직거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조를 이용한 모형말뚝시험을 실시하였다. 시험결과에 따르면 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 주면마찰력은 커지고 선단지지력은 감소하였으나, 단위 선단지지력의 경우 보통 상대밀도의 지반에서는 말뚝의 테이퍼 각도에 비례해서 증가하였으나 조밀한 지반에서는 테이퍼 각도에 따라 감소하였다. 그리고 말뚝의 전체지지력에 대한 주면마찰력의 비율은 테이퍼 각도가 커짐에 따라 그리고 지반의 상대밀도가 작아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 말뚝의 단위 체적당 전체지지력은 지반이 느슨할 때는 테이퍼 각도에 따라 증가했지만 조밀한 지반에서는 테이퍼 각도에 따라 감소하였다. 따라서 테이퍼말뚝은 조밀한 지반보다는 느슨한 지반에서 더 경제성이 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Axial response, Calibration chamber test, Taper angle, Tapered pile

1. 서 론

말뚝은 구조물의 자중과 구조물에 작용하는 하중을 지반의 지지층에 전달하는 역할을 하는 것으로, 구조적인 특성상 두부에 가장 큰 하중이 가해지고 말뚝의 선단에 가까워질수록 말뚝을 통해서 전달되는 하중의 크

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.)
3 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Electric Power Research Institute)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

기는 작아진다. 이러한 말뚝의 하중전이특성을 고려할 때 두부에서 단면이 크고 선단으로 갈수록 단면이 작아지는 테이퍼말뚝이 말뚝의 구조적인 안정성과 경제성 측면에서 우수한 것으로 평가되고 있다(El Naggar와 Wei 1999, Zil'berberg와 Sherstnev 1990). 이처럼 테이퍼말뚝은 여러가지 측면에서 많은 장점을 갖고 있으나 테이퍼형말뚝의 지지력과 거동 특성에 대한 연구의 부족과 합리적인 설계기준의 부재로 인하여 테이퍼말뚝이 현장에 적용된 사례는 매우 제한적인 실정이다.

현재까지 수행된 테이퍼말뚝에 관한 연구의 대부분은 대형 토조나 원심모형시험기를 이용한 모형시험이나 실대형 현장시험을 통해서 이루어져 왔다. Norlund(1963)와 D'Appolonia와 Hribar(1963), Zil'berberg와 Sherstnev (1990)은 현장시험을 통해서 사질토 지반에 설치된 테이퍼말뚝은 원통형말뚝보다 큰 지지력을 갖고, 말뚝에 가해지는 하중의 상당부분이 주면마찰력에 의해 지지됨을 보고하였다. 그리고 Robinsky 등(1964)과 Wei와 El Naggar(1998), El Naggar와 Wei(1999), El Naggar와 Sakr(2000)는 이와 동일한 결과가 느슨한 모래지반에 매입된 테이퍼말뚝에도 적용됨을 모형시험을 통해서 규명하였다. 특히 El Naggar와 Wei(1999)와 El Naggar와 Sakr(2000)는 느슨한 모래지반에 매입된 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력이 테이퍼 각도가 커질수록 증가함을 보고하였고, Sakr 등(2004)의 연구결과에 따르면 조밀한 모래에 타입된 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력도 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 테이퍼 각도에 따른 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력 증가는 말뚝 관입 시 말뚝 주변지반이 방사방향으로 밀림에 의해 지반의 내부마찰각이 증가하거나 구속응력이 증가하기 때문으로 보고되고 있다(Norlund 1963, Ladanyi와 Guichaoua 1985, Sakr 등 2004). 그러나 이러한 연구결과의 대부분은 테이퍼말뚝이 느슨한 모래지반에 매입되거나 조밀한 모래지반에 타입된 경우에 대한 것들로, 현재까지 다양한 상대밀도를 갖는 모래지반에 매입되거나 타입되었을 때 테이퍼 각도가 말뚝의 거동에 미치는 영향에 관한 연구는 진행되지 못하였다.

본 연구에서는 말뚝의 테이퍼 각도가 모래지반에 매입된 비배토 테이퍼말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조를 이용한 모형말뚝시험을 수행하였으며, 모형시험은 상대밀도가 55%와 86%인 모형지반에서 진행되었다. 특히 테이퍼말뚝의 주면마찰력과 선단지지력은 테이퍼 각도에 따라 크게 달라진다는 기존의 연구결과를 고려해서 시험에 사용된 모든 모형말뚝은 전체지지력을 선단지지력과 주면마찰력으로 분리해서 측정할 수 있도록 제작하였다. 이러한 방법으로 수행된 모형말뚝시험의 결과에 근거해서 말뚝의 테이퍼 각도가 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 미치는 영향, 즉 테이퍼 효과와 함께 모래지반의 상대밀도에 따른 테이퍼 효과의 변화 등이 조사되었다.

2. 실내모형시험

2.1 시험말뚝

모형말뚝시험에서는 말뚝의 테이퍼 각도가 테이퍼말뚝의 연직 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 원통형말뚝과 함께 테이퍼 각도가 다른 두개의 테이퍼말뚝이 사용되었으며, 모든 시험말뚝은 지반에 매입되는 부분의 체적이 동일하도록 하였다. 그 결과 원통형말뚝의 직경은 60mm로 하였고 테이퍼 각도가 각각 1°와 1.5°인 테이퍼말뚝(T1과 T2)의 평균직경은 각각 58.7mm와 59.8mm로 결정되었다. 시험말뚝의 전체 길이는 900mm였고, 테이퍼말뚝은 지반에 매입되는 선단부 700mm에 대해서만 테이퍼 형태로 가공되었다. 모형시험에 사용된 3종류의 시험말뚝에 대한 제원은 표 1과 같다. 그리고 재하시험이 진행되는 동안 말뚝의 하중전이분포를 측정하기 위해서 지반에 매입되는 700mm 부분의 말뚝에 대해서는 말뚝의 길이방향으로 9개 위치에 총 18개의 스트레인게이지를 대칭으로 부착하였다.

한편, El Naggar와 Sakr(2000)와 Sakr 등(2004), 백규

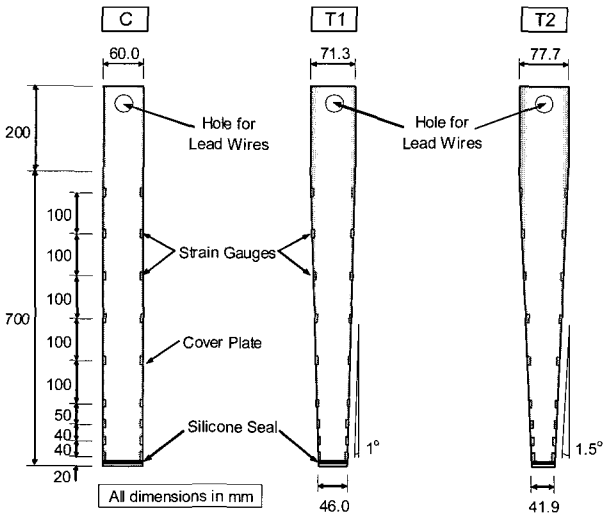


그림 1. 모형말뚝의 구조와 재원

표 1. 모형말뚝의 치수

말뚝명	직경(mm)			테이퍼 각도(°)	지반에 매입된 길이 (mm)	지반에 매입된 체적 (cm^3)
	선단	지표면	평균			
C	60.0	60.0	60.0	0	700	1319.5
T1	46.0	71.3	58.7	1.0	700	1289.8
T2	41.9	77.7	59.8	1.5	700	1315.1

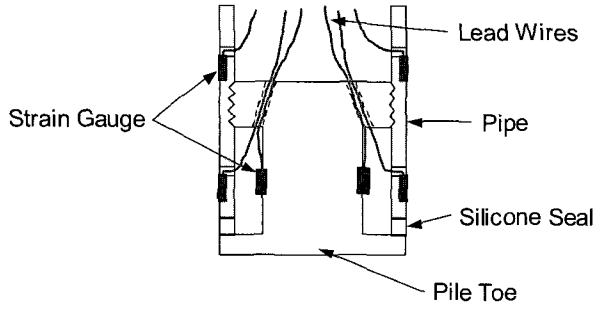


그림 2. 말뚝 선단부 상세도

호 등(2007)의 연구결과에 따르면 테이퍼말뚝의 경우 전체지지력에서 선단지지력과 주면마찰력이 차지하는 비율이 현장에서 일반적으로 사용하는 원통형말뚝의 경우와 크게 다른 것으로 나타났다. 따라서 테이퍼말뚝의 지지력 특성을 정확히 규명하기 위해서는 말뚝의 전체지지력을 선단지지력과 주면마찰력으로 분리해서 측정하는 것이 필요하다. 이를 위해 모형시험에 사용된 모든 시험말뚝의 선단부에 그림 2와 같이 직경이 작은 원형 강봉에 4개의 스트레인게이지를 대칭으로 부착해서 제작한 하중계(load cell)를 설치함으로써 재하시험 중에 말뚝의 선단지지력을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 말뚝의 선단에 작용하는 하중이 주면마찰력으로 전이되는 것을 방지하기 위해서 하중계와 말뚝 본체 간에 3mm의 간격을 두었고, 이 부분은 실리콘으로 채워졌다.

2.2 모형지반 조성

모형지반은 대기중에서 건조된 주문진 표준사를 이용해서 그림 3과 같이 직경이 775mm이고 높이가 1250mm인 가압토조에 조성되었다. 지반조성에 사용된 주문진 표준사는 비중(G_s)이 2.63이고 최대 및 최소간극비가 각각 0.948과 0.596이었으며, 균등계수와 곡률계수는 각각 1.24와 0.97으로 측정되었다. 그리고 통일분류법에 의해서는 SP로 분류되었다.

모형지반은 낙사법(raining method)에 의해 상대밀도

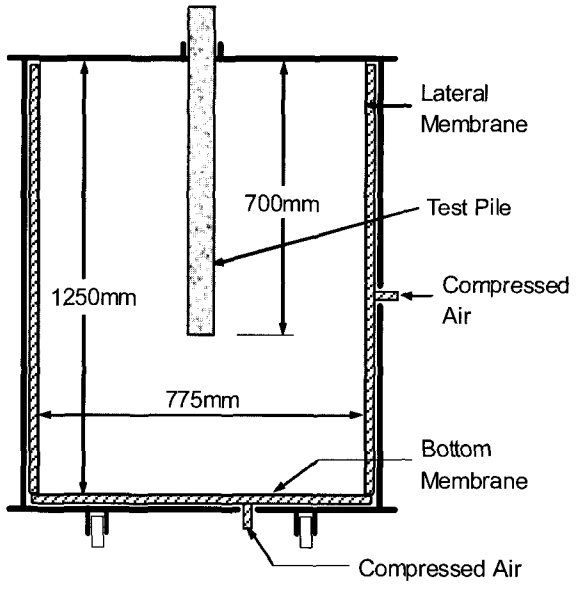


그림 3. 가압토조의 형상과 재원

가 55%와 86%인 상태로 조성되었으며, 1회에 10cm씩 총 13회에 걸쳐 조성을 완료하였다. 모형지반이 60cm만큼 조성되었을 때 시험말뚝이 토조의 중앙부에 거치되었으며, 이때 말뚝 선단부가 모형지반과 완전히 밀착되도록 하기 위해서 시험말뚝을 모형지반에 5cm정도 압입시켰다. 그 후 나머지 65cm 높이의 모형지반을 이전과 동일한 방법으로 조성하였으며, 지반조성이 완료되었을 때 시험말뚝의 최종 관입깊이는 70cm였다. 지반조성이 완료된 후 가압토조의 바닥과 측면에 설치된 고무막(membrane)에 압축공기를 17시간 동안 가해서 모형지반을 소정의 응력상태로 압밀시켰다.

2.3 시험방법

모형말뚝시험은 표 2와 같이 지반의 연직응력과 수평응력이 98.1kPa과 39.2kPa이고 상대밀도가 55%와 86%인 2가지 지반조건에서 원통형말뚝(C)과 테이퍼 각도가 1°와 1.5°인 2개의 테이퍼말뚝(T1과 T2)을 이용해서 6회를 수행하였다. 표에 보이는 시험명에서 첫번째 문자인 M과 H는 모형지반의 상대밀도를 의미하는 것으로 각각

표 2. 지반조건과 시험말뚝의 종류

시험명	상대밀도(%)	연직응력(kPa)	수평응력(kPa)	Ko	시험말뚝
MML	55	98.1	39.2	0.4	C, T1, T2
HML	86	98.1	39.2	0.4	C, T1, T2

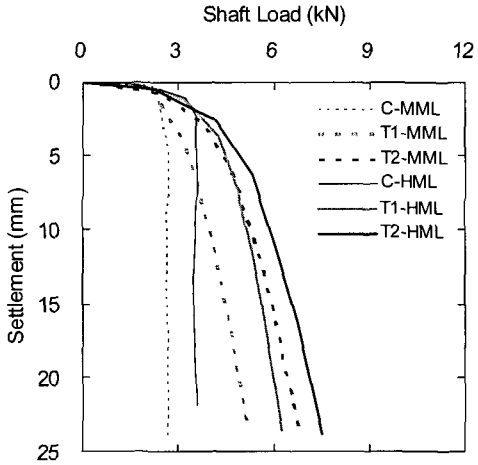
D_R=55%와 86%를 나타내고, 두번째와 세번째 문자는 모형지반에 가해진 연직응력과 수평응력의 수준을 의미하는 것으로 M은 σ_{vo}=98.1kPa을 L은 σ_{ho}=39.2kPa을 나타낸다.

시험말뚝에 대한 연직재하시험은 말뚝의 두부가 평균직경의 약 40%에 해당하는 24mm내외로 침하될 때까지 진행되었다. 재하시험이 진행되는 동안 말뚝의 전체지지력은 시험말뚝의 두부에 설치된 하중계(load cell)에 의해 측정되었고, 말뚝의 하중 단계별 침하량은 시험말뚝의 두부에 대칭으로 설치된 2개의 LVDT에 의해 측정되었다. 말뚝의 선단지지력은 말뚝 선단에 부착된 하중계에 의해 직접 측정되었고, 말뚝의 주면마찰력은 전체지지력과 선단지지력의 차이로 계산되었다. 그리고 시험말뚝에 부착된 스트레인게이지를 포함해서 모형시험에 사용된 모든 계측기들은 재하시험 직전에 초기화되었으며, 모든 결과는 데이터로거(data logger)를 이용해서 얻어졌다.

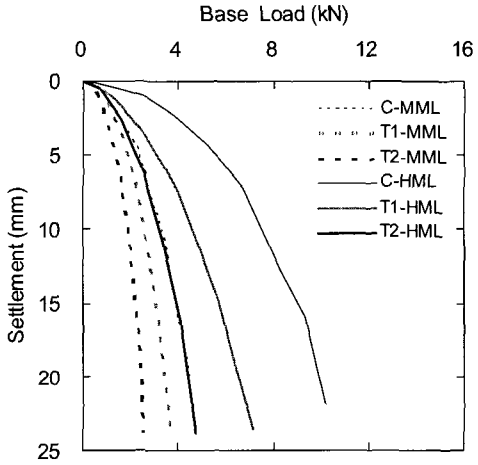
3. 시험결과 및 분석

3.1 하중-침하 곡선

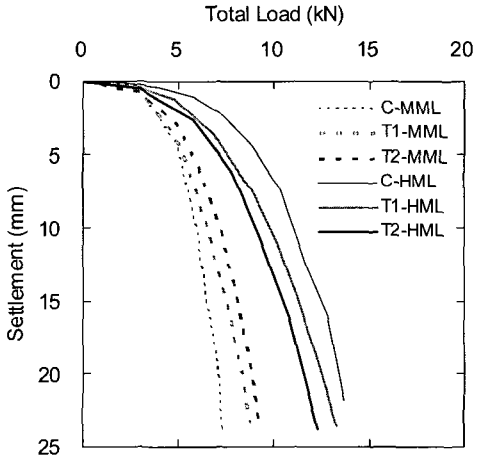
그림 4는 연직응력과 수평응력이 각각 98.1kPa과 39.2kPa이고 상대밀도가 55%와 86%인 지반에서 테이퍼 각도가 말뚝의 하중-침하 거동에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림의 범례에 사용된 4개의 문자 중 첫번째는 말뚝의 종류(C: 원통형말뚝, T1: 테이퍼 각도가 1°인 테이퍼말뚝, T2: 테이퍼 각도가 1.5°인 테이퍼말뚝)를, 그리고 데시(-) 이후에 사용된 세 개의 문자는 모형지반의 상대밀도와 응력상태를 나타낸다(2.3절 참조). 그림 4(a)에서 보듯이 원통형말뚝은 직경의 4%만큼 침하했을 때 주면마찰력이 극한상태에 도달함으로써 말뚝의 침하량에 대한 지지력 증가율로 정의되는 주면마찰력의 강성도(stiffness)는 0이었다. 반면 테이퍼말뚝은 말뚝이 평균직경의 40%에 해당하는 만큼 침하했을 때에도 주면마찰력의 강성도가 0보다 컸으며, 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 주면마찰력의 강성도는 증가하는 것



(a) 주면마찰력



(b) 선단지지력



(c) 전체지지력

그림 4. 테이퍼 각도에 따른 말뚝의 하중-침하량 변화

으로 나타났다. 이러한 말뚝의 형태별 주면마찰력의 거동 차이는 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 지지력 메커니즘 차이로 설명될 수 있다. 즉 원통형말뚝의 주면마찰력은 순수하게 마찰력 성분으로만 구성된 반면 테이퍼말뚝은 경사진 주면의 연직성분에 작용하는 마찰력 성분과 수평성분에 작용하는 압축지지력 성분으로 주면마찰력이 구성되기 때문이다. 그리고 테이퍼 각도가 커질수록 테이퍼말뚝의 주면마찰력에서 압축지지력 성분이 차지하는 비율이 높아지기 때문에 주면마찰력의 하중-침하 거동이 일반적인 원통형말뚝의 주면마찰력에 대한 거동보다는 선단지지력의 거동에 더 가까워지는 것으로 판단된다.

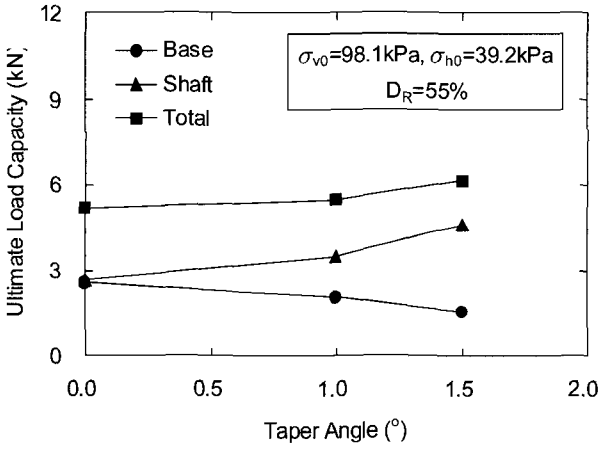
테이퍼말뚝의 선단지지력에 대한 강성도는 그림 4(b)와 같이 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 감소하였고, 이러한 경향은 지반의 상대밀도가 커질수록 더욱 분명하게 나타났다. 이러한 시험결과는 말뚝의 체적과 관입깊이가 일정할 때 테이퍼 각도가 커짐에 따라 말뚝의 선단면적이 감소하고, 백규호 등(2007)의 연구결과와 같이 지반의 상대밀도가 커질수록 전체지지력에서 선단지지력이 차지하는 비중이 커지기 때문으로 생각된다.

한편, 기존의 연구결과(Wei와 El Naggar 1998, Sakr 등 2004)에 따르면 느슨한 지반에 매입되거나 조밀한 지반에 타입된 테이퍼말뚝의 경우 전체지지력의 강성도는 동일조건의 원통형말뚝보다 크고, 이러한 경향은 말뚝의 테이퍼 각도가 커짐에 따라 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다. 그러나 본 모형시험의 결과에 따르면 테이퍼 각도가 테이퍼말뚝의 전체지지력에 대한 강성도에 미치는 영향은 지반의 상대밀도에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 그림 4(c)에서 보듯이 D_R=55%인 지반에서 테이퍼말뚝의 전체지지력에 대한 강성도는 원통형말뚝보다 클 뿐만 아니라 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 전체지지력에 대한 강성도도 커지는 경향을 보였다. 그러나 D_R=86%의 지반에서는 테이퍼말뚝의 전체지지력에 대한 강성도가 원통형말뚝보다 작았으며, 테이퍼 각도가 커질수록 전체지지력에 대한 강성도 또한 감소하는 것으로 나타났다

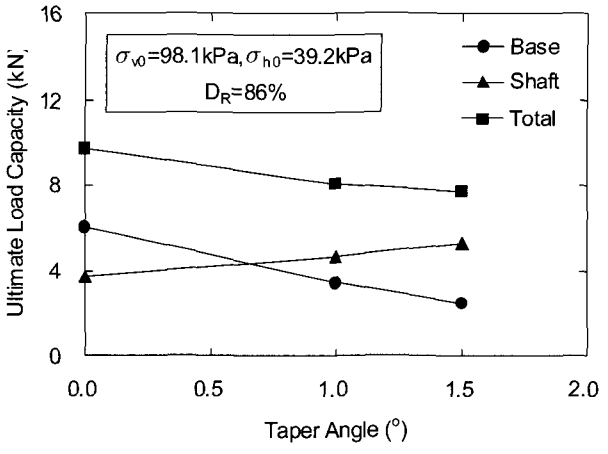
3.2 극한지지력

모형말뚝에 대한 정재하시험의 결과로부터 말뚝의 극한지지력을 결정하기 위해서 본 연구에서는 말뚝의 두부가 평균직경의 10%에 해당하는 만큼 침하했을 때를 극한상태로 간주하는 파괴기준을 사용하였다. 따라서 원통형말뚝은 두부가 6mm만큼 침하했을 때 그리고 테이퍼말뚝 T1과 T2는 말뚝의 두부가 각각 5.87mm와 5.98mm만큼 침하했을 때 말뚝의 각 부분에 작용하는 하중을 극한지지력으로 하였다.

그림 5는 지반의 상대밀도별로 테이퍼 각도에 따른 말뚝의 지지력 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 말뚝의 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 무관하게 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 증가하지만 선단지지력은 테이퍼 각도에 따른 선단면적의 감소로 인해 선단지지력이 감소하는 경향을 보였다. 반면 전체지지력의 경우 D_R=55%의 지반에서는 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 증가하지만 D_R=86%의 지반에서는 D_R=55%일 때와는 달리 말뚝의 테이퍼 각도가 커짐에 따라 전체지지력이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 시험결과는 테이퍼 각도가 커질수록 말뚝의 전체지지력이 커진다는 기존의 연구결과(Wei와 El Naggar 1998, Sakr 등 2004,



(a) D_R=55%의 경우



(b) D_R=86%의 경우

그림 5. 테이퍼 각도에 따른 극한지지력 변화

Rybnikov 1990, Norlund 1963, Zil'berberg와 Sherstnev 1990)와 일부 상반되는 것으로, 지반의 상대밀도에 따라 말뚝의 전체지지력에서 선단지지력과 주면마찰력의 비중이 달라지는 데서 그 원인을 찾을 수 있다. 백규호 등(2007)의 연구결과에 따르면 지반이 조밀해질수록 전체지지력에서 선단지지력의 비중이 커지고 지반이 느슨할수록 주면마찰력의 비중이 커지는 것으로 나타났다. 따라서 D_R=55%의 지반에서는 테이퍼 각도에 따른 전체지지력의 변화가 주면마찰력의 경향을 따르고 D_R=86%인 지반에서는 선단지지력의 경향을 따르기 때문으로 판단된다.

3.3 주면마찰력과 선단지지력의 하중분담률

그림 6은 지반의 상대밀도별로 말뚝의 전체지지력에서 선단지지력과 주면마찰력이 차지하는 비율로 정의되는 하중분담률이 말뚝의 테이퍼 각도에 따라 어떻게 변하는가를 나타낸 것이다. 시험결과에 따르면 말뚝의 테이퍼 각도가 커짐에 따라 전체지지력에서 주면마찰력의 하중분담률은 증가하고 선단지지력의 하중분담률은 감소하였다. 이것은 지반에 매입되는 말뚝의 관입깊이와 체적이 일정할 때 말뚝의 테이퍼 각도가 증가하면 선단 면적은 감소하고 주면 면적은 증가하며 주면에 작용하는 압축지지력 성분이 커져서 말뚝의 선단지지력은 감소하고 주면마찰력은 커지기 때문으로 판단된다. 그리고 말뚝의 테이퍼 각도가 일정하더라도 지반의 상대밀도가 작을수록 주면마찰력의 하중분담률은 커지고 선단지지력의 하중분담률은 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

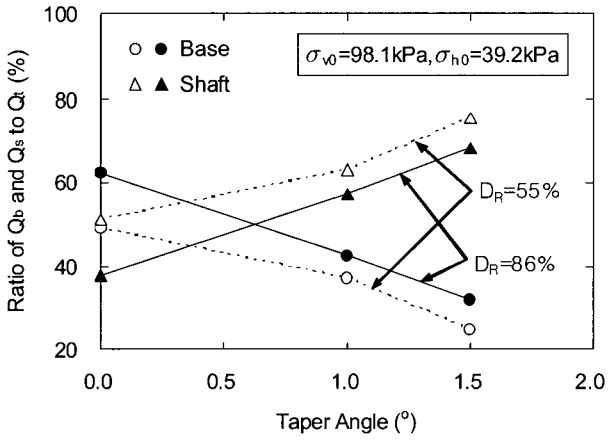
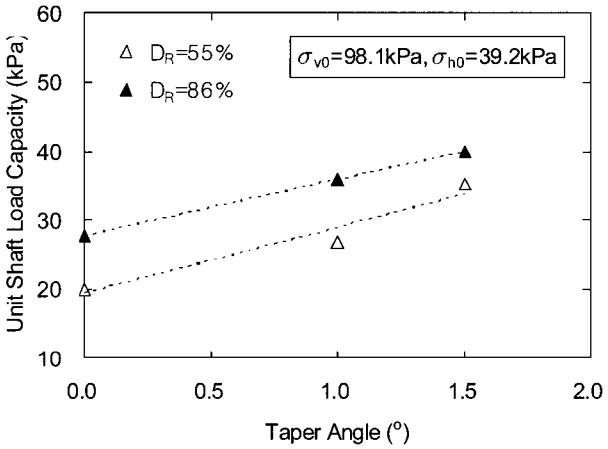


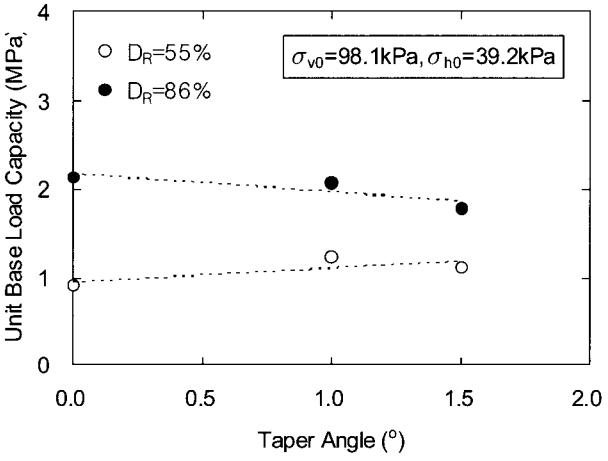
그림 6. 테이퍼 각도에 따른 선단지지력과 주면마찰력의 하중분담률

3.4 단위 지지력

그림 7은 지반의 상대밀도별로 말뚝의 테이퍼 각도에 따른 단위 주면마찰력과 단위 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 보듯이 말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 무관하게 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 증가하였으며, 이러한 시험결과는 현재까지 크게 두 가지 요인에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다. 그 중 첫 번째는 테이퍼말뚝이 침하하면서 주변지반을 방사방향으로 밀어내서 주변지반이 다져지게 되고 그로 인해 주변 지반의 내부마찰각이 증가하기 때문에 주변마찰력이 증가한다는 것이다(Norlund 1963). 그리고 두 번째는 테이퍼말뚝의 침하에 의한 주변지반의 방사방향 압축으로 인해 지반의 수평방향 구속응력이 증가하게 되고 그로 인해 테이퍼 각도에 따라 말뚝의 주면마찰력이 커진다는 것이다(Ladanyi와 Guichaoua 1985,



(a) 단위 주면마찰력



(b) 단위 선단지지력

그림 7. 테이퍼 각도에 따른 단위 선단지지력과 단위 주면마찰력의 변화

Kodikara와 Moore 1993).

한편, 말뚝의 테이퍼 각도에 따른 단위 선단지지력의 변화는 그림 7(b)와 같이 지반의 상대밀도에 따라 그 경향이 달라졌다. D_R=55%의 지반에서는 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력이 원통형말뚝보다 컸으며, 테이퍼 각도가 1°와 1.5°인 말뚝 T1과 T2의 결과만을 비교할 때는 약간 다른 결과가 얻어질 수 있지만 테이퍼 각도가 0°인 원통형말뚝에 대한 결과를 포함해서 시험결과를 전체적으로 보면 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 단위 선단지지력도 함께 증가하는 경향을 보였다. 반면 D_R=86%의 지반에서는 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력이 원통형말뚝보다 작았으며, 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 단위 선단지지력이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 시험결과는 말뚝의 설치방법은 다르지만 D_R=90%의 모래지반에서 테이퍼 각도가 커질수록 지반에 타입된 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력도 함께 커진다는 Sakr 등(2004)의 연구결과와 상반되는 것이다.

그림 8은 테이퍼 각도에 따른 말뚝의 단위 체적당 전체지지력의 변화를 보인 것이다. 일반적으로 말뚝기초를 시공하는데 소요되는 기초 공사비는 지반에 매입되는 말뚝의 체적과 직접적인 관계가 있기 때문에 말뚝의 테이퍼 각도에 따른 단위 체적당 전체지지력의 변화는 테이퍼말뚝의 경제성을 판단하는 참고자료로 활용될 수 있다. 그림에서 보듯이 D_R=55%의 지반에서는 테이퍼말뚝의 단위 체적당 전체지지력이 말뚝의 테이퍼 각도에 비례해서 증가했지만 D_R=86%의 지반에서는 테이퍼 각도에 비례해서 감소했다. 그리고 이러한 시험결과에 근거할 때 비배토 테이퍼말뚝의 경우 느슨한 지반에서는 원통형말뚝보다 경제성이 뛰어나지만 조밀한 지반에서는 원통형말뚝보다 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다.

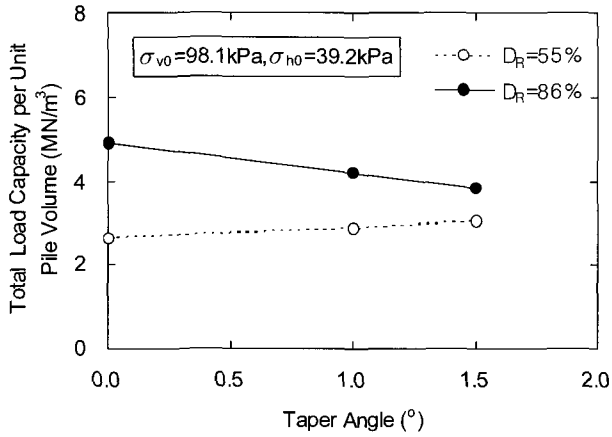


그림 8. 테이퍼 각도에 따른 말뚝의 단위 체적당 전체지지력 변화

4. 결 론

본 논문에서는 말뚝의 테이퍼 각도에 따른 테이퍼말뚝의 연직거동과 지지력의 변화를 조사하기 위하여 가압토조를 이용해서 모형말뚝시험을 수행하였다. 모형시험은 응력상태는 일정하고 상대밀도만 55%와 86%로 다른 두 종류의 모형지반에서 모형 원통형말뚝과 테이퍼 각도가 다른 두 개의 모형 테이퍼말뚝을 이용해서 총 6회를 수행하였다. 모형시험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 말뚝이 침하함에 따라 원통형말뚝의 주면마찰력은 침하 초기에 극한치에 도달하였으나 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 말뚝이 침하함에 따라 계속 증가하였다. 그리고 말뚝의 침하량에 대한 지지력의 변화를 강성도로 정의할 때 테이퍼 각도가 커짐에 따라 말뚝의 주면마찰력에 대한 강성도는 증가하였으나 선단지지력에 대한 강성도는 감소하는 경향을 보였다.

(2) 지반의 상대밀도와 무관하게 말뚝의 테이퍼 각도가 커질수록 주면마찰력은 증가하고 선단지지력은 감소하였다. 반면 전체지지력의 경우에는 지반의 상대밀도에 따라 다른 결과를 보여서, D_R=55%의 지반에서는 테이퍼 각도가 커짐에 따라 전체지지력이 증가한 반면 D_R=86%의 지반에서는 감소하는 경향을 보였다.

(3) 테이퍼 각도가 커짐에 따라 전체지지력에서 주면마찰력이 차지하는 하중분담률은 증가하고 선단지지력의 하중분담률은 감소하였다. 그리고 테이퍼 각도가 일정할 경우 지반의 상대밀도가 커질수록 선단지지력의 하중분담률은 커지고 주면마찰력의 하중분담률은 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 말뚝의 테이퍼 각도가 커짐에 따라 단위 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 상관없이 증가하였다. 반면 단위 선단지지력의 경우 D_R=86%의 지반에서는 테이퍼 각도에 따라 감소하였고 D_R=55%의 지반에서는 증가하는 경향을 보였다.

(5) 테이퍼말뚝의 단위 체적당 전체지지력은 D_R=55%의 지반에서는 테이퍼 각도에 비례해서 증가했지만 D_R=86%의 지반에서는 테이퍼 각도에 따라 감소하

였다. 따라서 말뚝의 단위 체적당 지지력 측면에서 말뚝의 경제성을 평가할 때 테이퍼말뚝은 조밀한 지반보다 느슨한 지반에서 경제성이 더 뛰어난 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 "가공송전용 강관주 철탑기초 설계기준 수립 연구"의 결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 백규호, 이준환, 김대홍 (2007), "모래지반에 현장타설된 테이퍼 말뚝의 연직거동 특성", *한국지반공학회논문집*, 제23권, 제8호, pp.35-45.
2. 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.SM6, pp.57-77.
3. El Naggar, M. H. and Wei, J.Q. (1999), "Axial Capacity of Tapered Piles Established from Model Tests", *Canadian Geotech. J.*, Vol.36, pp.1185-1194.
4. El Naggar, M. H. and Sakr, M. (2000), "Evaluation of Axial Performance of Taper Piles from Centrifuge Tests", *Canadian Geotech. J.*, Vol.37, pp.1295-1308.
5. 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, pp.675-693.
6. Ladanyi, B. and Guichaoua, A. (1985), "Bearing Capacity and Settlement of Shaped Piles on Permafrost", *11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol.4, pp.1421-1427.
7. 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.
8. 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 Geotechnical J.*, Vol.1, pp.189-204.
9. Rybnikov, A. M. (1990), "Experimental Investigation of Bearing Capacity of Bored-Cast-In-Place Tapered Piles", *Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol.27, No.2, pp.48-52.
10. 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, pp.70-88.
11. Wei, J. and El Naggar, M. H. (1998), "Experimental Study of Axial Behavior of Tapered Piles", *Canadian Geotech. J.*, Vol.35, pp.641-654.
12. 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 2006. 11. 10, 심사완료일 2007. 8. 17)