

말뚝형태 및 길이변화를 고려한 수평재하말뚝의 거동특성 Behavior of Lateral Loaded Piles with Pile shape and Length

황성욱¹⁾, Sung-Wook Hwang, 김민기¹⁾, Min-Kee Kim, 경두현¹⁾, Du-Hyun Kyung, 이준환²⁾, Jun-Hwan Lee

1) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

2) 연세대학교 토목공학과 부교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, Calibration Chamber Tests for cast-in-place piles in sand were performed for measuring behavior properties of piles. These tests were examined effects of various parameters of soil conditions including the relative density(D_R), the coefficient of earth pressure, and investigated differences between cylindrical pile and taper-shaped pile with the same volumes. The important effect factors of foundation behavior were investigated by considering embedded depth of piles and shapes of piles, and inspected details of lateral behavior of piles. These results were verified reliabilities of each methods for comparing the results estimated with tests and the results by proposed estimating solutions in the past.

Key words : Calibration Chamber Tests, cast-in-place piles, density(D_R),

1. 서 론

최근 건설현장의 부지확보의 어려움과 악조건의 지반에서 구조물을 시공하는 사례가 많아지고 있고 구조물의 중량화 및 대형화 그리고 사용목적이 다양해짐에 따라서 말뚝에 작용하는 하중상태가 복잡해짐으로서 말뚝의 거동역시 함께 복잡해지고 있는 실정이다. 다양해진 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 복잡한 하중조건에서의 말뚝의 움직임 및 지반사이의 상호작용에 관한 발생기구를 명백하게 규명하여야 할 필요성이 있다.

구조물이 토압, 풍압, 파력등에 의해 지반거공에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝머리에는 연직력 뿐만 아니라 수평력과 모멘트력이 동시에 작용하게 된다. 따라서 그것으로 인하여 발생하는 말뚝기초의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 치명적인 영향을 미치므로 수평하중을 받는 말뚝의 해석과 설계는 매우 중요한 사항 중의 하나로 각인되고 있다. 따라서 말뚝기초의 수평거동과 지지력에 영향을 미치는 인자들에 대한 명확한 이해와 정확한 수평거동의 예측연구가 경제적인 설계 및 상부구조물의 안정을 위하여 필수적으로 요구 되어야 한다. 일찍이 말뚝은 상부구조물의 하중을 하부의 지반에 안전하게 전달 시키기 위하여 사용되었고 따라서 연직하중을 받는 말뚝에 대해서는 많은 연구와 더불어 실무 설계에 유용하게 사용되고 있는 실정에 있으나 구조물의 대형화와 다양성에 대하여 수평력을 받는 말뚝에 대하여 주목을 하지 않을 수 없게 되었다. 그 결과 국외의 경우(Brinch-Hasen, 1961 ; Broms, 1964 ; Barton, 1982 ; Zhang et al, 2005 등) 여러 학자들에 의해서 수평지지력에 대한 실험 및 해석적인 다양한 평가법이 제안되었고 더불어 국내에서 말뚝의 수평력의 작용에 대하여 중요성을 인식하고 다양한 연구가 진행되어 오고 있다.

따라서 본 연구에서는 사질토 지반에 근입되어 있는 현장타설말뚝을 실내모형실험으로 재현하여 수평력에 대한 지지력 및 말뚝의 거동에 대해 알아보고자 실험을 실시하였으며 실내 실험에서 기초거동에

중요한 영향인자인 지반조건과 말뚝의 근입깊이의 변화에 대한 지지력을 얻을 수 있었으며 동일한 부피에서 말뚝의 형상별 지지력을 구함으로서 경제성의 효과도 입증할 수 있었다. 그리고 그 결과를 기존의 이론식들에 반영하여 좀 더 다양한 시각으로 수평재하 말뚝의 거동특성을 파악하고자 하였다.

2. 극한 수평지지력 산정 방법

2.1 극한 수평단위 지지력과 극한 수평지지력

극한수평단위지지력(Ultimate Lateral Resistance)은 말뚝이 수평하중을 받아 변위를 일으키는 과정에서 말뚝의 주변지반이 더 이상 버티지 못하고 항복상태에 도달하면서 발생한다. 일반적으로 말뚝의 선단부가 가장 먼저 항복상태에 도달하는 변위를 발생하므로, 극한수평단위지지력은 말뚝의 선단부에서 말뚝의 깊이 방향으로 전파되는 경향을 보인다. 극한수평단위지지력은 말뚝의 전구간에서 발생하게 되면 말뚝은 극한상태에 도달하였다고 판단하여, 이때 말뚝이 주변지반으로부터 받는 수평지지력을 극한 수평지지력이라고 한다. 말뚝의 극한수평단위지지력 P_u 와 극한 수평지지력 H_u 는 정적평형 조건으로부터 구할 수 있다.

$$H_u - \int_0^{x_r} P_u D dx + \int_{x_r}^L P_u D dx = 0 \quad (1)$$

이 때, X_r = 지면으로부터 말뚝의 회전점까지의 거리, D =말뚝의 직경, L =근입깊이이다. 또한 지면에서의 모멘트 평형조건 $\sum My=0$ 으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$H_u e + \int_0^{x_r} P_u D dx + \int_{x_r}^L P_u D dx = 0 \quad (2)$$

e = 말뚝재하지점으로부터 지면까지의 거리, 극한수평지지력을 위의 두 개의 식으로부터 산정할 수 있다. 기본적으로 X_r 은 지반의 극한 수평단위지지력의 분포가 정해지면 시행착오법에 따라 모멘트의 합이 0이 되는 위치로 산정되지만, 각 분포를 제한한 저자에 따라 일정한 값으로 정해지는 경우도 있다. 극한 수평단위지지력은 일반적으로 말뚝의 관입된 해당지반의 수평토압계수와 깊이별로 나타나는 유효연직응력의 관계로 산정된다.

2.2 방법별 극한수평지지력 산정법

Broms(1964)는 수평재하말뚝에서 말뚝선단부가 고정되어 수평력을 버티고 있다고 가정하였다. 말뚝의 회전에 따른 주변지반의 변위에 의해 발생하는 지반반력은 단순한 삼각형 형태의 극한수평단위지지력 분포로 나타난다. 극한 상태의 지반반력은 지반의 극한수평단위지지력이며, 극한수평지지력은 극한수평단위 지지력의 모멘트 평형조건에 의해 산정된다. Broms에 의한 극한수평단위지지력을 다음과 같은식으로 나타낼 수 있다.

$$P_u = 3K_p \sigma_v' = 3K_p \gamma x \quad (3)$$

Petravits와 Award(1972)는 수평재하말뚝은 수평재하시 말뚝선단부가 고정이 아니라 말뚝선단부에서

일정한 깊이만큼 올라간 부분에서 회전점이 발생한다고 가정하였다. 그리고 회전점을 중심으로 수동토압이 반대 방향으로 발생 이 때 말뚝의 주변지반은 재하방향의 주동토압과 재하반대방향의 수동토압이 발생하므로 Petravits와 Award는 이에 대한 고려를 수행하고자 하였다. Petravits와 Award에 대한 극한수평단위지지력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_u = (3.7K_p - Ka)\sigma_v' = (3.7K_p - Ka)\gamma x \quad (4)$$

Prasad와 Chari(1999)에 따르면 수평하중을 받는 말뚝은 말뚝의 단면형상에 따라 극한 수평지지력의 크기가 영향을 받게 된다. 또한 원형말뚝의 경우 연직반력과 주면 반력으로 표현되는 두 요소(Briaud와 Smith 1983; Smith 1987)에 의해 지반반력이 발생하므로, 말뚝 단면을 따라 다른 값을 갖는 극한수평단위지지력을 구하기 위해 재하 반대면에서 발생하는 최대수평토압의 0.8배를 도입하였다. Prasad와 Chari는 지표면으로부터 0.6x 깊이에서 P_u , 0.6x가 발생하며, 말뚝의 회전점에서 토압분포가 전환되어 말뚝선단부에는 P_u , 0.6x의 1.7배가 수동토압으로 발생한다고 제안하였으며 Prasad와 Chari 에 의한 극한 수평단위지지력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_u = sK_p\sigma_{v,0.6x}' = 10^{(1.3\tan\phi + 0.3)}\gamma x \quad (5)$$

3. 실내모형실험

3.1 모형토조 및 모형 말뚝

본 연구에서는 제작과 사용이 비교적 간편하며 현장지반조건을 적절히 재현 할 수 있으며 말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 많이 수행되고 있고 상당히 높은 정확도를 갖는 것으로 알려진 (O'Neill과 Raines,1991) 가압이 가능한 토조를 제작하였다. 그림 1 에서 보는 것과 같이 높이 120cm 에 77cm의 직경의 모형지반이 조성되는 용기와 일정한 조건하에서 용기 내부에 건조모래를 낙하시켜서 모형지반을 조성하기 위해 필요한 강사장치로 구성되어 있으며 고정낙하장치(Mass spreader)를 사용하여 낙하속도와 공기흐름등의 외부 요소를 차단 하였다. 그리고 토조 안쪽으로 밀면과 측면에 독립적으로 2개의 고무막을 설치하는 응력조절법을 채택하여 더 다양한 조건의 토압계수 K_0 를 갖을 수 있게 재현하였다.

모형 말뚝은 그림 2에서 보는 것과 같이 근입 깊이 70cm, 36cm의 강관 말뚝을 제작하였으며 말뚝주면에는 좌우 대칭으로 각각의 변형률 게이지(Strain Gauge)를 설치하였고 말뚝의 형상의 고려를 위해 말뚝 상하부의 지름이 동일한 실린더형 말뚝과 말뚝상하부의 지름이 다른 테이퍼형 말뚝을 각각 제작하였으며 근입깊이가 동일한 형상이 다른 두 말뚝에 대해서는 말뚝의 부피를 동일하게 제작하였다. 즉, 지지력의 비교가 곧 바로 경제성으로 까지 연관 될 수 있다.

3.2 모형지반조성 및 재하실험

본 연구에서는 사질토인 주문진 표준사를 이용하였으며 토조에 조성되는 모래지반의 상대밀도를 조절하는 방법은 낙차조절법 및 유출속도조절법으로 여러번의 시행착오를 통하여 실험에 필요한 지반을 조성할 수 있었다. 본 연구에서는 현장타설 말뚝을 모형화한 실험이며 이를 재현하기 위하여 말뚝의 근입 깊이가 선단지점까지 강사를 하고 각종 프레임으로 말뚝을 설치한 다시 강사를 하였으며 토조안쪽의 고무막(membrane)에 압력조절기(Regulator)를 이용하여 17시간의 압밀을 통하여 비로소 실험에서 원하는

다양한 토압계수 K_0 를 갖는 지반을 구현할 수 있었으며 수평재하 장치를 이용하여 말뚝에 수평력을 가하고 가력의 반대 방향에 LVDT 2개를 상하 연직방향으로 일정한 거리를 두어 설치함으로써 말뚝의 변위 및 넘어가는 각도까지 알아 볼 수 있었다.

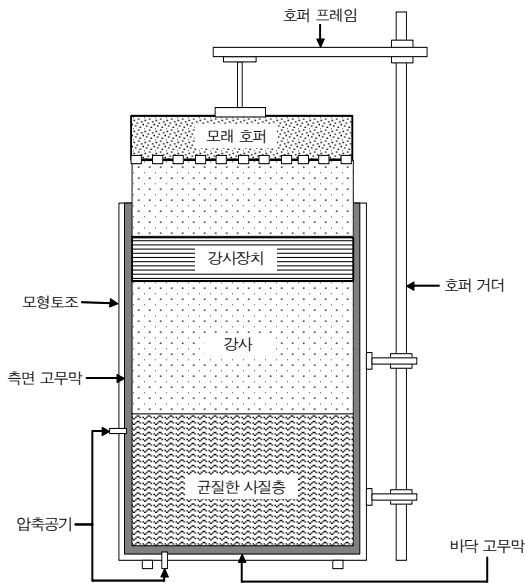


그림 1 모형 토조

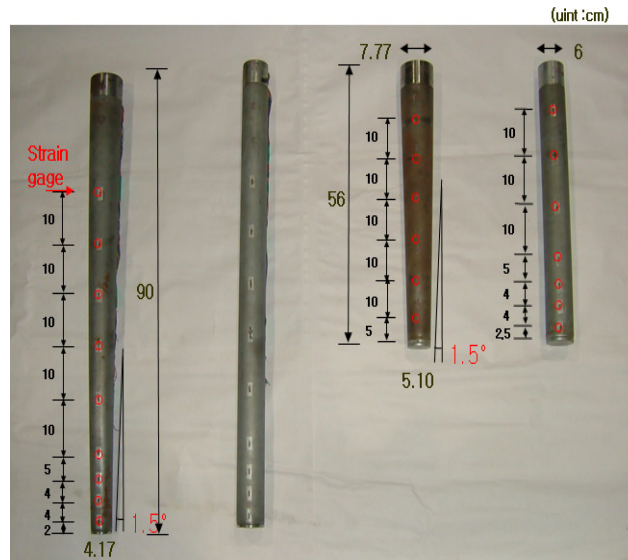


그림 2 모형말뚝

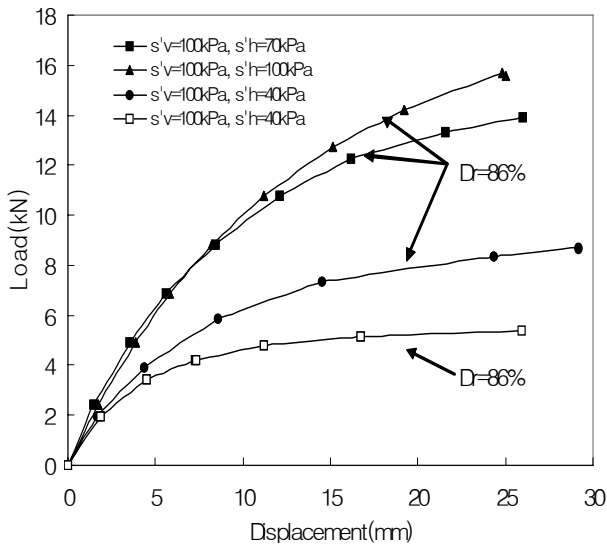
4. 실험결과

4.1 수평하중변위량 곡선

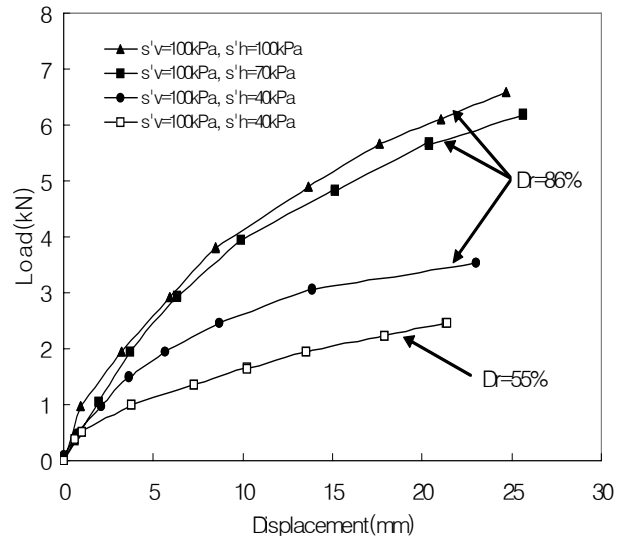
그림 3은 실내모형 실험으로부터 얻어진 하중-변위량 곡선을 나타내고 있다. 3(a)의 경우 근입깊이 70cm이고 초기수직응력이 100kPa에 대하여 초기수평응력이 30kPa 씩 증가한 40, 70, 100kPa 이며 토압계수는 각각 0.4, 0.7, 1.0 인 원통형 말뚝이다. 그림 3(b)는 근입깊이 36cm 초기수직응력이 100kPa에 대하여 초기수평응력이 30kPa 씩 증가한 40, 70, 100kPa 이며 토압계수는 각각 0.4, 0.7, 1.0인 테이퍼형 말뚝이다. 선행 연구결과 (이준환2007)에서 수직응력과 수평응력 모두에서 지지력의 영향을 받지만 수평응력의 영향이 수직응력의 영향보다 더 크게 작용하고 있음을 시사하였다. 본 연구에서는 선행 연구결과를 바탕으로 근입깊이와 말뚝의 형상 2가지의 조건을 변화 시켜 실험을 실시해본결과 2가지의 조건에 관계없이 말뚝은 수평응력에 대하여 더욱 민감하게 변화하는 것을 추가적으로 알 수 있었다.

그림 3에 (c),(d)는 상대밀도가 86%, 55% 일때 실린더형 말뚝과 테이퍼형 말뚝에 대한 하중-변위량 곡선을 나타내고 있으며 응력 상태는 두 상대밀도에 대하여 동일하게 수직 및 수평이 100kPa, 40kPa을 기준으로 하고 있으며 근입깊이의 변화에 대하여도 동일한 조건을 가지고 있다. 두 경우 말뚝의 근입깊이와 상대밀도 다양하게 변화하는 조건에 대하여 근입깊이에 대해서 지지력의 차이만 보일뿐 말뚝의 형상에 대하여 지지력의 차이는 매우 미비한 것으로 나타나고 있다. 앞선 선행 연구결과에서는 연직재하일 경우 테이퍼말뚝의 지지력이 전반적으로 앞서는 결과를 보이고 있었고 상대밀도의 크기에 대해서도 지지력의 차이를 보였으며 상대밀도가 높을 경우 원통형말뚝을 낮을 경우 테이퍼형말뚝을 사용하는것이 더 경제적일 수 있음을 보여 주었다. 그러나 수평재하의 경우에는서는 부피가 동일한 말뚝인 경우에는 부피가

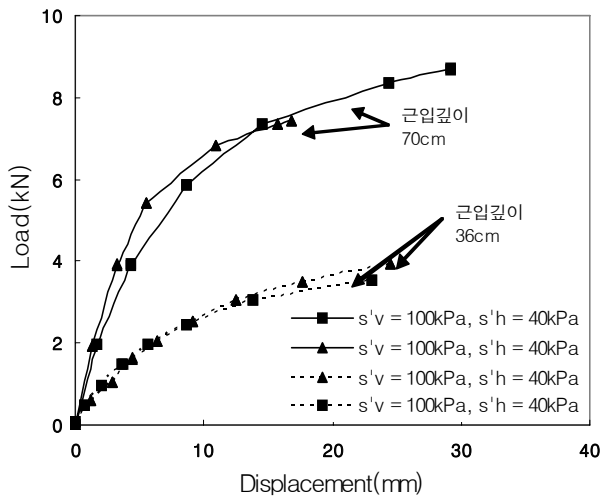
동일한 말뚝인 경우에는 현장조건에서 시공하기 편리한 방법을 채택하는것이 더 경제적인 측면에서 유리 할 수 있다고 판단된다.



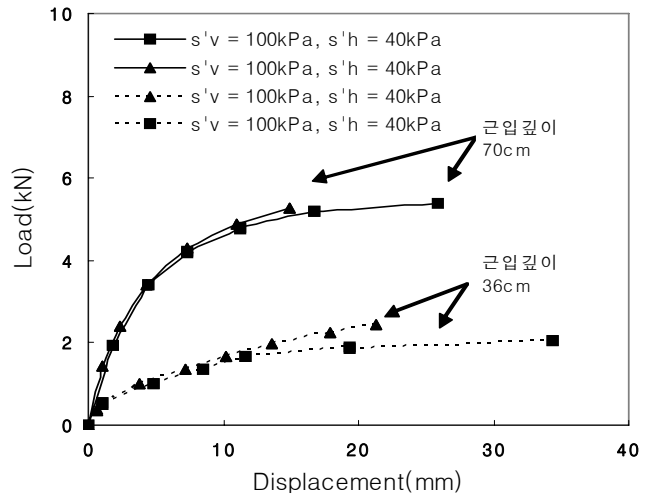
(a) 말뚝관입깊이 70cm



(b) 말뚝관입깊이 36cm



(c) 상대밀도 86%



(d) 상대밀도 55%

그림 3. 실험 조건별 하중-변위량 곡선

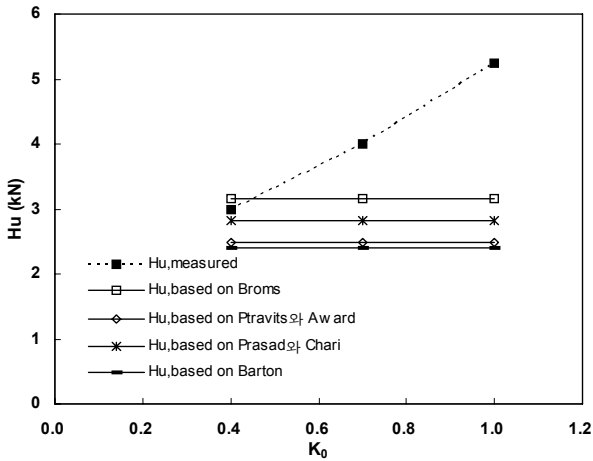
4.2 Hu의 이론식과의 검증

말뚝이 극한 상태에 도달할때의 수평변위를 극한 수평변위라고 하는데 선행 연구자들에 의해 극한 수평지지력을 결정하는데 다양한 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 극한 수평지지력의 결정을 위하여 전반부의 비선형 침하곡선 이후에 나타나는 직선부의 시작점을 기준으로 하는 Meyerhof (1981)와 말뚝의 회전각이 2° 일때 극한 수평지지력이라고 말하는 GAI Consultant Inc.(1982)의 두 저자의 경우를 각각 고려하여 극한 수평지지력을 구해본 결과 두 경우의 극한수평지지력의 값의 차이가 매우 비슷한 점을 착안 좀 더 객관적일 수 있는 GAI Consultant Inc.(1982)의 경우일 때를 사용하였다.

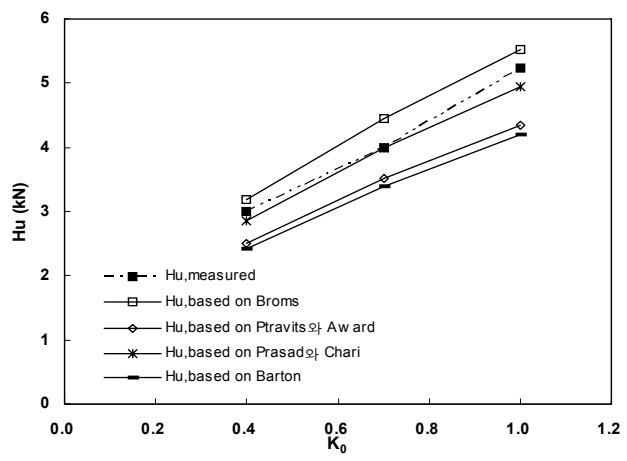
그림 4는 수직 및 수평응력에 대한 극한수평지지력의 실측값과 예측값을 나타내고 있다. 예측값의 비교를 위해서 앞서 설명한 Broms(1964), Petravits와 Award(1972), Barton(1982), Prasad와 Chari(1999)가 제안한 예측식을 사용하였으며 수직응력이 100kPa일때 수평응력의 변화에 대한 극한

수평지지력의 실측값과 예측값을 나타내고 있다. 앞서 말한바와 같이 기존의 평가법에는 수평응력의 변화량은 고려되어 있지 않기 때문에 예측치는 수평응력의 변화에도 불구하고 일정하게 나타나고 있다. 그래서 이준환 등(2007)이 제안한 아래 식을 사용하여 수평응력의 효과를 반영하는 수평응력 보정계수를 사용한 결과가 그림 4(b)이다.

그림에서 보는 바와 같이 Petravits와 Award, Barton은 다소 과소평가 되고 있으며 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 Broms의 예측식이 실측치보다 약간 과대 평가되어 있고 Prasad와 Chari의 예측식이 실측값과 비교할 때 약간 과소 평가 되긴 하였지만 4개의 대표적인 평가법중 가장 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 토압의 분포형식에서 과거 문제점을 보완하며 가장 최근에 발표된 Prasad와 Chari가 실제로 말뚝거동을 가장 잘 파악함을 알 수 있다. 그리고 이준환(2007)등이 발표한 연구결과처럼 말뚝의 수평재하시 수평에 대한고려가 시급하다고 판단된다.



(a) 보정계수 전



(b) 보정계수 후

그림 4 실측결과 와 예측결과의 비교

5. 결론

본 연구에서는 다양한 조건에서 말뚝의 수평재하 실내실험을 통하여 얻은 값들을 비교 분석하였다. 일반적인 연직재하 말뚝에서는 연직과 수평의 압력을 동시에 견딜 수 있는 테이퍼형 말뚝의 지지력이 그렇지 못한 원통형 말뚝보다 더 우수하지만 수평재하의 경우 본 연구 결과에 따르면 말뚝의 형상에 대한 지지력은 뚜렷한 특징없이 근소한 차이로 서로 비슷한 지지력을 갖는 것을 확인 할 수 있었으며 말뚝의 형상에 대하여 부피가 같기 때문에 지지력의 비교가 현장에서 적용될때 곧 바로 경제성과도 연결 될 수 있었다. 그리고 말뚝의 근입 깊이 및 말뚝의 형상에 변화에도 수평응력에 대하여 더 민감한 반응을 보이는 것을 추가적으로 알 수 있었다.

기존 예측식들을 이용하여 비교 분석한 결과, 기존의 예측식들에 의해 산정된 결과는 지지력 산정시 수평응력의 변화량이 고려되어 있지 않아 실측치와 상당한 차이를 보이고 있지만 수평응력 보정계수를 사용한 결과 예측결과와 실측결과의 경향이 상당히 비슷하게 나온것을 확인할 수 있었으며 예측식들 중 토압의 분포형식에서 과거 문제점을 보완하며 가장 최근에 발표된 Prasad와 Chari가 실제로 말뚝거동을 가장 잘 파악함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이준환 (2007), “원통형 및 테이퍼말뚝의 하중-침하특성 및 CPT지지력상관계수”
2. 한국지반공학회 (2003). 구조물기초설계기준, 말뚝기초편, p151-254
3. 이준환 (2007), “말뚝형태 및 지반조건에 따른 현장타설말뚝의 수평지지력 평가”
4. 이준환 (2007), “응력상태를 고려한 사질토지반에 관입된 말뚝의 극한수평지지력 분석 및 평가”
5. 박영수 (2006), “Estimation of load bearing capacity of single pole foundation for transmission structure in sand”, 연세대학교 학위 논문
6. Jinqi Wei and M. Hesham El Naggar(1998). "Experimental Study of Axial Behaviour of Tapered Piles". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, p641~654
7. M. Hesham El Naggar and Jin Qi Wei. (1999). "Response of Tapered Piles Subjected to Lateral Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, p52~70
8. Broms, B. B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesive soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol .90, No.2, pp.27-64.