

말뚝형태 및 지반조건에 따른 현장타설말뚝의 수평지지력 평가

Evaluation of Lateral Load Capacity of Drilled Shafts with Pile Shape and Soil Conditions

이 준 환¹ Lee, Jun-Hwan

백 규 호² Paik, Kyu-Ho

김 대 홍³ Kim, Dae-Hong

황 성 옥⁴ Hwang, Sung-Wuk

김 민 기⁴ Kim, Min-Kee

Abstract

In this study, experimental analysis was performed about lateral load capacity and behavior of laterally loaded-bored piles for soil conditions and pile shape, i.e. cylindrical and taper piles. Also, Calibration chamber load tests were performed for cylindrical and taper piles considering the variations of relative densities and restraint stresses. According to the results of chamber tests, it was found that, while both vertical and horizontal stresses affect load-responses and ultimate lateral load capacity of laterally loaded piles, effect of the horizontal stress was larger than that of the vertical stress. Effect of lateral load capacity and behavior was relatively small compared to relative density and stress state of soils surrounding piles, but showed a little difference for soil conditions. From comparison between predicted and measured lateral load capacity, it was observed that predicted results differ significantly from measured results. This is mainly due to the fact that the effect of horizontal stress is not considered in the conventional prediction methods.

요 지

본 연구에서는 현장타설말뚝을 대상으로 지반조건 및 말뚝형태에 따른 수평지지력과 수평거동에 대하여 실험적 분석을 실시하였다. 이를 위해 가압토조실험을 수행하였으며 상대밀도와 지반응력의 변화를 고려하여 원통형과 테이퍼형 말뚝에 대해 재하시험을 수행하였다. 토조실험결과, 수직응력과 수평응력은 모두 말뚝의 수평거동 및 극한수평 지지력에 영향을 나타내는 것으로 관찰되고 있으나, 수평응력의 영향이 보다 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 상대밀도 또한 수평거동 및 지지력에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있었다. 수평거동에 대한 말뚝형태의 영향은 지반상태에 따라 다소간의 차이가 보이고 있으나, 전반적으로 지반응력이나 상대밀도와 같은 지반특성치에 의한 영향에 비해서는 작게 나타나고 있었다. 기존 예측식을 이용한 비교분석 결과, 기존의 예측식에 의해 산정된 결과는 실측된 결과와 상당한 차이를 보이고 있었으며, 이는 지지력 산정시 수평응력의 변화량이 고려되어 있지 않았기 때문임을 알 수 있었다.

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

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

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

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

말뚝의 수평지지력은 연직압축 및 인발지지력과 더불어 말뚝설계에 있어 매우 중요한 지지력 요소이다. 연직압축지지력은 초고층 건물과 같이 상부구조물의 규모가 큰 경우, 구조물의 안정성을 지배하는 핵심지지력 요소로 간주될 수 있는 반면, 수평지지력은 대부분 풍하중이나 차량충돌하중 등의 일시하중에 대응하는 지지력 요소로서 포함될 수 있다. 특히 최근 들어 적용사례가 증가하고 있는 가공송전용 강관주 철탑기초의 경우, 상부구조물에 의한 사하중의 크기가 일반 대형구조물에 비해 상대적으로 작으며, 풍하중 및 케이블하중에 의한 수평하중이 지배적인 하중요소이므로, 적절한 수평지지력의 평가 및 확보는 구조적 안정성 및 기능성 확보를 위해 핵심적인 설계고려사항에 포함된다.

말뚝의 수평거동 해석 및 지지력 평가는 안전율의 적용을 전제로 극한수평지지력을 산정하여 설계에 반영하는 방법과 구조물별 허용변위를 토대로 지지력을 평가하는 방법으로 구분될 수 있다. 해석적 측면에서의 극한수평지지력은 지반 혹은 말뚝 자체의 파괴상태를 가정하여 산정될 수 있으며, 이를 위해 지금까지 다양한 방법들이 제안되어 왔다(Broms, 1964; Reese et al., 1974; Fleming et al., 1992; Zhang et al., 2005). 대부분의 수평지지력 평가방법들은 지반의 소성평형상태를 기반으로 유도되어 왔으나, 구체적인 지반응력상태나 상대밀도의 영향 등과 같은 지반조건 고려가 반영되어 있지 않아, 방법별 지지력 산정결과 또한 상당한 차이를 보이고 있으며

아직까지도 많은 불확실성을 포함하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 사질토 지반에 근입되어 있는 현장타설말뚝을 대상으로 다양한 지반조건에 따른 수평거동 및 지지력 평가에 대해 알아보려고 한다. 이를 위해 가압토조를 이용하여 사질토지반에 근입되어 있는 현장타설말뚝의 설치과정을 모사하였으며, 설치된 말뚝에 대해 재하실험을 수행하였다. 다양한 지반조건 변화를 반영하기 위해 사질토지반에서 기초거동의 중요한 영향인자인 상대밀도와 지반응력을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 아울러 수평지지력 확보를 위한 보다 효과적인 기초형식을 평가하기 위해 원통형 및 테이퍼형 말뚝을 각각 모형실험에 적용하였으며, 각각의 경우에 대해 지지성능을 비교분석하였다.

2. 말뚝의 극한수평지지력 평가

말뚝의 수평지지력 평가를 위해서는 수평변위에 따른 단위수평지지력의 크기와 분포형태가 결정되어야 하며, 이들 요소가 결정되면 힘평형 관계로부터 말뚝에 가해질 수 있는 최대 수평하중이 결정될 수 있다. 일반적으로 수평하중을 받는 말뚝은 장말뚝과 단말뚝으로 구분될 수 있으며, 이러한 구분은 기하학적 의미의 말뚝 길이보다는 최대수평하중에 의한 파괴의 주체가 말뚝 주변지반인지 아니면 말뚝 그 자체인지에 따라 결정된다. 수평하중 혹은 말뚝의 수평변위에 따른 주변지반의 단위수평지지력의 분포는 극한수평지지력 평가를 위해 핵심적인 사항이나, 그림 1에 나타난 바와 같이 매우 다

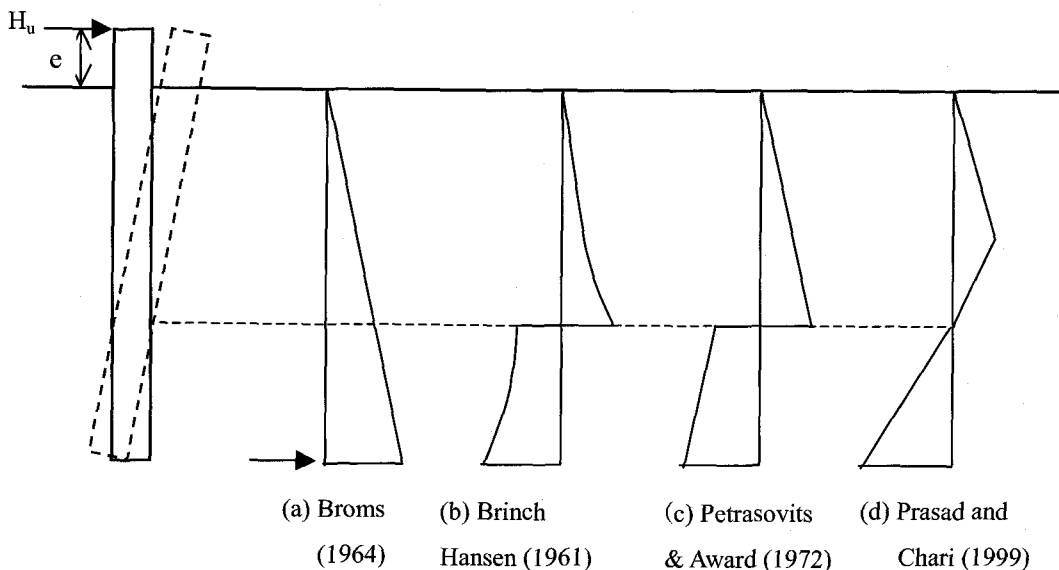


그림 1. 수평하중을 받는 말뚝에 작용하는 단위수평지지력의 분포

양한 형태로 제안되어 왔으며, 동일 조건이라 할지라도 각 방법 별 결과 또한 상당한 차이를 보이고 있다.

그림 1에 나타난 토압분포 중 실무에 보편적으로 적용되어온 방법은 그림 1(a)의 Broms(1964)에 의해 제안된 방법이다. 그림에서 보는 바와 같이 단말쪽에 대한 Broms의 방법은 수평변위분포에 따른 말뚝의 회전점이 말뚝선단부근에 위치한다고 가정하고 있으며, 말뚝선단부에는 집중하중이 작용하는 것으로 하여, 말뚝변위의 회전점은 고려하지 않고 있다. 그러나 실제 대부분의 실측결과에 의하면(Zhang et al., 2004), 수평하중하의 말뚝은 하단부의 특정지점을 중심으로 토압분포의 역전현상이 발생하는 것이 일반적이며, 이 경우 수평지지력의 평가를 위해서는 말뚝 회전점의 위치가 정의되어야 한다.

단위수평지지력의 분포와 더불어 크기 또한 지지력 평가를 위한 핵심적인 사항이다. Broms(1964)에 의하면 사질토지반에서 수평하중을 받는 말뚝에 대한 지반의 단위수평지지력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_u = 3 \cdot K_p \cdot \gamma \cdot z \quad (1)$$

여기서 p_u = 말뚝주변 사질토지반에 의한 단위길이당 극한수평지지력; K_p = 수동토압계수; γ = 주변지반의 단위중량; z = 지표면으로부터의 깊이이다. 식 (1)에 의해 결정되는 단위수평지지력과 그림 1(a)의 삼각형분포를 가정하면, 말뚝두부에 가해질 수 있는 최대수평하중 혹은 극한수평지지력 P_h 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_h = \frac{\gamma B L^3 K_p}{2(e+L)} \quad (2)$$

여기서 B = 말뚝직경, e = 지면으로부터 재하지점까지의 높이, L = 말뚝의 묻힌 깊이이다. 식 (1)과 더불어 Brinch-Hasen(1961)과 Barton(1982)에 의해 제안된 극한수평토압식 또한 실무에서 빈번히 사용되고 있는 방법이다. Brinch-Hasen(1961)은 토압이론에 근거하여 단위수평지지력과 상재압간의 관계를 정의하는 상관계수 K_q 를 제안하여 지반의 내부마찰각과 깊이의 함수로 나타내었으며, Barton(1982)는 수평하중을 말뚝주변의 토압은 유효상재하중과 수평토압계수 K_p 의 제곱에 비례한다는 가정 하에 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$p_u = K_p^2 \cdot \gamma \cdot z \quad (3)$$

일반적으로 Broms(1964)에 제안된 식 (1)은 Brinch-Hasen(1961)나 Barton(1982) 방법에 비해 다소 보수적인 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(Poulus and Davis, 1980). 이외에 Reese et al.(1974)은 깊이에 따라 상이하게 나타나는 극한수평토압식을 제안하였으나, 이 역시 근사적인 방법으로 간주되고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 말뚝의 극한수평지지력 결정을 위한 단위수평지지력의 분포와 크기는 아직까지 엄밀한 평가방법이 존재하지 않으며, 실험결과를 토대로 한 경험적 방법이 주를 이루고 있다. 또한 대부분의 평가법이 유효 상재압과 수동토압계수의 적용을 토대로 하고 있어 말뚝형태 및 지반응력상태와 같은 세부지반조건은 고려되어 있지 않다. 특히 지반응력상태의 경우, 수평토압의 크기는 마찰각만의 함수로 표현되는 수동토압계수와 유효상재응력으로만 주어지게 되므로, 다양하게 나타날 수 있는 지반의 수평토압에 대한 변화는 고려되어 있지 못하다.

3. 가압토조를 통한 현장타설말뚝의 수평재하시험

3.1 가압토조를 이용한 모형지반 구현

본 연구에서 대상으로 하고 있는 현장타설말뚝의 수평거동 및 지지력을 알아 보기 위하여, 가압토조를 이용한 모형수평말뚝재하시험을 실시하였다. 본 연구에서



그림 2. 실험에 사용된 가압토조

사용된 토조는 그림 2에 나타난 바와 같이 직경 77cm, 높이가 121cm의 모형지반이 조성되는 용기와 일정한 조건 하에서 용기 내부에 건조모래를 낙하시켜서 모형지반을 조성하기 위해 필요한 강사장치를 구분된다. 본 실험에서는 강사장치의 낙하고와 모래유출량을 조절하여 계획된 지반의 상대밀도를 조절하였으며, 모형지반 조성 전에 여러 번의 시행착오를 통하여 상대밀도 86%와 55%에 해당하는 낙차고와 유출구멍의 크기를 결정하였다.

본 실험에서는 모형지반의 응력상태를 구현하기 위하여 응력조절법이 채택되었다. 이를 위하여 토조의 밑면과 측면에 두 개의 고무막을 설치하고, 각기 다른 압력조절기를 통해 밑면과 옆면의 공기압을 독립적으로 조절할 수 있도록 하였다. 따라서 모형지반에 가해지는 수평응력은 측면의 고무막을 통한 압력으로 조절이 가능하며, 수직응력은 밑면에 부착되어 있는 고무막에 압력을 가함으로써 조절이 가능하다. 각기 다른 수직과 수평응력에 의해 다양한 깊이에서 발생할 수 있는 다양한 정지토압계수(K_0)를 갖는 지반을 구현할 수 있게 하였다.

실험에 사용된 모래는 주문진 표준사이며, 모형지반의 조성을 위해 강사법을 사용하여 먼저 10cm씩 5회 모래를 강사한 후에 모형말뚝을 중앙에 설치하였다. 이때 모래 위에 놓여진 말뚝이 연직상태를 유지할 수 있도록 사전에 제작된 보조 프레임을 사용하였다. 사질토지반을 모사하기 위해 모형토조 내에 모래의 강사를 실행하였으며, 그 과정에서 말뚝을 설치하기 위해 말뚝선단상부지반과 말뚝선단하부지반으로 구분하여 지반을 구성하였다. 우선 모래를 일정한 상대밀도 조건에 맞추어 강사시키면서 말뚝선단하부지반을 조성하고, 그 위에 모형말뚝을 보조프레임을 사용하여 연직으로 설치하였다. 그 후 중앙부에 말뚝직경과 동일한 크기의 삼입구가 존재하는 강사체를 사용하여 강사높이를 일정하게 유지하였으며, 여러 차례의 실험을 통하여 모형지반의 균질성을 확인하였다. 말뚝선단 상부지반을 조성하는 과정에는 말뚝 주위에 토압계를 설치하여 말뚝주변에 발생하는 토압을 측정하였다. 모형말뚝과 토압계 설치 후 모형토조의 잔여부분에 대한 강사가 끝나면 토조 뚜껑을

닫고, 주어진 수직 및 수평압 조건에 해당하는 압력을 모형지반에 가하고 17시간 동안 압밀시킴으로서 모형지반내의 균질한 압력상태를 구현하였다. 표 1은 토조 실험에 적용된 모형지반의 응력조건을 나타내고 있다.

3.2 모형말뚝 및 수평재하장치

본 연구에서 진행된 실험은 천공말뚝을 모형화한 방식으로, 실험에 사용된 말뚝은 짧은 강관말뚝의 거동을 고려하여 제작되었다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 지반을 형성하는 경우, 말뚝을 거치한 후 말뚝선단상부지반을 형성하기 때문에 말뚝 주변지반의 교란이나 배토가 발생하지 않으며, 강관말뚝 내에 플러그가 발생하지 않는다. 이러한 형성조건은 사질토지반을 모사한 모형토조 내에 설치되는 무배토말뚝을 형상화한 것으로 판단할 수 있으며, 이는 현장타설말뚝 중 천공말뚝을 모사할 수 있다.

본 실험에서는 말뚝형태의 영향을 알아보기 위해 부피는 동일하고 형태가 다른 두 개의 말뚝이 사용되었다. 실험에 사용된 모형말뚝들의 제원 및 변형율게이지의 위치는 그림 3에 나타나 있다. 말뚝의 형태는 일반적인 원통형 형태와 선단쪽으로 갈수록 직경이 줄어드는 테이퍼 형태가 고려되었으며, 재질은 모두 강재이다. 테이퍼형 말뚝은 말뚝주변의 테이퍼 경사각이 1도로 구성되어 있으며, 원통형 말뚝은 보편적으로 적용되는 현장타설말뚝의 형태를 모사하도록 제작되었다. 원통형 말뚝은 직경

표 1. 토조실험에 적용된 지반조건

D_R (%)	86					55
σ'_{v0} (kPa)	57	150	100	100	100	100
σ'_{h0} (kPa)	40	40	40	70	100	40
K_0	0.7	0.27	0.4	0.7	1.0	0.4

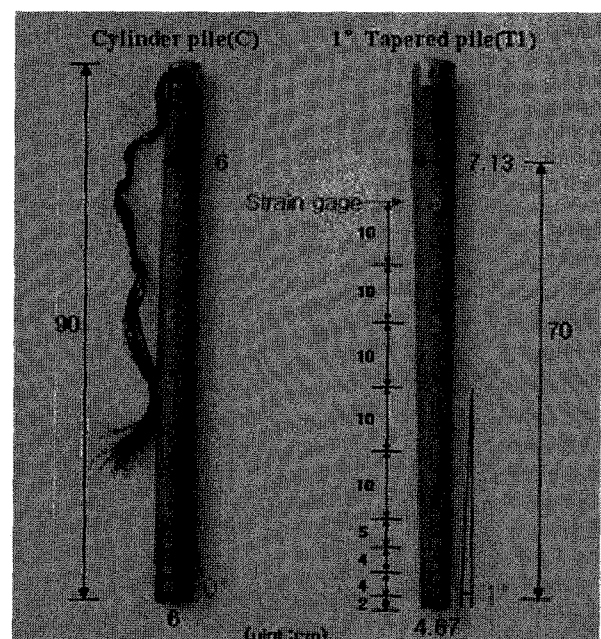


그림 3. 원형말뚝과 테이퍼말뚝의 제원

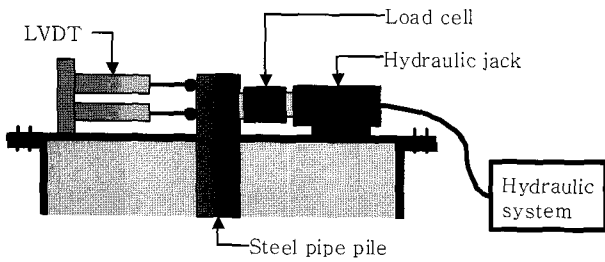


그림 4. 토조실험에 사용된 수평재하장치

6cm, 길이 90cm로 제작되었으며, 테이퍼형 말뚝의 경우 두부직경 7.13cm, 선단직경 4.6cm로서 평균직경은 원통형 말뚝과 동일하며, 길이 또한 90cm로서 동일하다.

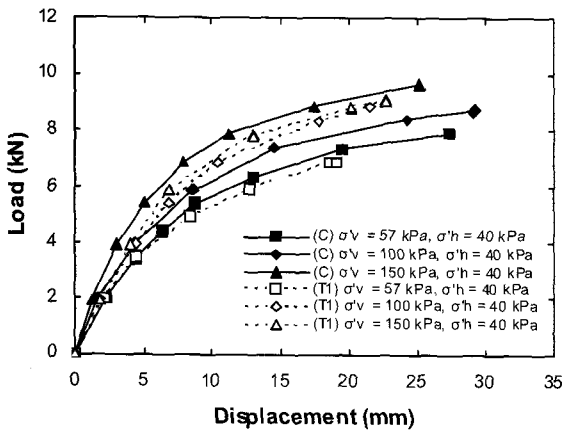
수평재하시험을 위해 제작된 재하장치는 그림 4에서 보는 바와 같이 토조상단면에서 10cm 위에 자체 제작된 버팀보와 함께 설치되었다. 수평재하장치는 일반적인 수직재하장치와 유사한 구성으로 이루어져 있으며, 유압잭과 로드셀을 포함하게 된다. 재하과정 중 발생하는 수평변위의 측정을 위해 재하지점의 반대편에 LVDT를

설치하였고, 하중 단계별 말뚝의 경사도를 측정하기 위하여 9cm 상부지점에 추가적인 LVDT를 설치하였다. 수평재하를 위한 하중증분은 2kN으로부터 시작하여 변위량이 증가함에 따라 각 하중단계별로 감소시켜 나갔으며, 말뚝두부의 전체 변위량이 약 2cm 에 이를 때까지 재하시험을 지속하였다.

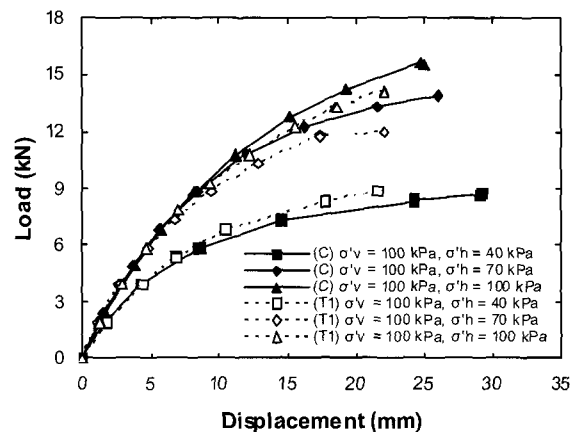
4. 수평하중-변위량 거동 및 영향요소

4.1 지반응력상태 및 상대밀도에 의한 영향

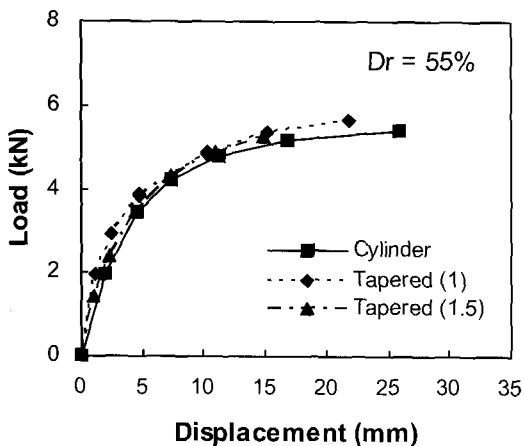
그림 5는 토조실험으로부터 얻어진 원통형 및 테이퍼형 말뚝에 대한 수평하중-변위곡선을 나타내고 있다. 사질토 지반의 경우 기초구조물의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자는 응력조건과 상대밀도이므로, 그림 5에서 수직응력, 수평응력 및 상대밀도의 변화량에 대한 하중-변위량 곡선을 별도로 나타내었다. 그림 5(a)의 경우,



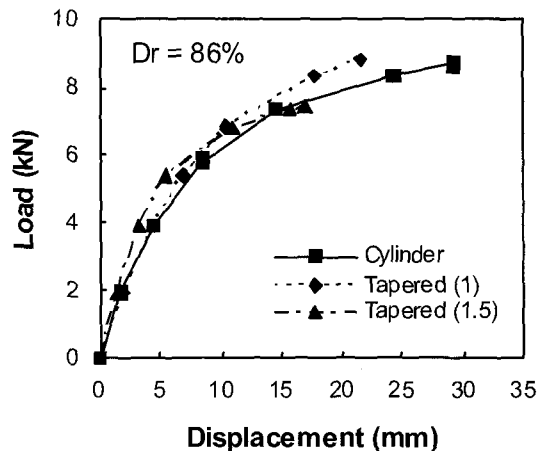
(a) 수평응력이 40 kPa 인 경우



(b) 수직응력이 100 kPa 인 경우



(c) DR=55%인 경우



(d) DR=86%인 경우

그림 5. 수평재하시험을 통해 얻어진 하중-변위곡선

초기수평응력이 40kPa로 고정된 상태에서 초기수직응력이 각각 57, 100, 150kPa에서의 하중-변위량 곡선을 나타내고 있으며, 그림 5(b)의 경우, 초기 수직응력 100kPa에 대해 초기 수평응력이 40, 70, 100으로 변화할 경우의 수평하중-변위량 곡선을 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 각 응력상태에 해당하는 정지토압계수 K_0 의 값은 각각 0.7, 0.4, 0.27이며 그림 5(b)의 응력상태에 해당하는 K_0 값은 각각 0.4, 0.7, 1.0이다. 그림 5(c)와 (d)는 각각 상대밀도 55%와 86%인 경우에 있어서의 실린더 및 테이퍼말뚝에 대한 하중-변위량 곡선을 나타내고 있으며, 응력상태는 두 가지의 상대밀도에 대해 동일하게 수직 및 수평응력이 각각 100kPa와 40kPa를 기준하고 있다. 본 연구에서 고려된 토압계수 1.0은 일반적인 토압계수인 0.4 뿐만 아니라, 수평토압의 영향을 보다 광범위하고 구체적으로 살펴보기 위해 포함하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이, 하중이 가해지기 전 초기 상태에서의 수직응력과 수평응력은 모두 말뚝의 수평 거동에 영향을 나타내는 것으로 관찰되고 있으나, 수평 응력의 영향이 보다 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 상대밀도 또한 수평거동 및 지지력에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 앞서 살펴본 바와 같이 기존의 말뚝의 수평지지력 평가가 수동토압계수와 유효상재압력의 함수로 이루어지는 것에 반해, 현장 지반응력상태를 나타내는 정지토압계수 및 초기수평응력도 수평지지력 평가에 고려되어야 하는 요소임을 의미하고 있다.

4.2 말뚝형태에 따른 극한수평지지력

그림 5에서 보는 바와 같이 수평거동에 대한 말뚝형태의 영향은 지반상태에 따라 다소간의 차이가 보이므로, 전반적으로 지반응력이나 상대밀도와 같은 지반특

성치에 의한 영향에 비해서는 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 테이퍼형 말뚝의 지지성능 효율이 동일한 부피에 상응하는 원통형 말뚝에 비해 우수하다는 기존 연구결과(EI Nagggar and Wei, 1998)와는 다소 상이한 경향을 나타내는 것으로 보일 수 있으며, 이러한 차이점의 주된 요인 중 하나는 실험조건의 차이로 판단된다. EI Nagggar and Wei(1998)에 의한 실험의 경우, 본 연구와 동일하게 가압토조와 모형말뚝을 통해 시험이 이루어졌으나, 초기지반응력 구현을 위한 토압의 적용 시 측면부에 부착된 멤브레인을 통해서만 이루어져 상부 및 하부 경계면을 통해 작용되는 수직응력은 정지토압계수에 의해 결정되도록 하였다. 이러한 과정은 수평응력의 증가와 상하부면의 무변위조건에 의해 초기지반응력을 구현하게 되므로 정지토압계수 K_0 의 값은 1 이상으로 나타나게 되어 실제 지반응력상태와는 많은 차이를 보이게 된다. 결과적으로 테이퍼말뚝의 지지성능이 정지토압계수의 영향을 받는다면 이를 통해 얻어진 결과는 다소의 왜곡성을 포함할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 얻어진 결과와도 상이할 수 있음을 나타내고 있다.

지반조건별 극한수평지지력의 변화추이를 보다 구체적으로 분석하기 위해 하중-변위량 곡선을 토대로 각각의 경우에 대해 극한수평지지력을 평가하였으며, 이를 각 지반조건의 변화에 따라 비교 분석하였다. 극한수평지지력은 소성상태를 나타내는 지반의 영향범위가 연직지지력에 비해 크며 파괴의 정의가 명확하지 않으므로, 극한수평지지력의 평가 및 결정을 위한 절대적 기준이 제시되어 있지는 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 Meyerhof et al.(1981)와 Chari and Meyerhof(1983)방법을 채택하여 적용하였다. Meyerhof et al.(1981)방법은 수평하중-변위량 곡선에서 전반부의 비선형 침하곡선 이후에 나타나는 직선부의 시작점에 해당하는 하중을 극한지지력으로 결정하고 있다.

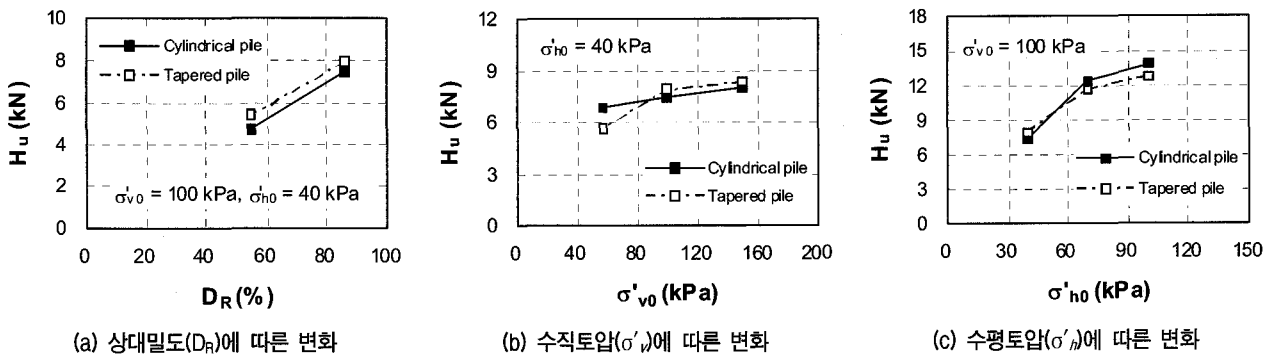


그림 6. 지반조건에 따른 극한수평지지력의 변화

그림 6은 상대밀도(D_R), 정지토압계수(K_0), 수직토압(σ'_v), 수평토압(σ'_h)에 따른 극한수평지지력의 변화추이를 나타내고 있다. 그림 6(a)의 경우, 수직 및 수평응력이 100, 40 kPa에 대한 결과이며, 그림 6(b)와 (c)의 경우 수평 및 수직응력이 각각 40 및 100 kPa에 대한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝형태에 따른 극한수평지지력은 경우에 따라 다소간의 차이가 발견되고 있으나, 전반적인 추세는 유사한 것으로 나타나고 있다. 또한 극한수평지지력의 증대효과는 수직응력보다는 수평응력의 증가량에 보다 민감하게 변화하는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 그림 6의 결과의 종합해 보면, 말뚝의 극한수평지지력은 상대밀도와 수평응력이 핵심영향인자로 작용하는 것으로 나타나고 있으며, 수직응력의 영향은 상대적으로 작은 것임을 알 수 있다.

5. 극한수평지지력의 예측방법에 따른 비교

본 연구에서 수행된 토조실험으로부터 얻어진 극한수평지지력과 비교를 위해 그림 1(d)에 나타난 Prasad와 Chari(1999)의 단위수평지지력의 분포형태를 기반으로 하여, Broms(1964)와 Barton(1982)에 의해 제안된 최대수평지지력을 적용하여 극한수평지지력을 평가하였으며, 이를 실측결과와 비교, 분석하였다. 그림 1에 나타난 토압분포 중 Prasad와 Chari(1999)의 토압분포가 사용된 이유는 비교적 최근에 연구된 결과이며, 실측된 토압분포와 유사하다는 연구결과가 발표되어 왔기 때문이다(Zhang et al. 2005). Prasad와 Chari(1999)에 의하면 수평하중을 받고 있는 말뚝에 작용하는 단위수평지지력은 말뚝형상의 영향을 받게 되며, 원형말뚝의 경우 변위방향의 중심에서 최대값을 보이고 말뚝원주를 따라 감소하는 토압분포를 나타내게 되는 것으로 관찰되었다. 따라서 말뚝단면의 위치에 따른 단위수평지지력의 변화를 고려하기 위해서는 평균지지력개념을 도입해야 하며, 원형말뚝의 경우 Prasad와 Chari(1999)가 제안한 바와 같이 극한수평지지력의 산정에 적용되는 단위수평지지력을 변위중심에서 나타나는 최대수평토압의 0.8배를 적용하여 극한수평지지력을 산정하였다.

그림 1(d)에 나타난 Prasad and Chari(1999)의 토압분포와 극한수평지지력은 말뚝선단부에서 발휘되는 단위수평지지력이 $0.6d_r$ 깊이에서의 단위수평지지력의 1.7배가 된다는 실험결과에 근거해 유도되었으나, 보다 일반

적인 지반응력상태를 반영하기 위해 그림 7과 같이 말뚝전면부 및 후면에서의 지반응력을 일반화된 형태로 정의하고 힘평형관계를 적용하면 극한수평지지력은 다음과 같이 나타날 수 있다.

$$H_u = 0.4R_h K_p B [\sigma'_{v,R} d_r - \sigma'_{v,L} (L - d_r)] \quad (4)$$

여기서 H_u = 극한수평지지력; R_h = 단위수평지지력 계수; K_p = 수평토압계수; B = 말뚝직경; d_r = 말뚝회전점까지의 거리; $\sigma'_{v,R} = 0.6d_r$ 깊이에서의 단위수평지지력; $\sigma'_{v,L}$ = 말뚝선단 깊이에서의 단위수평지지력이다. R_h 값은 앞서 설명된 바와 같이 Broms(1964)의 경우는 3, Barton(1982)의 경우는 K_p 로 제안되었다.

그림 8은 지반응력상태를 정의하는 수직 및 수평응력의 변화에 따른 예측 및 실측된 수평지지력의 변화를 나타내고 있다. 그림 8(a)는 수평응력이 40kPa일 경우, 수직응력에 대한 극한수평지지력의 변화량에 따른 비교이며, 그림 8(b)는 수직응력 100kPa일 경우 수평응력에 따른 극한수평지지력의 변화량을 나타내고 있다. 그림 8에서 실측값은 토조실험을 통해 얻어진 결과이며, 계산된 수평지지력은 그림 7의 단위수평지지력 분포형태와 식 (4)를 사용하여 산정되었다. 그림에서 보는 바와 같이 실측치와 예측치는 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, Barton(1982)에 의한 방법이 Broms(1964)에 의한 방법에 비해 과대평가의 정도가 더 큼을 알 수 있다. 특히 각 방법에서 수평응력의 변화량은 고려되고 있지 않으므로 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 일정한 예측값을 나타내고 있어 실제 얻어진 결과와는 많은 차이를

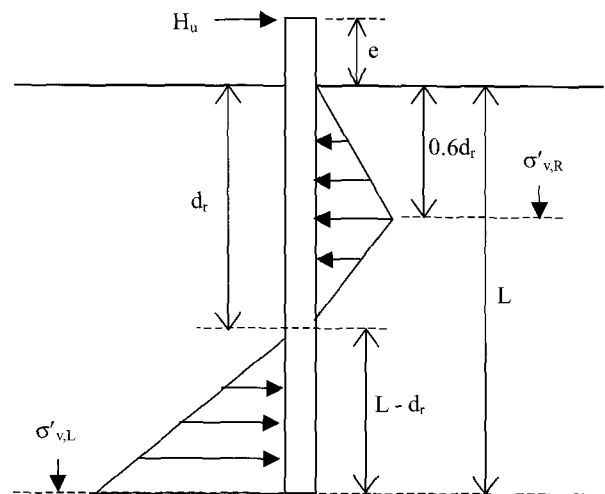
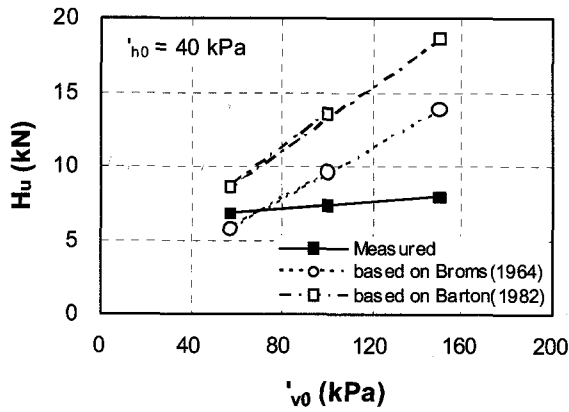
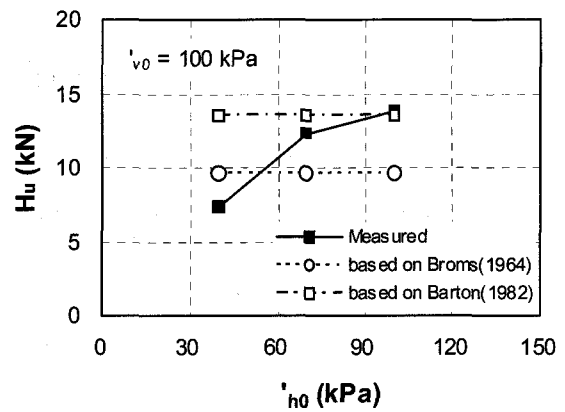


그림 7. 수평하중하의 말뚝에 작용하는 단위수평지지력(Prasad and Chari, 1999)



(a) 수직응력에 따른 변화량($\sigma'_h=40\text{kPa}$)



(b) 수평응력에 따른 변화량($\sigma'_v=100\text{kPa}$)

그림 8. 실측치와 예측치의 극한수평지지력의 비교

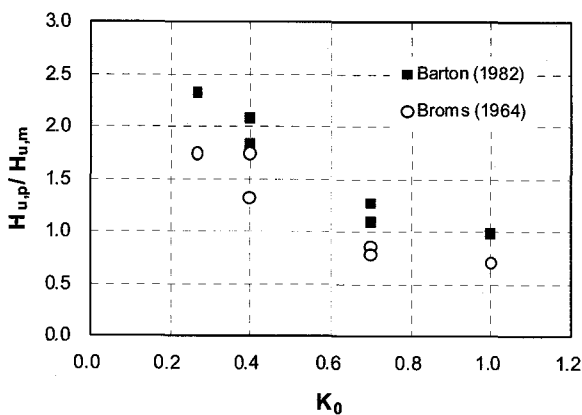


그림 9. 정지토압계수에 따른 실측 및 예측 극한수평지지력의 비

보이고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 제시된 토압계수에 따른 예측값과 실측값의 비율 ($H_{u,p}/H_{u,m}$)을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 일반적인 정지토압계수의 범위인 0.3 - 0.5에서는 각 예측방법이 과대평가의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 0.6이상의 범위에서는 비교적 실측치와 유사한 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 극한수평지지력의 예측 정확도가 지반응력상태에 따라 달라질 수 있음을 의미하게 되며, 기존 방법에 포함되어 있지 않은 수평압의 변화에 상당히 민감한 것으로 나타내고 있어 실제 설계 시 이에 대한 고려가 필요함을 나타내고 있다.

6. 결론

말뚝의 수평지지력은 수평하중이 지배적인 구조물에 있어 핵심적인 설계요소로 간주되고 있으며, 따라서 본 연구에서는 현장타설말뚝을 대상으로 다양한 지반조건 하에서 발휘되는 수평지지력과 수평거동에 대하여 실

험적 분석을 실시하였다. 토조실험결과, 수직응력과 수평응력은 모두 말뚝의 수평거동에 영향을 나타내는 것으로 관찰되고 있으나, 수평응력의 영향이 보다 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 상대밀도 또한 수평거동 및 지지력에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있었다. 수평거동에 대한 말뚝형태의 영향은 지반상태에 따라 다소간의 차이가 보이고 있으나, 전반적으로 지반응력이나 상대밀도와 같은 지반특성치에 의한 영향에 비해서는 작게 나타나고 있었다. 극한수평지지력의 경우, 상대밀도와 수평응력이 중요한 영향인자로 작용하고 있었으며, 기존의 이론과는 달리 수직응력의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타나고 있었다.

기존 예측식들을 이용하여 비교, 분석한 결과, 기존의 예측식들에 의해 산정된 결과는 실측된 결과와 상당한 차이를 보이고 있었으며, 이는 지지력 산정시 수평응력의 변화량이 고려되어 있지 않았기 때문임을 알 수 있었다. 정지토압계수에 따른 예측결과와 실측결과의 차이는 토압계수가 증가함에 따라 감소하고 있었으며, 정지토압계수가 0.6이상에서는 예측된 지지력이 실측결과와 비교적 유사한 경향을 나타내고 있었음을 알 수 있었다. 극한수평지지력을 예측함에 있어서 지반응력상태를 나타내는 정지토압계수에 따라 달라질 수 있으며, 수평압력에 의한 변화에 민감하게 나타나 이에 대한 고려가 필요하다는 것을 보이고 있다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “가공송전용 강관주 철타기초 설계기준

수립 연구”의 결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Barton, Y. O. (1982), “Laterally loaded model piles in sand: Centrifuge tests and finite element analyses”, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
2. Brinch-Hansen, J. (1961), “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin No.12, pp.5-9.
3. Broms, B. B. (1964), “Lateral resistance of piles in cohesive soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.90, No.2, pp.27-64.
4. Chari, T. R. and Meyerhof, G. G. (1983), “Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sands”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp.849-854.
5. El Naggar, M. H. and Wei, J. Q. (1998), “Response of tapered piles subjected to lateral loading”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.52-71.
6. Fleming, W. G., Weltman, A. J., Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), “Piling Engineering”, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc.
7. Meyerhof, G. G., Mathur, S. K., and Valsangkar, A. J. (1981), “Lateral resistance and deflection of rigid wall and piles in layered soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.159-170.
8. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), “Pile foundation analysis and design”, John Wiley and Sons.
9. Petrasovits, G. and Award, A. (1972), “Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil”, *Proc. Of 5th European conf. on SMFE*, Vol.3, pp.407-412.
10. Prasad, Y. V. S. and Chari, T. R. (1999), “Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils”, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp.21-29.
11. Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974), “Analysis of laterally loaded piles in sand”, *Proc. of 6th Offshore Technology Conf.* Vol.2, pp.473-483.
12. Zhang, L., Silva, F., and Grismala, R. (2005), “Ultimate lateral resistance to pile in cohesionless soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol.131, No.1, pp.78-83.

(접수일자 2006. 11. 21, 심사완료일 2007. 2. 21)