

모형실험에 의한 사질토 지반에서 단말뚝의 수평거동 특성 Lateral Behavior Characteristics of Short Pile in Sands by Model Tests

김진복¹⁾, Jin-Bok Kim, 박종운¹⁾, Jong-Un Park, 한대환²⁾, Dae-Hwan Han, 권오균³⁾, Oh-Kyun Kwon

¹⁾ 계명대학교 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung University

²⁾ 계명대학교 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Keimyung University

³⁾ 계명대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung University

SYNOPSIS : The model tests of short pile with very small pile length/diameter(L/D) were performed in this paper. Varying the pile diameter, length, and the lateral loading point, the lateral resistance and behavior of very short pile were studied in this model tests.

The experimental and analytical results are as follows. The lateral ultimate resistance of short pile in sands was the maximum at the point of $h/L=0.75$, regardless of pile length/diameter(L/D). As the pile diameter is larger, the lateral ultimate resistance of pile with $L/D=1$ decreases a little and the lateral resistance increases according to the ratio of pile length/diameter.

As the lateral loads are acting on the pile, the displacement of pile head is maximum at the pile top of $h/L=0$, but minimum at the middle point of the pile. And if the loading point is under the middle of pile, the displacement of pile head occurs opposite in the loading direction, but its magnitude is very small.

Key words : Lateral resistance, Lateral behavior, Short pile, Lateral loading point, Displacement

1. 서 론

현재까지 수직하중을 받는 말뚝기초에 관한 연구는 많이 수행되어 왔으나, 수평하중을 받는 말뚝에 관한 연구는 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다. 특히 말뚝직경과 길이의 비가 1:2를 넘지 않는 매우 짧은 단말뚝(Short Pile)의 수평하중에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 특히 해양구조물, 옹벽, 교량 등의 구조물은 수직하중 뿐만 아니라 수평하중에 대한 영향도 크게 작용한다. 수직하중과 마찬가지로 수평하중을 받는 말뚝의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 심각한 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 철저한 검토가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 사질토 지반에서 수평하중을 받는 단말뚝의 거동 양상을 파악하기 위하여 실내모형실험을 실시하였으며, 그 결과를 비교 및 분석하여 단말뚝의 수평거동특성을 파악하였다.

2. 이론적 배경

수평력을 받는 말뚝은 말뚝과 지반 중 어느 것이 움직이는 주체인가에 따라 그림 1과 같이 주동말뚝 및 수동말뚝으로 구별할 수 있다. 주동말뚝은 움직이는 주체가 말뚝이 되고 말뚝의 변위가 주변 지반의 변형을 유발하게 된다. 한편, 수동말뚝은 우선 어떤 원인에 의하여 말뚝주변의 지반이 먼저 변형을 일으키면 말뚝에 측방토압이 작용하고 나아가 부동지반면 아래의 지반으로 이 측방토압이 전달된다. 이 경우에는 말뚝주변의 지반이 움직이는 주체가 되어 말뚝이 지반변형의 영향을 받게 된다.

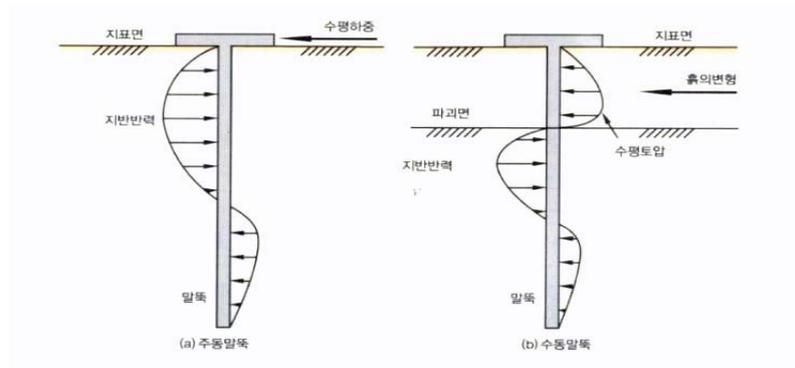


그림 1. 수평력을 받는 말뚝(조천환, 2007)

극한평형법에서는 지반반력 p 를 말뚝처짐 y 와는 무관하게 깊이 x 만의 관계로 식(1)과 같이 나타낸다.

$$p = P(x) \quad (1)$$

즉 지반의 극한상태에 대한 지반반력의 분포형상을 선형적으로 가정하고, 말뚝에 작용하는 외력과의 균형에서 수평지지력을 구하려고 하는 것이다. 이 방법은 Engel(1903)이 스스로의 실험결과를 해명하기 위해 일반적으로 제로포인트법으로 일컬어지는 사고방식을 적용한 것이 그 원천으로 되어 있다. 지반반력의 분포형상을 2차곡선으로 가정하는 Engel-物部(1952)의 방법, 직선으로 가정하는 Raes(1936), Broms(1964) 등의 방법이 있다.

극한평형법은 처짐성의 긴말뚝에 적용하는 것은 곤란하다. 그러나 말뚝의 근입깊이가 짧고 지반에 대해서 상대적으로 강성인 말뚝, 그리고 말뚝-지반과의 파괴가 지반전역에 걸쳐서 생기는 경우에는 적용하기 편리한 방법이다.

Engel-物部(1952)의 방법은 수평력(Q , kgf) 및 전도모멘트(M , kgf · cm)를 받는 말뚝에 작용하는 지반반력(p , kgf/cm)을 그림 2에 나타낸 것과 같이 2차 곡선인 것으로 가정한다. 이 방법을 이용한 임의의 깊이 x (cm)에 대한 휨모멘트(M_x , kgf · cm) 및 전단력(Q_x , kgf)은 식(2) 및 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_x = -Mt - Qtx + \frac{P_{\max}}{x_1^2} \left(\frac{1}{3}x_1x_3 - \frac{1}{12}x^4 \right) \quad (2)$$

$$Q_x = -Qt + \frac{P_{\max}}{x_2^2} \left(x_1x^2 - \frac{1}{3}x^3 \right) \quad (3)$$

최대휨모멘트는 식(4)의 위치에서 발생하며, 그 크기는 식(5)와 같다.

$$l_m = \frac{1}{2} \{ d + \sqrt{d(d+4L)} \}, \quad d = 3x_1 - L \quad (4)$$

$$M_{\max} = -M_t - Q_t l_m + \frac{P_{\max}}{12} \frac{l_m^3}{x_1^2} (4x_1 - l_m) \quad (5)$$

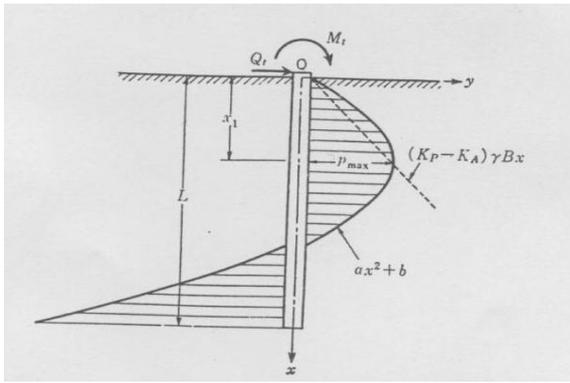


그림 2. Engel-物部の 방법(1952)

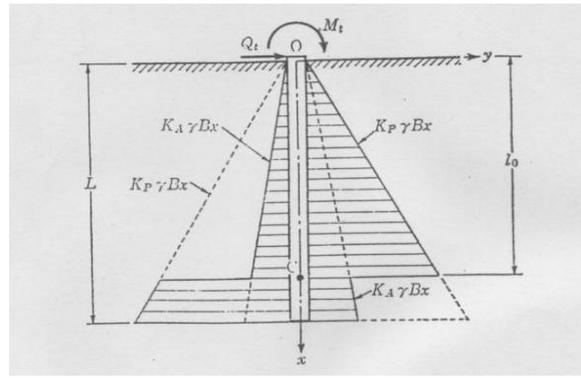


그림 3. Raes의 방법(1936)

Raes(1936)는 수평력을 받는 말뚝이 지반중의 어떤 점 C를 중심으로 강체회전을 일으켜 균형상태에 있는 경우에 대한 휨모멘트와 전단력을 구하였다. 이때 토압분포를 그림 3과 같이 가정하면, 수평력 및 O점에서의 모멘트 평형조건은 식(6) 및 식(7)과 같다.

$$\frac{1}{2}(K_P - K_A)\gamma B(2l_0 - L^2) = Q_t \quad (6)$$

$$\frac{1}{3}(K_P - K_A)\gamma B(L^3 - 2l_0^3) = M_t \quad (7)$$

말뚝에 생기는 휨모멘트(M_x)와 전단력(Q_x)은 각각 식(8) 및 식(9)와 같다.

$$M_x = -M_t - Q_t x + \frac{1}{6}(K_P - K_A)\gamma Bx^3 \quad (8)$$

$$Q_x = -Q_t + \frac{1}{2}(K_P - K_A)\gamma Bx^2 \quad (9)$$

또한 최대휨모멘트는 식(10)과 같은 위치에서 나타나며, 그 크기는 식(11)과 같다.

$$l_m = \sqrt{\frac{2Q_t}{(K_P - K_A)\gamma B}} \quad (10)$$

$$M_{\max} = -M_t - \frac{2}{3}Q_t l_m \quad (11)$$

Broms(1964)는 수평력을 받는 말뚝 지반계의 파괴형태를 고찰하여 말뚝의 휨강성과 근입길이 및 지반강성에 의하여 말뚝을 분류하였고, 지반을 점성토와 사질토로 나누어 말뚝의 극한 수평저항력을 구하는 방법을 제안하였다. 지반에 따른 말뚝의 길고 짧음의 판별은 표 1과 같다. 이 표에서 L은 말뚝의 근입길이(cm)이며, β 와 η 는 각각 식(12) 및 식(13)과 같다.

표 1. 말뚝의 판별(Broms, 1964)

	점 성 토	사 질 토
짧은 말뚝	$\beta L < 2.25$	$\eta L < 2.0$
중간 말뚝	-	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$
긴 말뚝	$\beta L > 2.25$	$\eta L \leq 4.0$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \quad (12)$$

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (13)$$

표 1은 점성토와 사질토 지반에서 장·단 말뚝을 나타낸 것으로 말뚝과 지반에 대하여 다음의 가정을 한다.

- ① 짧은 말뚝, 중간 말뚝에서는 말뚝길이 전역에 걸쳐서 파괴한다.
- ② 긴 말뚝에서는 지중부의 말뚝체에 소성힌지가 발생하고, 상부의 지반은 전역에 걸쳐서 소성화 한다.

그림 4와 그림 5는 사질토 지반에서 말뚝과 지반의 파괴형태를 보이고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 짧은 말뚝의 회전중심은 말뚝선단 부근으로 가정하고, 이 부근에 작용하는 높은 토압은 말뚝선단에 집중하중으로 가정하고, 말뚝선단에 모멘트를 취하면 수평저항력(Q_u)는 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$Q_u = \frac{0.5\gamma BL^3 K_p^3}{e + L} \quad (14)$$

최대모멘트가 발생하는 위치와 최대모멘트는 각각 식(15) 및 식(16)과 같다.

$$D_y = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{BK_p \gamma}} \quad (15)$$

$$M_{\max} = Q_u \left(e + \frac{2}{3} D_y \right) \quad (16)$$

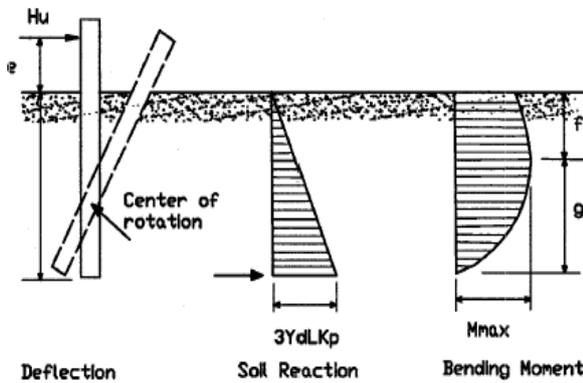


그림 4. 사질토 지반에서 짧은 말뚝의 지반파괴 형태(Broms, 1964)

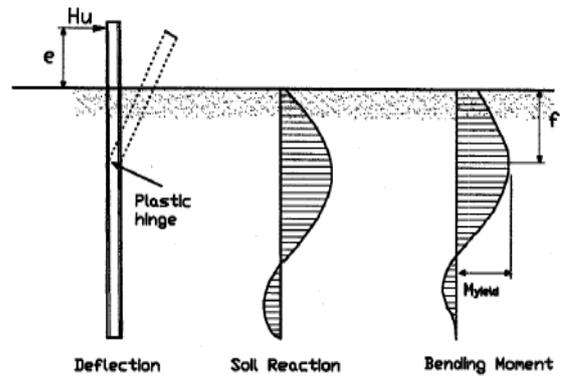


그림 5. 사질토 지반에서 긴 말뚝의 지반파괴 형태(Broms, 1964)

3. 모형실험 장치 및 방법

3.1 모형실험 장치

본 연구에서 사용된 모형토조의 크기는 1.28m×1.00m×1.50m(가로×세로×높이, 그림 7 참조)이고, 실험이 진행되는 동안 토조의 변형을 방지하기 위하여 강재와 아크릴을 사용하여 제작하였다. 모형지반은 주문진 표준사로 조성하였으며, 실험에 사용된 모형시료의 입도분포곡선은 그림 6과 같으며, 균등계

수(C_u)는 1.38, 곡률계수(C_c)는 0.97로 통일분류법상 SP로 분류된다. 내부마찰각(ϕ)은 약 34° 이며, 비중(G_s)은 2.61이다. Bowles(1978)의 방법을 이용하여 산정한 모형시료의 최대 및 최소건조단위중량은 각각 0.182kN/m^3 과 0.152kN/m^3 이며, 실험 시 모형지반의 건조단위중량(γ_d)은 0.161kN/m^3 으로 상대밀도(D_r)는 약 56%로 나타났다. 모형말뚝은 두께가 3mm인 아크릴로 제작하였으며(그림 8 참조), 말뚝측면 5개소에서 횡하중을 작용시켜 모형실험을 수행하였으며, 하중재하는 와이어를 연결하여 하중을 가할 수 있도록 하였다. 수평하중을 받는 말뚝의 수평변위는 LVDT와 와이어 변위계(DP-500D)를 이용하였으며, 모형말뚝에 작용하는 하중은 로드셀(최대하중 2kN)로 측정하였다. 모형실험을 수행하는 동안 재하하중과 말뚝의 수평변위는 데이터 로거(TDS-602)에 자동으로 기록 저장된다.

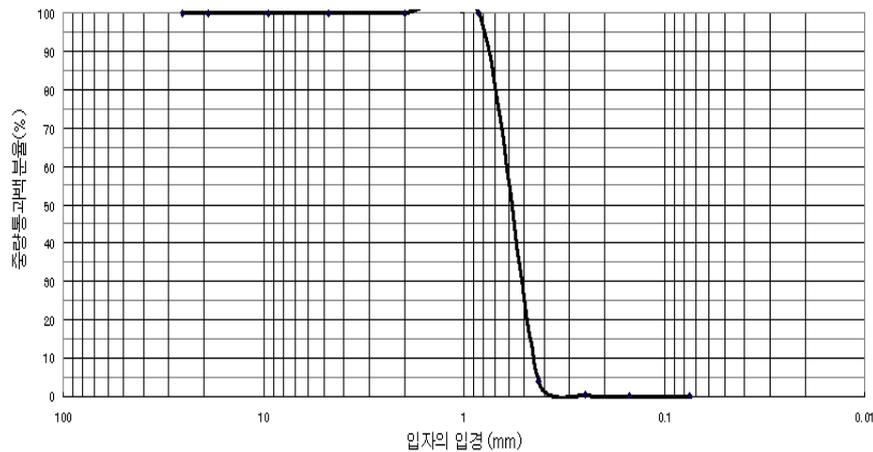


그림 6. 입도분포곡선



그림 7. 모형실험용 토조



그림 8. 모형말뚝 모습

3.2 모형실험 순서

모형실험의 순서는 다음과 같다. 먼저 물로 깨끗이 씻은 시료를 모형토조에 넣은 후, 물을 채워서 시료를 포화시켰다. 형성된 지반의 단위중량을 확인하기 위하여 일정한 깊이에 작은 캔을 넣은 후, 모형실험이 완료된 후에 지반의 단위중량을 확인하였다. 모형말뚝은 유압잭을 이용하여 소정의 깊이에 관입시켰으며, 정확한 위치에 말뚝을 관입시키고 편심이 작용하지 않도록 하기 위하여 말뚝관입 보조장치를 이용하였다.

말뚝에 대한 실험은 말뚝을 설치할 때의 불안정한 지반이 안정될 때까지 일정한 시간이 경과한 후 실시하였으며, 하중재하는 모형토조의 외부에 설치된 와이어와 도르래로 연결된 감속기가 달린 모터를 이용하였다. 이때 하중재하는 2mm/min의 속도를 일정하게 유지하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험을

위한 재하장치와 계측기 설치가 완료된 모습(실험 전)과 수평하중을 받아 말뚝이 이동한 모습(실험 후)이 그림 9와 그림 10에 나타나 있다.



그림 9. 실험 전 전경



그림 10. 실험 완료 후 전경

4. 모형실험 결과

본 연구에서는 사질토 지반에서 횡방향 하중에 대한 단말뚝의 거동특성을 연구하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험에 사용된 말뚝은 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 1인 말뚝직경이 100mm, 150mm, 200mm인 경우와 L/D=2인 말뚝직경 100mm인 경우이다. 그리고 말뚝의 수평방향 하중재하위치에 따른 거동 특성을 파악하기 위하여 말뚝측면의 5개소 위치에서 하중을 재하하여 실험을 실시하였다. 하중재하위치(h)는 말뚝상부로부터 나타내었으며, 각각 하중재하위치(h/L)는 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0의 5가지의 경우이다. 말뚝상부에 보조장치를 이용하여 4개의 와이어 변위계를 설치하여 수평하중에 따른 말뚝의 변화 양상을 파악하였다.

모형실험에 사용된 모형말뚝은 직경에 대한 길이비가 일반 깊은 기초보다 현저히 짧기 때문에 말뚝의 재질에 의한 휨 강성은 무시하고 실험을 하였다. 또한, 실제 말뚝의 수평거동은 관입깊이가 증가함에 따라, 동일한 하중에서 수평변위가 감소하는 것으로 알려져 있다.

4.1 하중재하위치에 따른 하중-변위 관계

그림 11은 말뚝길이/직경(L/D)이 1이고 직경(D)이 100mm인 말뚝에서 수평하중 재하위치별 하중-변위 관계를 나타내었다. 이 그림으로부터 p-s곡선의 기울기는 하중재하위치가 말뚝의 상부에서 하부로 갈수록 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 하중은 말뚝상부에서 하부로 갈수록 커지다가 h/L=0.75 위치에서 최대로 나타난 후 말뚝 최하단에서는 약간 감소하는 것으로 나타났다.

그림 12는 직경이 100mm이고, L/D=2인 모형말뚝의 p-s곡선을 나타내고 있다. 그림 11의 경우와 비교하여 하중은 상대적으로 증가하였으며, 변위도 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. p-s곡선의 기울기는 L/D=1인 경우에 비하여 하중재하위치에 따른 뚜렷한 양상은 없는 것으로 나타났다. 그리고 하중재하위치에 따른 양상은 L/D=1인 경우와 비슷하게 h/L=0.75에서 하중이 가장 크게 나타났다.

그림 13과 14는 L/D=1이고 말뚝직경이 각각 150mm와 200mm인 경우의 p-s곡선을 나타내고 있다. 말뚝직경이 커짐에 따라 최대하중은 증가하며, p-s곡선의 기울기도 커지는 것으로 나타났다. 그리고 하중재하위치에 따른 하중은 말뚝직경 100mm인 경우와 유사하게 말뚝하부로 내려 갈수록 커지다가 h/L=0.75에서 최대로 나타난 후, 말뚝하단에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이상에서 보는 바와 같이 말뚝직경이 커질수록 p-s곡선의 기울기는 증가하지만, 하중재하위치에 따른 극한하중은 말뚝직경에 관계없이 하중재하위치가 말뚝상부에서 하부로 내려 갈수록 증가하다가 h/L=0.75 위치에서 최대의 극한하중을 나타냈다.

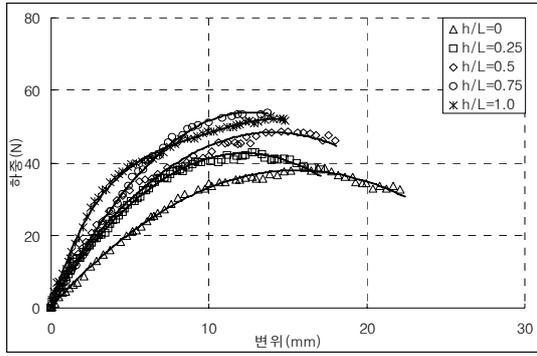


그림 11. $L/D=1(D=100\text{mm})$ 인 말뚝의 하중재하위치에 따른 p-s곡선

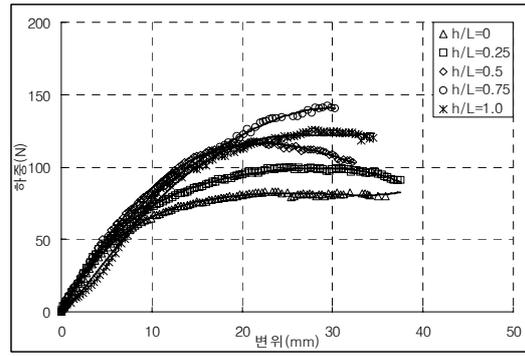


그림 12. $L/D=2(D=100\text{mm})$ 인 말뚝의 하중재하위치에 따른 p-s곡선

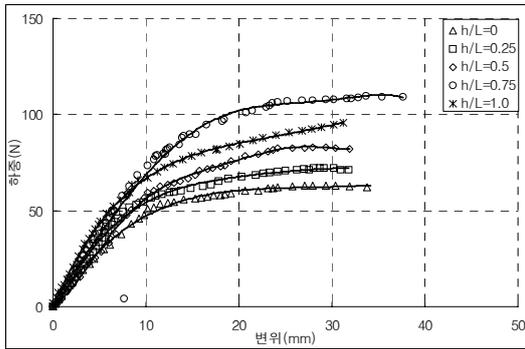


그림 13. $L/D=1(D=150\text{mm})$ 인 말뚝의 하중재하위치에 따른 p-s곡선

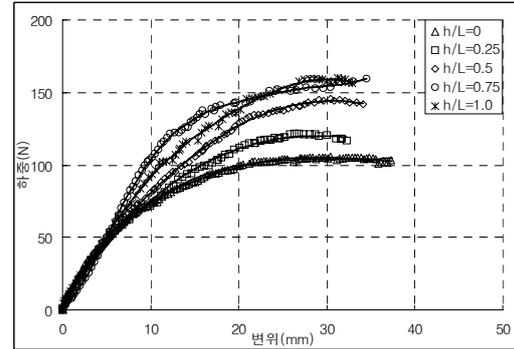


그림 14. $L/D=1(D=200\text{mm})$ 인 말뚝의 하중재하위치에 따른 p-s곡선

4.2 말뚝의 극한지지력

본 연구에서는 모형실험에 의한 하중-침하곡선에 대하여 Davisson방법(Davisson, 1972), 침하량을 기준으로 하는 $\Delta=0.1D$ 방법(Terzaghi, 1942)과 최대지하중을 극한지지력으로 하는 방법 등으로 극한지지력을 산정하였으며, 이 결과들을 이론적 해석방법인 Broms(1964)의 극한지지력 산정식에 의한 극한지지력과 비교하였으며 그 결과는 표 2 및 그림 15~20에 자세히 나타나 있다.

그림 15는 말뚝길이/직경(L/D)비가 1이고 직경(D)이 100mm인 경우의 극한지지력을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 하중재하위치에 따른 극한지지력은 최대하중법, 0.1D방법(Terzaghi, 1942), Davisson 방법(Davisson, 1972) 모두 비슷한 결과를 나타내지만, 해석적 방법인 Broms 방법(Broms, 1964)의 결과는 $h/L=0$ 과 $h/L=0.25$ 에서의 결과를 제외하면, 실험적 방법의 결과보다 크게 나타났다. 그리고 하중재하위치가 $h/L=0.75$ 인 경우 지지력이 가장 크게 나타났으며, 다른 세 가지 방법으로 구한 지지력도 동일한 양상을 보이고 있다.

그림 16은 $L/D=2(D=100\text{mm})$ 인 말뚝의 각 방법에 의한 극한지지력을 보여주고 있으며, 그림 17과 18은 $L/D=1$ 인 직경 150mm와 200mm인 말뚝의 극한지지력을 나타내고 있다. 이 그림들로부터 하중재하위치에 따른 극한지지력은 그림 15에서의 결과와 비슷한 경향을 나타내며, $h/L=0.75$ 에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 그러나 모형실험 결과는 $L/D=1(D=100)$ 의 경우 세 가지 방법으로 구한 극한지지력은 거의 비슷한 결과를 주지만, 말뚝직경이 커지면 세 가지 방법에 의한 결과는 차이가 크게 나타난다. 최대하중법에 의한 극한지지력이 가장 크고, 0.1D방법의 결과가 가장 작게 나타났다.

그림 19와 20은 말뚝의 종류에 따른 극한지지력을 비교하였다. 말뚝직길이/직경(L/D)비가 1이고 직경

(D)이 100mm인 경우를 기준으로 비교해보면, 직경과 길이가 변한 직경이 150mm, 200mm인 경우 극한지지력이 감소하는 것으로 나타났다.

표 2. 극한지지력 비교

(단위:kN/m²)

하중재하위치		h/L=0	h/L=0.2	h/L=0.5	h/L=0.7	h/L=1.0
극한지지력 결정방법			5	0	5	
L/D=1 (D=100mm)	최대하중방법	3.9	4.3	4.9	5.3	5.2
	△=0.1D 방법 (Terzaghi, 1942)	3.4	4.0	4.2	5.1	4.9
	Davisson 방법 (Davisson, 1972)	3.3	4.1	4.5	5.3	5.1
	Broms 방법(Broms, 1964)	3.2	4.3	6.5	12.9	∞
L/D=2 (D=100mm)	최대하중방법	4.1	5.0	5.9	6.8	6.2
	△=0.1D 방법 (Terzaghi, 1942)	3.3	3.6	4.2	4.9	4.0
	Davisson 방법 (Davisson, 1972)	4.1	4.8	5.2	6.8	5.6
	Broms 방법(Broms, 1964)	6.5	8.6	12.9	25.8	∞
L/D=1 (D=150mm)	최대하중방법	2.8	3.2	3.7	4.8	4.1
	△=0.1D 방법 (Terzaghi, 1942)	2.3	2.5	2.5	3.3	3.0
	Davisson 방법 (Davisson, 1972)	2.4	2.7	3.0	4.5	3.6
	Broms 방법(Broms, 1964)	4.8	6.5	9.7	19.4	∞
L/D=1 (D=200mm)	최대하중방법	2.6	3.0	3.6	3.8	4.0
	△=0.1D 방법 (Terzaghi, 1942)	1.9	1.9	2.0	2.6	2.3
	Davisson 방법 (Davisson, 1972)	2.4	2.9	3.4	3.9	3.8
	Broms 방법(Broms, 1964)	6.5	8.6	12.9	25.8	∞

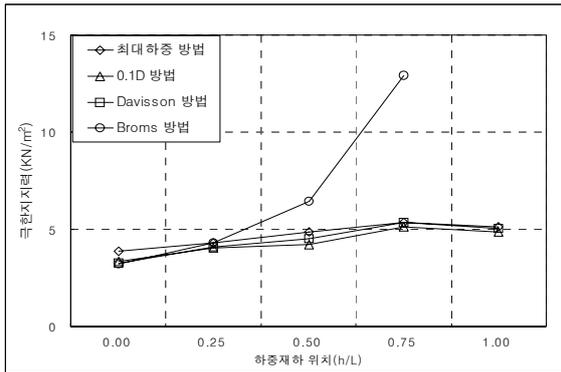


그림 15. L/D=1이고, D=100mm인 말뚝의 극한지지력

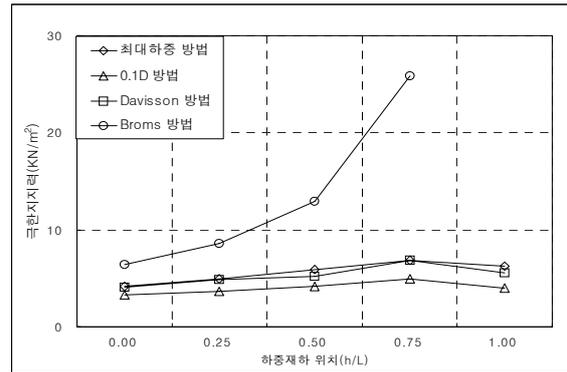


그림 16. L/D=2이고, D=100mm인 말뚝의 극한지지력

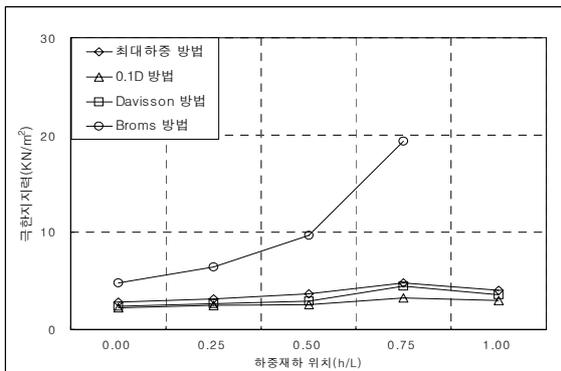


그림 17. L/D=1이고, D=150mm인 말뚝의 극한지지력

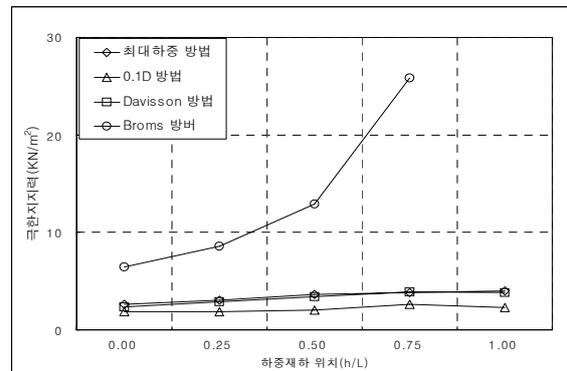


그림 18. L/D=1이고, D=200mm인 말뚝의 극한지지력

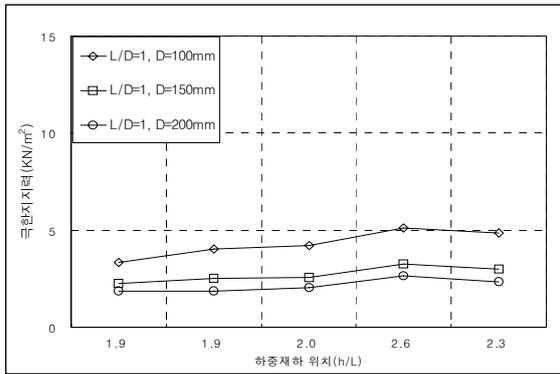


그림 19. 0.1D방법에 의한 극한지지력

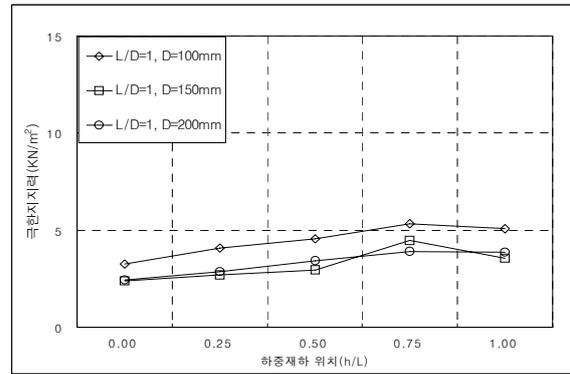


그림 20. Davisson에 의한 극한지지력

4.3 하중 재하위치에 따른 말뚝의 변위양상

수평하중을 받는 말뚝의 하중에 따른 변화 양상을 파악하기 위해 말뚝 상부에 와이어 변위계 4개를 설치하여 측정하였다. 측정한 값을 계산하여 수평하중에 따른 말뚝 전체의 변화 양상을 파악하였다. 본 연구에서는 각각의 하중 및 변위 변화에 대하여 모든 변화 양상을 그림으로 나타낼 수 없어 임의의 변위에 대하여 말뚝의 변화양상을 표 3~6에 나타내었다.

말뚝길이/직경(L/D)비가 1이고 직경이 100mm인 말뚝의 경우 하중재하위치(h/L)가 0인 말뚝의 최상단부에서 하중증가에 따른 변위가 15mm일 때 7.21° 기울어졌으며, h/L=0.25인 경우 6.33° 기울어졌고, 하중재하위치가 말뚝의 중앙인 h/L=0.5에서는 0.51°로 거의 변화가 없었다. 또한, 하중재하위치가 중앙에서 아래쪽으로 내려갈수록 하중재하 방향과 반대방향으로 1.24°, 2.88° 기울어졌다. 재하위치별 말뚝의 변화 양상은 최상부에서 가장 크고 중앙부분에서 약 1° 내외로 기울어졌으며 중앙 아래부분으로 내려갈수록 하중재하 방향과 반대방향으로 기울어지는 것을 볼 수 있다. 말뚝 직경과 길이가 증가함에 따라 말뚝의 변화양상은 작게 나타나는 것을 파악할 수 있다.

표 3. 하중 재하위치에 따른 말뚝의 변위 양상(D/L=1, D=100mm)

변위(mm) 하중 재하위치	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
h/L=0	0°	0.3°	0.57°	1.11°	2.08°	3.34°	4.32°	5.05°	6.32°	6.73°	7.21°
h/L=0.25	0°	0.06°	0.11°	0.69°	1.12°	1.78°	2.55°	3.43°	4.40°	5.23°	6.33°
h/L=0.50	0°	0.03°	0.03°	0.06°	0.14°	0.20°	0.28°	0.29°	0.31°	0.41°	0.51°
h/L=0.75	0°	-0.03°	-0.06°	-0.14°	-0.37°	-0.43°	-0.69°	-0.83°	-1.04°	-1.12°	-1.24°
h/L=1.0	0°	-0.03°	-0.17°	-0.29°	-0.54°	-0.69°	-1.15°	-1.24°	-1.87°	-2.11°	-2.88°

표 4. 하중 재하위치에 따른 말뚝의 변위 양상(D/L=2, D=100mm)

변위(mm) 하중 재하위치	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
h/L=0	0°	0.3°	0.69°	1.73°	2.87°	4.16°	5.43°	6.83°	8.18°	9.77°	11.18°
h/L=0.25	0°	0.03°	0.32°	0.92°	1.87°	3.28°	4.77°	6.32°	8.23°	10.11°	12.09°
h/L=0.50	0°	0.03°	0.03°	0.03°	0.29°	0.49°	0.68°	0.83°	0.97°	1.15°	1.23°
h/L=0.75	0°	-0.03°	-0.06°	-0.06°	-0.11°	-0.14°	-0.23°	-0.37°	-0.63°	-0.83°	-0.97°
h/L=1.0	0°	0°	-0.06°	-0.11°	-0.17°	-0.20°	-0.31°	-0.34°	-0.48°	-0.57°	-0.85°

표 5. 하중 재하위치에 따른 말뚝의 변위 양상(D/L=1, D=150mm)

변위(mm) 하중 재하위치	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
h/L=0	0°	0.09°	0.48°	1.33°	3.84°	6.01°	8.72°	11.39°	13.75°	15.62°	18.21°
h/L=0.25	0°	0.06°	0.45°	1.31°	2.56°	4.55°	6.41°	8.83°	11.79°	14.09°	17.12°
h/L=0.50	0°	0°	0.03°	0.06°	0.09°	0.20°	0.29°	0.43°	0.51°	0.54°	0.6°
h/L=0.75	0°	0°	-0.03°	-0.03°	-0.06°	-0.06°	-0.09°	-0.11°	-0.14°	-0.20°	-0.23°
h/L=1.0	0°	-0.03°	-0.03°	-0.06°	-0.14°	-0.29°	-0.37°	-0.57°	-0.66°	-0.80°	-0.95°

표 6. 하중 재하위치에 따른 말뚝의 변위 양상(D/L=1, D=200mm)

변위(mm) 하중 재하위치	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
h/L=0	0°	0.03°	0.14°	0.63°	1.90°	3.58°	5.73°	7.69°	9.65°	12.35°	14.78°
h/L=0.25	0°	0.03°	0.54°	1.57°	2.98°	5.23°	7.84°	10.71°	13.74°	16.91°	19.98°
h/L=0.50	0°	0.03°	0.03°	0.03°	0.03°	0.09°	0.26°	0.34°	0.37°	0.43°	0.49°
h/L=0.75	0°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.06°	-0.09°	-0.09°
h/L=1.0	0°	-0.03°	-0.06°	-0.09°	-0.14°	-0.26°	-0.29°	-0.37°	-0.43°	-0.52°	-0.54°

5. 결 론

본 연구에서는 말뚝길이/직경의 비가 매우 작은 단말뚝에 대하여 모형실험을 실시하였다. 말뚝직경과 길이를 변화하였으며 수평방향으로 하중재하위치를 변화하여 단말뚝의 지지력 및 거동특성에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형실험 결과, 사질토에 관입된 말뚝길이/직경의 비와 관계없이 단말뚝의 재하위치에 따른 수평극한 하중은 하중재하위치가 말뚝상부에서 하부로 내려 갈수록 커지며, $h/L=0.75$ 지점에서 수평극한지지력이 가장 크게 나타났다.
2. $L/D=1$ 인 말뚝의 수평극한지지력은 말뚝직경이 커짐에 따라 약간 감소하며, 말뚝길이/직경의 비가 커지면 극한지지력도 증가하는 경향을 나타냈다.
3. 하중 크기에 따른 변위양상은, 하중재하위치가 말뚝최상부인 $h/L=0$ 인 경우에 말뚝두부가 하중 재하 방향으로 가장 많이 회전하였고, 말뚝중양부에 재하하는 경우($h/L=0.5$)에는 매우 작게 회전하는 것으로 나타났다. 그리고 하중재하위치가 말뚝하부로 내려가면 말뚝두부가 하중재하 반대 방향으로 회전하지만, 그 크기는 매우 작게 나타났다.

참고문헌

1. 김영수, 김병탁, 손원일 (1995), "사질토 지반에서 수평정적하중에 의한 강관말뚝의 거동에 관한 원심 모형실험 연구", **대한토목학회발표논문(III)**, pp.301-305.
2. 김준석 (1998), *말뚝기초의 설계법과 해설*, 과학기술.
3. 이경동 (2004), *단말뚝의 수평지지력에 대한 실험적 연구*, 석사학위논문, 계명대학교.
4. 조천환. (2007). 매입말뚝공법. 이엔지·북.
5. 한국지반공학회 (2002), *깊은기초*, 구미서관.
6. Das, B.M. (2004), *Principle of Foundation Engineering*, tth ed., Brooks/Cole.
7. Broms, B.B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM 2, pp. 27~63
8. Broms, B.B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM 3, pp. 123~156
9. Chang, Y.L. (1937), "Discussions on lateral pile loading test", Trans. ASCE, pp. 272-278
10. Davission, M.T. (1970), "Later load capacity of piles", Highway Research Record, No. 333, pp. 104-112.
11. Rase, P.E (1936), "Theory of Lateral Bearing Capacity of Piles", Proc. 1st ICSMFE, pp. 166~169