

대구경 현장타설말뚝에 대한 현장수평재하시험에 관한 연구

A Study on Lateral Loading the Field Test of Pile for Large Diameter Drilled Shaft Pile

최용규* · 이민희** · 이충숙***
Choi, Yong-Kyu · Lee, Min-Hee · Lee, Chung-Sook

Abstract

Most of pile foundations are a condition of fixed head on pile, but lateral loading test of pile have performed to free head on generally.

This study performed field lateral loading test accompanying lateral displacement by depth of pile for two cases(fixed head and free head) and analyzed lateral behavior of large drilled shaft. Furthermore compared theoretical equation with result of lateral loading test.

Keywords : Fixed head, Free head, Lateral loading test, Large drilled shaft

요 지

대부분의 말뚝기초는 두부 고정상태이지만, 수평재하시험은 일반적으로 두부 자유상태에서 시행되었다.

이번 논문은 두가지 경우(두부고정, 두부자유)에 대한 말뚝깊이별 수평변위와 이론 방정식과 현장수평재하시험을 비교해가며 대구경현장타설말뚝의 수평거동을 분석한 말뚝현장수평재하시험을 수행하였다.

주요어 : 두부고정, 두부자유, 수평재하시험, 대구경현장타설말뚝

* 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsung Univ.
** 경성대학교 공학기술연구소 전임연구원, Researcher Asistant of Research Institute of Engineering Technology
*** 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsung Univ.

1. 서론

구조물의 사용목적이 다양해짐에 따라 말뚝에 작용하는 하중상태가 복잡해짐으로서 말뚝의 거동도 함께 복잡하게 하고 있다. 다양해진 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 복잡한 하중조건 하에서의 말뚝의 움직임 및 말뚝과 지반사이의 상호작용에 관한 발생기구를 명백하게 규명하여야만 할 것이다.

현재까지의 말뚝 설계 방법은 토압, 풍압, 파력 등에 의해 발생하는 수평력과 모멘트 등을 고려하지 않고, 단순히 상부구조물의 하중을 하부 지반에 안전하게 전달시키기 위한 검토가 행해지고 있다. 그러나, 수평력을 받는 말뚝의 변위 혹은 파괴는 상부구조물에 지대한 영향을 끼치게 되어 수평력을 받는 말뚝에 주목을 하지 않을 수 없게 되었다. 그 결과 수평력을 받는 말뚝에 관한 연구는 현재에 이르기까지 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 이에 따른 많은 해석법 및 설계법이 발표되어 그 일부는 이미 설계에 활용되고 있기도 하다(橫山幸滿(1978), 日本土質工學會(1976), Prakash,S. and Sharma,H.D.(1990)). 그러나 수평력을 받는 말뚝이라고 하여도 말뚝은 지반과 접하여 있으므로 말뚝과 지반의 변형상태에 따라 그 특성이 달라질 수가 있다.

본 연구에서는 대구경 현장타설말뚝에 대하여 말뚝구속 조건과 자유조건 두 가지 경우에 대하여 말뚝깊이별 수평변위 측정이 수반된 현장 수평재하시험을 실시하여 대구경 현장타설말뚝의 수평거동을 분석하였으며, 이와 더불어 이론식과 재하시험의 결과를 비교분석하였다.

2. 말뚝 제원 및 지반 조건

시험말뚝의 제원은 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 시험말뚝의 직경은 1300mm이고, 길이는 48.7m로 시공되어져 있다.

표 1. 시험말뚝의 제원

시험구분	시험위치	직경 (mm)	말뚝 길이 (m)	설계수평하중 (ton/분)		
				교축직각	상시	방향
수평재하시험	P29	1300	48.7	교축직각	상시	27.53

그림 1은 시험 지반의 특성을 보이고 있다. 그림 1에서

보는 바와 같이 지반분포는 모래질 실트, 실트질 모래 점토로 구성되어 있으며, 대부분 연약한 점토로 이루어져 있었다. 연약 점토지반에 대한 현장 배인시험 결과, 비배수 전단강도는 $0.25 \sim 0.41 \text{ kgf/cm}^2$ 정도로 깊이가 깊을수록 증가한다는 것을 볼 수 있었다.

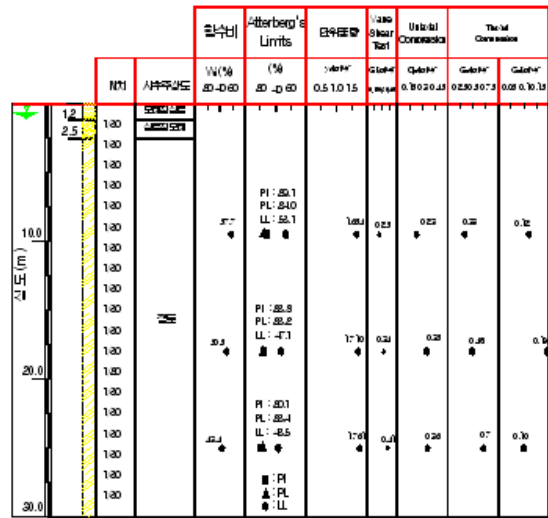


그림 1. 시험 지반 분포 및 특성

3. 말뚝의 수평변위 산정식

3.1 탄성비단위의 보로서의 계산식

말뚝의 수평변위 일반식은 식 (1)~식 (2)와 같다.

- 지상부의 처짐 곡선

$$y_1 = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4 \quad (1)$$

- 지중부의 처짐 곡선

$$y_2 = \exp(-\beta x)(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + \exp(-\beta x)(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (2)$$

식 (3) ~ 식 (5)의 경계조건을 적용하여 미지수 $a_1 \sim a_4$, $C_1 \sim C_4$ 를 구한다

$$EI[y_1^{(3)}]_{x=-h} = H, EI[y_1^{(2)}]_{x=-h} = M_t \quad (3)$$

$$[y_1]_{x=0} = [y_2]_{x=0}$$

$$[y_1^{(1)}]_{x=0} = [y_2^{(1)}]_{x=0} \quad (4)$$

$$[y_1^{(2)}]_{x=0} = [y_2^{(2)}]_{x=0}$$

$$[y_1^{(3)}]_{x=0} = [y_2^{(3)}]_{x=0} \quad (5)$$

말뚝 선단부 ($x=l$)의 조건일 경우, 말뚝 선단조건에 따라 다른 경계조건을 선택하여야 한다. 말뚝 선단이 자유단일 경우 식 (6), 힌지일 경우 식 (7), 고정단일 경우 식 (8)을 적용하여야 한다.

$$[y_2^{(2)}]_{x=l} = 0, [y_2^{(3)}]_{x=l} = 0 \quad (6)$$

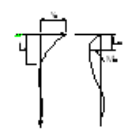
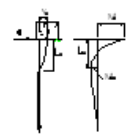
$$[y_2]_{x=l} = 0, [y_2^{(2)}]_{x=l} = 0 \quad (7)$$

$$[y_2]_{x=l} = 0, [y_2^{(1)}]_{x=l} = 0 \quad (8)$$

3.2 말뚝의 수평변위에 관한 일반식

표 2은 말뚝 두부조건에 관한 모멘트와 수평저항력 등에 관한 일반식을 요약한 것이다.

표 2. 말뚝두부조건에 대한 일반식

구속 조건	말뚝머리자유	말뚝머리회전구속
		
항 목		
두부의 휨모멘트 M_0	0	$\frac{Q}{2\beta}$
지중부의 최대휨모멘트 M_{max}	$0.3224 \frac{Q}{\beta}$	$0.104 \frac{Q}{\beta}$
두부의 수평변위 y_0	$\frac{Q}{2EI\beta^3} = \frac{2Q}{k_H d 4EI\beta^3} = \frac{Q\beta}{k_H d}$	
M_{max} 의 발생깊이 L_m	$\frac{\pi}{4\beta} = \frac{0.785}{\beta}$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$
말뚝머리 변위 δ (cm)	$\delta = \frac{H}{2E\beta^3}$	$\delta = \frac{H}{4E\beta^3} = \frac{\beta H}{kD}$
말뚝머리 경사각 α (rad)	$\alpha = \frac{H}{2E\beta^2}$	$\alpha = 0$
제1부동점의 깊이 l (cm)	$l = \frac{\pi}{2\beta}$	$l = \frac{3\pi}{4\beta}$
변형각 0이 되는 깊이 L (cm)	$L = \frac{3\pi}{4\beta}$	$L = \frac{\pi}{\beta}$

위의 식들에 관련된 정수값들은 도로교설계기준 해설(하부구조 편)의 내용과 도로교 시방서의 내용을 참고하여 계산하였으며, 표 3에 요약하였다.

표 3. 계수 요약

	계산식	입력치
I : 말뚝의 단면2차 모멘트 (cm^4)	$I = \frac{\pi \times D^2}{64}$	1.63×10^7
β : 기초의 특성값(cm^{-1})	$\beta = 4\sqrt{\frac{k_H D}{4EI}}$	0.001078
E : 말뚝재료의 영계수 (kgf/cm^2)	-	2.35×10^5
k_h : 수평방향 지반반력계수 (kg/cm^3)	$k_h = 0.2\alpha E_0 D^{-\frac{3}{4}}$	0.159

4. 현장 수평재하시험

4.1 시험장비

수평재하시험에 사용된 시험장비는 표 4과 같다. 수평하중 재하장치는 600tonf 유압잭을 사용하였으며, 말뚝 깊이별 수평변위를 측정하기 위하여 경사계를 깊이 방향으로 20m설치하였다.

표 4. 수평재하시험 장비

장비명	규격	수량
1. Hydraulic Jack & Read-Out Unit	- Model No.: Enerpac - Type : Hydraulic Type Cylinder - Max. Load : 600ton - Approx. sensitivity : 0.1%F.S. - Accuracy : 0.1%F.S. - Read Out Unit : Adept-5	1 set
2. Hydraulic hose & pump	- High Compressive Type Hose(700Kg/cm ²) : 5m	1 set
3. LVDT & Read Out Unit	- Type : Digital Display - Max. Range : 0~150mm - Approx. sensitivity : 0.001mm - Accuracy : 0.01mm	2 set
4. Magnet Holder	- Permanent Magnetic Type	2 set
5. Stop Watch	- Accuracy : 0.01sec	1 ea
6. Reference Beam	- Squared Pipe	1 set
7. Inclinator	- Inclinator Probe & Indicator - Biaxial	1 식
8. Tilt reference frame	- Inclinator guide Length : 1m - length of hold block : 0.5m	1 식
9. Hydraulic connector 및 부속장비	- 고압용 Connector, 멩키스페너, 바이스 플라이어, 렌치등	1 식
10. Slope Indicator	- 최대측정 길이 : 50m	
11. TDS & Computer	- 전기저항식 변위계 측정 및 경사계 분석용	

4.2 시험계획

시험하중의 재하계획 및 시험결과 해석은 말뚝두부의 고정조건에 따라 상이하다. 대부분의 말뚝기초는 말뚝두부 고정(fixed head) 조건이지만 말뚝의 수평재하시험은 두부자유(free head) 조건으로 시행되는 것이 일반적이다. 두부고정조건은 말뚝본체와 동등한 강도를 얻음으로써 수평력에 대해 말뚝머리에 최대응력이 발생하고 소성화하여 고정도가 저하한 후 말뚝본체의 응력이 크게 되어 최대내력이 되기까지 저하한다. 두부자유조건은 완전한 자유상태로 하는 것은 곤란하고 수평하중이 작용하면 말뚝머리에 휨모멘트가 발생하여 비교적 작은 수평하중에서도 국부적으로 파괴되어 연속하중을 받는 것이 곤란하게 되는 것도 있다. 따라서 두부자유조건은 수평하중이 작은 경우나 수평하중을 부담하지 않아도 되는 경우에 적당하다.

본 연구에서는 수평재하시험 말뚝두부 조건을 두부고정조건과 두부자유조건에 대하여 각각 수행하였다. 그림 2는 두부고정조건과 자유조건에 대한 수평재하시험 개략도이다.

말뚝 두부를 구속시키지 위하여 말뚝 주위에 직경 1500mm의 강관을 둘러싸고 말뚝과 강관 사이의 빈 공간을 그라우트로 충전하였으며, 수평지지빔을 설치한 뒤 빔이 자유롭게 움직이게 하기 위하여 빔 아래에 원형봉 설치와 그리스를 충전하였다. 그러나, 현장시험시 완전한 구속조건이 이루어지지 않아 사실상 반고정 상태로 시험을 수행하였다.

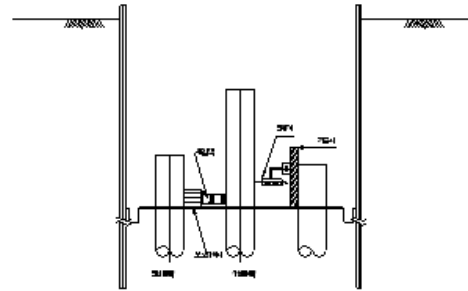
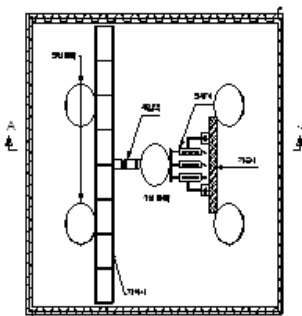


그림 2. 수평재하시험 개략도

본 연구에서는 경사계를 말뚝 내부에 설치하여 말뚝 깊이별 수평변위를 측정하기 하였다.

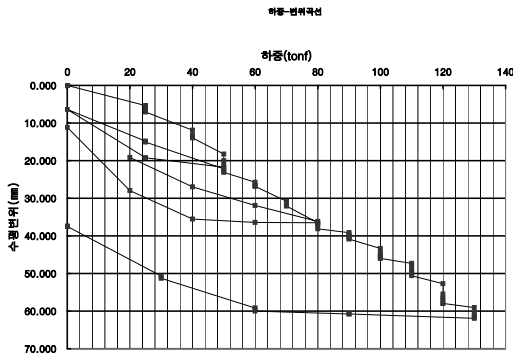
5. 시험 결과

5.1 수평하중-두부 수평 변위 곡선

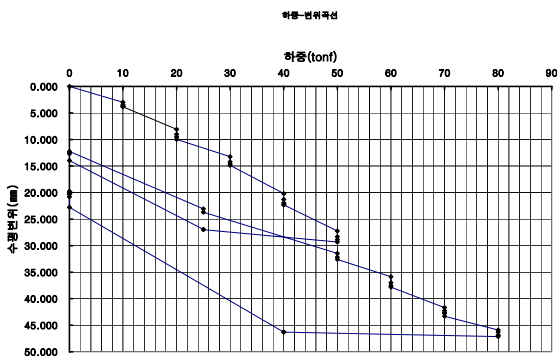
본 연구에서 사용한 대구경 현장타설말뚝은 사용말뚝이기 때문에 말뚝을 파괴시킬 수 없어서 말뚝에 손상이 끼치지 않는 범위까지만 시험을 수행하여 수평력에 대한 항목 지지력을 구할 수는 없었다.

말뚝두부 구속조건과 자유조건에 대한 수평하중-두부 수평 변위 곡선은 그림 3과 같다. 그림 3(a)와 같이 두부구속조건에서 일반적인 허용 수평변위 15mm일 때 수평저항력은 40tf이었으며, 두부자유조건에서는 그림 3(b)와 같이 수평저항력이 30tf이었다.

그림 3에서 보는 바와 같이 두부 구속조건과 자유조건 모두 수평력이 증가하면서 두부 수평변위가 증가하는 경향을 보이고 있었다. 말뚝두부의 구속조건에 따른 말뚝의 수평저항력은 두부 구속조건일 경우가 두부 자유조건일 경우보다, 수평변위기준 15mm일 때, 약 1.33배 정도 크다는 것을 알 수 있었다.



(a) 말뚝두부 구속조건



(b) 말뚝두부 자유조건

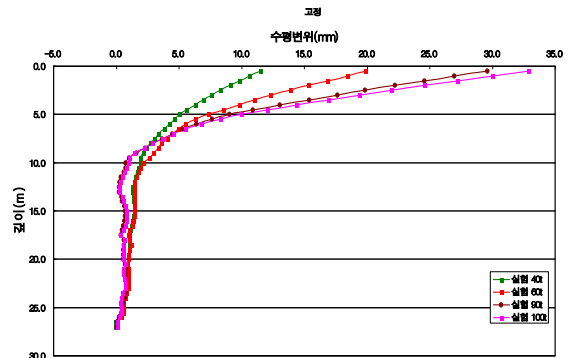
그림 3. 수평재하시험 결과 말뚝두부 자유

5.2 말뚝깊이별 수평변위 분포

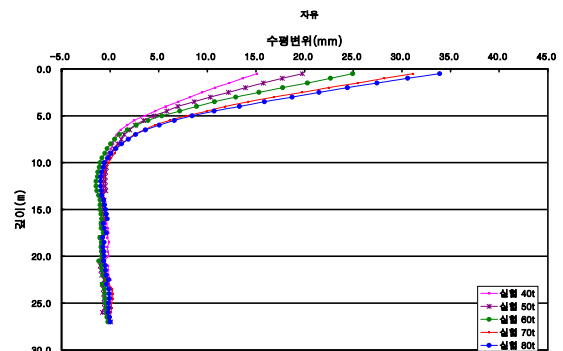
그림 4와 같이 말뚝에 수평하중 재하시 경사계를 이용하여 각 깊이별 수평변위를 측정하였다. 말뚝의 깊이별 수평 변위는 두 가지 두부조건 모두 깊이가 깊어질수록 작아지는 경향을 보이고 있었으며, 두부 구속조건일 경우에는 수평변위가 재하하중 방향으로 발생하였지만, 두부 자유조건 일 경우에는 수평하중이 증가할수록 말뚝 하부 약 8m 깊이부터 재하하중 반대방향으로 수평변위가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그리고, 두 가지 구속조건 모두, 초기 재하 하중 단계에서는 하중 단계별 수평변위의 증가량이 크지만, 재하하중이 커지면서 수평변위량의 증가량이 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 말뚝이 재하방향으로 변위가 발생하면서, 말뚝 주변 지반에 수동저항을 발생시켜 주변 지반의 수평방향 지반반력계수가 증가하기 때문이다.

수평하중으로 인해 발생하는 말뚝의 깊이별 수평변위는 그림 4에서 보는 바와 같이 두 가지 두부구속 모두 말뚝 상단에서 약 10m이하부터는 재하하중이 증가하여도 변화가

거의 없다는 것을 알 수 있었다.



(a) 말뚝두부 구속조건



(b) 말뚝두부 자유조건

그림 4. 말뚝깊이별 수평변위 분포

6. 이론식과 시험결과의 비교 분석

6.1 수평지지력 비교 분석

수평변위 15mm일 경우에 대하여 수평지지력식(Chang의 제안식)과 수평재하시험결과를 비교하여 표 5에 나타내었다. 표 5과 같이 이론식에 의한 수평지지력보다 시험치가 두부 구속조건에서는 1.35배 더 크다는 것을 알 수 있었으며, 두부 자유조건에서는 2.03배 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 현장시험에서 말뚝두부의 구속이 완전히 이루어지지 않은 상태에서 수행된 결과이므로 실제로는 구속조건이 이론치보다 더 큰 지지능력을 발휘할 것이라 판단된다.

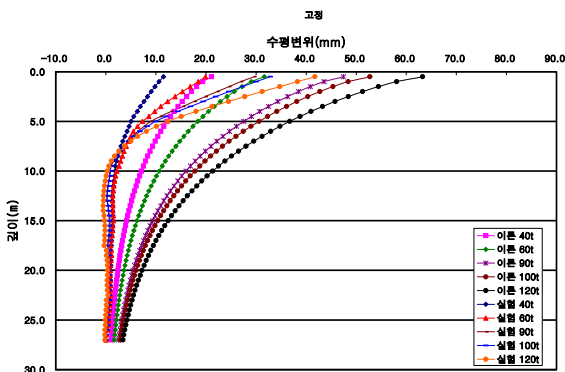
표 5. 수평지지력에 관한 이론식과 시험결과 비교

두부구속 조건		수평 지지력 (tonf)	$\frac{Q_{FF}(\text{현장시험})}{Q_{FT}(\text{이론식})}$	비고
구속	현장시험	40	1.35	15mm 변위기준
	이론식	29.6		
자유	현장시험	30	2.03	
	이론식	14.8		

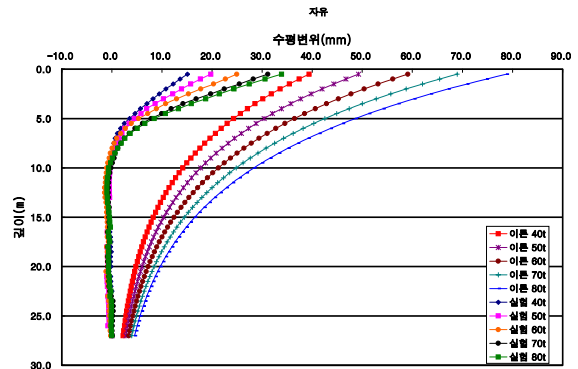
6.2 수평변위분포 및 일반식 비교분석

표 2과 같은 이론식을 사용하여 말뚝깊이별 수평변위에 관한 결과를 현장시험 결과와 함께 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 말뚝 구속조건에 상관없이 현장시험에 의한 수평변위가 이론식에 의한 수평변위보다 말뚝깊이별로 작다는 것을 알 수 있었다. 그리고 말뚝깊이별 수평변위는 이론식과 현장시험결과 말뚝의 위치가 깊을수록 감소한다는 것을 알 수 있었다.

현장재하시험에서는 일정 깊이 이상이면 말뚝깊이별 수평변위가 변화가 거의 없지만, 이론식에 의한 수평변위는 현장시험과는 달리 말뚝 전체 길이에 수평변위가 발생한다는 것을 알 수 있다. 이것은 표 2에서 보는 바와 같이, 이론식에서는 말뚝의 수평변위에 발생함에 따라 지반반력계수가 증가하는 것을 고려할 수 없기 때문일 것이다.



(a) 말뚝 두부고정



(b) 말뚝 두부자유

그림 5. 말뚝 깊이별 수평변위에 관한 이론과 시험결과 비교

수평재하하중과 두부수평변위비의 관계를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 각 수평재하하중별 두부수평변위비는 두부 고정조건에서 약 1.50~1.85이였으며, 두부 자유조건에서는 2.25~2.60정도로 두 경우 다 이론식보다 작은 수평변위가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

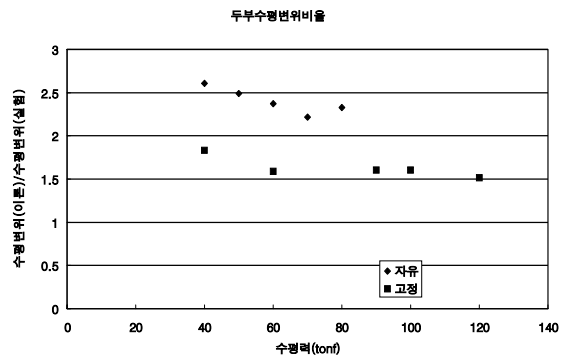


그림 6. 수평재하하중-두부수평변위 $\left(\frac{\text{두부수평변위(실험)}}{\text{두부수평변위(이론)}} \right)$ 관계곡선

표 6는 말뚝머리변위, 경사각, 수평변위 발생위치 등에 관하여 시험결과와 이론식을 비교분석한 결과이다. 표 6에서 보는 바와 같이 말뚝두부 구속조건에 관계없이 시험치가 이론치보다 작다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 말뚝두부 고정조건인 경우, 말뚝머리 변위와 경사각은 발생하지 않아야 하는데 시험결과에서는 각각 1.15cm, 1.1rad로 발생하였다. 이것은 말뚝두부 구속이 완전히 이루어지지 않은 상태에서 시험을 수행한 결과이기 때문이다.

표 6. 시험결과와 비교된 이론식의 관계정수

정수	조건	자유		고정	
		시험	이론	시험	이론
말뚝머리 변위 δ (cm)		1.5	4.12	1.15	0
말뚝머리 경사각 α (rad)		1.22	0.26	1.0996	0
제1부동점의 깊이 l (cm)		900	1457	2700	2185
변형각 0이 되는 깊이 L (cm)		900	2185	2700	2914

7. 결 론

연약지반에 설치된 대구경 현장타설말뚝에 대한 현장 수평재하시험의 결과는 다음과 같다.

- (1) 두부 구속조건과 자유조건 모두 수평력이 증가하면서 두부 수평변위가 증가하였다.

- (2) 말뚝두부의 구속조건에 따른 말뚝의 수평저항력은 두부 구속조건일 경우가 두부 자유조건일 경우보다, 수평변위기준 15mm일 때, 약 1.33배 정도 크다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 두 가지 구속조건 모두, 초기 재하하중 단계에서는 하중 단계별 수평변위의 증가량이 크지만, 재하하중이 커지면서 수평변위량의 증가량은 주변지반의 수동저항으로 인하여 감소하였다.
- (4) 이론식에 의한 수평지지력보다 시험치가 두부 구속조건에서는 1.35배, 두부 자유조건에서는 2.03배 크다는 것을 알 수 있었다.
- (5) 두부 수평변위비는 두부 고정조건에서 약 1.50~1.85, 두부 자유조건에서는 2.25~2.60이었다.

감사의 글

이 논문은 SisTec 연구비에 의해 연구되었음.

(접수일자 : 2004년 5월 3일)

참 고 문 헌

1. 横山幸満(1978), κ い構造物の計算法と計算例, 山海堂, 東京, pp.14-140.
2. 日本土質工學會(1976), 鋼ク"イ-鋼ク"イ研究委員會 報告-,1976, 東京, pp.61-170.
3. Prakash,S. and Sharma,H.D.(1990), Pile Foundation in Engineering Practice, John Wiley & Sons, A Wiley-International Publication, pp.322-474.
4. 부산지하철 2호선 연장 양산선 1공구 대구경 현장타설말뚝의 말뚝재하시험 보고서(2003).
5. 한국지반공학회(2003), 건설교통부제정 구조물 기초설계기준.
6. 대한토목학회(2002), 도로교 설계기준 해설집 (하부구조편).