

연직하중을 받는 경사말뚝의 연직지지력에 관한 연구

A Study on the Vertical Bearing Capacity of Batter Piles Subjected to Vertical Load

성 인 출*¹ Sung, In-Chool

이 민 희*² Lee, Min-Hee

최 용 규*³ Choi, Yong-Kyu

권 오 균*⁴ Kwon, Oh-Kyun

Abstract

In this study, based on the relationship of the vertical force - settlement of batter piles obtained by pressure chamber model tests, the vertical bearing capacity of vertical and batter piles according to the increase of pile inclination was analyzed. A model open - ended steel pipe pile with the inclination of 5°, 10° and 15° was driven into saturated fine sand with relative density of 50 %, and the static compression load tests were performed under each confining pressure of 35, 70 and 120 kPa in pressure chamber. The vertical bearing capacity of pile obtained from pressure chamber tests increased with the pile inclination. In the case of the inclination of 5°, 10°, 15°, increasing ratios of pile bearing capacity were 111, 121, 127 ~ 140 % of vertical bearing capacity respectively. In the case of the inclination of above 20°, the model tests could not be performed because of tilt of pile head during compressive loading on the pile head.

요 지

본 연구에서는 연직말뚝과 경사말뚝에 대하여 수행한 압력토조 모형실험을 통하여 경사말뚝의 연직하중과 침하량 관계로부터 경사각도에 따른 압축지지력의 증가양상을 분석하였다. 실트질 모래로 형성된 상대밀도 50 %의 포화지반에 경사각 0°, 5°, 10°, 15°, 20°의 모형 개단강관말뚝을 향타 관입하였으며, 압력토조내의 구속압력을 35, 70, 그리고 120 kPa로 변화시키면서 재하실험을 수행하였다. 연직 압축지지력은 경사각도가 커짐에 따라 증가하였으며 분석방법에 따라 증가율에는 다소의 차이가 수반되었으나 경사각 5°, 10°, 15°인 경우 지지력 증가율은 각각 111, 121, 127 ~ 140 % 정도를 나타내었다. 경사각이 20° 이상인 경우에는 말뚝 두부의 전도로 인하여 모형실험의 수행이 곤란하였다.

Keywords : Batter pile, Open-ended steel pipe pile, Pressure chamber model test, Vertical compressive bearing capacity, Yield bearing capacity

1. 서 론

말뚝기초는 콘크리트, 강재 등으로 이루어진 깊은 기초로서 상부구조물의 하중을 하부 지지층이나 주변 지

반에 전달하는 역할을 하고 있다. 국내 지반은 지표면 으로부터 15 m 이내에 기반암이 존재하는 경향이 많으나 현재 산업시설 및 거주시설 등을 위한 입지선정으로 인해 국토이용율이 날로 증가하여 불량한 지반에도

*1 정회원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사 (Member, Graduate Student Dept. of Civil Eng., Kyungsoong Univ.)

*2 정회원, 부산대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Ph.D Candidate Dept. of Civil Eng., Pusan National Univ.)

*3 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsoong Univ., ykchoi@ksu.ac.kr)

*4 정회원, 계명대학교 공학부 토목공학과 부교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.)

구조물을 설치하는 경우가 증가되고 있다. 이에 따른 필연적인 결과로서 구조물기초의 침하 및 지지력 문제가 대두되었고 이에 대한 대책방안으로서 말뚝기초의 중요성이 더욱 증가하고 있는 실정이다.

현재까지 말뚝에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 주로 연직말뚝의 거동특성에 대해서 많은 연구내용들이 알려져 있다. 그러나 경사말뚝은 교대나 교각기초 또는 인발하중을 지지하는 경우 등에 많은 시공이 이루어져 왔으며 경사말뚝에 대하여 현재까지 수행된 연구들은 대부분 인발거동에 대한 하중과 변위 사이의 관계에 대해서만 주로 이루어져 왔다. 인발하중이 작용하는 경우에 경사말뚝을 시공해 오고 있으나 현재까지 경사말뚝의 연직압축하중 지지거동에 관한 연구는 매우 미미하다. 대부분의 토목구조물의 경우 연직압축하중을 받는 경우가 많으므로 연직압축하중 작용시 하중과 변위 사이의 관계에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 경사말뚝에 대한 압력토조 모형실험을 수행하였다. 즉, 실트질 모래로 형성된 상대밀도 50%의 포화된 모형지반에 경사각 0°, 5°, 10°, 15°, 20°의 모형 강관 말뚝을 향타 관입하였다. 이 때 말뚝의 실제 관입깊이 12 m, 25 m, 42 m를 상사화 시키기 위해 유효 구속압력을 35 kPa, 70 kPa, 120 kPa를 작용시켰다. 재하실험 결과를 여러 가지 분석방법을 사용하여 분석하여 말뚝의 항복하중을 결정하였으며, 경사말뚝에 대한

하중과 변위 관계로부터 경사각도에 따른 압축지지력의 증가양상을 분석하였다.

2. 경사말뚝의 지지력 이론

경사말뚝의 지지력 이론 및 수행되었던 실험들을 살펴보면, Meyerhof(1973), Meyerhof and Ranjan(1973)의 경사진 말뚝의 축방향 인발하중에 대한 말뚝의 인발저항력 공식, Hanna and Afram(1986)의 연직말뚝과 경사말뚝에 대해 실내 인발실험결과에 근거한 극한인발력 산정 제안식, Petrasovits and Awad(1968)의 말뚝과 하중의 방향을 달리한 실험에서 연직말뚝과 경사말뚝의 지지력 비교, Das(1983)의 경사말뚝의 인발저항력 산정식, 그리고 배우석(1997)의 말뚝 근입각도에 따른 말뚝의 인발력 거동 분석 등이 있다.

이중 말뚝설치 각도와 하중작용 방향을 달리하여 연직말뚝에 대한 하중을 기준으로 연구결과를 발표한 Petrasovits and Awad(1968)의 실험에 대해 살펴보면 다음과 같다. Petrasovits and Awad(1968)는 내부마찰각 37.2°인 사질토를 사용하여 5 cm 두께로 같은 밀도를 유지하며 총 높이 80 cm의 강철토조 안에서 실험을 수행하였다. 말뚝설치 각도와 하중작용 방향을 달리하여(상대 밀도 = 89%) 많은 실험을 수행하였으며 여러 경우에 대하여 연직말뚝에 대한 하중을 기준으로 지지력 증가율을

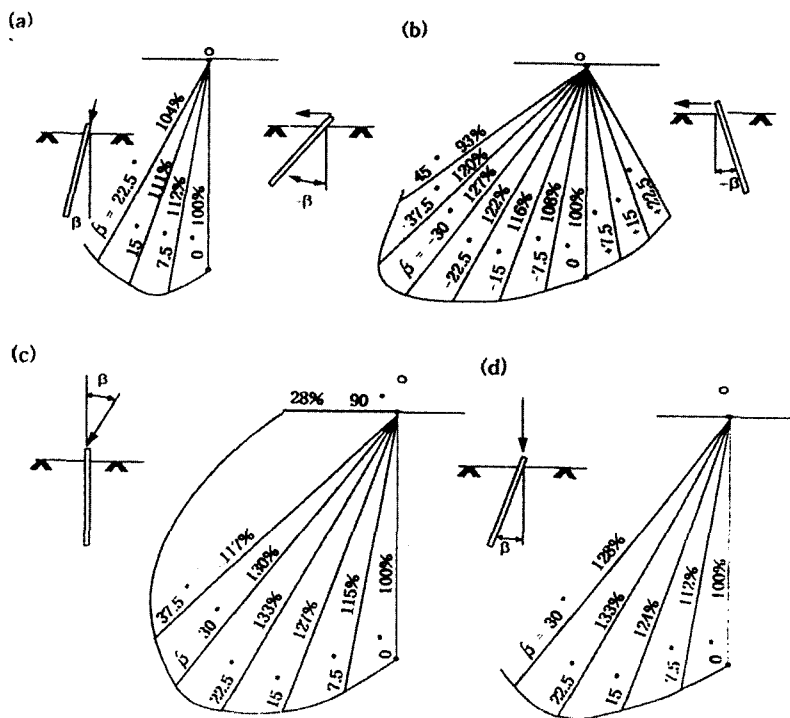


그림 1. 연직말뚝과 경사말뚝의 지지력 비교

알아내는 연구결과를 발표하였다. 그림 1에 제시된 바와 같이 경사말뚝에 축방향으로 하중이 작용하거나 연직말뚝에 작용하는 경사하중의 경우에 연직말뚝에 작용하는 축하중의 경우보다 최대 112 ~ 133 %의 지지력을 나타낼 수 있으며 횡하중의 경우에는 하중방향으로 기울어졌을 때에는 횡방향 저항력이 연직말뚝보다 작지만 그 반대의 경우에는 연직말뚝보다 큰 횡방향 저항력을 나타낼 수 있다. 또한 모든 제시된 실험결과에서 말뚝경사의 방향이 각각의 일정한 한계경사를 초과할 때 지지력이 연직인 경우에 비해 오히려 감소하는 것을 알 수 있었다.

3. 압력토조 실험과 현장조건과의 정적 상사법칙

말뚝이 타입된 실제 현장의 조건, 말뚝의 제원 그리고 압력토조에 사용할 모형 말뚝의 제원이 주어졌다면, 모형 압력토조에 작용시킬 구속 압력의 크기를 유효응력의 상사 법칙에 의해 결정할 수 있으며, 크기계수(Scaling factor)도 정할 수 있다. 현장 지반의 흙이 완전 포화되어 있고 압력 토조내의 지반도 완전히 포화되었다고 가정하여 그림 2를 참조하면 식 (1)의 관계가 성립한다.

$$[\sigma'_{o,av} / \gamma' L_{50\%}]_{model} = [\sigma'_{o,av} / \gamma' L_{67\%}]_{prototype} \quad (1)$$

여기서, $\sigma'_{o,av}$ = 평균 유효 연직응력

γ' = 수중 단위중량

$L_{50\%}, L_{67\%}$ = 모형과 현장말뚝에서 유효 연직 응력의 합력이 작용하는 작용점까지의 거리

모형 압력토조의 측면과 상부에서 동일한 압력을 작용시켜 주면 등방 응력상태가 되고, 과압밀된 사질토에 타입된 현장 말뚝을 가정하면 현장 말뚝에 작용하는 평균 유효응력의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma'_{o,av})_p = (L_{67\%})_p (\gamma'_p) (1 + 2K_{op}) / 3 \quad (2)$$

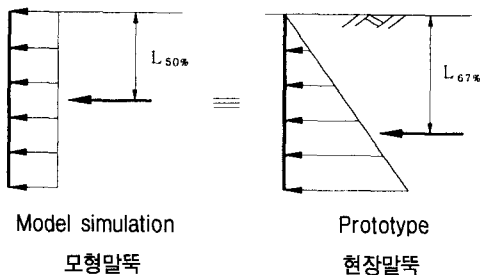


그림 2. 모형말뚝과 현장말뚝에 작용하는 유효 연직응력(O'Neill et al., 1990)

여기서 K_{op} 과 K_{om} 은 현장 지반과 모형 지반에서의 수평 정지토압계수이며 아래첨자에 사용된 p 와 m 은 각각 실제 현장조건과 모형 실험조건을 나타낸다. 그리고 Mayne and Kulhawy가 제안한 다음 식을 사용하여 K_o 를 계산할 수 있다.

$$K_o = (1 - \sin \phi') OCR^{\sin \phi'} \quad (3)$$

여기서, 모형 지반에는 모든 방향으로 동일한 크기의 응력이 작용되고 있으므로 OCR은 1로 볼 수 있으며 현장 지반은 중간 정도 촘촘한 과압밀된 사질토라고 가정하여 OCR을 1.5로 하였다. 또한, 본 실험에 사용된 지반의 내부 마찰각은 39° 이었으며 건조시료 소요밀도를 조정하여 시료를 성형한 후 배압(Back pressure)를 가하여 포화시킨 공시체에 대하여 삼축압축실험을 수행하여 구하였다. 현장 지반의 내부 마찰각도 동일하다고 가정하면 K_{op} 과 K_{om} 은 각각 0.48과 0.37이다.

여기서, $\gamma_p \cong \gamma_m = 1.88 t/m^3 = 18.4 kN/m^3$ (중간 정도 밀도에서 가는 균등한 모래의 포화단위중량)라 하고, 현장에 12 m의 말뚝이 타입되어 졌다고 할 때 압력 토조에 가해질 구속 응력의 크기는 다음과 같다.

$$(\sigma'_{o,av})_p = ((2/3) \times 12) (8.6) ((1 + 2 \times 0.48) / 3) = 45.0 kPa \quad (4)$$

여기서, 유효응력의 상사성에 의해 $(\sigma'_{av})_p$ 와 동일한 응력 45.0 kPa을 모형 압력토조에 등방적으로 작용시켜 준다고 가정하면, 모형 말뚝의 관입 길이가 380 mm이고 직경이 21.7 mm라면 식 (1)를 크기계수(Scaling factor) N (O'Neill et al., 1990)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N = (L_{67\%})_p / (L_{50\%})_m = (2/3)(12) / ((1/2)0.38) \cong 42 \quad (5)$$

따라서, 모형 실험에서 사용된 직경 21.7 mm, 관입 길이 380 mm의 모형 말뚝은 현장에 타입된 직경 0.9 m 정도의 실제 말뚝의 길이 16 m 또는 그 이상 관입된 긴 말뚝인 경우에는 상부 16 m의 말뚝 부분에 대한 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

4. 실내 모형실험

4.1 실험장치 및 시료

전반적인 실험장치는 그림 3에 나타나 있으며 압력토

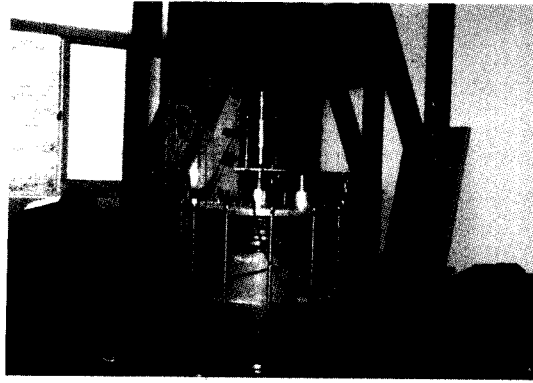


그림 3. 압력토조 실험장치

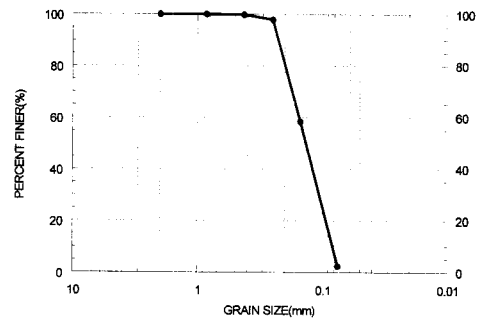


그림 4. 시료의 입도분포곡선

조, 모형말뚝, 시료, 스프링-질량시스템을 가진 정하중 재하장치, 상부수조, 간극수압 측정용 센서, 동적 변형 측정시스템, 정적 변형 측정 시스템 등으로 구성되었다. 조립된 압력토조는 높이 530 mm, 직경 600 mm의 강재로 제작된 원통형이며, 수평방향의 구속압력과 수직방향의 구속압력을 따로 작용시킬 수 있게 수평방향과 수직방향으로 고무 멤브레인(Membrane)을 따로 설치하였고, 고무 멤브레인과 시료와의 마찰을 줄이기 위해 테프론 쉬이트(Teflon sheet)를 수평 멤브레인의 내면에 사용하였다. 따라서, 압력토조의 벽면은 유연성 경계를, 바닥면은 강성 경계를 가졌다.

사용된 시료의 최소건조단위중량(γ_{dmin})은 15.51 kN/m^3 이고, 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 18.12 kN/m^3 이었다. 시료의 입도분포곡선은 그림 4에 나타나 있으며, $D_{10} = 0.083 \text{ mm}$, 균등계수(c_u) = 1.95, 곡률계수(c_g) = 0.88이었으며 통일분류법상 SM이었다.

4.2 실험계획 및 절차

모형실험 지반의 밀도를 일정하게 유지할 수 있도록 하기 위해 시료의 강사량을 일정하게 유지한 채 낙하높이를 20 ~ 60 cm로 변화시켜가면서 상대밀도와 낙하높이 관계곡선을 구하였다. 그림 5로부터 상대밀도 50%에 해당하는 낙하고 30 cm를 결정하여 레이닝(Raining)법으로 모형지반을 형성하였다. 먼저 필터 페이퍼(Filter paper)를 모형 토조 밑바닥에 깔고, 레이닝법(Raining method)에 의해 하부지반을 형성하여 포화시켰다. 상부지반을 형성하기 전에 모형지반의 포화도를 측정하기 위해 간극수압 센서(Pore pressure sensor)를 매설하였다. 형성된 모형지반 상부층에 필터 페이퍼를 깔고, 그 위에

200번 철망을 이중으로 깔고, 모형지반의 포화를 용이하게 하기 위하여 모형지반은 하부와 상부를 나누어서 형성하였다. 포화시 배압(Back pressure)에 의해 시료가 빠져 나오지 않도록 하였다. 토조 상부 뚜껑과 밀폐된 수조를 조립하여 진공펌프로써 시료 내에 내재된 공기를 배출시킨 후 필요한 구속압을 작용시켰다. 구속압은 말뚝의 실제 관입 깊이 12 m, 25 m, 42 m를 상사화시키기 위해서 유효구속압력을 35 kPa, 70 kPa, 120 kPa로 변화시켰으며, 본 실험의 구체적인 계획은 표 1에 나타내었다.

구속압이 작용된 상태에서 길이 550 mm, 내경 17 mm, 외경 21.7 mm 크기의 개단 모형말뚝을 44.1 N의 다짐 시험용 램머를 430 mm의 높이에서 자유 낙하시켜 모형말뚝을 타격 관입하였다. 타입시 50 mm당 타격횟수를 측정하였고, 380 mm까지 관입시켰다. 이때 경사각 5°, 10°, 15°, 20°를 유지하면서 모형말뚝이 타격 관입될 수 있도록 가이드 프레임(Guide frame)을 따로 제작하여 압력토조 상부 뚜껑에 고정시켰다. 이때, 경사말뚝의 전도방지와 응력집중을 방지하기 위하여 가이드

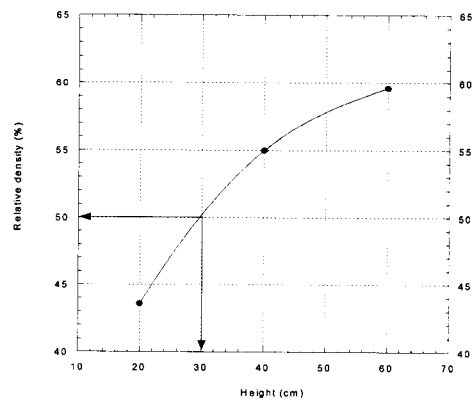


그림 5. 상대밀도와 낙하높이 관계곡선

표 1. 경사말뚝의 실험계획

말뚝길이	12 m					25 m					42 m				
	경사각	0°	5°	10°	15°	20°	0°	5°	10°	15°	20°	0°	5°	10°	15°
분류기호	T0(12)	T5(12)	T10(12)	T15(12)	T20(12)	T0(25)	T5(25)	T10(25)	T15(25)	T20(25)	T0(42)	T5(42)	T10(42)	T15(42)	T20(42)
상대밀도 (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
구속압력 (kPa)	35	35	35	35	35	70	70	70	70	70	120	120	120	120	120
말뚝종류	개단말뚝														

프레임에는 볼베어링을 설치하였다. 재하실험은 과잉 간극수압이 완전히 소산된 후 말뚝 두부에 대칭되게 LVDT를 설치하여 재하 실험시 말뚝두부의 침하량을 측정하게 하였다. 각 단계별 재하하중은 말뚝두부의 침하가 더 이상 발생하지 않을 때까지 기다렸다가 재하하중을 증가시켰다. 하중단계에 따라 재하 하중과 말뚝머리 침하량을 기록하였고, 말뚝머리침하량이 급격하게 증가할 때까지 하중을 계속 증가시켰다. 극한하중을 결정할 수 있을 때까지 재하하중을 증가시킨후 하중을 제거하였다.

5. 실험결과 및 분석

상대밀도 50 %로 형성시킨 포화된 모형지반에 단일 경사말뚝들을 향타 관입시킨 후 압축 재하실험을 실시하여 하중 - 침하 곡선을 구하였다. 이 곡선들로부터 연직 항복지지력을 하중 - 침하 곡선의 초기 접선과 최종 접선의 교점을 항복지지력으로 결정하는 Mansur/Kaufmann

방법(지반공학 시리즈4 - 깊은기초, 한국지반공학회, 1997)과 하중과 변위축을 양대수 그래프로 작도한 후 그래프의 시점과 종점의 접선을 그어 그 교점을 항복지지력으로 결정하는 $\log p - \log s$ 방법(지반공학 시리즈4 - 깊은기초, 한국지반공학회, 1997)을 적용하여 결정하였으며 그 결과를 비교·분석하였다.

5.1 실험결과

상대밀도 50 %로 형성시킨 포화된 모형지반에 유효 구속압력을 35 kPa, 70 kPa, 120 kPa로 변화시켜 실험한 0°, 5°, 10°, 15°, 20°의 경사각을 가지는 단일 경사말뚝들에 대하여 압축 재하실험을 수행하였으며 이에 대한 하중 - 침하 곡선과 대수하중 - 대수침하 곡선을 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 여기서, $\sigma = 35 \text{ kPa}$ 에 대한 결과는 실선으로, $\sigma = 70 \text{ kPa}$ 에 대한 결과는 점선으로 그리고 $\sigma = 120 \text{ kPa}$ 에 대한 결과는 일점쇄선으로 각각 나타내었다.

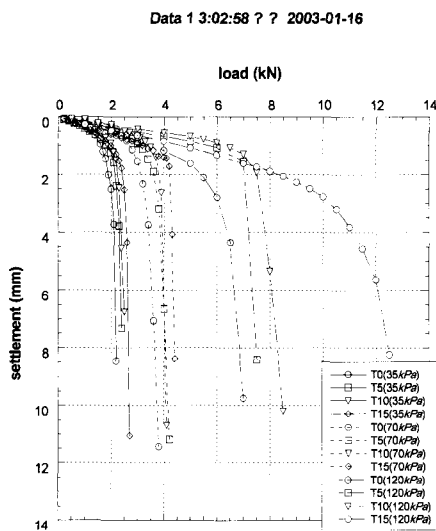


그림 6. 하중 - 침하량 곡선

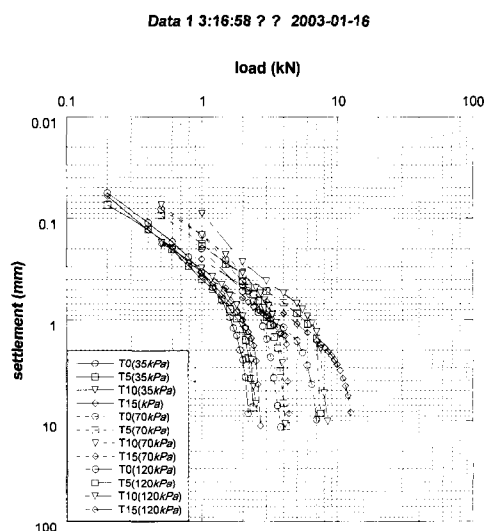


그림 7. $\log p - \log s$ 곡선

표 2. Mansur/Kaufmann 방법으로 구한 단일말뚝의 재하실험 결과

구분	구속압력						지지력 증가율의 평균값(%)
	35 kPa		70 kPa		120 kPa		
	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	
0°	2.03	100	3.3	100	6.25	100	100
5°	2.22	109	3.6	109	7.0	112	110
10°	2.3	113	3.85	117	7.4	118	116
15°	2.57	127	4.2	127			127

표 3. logp - logs 방법으로 구한 단일말뚝의 재하실험 결과

구분	구속압력						지지력 증가율의 평균값(%)
	35 kPa		70 kPa		120 kPa		
	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	항복지지력(kN)	지지력 증가비(%)	
0°	1.8	100	2.8	100	6.0	100	100
5°	2.0	111	3.2	114	6.8	113	113
10°	2.2	122	3.55	127	7.1	118	119
15°	2.5	138	4.0	142			140

5.2 결과분석

경사말뚝의 재하실험 결과를 Mansur/Kaufmann의 방법으로 계산한 결과, 동일 경사각에서의 지지력 증가율에 대한 오차가 최대 5 %인 것으로 나타났으며, logp - logs 방법으로 구한 지지력 증가비의 오차는 9 %가 발생하였다. 이는 항복지지력을 결정함에 있어 사용되는 판정법의 선별 및 적용에 있어 발생할 수 있는 오차라 판단하고 본 연구에서는 Mansur/Kaufmann의 방법과 logp - logs 방법으로 구한 지지력 증가율을 이용하여 분석하였다.

단일 경사말뚝의 재하실험에 있어 경사각 20°의 경우 하중재하시 하중의 말뚝 축방향 연직분력에 의해 발생할 수 있는 전도를 막기 위하여 볼 베어링을 결합한 가이드 프레임(Guide frame)을 설치하였으나 약간의 전도가 발생하여 항복지지력을 결정할 수 없었다. 또한, 구

속압력이 상대적으로 큰 경우 즉, 구속압력이 120 kPa 인 경우 경사말뚝의 전도가 15°에서부터 발생하여 항복 지지력을 결정할 수 없었다.

경사각 0°, 5°, 10°, 15°에 대한 경사말뚝의 항복지지력(Q_{ny})과 연직말뚝의 항복지지력(Q_{0y})과의 백분율을 지지력 증가율로 정의하였으며, 말뚝의 실제 깊이를 상사화하기 위한 압력토조의 구속압력에 대하여 정리하여 그림 8과 9에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 경사말뚝의 경사가 커짐에 따라 지지력 증가율이 증가하였으며 실험에서의 최대경사각인 15°일 때 연직 말뚝의 경우보다 120 ~ 140 %까지 지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 경사말뚝의 설치각도의 증가에 따른 지지력 증가율은 토조의 구속압력에 따라 달라지지는 않았는데 이는 말뚝의 근입깊이가 변화하더라도 지지력 증가율은 변화하지 않는 것을 의미하는

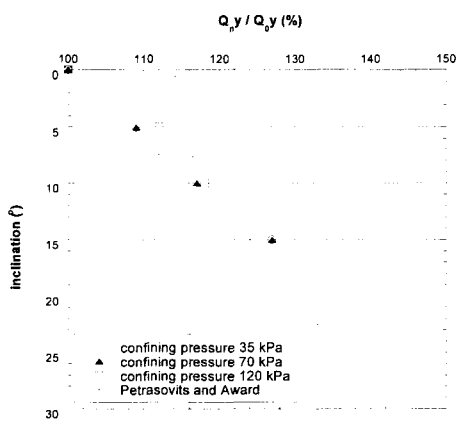


그림 8. 경사각도 - 지지력 증가율(Mansur/Kaufmann 방법)

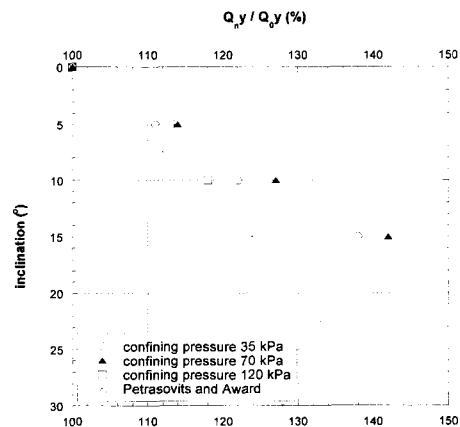
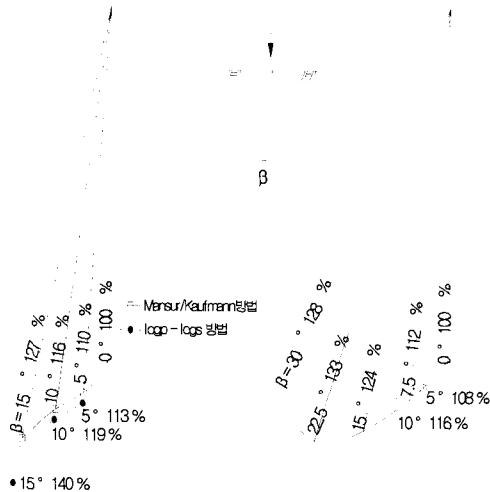


그림 9. 경사각도 - 지지력 증가율(logp - logs 방법)



(a) 지지력 증가율의 평균값 (b) Petrasovits and Awad의 지지력율
 그림 10. 경사각도에 따른 경사말뚝의 지지력을 비교

것으로 볼 수 있었다. 다만, 항복지지력 분석방법에 따라 지지력 증가율에서 다소의 차이는 수반되었다.

지지력 증가율은 말뚝의 근입깊이에 상관없이 말뚝의 설치각도에 따라 변화하는 것으로 볼 수 있었으므로 지지력 증가율을 구속압력에 관계없이 평균적인 값(표 2와 표 3 참조)으로 하여 그림 10에 나타내었다. 그림 10(a)에는 분석방법에 따른 지지력 증가율을 말뚝의 설치경사각도별로 분석하여 나타내었다. 여기서, 분석방법이 달라지더라도 설치각도에 따른 지지력 증가율은 큰 차이가 없었으며 설치 경사각도가 큰 경우에는 지지력 증가율에서 다소 차이가 나타났으나 그 오차는 9% 정도였다. 참고로 그림 10(b)에는 Petrasovits and Awad의 실험 연구 중 본 연구의 실험 사례와 비슷한 경우(그림 1(d) 참조)의 결과를 도시하였으며, 이중 5°와 10°인 경사각에 대한 지지력 증가율은 보간하여 나타내었다. Petrasovits and Awad의 실험조건은 본 연구의 실험조건과 동일하지는 않았으므로 직접적인 비교·분석은 곤란할 것으로 사료되었으므로 정량적으로 분석하지는 않았다. 다만 기존에 수행된 훌륭한 연구결과이므로 지지력 증가율에 대한 정성적인 경향성을 알아내는데 참고할 수 있을 것이다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 압력토조 모형실험을 통해 단일 경사말뚝을 5°, 10°, 15°의 경사각도로 타격 관입하여 연직말뚝의 지지력과 비교 검토하였다.

- (1) 단일 경사말뚝에 대한 압력토조 모형실험에서 말뚝의 경사각이 증가함에 따라 연직말뚝의 지지력보다 상대적으로 큰 지지력이 발현됨을 알 수 있었으며, 설치경사각 5°, 10°, 15°일 때 지지력 증가율은 각각 111, 121, 127 ~ 140% 정도를 나타내었다.
- (2) 설치경사각도에 따른 지지력 증가율은 항복지지력 분석방법에 따라 큰 차이는 없었으나 경사각 15°일 경우에는 9% 정도의 오차범위를 나타내었다.
- (3) 설치경사각도에 따른 지지력 증가율은 말뚝의 근입깊이에 따라 변화하지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 앞으로의 연구방향으로는 경사말뚝의 하중과 침하량 관계에 관한 연구뿐만 아니라 경사말뚝의 축하중 분포를 측정하여 축하중지지 거동을 파악하는 실험적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 하중방향의 변화, 지반조건 등을 변화시켜 추가적인 연구를 수행한다면 경사말뚝의 합리적인 설계에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 경성대학교 공학기술연구소와 스마트 사회기반시설 연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 배우석 (1997), "모래에 근입된 경사말뚝의 인발 거동", 충북대학교 공학 석사학위 논문.
2. (사) 한국지반공학회 (1997), "지반공학시리즈 4 - 깊은기초", pp. 229-240.
3. Das, B. M., "A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles", *Soils and Foundations*, Japan, Vol.23, No.3, 1983, pp.122-126.
4. Hanna, A. M. and Afram, A. (1986), "Pull-out Capacity of Single Batter Piles in Sand", *Can. Geotech. J.* Vol.23, pp.387-392.
5. Meyerhof, G. G. (1973), "Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles", *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, USSR, Vol.2, No.1, pp.167-172.
6. Meyerhof, G. G. and Goral Ranjan G. (1973), "The Bearing Capacity of Rigid Piles under Inclined Loads in Sand. II : Batter Piles", *Can. Geotech. J.* Vol.23, pp.387-392.
7. O'Neill, M. W., Vipulanandan, C., & Ochoa, M. (1990), "Response of Tension piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand", Report No. UHCEE 90-09, Dept of Civil and Environmental Engineering, Dec. 1990.
8. Petrasovits, G. and Awad, 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.

(접수일자 2002. 6. 14, 심사완료일 2003. 2. 25)