

사질토지반에서 폐색효과를 고려한 개단말뚝의 지지력 산정 (II) -새로운 지지력 산정식의 적용성-

Estimation of Bearing Capacity for Open-ended Pile in Sands Considering Soil Plugging (II) -Applicability of New Design Equation-

백 규 호* Paik, Kyu-Ho

Abstract

The bearing capacity of open-ended piles is affected by the degree of soil plugging, which is quantified by the incremental filling ratio, *IFR*. However, most design criteria for open-ended piles do not consider the variation of pile bearing capacity with *IFR*. In this study, new design equations for calculating the pile base and shaft load capacities, based on *IFR* value of the pile, were proposed using the results of model pile tests. A full-scale pile load test was also conducted on fully instrumented open-ended pile driven into gravelly sand. The *IFR* for the pile was continuously measured during pile driving. In order to check the accuracy of predictions made with the proposed equations, the equations were applied to two examples, including the pile load test performed in this study. Based on the comparisons with the pile load tests results, the proposed equations appear to produce satisfactory predictions.

요 지

개단말뚝의 지지력은 관내토중분비(*IFR*)에 의해 정량화 될 수 있는 말뚝의 폐색정도에 큰 영향을 받는다. 그러나 대부분의 지지력 산정식들은 *IFR*에 따른 지지력의 변화를 고려하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 모형말뚝시험의 결과에 근거하여 *IFR*을 이용한 개단말뚝의 지지력산정식을 제안하였다. 또한 자갈질 모래지반에서 각종 계측기가 부착된 실대형 개단말뚝을 이용하여 말뚝재하시험을 수행하였으며, 말뚝이 타입되는 동안 말뚝의 *IFR*을 연속적으로 측정하였다. 그리고 본 연구의 일부로 수행된 실대형 말뚝시험의 결과를 포함한 두 가지 경우의 말뚝재하시험 결과를 이용하여 새로 제안된 지지력산정식의 정확성을 평가하였다. 말뚝의 지지력에 대한 측정치와 예측치의 비교를 통하여 본 연구에서 제안된 지지력산정식은 만족스러운 예측결과를 주는 것으로 나타났다.

Keywords : Bearing capacity, Full-scale pile load test, Incremental filling ratio, New design equation, Open-ended pile

1. 서 론

강관말뚝과 같이 말뚝의 선단부가 열린상태에서 시공되는 개단말뚝의 지지력 및 관입저항력은 말뚝이 지

반에 타입되는 동안 말뚝의 선단부에서 발생하는 폐색정도에 크게 좌우된다. 그럼에도 불구하고 말뚝의 지지력 산정을 위하여 현재 사용되고 있는 대부분의 설계기준에서는 개단말뚝의 지지력을 폐단말뚝과 동일

* 정회원, 관동대학교 이공대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ., pkh@kwandong.ac.kr)

하게 취급하거나 관내토의 길이에 따라 개단말뚝의 지지력을 변화시키고 있을 뿐 말뚝의 폐색정도에 따른 지지력의 변화를 전혀 고려하지 못하고 있다(API RP2A, 1991; De Nicola와 Randolph, 1997).

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 가압토조를 이용한 모형말뚝시험을 다양한 지반조건에서 수행하였다. 그리고 모형시험에서 얻어진 시험결과에 토조의 크기효과(chamber size effect)에 대한 지지력 보정계수를 적용함으로써 토조에서 측정된 모형말뚝의 지지력을 현장조건에서의 지지력으로 전환시켰고, 이들 전환된 지지력 결과에 근거해서 다음과 같은 개단말뚝의 지지력산정식을 제안하였다.

$$\frac{q_b}{\sigma_h'} = 405 - 356 \frac{IFR(\%)}{100} \quad \left(\text{단, } \frac{q_b}{\sigma_h'} \leq 300 \right) \quad (1)$$

$$\frac{f_{so}}{(K_o \sigma_v' \tan \delta)\alpha} = 5.1 - 2.0 \frac{IFR(\%)}{100} \quad (2)$$

여기서 q_b 와 f_{so} 는 말뚝의 단위면적당 선단지지력과 주면마찰력이고 σ_h' 는 말뚝의 선단부에 작용하는 유효수평응력, σ_v' 는 말뚝의 주면에 작용하는 유효연직응력, K_o 말뚝 주면부 흙에서의 수평토압계수, δ 는 말뚝과 지반간의 마찰각이며, α 는 지반상수이다. 이들 제안식들에는 말뚝 타입후 시간이 경과함에 따라 지지력이 증가하는 시간경과효과(set-up effect)가 거의 반영되지 않았기 때문에 식 (1)과 (2)는 시간경과효과가 반영된 지지력보다 다소 작은 안전측의 지지력을 제공하게 된다.

한편 이들 제안식들이 실용화되기 위해서는 제안식의 정확성이 검증되어야 하며, 동시에 최종 관입깊이에서 말뚝의 폐색정도를 정의하는 IFR이 필요하다. 말뚝의 IFR은 식 (3)과 같이 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토 길이의 비로 정의되는 PLR을 이용하여 계산하거나 말뚝이 타입되는 동안 직접 측정되어야 한다.

$$IFR(\%) = 109 PLR - 22 \quad (3)$$

그러나 백규호(2001)의 연구결과에 따르면 말뚝의 IFR은 말뚝의 관입깊이 뿐만 아니라 항타에너지에 따라서도 달라지는 것으로 보고되었다. 따라서 보다 정확한 지지력의 산정을 위해서는 말뚝이 타입되는 동안 IFR을 측정하는 것이 바람직하지만 아직까지 효율적으로 IFR을 측정할 수 있는 방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 제안된 지지력산정식의 타당

성을 검증하기 위하여 각종 계측장치가 부착된 실험용 개단말뚝을 자갈질 모래지반에 타입한 후 정재하시험을 수행하였다. 특히 시험말뚝에 부착된 폐색정도 측정장치를 이용하여 말뚝이 타입되는 동안 관내토 길이의 변화를 연속해서 측정함으로써 말뚝의 관입깊이에 따른 IFR의 변화를 측정하였다. 그리고 여기서 얻어진 재하시험결과를 포함한 두 개의 재하시험결과(말뚝의 항타중에 IFR이 측정된 경우와 그렇지 않은 경우)를 이용하여 본 연구에서 제안된 지지력산정식의 정확도를 평가하였다.

2. 실험용 현장말뚝시험

2.1 지반조건

현장시험은 미국 인디애나주 북단의 교량건설 현장에서 실시되었으며, 지반조사를 위하여 다수의 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)이 실시되었다. 현장지반은 말뚝이 타입되기 전에 약 2m의 성토층이 제거된 곳으로, 약 14m의 깊이까지 자갈질 모래로 구성되어 있다. 이 모래의 최대 및 최소간극비는 각각 0.678과 0.405였으며, 비중은 2.67로 측정되었다. 그리고 삼축압축시험에서 얻어진 한계상태에서의 내부마찰각(ϕ_c)은 33.3°였다.

말뚝을 설치하기 전에 수행한 SPT와 CPT의 결과 및 성토층의 제거로 인한 지반의 깊이별 과압밀비(OCR)는 그림 1과 같았다. 그리고 현장지반의 상대밀도를 계산하기 위하여 공동확장이론을 이용하면서 CPT의 결과에 근거해서 지반의 상대밀도를 평가할 수 있는 프로그램인 CONPOINT(Salgado 등, 1997a; Salgado 등, 1998)가 사용되었다. CONPOINT에 의한 해석결과에 따르면 지표면으로부터 최초 3m의 지반은 $D_R=30\%$ 의 아주 느슨한 상태였으며, 그 이후의 깊이는 $D_R=80\%$ 의 조밀한 상태로 존재하였다. 그리고 성토층의 제거로 인한 현장지반의 과압밀비는 지표면 부근에서는 매우 큰 값을 보였으나 깊이가 깊어지면서 약 1.4에 수렴하는 경향을 보였다. 또한 현장지반의 지하수위는 지표면으로부터 3 m의 깊이에 존재하였다.

2.2 시험말뚝

본 시험에서는 그림 2에 보이는 바와 같이 제작된 실험

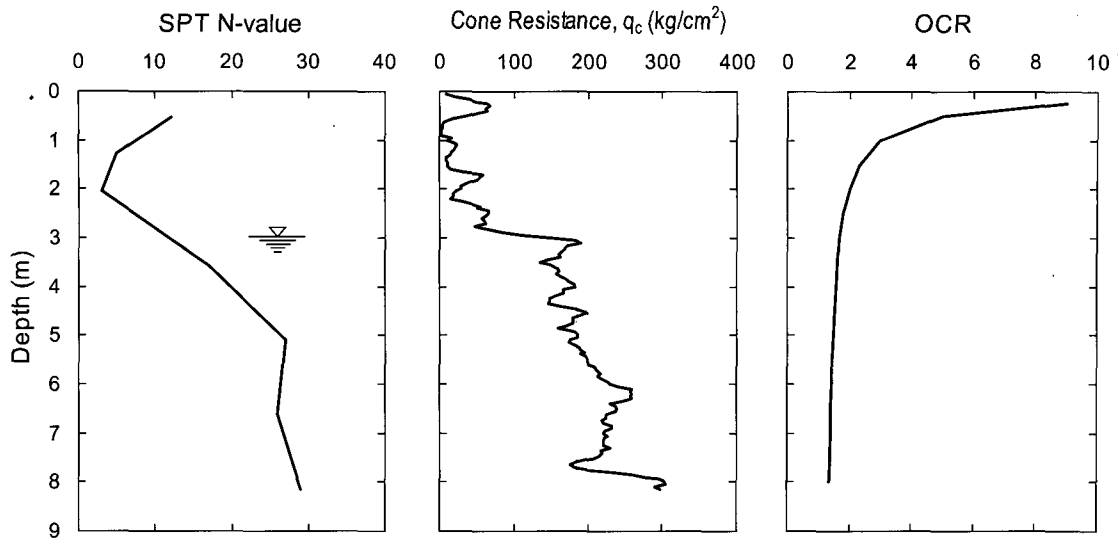


그림 1. 현장지반의 SPT와 CPT의 결과 및 OCR분포

대형의 개단말뚝이 사용되었다. 시험말뚝은 개단말뚝의 지지력을 관내토지지력과 단면부지지력, 주면마찰력으로 분리하기 위하여 두 개의 강관으로 제작되었으며, 관내토에서의 하중전이분포와 주면마찰력의 분포를 측정하기 위하여 내부강관과 외부강관의 외벽에 각각 10쌍과 9쌍의 스트레인게이지가 대칭으로 부착되었다. 그리고 내부강관과 외부강관 간에 하중이 전달됨으로써 지지력 요소들간에 상호간섭이 발생하는 것을 방지하기 위하여 말뚝의 선단부에 약 30mm의 홈이 만들어졌으며, 그 홈은 실리콘으로 채워졌다. 제작이 완료된 개단

말뚝의 외경과 내경은 각각 356mm와 292mm이고 길이는 8.24m였다. 또한 말뚝이 지반에 타입되는 동안 말뚝 내부에 생성되는 관내토길이의 변화를 측정하여 말뚝의 관입깊이별 IFR을 연속적으로 평가하기 위하여 시험말뚝에는 무게가 서로 다른 두 개의 추와 쇠줄을 이용해 만들어진 폐색정도 측정장치가 부착되었다.

한편, 재하시험 결과에 외삽법(extrapolation method)을 적용함으로써 개단말뚝의 선단지지력을 다시 관내토지지력과 단면부지지력으로 분리할 수 있으나, 이 과정에서 관내토지지력은 과소평가되고 단면부지지력은 과대평가 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 개단말뚝의 지지력을 선단지지력과 주면마찰력으로만 분리하였다. 개단말뚝의 선단지지력은 시험말뚝을 구성하는 내부강관의 머리부분에 부착된 스트레인게이지의 값으로부터 얻어졌으며, 주면마찰력은 외부강관의 머리부분에 부착된 스트레인게이지의 측정치로부터 결정되었다.

2.3 시험방법과 폐색정도의 측정

시험말뚝은 최대항타에너지가 5.8ton·m인 디젤햄머를 이용하여 7.04m의 깊이까지 타입되었다. 말뚝이 타입되는 동안 말뚝의 폐색정도 변화를 조사하기 위하여 개단말뚝에 부착된 폐색정도 측정장치를 이용하여 관내토길이의 변화가 연속적으로 측정되었다. 말뚝이 타입되는 동안 관내토길이의 변화를 측정하기 위해서는 폐색정도 측정장치를 구성하는 두 개의 추 중 무거운 것은 그림 3과 같이 말뚝 내부에 생성되는 관내토의 상

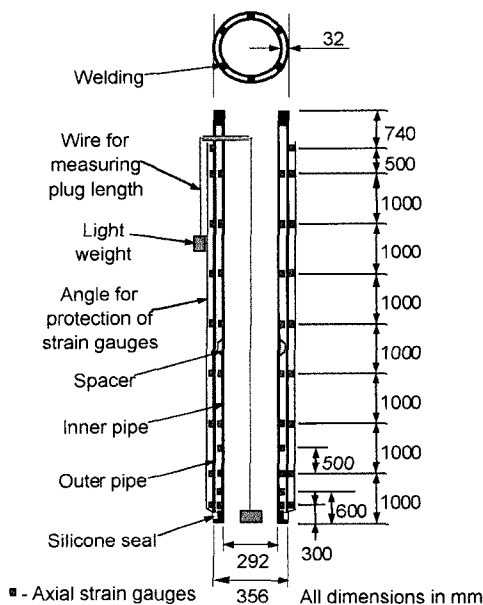


그림 2. 시험말뚝의 상세도

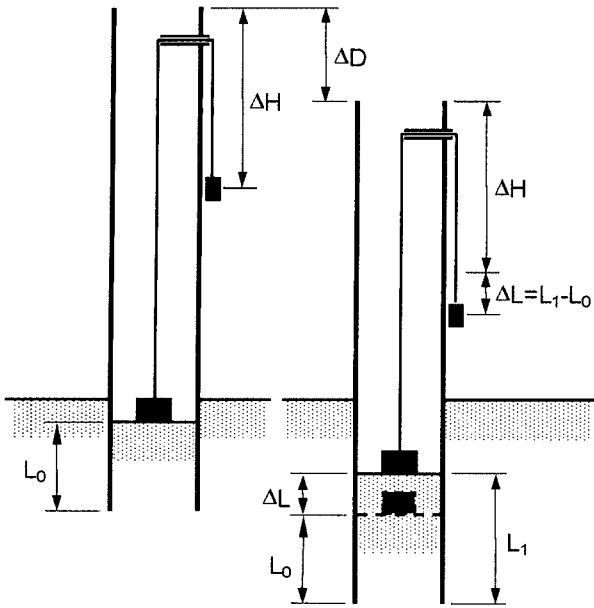


그림 3. 항타중 폐색정도 측정법

부에 고정되고, 가벼운 것은 눈금이 그어진 말뚝의 외벽에 쇠줄에 의해 매달리게 된다. 이 상태에서 말뚝이 지반에 타입되면 관내토의 길이가 변하게 되고 그에 따라 말뚝의 외벽에 놓인 추의 위치가 변하게 되므로 이 추의 위치변화를 통해 말뚝의 관입깊이 증가에 따른 관내토 길이의 변화를 측정하게 된다. 이러한 방법으로 말뚝의 관입깊이 증분(ΔD)과 그에 대응하는 관내토길이의 변화량(ΔL)을 측정하였으며, 이들 측정치를 이용하여 말뚝의 폐색정도를 정의하는 기준으로 사용하고 있는 관내토증분비, IFR (incremental filling ratio)를 산정하였다.

$$IFR = \frac{\Delta L}{\Delta D} \times 100 (\%) \quad (4)$$

말뚝의 타입이 완료되고 1주일이 경과된 후에 정재하시험이 수행되었다. 말뚝에 가해지는 하중의 증분은 15ton으로 하였으며, 하중은 말뚝 두부의 침하량이 0.5 mm/hour보다 작을 때까지 유지되었다. 그리고 시험말뚝 두부의 침하량이 말뚝직경의 42%에 해당하는 약 140mm에 이를 때까지 정재하시험은 계속되었다. 또한 정재하시험에서 말뚝의 두부에 가해지는 하중은 200ton 용량의 하중계에 의하여 측정되었으며, 침하량은 시험말뚝의 중심으로부터 말뚝직경의 약 7배 떨어진 지점에 타입된 보조말뚝에 의해 지지된 기준빔에 고정된 2개의 다이얼게이지에 의하여 측정되었다.

2.4 극한지지력의 결정

정재하시험에서 측정된 하중-침하량 곡선으로부터 말뚝의 극한지지력을 결정하기 위하여 Chin의 방법(Chin, 1970)이 사용되었다. 이 방법은 말뚝에 가해진 하중(Q)과 침하량(s)의 관계를 식 (5)와 같이 포물선으로 가정하는 것으로, 여기서 말뚝의 극한지지력은 $1/C_1$ 로 정의된다.

$$\frac{s}{Q} = C_1 \cdot s + C_2 \quad (5)$$

이때 정재하시험의 마지막 하중단계에서 말뚝의 침하량이 말뚝 직경의 약 42%임을 고려하여 시험말뚝의 극한 주변마찰력은 정재하시험의 마지막 하중단계에서 측정된 주변마찰력으로 하였으며, 극한 선단지지력은 Chin의 방법으로 결정된 극한 전체지지력과 극한 주변마찰력의 차이와 같다고 하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 말뚝의 폐색정도

개단말뚝에서 관내토에 의한 폐색현상은 말뚝의 거동을 결정하는데 있어서 매우 중요한 역할을 하며, 이 폐색정도는 일반적으로 관내토증분비, IFR 에 의하여 정

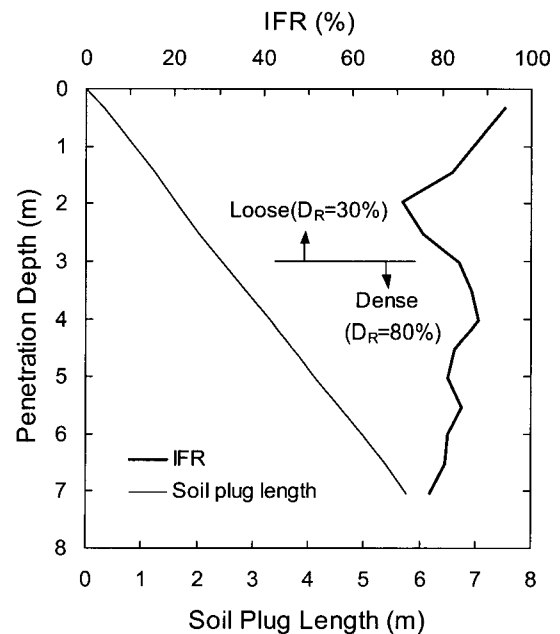


그림 4. 관입깊이에 따른 폐색정도의 변화

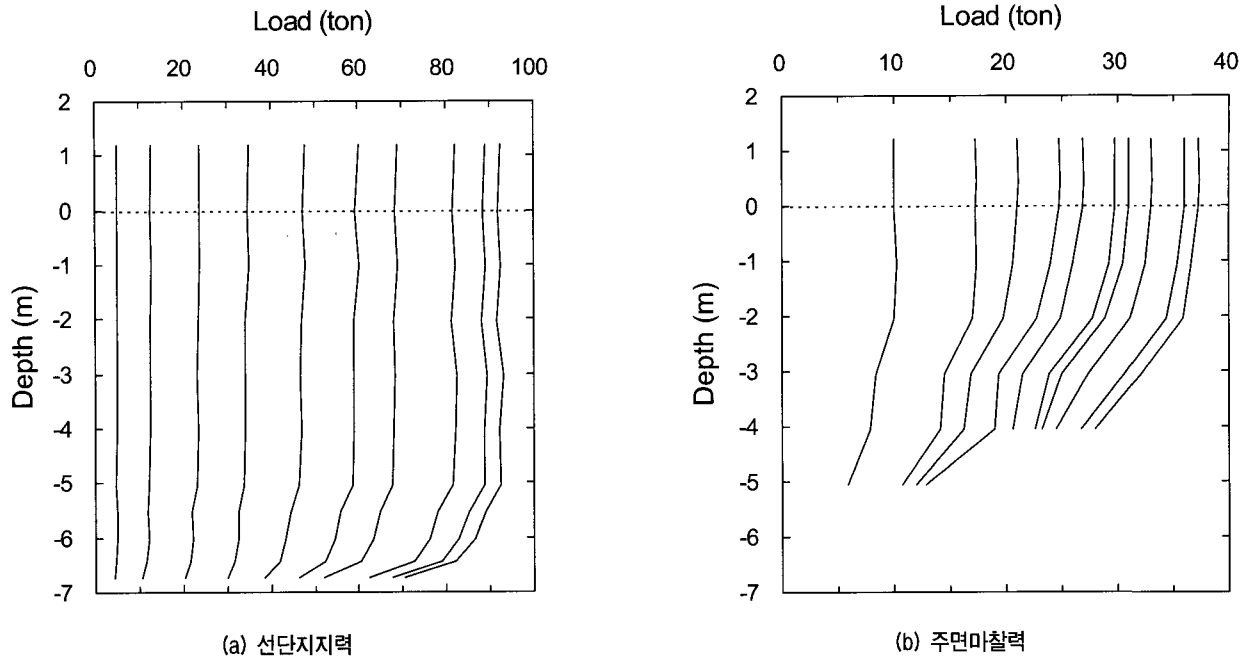


그림 5. 정재하시험의 하중단계별 하중전이분포

의될 수 있다. 그림 4는 말뚝이 타입되는 동안 현장에서 측정된 관내토길이와 *IFR*의 변화를 나타낸 것이다. 개단말뚝은 항타 초기부터 부분폐색상태($0% < IFR < 100%$)로 타입되었으나 최종 타입심도인 7.04m에서도 *IFR*은 77.5%로 여전히 부분폐색상태로 존재하였다. 이것은 Paikowsky 등(1989)과 Paik과 Lee(1993)가 보고한 바와 같이 모래지반에 타입되는 개단말뚝의 대부분은 부분폐색상태로 존재한다는 연구결과와 일치하는 것이다.

또한 그림 4로부터 말뚝의 *IFR*이 관입 초기에는 깊이에 따라 작아지다가 약 2~3m의 관입깊이에서 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 그 이후의 깊이에서는 *IFR*이 다시 지속적으로 작아지는 경향을 보였다. Klos와 Tejchaman(1977)과 De Nicola와 Randolph(1997)의 연구결과에 따르면 말뚝의 관입깊이가 증가하고 상대밀도가 감소하면 말뚝의 *IFR*은 감소하는 것으로 나타난다. 따라서 이와 같은 시험결과는 지반조사 결과에서 언급하였듯이 2~3m의 깊이를 전후해서 지반의 상대밀도가 $D_R=30%$ 의 느슨한 상태에서 $D_R=80%$ 의 조밀한 상태로 급변했기 때문으로 생각된다.

3.2 하중전이분포

정재하시험에서 시험말뚝에 가해진 하중단계는 15, 30, 45, 60, 75, 90, 100, 115, 125, 130ton이었으며, 각

하중단계마다 말뚝의 하중전이분포가 측정되었다. 그림 5는 정재하시험동안 개단말뚝의 내부강관과 외부강관에서 측정된 하중전이분포를 나타낸 것이다. 이중 그림 5(a)는 내부강관에서 측정된 선단지지력의 하중전이분포를, 그리고 그림 5(b)는 외부강관에서 측정된 주면마찰력의 분포를 보인 것이다. 그러나 외부강관의 선단부에 부착된 일부 스트레인게이지가 말뚝 항타시 파손됨으로써 주면마찰력의 분포를 완전하게 측정하는데는 실패하였다.

3.3 하중-침하량 곡선

재하시험 동안 시험말뚝의 내부강관과 외부강관에서 측정된 하중전이분포로부터 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 대한 하중-침하량 곡선이 구해졌으며, 그 결과가 그림 6에 보여졌다. 그림에서 보이는 바와 같이 말뚝 두부의 침하량이 약 140mm에 이르는 마지막 하중단계에서 말뚝의 선단지지력은 여전히 증가하고 있는 반면 주면마찰력은 이미 극한상태에 도달한 것을 알 수 있다. 이와 같은 시험말뚝에 대한 하중-침하량 곡선에 Chin의 방법을 적용함으로써 얻어진 극한 선단지지력과 극한 주면마찰력이 정재하시험의 결과와 함께 표 1에 정리되었다.

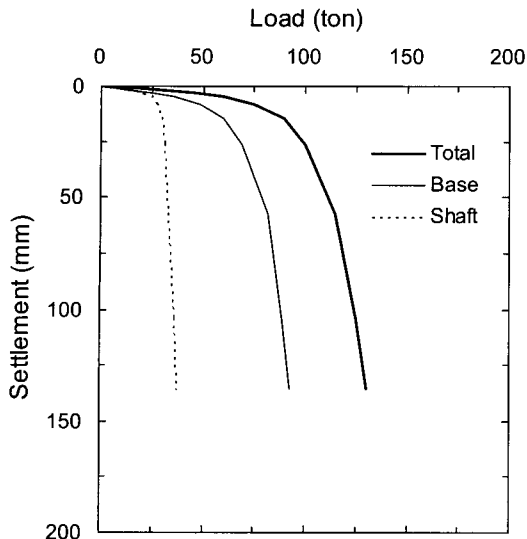


그림 6. 말뚝재하시험에서 측정된 하중-침하량 곡선

표 1. 정재하시험의 결과와 극한지지력

| 해석방법 | 전체지지력 | 선단지지력 | 주면마찰력 |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| 정재하시험의 마지막 하중단계 (ton) | 130.0 | 92.7 | 37.3 |
| Chin의 방법에 의한 극한지지력 (ton) | 133.8 | 96.5 | 37.3 |

4. 지지력 산정식의 적용성

본 연구에서 새롭게 제안된 지지력산정식의 정확성을 평가하기 위하여 제안식을 서로 다른 지반조건에서 수행된 두 개의 말뚝재하시험 결과에 적용하였다. 그중 첫 번째 사례는 본 연구에서 수행된 실대형 말뚝재하시험으로 말뚝이 타입되는 동안 말뚝의 IFR이 측정된 경우이다. 그리고 두 번째 사례는 Beringen 등(1979)에 의해서 보고된 실대형 말뚝재하시험으로 이 경우에는 말뚝의 IFR은 측정되지 아니하고 최종 관입깊이에서 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비로 정의되는 PLR만 측정된 경우이다.

4.1 사례 1

지반조사 결과에서 언급하였듯이 현장지반의 상대밀도는 지표면으로부터 3m되는 지점을 기준으로 급격히 달라진다. 상대밀도가 30%인 상부 3m 지반의 단위중량은 $\gamma_{sat} = 2.05 \text{ ton/m}^3$ 으로, 그리고 상대밀도가 80%인 하부지반의 단위중량은 $\gamma_{sat} = 2.14 \text{ ton/m}^3$ 로 계산되었다. 지반과 말뚝간의 마찰각(δ)은 지반의 한계상태 내부마찰각(ϕ_c)의 2/3배인 22.2° 로 가정하였다. 또한 현장지반은 성토층의 제거로 인해 과압밀상태에 있기 때문

에 지반의 깊이별 수평토압계수를 산정하기 위하여 식 (6)에 보이는 Mayne과 Kulhaway(1982)의 제안식을 사용하였다. 이 식으로부터 계산된 시험말뚝 선단부에서의 수평토압계수는 $K_o = 0.55$ 였다.

$$K_o = (1 - \sin \phi) OCR^{\sin \phi} \quad (6)$$

따라서 관입깊이가 7.04m이고 최종깊이에서 측정된 IFR이 77.5%인 개단말뚝의 극한 선단지지력은 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\frac{q_b}{\sigma'_h} = 405 - 356 \frac{IFR(\%)}{100} = 405 - 356 \frac{77.5}{100} = 129.1$$

$$Q_b = q_b \cdot A_b = 129.1 \cdot \sigma'_h \left(\frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \right) =$$

$$129.1 (0.55 \times 10.76) (0.0995) = 76.0 \text{ ton}$$

그리고 식 (2)의 지지력산정식을 이용해서 계산한 시험말뚝의 극한 주면마찰력은 $Q_{so} = 41.6 \text{ ton}$ 이었다.

$$\frac{f_{so}}{K_o \sigma'_v \tan \delta} = 5.1 - 2.0 \frac{IFR(\%)}{100} =$$

$$5.1 - 2.0 \frac{77.5}{100} = 3.55$$

$$Q_{so} = f_s A_s = 3.55 K_o \sigma'_v \tan \delta (\pi d_o D) = 3.55 \Sigma (K_o \sigma'_v D)$$

$$(\pi d_o \tan \delta) = 3.55 (25.66) \pi (0.356) \tan 22.2 = 41.6 \text{ ton}$$

식 (1)과 (2)의 지지력산정식을 이용해서 예측한 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력은 그림 7에 보이는 바와 같이 Chin의 방법에 의해 평가된 극한 선단지지력과 극한 주면마찰력의 79%와 111%에 해당되었다. 그리고 산정식으로부터 예측된 전체지지력은 Chin의 방법으로 산정된 극한 전체지지력의 88%에 해당하는 117.6ton으로

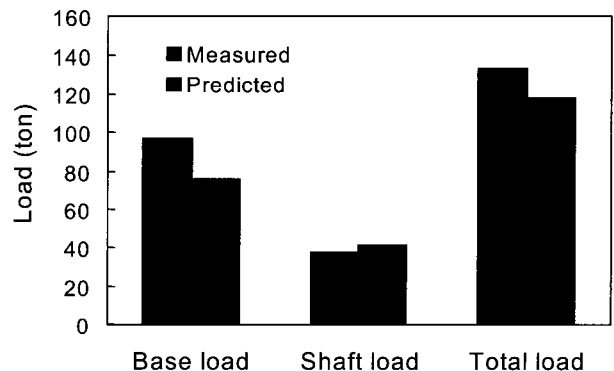


그림 7. 실측치와 예측치의 비교 (IFR 측정시)

로 실측치와 유사한 결과를 보였다.

4.2 사례 2

Beringen 등(1979)은 과압밀된 조밀한 모래지반에 타입된 계측기가 부착된 개단말뚝에 대하여 정재하시험을 수행하였다. 현장지반의 단위중량은 $\gamma_{sat} = 2.04 \text{ ton/m}^3$ 였으며, 배수조건인 삼축압축시험에서 구해진 모래의 내부마찰각은 $\phi = 38^\circ$ 였다. 그리고 지반과 말뚝간의 마찰각(δ)은 지반의 내부마찰각의 2/3배인 $\delta = 25.3^\circ$ 로 가정하였다. 지하수위는 지표면 아래 3.1 m에 위치하였으며, CPT시험을 통해서 측정된 말뚝 선단부 위치에서 콘의 관입저항력은 $q_c = 285 \text{ kg/cm}^2$ 였다. 또한 Beringen 등(1979)의 연구결과에 현장지반의 과압밀비가 언급되지 않았기 때문에 지반의 수평토압계수는 CONPOINT 프로그램을 (Salgado 등, 1997a; Salgado 등, 1998)을 이용하여 지반의 상대밀도와 수평응력에 대한 콘의 관입저항력을 계산한 Salgado 등(1997b)의 이론적인 해석결과를 이용하여 역으로 계산되었다. 이와 같은 방법으로 계산된 지반의 수평토압계수는 $K_o = 0.70$ 이었으며, 이 값을 이용해서 식 (6)으로부터 산정된 지반의 과압밀비는 2.65 였다.

한편, 말뚝의 내경과 외경이 각각 324mm와 356mm인 시험말뚝은 7.0m의 깊이까지 타입되었으며, 이 깊이에서 말뚝에 생성된 관내토길이는 4.6m로 측정되었다. 결국 최종 관입깊이에서 말뚝의 PLR(말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비)은 0.66이었다. 그리고 Beringen 등(1979)은 강관말뚝의 지지력 요소들을 분리 측정하기 위하여 일반 강관말뚝에 다수의 스트레인게이지를 부착하여 재하시험을 수행하였다. 그들의 시험결과를 종합하면 압축재하시험을 통해서 측정된 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 각각 115.2ton과 133.5ton이었으며, 인발재하시험에서 측정된 주변마찰력은 84.6ton이었다. 그러나 이 시험에서 사용된 말뚝과 같이 직경이 다른 두 개의 강관으로 구성되지 않은 일반 강관말뚝의 경우에는 압축재하시험을 통해서 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 말뚝의 선단지지력은 압축재하시험에서 측정된 전체지지력과 인발재하시험에서 측정된 주변마찰력의 차이와 같고 주변마찰력은 인발재하시험에서 측정된 주변마찰력과 같다고 하는 것이 더욱 타당해 보인다. 이러한 방법을 통해서 개단말뚝의 지지력 요소들은 다시 분리되었으며, 그 결과에 Chin의 방법을 적용하여 말뚝

의 극한지지력이 다시 계산되었다. 최종적으로 계산된 말뚝의 극한 선단지지력은 152.4ton이었으며, 극한 주변마찰력은 107.0ton이었다.

말뚝의 지지력을 산정하기 위해서는 말뚝의 IFR이 필요하며, 말뚝의 최종 관입깊이에서의 IFR은 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 계산되었다.

$$IFR (\%) = 109 (0.66) - 22 = 49.9\%$$

따라서 말뚝의 극한 선단지지력은 식 (1)로부터 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{q_b'}{\sigma_h'} &= 405 - 356 \frac{IFR(\%)}{100} = 405 - 356 \frac{49.9}{100} = 227.4 \\ Q_b &= q_b' \cdot A_b = 227.4 \cdot \sigma_h' \left(\frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \right) \\ &= 227.4 (0.70 \times 10.38) (0.0995) = 164.4 \text{ ton} \end{aligned}$$

그리고 말뚝의 극한 주변마찰력은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 계산될 수 있으며, 이러한 계산과정에서 말뚝의 전체 길이에 대하여 지반의 OCR이 수평토압계수 K_o 에 미치는 영향이 고려되었다.

$$\begin{aligned} \frac{f_{so}}{K_o \sigma_v' \tan \delta} &= 5.1 - 2.0 \frac{IFR(\%)}{100} \\ &= 5.1 - 2.0 \frac{49.9}{100} = 4.10 \\ Q_{so} &= f_s A_s = 4.1 K_o \sigma_v' \tan \delta (\pi d_o D) \\ &= 4.1 \Sigma (K_o \sigma_v' D) (\pi d_o \tan \delta) \\ &= 4.1 (0.70 \times 42.35) \pi (0.356) \tan 22.2 = 64.2 \text{ ton} \end{aligned}$$

식 (1)과 (2)의 지지력산정식을 이용해서 예측한 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 그림 8에 보이는 바와 같이 말뚝재하시험에서 측정된 극한 선단지지력과 극

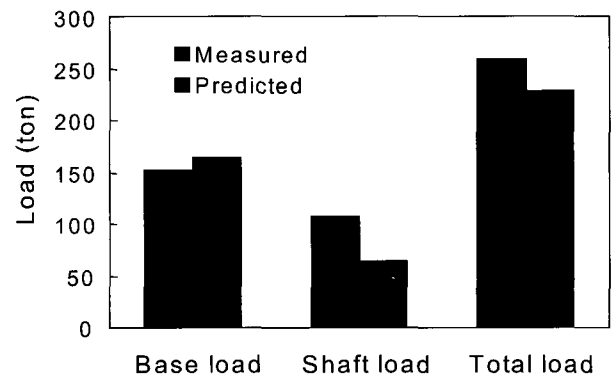


그림 8. 실측치와 예측치의 비교 (PLR 측정시)

한 주변마찰력의 107.9%와 60%에 해당되었다. 그리고 제안된 지지력산정식으로부터 계산된 전체지지력은 재하시험 결과의 88.1%였다. 이와 같은 실측치와 예측치의 비교를 통해서 식 (1)과 식 (2)에 보이는 지지력산정식은 만족스러운 수준에서 개단말뚝의 지지력을 예측하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

개단말뚝의 지지력은 말뚝의 폐색정도에 큰 영향을 받음에도 불구하고 대다수의 지지력산정식들은 이와 같은 개단말뚝의 거동을 고려하지 못하고 있다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 실내모형말뚝시험의 결과에 근거하여 개단말뚝의 지지력 산정시 말뚝의 폐색정도를 고려할 수 있는 지지력산정식이 제안되었다. 그러나 이러한 지지력산정식이 실용화되기 위해서는 다양한 지반조건에서 수행된 실대형 말뚝재하시험 결과를 이용하여 그 정확도가 검증되어야 한다.

본 연구에서는 새롭게 제안된 지지력산정식을 평가하기 위한 재하시험 결과의 획득을 위하여 각종 계측기가 설치된 실대형의 개단말뚝에 대하여 말뚝재하시험을 수행하였다. 그리고 말뚝에 설치된 폐색정도 측정장치를 이용해서 시험말뚝이 지반에 타입되는 동안 말뚝의 폐색정도가 연속적으로 측정되었다. 또한 이와 같은 시험결과외에 또 다른 말뚝재하시험 결과를 이용하여 새로 제안된 지지력산정식의 정확도를 평가하였다. 검증에 사용된 두 개의 재하시험 결과중 하나는 말뚝이 타입되는 동안 말뚝의 폐색정도를 측정한 경우이고, 다른 하나는 항타중 폐색정도를 측정하지 않고 최종 관입 깊이에서 관내토의 길이만 측정한 경우이다. 이 두 가지의 경우에 새로운 지지력산정식을 적용하여 예측치와 실측치를 비교한 결과 본 연구에서 제안된 지지력산정식은 만족스러운 수준의 예측결과를 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 박사후 해외연수사업의 지원을 받아 Purdue University에서 수행된 것으로 연구비를 지원해준 한국과학재단과 Purdue University의 Rodrigo Salgado 교수에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 백규호 (2001), "모래지반에서 개단말뚝의 항타에너지가 강관말뚝의 지지력에 미치는 영향", *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제6호, 99-110.
2. American Petroleum Institute(1991), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms*, 19th ed., API RP2A, Dallas, TX: America Petroleum Institute.
3. Beringen, F. L., Windle, D., and Van Hooydonk, W. R. (1979), "Results of loading tests on driven piles in sand" *Recent Developments in the Design and Construction of Piles*, London, pp.213-225.
4. Chin, F. V. (1970), "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure" *Proc. 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engrg.*, pp.81-90.
5. De Nicola, A. and Randolph, M. F. (1997), "The plugging behavior of driven and jacked piles in sand", *Geotechnique*, Vol.47, No.4, pp.841-856.
6. Klos, J. and Tejchman, A. (1977), "Analysis of behavior of tubular piles in subsoil", *Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Tokyo, Vol.1, pp.605-608.
7. Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982), "Ko-OCR relationships in soil", *J. of Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.108, No.6, pp.851-872
8. Paik, K. H. and Lee, S. R. (1993), "Behavior of soil plugs in open-ended model piles driven into sands", *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol.11, pp.353-373.
9. Paikowsky, S. G., Whitman, R. V., and Baligh, M. M. (1989), "A new look at the phenomenon of offshore pile plugging", *Marine Geotechnology*, Vol.8, pp.213-230.
10. Salgado, R., Michell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1997a), "Cavity expansion and penetration resistance in sands", *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.4, pp.344-354.
11. Salgado, R., Boulanger, R. W., and Michell, J. K. (1997b), "Lateral stress effects on CPT liquefaction resistance correlations", *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.8, pp.726-735.
12. 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, Vol.124, No.9, pp.878-888.

(접수일자 2002. 3. 19, 심사완료일 2002. 5. 24)