

모형실험에 의한 경사말뚝의 거동 특성

Behavior Characteristics of Batter Piles by Model Test

권 오 균¹ Kwon, Oh-Kyun
이 활² Lee, Whoal
석 정 우³ Seok, Jung-Woo

Abstract

In this study, the behavior characteristics of vertical and batter piles were analyzed by the model tests and the numerical analyses. Model steel pipe piles with the inclination of 0°, 10°, 20° and 30° were driven into sands with the relative density of 79%. The static compression load tests and numerical analyses using PENTAGON 3D were performed. The bearing capacities of batter piles with inclination of 10°, 20° and 30° were 111, 95, and 81% of those of vertical pile in model tests, and the results of numerical analyses were similar to those of model tests. The bearing capacities proposed by Petrasovits and Award (1968) were similar to those of model test in the inclination of 10°, but overestimated in the inclination of 20° and 30°. The skin frictions and end bearing loads were the maximum in the inclination of 10° and decreased with increasing the inclination angle.

요 지

본 연구에서는 연직말뚝과 경사말뚝에 대하여 모형실험과 수치해석을 실시하여 경사말뚝의 거동 특성을 분석하였다. 상대밀도 79%인 모래지반에 경사각도 0°, 10°, 20°, 30°의 강관말뚝을 향타 관입하여 하중재하실험을 실시하였고, 상용 유한요소 프로그램인 PENTAGON 3D를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 모형실험에 의한 경사말뚝의 축방향 지지력은 경사각도가 10°, 20°, 30°에서 연직말뚝에 비하여 111, 95, 81%로 나타났고, 수치해석의 결과도 다소 차이는 있지만 비슷하게 나타났다. 그러나 Petrasovits & Award의 결과는 경사각 10°에서 모형실험 결과와 유사하지만, 경사각 20°와 30°에서는 모형실험결과를 과대평가하였다. 경사각도에 따른 주변마찰력과 선단하중은 모형실험과 수치해석 모두 10°경사에서 최대값을 나타낸 후, 경사각도가 증가함에 따라 감소하였고, 전체하중에서 주변마찰력과 선단하중의 구성비율은 경사각도에 관계없이 거의 비슷하게 나타났다.

Keywords : Batter pile, End bearing load, Load transfer, Skin friction, Ultimate load

1. 서 론

최근에 이르러 각종 구조물들의 밀집화 현상으로 인하여 구조물 건설을 위한 양호한 지반확보가 어려워지

고 있으며 이로 인하여 열악한 지반환경에 대한 구조물의 시공이 증가하는 추세에 있다. 이러한 열악한 지반환경은 대부분의 경우 지반이 연약하거나 지지층이 깊은 심도에 위치하고 있어 일반적인 얇은 기초형식으

1 정희원, 계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ., ohkwon@kmu.ac.kr)

2 정희원, (주)두우건설엔지니어링 차장 (Member, Deputy General Manager, Doowoo Construction Engrg. Co. Ltd.)

3 정희원, 삼성건설기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Samsung Co., Institute of Eng. & Tech.)

로는 구조물 건설이 용이하지 않으며 이에 대한 대책방안으로써 말뚝기초가 많이 사용되고 있다.

말뚝기초는 설치각도에 따라 연직말뚝과 경사말뚝으로 구분하며, 횡방향 하중이 작용하는 경우에 대한 대책방안으로 경사말뚝의 시공이 많이 이루어지고 있다. 그러나 말뚝기초에 대한 연구들은 대부분 연직말뚝에 대해서 이루어져 왔으며, 이러한 일련의 연구활동을 통하여 연직말뚝에 대해서는 지반조건이나 하중의 방향 등 다양한 변수들에 대한 거동특성들이 많이 알려져 있다. 그러나 교대나 교각기초, 부두 접안시설 등의 구조물에서 경사말뚝이 많이 시공되지만, 이에 대한 연구는 매우 미미한 실정이다. 현재까지 경사말뚝에 대하여 수행된 대부분의 연구들은 인발하중에 대한 것들이 주를 이루고 있으며, 이러한 연구들은 주로 인발하중과 말뚝두부의 침하관계에 대해서만 수행되어 말뚝의 경사각도에 따른 말뚝의 거동특성은 파악되지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 수직방향 압축하중을 받는 경사말뚝에 대한 거동특성을 파악하기 위해 실내모형 실험을 수행하였으며, 말뚝내부에 변형을 계이저를 부착하여 하중에 따른 축하중전이 특성을 분석하였다. 그리고

말뚝의 선단하중과 주면마찰력을 비교 및 분석하여 말뚝경사에 따른 토압계수의 변화를 파악하였다. 또한 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON 3D에 의한 수치해석결과를 모형실험 결과와 비교 및 분석하였다.

2. 이론적 배경

Meyerhof(1973)는 경사진 말뚝의 축방향 인발하중에 대한 실험으로부터 사질토지반과 점성토지반에 적용할 수 있는 인발저항력 산정식을 식 (1)과 같이 제안하였다. 이 산정식은 수직인발실험결과로부터 산출되었으며 경사진 말뚝에 대한 인발계수는 매입식 말뚝보다 타입식 말뚝의 경우가 더 클 수 있다고 하였다.

$$Q_u = (C_a + P_0' K_u \tan \delta) A_s \quad (1)$$

여기서, Q_u : 인발저항력

C_a : 말뚝과 지반 사이의 점착력

P_0' : 평균 유효 상재응력

K_u : 경사말뚝의 인발계수

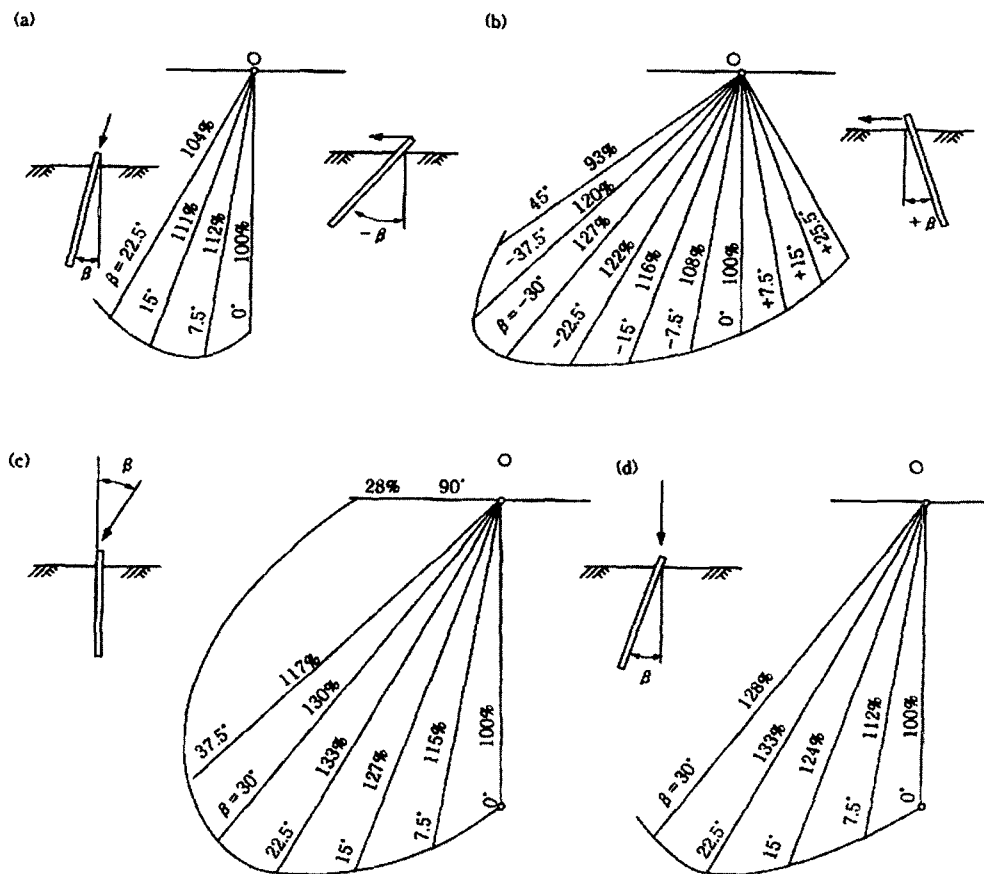


그림 1. 연직말뚝과 경사말뚝의 지지력(Petrasovites & Award, 1968)

$\tan \delta$: 말뚝과 지반 사이의 유효마찰계수
 A_s : 근입된 말뚝의 표면적

또한, Hanna와 Afram(1986)은 연직말뚝과 경사말뚝에 대해 말뚝직경을 다르게 하여 실내인발시험을 실시한 결과 말뚝의 경사각도가 커질수록 말뚝의 인발저항력은 점차 작아진다고 발표한 바 있다. Petrasovites와 Award(1968)는 말뚝과 하중의 방향을 변화시킨 실험으로부터 경사말뚝의 하중을 연직말뚝의 하중에 대한 백분율의 형태로 제시하였다. 경사말뚝에 수직방향으로 하중이 작용하는 경우 그림 1(d)에서 보는 바와 같이 경사각도 22.5°에서 최대 연직말뚝 하중의 133%로 나타나고, 말뚝과 재하하중 방향에 따른 다양한 수치를 제안한 바 있다. 또한 경사말뚝의 인발하중에 영향을 미치는 요인은 말뚝의 경사각도, 근입깊이비, 말뚝표면거칠기, 지반의 상대밀도 등이 있는데 배우석(1997)에 의하면 말뚝 표면의 거칠기가 가장 큰 영향을 미친다고 발표하였다. Das(1983)는 주면마찰력이 일정하여지는 상대밀도에 따른 경사말뚝의 한계깊이비를 제안하였고, Meyerhof와 Ranjan(1973)은 축방향 하중을 받는 경사말뚝의 주면마찰력 계산시 사용하는 토압계수는 연직말뚝의 토압계수보다 약간 클 수 있다고 하였다.

3. 모형실험 장치 및 방법

본 연구의 모형실험에 사용된 시료는 낙동강 성주지역의 모래를 이용하였다. 함수비의 변화를 줄이기 위해 모래를 자연 건조시킨 다음, No.10 체를 통과한 시료만을 사용하였다. 시료의 입도분포곡선은 그림 2와 같고, 건조단위중량 15.50 kN/m³, 내부마찰각 39°, 비중 2.64, 균등

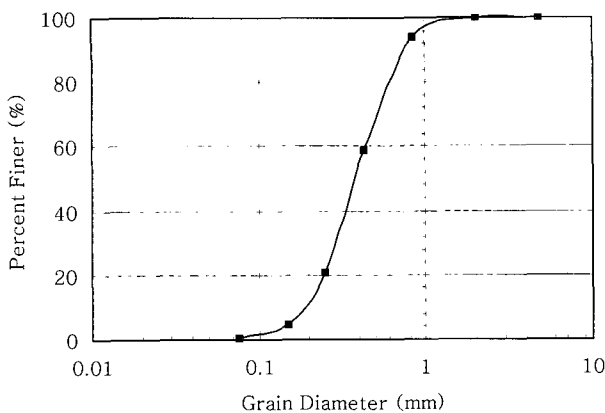


그림 2. 시료의 입도분포곡선

계수(C_u) 2.28, 곡률계수(C_c) 1.14이며 통일분류법상 SP로 분류되었다. 모형지반은 시료를 높이 160cm에서 낙하시켜 조성하였고, 이러한 강사법(Raining method)에 의해 조성된 지반은 평균단위중량 15.30 kN/m³이며 평균상대밀도는 79%이다. 모형지반의 상대밀도는 Bowles 방법(Bowles, 1978)으로 결정하였고, 직접전단시험장치(김상규와 이은수, 1996)에 의한 모형말뚝재료와 모래지반 사이의 표면마찰각은 약 19°로 나타났다.

모형토조는 그림 3과 같이 1500mm×1000mm×1200mm의 크기로 강재를 사용하여 제작하였고, 모형실험의 진행 상황을 관찰하기 위하여 모형토조의 한쪽 면은 두께 20mm의 투명 아크릴판으로 제작하였다. 토조의 상부에는 지반 조성을 위한 레이닝 장치를 설치하였다. 모형토조에서의 실험은 모형토조, 모형구조체, 지반 사이의 경계 효과를 고려하여야 한다. Vipulanandan 등(1989)은 조밀한 모래지반에서 경계효과를 감소시키기 위하여 토조직경이 말뚝직경의 7.5배 보다 크고, 말뚝의 최대 관입깊이는 토조 밑면으로부터 말뚝직경의 4배 깊이까지 제한한 바 있다. 본 모형 실험에서도 이러한 제한 규정을 고려하여 경계조건의 효과가 최소화되도록 토조의 크기를 결정하였다.

모형말뚝은 외경 40mm, 길이 840mm, 두께 3mm의 강재로 제작하였고, 말뚝선단부에 각도 60°, 길이 40mm의 원추형으로 제작된 강재를 말뚝선단에 부착하여 폐단말뚝으로 모형실험을 실시하였다. 말뚝의 하중전이를 파악하기 위하여 말뚝내부에 변형율계(strain gauge)를 부착하였으며, 그림 4는 모형말뚝의 단면도를 보여준다.

말뚝재하실험은 모형지반을 조성한 후 24시간 이상 경과한 다음, 향타하여 말뚝을 관입시켰고, 말뚝의 경사

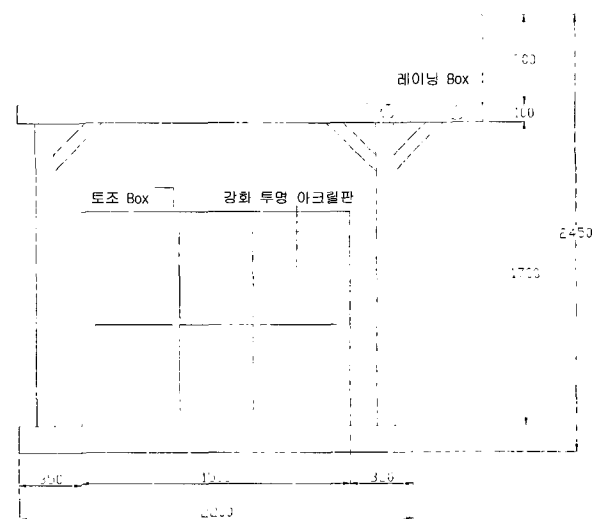


그림 3. 모형토조의 단면도

각도는 수직선에 대하여 0°, 10°, 20°, 30°로 변화시켰다. 말뚝 설치는 경제효과를 고려하여 말뚝의 관입 위치를 선정하고, 말뚝지지대 내부에 모형말뚝을 위치시킨 후 해머(무게 58.86 N)를 사용하여 낙하높이 50cm를 유지하면서 항타 관입시켰다. 그림 5는 경사각도 0°와 10°에 대한 말뚝재하실험 모습을 보여준다.

말뚝재하실험시 하중은 0.5mm/min.의 일정한 속도로 재하하였으며, 하중재하에 따른 말뚝의 하중, 변위, 변형율은 각각 로드셀(용량 4.9 kN), LVDT, 변형율계를

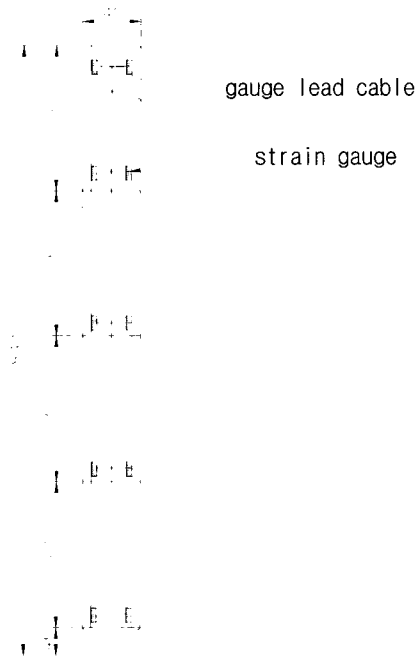


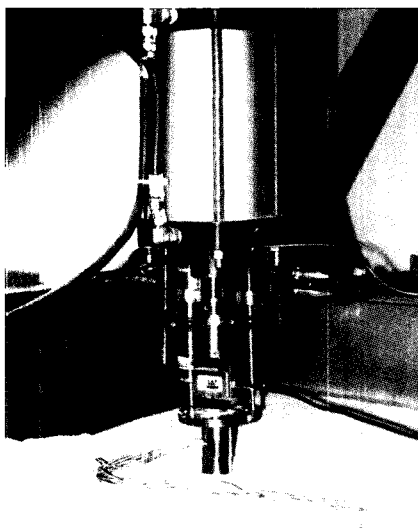
그림 4. 모형말뚝의 단면도(단위 mm)

이용하여 측정하였으며, 모든 데이터는 TDS-301로 자동계측하였다.

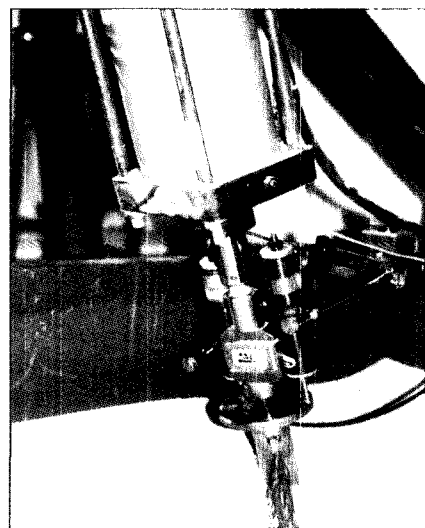
4. 모형실험 결과 및 해석

본 연구에서는 모래지반에 설치된 축방향 압축하중을 받는 경사말뚝의 하중-변위 특성, 선단지지력, 주면마찰력 등의 거동특성을 규명하기 위하여 말뚝의 설치 각도를 0°, 10°, 20°, 30°로 변화시켜 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 3회 반복하여 실시하였다. 그리고 모형실험 결과와 비교·분석하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D(에머랄드 소프트, 1998)를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 말뚝 해석조건은 말뚝의 중심축을 대칭으로 축대칭 반단면 해석을 수행하였다. 말뚝과 지반은 육면체 요소(hexa-hedral solid element), 강관말뚝은 쉘요소(shell element)로 모형화하였고, 강관은 등방탄성모델, 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 탄소성 모델로 모형화하였다. 수치해석 방법은 초기단계, 지반 굴착, 말뚝설치, 하중재하의 단계로 구성되고, 초기 단계에서 수치모형은 원지반의 응력상태로 구성되며, 시공 단계에서는 지반 굴착, 강관 설치의 과정으로 모형화하였다.

모형실험과 수치해석 결과로부터 경사각도에 따른 두 부하중-변위 곡선이 그림 6에 나타나 있다. 실험시 나타난 하중-변위 곡선은 극한하중이 뚜렷하게 나타나는 경향이 있는 반면, 수치해석 결과는 최종 변위(8mm)에서도 극한하중이 나타나지 않고 있다. 이러한 차이는 (1) 모형말뚝의 항타로 인하여 응력 및 밀도가 대상지반에서 불균등하



(a) 경사각도 0°



(b) 경사각도 10°

그림 5. 말뚝재하실험 모습

게 분포하는 것과, (2) 축하중 재하시 말뚝과 지반간의 상호작용으로 인하여 말뚝주변에 국부적으로 나타나는 실제 거동을 시뮬레이션하지 못하였기 때문에 판단된다. 모형실험과정에서 획득한 자료의 한계로 인하여 이러한 절차를 엄밀하게 모델링하는데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위하여 해석결과에서는 특정 변위에서 극한하중을 정의하여 분석하였다. 이로부터 실험과 해석간의 차이가 전반적인 분석의 일관성을 해치지 않도록 노력하였다.

그림 7에는 경사각도에 따른 극한하중을 나타내었다. 본 연구에서 경사말뚝의 극한하중은 하중-변위 곡선에서 말뚝 직경의 10%에 해당하는 변위에서의 하중으로 결정

하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 경사각도에 따른 말뚝의 극한하중은 경사각도 10°에서 가장 크고, 경사각도가 커짐에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 경사말뚝의 지지력비($\frac{\text{경사말뚝의 극한하중}}{\text{연직말뚝의 극한하중}} \times 100 (\%)$)는 경사각도 10°에서 최대 111%이고, 경사각도가 증가함에 따라 점차 감소하여 경사각도 30°에서 89%로 나타났다. 그림 7에서 보는 바와 같이 연직말뚝의 극한하중을 기준으로 모형실험과 수치해석에 의한 극한하중은 경사각도 10°에서 최대값을 나타낸 다음 경사각도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다.

그림 8은 여러 가지 방법들에 의한 경사말뚝의 지지

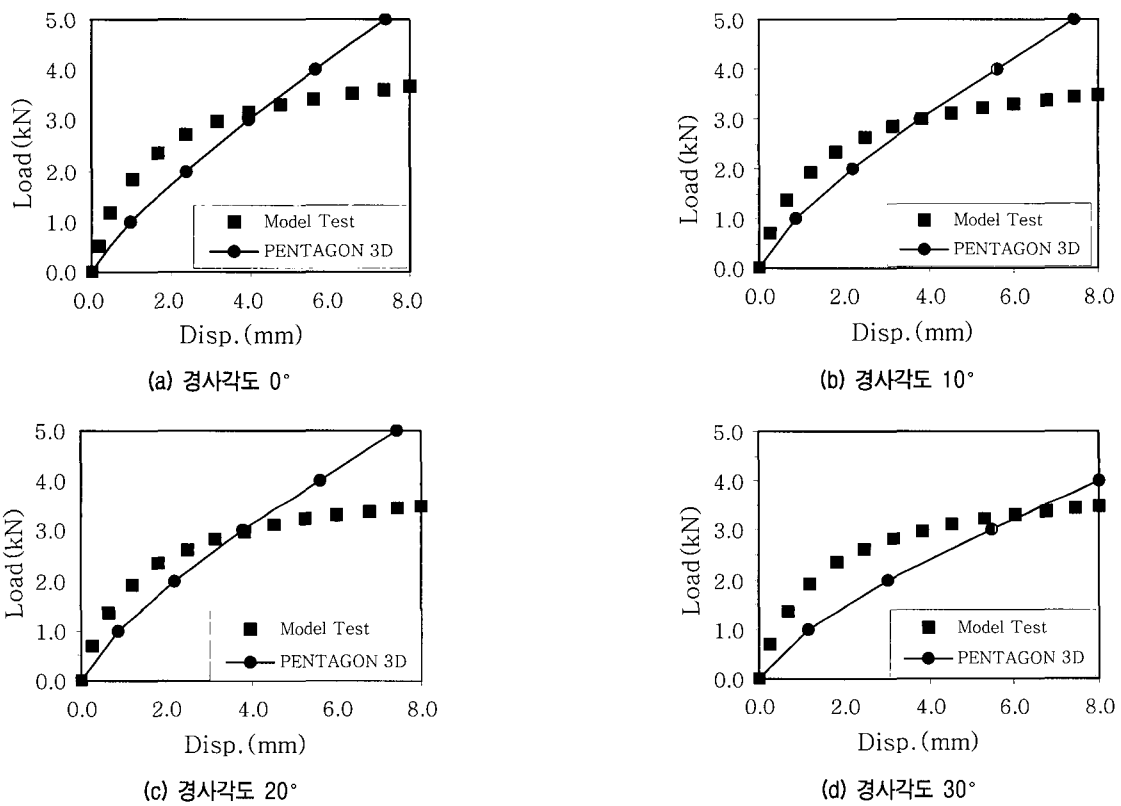


그림 6. 경사각도에 따른 말뚝의 두부 하중-변위 곡선

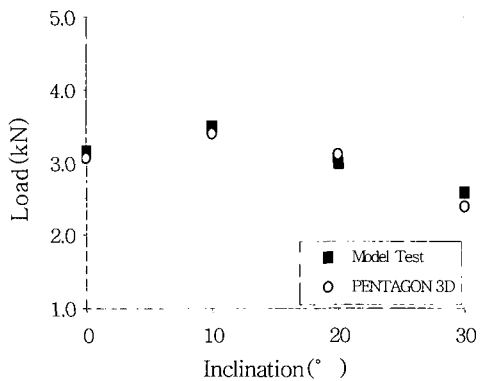


그림 7. 경사각도에 따른 극한하중

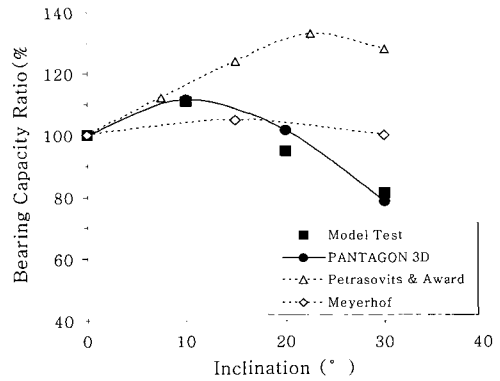


그림 8. 경사각도에 따른 말뚝의 지지력비

력비를 보여준다. 모형실험과 수치해석에 의한 지지력비는 경사각도 10°에서 약 111%로 최대값을 나타내고, 경사각도가 증가함에 따라 점차 감소하여 경사각도 30°에서 모형실험의 결과는 81%, 수치해석의 결과는 89%를 나타냈다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수치해석과 모형실험은 거의 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과들을 기존의 Petrasovits와 Award(1968), Meyerhof와 Ranjan(1973)의 연구결과와 비교하면, 대략 10°이하의 경사각도에서 모형실험에 의한 지지력비는 수치해석 결과 및 기존 연구자들의 실험결과들과 거의 비슷하지만, 경사각도가 15°보다 커지면 모형실험의 결과는 기존의 결과들 보다 작고, 그 차이는 약 20% 정도로 매우 크게 나타났다.

모형말뚝의 하중재하실험에서 모형말뚝 내부에 부착된 변형율계로부터 각 하중단계에서 말뚝에 전달된 축하중 분포를 측정하였으며, 각 경사각도에서 말뚝길이에 따른 축하중 분포는 그림 9와 같다. 이 그림에서 마지막 하중단계는 각 경사말뚝에서의 극한하중이다. 약간의 차이는 있지만 모든 경사각도에서 대체로 말뚝의 상부부분에서 지반으로 하중전이가 많이 발생하였고, 선단지지력이 상당히 크게 나타났는데, 이는 모형실험의 지반이 견고하지 않고 말뚝길이가 길지 않아서 주면마찰력이 충분히 발휘되지 못한 것에 기인하는 것으로 판단되었다. 수치해석에 의한 경사말뚝의 하중전이 양상도 비슷하게 나타났다.

그림 10은 경사각도에 따른 선단하중과 주면마찰력

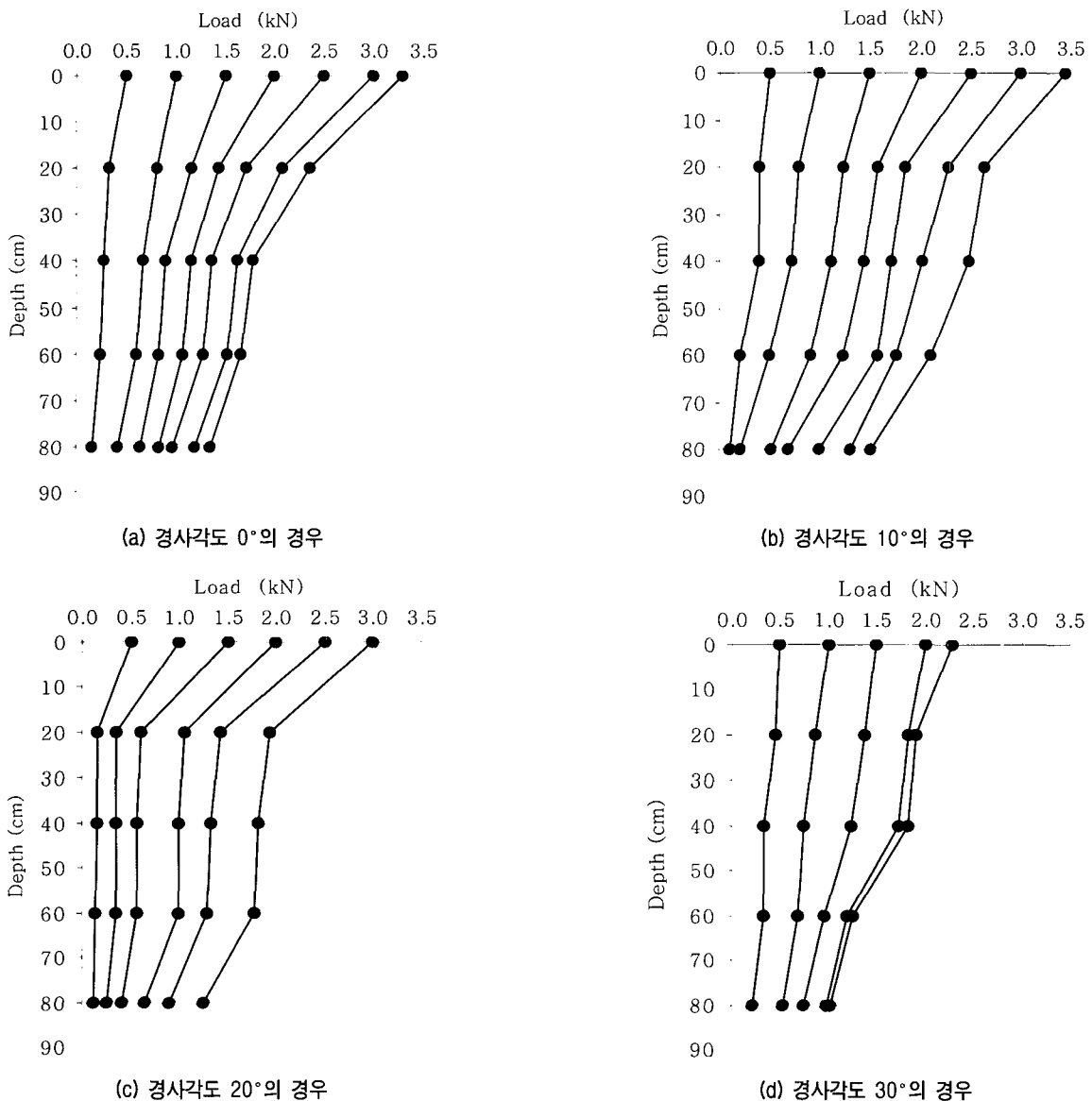
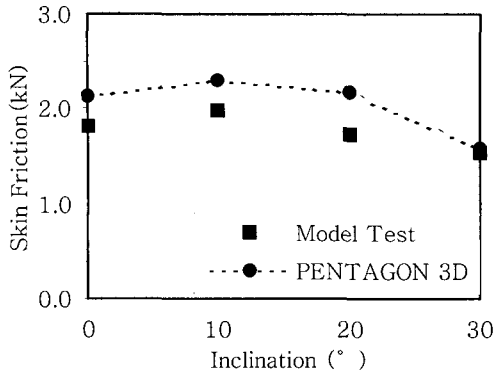
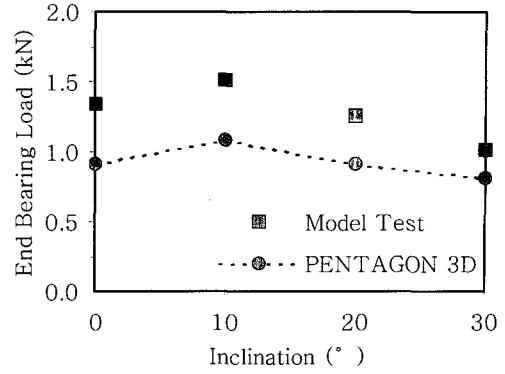


그림 9. 모형실험에 의한 경사말뚝의 축하중 분포도

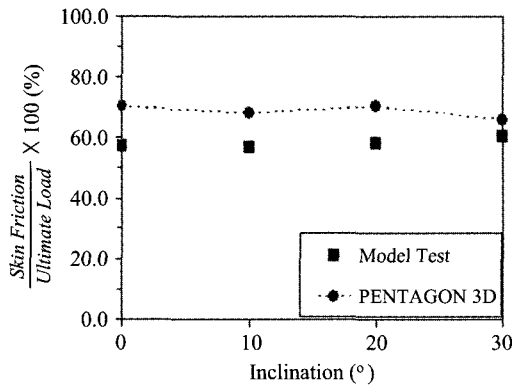


(a) 주면마찰력

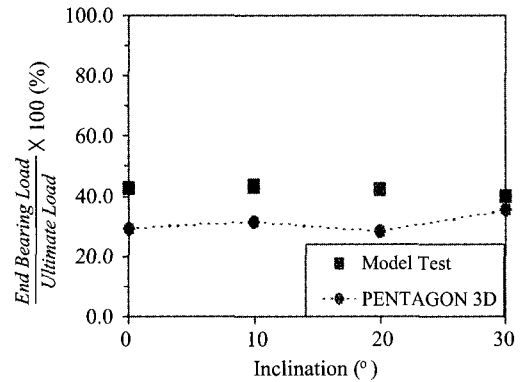


(b) 선단지지력

그림 10. 경사각도에 따른 선단하중과 주면마찰력 비교



(a) 주면마찰력의 구성비율



(b) 선단하중의 구성비율

그림 11. 경사말뚝의 지지력 구성비율 비교

을 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 경사말뚝의 선단하중과 주면마찰력은 경사각도 10°에서 모두 최대 값을 나타낸 후 점차 감소하였고, 이러한 경향은 경사각도에 따른 극한하중의 변화와 비슷하게 나타났다. 모형 실험에 의한 선단하중은 수치해석의 결과 보다 약간 크고, 주면마찰력은 수치해석 결과가 더 크게 나타났지만, 경사각도에 따른 경향은 비슷하였다.

그림 11과 12는 각각 극한하중에서 선단하중과 주면마찰력의 구성비율을 보여준다. 이 그림에서 보는 바와 같이 모형실험의 결과, 극한하중 상태에서 전체하중에서 주면마찰력은 58~60%, 선단하중은 38~40%로 나타났고, 이 결과는 경사각도에 관계없이 거의 비슷하게 나타났다. 그리고 수치해석결과도 약간의 차이는 있지만 비슷한 경향을 보여준다. 이러한 결과로부터 경사각도가 말뚝의 지지력 구성성분의 비율에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

사질토 지반에 타입된 말뚝의 주면마찰력은 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_f = A_s \cdot K \cdot \tan \delta \cdot \sigma_v \quad (2)$$

여기서, σ_v : 유효수직응력

K : 토압계수

모형실험에서 측정된 경사말뚝의 주면마찰력과 식 (2)를 이용하면 경사말뚝에 대한 토압계수를 계산할 수

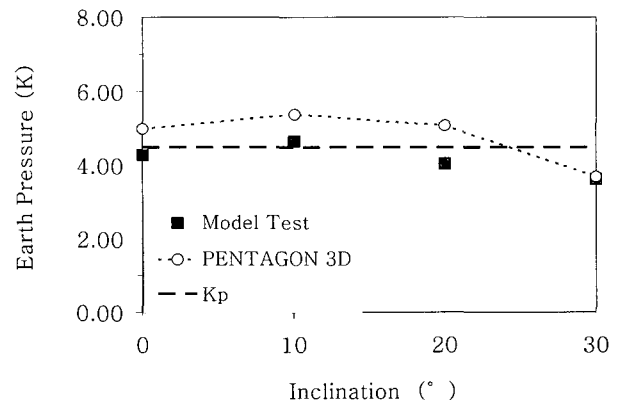


그림 12. 경사각도에 따른 토압계수 비교

있으며, 이 결과가 그림 12에 나타나 있다. 모형실험으로부터 역산된 토압계수는 모든 경사각도에서 정지토 압계수 보다 크게 나타났다. 경사각도 0°와 10° 말뚝의 토압계수는 Rankine의 수동토압계수와 비슷하며, 이는 Meyerhof(1959)와 Nordlund(1963)가 타입에 의해 관입된 연직말뚝에 대한 연구결과로 제시한 결과와 유사함을 알 수 있다. 모형실험과 수치해석 결과로부터 역산된 수평토압계수는 20° 이하의 경사각도에서 지반의 수동토압계수와 유사하지만, 경사각도가 20° 보다 크게 되면 지반의 수동토압계수보다 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 말뚝의 주면마찰력과 토압계수가 말뚝의 경사에 의해 영향을 받고 있는 것을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한 실험결과와 수치해석결과 모두 지반의 정지토압계수 보다 크게 나타나 경사말뚝의 마찰력 산정시 사용되는 토압계수는 지반의 정지토압계수와 수동토압계수 사이의 값으로 적용하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 축방향 압축하중을 받는 경사말뚝의 거동 특성을 연구하기 위해 경사각도를 0°, 10°, 20°, 30°로 변화시켜 실내모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모형실험에 의한 경사말뚝의 축방향 지지력은 경사각도가 10°, 20°, 30°에서 연직말뚝에 비하여 111, 95, 81%로 나타났고, 수치해석의 결과도 다소 차이는 있지만 모형실험의 결과와 비슷하게 나타났다. 그러나 Petrasovits & Award의 결과는 경사각 10°에서 모형실험 결과와 유사하지만, 경사각 20°와 30°에서는 모형실험결과를 과대평가 하였다.
- (2) 경사각도에 따른 주면마찰력과 선단하중은 모형실험과 수치해석 모두 10° 경사에서 최대값을 나타낸 후, 경사각도가 증가함에 따라 감소하였고, 전체하중에서 주면마찰력과 선단하중의 구성비율은 경사각도에 관계없이 거의 비슷하게 나타났다.
- (3) 모형실험으로부터 역산된 토압계수는 모든 경사각도에서 정지토압계수보다 크고, 수동토압계수와 비슷하지만 경사각도 30°에서는 다소 작게 나타났다.
- (4) 모형실험 결과 말뚝두부 부분에서 지반으로 하중전이가 크게 나타났고, 경사각도가 증가할수록 깊이 에 따른 단위주면 마찰력은 다소 차이는 있지만 감

소하는 경향을 나타냈다.

앞으로의 연구방향은 하중방향, 지반조건 등의 변화에 따른 경사말뚝의 거동특성과 현장에서의 하중재하 실험에 의한 추가적인 연구가 수행된다면, 경사말뚝에 대한 합리적인 설계절차가 이루어 질 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성건설(주)의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김상규, 이은수 (1996), "화강토와 보강재 경계면에서의 마찰계수에 관한 연구", *한국지반공학회지*, 제12권 제2호, pp.107-114.
2. 배우석 (1997), *모래에 근입된 경사말뚝의 인발 거동*, 충북대학교 석사학위논문.
3. 에머랄드 소프트 (1998), *PENTAGON-3D 사용설명서*.
4. 한국지반공학회 (2003), *구조물 기초 설계기준*, pp.356-357.
5. Bowles, J. E. (1978), *Engineering Properties of Soils and their Measurements*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, pp.185-188.
6. Das, B. M. (1983), "A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles", *Soils and Foundations*, Japan, Vol.23, No.3, pp.122-126.
7. Das, B. M. (1990), *Earth Anchors*, Elsevier, New York, 1990, pp.198-199.
8. Hanna, A.M. and Afram, A. (1986), "Pull-out Capacity of Single Batter Piles in Sand", *Canadian Geotech. J.* Vol.23, No.3, 1986, pp.387-392.
9. Meyerhof G. G. (1959), "Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol.8, No.SM6, pp.1-29.
10. Meyerhof, G.G. (1973), "Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles", *Proceedings of 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Moscow, USSR*, Vol.2, No.1, pp.167-172.
11. Meyerhof, G.G. and Ranjan, G. (1973), "The Bearing Capacity of Rigid Piles under Inclined loads in Sand. II: Batter Piles", *Canadian Geotech. J.* Vol.10, pp.71-85.
12. Nordlund, R. L. (1963), "Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soils", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol.89, No.SM3, pp.1-35.
13. Petrasovits, G. and Award, A. (1968), "Consideration on the Bearing Capacity of Vertical and Batter Piles subjected to Forces acting in Different Directions", *Proceedings 3rd Budapest Conf. Soil. Mech. Found. Engg., Akademiai Kiado, Budapest*, pp.483-497.
14. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, Vol.98, No.SM3, pp. 265-290.
15. Vipulanandan, C., Wong, D., Ochoa, M. and O'Neill, M. W. (1989), "Modelling Displacement Piles in Sand using a Pressure Chamber", *J. of Geotechnical Engineering. ASCE*, Vol.1, pp. 526-541.

(접수일자 2004. 4. 9, 심사완료일 2004. 9. 5)