

## 모래지반에서 비배토 테이퍼말뚝의 연직거동 특성

### Axial Behavior of Non-Displacement Tapered Piles in Sand

백 규 호<sup>1</sup> Paik, Kyu-Ho  
이 준 환<sup>2</sup> Lee, Jun-Hwan  
김 대 홍<sup>3</sup> Kim, Dae-Hong

#### Abstract

It is known that the response of piles is affected by the shape of pile as well as soil conditions. In order to investigate the characteristics of the axial responses and bearing capacities of non-displacement tapered and cylindrical piles in sands, 12 model pile load tests using a calibration chamber were conducted on model tapered and cylindrical piles, which were specially manufactured to measure the base and shaft load capacities independently. Results of the model tests showed that the shaft load of tapered piles continuously increased with pile settlement, whereas the shaft load of cylindrical piles reached ultimate values at a settlement equal to 4% of pile diameter. Therefore, taper piles have greater shaft loads than cylindrical one at the same settlement. It is also observed that the total load capacity of tapered piles is lower than cylindrical piles for dense sand but is greater than that of cylindrical piles for medium sand. The ultimate unit base resistance of tapered piles was greater than that of cylindrical piles for lateral earth pressure ratio greater than 0.4, and the shaft resistance was greater than that of cylindrical piles irrespective of lateral earth pressure ratio.

#### 요 지

말뚝의 거동특성은 지반조건 뿐만 아니라 말뚝의 형상에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 비배토 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 연직거동과 지지력 특성을 조사하기 위해서 선단지지력과 주면마찰력을 분리해서 측정할 수 있는 모형말뚝과 가압토조를 이용해서 총 12회의 모형말뚝시험을 실시하였다. 시험결과 원통형말뚝의 주면하중은 말뚝 직경의 4%에 해당하는 침하량에서 극한치에 도달하였다. 반면 테이퍼말뚝의 주면하중은 말뚝이 침하함에 따라 계속 증가하는 경향을 보였으며, 원통형말뚝의 주면하중보다 상당히 큰 것으로 나타났다. 그리고 조밀한 지반에서는 테이퍼말뚝의 전체지지력이 원통형말뚝보다 작은 반면 상대밀도가 보통인 지반에서는 테이퍼말뚝의 전체 지지력이 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다. 테이퍼말뚝의 단위 극한선단지지력은 지반의 토압계수가 0.4보다 클 때 원통형말뚝보다 컸으며, 테이퍼말뚝의 단위 극한주면마찰력은 지반의 토압계수와는 무관하게 원통형말뚝보다 큰 것을 알 수 있었다.

**Keywords** : Axial behavior, Base load capacity, Calibration chamber test, Shaft load capacity, 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., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

3 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KEPRI/KEPCO)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

말뚝의 거동 특성은 말뚝이 설치된 지반의 응력상태와 상대밀도 같은 지반조건과 설치방법 뿐만 아니라 말뚝의 형상에 따라 서로 달라진다. 현재까지 많은 연구자들은 말뚝기초의 경제성 향상을 위해서 일정한 지반조건 하에서 말뚝의 형상 변화를 통해서 말뚝의 지지력을 극대화하기 위한 연구를 수행해 왔다. 그 결과 테이퍼(tapered)형태나 계단식 테이퍼형태(step-tapered)의 현장타설말뚝이 개발되어 오래동안 사용되어 왔으며, 국내에서도 말뚝의 선단부를 확대시킨 선단확대말뚝(belled pile)이나 말뚝 주변에 나선형의 돌기를 형성해서 주변마찰력을 증대시킨 나선돌기말뚝과 같은 다양한 형태의 말뚝이 개발되었다(McCarthy 1998, 신민호 등 1996, 백규호 1997).

한편 구조물에 가해지는 하중이 말뚝을 통해서 지반의 지지층에 전달되는 과정을 살펴보면, 말뚝에 가해지는 연직력과 수평력, 그로 인한 발생하는 모멘트의 크기는 말뚝의 두부에서 가장 크고 말뚝의 선단에 가까워질수록 점차 감소하게 된다. 특히 송전선을 하나의 기둥으로 지지하는 강관주 철탑(one pole)의 경우에는 단 본의 말뚝이 철탑을 지지하는 상태에서 송전선에 가해지는 장력이나 풍하중에 의해 매우 큰 크기의 수평력과 모멘트가 기초의 상부에 작용하게 된다(한국전력 2006). 따라서 말뚝에 전달되는 각종 하중요소의 분포와 그에 필요한 말뚝의 소요단면을 고려할 때 말뚝의 두부에서 단면이 가장 크고 선단으로 갈수록 단면이 작아지는 테이퍼말뚝(tapered pile)이 말뚝의 구조적인 안정성과 경제성 측면에서 가장 유리하다고 할 수 있다(Zil'berberg and Sherstnev 1990; El Naggar and Wei 1999). 그러나 테이퍼말뚝에 대한 연구결과가 충분치 못하고 관련 설계기준이 정립되지 않은 탓에 현재까지 테이퍼말뚝의 현장 시공사례는 극히 드문 실정이다.

현재까지 테이퍼말뚝의 거동에 관한 연구는 사질토 지반에 타입된 테이퍼말뚝의 연직지지력이 원통형말뚝보다 크다는 Norlund(1963)의 현장시험 결과가 보고된 이후에 몇몇 연구자들에 의해 매우 제한적으로 이루어져 왔다. Wei와 El Naggar(1998), El Naggar와 Wei(1999), El Naggar와 Sakr(2000)는 가압토조와 원심모형시험기를 이용한 모형시험을 통해서 느슨한 모래지반에 매입된 테이퍼말뚝의 전체지지력과 단위 주변마찰력은 동일조건에 설치된 원통형말뚝보다 크고, 말뚝의 테이퍼 각도

가 커질수록 테이퍼말뚝의 단위 주변마찰력이 더욱 커지는 것을 밝혀냈다. 그리고 Sakr 등(2004)의 연구결과에 따르면 조밀한 모래지반에 타입된 테이퍼말뚝의 전체지지력과 단위 주변마찰력, 단위 선단지지력은 동일조건에 있는 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다. 또한 모래지반에 타입된 테이퍼말뚝의 전체지지력은 원통형말뚝보다 200-250%정도 크고, 그로 인해 기초공사에서 원통형말뚝을 테이퍼말뚝으로 대체함으로써 기초 공사비를 대폭 절감한 사례가 보고되기도 하였다(Zil'berberg and Sherstnev 1990).

이상과 같이 테이퍼말뚝의 거동 특성과 관련해서 현재까지 수행된 연구의 대부분은 매우 제한된 범위 내에서만 이루어짐으로써 관련 연구결과가 충분하지 않은 상태이다. 즉, 비배토 테이퍼말뚝의 거동에 대한 연구는 느슨한 모래지반이나 불포화 점성토에서만 이루어졌고, 타입된 테이퍼말뚝의 거동 연구는 조밀한 모래지반에서만 이루어져 왔다(Norlund 1963, Rybnikov 1990, Wei와 El Naggar 1998, El Naggar와 Sakr 2000, Sakr 등 2004). 그 결과 말뚝의 테이퍼 각도와 지반조건이 테이퍼말뚝의 거동 특성에 미치는 정성적, 정량적 영향도 정확하게 규명되지 않고 있으며, 그로 인해 현재까지 테이퍼말뚝의 지지력을 산정할 수 있는 합리적인 설계기준도 정립되어 있지 않은 상태이다.

본 논문에서는 모래지반에 현장타설된 테이퍼말뚝의 연직거동과 지지력 특성을 조사하기 위하여 가압토조를 이용해서 다양한 지반조건 하에서 모형말뚝시험을 수행하였다. 그리고 일반적으로 사용되고 있는 원통형말뚝과의 비교를 통해서 테이퍼말뚝의 거동 특성을 분석하기 위해서 원통형말뚝에 대한 모형말뚝시험도 병행하였다. 이러한 모형시험을 통해서 지반의 수평응력과 연직응력, 상대밀도가 테이퍼말뚝의 연직거동과 지지력에 미치는 영향을 분석하였고, 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 거동을 비교함으로써 모래지반에서 테이퍼말뚝의 연직거동 특성을 조사하였다.

## 2. 실내모형시험

### 2.1 모형지반 조성 및 말뚝 설치

모형말뚝시험을 위한 모형지반은 그림 1과 같이 직경이 775mm이고 높이가 1250mm인 가압토조에 대기중에서 건조된 주문진 표준사를 다양한 방법으로 살포함으

로써 조성하였다. 시험에 사용된 모래의 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )는 각각 1.24와 0.97이었고, 통일분류법에 의해 SP로 분류되었다. 모래의 비중( $G_s$ )은 2.63이었으며, 최대 및 최소 간극비는 각각 0.948과 0.596으로 측정되었다.

모형지반은 모래상자(hopper)에서 유출되는 모래의 양과 낙하고를 조절해서 지반의 상대밀도를 조절하는 낙사법(raining method)을 이용해서 조성하였으며, 지반의 상대밀도는 보통상태와 조밀한 상태로 구분하여 55%와 86%로 하였다. 모형지반의 균질성을 확보하기 위해 모래상자에서 유출된 모래는 8번과 10번 체로 구성된 모래분산망(sand diffuser)을 통과하도록 하였고, 모래의 1회 낙하로 인한 모형지반의 조성높이는 10cm로 제한하였다. 모형지반의 높이가 60cm에 도달했을 때 토조에 설치된 가이드프레임을 이용해서 시험말뚝을 연직으로 유지한 상태에서 모형지반의 중앙부에 5cm 가량 압입함으로써 모형말뚝의 선단부가 지반과 완전히 밀착되도록 하였다. 시험말뚝의 거치가 끝난 후에 나머지 65cm 높이의 모형지반을 조성하였으며, 모형말뚝의 최종 관입 깊이는 70cm가 되도록 하였다. 따라서 말뚝의 설치에 따른 주변지반의 응력변화를 고려할 때 본 모형시험의 말뚝은 비배토말뚝을 재현한 것으로 생각할 수 있다. 이상과 같은 방법으로 모형지반을 조성한 후에 가압토조의 바닥과 측면에 설치된 고무막(membrane)에 압축공기를 17시간동안 가함으로써 모형지반을 소정의 응력

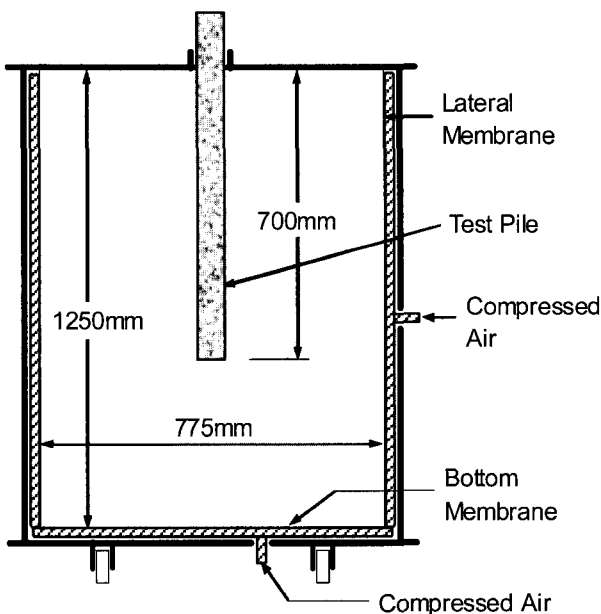


그림 1. 가압토조의 형상과 제원

상태로 압밀시켰다.

## 2.2 시험말뚝

본 논문에서는 지반조건에 따른 테이퍼말뚝의 거동변화를 조사하고 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 지지력 특성을 비교하기 위하여 그림 2와 같이 직경 60mm의 원통형말뚝과 평균직경이 58.7mm이고 말뚝의 주면이 연직으로부터 1° 만큼 기울어진 테이퍼말뚝을 시험말뚝으로 사용하였다. 시험말뚝의 전체 길이는 900mm이며, 말뚝의 하중전이분포를 측정하기 위하여 전체 말뚝길이 중 지반에 매입될 700mm 부분에 대해서만 말뚝의 길이방향으로 9개 위치에 대칭으로 총 18개의 스트레인게이지를 부착하였다. 그리고 말뚝의 하중전이분포가 말뚝 선단부에서 심하게 변하는 것을 고려해서 말뚝의 선단부에서는 스트레인게이지의 설치간격을 좁게 하였고, 모든 스트레인게이지 전선들은 게이지가 설치된 지점에서 곧바로 말뚝 내부로 유입되어 말뚝 두부에 설치된 구멍을 통해서 데이터로거(data logger)에 연결되었다.

한편, 기존의 연구결과에 따르면 테이퍼말뚝은 원통형말뚝에 비해 전체지지력에서 주면마찰력이 차지하는 비중이 상당히 크고 말뚝의 침하에 따른 주면마찰력의 변화도 원통형말뚝과 매우 다른 것으로 알려져 있다(EI

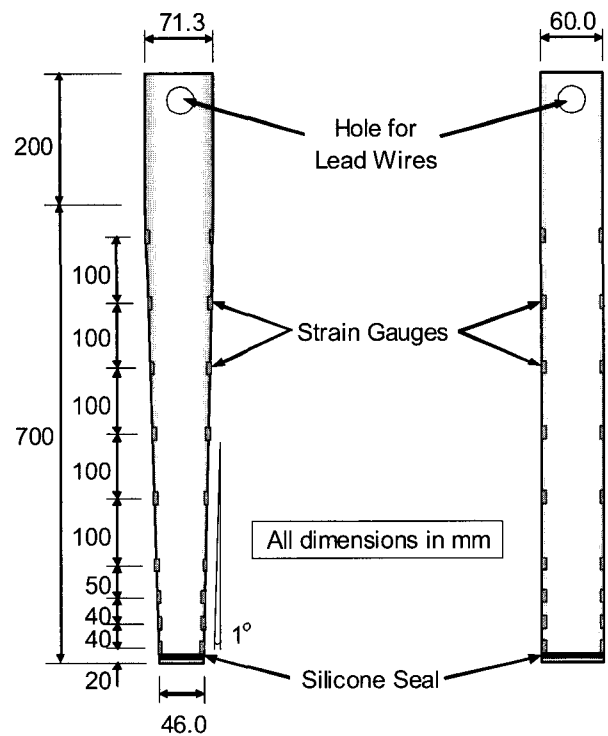


그림 2. 모형말뚝의 구조와 제원

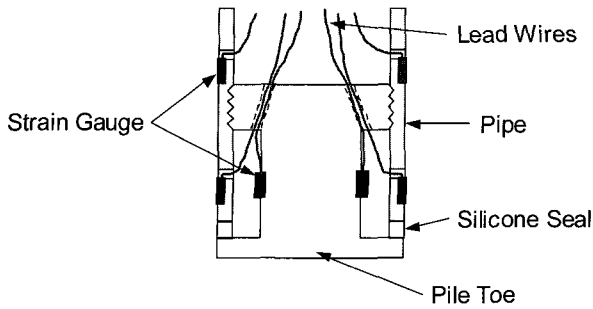


그림 3. 말뚝 선단에 부착된 하중계 상세도

Naggar와 Sakr 2000, Sakr 등 2004). 따라서 테이퍼말뚝의 거동 특성을 정확히 분석하기 위해서는 말뚝의 지지력을 선단지지력과 주변마찰력으로 분리해서 측정하는 것이 필요하다. 이를 위해 모형시험에 사용된 모든 시험 말뚝의 선단에는 그림 3과 같이 직경이 작은 강봉에 4개의 스트레인게이지를 대칭으로 부착해서 제작된 하중계(load cell)를 설치함으로써 재하시험 중에 말뚝의 선단에 작용하는 하중을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 말뚝의 선단에 작용하는 하중이 말뚝의 주변으로 전달되는 것을 방지하기 위해서 말뚝 본체와 하중계 간에 3mm의 간격을 두었으며, 이 공간은 실리콘으로 밀봉하였다.

### 2.3 시험방법

모형말뚝시험은 표 1에 정리된 바와 같이 응력상태와 상대밀도가 다른 6개의 지반조건에서 테이퍼말뚝과 원통형말뚝에 대한 재하시험을 수행함으로써 총 12회 수행되었다. 표의 첫번째 열에 보이는 시험명에서 첫번째 문자는 모형지반의 상대밀도를 의미하는 것으로 H와 M은 각각  $D_r=86\%$ 와  $55\%$ 의 상태를 나타낸다. 그리고 두번째와 세번째 문자는 각각 모형지반에 가해진 연직응력과 수평응력의 수준을 의미하는 것으로 L, M, H가 가리키는 응력수준은 표의 세번째와 네번째 열에 나타나 있다. 표와 같이 지반의 연직응력과 수평응력이 테이퍼

말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여  $D_r=86\%$ 의 지반에서 수평응력을 39.2kPa로 고정시키고 연직응력을 3가지 상태로 변화시키거나 연직응력을 98.1kPa로 고정시키고 수평응력을 3가지 상태로 변화시키면서 총 10회의 모형시험을 수행하였다. 그리고 지반의 상대밀도에 따른 테이퍼말뚝의 거동 변화를 조사하기 위하여 지반의 연직응력과 수평응력을 각각 98.1kPa와 39.2kPa로 고정시킨 상태에서 지반의 상대밀도를 86%에서 55%로 변화시키면서 2회의 모형시험을 실시하였다.

모형지반에 설치된 시험말뚝에 대한 연직재하시험은 시험말뚝의 두부가 말뚝 평균직경의 약 40%에 해당하는 24mm내외로 침하할 때까지 계속되었다. 재하시험이 수행되는 동안 말뚝에 가해진 전체하중은 시험말뚝의 두부에 설치된 하중계에 의해 측정되었으며, 말뚝의 침하량은 말뚝 두부에 대칭으로 설치된 2개의 LVDT에 의해 측정되었다. 말뚝의 선단에 작용하는 하중은 말뚝 선단에 부착된 하중계에 의해 직접 측정되었으며, 주변에 작용하는 하중은 전체하중과 선단하중의 차이로 계산되었다.

말뚝의 극한지지력은 말뚝재하시험에서 얻어진 하중-침하량 곡선으로부터 구해졌으며, 말뚝 두부의 침하량이 말뚝 평균직경의 10%에 도달했을 때 말뚝의 각 부분에 가해진 하중을 극한 전체 및 선단지지력과 극한 주변마찰력으로 간주하였다(Weltman 1980). 따라서 직경이 60mm인 원통형말뚝은 말뚝 두부의 침하량이 6mm에 도달했을 때 말뚝에 가해지는 하중을 그리고 테이퍼말뚝은 말뚝의 두부가 평균직경의 10%에 해당하는 5.87mm만큼 침하했을 때 말뚝에 가해지는 하중을 극한지지력으로 하였다. 이처럼 일정한 침하량에서 말뚝의 극한지지력을 결정하는 파괴기준을 원통형말뚝에 적용하면 말뚝 선단부와 주변부의 직경이 동일하므로 선단지지력과 주변마찰력에 동일한 기준이 적용되어 어떠한 문제도 발생하지 않는다. 그러나 말뚝의 길이방향으로 직경이 달라지는 테이퍼말뚝에 이러한 파괴기준을 적용

표 1. 모형시험이 수행된 지반조건

시험명	상대밀도(%)	연직응력(kPa)	수평응력(kPa)	토입계수, $K_0$
HLL	86	55.9	39.2	0.7
HML	86	98.1	39.2	0.4
HHL	86	147.1	39.2	0.27
HMM	86	98.1	68.6	0.7
HMH	86	98.1	98.1	1.0
MML	55	98.1	39.2	0.4

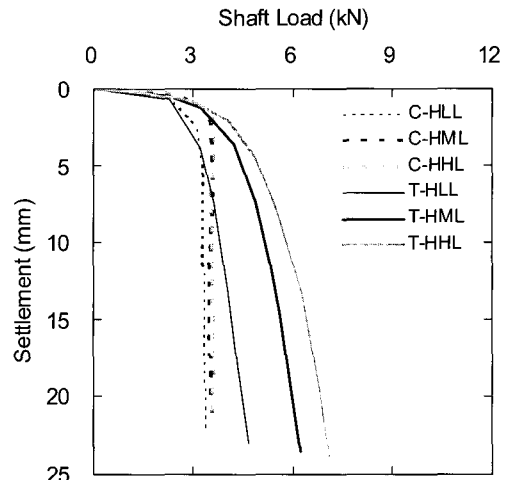
하면 말뚝의 두부 및 선단부의 직경과 평균직경이 모두 다르기 때문에 말뚝에 일정한 파괴기준을 적용하더라도 실질적으로는 주면마찰력과 선단지지력이 다른 파괴기준에 의해 결정되는 문제가 발생한다. 즉 테이퍼말뚝의 극한 전체지지력을 말뚝 평균직경의 10%에 해당하는 침하량에서 결정하고, 이때의 전체지지력을 주면마찰력과 선단지지력으로 분리하면 주면마찰력은 전체 지지력과 마찬가지로 말뚝 평균직경의 10%에 해당하는 침하량에서 결정되지만 선단지지력은 말뚝 선단직경을 기준으로 할 때 선단직경의 10%보다 큰 침하량에서 결정된다. 따라서 말뚝이 침하함에 따라 말뚝의 선단부에 작용하는 하중이 커지는 것을 고려할 때 동일한 파괴기준을 원통형말뚝과 테이퍼말뚝에 적용하더라도 말뚝의 선단직경을 기준으로 할 때 침하량 수준이 더 큰 테이퍼말뚝의 지지력이 원통형말뚝보다 과대평가될 수 있다. 그러나 현실적으로 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안이 존재하지 않기 때문에 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 거동을 비교하는 대부분의 연구에서는 본 연구와 마찬가지로 원통형말뚝과 테이퍼말뚝에 동일한 파괴기준을 적용해서 말뚝의 극한 선단지지력과 주면마찰력을 결정하고 있다.

### 3. 시험결과 및 분석

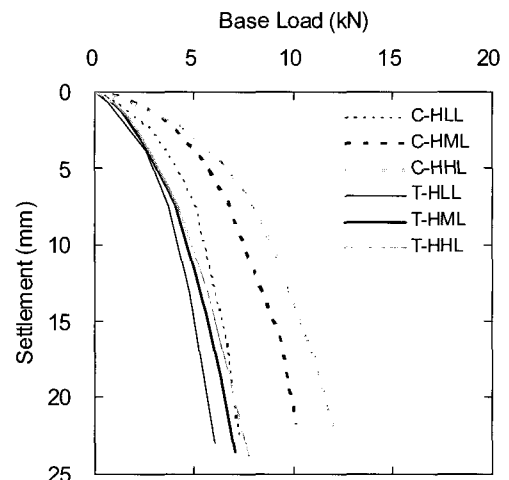
#### 3.1 하중-침하곡선

그림 4와 5는  $D_r=86\%$ 일 때 지반의 연직응력과 수평응력에 따른 말뚝의 거동 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 범례에 사용된 4개의 문자 중 첫번째 것은 말뚝의 종류(C: 원통형말뚝, T: 테이퍼말뚝)를 나타내고, 나머지 세 개의 문자는 2.3절에서 설명한 바와 같이 각각 지반의 상대밀도와 연직 및 수평응력의 수준을 나타낸다. 그림 4(a)와 5(a)에서 보듯이 원통형말뚝의 주면하중은 말뚝의 두부가 말뚝 직경의 4%만큼 침하했을 때 극한치에 도달하였으며, 극한 주면마찰력은 지반의 연직응력과는 무관하고 지반의 수평응력과는 비례관계에 있는 것으로 나타났다. 반면 테이퍼말뚝은 침하량이 말뚝 평균직경의 40%에 해당하는 24mm에 도달할 때까지도 주면하중이 극한치에 도달하지 않고 말뚝이 침하함에 따라 계속 증가하였으며, 지반의 연직응력이나 수평응력이 커지면 극한 주면마찰력도 증가하는 경향을 보였다. 그리고 말뚝의 침하량이 동일할 때 테이퍼말뚝의 주

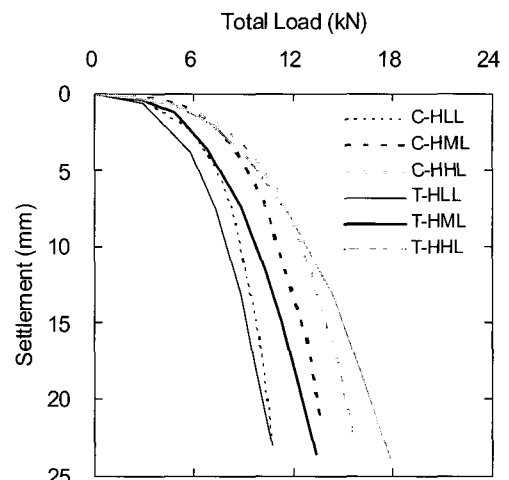
면하중은 동일 조건의 원통형말뚝보다 컸으며, 말뚝의 침하량이 커질수록 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 주면하중 차이는 커지는 것으로 나타났다. 따라서 원통형말뚝



(a) 주면하중



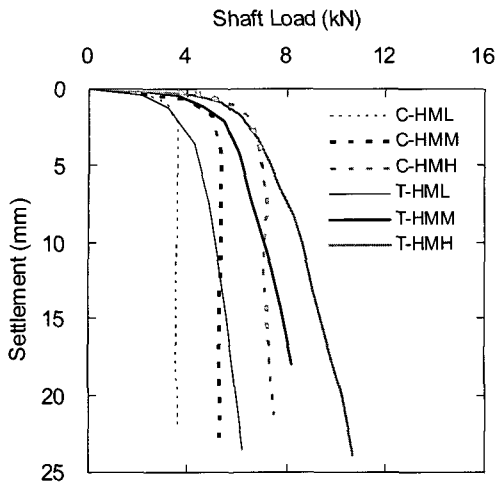
(b) 선단하중



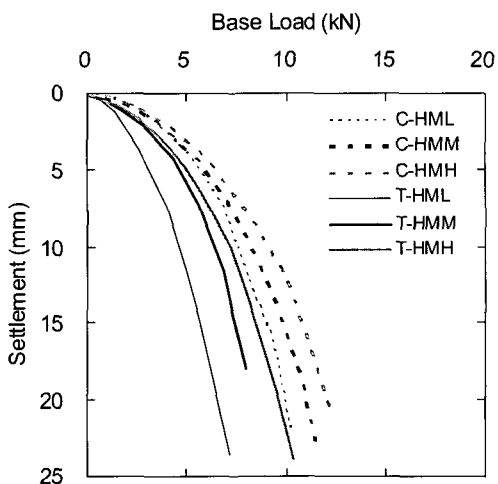
(c) 전체하중

그림 4.  $D_r=86\%$ 인 지반에서 연직응력에 따른 말뚝의 거동변화

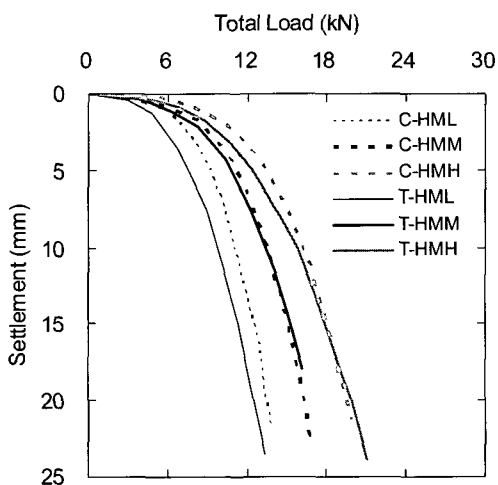
의 주면마찰력은 지반의 수평응력에만 영향을 받고 선단지지력은 수평 및 연직응력 모두에 영향을 받는다는 사실과 말뚝이 침하하면 주면하중은 곧바로 극한치에



(a) 주면하중



(b) 선단하중



(c) 전체하중

그림 5.  $D_r=86\%$ 인 지반에서 수평응력에 따른 말뚝의 거동변화

도달하고 선단하중은 계속 증가한다는 사실을 고려할 때 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 그림 6과 같이 경사진 주면의 연직성분에 작용하는 마찰력 성분( $Q_{s,z}$ )과 주면의 수평성분에 작용하는 압축지지력 성분( $Q_{b,z}$ )으로 구성되어 있음을 시험결과로부터 확인할 수 있었다.

테이퍼말뚝의 선단하중은 그림 4(b) 및 5(b)에서와 같이 지반의 연직응력과 수평응력에 따라 증가하였으며, 동일조건인 원통형말뚝에 비해서 상당히 작게 측정되었다. 이러한 말뚝의 형태별 선단하중 차이는 테이퍼말뚝의 선단 면적이 원통형말뚝보다 약 40%가량 작았기 때문이다. 그리고 조밀한 지반에서 테이퍼말뚝의 전체 하중은 그림 4(c)와 5(c)에서 보듯이 말뚝의 침하 초기에는 원통형말뚝에 비해 약간 작았지만 말뚝이 침하함에 따라 원통형말뚝의 전체하중에 근접하는 것으로 나타났다.

반면 테이퍼말뚝의 단위 선단하중은 그림 7과 같이 동일조건에 있는 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다. 이것은 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 선단하중이 서로 다른 상대침하량(즉, 말뚝의 직경에 대한 침하량의 비)에서 결정되었기 때문으로 판단된다. 즉 본 연구에서는 동일한 침하량에서 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 선단하중을 비교하였지만, 이러한 침하량을 말뚝 선단직경을 기준으로 하는 상대침하량으로 전환하면 동일 침하량 일지라도 테이퍼말뚝의 상대침하량이 원통형말뚝보다 28% 크게 된다. 따라서 말뚝의 선단하중은 상대침하량이 커질수록 커진다는 사실을 고려할 때 상대적으로 더

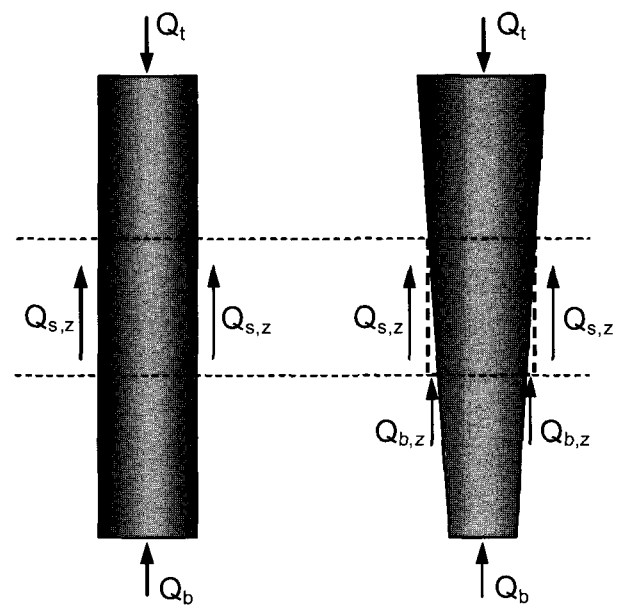


그림 6. 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 하중지지 메커니즘 비교

큰 상대침하량에서 선단하중이 결정된 테이퍼말뚝의 단위 선단하중이 원통형말뚝의 경우보다 큰 것이다.

그림 8은  $D_R=55\%$ 이고 연직과 수평응력이 각각 98.1kPa와 39.2kPa인 지반에 설치된 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 하중-침하량 곡선을 나타낸 것이다. 이 경우에도 테이퍼말뚝은 원통형말뚝과 달리 침하가 진행될수록 주면하중이 계속 증가하는 경향을 보였으며, 동일 침하량에서 원통형말뚝보다 큰 주면하중을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 선단하중은 선단 면적이 작은 관계로 원통형말뚝보다 조금 작았지만 그림 8(b)에서 보듯이 테이퍼말뚝의 단위 선단하중은 원통형말뚝의 경우보다 큰 것으로 나타났다. 반면 테이퍼말뚝의 전체하중은  $D_R=86\%$ 의 경우와 달리 원통형말뚝의 전체하중을 능가

하였으며, 말뚝의 침하량이 커질수록 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 전체하중 차이는 더욱 벌어졌다. 이처럼 지반이 조밀한 경우에는 테이퍼말뚝의 전체지지력이 원통형말뚝보다 작은 반면 지반의 조밀도가 보통인 경우에는 원통형말뚝보다 커지는 것은 말뚝의 전체하중에서 선단하중과 주면하중이 차지하는 비율이 지반의 상대밀도에 따라 달라지기 때문이다. 즉 조밀한 지반에서는 전체하중에서 선단하중이 차지하는 비율이 더 크기 때문에 선단하중 성분이 큰 원통형말뚝의 전체하중이 테이퍼말뚝보다 크게 된다. 반면 지반의 상대밀도가 작아지면 전체하중에서 주면하중이 차지하는 비율이 커지므로 상대적으로 주면마찰력 성분이 큰 테이퍼말뚝의 전체하중이 원통형말뚝보다 커지는 것이다. 지반의

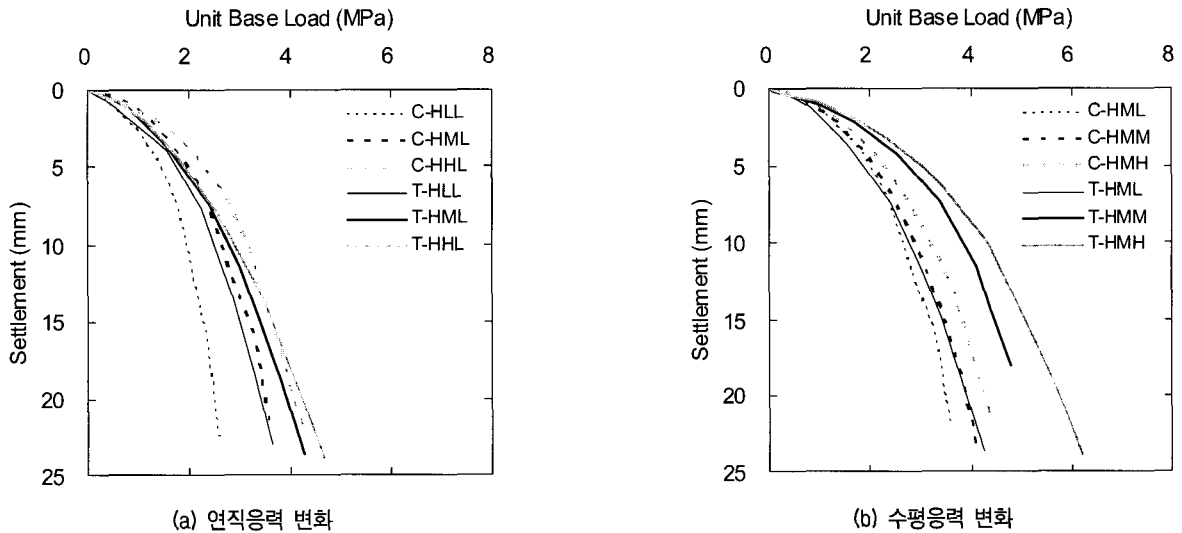


그림 7.  $D_R=86\%$ 인 지반에서 지반응력에 따른 단위 선단하중의 변화

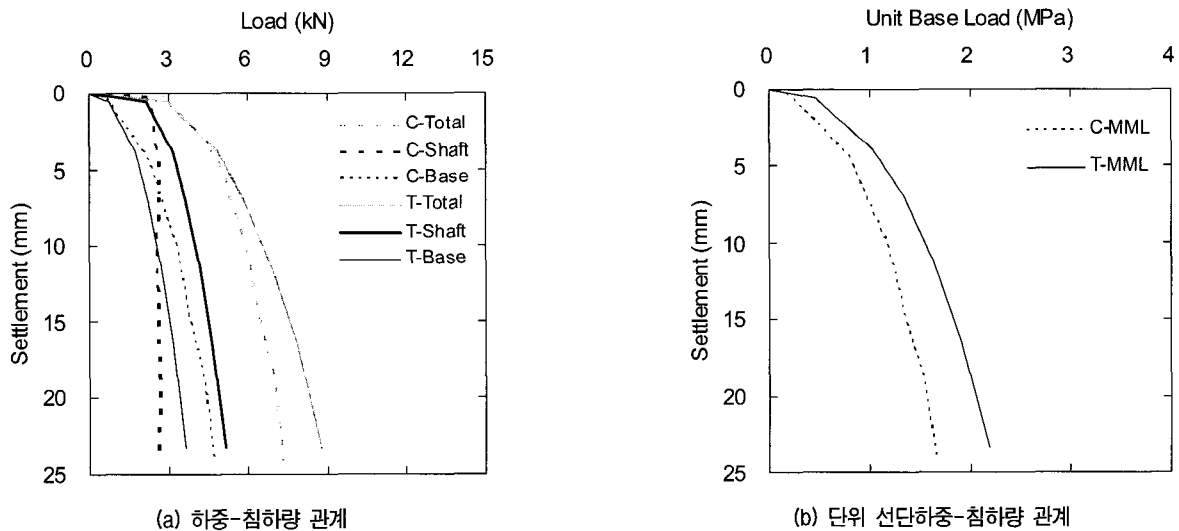
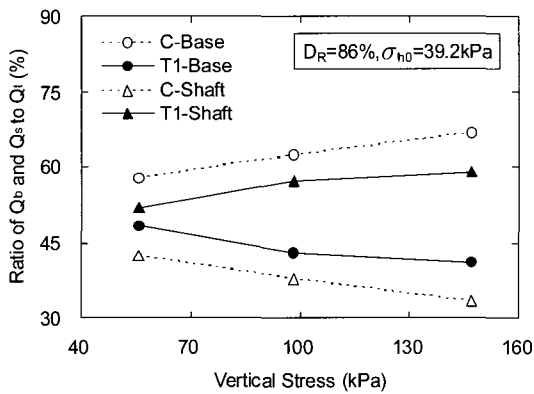


그림 8.  $D_R=55\%$ 의 지반에서 말뚝의 거동 특성

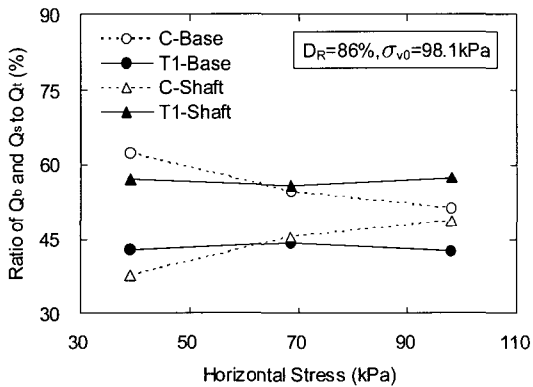
상대밀도에 따른 선단지지력과 주변하중의 하중분담비율 변화는 3.2절에서 보다 자세히 언급하였다.

### 3.2 주변마찰력과 선단지지력의 하중분담비

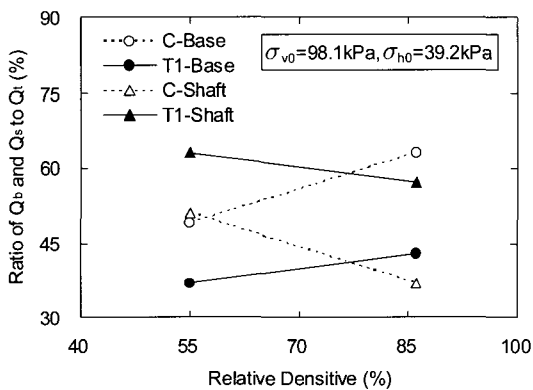
그림 9는 지반조건에 따라 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 극한 전체지지력에서 선단지지력과 주변마찰력이 차지하는 비율의 변화를 나타낸 것이다. 그림 9(a)에서 보듯이 원통형말뚝의 경우 지반의 연직응력이 증가함에



(a) 연직응력



(b) 수평응력



(c) 상대밀도

그림 9. 지반조건에 따른 선단지지력과 주변마찰력의 하중분담비

따라 선단지지력의 하중분담비는 증가하고 주변마찰력의 하중분담비는 감소하였다. 그러나 테이퍼말뚝의 경우에는 원통형말뚝과 달리 연직응력이 커짐에 따라 선단지지력의 하중분담비는 감소하고 주변마찰력의 하중분담비는 증가하였다. 그리고 Wei와 El Naggari(1998)와 El Naggari와 Wei(1999)의 연구결과와 마찬가지로 원통형말뚝은 선단지지력의 하중분담비가 더 반면 테이퍼말뚝은 주변마찰력의 하중분담비가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 9(b)와 같이 지반의 수평응력이 증가하면 원통형말뚝의 경우에 선단지지력의 하중분담비가 감소하고 주변마찰력의 하중분담비는 증가하지만, 테이퍼말뚝의 선단지지력과 주변마찰력의 하중분담비는 각각 57%와 43%로 거의 일정하게 유지되었다.

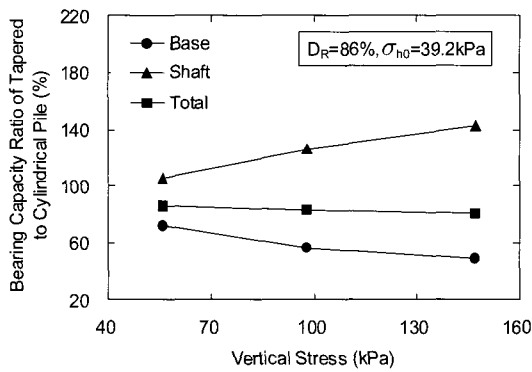
한편 지반의 상대밀도가 55%에서 86%로 증가하면 그림 8(c)와 같이 원통형말뚝과 테이퍼말뚝 모두에 대해서 선단지지력의 하중분담비는 증가하고 주변마찰력의 하중분담비는 감소하였다. 원통형말뚝의 경우  $D_R=55\%$ 의 지반에서 선단지지력과 주변마찰력의 하중분담비는 비슷하였으나  $D_R=86\%$ 의 지반에서는 선단지지력의 하중분담비가 주변마찰력의 분담비보다 1.7배 큰 것으로 나타났다. 그리고 테이퍼말뚝의 경우에는 주변마찰력의 하중분담비가 선단지지력의 하중분담비에 비해 지반의 상대밀도에 따라 30-70%까지 큰 것으로 나타났다. 따라서  $D_R=55\%$ 의 지반에서는 주변마찰력의 하중분담비가 크기 때문에 상대적으로 주변마찰력이 더 큰 테이퍼말뚝의 지지력이 원통형말뚝보다 크게 되고,  $D_R=86\%$ 의 지반에서는 선단지지력의 하중분담비가 크기 때문에 상대적으로 선단지지력이 큰 원통형말뚝의 전체지지력이 테이퍼말뚝보다 크게 됨을 알 수 있다.

### 3.3 원통형말뚝과의 지지력 비교

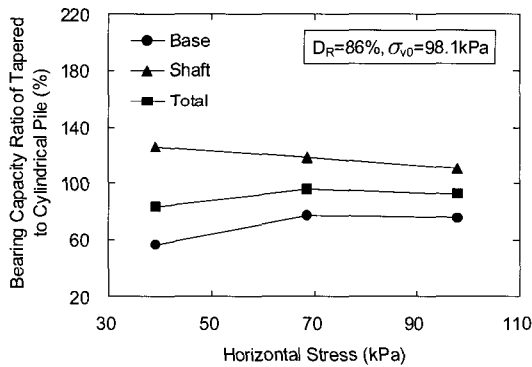
그림 10은 지반조건에 따른 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 지지력 요소간 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림 10(a), (b)와 같이 조밀한 지반에서 테이퍼말뚝의 주변마찰력은 지반의 응력상태와 무관하게 체적이 동일한 원통형말뚝보다 항상 크지만 전체지지력과 선단지지력은 항상 작은 것으로 나타났다. 그리고 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 전체지지력 차이는 지반의 연직응력이 증가할수록 더욱 커졌으나, 지반의 수평응력이 증가함에 따라서는 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한 그림 10(c)에서 보듯이 지반의 연직응력과 수평응력이 각각



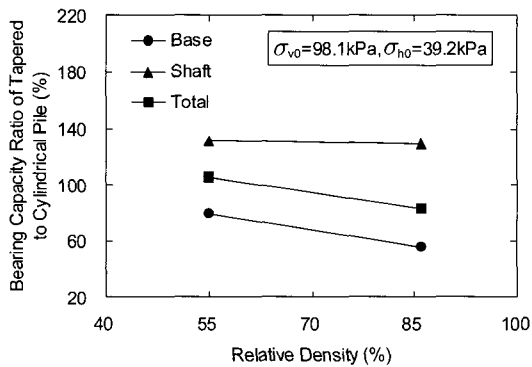
98.1kPa과 39.2kPa일 때 테이퍼 각도가 1°인 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 무관하게 원통형말뚝보다 30%정도 컸으나, 선단지지력은 지반의 상대밀도에 따라 원통형말뚝의 56-80%에 불과하였다. 전체지지력의 경우에는  $D_R=55\%$ 에서 테이퍼말뚝의 전체 지지력은 체적이 동일한 원통형말뚝의 106%였으나,  $D_R=86\%$ 에서는 원통형말뚝의 83%에 불과하였다. 따라서 말뚝의 단위체적당 지지력을 고려할 때 테이퍼말뚝은 상대밀도가 작은 지반에서 더 효과적인 것으로 나타났다.



(a) 연직응력



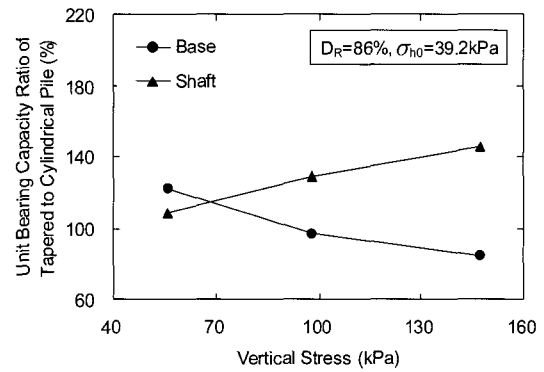
(b) 수평응력



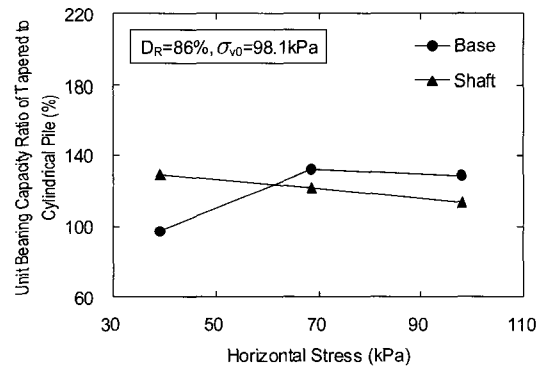
(c) 상대밀도

그림 10. 지반조건에 따른 원통형말뚝과 테이퍼말뚝간 지지력 비의 변화

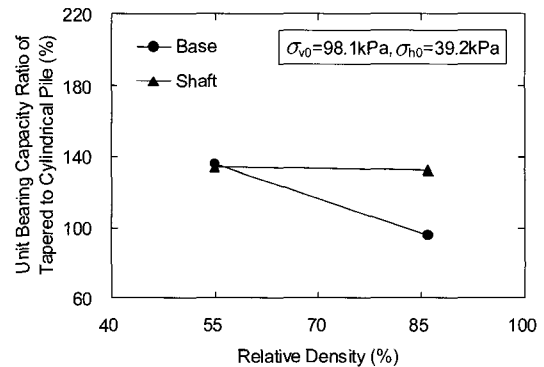
그림 11은 지반조건에 따른 원통형말뚝과 테이퍼말뚝의 단위 면적당 지지력 비(이하 단위 지지력 비로 함)를 나타낸 것이다.  $D_R=86\%$ 인 지반의 연직응력이 55.9kPa에서 147.1kPa로 커질 때 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력 비는 108%에서 145%까지 증가했지만 단위 선단지지력 비는 122%에서 85%까지 감소하였다. 그리고  $D_R=86\%$ 인 지반의 수평응력이 39.2kPa에서 98.1kPa로 증가할 때 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력 비는 145%에서 110%로 감소한 반면 단위 선단지지력 비는 85%에서 132%까지 증가하



(a) 연직응력



(b) 수평응력



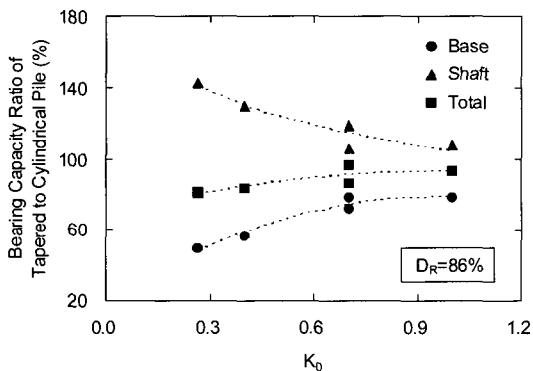
(c) 상대밀도

그림 11. 지반조건에 따른 원통형말뚝과 테이퍼말뚝간 단위지지력 비의 변화

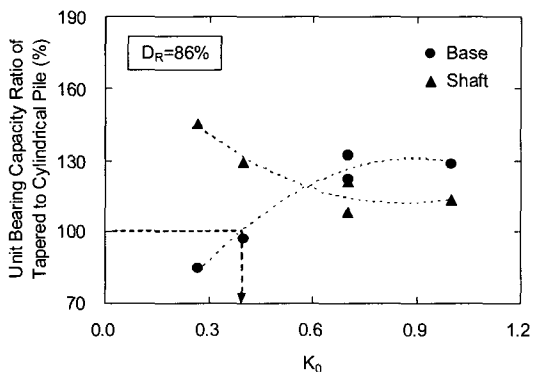
였다. 또한 지반의 연직과 수평응력이 각각 98.1kPa와 39.2kPa일 때 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 무관하게 원통형말뚝보다 33%정도 큰 것으로 나타났다. 그러나 단위 선단지지력의 경우  $D_R=55\%$ 인 지반에서는 테이퍼말뚝이 원통형말뚝보다 36% 크지만  $D_R=86\%$ 의 지반에서는 원통형말뚝보다 약 15% 작은 것으로 나타났다.

### 3.4 말뚝 형상에 따른 지지력 변화

그림 12는  $D_R=86\%$ 인 지반에서 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 지지력 비와 단위 지지력 비를 모형지반에 가한 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되는 토압계수( $K_0$ )에 대하여 나타낸 것이다. 그림 12(a)와 같이 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 항상 원통형말뚝보다 컸으나, 전체지지력과 선단지지력은 지반의 응력상태와 무관하게 항상 원통형말뚝보다 작았다. 그러나 지반의  $K_0$ 가 커짐에 따라 테이퍼말뚝의 모든 지지력 요소들은 점차 원통형말뚝의 지지력 요소에 근접하는 경향을 보였다.



(a) 지지력 비



(b) 단위 지지력 비

그림 12. 지반의 토압계수에 따른 원통형말뚝과 테이퍼말뚝간 지지력 비의 변화

다. 그리고  $K_0$ 가 0.27에서 1.0까지 커짐에 따라 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력 비는 142%에서 108%로 감소하였으나 단위 선단지지력의 비는 85%에서 136%로 증가하였다. 특히 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의  $K_0$ 와 무관하게 항상 원통형말뚝보다 크지만 단위 선단지지력은  $K_0 > 0.4$ 인 경우에만 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다.

### 4. 결론

본 논문에서는 모래지반에 설치된 비배토 테이퍼말뚝의 연직거동과 지지력 특성을 조사하기 위하여 가압토조를 이용해서 테이퍼말뚝과 원통형말뚝에 대한 모형말뚝시험을 수행하였다. 모형시험은 지반의 응력상태와 상대밀도가 다른 6개의 지반상태에서 수행되었고, 테이퍼말뚝과 원통형말뚝의 지지력 요소들을 비교하기 위하여 모든 모형말뚝은 전체지지력을 선단지지력과 주면마찰력으로 분리해서 측정할 수 있도록 제작하였다. 총 12회의 모형말뚝시험을 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 원통형말뚝의 주면하중은 말뚝 두부가 직경의 4%만큼 침하했을 때 극한치에 도달했으나 테이퍼말뚝의 주면하중은 말뚝이 평균직경의 40%에 해당하는 만큼 침하했을 때에도 말뚝이 침하됨에 따라 계속 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 원통형말뚝의 주면마찰력은 지반의 수평응력과 상대밀도에만 영향을 받는 반면 테이퍼말뚝의 경우에는 지반의 연직응력과 수평응력, 상대밀도 모두가 주면마찰력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 상대밀도가 86%인 지반에서 테이퍼말뚝의 전체지지력은 체적이 동일한 원통형말뚝보다 작았지만 55%인 지반에서는 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 말뚝의 단위 체적당 지지력을 고려할 때 테이퍼말뚝은 조밀한 지반보다 느슨한 지반에서 더 효과적인 것으로 판단된다.
- (4) 테이퍼말뚝의 주면마찰력은 동일조건에 있는 동일체적의 원통형말뚝에 비해 상당히 컸다. 그리고 테이퍼말뚝의 전체지지력에 대한 주면마찰력의 비율은 지반의 연직응력이 커지고 상대밀도가 작을수록 증가하였으나 수평응력의 변화에 대해서는 크게 영향을 받지 않았다.

- (5) 말뚝의 근입심도와 체적이 동일한 경우 선단 면적의 차이로 인해 테이퍼말뚝의 선단지지력은 항상 원통형말뚝보다 작았으며, 지반의 연직응력이 작아지거나 수평응력이 커질수록 그리고 상대밀도가 작아질수록 원통형말뚝과의 선단지지력 차이는 감소하였다.
- (6) 선단지지력의 경우와 달리 테이퍼말뚝의 단위 선단지지력은 오히려 원통형말뚝보다 큰 것으로 나타났다. 이것은 두 말뚝의 선단지지력이 모두 말뚝 평균 직경의 10%에 해당하는 약 6mm의 침하량에서 말뚝 선단에 작용하는 하중으로 결정되었지만 이것을 말뚝의 평균직경이 아닌 선단지지력과 관련되는 선단직경의 관점에서 보면 원통형말뚝의 단위 선단지지력은 말뚝 직경의 10%에 해당하는 침하량에서 결정된 반면 테이퍼말뚝은 말뚝 선단직경의 12.8%에 해당하는 침하량에서 단위 선단지지력이 결정되었기 때문에 판단된다.
- (7) 지반의 토압계수가 커짐에 따라 원통형말뚝에 대한 테이퍼말뚝의 주면마찰력 비는 감소하였고 선단지지력 비와 전체지지력 비는 증가하는 경향을 보였다. 특히 테이퍼말뚝의 주면마찰력과 전체지지력은 원통형말뚝의 지지력 값에 근접하는 경향을 보였다.
- (8) 테이퍼말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 응력상태와 무관하게 항상 원통형말뚝보다 컸으며, 단위 선단지지력은 토압계수가 0.4 이상인 지반에서만 원통형말뚝보다 크게 나타났다.

## 감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 지원 하에 수행된 “가공송전용 강관주 철탑기초 설계기준 수립”에 대한 연구결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 백규호 (1997), “새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성”, *한국지반공학회논문집*, Vol.13, No.4, pp.25-35.
2. 신민호, 전병승, 김상훈, 방운경 (1996), “주면마찰력을 보강한 저소음, 저진동 말뚝공법(KSIP)에 관한 모형시험연구(1)”, *96 봄 학술발표회 논문집*.
3. 한국전력 (2006), *가공송전용 강관주 철탑기초 설계기준 수립연구*, 한국전력.
4. 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.
5. 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.
6. McCarthy, D. F. (1998), *Essentials of Soil Mechanics and Foundations*, 5th Ed., Prentice-Hall.
7. Norlund, R. L. (1963), “Bearing Capacity of Piles in Cohesionless soils”, *J. of Soil Mech. and Found. Eng. Div.*, Vol.89, No. SM3, pp.1-34.
8. 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.
9. 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.
10. Wei, J. and El Naggar, M. H. (1998), “Experimental Study of Axial Behavior of Tapered Piles”, *Canadian Geotech. J.*, Vol.35, pp.641-654.
11. Weltman, A. J. (1980), “Pile load testing procedures”, *DOE and CIRIA Piling Devel. Group Rep. PG7*, Construction Industry Research and Information Association, London.
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. 10. 25, 심사완료일 2007. 8. 28)