

폐색정도를 고려한 개단말뚝의 지지력 산정

Estimation of Bearing Capacity for Open-Ended Pile Considering Soil Plugging

백규호¹⁾, Kyu-Ho Paik

¹⁾ 관동대학교 이공대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ.

개요(SYNOPSIS) : The bearing capacity of open-ended piles is affected by the degree of soil plugging, which is quantified by the IFR. There is not at present a design criterion for open-ended piles that explicitly considers the effect of IFR on pile load capacity. In order to investigate this effect, model pile load tests using a calibration chamber were conducted on instrumented open-ended piles. The results of these tests show that the IFR increases with increasing relative density and increasing horizontal stress of soils. The unit base and shaft resistances decrease with increasing IFR. Based on the results of the model pile tests, new empirical relations for base load capacity and shaft load capacity of open-ended piles are proposed. In order to check the accuracy of predictions made with the proposed equations, the equations were applied to the full-scale pile load test performed in this study. Based on the comparisons with the pile load test results, the proposed equations appear to produce satisfactory predictions.

주요어(Key words) : open-ended pile, calibration chamber test, incremental filling ratio, bearing capacity, chamber size effect, new design method

1. 서론

개단말뚝이 지반에 타입될 때 말뚝 내부에는 관내토가 형성되며, 이 관내토에 의하여 말뚝의 선단부에서는 폐색현상이 발생하게 된다. 그리고 개단말뚝의 지지력과 관입저항력은 이러한 폐색현상에 의해 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다.

그러나 개단말뚝의 지지력 산정을 위해 현재 사용되고 있는 많은 기준들은 말뚝의 폐색정도에 따른 지지력의 변화를 제대로 반영하지 못하고 있다. 특히 해상구조물의 기초 설계에 자주 사용되는 API 기준(1991)에서는 부분폐색상태에 있는 개단말뚝의 지지력 산정법을 제시하지 못하고 있다. 그리고 관내토가 미소두께의 원판형 요소들로 구성되어 있다고 가정하고 각 요소의 힘평형조건을 고려함으로써 개단말뚝의 관내토지지력을 산정하는 1차원 관내토 해석법 또한 지지력 산정시 말뚝의 폐색정도를 적절히 고려하지 못함은 물론 현실적으로 쉽게 평가할 수 없는 관내토의 수평토압계수를 설계인자로 사용함으로써 이 방법을 실무에 적용하는 것은 그다지 쉽지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 관내토중분비(IFR)로 표현되는 개단말뚝의 폐색정도가 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조와 스트레인게이지가 부착된 모형말뚝을 이용하여 일련의 모형말뚝시험을 수행하였다. 그리고 모형시험의 결과에 근거하여 말뚝의 폐색정도가 고려된 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 대한 지지력 산정식을 제안하였으며, 이들 산정식의 정확도를 평가하기 위하여 산정식에 의한 예측치가 현장에서 수행된 실대형 말뚝재하시험의 결과와 비교하였다.

2. 실내모형시험

2.1 모형지반의 조성

본 시험에서 모형지반의 조성을 위해 곡률계수(C_c)와 균등계수(C_u)가 각각 1.23과 2.21이고 최대 및 최소 건조단위중량이 각각 1.62 g/cm^3 와 1.33 g/cm^3 이며, 통일분류법에서 SP로 분류되는 자연 건조된 한강모래가 사용되었다. 그리고 직접전단시험을 통해서 얻어진 상대밀도가 23%, 56%, 90%인 모래시료의 내부마찰각은 각각 34.8° , 38.2° , 43.4° 였으며, 한계상태에서의 마찰각은 33.7° 였다. 또한 모래의 상대밀도가 23%, 56%, 90%일 때 모래와 모형말뚝간의 마찰각은 각각 15.0° , 16.1° , 17.7° 로 측정되었다.

모형말뚝시험은 직경이 775 mm이고 높이가 1250 mm인 가압토조에서 수행되었다. 다양한 응력상태를 갖는 모형지반을 조성하기 위하여 토조의 밑면과 측면에 압력을 독립적으로 조절할 수 있는 고무 멤브레인을 설치하였다. 모형지반은 모래비법에 의하여 상대밀도가 23%, 56%와 90%인 상태로 조성되었으며, 그 후에 고무 멤브레인에 일정한 크기의 압력을 30시간동안 가함으로써 모형지반을 압밀시켰다.

한편, 토조를 이용한 모형시험에서는 실제 현장과는 달리 토조의 제한된 크기로 인하여 토조의 경계조건이 말뚝의 거동에 미치는 영향, 즉 토조의 크기효과(chamber size effect)가 발생한다. Parkin과 Lunne(1982)는 토조의 경계조건이 최소화될 수 있는 토조의 최소 직경으로 시험에 사용되는 콘 직경의 50배를 보고하였으며, Salgado 등(1998)은 해석적인 방법을 이용하여 토조의 크기효과를 없애기 위한 토조의 최소 직경으로 콘 직경의 100배를 제안하였다. 그러나 본 시험에 사용된 토조의 직경은 모형말뚝 직경의 약 18배에 불과하다. 따라서 토조의 크기효과와 관련한 기존의 연구결과들을 고려할 때 본 시험에서 측정되는 모형말뚝의 지지력은 현장에서 측정되는 지지력보다 작게 된다. 결국 본 모형말뚝시험에서 얻어진 시험결과를 현장에 적용하기 위해서는 토조의 크기효과에 대한 보정이 필수적이다.

2.2 시험말뚝과 시험방법

본 시험에서는 개단말뚝의 지지력을 선단지지력과 주면마찰력으로 분리·측정하기 위하여 모형말뚝은 그림 1과 같이 직경이 서로 다른 두 개의 스테인레스 파이프로 만들어졌으며, 내부파이프와 외부파이프의 외벽에는 각각 18개와 2개의 스트레인게이지가 대칭으로 부착되었다. 이러한 방법으로 조립이 완료된 모형말뚝의 내경과 외경은 각각 36.5 mm와 42.7 mm였으며, 길이는 908 mm였다. 그리고 시험말뚝의 선단지지력은 내부파이프의 머리부분에 부착된 스트레인게이지로부터 얻어졌으며, 주면마찰력은 외부파이프에 부착된 스트레인게이지로부터 얻어졌다.

모형말뚝시험은 총 7회 수행되었으며, 각 시험별 모형지반의 상대밀도와 응력상태가 표 1에 표시되었다. 여기서 각 시험명은 3개의 문자(H:높음, M:중간, L:낮음)로 구성되었으며, 첫 번째 문자는 모형지반의 상대밀도를, 두 번째와 세 번째 문자는 각각 모형지반의 수직응력과 수평응력의 상대적인 정도를 나

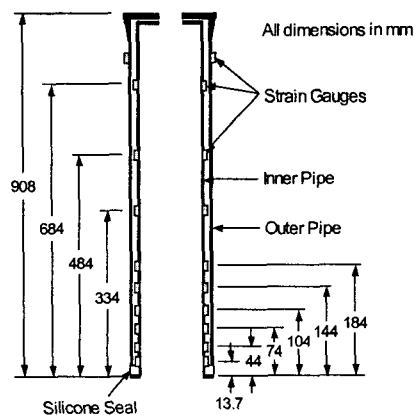


그림 1. 모형말뚝의 상세도

타낸다. 모형말뚝이 지반에 타입되는 동안 관입깊이가 40 mm 증가할 때마다 관내토길이의 변화를 측정 하였으며, 이들 측정치를 이용해서 말뚝의 폐색정도를 나타내는 관내토중분비, IFR이 계산되었다. 말뚝에 대한 재하시험은 말뚝의 관입깊이가 250, 420, 590, 760 mm일 때 연속적으로 행해졌으며, 말뚝에 가해지는 전체하중은 하중계에 의하여, 말뚝 머리의 침하량은 두 개의 선형변위계에 의하여 측정되었다.

표 1. 모형말뚝시험에서 지반조건

시험명	상대밀도 (%)	수직응력 (kg/cm ²)	수평응력 (kg/cm ²)	수평토압 계수
HLL	90	0.4	0.4	0.1
HML	90	0.7	0.4	0.6
HHL	90	1.0	0.4	0.4
HHM	90	1.0	0.7	0.7
HHH	90	1.0	1.0	1.0
LHL	23	1.0	0.4	0.4
MHL	56	1.0	0.4	0.4

2.3 시험결과 및 분석

그림 2는 모형지반의 상대밀도와 수직응력 및 수평응력에 따른 말뚝의 단위 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다. 시험결과 말뚝의 선단지지력은 지반의 상대밀도와 수평응력이 증가함에 따라 상당히 증가하는 경향을 보였으나, 수직응력의 변화에 대해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 시험 결과는 콘의 관입저항은 지반의 수직응력보다는 수평응력에 더 영향받는다라는 Houlsby와 Hitchman (1988)의 연구결과와 일치하는 것이다.

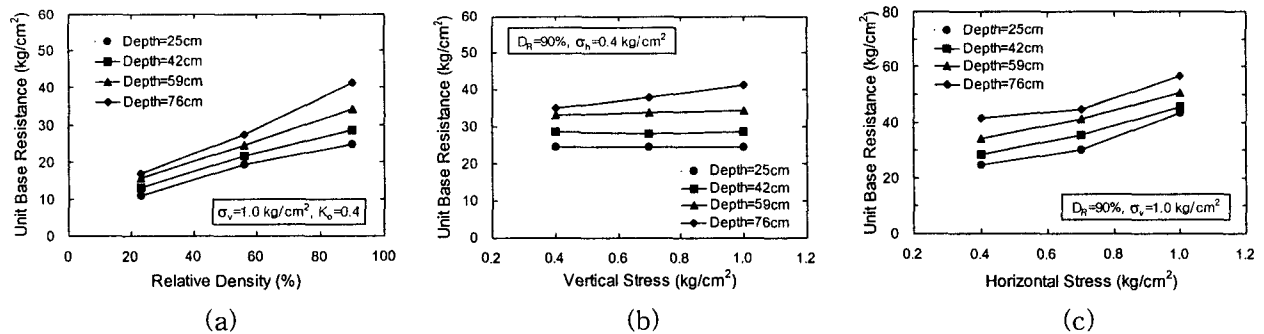


그림 2. 지반조건에 따른 단위 선단지지력의 변화

그림 3은 다양한 상대밀도를 갖는 지반조건에서 말뚝의 IFR에 따른 단위 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 개단말뚝의 폐색정도를 나타내는 관내토중분비(IFR)은 완전폐색상태에서는 IFR=0%로, 완전개방상태에 대해서는 IFR=100%, 그리고 부분폐색상태에서는 $0\% < \text{IFR} < 100\%$ 로 표시된다. 그림에서 보이듯이 개단말뚝의 선단지지력은 IFR이 감소함에 따라 증가하였으며, IFR에 따른 선단지지력의 증가율은 지반의 상대밀도가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 말뚝의 IFR이 일정하더라도 지반의 상대밀도가 커지면 말뚝의 선단지지력도 증가하는 것을 그림에서 볼 수 있다.

그림 4는 지반의 상대밀도와 수직응력 및 수평응력에 따른 말뚝의 단위 주면마찰력의 변화를 나타낸 것이다. 말뚝의 단위 선단지지력에서 관찰된 것과 마찬가지로 개단말뚝의 단위 주면마찰력도 지반의 상대밀도와 수평응력에 크게 영향받으며, 수직응력의 크기와는 거의 무관한 것으로 밝혀졌다. 그리고 말뚝의 주면마찰력은 지반의 수평응력과 선형관계에 있음을 그림 4(c)에서 볼 수 있다.

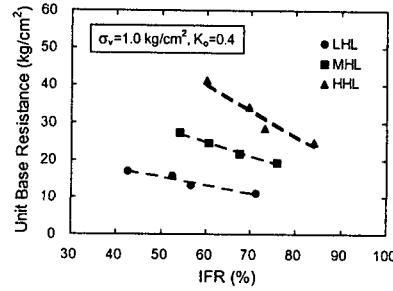


그림 3. IFR과 지반의 상대밀도에 따른 단위 선단지지력의 변화

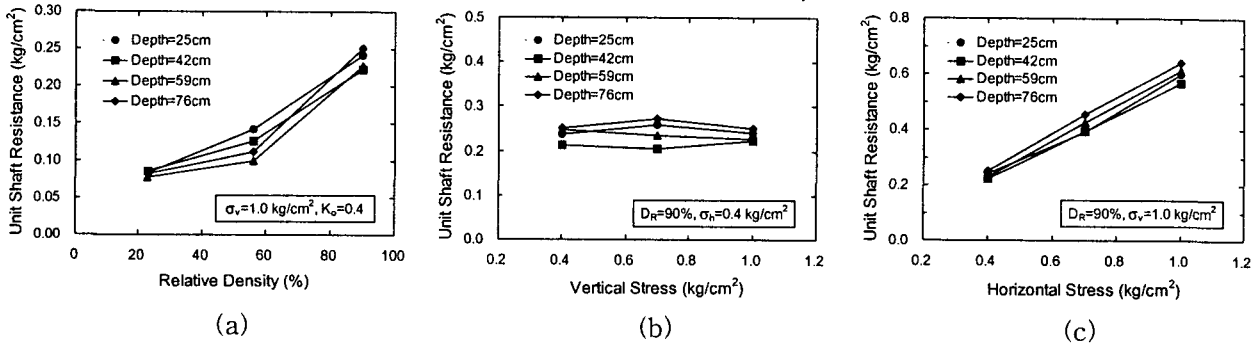


그림 4. 지반조건에 따른 단위 주면마찰력의 변화

3. 토조의 크기효과에 대한 모형시험결과의 보정

3.1 말뚝직경의 보정

앞서 언급한 바와 같이 토조를 이용한 모형시험에서 측정되는 말뚝의 지지력은 토조의 크기효과로 인하여 동일지반조건에서 측정된 지지력과 다르게 된다. 그러므로 본 모형시험의 결과를 현장에 적용하기 위해서는 토조의 크기효과에 대한 보정이 필수적이다. 그러나 개단말뚝의 경우에는 말뚝의 폐색정도에 따라 주변지반의 다짐정도가 달라지므로 토조의 크기효과도 달라지게 된다(Randolph 등, 1979; Salgado 등, 1998). 따라서 토조의 크기효과를 정량화하기 위해서는 시험에 사용된 모형말뚝의 균등직경 (equivalent diameter)에 대한 토조의 직경 비가 필요하게 된다. 여기서 개단말뚝에 균등직경이란 개단말뚝이 설치되는 동안 발생하는 말뚝 주변지반의 변위량과 동일한 지반변위량을 발생시키는 폐단말뚝의 직경을 의미한다. 즉, 식 (1)과 같이 완전개방상태(IFR=100%)에 있는 말뚝의 균등직경은 개단말뚝의 단면부면적과 동등한 면적을 갖는 원의 직경과 같아지며, 완전폐색상태(IFR=0%)에 있는 말뚝의 균등직경은 개단말뚝의 외경과 같아지게 된다. 그리고 부분폐색상태(0<IFR<100%)로 타입된 말뚝의 경우에 균등직경은 보간법(interpolation)을 통해서 구할 수 있다. 이 식에서 d_i 와 d_o 는 개단말뚝의 내경과 외경을 나타낸다.

$$d_p = d_o - (d_o - \sqrt{d_o^2 - d_i^2}) \frac{IFR(\%)}{100} \quad (1)$$

한편, 개단말뚝의 항타과정을 고려하면 말뚝의 선단지지력은 말뚝의 최종 관입깊이에서 측정된 IFR에 만 영향을 받는 반면, 주면마찰력은 말뚝이 타입되는 전 깊이에 걸쳐 측정된 IFR 값과 관련된다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)을 사용해서 모형말뚝의 균등직경을 계산할 때 말뚝 선단지지력의 보정을 위한 균등직경은 최종관입깊이에서의 IFR을 사용하여 계산하였으며, 주면마찰력의 보정을 위한 균등직경은 말

뚝의 관입깊이 전체에 걸쳐 측정된 IFR의 평균치를 사용하여 계산하였다.

3.2 모형말뚝의 지지력에 대한 보정

Salgado 등(1998)은 공동확장이론을 이용해서 토조와 콘의 직경 비에 따른 토조의 크기효과를 해석하였다. 그들의 연구결과에 따르면 본 시험에서 사용된 한강모래와 토질특성이 매우 유사한 모래로 구성된 상대밀도가 90%인 정규압밀 모래지반에서 콘과 토조의 직경 비가 20~45의 범위에 있을 때 토조와 현장에서 측정된 콘 관입저항력의 비,

$$\frac{q_{c,c}}{q_{c,f}} = 7.79 \times 10^{-3} \times \left(\frac{D_c}{d_b} \right) + 0.27 \quad (2)$$

여기서 $q_{c,c}$ 와 $q_{c,f}$ 는 각각 토조와 현장조건에서 측정된 콘의 관입저항력이며, $\frac{D_c}{d_b}$ 는 모형말뚝의 균등직경에 대한 토조의 직경 비이다. 따라서 현장조건에서의 말뚝 지지력은 토조에서 측정된 말뚝 지지력을 토조의 크기효과에 대한 관입저항력 비($\frac{q_{c,c}}{q_{c,f}}$)로 나눔으로써 얻어질 수 있다.

4. 새로운 지지력 산정식

4.1 선단지지력

그림 5는 $D_R=90\%$ 인 모래지반에서 지반의 수평응력으로 표준화(normalized)된 현장조건에서의 단위 선단지지력을 개단말뚝의 IFR에 따라 나타낸 것이다. 여기서 사용된 현장조건에서의 단위 선단지지력($q_{b,f}$)은 토조에서 측정된 모형말뚝의 단위 선단지지력을 토조의 크기효과에 대하여 보정한 것이며, 단위 선단지지력을 표준화하는데 사용한 수평응력은 모형지반에 가해진 수평응력이다. 그림에서 보이는 바와 같이 지반의 수평응력으로 표준화된 말뚝의 단위 선단지지력($\frac{q_{b,f}}{\sigma'_h}$)은 말뚝의 IFR이 감소함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, IFR과 표준화된 단위 선단지지력은 다음과 같이 식으로 표현될 수 있었다.

$$\frac{q_{b,f}}{\sigma'_h} = 405 - 356 \frac{IFR(\%)}{100} \quad \left(\text{단, } \frac{q_{b,f}}{\sigma'_h} \leq 300 \right) \quad (3)$$

일반적으로 완전폐색상태에 있는 개단말뚝의 거동은 폐단말뚝의 거동과 동일한 것으로 알려져 있다. 따라서 식 (3)에 따르면 개단말뚝이 완전폐색상태(IFR=0%)에 있는 경우에 말뚝의 단위 선단지지력은 $q_{b,f} = 405 \sigma'_h$ 로 표현될 수 있으며, 토압계수가 $K=0.4$ 인 정규압밀상태의 모래지반에서는 말뚝의 단위 선

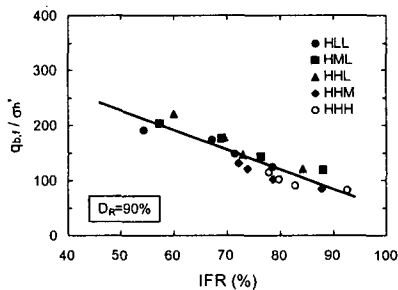


그림 5. IFR과 표준화된 단위 선단지지력의 관계

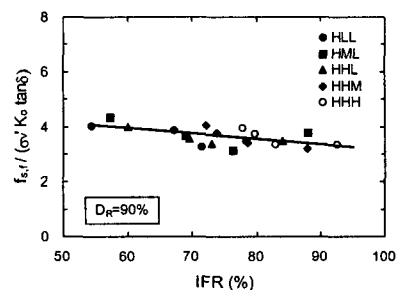


그림 6. IFR과 표준화된 단위 주면마찰력의 관계

단지지력이 다시 $a_{b,f} = 160 \sigma'_v$ 로 표현된다. 그러나 이 값은 캐나다의 기초설계기준(1992)에서 조밀한 모래지반에 타입된 개단말뚝의 단위 선단지지력으로 제시한 값의 1.3배에 달한다. 따라서 식 (3)을 이용하여 개단말뚝의 선단지지력을 산정할 경우에 지반의 수평응력으로 표준화된 단위 선단지지력($a_{b,f}/\sigma'_h$)의 최대값을 300으로 제한하였다.

4.2 주변마찰력

그림 6은 조밀한 지반에서 $K_0 \sigma'_v \tan \delta$ 로 표준화된 말뚝의 단위 주변마찰력의 변화를 말뚝의 IFR에 대하여 나타낸 것이다. 표준화된 말뚝의 단위 주변마찰력은 말뚝의 IFR이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이들의 관계는 식 (4)와 같이 표현될 수 있었다.

$$\frac{f_{s,f}}{(K_0 \sigma'_v \tan \delta) \alpha} = 5.1 - 2.0 \frac{IFR(\%)}{100} \quad (4)$$

여기서, K_0 는 말뚝이 타입되기 전에 지반의 수평토압계수이고 α 는 말뚝의 관입깊이에 대한 평균 유효수직응력이며 δ 는 말뚝과 지반간의 마찰각이다. 그리고 σ'_v 는 지반의 상대밀도와 관련되는 상수로 조밀한 지반에서는 $\alpha = 1.0$ 의 값을 갖는다. 식 (4)에 따르면 정규압밀된 조밀한 상태의 모래지반에서 완전 폐색상태(IFR=0%)로 타입된 개단말뚝의 표준화된 단위 주변마찰력은 5.1이다. 이것은 완전폐색상태로 타입된 말뚝의 주변에 작용하는 수평응력은 말뚝이 타입되기 전에 말뚝에 작용하는 수평응력의 5.1배라는 것을 의미하는 것이다. 이 결과는 정규압밀된 조밀한 모래지반에서 타입말뚝 주변지반의 토압계수가 $K=0.4$ 에서 $K=2\sim 3$ 으로 5~7배 증가한다는 캐나다 기초설계기준(1992)의 설계기준과 일치하는 것이다.

5. 새로운 지지력산정식의 현장 적용성 검토

5.1 실대형 말뚝재하시험

실대형 말뚝시험은 미국 인디애나주 북단의 교량건설 현장에서 실시되었으며, 현장지반은 자갈질 모래지반으로 말뚝이 타입되기 전에 약 2 m의 성토층이 제거되었다. 이 모래층의 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 1.90 t/m³과 1.59 t/m³이었으며, 삼축시험으로부터 얻어진 한계상태의 마찰각(ϕ_c)은 33.29°였다. 그리고 SPT와 CPT의 결과에 의하면 지표면으로부터 처음 3 m는 $D_R=30\%$ 였으며, 그 이후에는 $D_R=90\%$ 의 조밀한 모래로 존재하였다. 그리고 성토층의 제거로 인한 현장지반의 과압밀비는 3 m 이후의 깊이에서 약 1.4~1.7에 해당하였다.

현장시험에서 사용된 시험말뚝은 모형시험에서 사용된 말뚝과 같이 직경이 다른 두 개의 강관으로 제작되었으며, 선단지지력과 주변마찰력의 측정을 위하여 내부강관과 외부강관의 외벽에 각각 18개씩의 스트레인게이지를 대칭으로 부착하였다(그림 7). 제작이 완료된 개단말뚝의 외경과 내경은 각각 356 mm와 292 mm였으며, 최종 관입깊이는 7.04 m였다. 또한 말뚝이 지반에 타입되는 동안 말뚝 내부에 생성되는 관내토길이의 변화를 측정하기 위하여 시험말뚝에는 무게가 다른 두 개의 추와 쇠줄을 이용한 폐색정도 측정장치가 부착되었다. 이 장치를 통해서 측정된 최종 관입깊이에서 시험말뚝의 IFR은 부분폐색상태를 의미하는 77.5%였다.

말뚝의 타입이 완료된지 1주일 경과 후에 정재하시험이 수행되었다. 말뚝에 가해지는 하중의 증분은 15 ton으로 하였으며, 하중은 말뚝 두부의 침하량이 0.5 mm/hr보다 작을 때까지 유지되었다. 그리고 시험말뚝 두부의 침하량이 약 15 cm에 이를 때까지 정재하시험이 계속되었다.

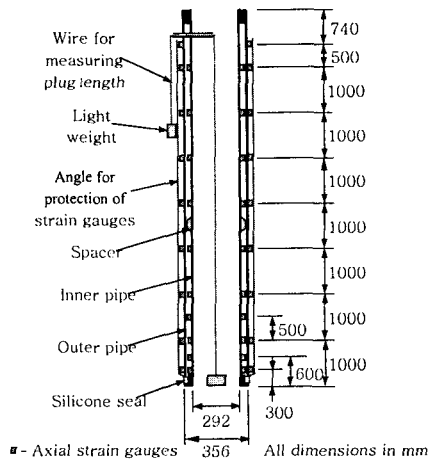


그림 7. 실험용 대형 말뚝의 상세도

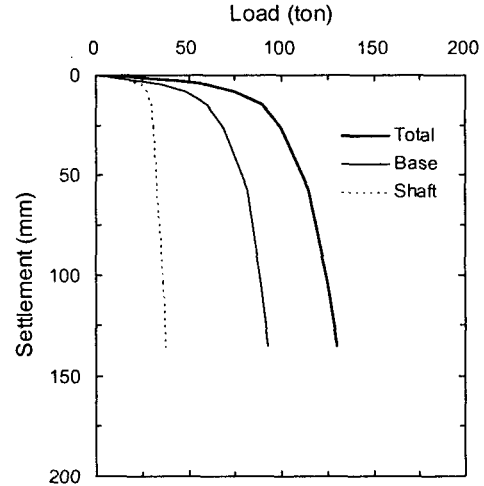


그림 8. 실험용 대형 말뚝의 하중-침하량 곡선

5.2 현장 말뚝재하시험의 결과

정재하시험에서 측정된 하중-침하량 곡선으로부터 말뚝의 지지력을 결정하기 위하여 하중-침하량 곡선을 포물선으로 가정해서 극한지지력을 결정하는 Chin의 방법(Chin, 1970)이 사용되었다. 개단말뚝의 선단지지력과 주변마찰력에 대한 하중-침하량 곡선이 내부강관과 외부강관의 하중전이 분포로부터 구해졌으며, 그 결과가 그림 8에 보여졌다. 정재하시험 결과 최종 하중단계에서 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 각각 92.7 ton과 37.3 ton이었다. 그리고 Chin의 방법에 의한 극한 선단지지력과 극한 주변마찰력은 96.5 ton과 37.3 ton으로 평가되었다.

5.3 예측치와 실측치의 비교

지지력의 산정을 위하여 지반과 말뚝간의 마찰각은 지반의 한계상태 내부마찰각의 2/3배로 가정하였으며, 식 (5)에 보이는 Mayne과 Kulhaway(1982)의 수평토압계수 산정식을 이용하여 말뚝의 선단부(OCR=1.41)와 주변부에서의 수평토압계수를 계산하였다.

$$K_o = (1 - \sin \phi) OCR^{\sin \phi} \quad (5)$$

따라서 식 (4)를 이용해서 산정된 말뚝의 극한 선단지지력, Q_b 는 다음과 같이 계산되었다.

$$\frac{q_{b,f}}{\sigma_h} = 405 - 356 \frac{IFR(\%)}{100} = 405 - 356 \frac{77.5}{100} = 129.1$$

$$Q_b = q_{b,f} \cdot A_b = 129.1 \cdot \sigma_h' \left(\frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \right) = 129.1 (0.55 \times 10.33)(0.0995) = 73.0 \text{ ton}$$

그리고 식 (5)로부터 구할 수 있는 말뚝의 극한 주변마찰력은 $Q_{so} = 40.7 \text{ ton}$ 으로 계산되었다.

$$\frac{f_{s,f}}{K_o \sigma_v' \tan \delta} = 5.1 - 2.0 \frac{IFR(\%)}{100} = 5.1 - 2.0 \frac{77.5}{100} = 3.55$$

$$Q_{so} = f_{s,f} A_s = 3.55 K_o \sigma'_v \tan \delta (\pi d_o D) = 3.55 \Sigma (K_o \sigma'_v D) (\pi d_o \tan \delta) = 3.55 (25.1) \pi (0.356) \tan 22.2 = 40.7 \text{ ton}$$

식 (4)와 (5)를 사용해서 예측한 극한 선단지지력과 극한 주변마찰력은 Chin의 방법에 의해 평가된 극한 지지력의 75.6%와 109.1%에 해당되었다. 그리고 산정식으로부터 예측된 전체지지력은 Chin의 방법으로 산정된 극한 전체지지력의 85.0%에 해당하는 113.7 ton으로 실측치에 아주 근접한 결과를 보였다.

6. 결 론

개단말뚝의 지지력은 관내토에 의한 말뚝의 폐색정도에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 개단말뚝의 지지력 산정과 관련한 대부분의 설계기준들은 말뚝의 폐색정도에 따른 지지력의 변화를 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 폐색정도가 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조를 이용한 일련의 모형말뚝시험을 수행하였다. 그리고 모형시험의 결과에 토조의 크기효과에 대한 보정값을 적용함으로써 모형말뚝의 지지력을 현장조건에서의 지지력의 전환시켰으며, 그 전환된 지지력에 근거하여 말뚝의 폐색정도(IFR)를 주요 변수로 하는 개단말뚝의 지지력산정식을 제안하였다. 또한 제안된 지지력산정식에 대한 현장 적용성을 평가하기 위하여 실험대형 말뚝재하시험을 수행하였으며, 지지력의 측정치와 예측치의 비교를 통해 본 연구에서 제안된 지지력산정식이 만족스러운 정도의 지지력 예측치를 제공함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. American Petroleum Institute (1991), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, 19th ed., API RP2A, Dallas, TX: American Petroleum Institute.
2. Canadian Geotechnical Society (1992), Canadian foundation engineering manual, 3rd ed., Vancouver, B.C.: The Canadian Geotechnical Society.
3. Chin, F. V. (1970), "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure", Proc. 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engrg., 81~90.
4. Houlsby, G. T., and Hitchman, R. (1988), "Calibration chamber tests of a cone penetration in sand", Geotechnique, 38(1), 39~44.
4. Mayne, P. W., and Kulhawy, F. H. (1982), "Ko-OCR relationships in soil" J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 108(6), 851~872
5. Parkin, A. K., and Lunne, T. (1982), "Boundary effect in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand", Proc. 2nd European Symp. on Penetration Testing, Amsterdam, 761~768.
6. Salgado, R., Michell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 124(9), 878~888.
7. Stefanoff, G., and Boshinov, B. (1977), "Bearing capacity of hollow piles driven by vibration", Proc. 9th Int. Con. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, 1, 753~758.