

사질토지반에서 수평인발하중을 받는 석션말뚝에 관한 연구

A Study on Behavior of Horizontal Pull-out Loaded suction pile in Sands

김진복¹⁾, Jin-Bok Kim, 박종운²⁾, Joung-Un Park, 진홍민³⁾, Hong-Min Jin 권오균⁴⁾, Oh-Kyun Kwon

¹⁾ 계명대학교 토목공학과 박사, Ph. D., Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

²⁾ 계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

³⁾ 계명대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

⁴⁾ 계명대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

SYNOPSIS : In this thesis the model tests were performed to the horizontal pull-out characteristics of a suction pile subjected to a pull in sands. For this model tests, soil conditions ($D_r=65$), three pile diameters ($D=100, 150, 200\text{mm}$) and five loading points ($h/L=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) were changed. And the experimental results were also compared with those by the theoretical methods. The results by the experimental and theoretical analysis are as follows. The ultimate horizontal pull-out resistance by the model test increased as the loading point (h/L) moved downwards from the pile top, and the maximum value reached at the $h/L=0.75$. The theoretical ultimate horizontal pull-out resistance by Broms(1964) and Hong(1984) agreed well with that by the model test at $h/L=0$ and 0.25 , but their results overestimated the experimental result at lower part of pile and the differences between the theoretical and experimental results were of great. While the horizontal loading applied at the upper part of pile, the pile moved to the horizontal direction with rotating clockwise. As the loading point moved downwards from the pile top, the rotating angle of pile was smaller.

Keywords : Suction Pile, Horizontal pull-out resistance, Lateral behavior.

1. 서론

최근에는 육지뿐만 아니라 해안쪽으로 발전이 급속히 증가하는 추세이다. 해안항만구조물의 경우 육지와는 달리 바다위에 구조물이 설치되는 경우가 발생하게 되는데 이때 구조물의 하부 기초에 있어서 시공 및 공사비가 대단히 많이 소요되는 특징을 가지고 있다. 특히 수심이 깊은 곳에서의 구조물 시공 시 구조물의 하부구조인 기초의 시공이 상당히 어려우며 공사비 또한 상당히 많이 필요하게 된다. 이러한 하부구조인 기초를 석션파일로 대체한다면 시간과 공사비용이 크게 줄어들 수 있다고 본다. 또한, 기존의 해양구조물들은 시공이 실시된 이후에 잘못된 점이 발견될 경우에는 시정이 매우 곤란한 특징이 있다. 반면에 석션파일을 사용한 항만구조물의 경우에는 영구구조물일지라도 잘못된 점이 발견되면 석션파일 내부에 압력을 가하여 석션파일을 인발하여 재시공이 가능하며, 임시구조물의 경우에도 구조물을 고정시키는 석션파일의 설치 및 제거가 매우 용이하므로 신속하게 시공 및 해체가 가능하다. 따라서 앞으로 석션파일의 발전 가능성과 용도는 매우 크다고 할 수 있다. 이에 비하여 현재까지 석션파일의 형상비, 인발각도와 작용점의 위치 등 다양한 조건에 따른 석션파일의 지지거동 특성에 대한 연구가 미미한 실정이다. 석션파일은 해양구조물에 주로 사용되는 기초구조물로서 상부하중에 대한 연직지지력뿐만 아니라 인발하중, 수평하중 및 경사하중 등에 따라 지지력을 확보할 수 있으며, 앵커의 기능으로도 사용 가능하다. 석션파일에 작용하는 하중에 대하여 하중 작용위치에 강선(Cable)을 연결하여 수중이나 수상에 있는 구조물을 지지할 수 있다. 본 연구에서는 일반말뚝에 비해 길이가 짧은 석션말뚝에 대한

실내모형실험을 실시하여, 석션말뚝의 근입깊이 비 변화와 하중작용 위치 변화 등에 따른 석션말뚝에 작용하는 수평인발하중에 대한 하중 특성 및 거동특성 분석 등에 관한 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 개요

말뚝 기초의 지지력에 대한 현장실험과 이론적 평가는 주로 압축 하중에 대하여 수행된 것이 대부분이다. 수평력을 받는 말뚝은 말뚝과 지반 중 어느 것이 움직이는 주체인가에 따라 주동말뚝과 수동말뚝으로 분류된다. 주동말뚝은 말뚝 두부에 수평력이 재하되어 말뚝이 변형함에 따라 말뚝주변지반이 저항하게 되고 하중이 지반에 전달된다. 즉, 먼저 움직이는 주체가 말뚝이 되고, 말뚝의 변위가 주변지반의 변형을 일으키는 경우에는 주동말뚝으로 정의하여 해석한다.

수동말뚝은 주변지반에서의 성토나 절토 등으로 인하여 말뚝주변 지반이 먼저 변형을 일으켜 그 결과로써 말뚝에 측방토압이 작용하는 경우이다. 즉, 말뚝주변 지반이 먼저 움직이는 주체가 되어 지반이 말뚝에 하중을 가하는 경우에는 수동말뚝이라 정의하여 해석을 한다. 따라서 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 말뚝의 움직임 및 말뚝과 지반 사이의 상호작용에 의한 하중 메카니즘을 명백하게 이해하여야 한다. 수평하중을 받는 말뚝의 설계는 두 가지 측면에 의하여 영향을 받는다. 첫째는 말뚝의 허용변위량(y_{all})이고, 둘째는 말뚝의 허용휨모멘트(M_{max})이다. 따라서, 말뚝의 수평방향 허용 지지력은 다음의 두 가지 기준을 동시에 만족하도록 결정해야 한다.

2.2 말뚝기초의 수평저항력 산정

Broms(1964)는 수평력을 받는 말뚝 지반계의 파괴형태를 고찰하여 말뚝의 휨강성과 근입깊이 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 근입깊이(cm)이며, β 와 η 는 각각 식(1) 및 식(2)와 같다.

표 1. 말뚝의 판별(Broms, 1964)

	점 성 토	사 질 토
짧 은 말 뚝	$\beta L < 2.25$	$\eta L < 2.0$
중 간 말 뚝	-	$2.0 \leq \eta L \leq 4.0$
긴 말 뚝	$\beta L > 2.25$	$\eta L \leq 4.0$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \quad (1)$$

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \quad (2)$$

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 소성현상이 발생하고, 상부의 지반은 전역에 걸쳐서 소성화 한다.

그림 1과 그림 2는 사질토 지반에서 말뚝과 지반의 파괴형태를 보이고 있다. 그림 1에서 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(3)과 같이 구할 수 있다.

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

최대모멘트가 발생하는 위치와 최대모멘트는 각각 식(4) 및 식(5)와 같다.

$$D_y = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{BK_p \gamma}} \quad (4)$$

$$M_{\max} = Q_u \left(e + \frac{2}{3} D_y \right) \quad (5)$$

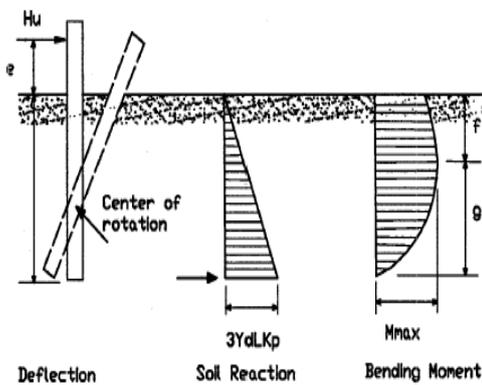


그림 1. 사질토 지반에서 짧은말뚝의 지반파괴 형태(Broms, 1964)

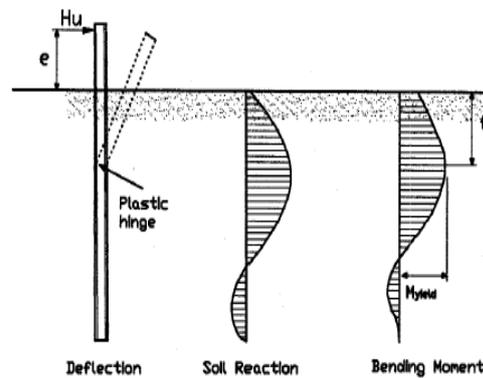


그림 2. 사질토 지반에서 긴 말뚝의 지반파괴형태(Broms, 1964)

Meyerhof(1995)는 횡방향 하중을 받는 강성 및 연성 말뚝에 대한 해를 그림 3과 같이 제안하였으며 이를 아래와 같이 요약하였다. Meyerhof(1995)의 방법에 따르면, 식 (6)를 만족할 경우 말뚝은 연성이라고 정의 된다.

$$K_r = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} < 0.01 \quad (6)$$

- 여기서, K_r : 말뚝의 상대강성
- E_p : 말뚝의 탄성계수
- I_p : 말뚝의 단면모멘트
- E_s : 지반의 횡방향 평균 탄성계수
- L : 말뚝길이

사질토지반에 관입된 짧은(강성)말뚝의 극한 지지력은 식 (7)과 같이 제안된다.

$$Q_u = 0.12 \gamma DL^2 K_{br} \leq 0.4 p_l DL \quad (7)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량

K_{br} : 총토압계수(그림 4 참조)

p_l : 공내재하시험으로부터 얻은 한계값

D : 말뚝 직경

L : 말뚝길이

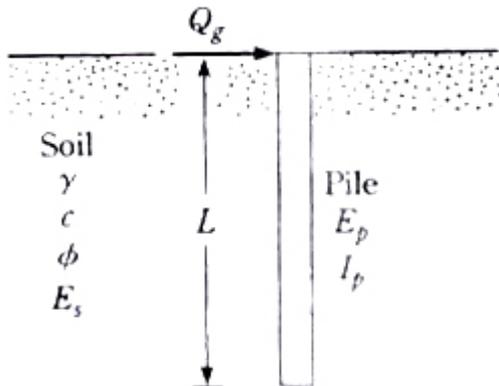


그림 3. 횡방향 하중을 받는 말뚝
(Meyerhof, 1995)

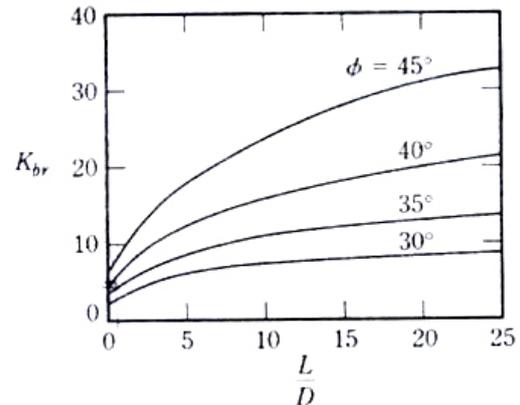


그림 4. 총토압계수 K_{br} 의
변화(Meyerhof, 1995)

Bang과 Cho(2002)는 인발에 대한 석선파일앵커의 저항력은 지반의 종류, 하중 방향, 하중 작용점, 매입깊이, 앵커의 크기 등 다양한 요소의 지배를 받는다고 하였다. Bang 등(2002)은 석선말뚝에 수평하중이 작용하는 경우에 대하여 연구를 수행하였으며, 점성토 지반의 말뚝길이의 0.55L 지점, 사질토 지반에서는 0.8L 지점에 수평하중이 재하될 경우에 최대수평저항력이 나타난다고 보고하였다. 말뚝의 L/D에 대한 연구결과로 말뚝의 길이가 증가할수록 수평하중에 대한 저항력이 증가한다고 하였다.

Cho(2000)는 그림 5와 같이 사질토 지반에 설치된 석선말뚝의 극한 수평지지력은 말뚝상부로부터 0.8H인 지점에서 가장 크게 나타났고, 점성토 지반에 설치된 석선말뚝의 경우에는 말뚝상부로부터 0.5H인 지점에서 크게 나타났다고 하였다.

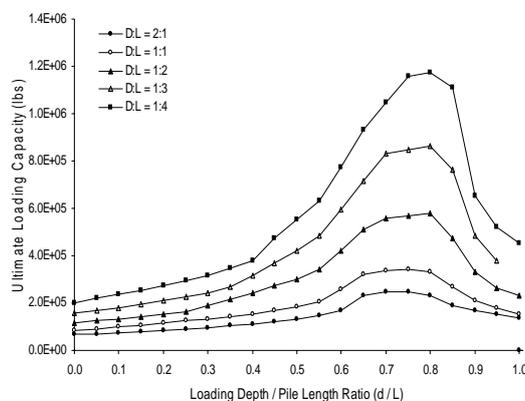


그림 5. 사질토지반에서 석선말뚝의
극한 수평하중(Cho, 2000)

3.2 모형실험 순서

모형실험은 수중에서 모형지반을 조성하였으며, 실험에 사용된 모형지반은 상대밀도가 동일한 지반조건에서 실험을 실시하였다. 지반의 상태를 파악하기 위하여 지반조성 전에 캔을 지반 속에 넣어 지반을 조성하였으며, 실험을 마친 후 캔을 꺼내어 지반의 단위 중량을 확인하고 상대밀도를 확인하였다. 석션파일의 설치 방법은 관입시 말뚝상부에 뚫린 구멍으로 물이 배출되며, 말뚝관입이 끝난 후 마개를 이용하여 구멍을 막고 실험을 실시하며, 말뚝을 설치할 때의 불안정한 지반이 안정될 때까지 일정한 시간이 경과한 후 실시하였으며, 하중재하는 모형토조의 외부에 설치된 하중재하 장치와 와이어로 석션파일에 연결하여 하중을 재하 하였다. 이때 하중재하는 2mm/min의 속도를 일정하게 유지하여 모형실험을 수행하였다. 수평인발 모형실험을 위한 재하장치와 계측기 설치가 완료된 모습(실험 전)과 수평인발하중을 받아 말뚝이 이동한 모습(실험 후)이 그림 9와 그림 10에 나타나 있다.



그림 9. 수평인발실험 전 모습



그림 10. 수평인발실험 완료 후 모습

4. 모형실험 분석

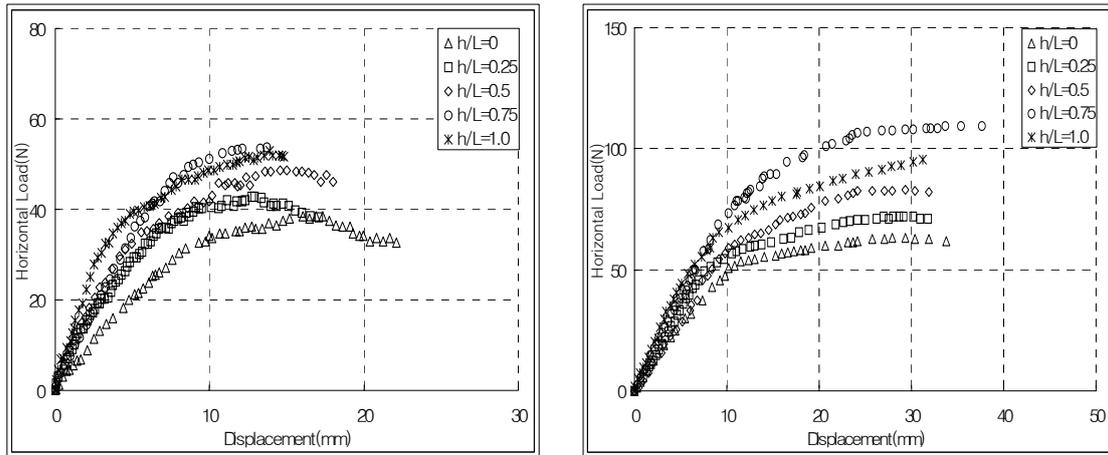
본 연구에서는 사질토 지반에서 수평인발하중에 대한 석션파일의 거동특성을 연구하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험에 사용된 말뚝은 아크릴로 제작하였으며, 본 연구에서 사용된 모형말뚝 길이와 직경의 비(L/D)가 일반적인 깊은기초 보다 현저히 작기 때문에, 말뚝 재질에 의한 휨강성은 무시하고 실험을 실시하였다. 이에 본 연구에서는 석션말뚝을 모사한 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 작은 말뚝에 대하여 말뚝직경과 말뚝길이/직경의 비(L/D)를 변화시켜 모형실험을 실시하였다.

4.1 수평인발하중에 따른 하중-변위 곡선

수중에 설치된 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 매우 작은 석션파일에 대한 수평인발실험을 실시하였다. 모형지반의 상대밀도 64% 대하여 모형실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 모형말뚝 길이와 직경의 비(L/D)가 일반적인 깊은기초 보다 현저히 작기 때문에, 말뚝 재질에 의한 휨강성은 무시하고 실험을 실시하였다. 이에 본 연구에서는 석션말뚝을 모사한 말뚝길이/직경의 비(L/D)가 1이며 직경이 100mm, 150mm, 200mm 모형말뚝으로 실험을 실시하였다.

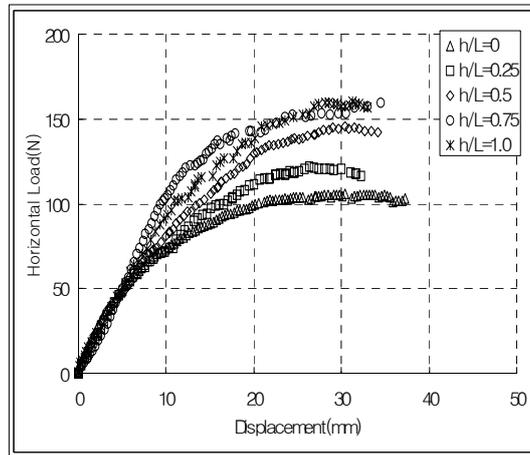
그림 11은 말뚝길이/말뚝직경의 비(L/D)가 1인 말뚝의 수평인발하중재하 위치에 따른 하중-침하 곡선을 나타낸 그림이다. 모든 경우에서 하중이 작용하는 위치가 말뚝상부에서 하부로 내려갈수록 말뚝 직경에 관계없이 극한 수평인발하중은 증가하며, $h/L=0.75$ 의 위치에서 최대값을 나타낸 다음, 말뚝하단에서는 약간 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 말뚝의 직경과 길이가 커질수록 최대 수평인발하중은 증

가하며, 하중-변위 곡선의 기울기도 약간 커지는 것으로 나타났다.



(a) D=100mm

(b) D=150mm



(c) D=200mm

그림 11. 수평인발하중 작용시 L/D=1인 말뚝의 하중-변위 곡선

4.2 극한 수평인발하중

건설부 제정 구조물기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 의하면, 실험에 의한 하중-변위 곡선에서 극한하중이 명확히 규명되지 않을 경우에는 말뚝에 하중이 재하되었을 때의 하중(P), 시간(t), 침하량(S)의 거동특성에 의하여 항복하중을 구하여 판정하며, 국내의 경우 S-logt 곡선법, ds/dlogt-P 곡선법, logP-logS 곡선법 등을 사용하여 종합적으로 판단한다고 규정되어 있다. 또한 하중-변위 곡선에서 항복하중 또는 극한하중을 산정하는 방법에는 Davisson 방법(Davisson, 1972) 등이 있으며, 이외에도 변위량을 기준으로 하는 $\Delta=0.1D$ 방법(Terzaghi, 1942) 등이 있다.

본 논문에서는 모형실험에 의한 하중-변위 곡선에 대하여 Davisson 방법(1972), 침하량을 기준으로 하는 $\Delta=0.1D$ 방법(1942)과 최대지지하중을 극한하중으로 하는 방법 등 세 가지 방법으로 극한 수평인발하중을 산정하였으며, 이 결과들을 이론적 해석방법인 Broms 방법(1964) 및 홍원표 방법(1984)에 의한 극한 수평인발하중과 비교하였다. 모형실험에 의한 하중-변위 곡선에서 최대하중 방법, $\Delta=0.1D$ 방법(1942) 및 Davisson 방법(1972)에 의한 극한수평하중 산정결과를 표 2에 나타내었다. 세가지 방법으로

구한 극한 수평인발하중의 평균값이 그림 12에 나타나 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 하중 작용위치(h/L)가 말뚝하부로 내려갈수록 극한 수평인발하중은 증가하며 h/L=0.75에서 가장 큰 값을 나타낸 후, 말뚝하부에서는 오히려 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 말뚝직경과 길이가 변화하여도 비슷한 경향을 보이고 있다.

그림 13은 각각의 하중작용위치에서 말뚝직경에 따른 극한 수평인발하중을 나타낸 그림이다. 모든 경우에서 말뚝의 직경이 증가함에 따라 극한 수평인발하중은 증가하는 것으로 나타났다.

표 2. 모형실험에 의한 극한 수평인발하중 산정 결과 (단위:N)

하중작용위치		h/L=0	h/L=0.25	h/L=0.50	h/L=0.75	h/L=1.0	
극한하중 결정방법							
L/D=1	D=100mm	최대하중 방법	38.5	42.9	48.7	53.4	51.5
		$\Delta=0.1D$ 방법	33.5	40.3	42.1	51.2	48.7
		Davisson 방법	32.6	40.8	45.4	53.5	50.6
		평균	34.87	41.33	45.40	52.70	50.27
	D=150mm	최대하중 방법	63.0	71.9	82.8	108.5	91.4
		$\Delta=0.1D$ 방법	56.8	61.5	70.1	86.2	80.2
		Davisson 방법	53.8	60.4	66.5	100.2	80.1
		평균	57.87	64.60	73.13	98.30	83.90
	D=200mm	최대하중 방법	105.8	120.8	145.8	153.5	158.7
		$\Delta=0.1D$ 방법	98.09	110.13	119.9	145.5	119.9
		Davisson 방법	96.65	114.9	125.5	151.8	153.5
		평균	100.18	115.28	130.40	150.27	144.03

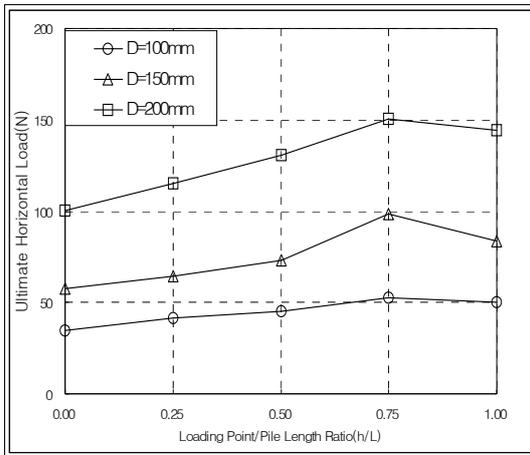


그림 12. 모형실험에 의한 극한 수평인발하중의 비교

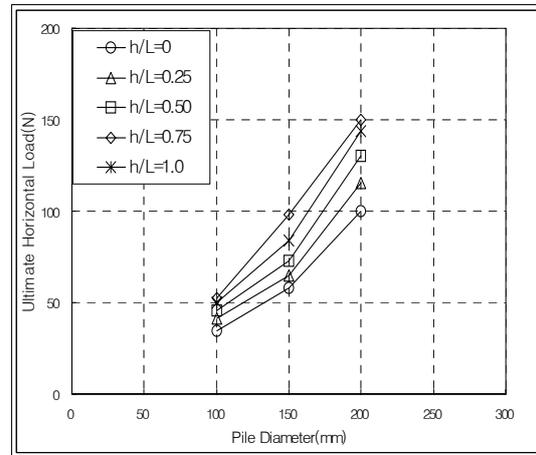
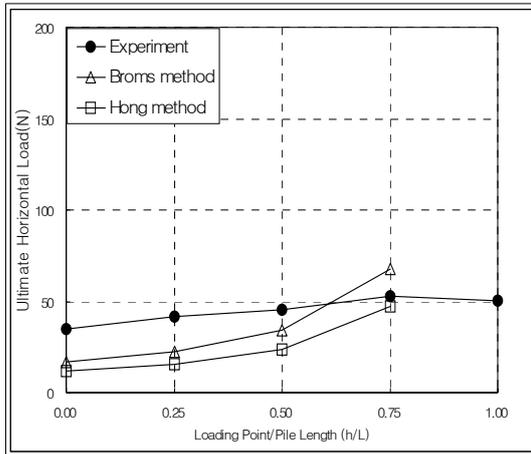


그림 13. 말뚝직경에 따른 극한 수평인발하중의 비교

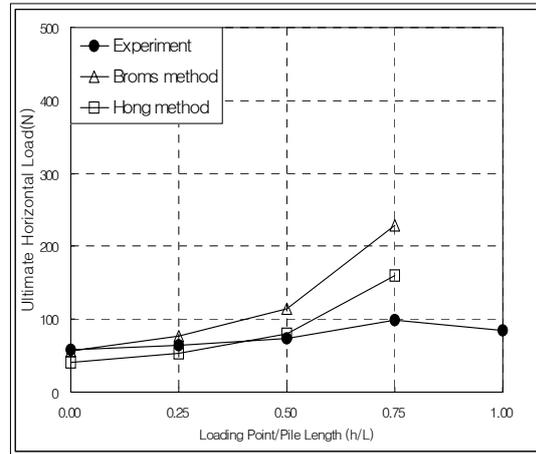
그림 14는 모형실험과 해석적 방법인 Broms 방법(1964)과 홍원표 방법(1984)으로 구한 극한 수평인발하중을 나타낸 그림이다. 여기에서 말뚝의 최하단부(h/L=1)에 하중이 작용하는 경우는 이론적 방법에 의한 극한 수평하중은 무한대로 계산되기 때문에 그림에 나타내지 않았다.

모형실험에 의한 극한 수평인발하중을 이론적 방법의 결과와 비교해 보면, L/D=1인 말뚝의 경우, 직경 100mm인 말뚝의 상부에 수평인발하중이 작용하면, 모형실험결과는 이론적 방법의 결과보다 크게 나타났다. h/L=0.75인 위치에 하중이 작용하면, 모형실험 결과는 Broms 방법(1964)의 결과보다 작지만, 홍원표 방법(1984) 결과보다 크게 나타났다. 그러나, 말뚝직경이 커질수록 이론적 방법의 결과가 모형실험

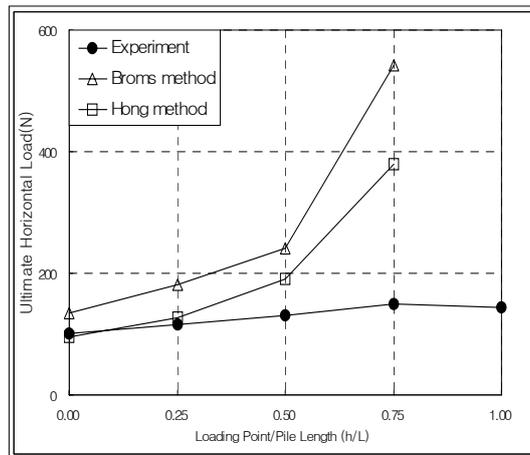
결과 보다 크게 나타났다. 모형실험에 의한 극한 수평하중은 말뚝 직경과 길이에 관계없이 말뚝하부쪽으로 내려갈수록 증가하며 $h/L=0.75$ 인 위치에서 최대로 나타났다. 하중작용위치(h/L)가 $h/L=0$, $h/L=0.25$ 인 경우에는 실험과 이론적 방법에 의한 극한 수평인발하중의 차이가 많이 나지 않으나, 하중작용위치가 말뚝하부쪽으로 내려갈수록 그 차이는 커지는 경향을 보이고 있다. 그리고 Broms 방법(1964)은 홍원표 방법(1984)보다 더 큰 극한 수평인발하중을 나타냈다.



(a) D = 100mm



(b) D = 150mm



(c) D = 200mm

그림 14. 모형실험과 이론적 방법에 의한 극한 수평인발하중의 비교

4.3 수평인발하중 작용시 석선파일의 이동 양상

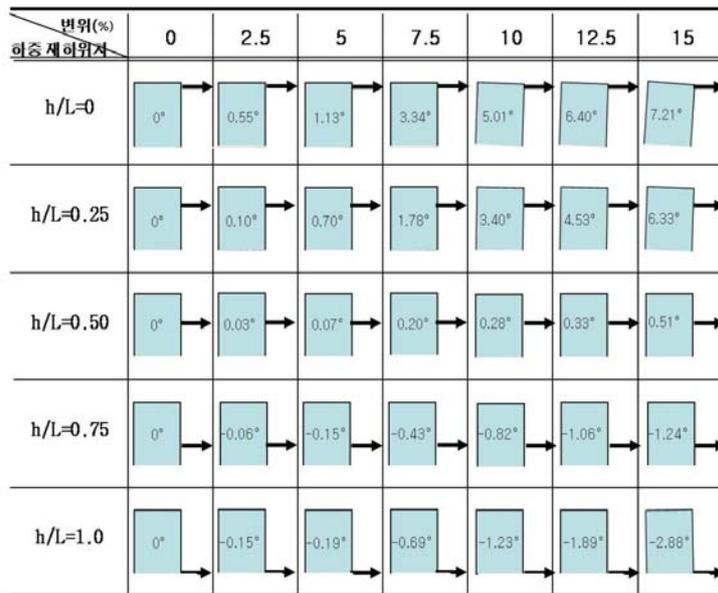
일반적으로 압축력을 받는 말뚝은 수직방향으로 침하를 일으키지만, 수평하중을 받는 경우에는 하중이 작용한 방향으로 말뚝은 이동 및 회전하는 경향이 있다. 본 연구에서는 수평인발하중 작용시 말뚝의 회전뿐만 아니라 말뚝의 이동양상을 정확히 판단하기 위하여, 모형실험에서 말뚝상부 두 지점에 4개의 와이어 변위계를 연결하여 말뚝의 전체적인 이동 경로를 파악하였다.

말뚝에 수평인발하중이 작용하면, 말뚝은 하중작용방향으로 이동 및 회전하게 된다. 이와 같이 말뚝이 회전 및 수평이동을 하면, 말뚝의 이동경로가 이차원적 거동을 하므로 기존의 LVDT를 이용하는 방법으

로는 정확한 말뚝의 이동경로를 파악하는 것이 불가능하였다. 이에 본 연구에서는 4개의 와이어 변위계를 이용하여 모형실험시 말뚝의 변위를 측정함, 이 결과를 분석하여 말뚝상부 두지점의 좌표를 계산하여 모형실험이 진행되는 동안 말뚝의 이동경로를 정확히 산정하였다. 이와 같이 산정된 결과가 그림 15에 나타나 있다. 그림 15는 L/D=1인 말뚝의 결과를 보여 준다. 이 그림으로부터 수평인발하중이 말뚝의 중앙부 윗쪽에 작용하면, 말뚝은 하중재하방향(시계방향)으로 회전하면서 수평방향으로 이동하고, 말뚝의 회전각도는 하중작용점이 말뚝상부로 갈수록 커지고 있음을 알 수 있다. 말뚝의 하부에 수평하중이 작용하면, 말뚝은 하중재하 반대방향(반시계방향)으로 회전하면서 수평이동하며, 회전각도는 매우 작게 나타났다. 표 3은 말뚝직경의 10%에 해당하는 수평변위 발생시 말뚝의 회전 각도를 나타냈다. 말뚝상단에 하중 작용시(h/L=0)에는 말뚝은 시계방향으로 약 5~7°회전하고, 말뚝 가운데 지점에 하중 작용시(h/L=0.5)에는 말뚝은 시계방으로 약 0.1~0.3°회전하였다. 말뚝하단에 하중작용시(h/L=1)에는 말뚝은 반시계방으로 약 0.3~1.2°회전하는 것으로 나타났다.

표 3. 말뚝직경의 10% 변위시 말뚝의 회전각도

	L/D=1		
	D=100mm	D=150mm	D=200mm
h/L=0	5.01°	6.01°	7.04°
h/L=0.25	3.40°	4.55°	5.23°
h/L=0.5	0.28°	0.20°	0.09°
h/L=0.75	-0.82°	-0.6°	-0.03°
h/L=1	-1.23°	-0.29°	-0.26°



(a) D=100mm

변위(%) 하중재하위치	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
h/L=0	0°	0.19°	0.90°	3.23°	6.01°	9.52°	12.58°	14.84°	18.21°
h/L=0.25	0°	0.16°	1.21°	2.12°	4.55°	7.25°	10.28°	13.43°	17.12°
h/L=0.50	0°	0°	0.04°	0.08°	0.20°	0.32°	0.47°	0.53°	0.6°
h/L=0.75	0°	0°	-0.03°	-0.06°	-0.06°	-0.10°	-0.12°	-0.18°	-0.23°
h/L=1.0	0°	-0.03°	-0.04°	-0.12°	-0.29°	-0.43°	-0.62°	-0.76°	-0.95°

(b) D=150mm

변위(%) 하중재하위치	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
h/L=0	0°	0.11°	1.12°	3.58°	7.04°	10.64°	14.78°
h/L=0.25	0°	0.38°	1.97°	5.23°	9.82°	14.96°	19.98°
h/L=0.50	0°	0.03°	0.03°	0.09°	0.31°	0.39°	0.49°
h/L=0.75	0°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.03°	-0.06°	-0.08°
h/L=1.0	0°	-0.05°	-0.11°	-0.26°	-0.34°	-0.47°	-0.54°

(c) D=200mm

그림 15. 수평인발하중 작용시 L/D=1인 말뚝의 이동 모습

5. 결론

본 연구에서는 사질토 지반에 설치된 석선말뚝의 수평인발거동 특성에 관한 연구를 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험에서는 말뚝직경과 길이, 하중작용점 등을 변화시켜 모형실험을 실시하였다. 모형실험을 통하여 석선말뚝의 수평인발하중에 따른 특성에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형실험 결과, 사질토에 관입된 말뚝길이 및 직경과 관계없이 석선파일의 재하위치에 따른 극한 수

평인발하중은 하중재하위치가 말뚝상부에서 하부로 내려 갈수록 커지며, $h/L=0.75$ 지점에서 극한 수평인 발하중이 가장 크게 나타났고 다시 말뚝하부로 내려 갈수록 작아졌다.

2. 하중재하에 따른 석선파일의 변위양상은, 하중재하위치가 말뚝최상부인 $h/L=0$ 인 경우에 말뚝두부가 하중 재하 방향으로 가장 많이 회전하였고, 말뚝중앙부에 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.

3. 말뚝직경의 10%에 해당하는 수평변위 발생시 말뚝의 회전 각도를 나타냈다. 말뚝상단에 하중 작용시 ($h/L=0$)에는 말뚝은 시계방향으로 약 $5\sim7^\circ$ 회전하고, 말뚝 가운데 지점에 하중 작용시($h/L=0.5$)에는 $L/D=1$ 인 말뚝은 시계방으로 약 $0.1\sim0.3^\circ$ 회전하였다. 말뚝하단에 하중작용시($h/L=1$)에는 말뚝은 반시계방으로 약 $0.25\sim1.2^\circ$ 회전하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김준석 (1998), **말뚝기초의 설계법과 해설**, 과학기술.
2. 김진복 (2009), 사질토 지반에서 하중 특성에 따른 석선말뚝의 인발거동에 관한 연구, 박사학위논문, 계명대학교.
3. 조천환. (2007). **매입말뚝공법**. 이엔지·북.
4. 한국지반공학회 (2002), **깊은기초**, 구미서관.
5. 홍원표. (1984). 수평력을 받는 말뚝. **대한토목학회지**, 31(5), 32-36.
6. Bang, S. and Cho, Y. (2002). Ultimate horizontal loading capacity of suction pile. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 12(1), 56-63.
7. Bowles, J. E. (1978). *Engineering properties of soil and their measurements* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
8. Broms, B. B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *ASCE*, 90(2), 27-63.
9. Broms, B. B. (1965). Design of laterally load piles. *ASCE*, 91(3), 79-99.
10. Broms, B. B. (1965). Piles in cohesionless soil subject to oblique pull. *ASCE*, 91(4), 199-207.
11. Cho, Y. K. (2000). Calibration of installation, analytical performance study, and analytical solution of loading capacity of suction piles. Ph. D Dissertation, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid city.
12. Cho, Y. and Bang, S. (2002). Inclined loading capacity of suction piles. *Proc. of 12th Inter. Offshore and Polar Eng. Con.*, 2, 827-832.
13. Das, B. M. and Seely, G. R. (1975). Uplift capacity of Buried model pile in sand. *ASCE*, 101(10), 1091-1094.
14. Das, B. M., Seely, G. R. and Pfeifle, T. W. (1977). Pull out resistance of rough rigid piles in granular soils. *Soil and Foundations*, 17(3), 72-77.
15. Das, B. M. (1983). A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. *Soils and Foundation*. 23(3), 122-126.
16. Meyerhof, G. G. (1995). Behavior of pile foundations under special loading conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), 204-222.