

원통형 및 테이퍼말뚝의 하중-침하특성 및 CPT지지력상관계수

Evaluation of CPT-based Pile Load Capacity Factors with Cylindrical and Taper Pile

이 준 환¹ Lee, Jun-Hwan

백 규 호² Paik, Kyu-Ho

김 대 홍³ Kim, Dae-Hong

김 민 기⁴ Kim, Min-Kee

황 성 욱⁴ Hwang, Sung-Wuk

Abstract

In this study, evaluation of load capacity and CPT-load capacity parameters were performed using calibration chamber tests for different types of piles including straight-side and tapered piles. Various soil conditions were considered in the investigation, aiming at establishing design procedure for foundation of electronic transmission tower structures. Test results show that no significant difference of total load capacity from straight-side and tapered piles, while individual components of base and shaft load capacities were quite different. Based on the test results, values of CPT-load capacity correlation parameters for different pile types were analyzed for the evaluation of both base and shaft load capacities.

요 지

본 논문에서는 토조에 실시된 모형말뚝 재하실험과 콘관입실험을 통하여, 말뚝형태별 지지력 특성분석과 CPT지지력 상관계수를 평가하였다. 고려된 말뚝의 형태는 일반적인 현장타설말뚝에 적용되는 원통형 말뚝과 테이퍼형 말뚝이 고려되었다. 본 연구는 궁극적으로 강관주 송전탑의 기초구조물 형식개발과 설계기준 수립을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 기초형식별 거동과 지반상태의 영향 등을 중점적으로 살펴보았다. 말뚝 토조실험을 통해 나타난 결과에 의하면, 원통형 및 테이퍼형 말뚝의 전체지지력의 차이는 크지 않았으나, 개별 지지력요소의 거동은 말뚝형태별로 상이한 것으로 나타났다. 토조실험결과와 동일한 지반조건에 대해 수행된 CPT결과를 통해 말뚝지지력과 콘지지력의 관계를 나타내는 CPT지지력 상관계수의 변화추이를 도출하였다. CPT상관계수는 원통형 및 테이퍼형 말뚝형태를 비교함으로써 나타내었으며, 선단지지력과 주면마찰력의 요소별 변화추이를 제안하였다.

Keywords : Calibration chamber tests, CPT, Drilled shafts, Electric transmission tower, Pile load capacity

1. 서 론

말뚝의 종류는 다양한 기준에 의해 분류될 수 있으나, 시공방법에 따라 크게 항타말뚝(무배토말뚝)과 현장타설말뚝(배토말뚝)으로 나눌 수 있다. 현장타설말뚝의 경

우, 최근 들어 구조물의 대형화와 설계하중의 증가로 많은 수요를 보이고 있으며, 적용사례는 장대교량 등과 같은 대형구조물로부터 가공송전선로 등의 특수 구조물에까지 매우 광범위하게 적용되고 있다. 가공송전선로의 경우, 대부분의 경우 격자형식의 사각철탑구조물이

1 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 (Member, School of Civil and Environmental Engrg, Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 관동대학교 토목공학과 부교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Kwan-Dong Univ.)

3 정희원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, Korea Electric Power Corporation)

4 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (Member, School of Civil and Environmental Engrg, Yonsei Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

보편적 형식으로 사용되어 왔으나, 최근에 이르러 환경 훼손이나 미관상의 문제 등으로 인해 대체형식 구조물의 필요성이 대두되고 있다(한국전력 2006). 이의 일환으로 상부의 송전탑시설이 원통구조물로 구성된 강관주송전탑의 적용이 활발히 논의되고 있으며, 이를 위한 세부설계 및 시공기준 등이 연구 중에 있다. 강관주 송전탑을 위한 기초구조물형식으로는 역T형의 직접기초 형식과 현장타설말뚝이 적용가능하나, 소요 부지면적비율과 지지성능의 측면에서, 현장타설말뚝이 보다 효과적인 기초형식으로 간주되고 있다.

현장타설말뚝의 지지력 산정은 크게 지반의 역학적 특성치를 이용하는 방법과 표준관입시험등과 같은 현장시험결과를 직접 적용하는 방법으로 구분될 수 있다. 암반에 시공되는 현장타설말뚝은 주로 암반의 역학적 특성을 좌우하는 강도 및 강성도를 토대로 지지력의 산정이 이루어지나, 사질토 지반과 같은 일반적인 기초지반의 경우 시료채위의 어려움으로 인해 현장시험에 의한 방법이 더 효과적으로 간주될 수 있다(Lee and Salgado 1999). 강관주송전구조물의 경우, 산악지역 뿐만 아니라 기초지반이 토사층으로 구성된 도심지역에서도 빈번히 사용될 수 있으므로, 토사지반에 시공된 현장타설말뚝의 지지력산정 또한 강관주기초의 설계기준 수립을 위해 매우 중요한 핵심과정에 포함된다.

본 연구에서는 사질토지반에서의 현장타설말뚝을 대상으로, 말뚝형상 변화에 따른 지지특성과 대표적 원위치현장시험방법인 콘관입시험(Cone Penetration Test:CPT) 결과를 토대로 한 지지력 추정방법에 대해 알아보하고자 한다. 말뚝형상의 경우 원통형 및 테이퍼형 말뚝이 고려되었으며, 각 말뚝형식에 따른 지지성능을 비교, 분석하고자 한다. 이를 위해 사질토 지반에 근입된 현장타설말뚝을 모사한 모형 토조실험을 수행하였으며, 응력상태 및 상대밀도의 변화를 통해 다양한 지반조건을 실험에 반영하였다. 아울러 모형말뚝재하시험에 사용된 동일 시료조건에 대해 콘관입시험을 실시하였으며, 이를 통해 CPT지지력 상관계수를 도출하고자 한다.

2. 콘관입시험결과를 이용한 말뚝기초의 지지력 산정 및 CPT상관계수

콘관입시험(CPT) 결과를 이용한 말뚝 기초의 지지력 평가는 많은 학자들에 의해 다양한 방법들이 제시되어 왔다(Aoki and Velloso 1975, Schmertmann 1978, Bustamante and Ganeselli 1982, Philipponnat 1980). 국내의 경우

CPT는 주로 연약지반에서의 지반조사와 설계정수 도출을 위해 적용되고 있으나, 국외적으로 볼 때 기초설계를 위해서도 매우 활발히 적용되고 있다. CPT시험결과를 이용한 말뚝지지력 산정은 대부분 다음과 같은 형태의 식을 통해 이루어진다.

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

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

여기서, c_b = CPT 선단지지력 상관계수; c_s = CPT 주변 지지력 상관계수; $q_{c, avg}$ = 말뚝선단 부근에서의 평균 콘 지지력; $q_{c, i}$ = 각 지층에서의 평균 콘지지력이다. 식 (1)과 (2)에서 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.

CPT결과를 이용한 말뚝기초의 지지력 평가법 중, 설계실무에서 빈번히 적용되는 대표적인 방법은 LCPC방법(Bustamante and Ganeselli 1982)이다. LCPC방법은 비교적 세분화된 지반상태를 반영할 수 있으며, 말뚝의 종류 또한 다양한 형식으로 구분되어 있어 지지력 산정에 있어 보다 구체적인 영향요소를 포함할 수 있다. LCPC 방법 이외에도 Aoki and Velloso(1975), Schmertmann(1978), Philipponnat(1980)에 의한 방법 또한 실무에서 빈번히 적용되고 있으며, 각 방법에서는 식 (1)과 (2)에 나타난 상관계수의 값과 콘지지력의 결정을 위한 영향범위가 달리 정의되어 있다.

현재 제시되어 있는 대부분의 설계과정은 단일 원통형이나 사각형말뚝 등을 대상으로 하고 있으며, 테이퍼형 말뚝과 같이 길이에 따른 단면크기의 변화는 고려되어 있지 않다. 테이퍼말뚝의 경우, 실무적용을 위한 세부적인 연구결과는 상대적으로 미흡한 편이나, 지금까지 선단지지력 및 주변마찰력의 증가효과에 대한 연구가 일부 수행되어 왔다(Robinsky and Morrison, 1964; Rybnikov, 1990; Wei and El Naggar 1998). Rybnikov(1990)에 따르면, 동일한 길이의 테이퍼형 말뚝의 경우 원형말뚝에 비해 20~30% 정도 큰 지지력을 나타냈으며, 테이퍼의 각도가 클수록 제작비용은 증가하지만 충분히 큰 지지력을 추가적으로 얻을 수 있어 경제적인 효과를 고려해 볼 수 있음을 보였다. 앞서 기술된 바와 같이 CPT를 이용한 대부분의 지지력 평가방법들은 말뚝의 재질이나 시공방법에 따른 영향은 일부 반영하고 있으나, 테이퍼형식과 같이 깊이별 단면형태의 변화나 지반의 밀도의 변화에 따

른 영향은 고려되어 있지 않다. 이는 이러한 말뚝의 형식이 현재 보편적으로 사용, 설치되지 않기 때문이라 판단되나, 현장 및 시공조건 다양화와 지반상태의 열악화 등에 대비한 테이퍼형 말뚝의 적용은 지지성능의 효율화를 위해 고려될 수 있는 조건이므로(Wei and El Naggar 1998), 이에 대한 연구검토 또한 필요하다 사료된다.

3. 현장타설말뚝의 모사를 위한 실내 모형토조실험

3.1 모형토조

모형 토조실험은 제작과 사용이 간편하고, 현장지반의 응력상태와 상대밀도 등의 핵심지반조건을 적절히 재현할 수 있어 말뚝거동 분석을 위해 많이 수행되고 있으며, 실험결과 또한 비교적 높은 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 토조는 그림 1에 나와 있는 것과 같이 직경 77cm, 높이 121cm의 모형지반이 조성되는 용기와 일정한 조건하에서 용기 내부에 건조모래를 낙하시켜서 모형지반을 조성하기 위해 필요한 강사장치로 구분된다. 토조 내의 모형지반 조성을 위해 사용되는 강사장치로는 고정식 낙하장치(Mass spreader)가 사용되었으며, 모형지반의 상대밀도는 강사장치를 통한 모래의 낙하거리와 모래 유출량을 조절을 위한 유출구 크기에 의해 조절되었다.

본 실험에서는 모형지반의 응력상태를 조절하기 위하여 응력조절법이 채택되었다. 이를 위하여 토조의 밑

면과 측면에 두개의 고무막이 설치되었으며, 압력조절기를 통해 밑면과 옆면의 공기압을 독립적으로 조절할 수 있도록 하였다. 이를 통해 다양한 응력조건을 가지는 모형지반을 구현할 수 있으며, 수직 및 수평토압의 크기에 따라 토압계수(K_0) 또한 다양한 범위에서 조절이 가능하였다.

3.2 모형말뚝

본 연구에서 고려된 말뚝형식은 현장타설말뚝이다. 항타말뚝과 비교하여 현장타설말뚝의 시공특성은 배토 시공절차에 따라 말뚝주변의 지반교란을 수반하지 않는다는 점이며, 이러한 지반특성이 모형토조실험에 반영되도록 하였다. 말뚝형태에 따른 영향을 알아보기 위해 길이 및 부피는 동일한 원통형 및 테이퍼형 말뚝이 사용되었다. 말뚝 형태에 따른 기본적인 제원은 그림 2에 나타나 있다. 테이퍼형 말뚝은 길이에 따라 단면 크기가 줄어드는 형식으로 갖추고 있으며 말뚝주변의 테이퍼 경사각은 1도로 구성되었다. 원통형 말뚝은 직경 6cm, 길이 90cm로 제작되었으며, 테이퍼형 말뚝의 경우 두부직경 7.13cm, 선단직경 4.67cm로서 평균직경은 원통형 말뚝과 동일하며, 길이 또한 90cm로서 동일하다.

모형말뚝의 변형률을 측정하기 위해서 말뚝의 전면과 후면에 각각 9개씩의 변형률 게이지를 대칭으로 부착하였다. 일반적으로 말뚝 하부에 하중 변화 및 전이가 급격하게 발생하기 때문에 말뚝 하단부에서는 상부에서보다 조밀한 간격으로 게이지를 부착하였다. 일반적

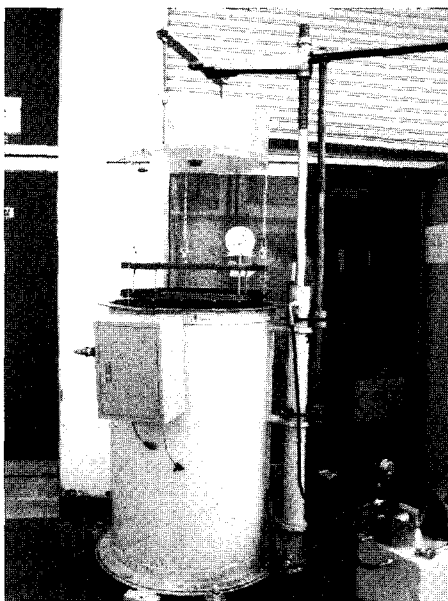


그림 1. 말뚝재하실험에 사용된 모형 토조

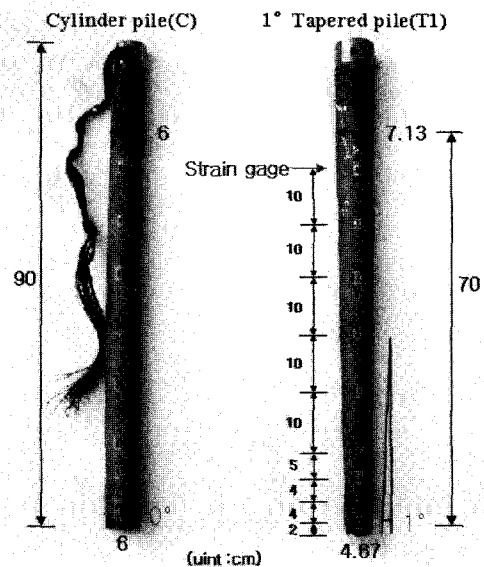


그림 2. 원형말뚝과 테이퍼말뚝의 제원

인 하중전이관계는 변형률계이지만으로도 측정 가능하나, 본 연구에서는 측정결과의 정확도를 높이기 위해 말뚝선단부에 하중계를 설치함으로써 선단지지력의 독립적인 측정이 이루어지도록 하였다. 그림 3은 말뚝 선단부의 연결 모식도를 보이고 있다. 선단부위의 독립적인 측정을 위해 선단측정부와 강관말뚝을 따로 제작하여, 선단부와 말뚝간에 발생하는 연결부위를 실리콘으로 채워 점착시킴으로써 선단부에 작용하는 압력이 주변부에 영향을 미치지 않도록 하였다.

3.3 지반조성 및 말뚝설치

토조에 조성되는 모래지반의 상대밀도는 강사되는 모래의 낙차와 모래의 유출량에 따라 조절되었다. 강사 낙차에 의한 조절법은 모래상자와 체, 그리고 조성될 지반간의 거리에 따라 상대밀도를 조절하게 되며, 모래의 낙차가 커질수록 상대밀도는 증가한다. 모래유출량에 의한 조절법은 모래상자의 바닥에 설치한 유출구멍의 크기를 작게 함으로써 상대밀도를 증가시키는 방법이다. 본 연구에서는 대표적인 기초지반 조건으로서 중간 상태 및 조밀한 상태의 지반을 구현하고자 하였으며, 이를 위해 여러번의 사전실험을 통하여 적절한 낙차고와

유출구멍의 크기를 결정하였다. 본 연구에서 선정된 상대밀도는 55% 및 86%이다.

실험에 사용된 모래는 주문진 표준사이며 이에 대한 물성치는 표 1에 나타난 바와 같다. 모형지반의 조성을 위해 강사법을 사용하여 먼저 10cm 씩 5회 모래를 강사한 후에 모형말뚝을 중앙에 설치하였다. 이때 모래위에 놓여진 말뚝이 연직상태를 유지할 수 있도록 사전에 제작된 보조 프레임을 사용하여 말뚝거치과정에 적용하였다. 주어진 지반깊이에서 말뚝거치가 완료되면 말뚝 두부까지 동일한 강사방법을 사용하여 재하시험을 위한 균질한 지반을 조성하였다. 모형말뚝과 토압계 설치 후 모형토조의 잔여부분에 대한 강사가 끝나면 토조 뚜껑을 닫고, 주어진 수직 및 수평압 조건에 해당하는 압력을 모형지반에 가하고 17시간 동안 압밀시킴으로써 모형지반내의 균질한 압력상태를 구현하였다. 표 2는 토조시험에 적용된 모형지반의 응력조건을 나타내고 있다.

본 실험에서 적용된 말뚝 및 모형지반의 조성과정은 현장타설말뚝의 설치방법을 지반상태의 측면에서 유사하게 구현한 것으로 간주될 수 있다. 항타말뚝의 경우, 기 존재하는 지반에 말뚝의 항타과정을 거침으로써 초

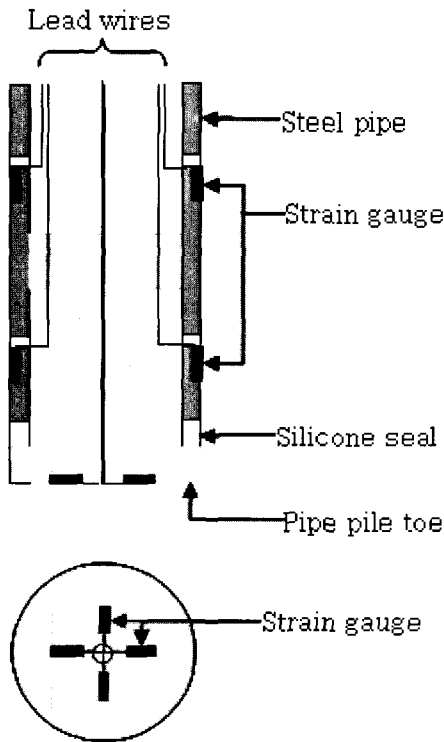


그림 3. 말뚝선단연결부

표 1. 주문진표준사의 물성치

입도분포		시료의 물성치
최대 입경 (mm)	D_{max}	0.850 (NO. 20)
최소 입경 (mm)	D_{min}	0.075 (NO. 200)
통과중량백분율 10%(mm)	D_{10}	0.41
통과중량백분율 60%(mm)	D_{60}	0.51
균등계수	C_u	1.24
곡률계수	C_c	0.97
최대 간극비	e_{max}	0.948
최소 간극비	e_{min}	0.596
최대 건조단위중량 (KN/m^3)	γ_{dmax}	16.15
최소 건조단위중량 (KN/m^3)	γ_{dmin}	13.23
비중	G_s	2.63
함수비(%)	V	0.2
통일분류	Unified System Astm D2487	SP

표 2. 모형토조실험에 적용된 모형지반의 지반조건

수직응력 (kPa)	수평응력 (kPa)	토압계수 (K_0)	상대밀도 (%)
57	40	0.70	86
100	40	0.40	86, 55
150	40	0.27	86
100	70	0.70	86
100	100	1.00	86

기조건과는 매우 상이한 지반상태로 변하게 된다. 반면, 현장타설말뚝의 경우에는 말뚝의 시공전후 지반상태의 변화가 원칙적으로 미미한 것으로 간주될 수 있으나, 말뚝직경의 증대와 시공과정상의 제한점 등으로 인해 지반응력이 다소 이완되는 현상이 나타날 수 있다. 본 실험에서 적용된 실험과정은 이러한 응력이완은 고려하지 않았으나, 그 영향은 미미한 것으로 가정하였으며 원칙적인 측면의 현장타설말뚝 시공과정을 구현한 것으로 간주하였다.

3.4 CPT 및 말뚝 재하시험

조성된 모형지반과 말뚝에 대해 연직재하시험을 수행하기 위해 그림 4와 같이 말뚝의 두부에 5톤 용량의 하중계와 유압잭을 설치하였고, 이들은 토조 뚜껑에 연결된 강봉과 반력판으로 고정되었다. 재하시험 중 말뚝의 전체지지력은 말뚝 두부에 설치된 하중계에 의하여 측정되었다. 말뚝의 하중-침하량 특성을 조사하기 위하여 말뚝의 두부에 대칭으로 2개의 LVDT를 설치하여 측정치의 평균값을 말뚝의 침하량으로 사용하였다. 재하시험 전에 모형말뚝에 부착된 모든 변형률 게이지와 하중계는 영점 조정되었으며, 재하시험이 진행되는 동안 하중계와 LVDT, 변형률 게이지의 결과는 최대 20채널 까지 측정이 가능한 데이터로거 2대를 통하여 얻어졌다. 재하시험은 각 하중단계별로 하중에 대한 변위가 충분히 수렴토록 하기 위하여 각 하중단계별로 10분 이상의 하중유지시간을 지속하도록 하였다.

말뚝재하시험에 적용된 각 모형 지반조건에 대해 CPT시험을 아울러 수행하였다. CPT시험은 동일한 강사방법과 압밀과정을 통해 모형지반을 구성한 후, 말뚝이 거치된 위치에서 토조 상부로부터 콘을 관입하여 진

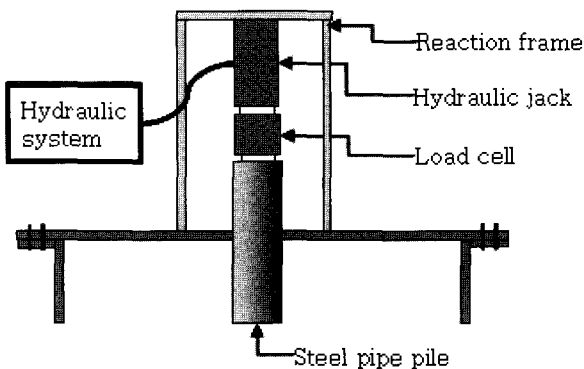


그림 4. 모형토조실험에 사용된 재하장치

행하였다. 시험에 사용된 콘은 AP Vanderberg사의 모델명 ELC2-C,C+F,10로서 직경은 1.5cm 이고 콘의 단면적은 2cm²이다. 콘의 관입을 위한 관입장치는 주문제작하였으며, 지지프레임, 유압잭, 그리고 관입로드로 구성되어 있다. 그림 5는 실험에 사용된 CPT장치를 보여주고 있다.

4. 말뚝형태에 따른 하중-침하 거동

그림 6은 토조실험으로부터 얻어진 원통형 및 테이퍼형 말뚝의 하중-침하량 곡선을 나타내고 있다. 총 12회의 말뚝재하시험 중, 그림 6에 나타난 경우는 대표적 지반상태로서, 상대밀도 55%와 86%인 모형지반조건에서의 결과이며, 적용된 응력조건은 수직압 100kPa, 수평압 40kPa로서 토압계수 $K_0 = 0.4$ 에 해당하는 값이다. 각 하중-침하량 곡선은 선단, 주면, 그리고 전체지지력 요소로 구분되어 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이, 전체지지력의 경우 원통형 및 테이퍼의 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 주면지지력과 선단지지력의 특성차이를 통해 설명되어질 수 있다. 선단지지력의 경우, 동일한 부피조건에 대해 테이퍼형 말뚝의 선단면적이 원통형보다 작게 되므로 이를 통해 전달되는 하중 또한 감소하

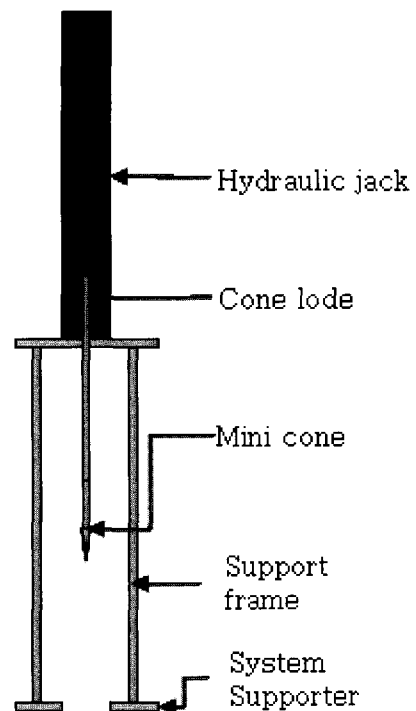


그림 5. 미니콘 관입장치

는 것으로 나타나고 있다. 반면에 주면으로 전달되는 하중의 경우, 테이퍼형 말뚝은 정량적, 정성적 측면 모두에서 원통형 말뚝에 비해 큰 지지력값을 나타내고 있다. 원통형의 경우 주면지지력은 일반적으로 말뚝지경의 1 - 2%내외에서 보여지는 한계 침하량 이후에는 말뚝표면과 주변지반사이의 미끄러짐이 발생하게 되며, 이때 최대 주면지지력이 발휘되게 된다. 테이퍼형 말뚝의 경우, 경사진 주면부의 영향으로 원통형에서 보여지는 미끄러짐 현상과 이에 상응하는 최대점이 보이고 있지 않으며, 하중증가에 따라 계속적으로 증가하는 주면마찰력의 추세를 확인할 수 있다. 따라서 말뚝주면부 경사각에 따른 주면마찰력의 증가는 선단부에서 감소된 지지력과의 상쇄효과를 가져오게 되며, 결과적으로 전체 지지력의 측면에서는 원통형 말뚝과 유사한 값을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 이와 같은 결과는 테이퍼형 말뚝이 원통형 말뚝에 비해 우수한 지지성을 보인다는 기존 연구결과(Wei and El Naggar 1998)와는 다소 상이한 것으로, 지지성능에 있어서의 조건별 차이점을 나타내고 있는 것으로 간주할 수 있다.

말뚝형태별 지지력특성을 보다 구체적으로 분석하기 위하여, 응력단위의 단위하중과 침하량의 관계로서 하중-침하량 곡선을 재도시하였다. 그림 7은 각 응력상태별 원통형 및 테이퍼형 말뚝의 단위하중-침하량 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 C와 T는 각각 원통형, 테이퍼형 말뚝을 나타낸다. 주면마찰력(q_s)의 경우 예상된 바와 같이 수평압에 민감한 것으로 나타났으며, 곡선의 형태는 그림 6과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었

다. 선단지지력(q_b)의 경우에는 단위면적에 의한 값이므로 그림 6의 하중-침하량 곡선과는 달리 테이퍼형 말뚝의 단위지지력의 크게 나타나고 있다. 전반적인 단위선단지지력의 경향은 그림에서 보는 바와 같이 수직압보다 수평압에 의해 더 크게 좌우되는 것으로 나타나고 있으며, 원통형과 테이퍼형 말뚝의 지지력차이도 유사한 경향을 보이고 있다.

5. CPT지지력 상관계수

5.1 응력상태에 따른 단위지지력의 변화추이

그림 8은 토조실험결과로부터 얻어진 원통형말뚝과 테이퍼형 말뚝의 선단지지력 및 주면마찰력과 토압계수간의 상관관계를 나타내고 있다. 주면마찰력의 경우 그림에서 보는 바와 같이 토압계수가 증가할수록 테이퍼형 및 원통형 말뚝의 주면마찰력비가 140%에서 110%로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 반면에 선단지지력의 경우, 토압계수가 증가할수록 원통형 말뚝 대비 테이퍼형 말뚝의 단위선단지지력이 90%에서 140%로 증가할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 상반된 관계는 결과적으로 전체지지력의 측면에서 원통형 말뚝과 테이퍼형 말뚝의 현저한 지지력 차이는 보이지 않는다는 것을 의미하고 있다. 그러나 선단지지력 및 주면마찰력의 개별적 요소 측면에서는, 말뚝시공 및 지반조건에 따라 발휘될 수 있는 지지력의 효율성이 달라질 수 있으며, 이는 말뚝설계 시 고려되어야 하는 요소로 판단된다. 즉, 선단지지

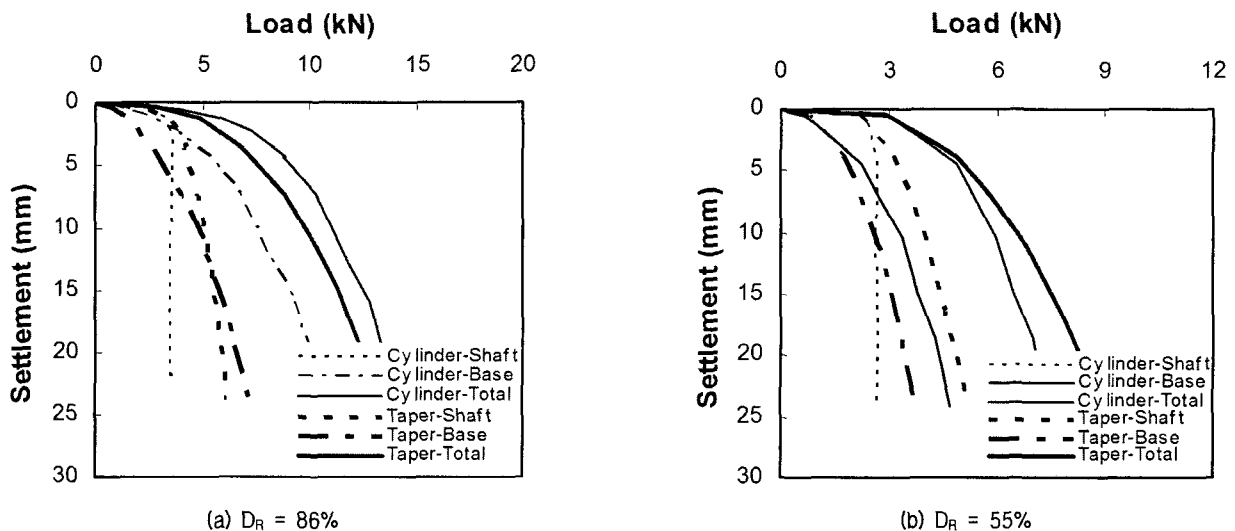
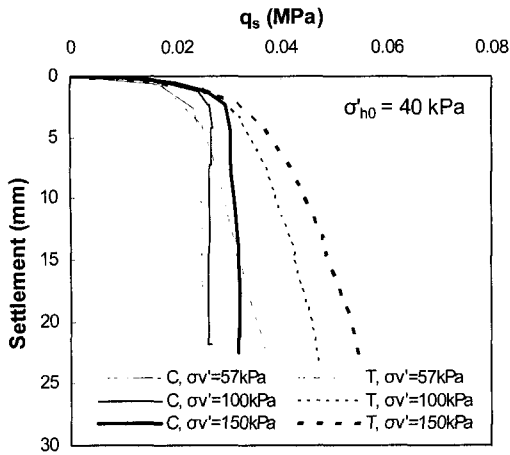
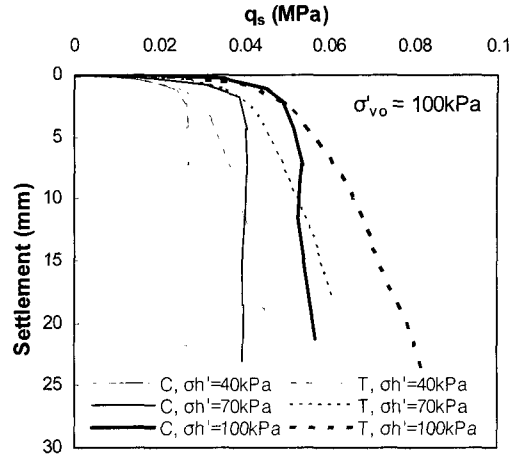


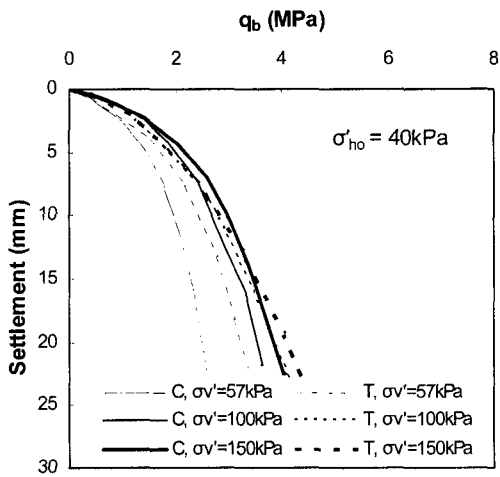
그림 6. 토조실험으로부터 얻어진 원형말뚝과 테이퍼말뚝의 하중-침하량 곡선



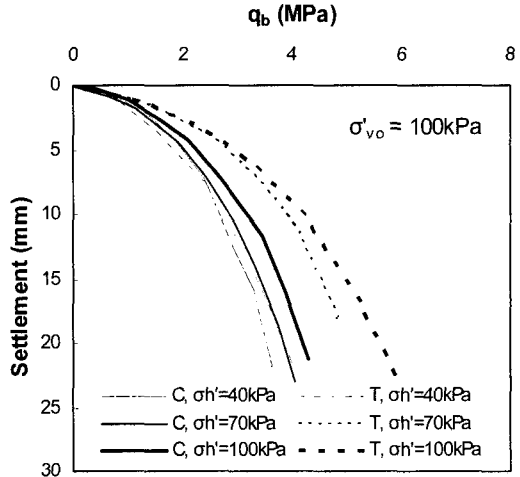
(a) 수직압의 변화에 따른 단위주면마찰력



(b) 수평압의 변화에 따른 단위주면마찰력

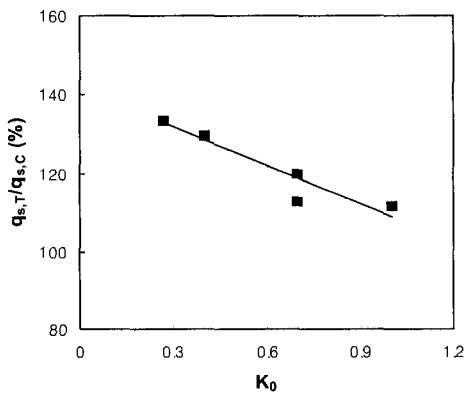


(c) 수직압의 변화에 따른 단위선단지력

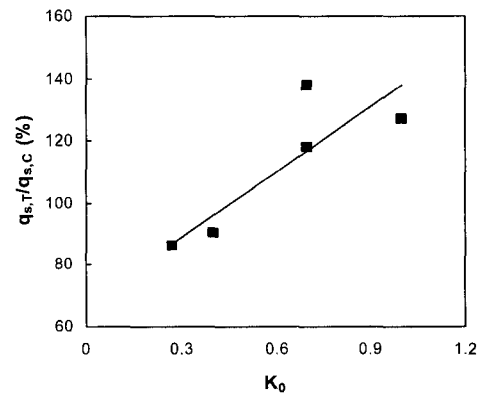


(d) 수평압의 변화에 따른 단위선단지력

그림 7. 토조실험으로부터 얻어진 단위하중-침하량 곡선



(a) 단위주면마찰력



(b) 단위선단지력

그림 8. 말뚝형태 및 토압계수에 따른 선단지력과 주면마찰력

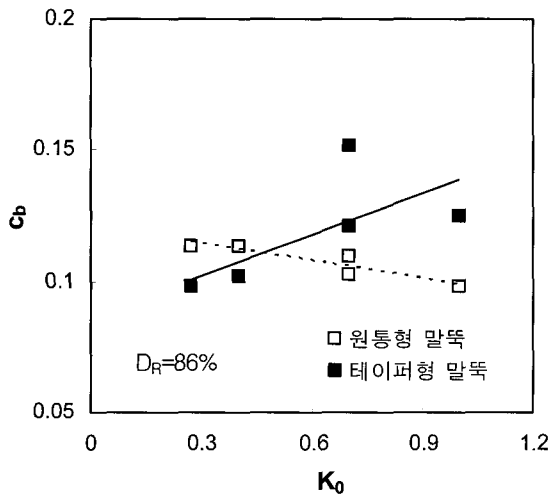
력의 발휘를 거의 고려하지 않는 경우에는 주면마찰력에 대해 우수한 지지능을 보여주는 테이퍼형 말뚝이

유리할 수 있으나, 그 효율성의 정도는 지반의 응력상태에 따라 설계에 반영되어져야 한다.

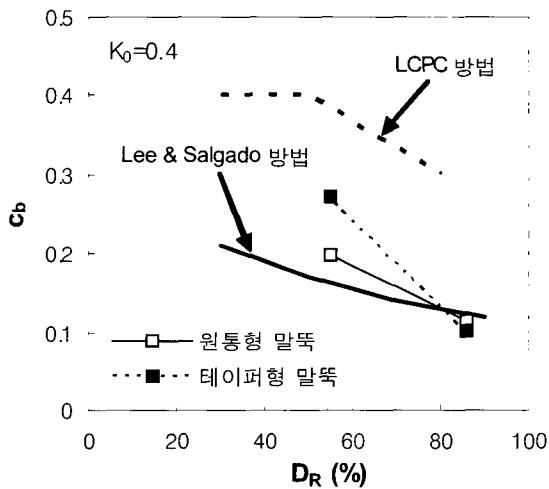
5.2 단위선단지지력에 대한 CPT지지력 상관계수

그림 9는 위에서 도출된 결과를 바탕으로 콘지지력과 말뚝의 단위선단지지력간의 상관관계수 c_b 값을 나타내고 있으며, 사질토 지반의 거동에 있어 중요한 영향변수인 응력상태(즉, 토압계수 K_0)와 상대밀도에 따른 변화추이를 나타내고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 기존 대부분의 방법에서 정의된 c_b 값은 말뚝형태와 관련된 영향인자는 반영되어 있지 않다. 본 논문에서 도출된 결과에 의하면, 말뚝의 형태가 원통형에서 테이퍼형으로 변환됨에 따라 c_b 값은 증가하는 것으로 나타났으므로, 그림 9(a)의 결과에 근거하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{c_{b,t}}{c_{b,c}} = 0.7 \cdot (K_0 + 1) \quad (3)$$



(a) 토압계수 K_0 에 따른 c_b 값의 변화



(b) 상대밀도에 따른 c_b 값의 변화

그림 9. 토압계수 및 상대밀도에 따른 CPT-선단지지력 상관계수 c_b

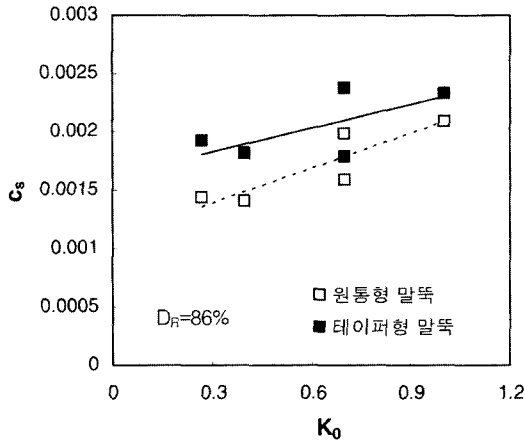
여기서, $c_{b,t}$ = 테이퍼형 말뚝에 대한 CPT지지력 상관계수, $c_{b,c}$ = 원통형 말뚝에 대한 CPT지지력 상관계수, 그리고 K_0 = 지반의 토압계수이다. 그림 8 및 식(3)에서 고려된 테이퍼경사각은 1도로 설정되었으므로 이보다 작은 경사각의 경우에는 근사적으로 내삽법이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9(a)는 토압계수 K_0 에 따른 c_b 값의 변화를, 그리고 그림 9(b)는 상대밀도에 따른 c_b 값의 변화추이를 나타내고 있다. 기존 연구결과에 의하며, c_b 값은 상대밀도가 증가할수록 감소하는 것으로 관찰되어 왔다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서도 전반적으로 LCPC 방법이나 Lee와 Salgado 방법(Lee and Salgado 1999) 등, 기존의 연구결과에 부합하는 경향이 나타났으나, LCPC 방법은 실측값에 비해 과다하게 큰 c_b 값을 정의하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 테이퍼형 말뚝에서는 c_b 값의 감소정도가 원통형 말뚝보다 더 큰 것으로 나타나고 있다. 반면 조밀한 지반상태, 즉 본 연구에서 고려된 상대밀도 86%에서는 원통형 말뚝과 테이퍼형 말뚝에서의 c_b 값차이가 미미한 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 동일한 말뚝부피를 고려하였을 때, 상대밀도가 큰 지반에서는 테이퍼말뚝의 지지력으로부터 얻을 수 있는 현격한 지지성능 향상의 효과는 얻을 수 없음을 의미하고 있다.

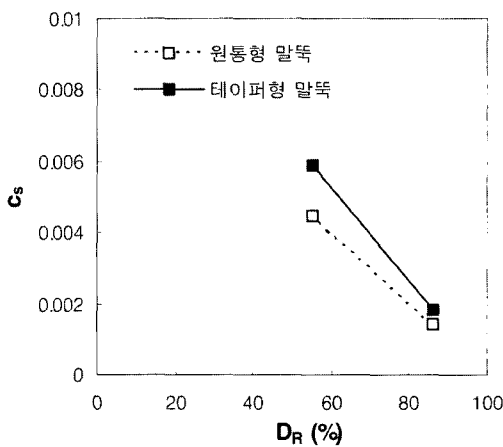
5.3 주면마찰력에 대한 CPT지지력 상관계수

그림 10은 토압계수와 상대밀도의 변화에 따른 원통형 및 테이퍼형 말뚝의 주면마찰력에 대한 CPT지지력 상관계수 c_s 값의 변화추이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 테이퍼형 말뚝에 대한 c_s 의 절대적 값이 원통형 말뚝에서 보다 큼을 알 수 있으나, 두 가지 경우 모두에서 K_0 값이 증가할수록 c_s 값이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 보다 정확한 추세는 추가적인 실험 결과가 필요할 것으로 보이나, 일반적인 기초지반에서 관찰되어지는 토압계수의 범위를 0.3에서 최대 1.0 정도로 간주했을 때, 테이퍼형 말뚝에 대한 c_s 값은 원통형 말뚝에 비해 약 30%정도 큰 값으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

c_s 값과 상대밀도에서의 경우는 선단지지력에 관련된 c_b 값의 경우와 마찬가지로, 상대밀도가 증가할수록 c_s 값은 감소하고 있음을 알 수 있으며, 테이퍼형 말뚝에서 다소 큰 감소정도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같



(a) 토압계수 K_0 에 따른 C_s 값의 변화



(b) 상대밀도에 따른 C_s 값의 변화

그림 10. 토압계수 및 상대밀도에 따른 CPT-주면마찰력 상관계수 C_s

은 결과는 상대밀도가 큰 지반의 경우 주면마찰력의 효율이 다소 감소하게 된다는 사실을 보여주고 있으며, 경사각을 가진 테이퍼형 말뚝의 경우 더 큰 감소율을 고려하여 설계에 반영해야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 토조에 실시된 모형말뚝 재하실험과 콘관입실험을 통하여, 말뚝형태별 지지력 특성분석과 CPT지지력 상관계수 평가에 관련된 연구를 수행하였다. 고려된 말뚝의 형태는 일반적인 현장타설말뚝에 적용되는 원통형 말뚝과 선단으로 갈수록 직경이 감소하는 테이퍼형 말뚝이 고려되었다. 본 연구는 궁극적으로 강관주 송전탑의 기초구조물 형식개발과 설계기준 수립을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 토사지반에서의 기초형식별 거동과 지반상태의 영향 등을 중점적으로 살펴보았다. 본 논문을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝 토조실험을 통해 나타나 결과에 의하면, 원통형 및 테이퍼형 말뚝의 전체지지력의 차이는 크지 않았으나, 개별 지지력요소의 거동은 말뚝형태별로 상이한 것으로 나타났다. 선단지지력의 경우, 동일한 부피조건에 대해 테이퍼형 말뚝의 선단면적이 원통형보다 작게 되므로 이를 통해 전달되는 하중 또한 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 주면으로 전달되는 하중의 경우, 테이퍼형 말뚝은 정량적, 정성적 측면 모두에서 원통형 말뚝에 비해 큰 지지력값을 나타냄을 확인할 수 있었다.
- (2) 단위하중과 침하량의 관계를 살펴보면, 주면마찰력의 경우 수평압에 민감한 것으로 나타났으며, 곡선의 형태는 하중-침하량관계와 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 선단지지력의 경우에는 단위면적에 의한 값이므로 하중-침하량 곡선과는 달리 테이퍼형 말뚝의 단위지지력의 크게 나타나고 있었다. 또한 전반적인 단위선단지지력의 경향은 수직압보다 수평압에 의해 더 크게 좌우되는 것으로 나타났으며, 원통형과 테이퍼형 말뚝의 지지력차이도 유사한 경향을 보이고 있었다.
- (3) 응력상태에 따른 주면마찰력의 경우, 토압계수가 증가할수록 테이퍼형 및 원통형 말뚝의 주면마찰력비가 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 반면에 선단지지력의 경우, 토압계수가 증가할수록 원통형 말뚝 대비 테이퍼형 말뚝의 단위선단지지력이 증가할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 말뚝시공 및 지반조건에 따라 발휘될 수 있는 말뚝형태별 지지력의 효율성이 달라질 수 있음을 의미하며, 이는 말뚝설계시 고려되어야 하는 요소로 판단된다.
- (4) 토조실험결과와 동일한 지반조건에 대해 수행된 CPT결과를 통해 말뚝지지력과 콘지지력의 관계를 나타내는 CPT지지력 상관계수의 변화추이를 도출하였다. CPT상관계수는 원통형 및 테이퍼형 말뚝 형태를 비교함으로써 나타내었으며, 선단지지력과 주면마찰력의 요소별 변화추이를 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 “가공송전용 강관주 철탐기 초 설계기준 수립연구” 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국전력 (2006), 가공송전용 강관주 철탐기초 설계기준 수립연구, 한국전력.
2. 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*, Buenos Aires, Vol.1, pp.367-376.
3. 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.
4. Lee, J. and Salgado, R. (1999), "Determination of pile base resistance in sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.8, pp.673-683.
5. Philipponnat, G. (1980), "Methode pratique de calcul d'un pieu isole a l'aide du penetrometre statique", *Revue Francaise de Geotechnique*, Vol.10, pp.55-64.
6. 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.
7. Rybnikov, A.M (1990), "Experimental investigations of bearing capacity of bored-case-in-place tapered piles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.27, pp.48-51.
8. Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design", U.S. Department of Transportation, FHWA-TS-78-209.
9. 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.

(접수일자 2006. 9. 14, 심사완료일 2007. 4. 9)