한국지반공학회논문집 제18권 4호 2002년 8월 pp. 189 ~ 197

사질토지반에서 폐색효과를 고려한 개단말뚝의 지지력 산정 (I) -새로운 지지력 산정식의 개발-

Estimation of Bearing Capacity for Open-ended Pile in Sands Considering Soil Plugging (I) -Development 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*. 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* can be estimated from the plug length ratio *PLR*, which is defined as the ratio of soil plug length to pile penetration depth. The unit base and shaft resistances decrease with increasing *IFR*. Based on the results of the model pile tests, new design equations for calculating base load capacity and shaft load capacity of open-ended piles are proposed.

요 지

개단말뚝의 지지력은 말뚝의 폐색정도에 영향을 받으며, 이러한 폐색정도는 관내토증분비인 *IFR*에 의하여 정량화 될 수 있다. 그러나 말뚝의 폐색정도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향을 정확하게 고려하는 개단말뚝의 지지력 산정기준이 현재까지 없는 실정이다. 따라서 말뚝의 폐색정도가 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 계측기가 부착된 모형 개단말뚝과 가압토조를 이용해서 모형말뚝시험을 수행하였다. 시험결과 개단말뚝의 *IFR*은 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비로 정의되는 관내토길이비(*PLR*)로부터 예측이 가능함을 알 수 있었다. 그리고 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력은 말뚝의 *IFR*이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또한 이와 같은 모형말뚝시험의 결과에 근거하여 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 산정할 수 있는 새로운 지지력산정식이 제안되었다.

Keywords : Bearing capacity, Calibration chamber test, Chamber size effect, Incremental filling ratio, New design equation, Open-ended pile

1. 서 론

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

개단말뚝에 대한 많은 설계기준들은 현장시험이나

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

실내시험 혹은 해석적인 방법을 통해서 제안되어 왔다 (Klos와 Tejchman, 1977; Nishida 등, 1985; API, 1991; Randolph 등, 1991). 그 예로 해상구조물의 기초 설계에 사용되는 API RP2A(1991)의 기준에서는 개단말뚝의 지지력을 완전폐색과 완전개방 상태에 대해서만 산정할 수 있도록 하고 있다. 그러나 모래지반에 타입되는 대부분의 개단말뚝은 부분폐색상태에서 관입되는 것으로 알려져 있으며, API RP2A의 기준은 이러한 말뚝의 거동을 적절히 반영하지 못하고 있는 것이 현실이다. 그리고 Stefanoff와 Boshinov(1977)는 관내토가 미소 두께의 원판형 요소들로 구성되어 있다고 가정하고 각 요소의 힘평형조건을 고려함으로써 개단말뚝의 관내토지지력을 산정하는 1차원 관내토 해석법(*one-dimensional plug analysis*)을 제안하였다. 또한 많은 연구자들(Murff 등, 1990; O'Neill과 Raines, 1991; Randolph 등, 1991; 백규호, 1993)은 각종 실험결과에 근거하여 1차원 관내토 해석법에 쐐기영역 관내토(wedged plug zone)의 개념을 도입함으로써 지지력 산정식의 예측정도를 높이려 하였다. 그러나 1차원 관내토 해석법은 현실적으로 쉽게 구할 수 없는 관내토의 수평토압계수를 설계인자로 사용함은 물론 이 토압계수의 변화에 따라 해석결과가 매우 민감하게 반응하기 때문에 이 방법을 실무에 적용하는 것은 그다지 쉽지 않은 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 백규호(1993)는 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비로 정의되는 관내토길이비(*PLR*)와 현장지반의 토질특성에 근거하여 관내토의 수평토압계수를 산정하는 방법을 제안하였으며, De Nicloa와 Randolph(1997)가 관내토의 전체 길이에 대하여 일정한 형태의 수평토압계수 분포를 제안하기도 하였다.

실질적으로 개단말뚝의 지지력은 말뚝의 폐색정도에 따라 크게 변화하며, 말뚝의 폐색정도는 말뚝의 단위 관입깊이당 관내토 길이의 증분으로 정의되는 관내토증분비(incremental filling ratio, *IFR*)에 의하여 적절히 표현될 수 있다. 그러나 이상에서 언급한 바와 같이 현재까지 개단말뚝에 대하여 제안된 모든 지지력 산정식들은 말뚝의 *IFR*에 따른 지지력의 변화를 제대로 고려하지 못하고 있음은 물론 실용성도 떨어지는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 *IFR*이 개단말뚝의 선단지지력과 주면마찰력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조와 스트레인게이지가 부착된 모형 개단말뚝을 이용하여 일련의 모형말뚝시험을 수행하였다. 그리고 여기서 얻어진 시험결과에 근거하여 *IFR*을 주된 설계인자로 사용하는 개단말뚝의 지지력산정식이 제안되었다.

2. 모형말뚝시험

2.1 시료의 공학적 특성

백규호(1993)는 다양한 지반조건에서 개단말뚝의 항타거동과 지지력 특성을 조사하기 위하여 가압토조(calibration chamber)를 이용한 모형말뚝시험을 수행하였다. 본 시험에서 모형지반의 조성을 위하여 사용된 시료는 자연 건조된 한강모래였다. 이 시료의 곡률계수(C_c)와 균등계수(C_u)는 각각 1.23과 2.21로, 통일분류법에서 SP(poorly graded sand)로 분류되었다. 그리고 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 1.62 g/cm^{3}와 1.33 g/cm^{3}로 측정되었다.

모래 시료의 공학적 특성을 조사하기 위하여 일련의 실내시험이 수행되었다. 시료로 사용된 모래의 내부마찰각과 시험말뚝과 모래간의 마찰각이 직접전단시험으로부터 구해졌다. 상대밀도가 23%, 56%, 90%인 모래시료의 내부마찰각은 각각 34.8°, 38.2°, 43.4°였으며, 한계상태에서의 마찰각은 33.7°로 측정되었다. 또한 23%, 56%, 90%의 상대밀도에 대응하는 모래와 모형말뚝간의 마찰각은 각각 17.0°, 17.5°, 18.4°였다. 이처럼 모래와 모형말뚝간의 마찰각이 작은 것은 모형말뚝이 벽면이 매우 매끄러운 스테인레스 파이프로 만들어졌기 때문이다.

2.2 가압토조와 지반조성

모형말뚝시험은 직경이 775mm이고 높이가 1250mm인 가압토조에 성형된 모형지반에서 수행되었다. 다양한 응력상태를 갖는 모형지반을 조성하기 위하여 토조의 밑면과 측면에 압력을 독립적으로 조절할 수 있는 고무 맴브레인(rubber membrane)을 설치하였으며, 모형지반의 압밀을 위하여 고무 멤브레인에 가해지는 압력은 압력조절장치에 의하여 시험이 진행되는 동안 일정하게 유지되었다.

모형지반은 모래입자를 일정한 높이에서 낙하시킴으로써 지반의 상대밀도를 조절하는 낙사법(raining method)에 의하여 조성되었으며, 낙하하는 모래입자들은 낙하속도의 조절과 토조 내에서의 균등한 분산을 위하여 8번과 10번 체로 구성된 모래분산망을 통과하도록 하였

다. 이상과 같은 방법으로 상대밀도가 23%, 56%와 90%인 모형지반이 조성되었으며, 그후에 고무 멤브레인에 일정한 크기의 압력을 30시간동안 가함으로써 모형지반을 압밀시켰다.

토조를 이용한 모형시험에서는 실제 현장과는 달리 토조의 크기가 한정되어 있기 때문에 토조의 크기가 말뚝의 거동에 미치는 영향, 즉 토조의 크기효과가 발생하게 된다. 몇몇 연구자들은 각종 방법을 통해서 토조의 경계조건이 말뚝의 거동에 영향을 미치지 않는 최소한의 토조 크기를 평가하였다. Parkin과 Lunne(1982)는 토조의 경계조건이 콘의 관입저항에 영향을 주지 않기 위해서는 토조의 직경이 시험에 사용되는 콘 직경의 50배 이상되어야 한다는 시험결과를 보고하였으며, Salgado 등(1998)은 토조의 크기효과를 없애기 위한 최소한의 토조 직경으로 콘 직경의 100배를 제안하였다. 그러나 본 시험에 사용된 토조와 모형말뚝의 직경은 각각 775mm와 42.7mm로 가압토조의 직경은 모형말뚝 직경의 약 18.2배에 불과하다. 따라서 토조의 크기효과와 관련한 기존의 연구결과들과 고무 멤브레인을 이용한 토조에 말뚝이 타입되었을 때 지반에 유발되는 수평응력의 증분은 실제 현장에서 측정되는 것보다 작다는 것을 고려할 때 본 시험에서 측정되는 모형말뚝의 지지력은 현장에서 측정되는 지지력보다 작을 수 있다는 것을 알 수 있다. 결국 본 모형시험에서 얻어진 시험결과를 현장에 적용하기 위해서는 시험결과가 토조의 크기효과에 대하여 보정되어야 한다.

한편, 말뚝의 지지력은 그 직경에 따라 달라질 수 있으며, 이와 같은 말뚝의 크기효과(scale effect)에 대한 존재 여부는 아직까지 많은 논란이 되고 있을 뿐만 아니라 정량적으로도 명확히 규명되지 않고 있다(Kraft, 1991). 따라서 본 연구에서는 말뚝의 크기효과에 의한 지지력의 변화는 고려하지 아니하였다. 또한 사질토 지반에서도 말뚝 설치후 시간이 경과함에 따라 지지력이 증가하는 시간경과효과(set-up effect)가 발생하는 것으로 보고되고 있으나, 본 모형말뚝시험에서는 말뚝 설치후 약 30분이 경과한 시점에서 재하시험을 수행함으로써 말뚝의 지지력에 시간경과효과가 거의 반영되지 않도록 하였다.

2.3 시험말뚝

일반적으로 개단말뚝은 모래지반에서 부분폐색상태로 타입되며, 이때 말뚝의 지지력은 관내토지지력과 단면부지지력, 그리고 주면마찰력으로 구성된다(Paikowsky 등, 1989). 따라서 개단말뚝의 지지력을 이들 세 개의 지지력 요소들로 분리하여 측정하기 위하여 모형말뚝은 그림 1과 같이 직경이 서로 다른 두 개의 스테인레스 파이프로 구성되었다. 그리고 내부파이프를 따라 전달되는 하중의 변화로부터 개단말뚝의 선단지지력과 관내토지지력을 측정하기 위하여 내부파이프의 외벽에 9쌍의 스트레인게이지가 대칭으로 부착되었으며, 주면마찰력을 측정하기 위하여 외부파이프의 머리부분 외벽에 한 쌍의 스트레인게이지가 역시 대칭으로 부착되었다. 이때 스트레인게이지는 말뚝과 동일한 재질로 만들어진 것을 사용함으로써 온도변화에 대한 오차를 제거하였으며, 동시에 2선결선법으로 부착하면서 데이터 획득장치(data logger)에 접지선을 연결함으로써 전선길이의 증가에 의한 오차 또한 최소화하였다. 이러한 방법으로 조립이 완료된 모형말뚝의 내경과 외경은 각각 36.5mm와 42.7mm였으며, 길이는 908mm였다.

시험말뚝의 선단지지력은 내부파이프의 머리부분에 부착된 스트레인게이지로부터 얻어졌으며, 주면마찰력은 외부파이프에 부착된 스트레인게이지로부터 얻어졌다. 그리고 관내토지지력과 단면부지지력은 그림 2에 보이는 외삽법(extrapolation method)을 통해서 평가될 수 있으며, 이러한 외삽법에는 말뚝의 선단부 근처에서 관내토와 말뚝 내면간의 단위 마찰력이 일정하다는 가

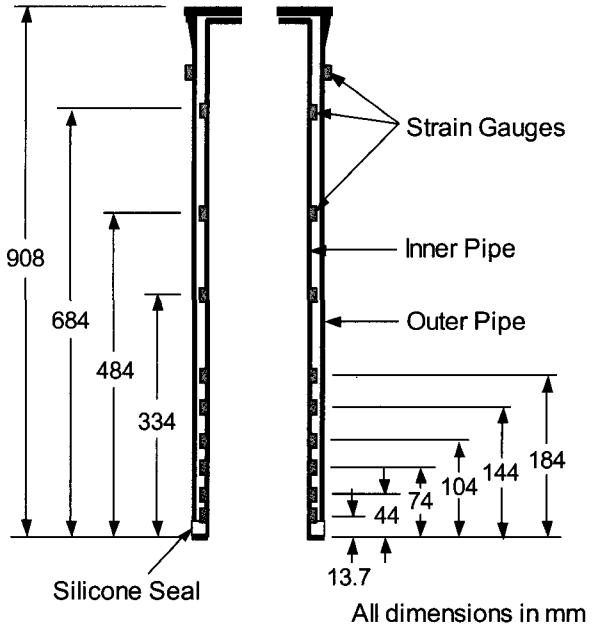


그림 1. 모형말뚝의 상세 구조

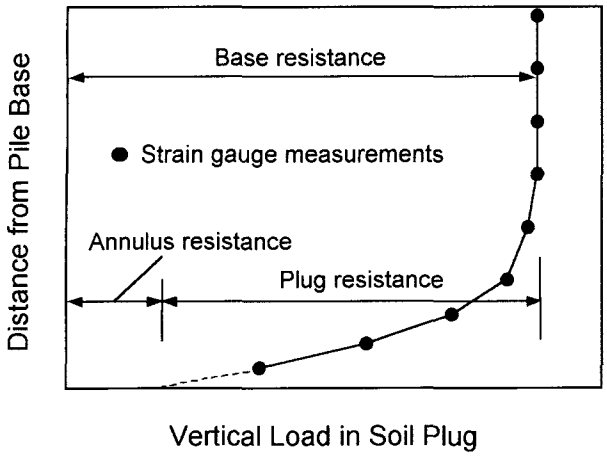


그림 2. 선단지지력의 결정법

정이 사용된다. 그러나 많은 실험결과에 의하면 관내토와 말뚝과의 단위 마찰력은 말뚝의 선단부 근처에서 급격히 변하기 때문에 이상에 언급한 외삽법을 시험결과의 해석에 사용하면 관내토지지력은 다소 과소평가되고 단면부지지력은 과대평가된다. 그리고 외삽법으로부터 발생하는 이와같은 오차는 말뚝의 선단으로부터 말뚝의 가장 낮은 곳에 부착된 스트레인게이지까지의 거리가 증가함에 따라 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 외삽법에 의한 이러한 오차를 제거하기 위하여 시험결과의 분석과정에서 관내토지지력과 단면부지지력을 구분하지 않고 대신 선단지지력을 사용하였다.

2.4 시험방법

모형말뚝시험은 총 7회 수행되었으며, 각 시험별 모형지반의 상대밀도와 응력상태가 표 1에 표시되었다. 여기서 시험명은 3개의 문자(H:높음, M:중간, L:낮음)로 구성되었으며, 첫 번째 문자는 모형지반의 상대밀도를, 그리고 두 번째와 세 번째 문자는 각각 모형지반의 수직 및 수평응력의 상대적인 정도를 나타내고 있다. 표에 보이는 바와 같이 총 7회의 시험중 5회는 상대밀도가 90%인 조밀한 지반에서 수행되었으며, 지반의 응력상태는 모두 다르게 하였다. 그리고 나머지 2회는 상대밀도가 23%와 56%인 지반에서 수행되었으며, 지반은 1.0 kg/cm^{2}의 수직응력과 0.4 kg/cm^{2}의 수평응력으로 압밀되었다. 모형말뚝은 중량이 4kg인 햄머를 0.5m의 높이에서 자유낙하시켜서 모형지반에 타입되었다. 말뚝이 지반에 타입되는 동안 말뚝의 관입깊이와 관내토길이의 변화

표 1. 모형말뚝시험의 지반조건

시험명	상대밀도 (%)	수직응력 (kg/cm^2)	수평응력 (kg/cm^2)	수평토압계수 K_o
HLL	90	0.4	0.4	1.0
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

가 측정되었으며, 이 값들을 이용해서 말뚝의 폐색정도를 나타내는 기준으로 사용되는 관내토증분비, *IFR*이 계산되었다.

$$IFR\,(\%) = \frac{\text{관내토길이의 증분}}{\text{말뚝의 관입깊이 증분}} \times 100 \qquad (1)$$

말뚝에 대한 재하시험은 말뚝의 관입깊이가 250, 420, 590, 760mm일 때 연속적으로 행해졌다. 그리고 말뚝 머리에 가해지는 전체하중은 하중계(load cell)에 의하여 측정되었으며, 말뚝 머리의 침하량은 두 개의 선형변위계(LVDT)에 의하여 측정되었다. 시험방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌(백규호, 1993)을 참고하기 바란다.

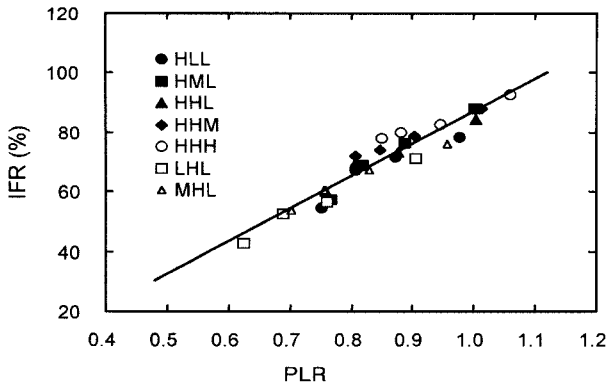
3. 시험결과 및 분석

3.1 말뚝의 폐색정도

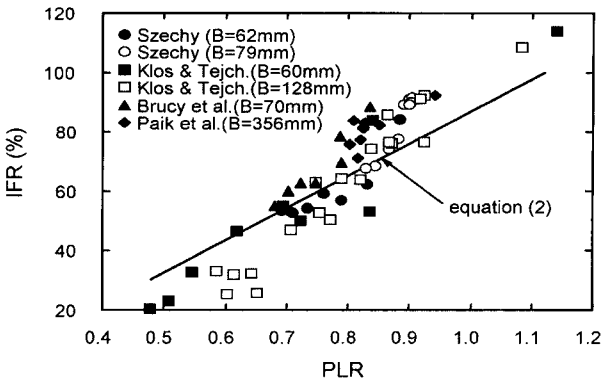
개단말뚝의 폐색정도는 *IFR*에 의하여 적절히 표현될 수 있으며, 이 값은 완전폐색상태에서는 *IFR*=0%로, 완전개방상태에 대해서는 *IFR*=100%로, 그리고 부분폐색상태에 대해서는 0%<*IFR*<100%로 표시된다. 따라서 본 시험에서도 말뚝의 관입깊이와 지반조건에 따른 말뚝 폐색정도의 변화를 조사하기 위하여 말뚝의 관입깊이가 40mm 증가할 때마다 관내토길이의 증분을 측정함으로써 시험말뚝의 *IFR*을 측정하였다.

그림 3은 모형말뚝시험과 각종 현장시험에서 측정된 *IFR*과 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비로 정의되는 관내토길이비(plug length ratio, *PLR*)의 관계를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 모형말뚝시험의 결과를 나타낸 것으로 말뚝의 *IFR*은 *PLR*이 증가함에 따라 선형으로 증가하는 경향을 보였으며, *PLR*과 *IFR*의 관계는 식 (2)와 같이 표시될 수 있었다.

$$IFR(\%) = 109\,PLR - 22 \qquad (2)$$

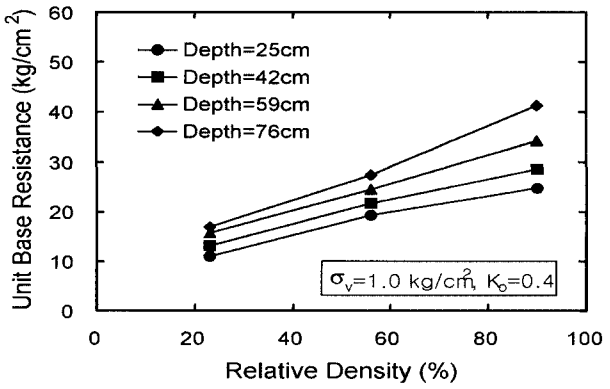


(a) 모형말뚝시험의 경우

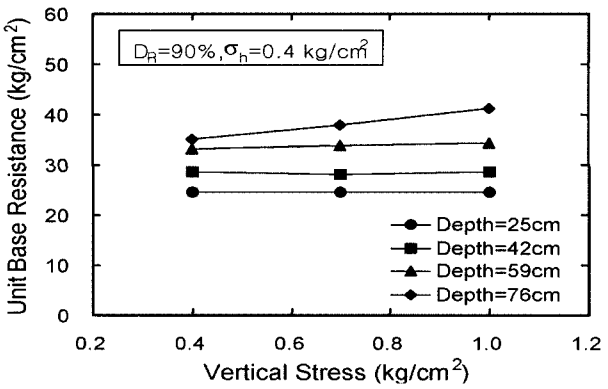


(b) 다른 시험결과의 경우

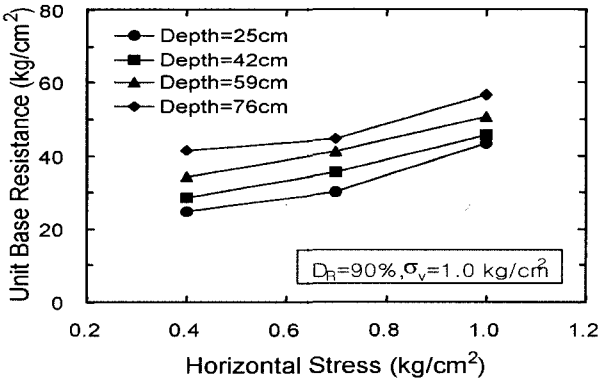
그림 3. *IFR*과 *PLR*의 관계



(a) 상대밀도의 변화



(b) 수직응력의 변화



(c) 수평응력의 변화

그림 4. 지반조건에 따른 단위 선단지지력의 변화

일반적으로 개단말뚝의 폐색정도는 *PLR*보다는 *IFR*에 의하여 더 정확히 표현될 수 있는 것으로 보고되고 있다(Paikowsky 등, 1989; Paik과 Lee, 1993). 그러나 현장에서는 말뚝의 최종깊이에서 관내토길이의 측정은 쉬운 반면 항타중에 관내토길이의 증분은 측정이 어렵기 때문에 *IFR*은 측정이 어려운 반면 *PLR*은 상대적으로 쉽게 측정할 수 있다. 따라서 위에 제안된 식 (2)를 이용하면 현장에서 상대적으로 쉽게 측정할 수 있는 *PLR*을 이용해서 말뚝의 폐색정도를 나타내는 지표로 사용되는 *IFR*을 추정하는 것이 가능해진다. 그러나 그림 3(b)에 보이는 바와 같이 식 (2)의 결과들과 각종 현장에서 측정한 시험결과들을 비교한 결과 식 (2)는 *PLR*>0.8인 경우에는 말뚝의 폐색정도를 약간 과대평가(즉, *IFR*을 과소평가)하고 *PLR*<0.7인 경우에는 약간 과소평가하는 것으로 나타났다.

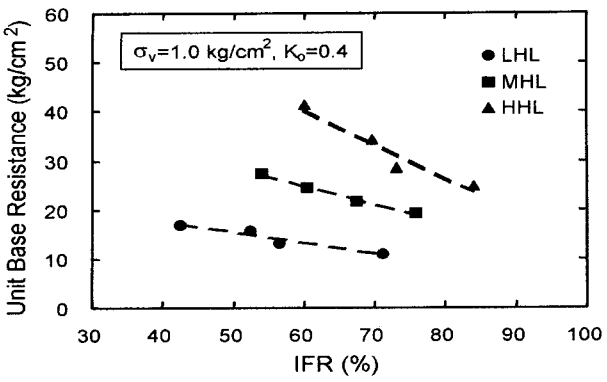


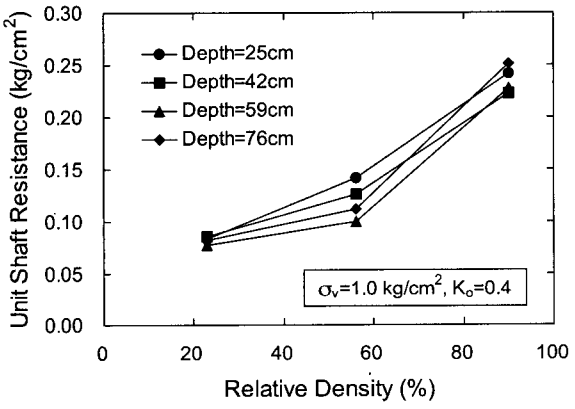
그림 5. 말뚝의 *IFR*과 단위 선단지지력의 관계

3.2 선단지지력과 주면마찰력

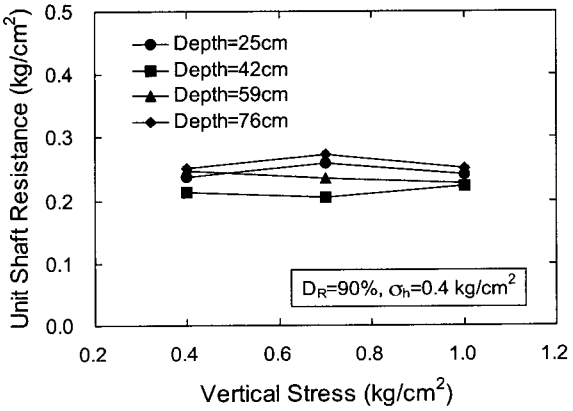
그림 4는 모형지반의 상대밀도와 수직응력 및 수평응력에 따른 말뚝의 단위 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다. 시험결과 말뚝의 단위 선단지지력은 지반의 상대밀도와 수평응력이 증가함에 따라 상당히 증가하는 경향을 보였으나, 수직응력의 변화에 대해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 시험결과는 콘의 관입저항이 지반의 수직응력보다는 수평응력에 크게 영향받는다는 Baldi 등(1981)과 Houlsby와 Hitchman(1988)의 연구결과와 일치하는 것이다.

그림 5는 모형지반의 응력상태는 동일하나 상대밀도가 다른 조건에서 말뚝의 *IFR*에 따른 단위 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보이듯이 개단말뚝의 단위 선단지지력은 *IFR*이 감소함에 따라 증가하였으며, *IFR*에 따른 단위 선단지지력의 증가율은 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 커지는 경향을 보였다. 또한 말뚝의 *IFR*이 일정하더라도 지반의 상대밀도가 커지면 말뚝의 단위 선단지지력도 증가하는 것을 볼 수 있다.

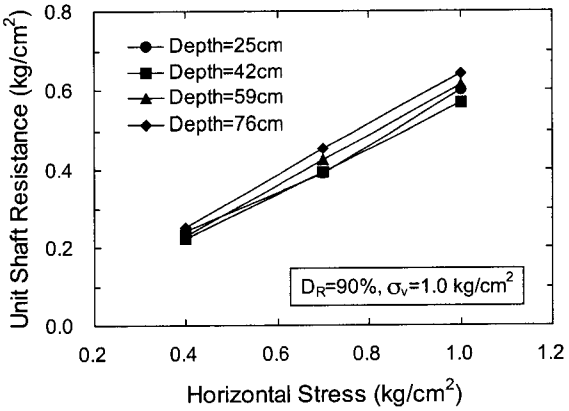
그림 6은 지반의 상대밀도와 수직응력 및 수평응력에 따른 단위 주면마찰력의 변화를 나타낸 것이다. 말뚝의 단위 선단지지력의 경우에 관찰된 것과 마찬가지로 개단말뚝의 단위 주면마찰력은 지반의 상대밀도와 수평응력에는 크게 영향받는 것으로 나타났으며, 수직응력과는 거의 무관한 것으로 밝혀졌다. 그리고 말뚝의 단위



(a) 상대밀도의 변화



(b) 수직응력의 변화



(c) 수평응력의 변화

그림 6. 지반조건에 따른 단위 주면마찰력의 변화

주면마찰력은 지반의 수평응력과 선형관계에 있음을 그림 6(c)에서 볼 수 있다.

4. 토조의 크기효과에 대한 시험결과의 보정

4.1 말뚝직경의 보정

토조를 이용한 모형말뚝시험에서 측정된 말뚝의 지지력은 토조의 제한된 크기로 인해 발생하는 토조의 크기효과(chamber size effect) 때문에 현장에서 측정된 말뚝 지지력과는 다르게 된다(O'Neill과 Raines, 1991). 토조 시험의 결과를 이용해서 현장에서의 말뚝 지지력을 산정하기 위해서는 모든 토조 시험의 결과를 토조의 크기효과에 대하여 보정하는 것이 필수적이다. 그러나 토조의 크기효과는 모형말뚝에 대한 토조의 직경비가 감소할수록, 그리고 모형지반의 상대밀도가 증가할수록 커지는 경향을 보인다(Salgado 등, 1998). 그러므로 개단말뚝의 경우에는 말뚝의 폐색정도에 따라 주변지반의 다짐정도가 달라지므로 폐색정도에 따라 토조의 크기효과도 달라지게 된다(Randolph 등, 1979). 따라서 토조의 크기효과를 정량화하기 위해서는 시험에 사용된 모형개단말뚝의 균등직경(equivalent diameter)에 대한 토조의 직경비가 필요하게 된다. 여기서 개단말뚝의 균등직경(d_p)이란 개단말뚝이 설치되는 동안 발생하는 말뚝 주변지반의 변위량과 동일한 지반변위량을 갖는 폐단말뚝의 직경을 의미한다. 즉, 식 (3)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.

$$d_p = d_o - \left[d_o - \sqrt{(d_o^2 - d_i^2)} \right] \frac{IFR(\%)}{100} \qquad (3)$$

여기서 d_i와 d_o는 개단말뚝의 내경과 외경을 나타낸다.

한편, 개단말뚝의 항타과정을 고려하면 말뚝의 선단지지력은 말뚝의 최종관입깊이에서 측정된 *IFR*에 영향을 받는 반면, 주면마찰력은 말뚝이 타입되는 전 깊이에 걸쳐 측정된 *IFR* 값과 관련될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (3)을 사용해서 시험말뚝의 균등직경을 계산할 때 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 보정하기 위한 균등직경을 각기 다른 방법으로 계산하였다. 즉, 말뚝 선단지지력의 보정을 위한 균등직경은 최종관입깊이에서의 *IFR*을 사용하여 계산하였으며, 주면마찰력의 보정을 위한 균등직경은 말뚝의 관입깊이 전체에 걸쳐 측정된 *IFR*의 평균치를 사용하여 계산하였다.

4.2 지지력에 대한 보정

Salgado 등(1998)은 공동확장이론을 이용해서 토조와 콘의 직경 변화에 따른 토조의 크기효과를 해석하였다. 그들의 연구결과에 따르면 본 시험에서 사용된 한강모래와 토질특성이 매우 유사한 모래로 구성된 상대밀도가 90%인 정규압밀 모래지반에서 콘과 토조의 직경비가 0~45의 범위에 있을 때 토조와 현장에서 측정된 콘 관입저항력의 비, $q_{c,cc}/q_{c,ff}$는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{q_{c,cc}}{q_{c,ff}} = 7.79 \times 10^{-3} \times \left(\frac{D_c}{d_p} \right) + 0.27 \qquad (4)$$

여기서 $q_{c,cc}$와 $q_{c,ff}$는 각각 토조와 현장에서 측정된 콘의 관입저항력이며, D_c/d_p는 시험말뚝의 균등직경에 대한 토조 직경의 비이다. 따라서 현장조건에서 말뚝의 지지력은 토조에서 측정된 말뚝 지지력을 토조의 크기효과에 대한 관입저항력 비($q_{c,cc}/q_{c,ff}$)로 나눔으로써 얻어질 수 있다.

5. 새로운 지지력 산정식

5.1 선단지지력

그림 7은 상대밀도가 90%인 모래지반에서 개단말뚝

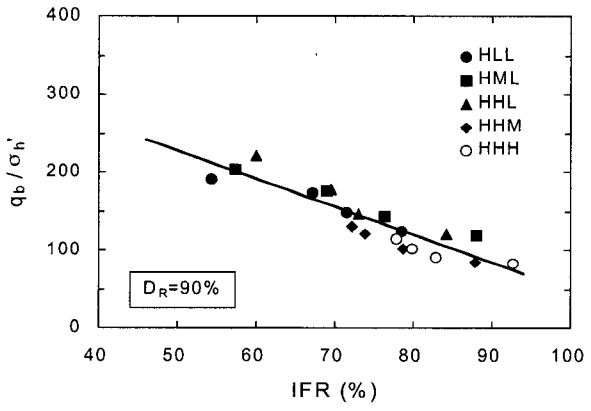


그림 7. 말뚝의 *IFR*과 규준화된 단위 선단지지력의 관계

의 *IFR*에 따른 지반의 수평응력으로 규준화된 현장조건에서의 단위 선단지지력을 나타낸 것이다. 여기서 사용된 현장조건에서의 단위 선단지지력은 토조에서 측정된 모형말뚝의 단위 선단지지력을 토조의 크기효과에 대하여 보정한 것이며, 단위 선단지지력을 규준화하는데 사용한 수평응력으로 모형지반에 가해진 수평응력을 사용하였다.

그림에서 보이는 바와 같이 지반의 수평응력으로 규준화된 말뚝의 단위 선단지지력(q_b/σ_h')은 말뚝의 *IFR*이 감소함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, *IFR*과 규준화된 단위 선단지지력간의 관계는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{q_b}{\sigma_h'} = 405 - 356\,\frac{IFR(\%)}{100} \quad \left(\text{단, } \frac{q_b}{\sigma_h'} \le 300\right) \qquad (5)$$

한편, 식 (5)에 따르면 완전폐색상태(*IFR*=0%)에 있는 개단말뚝의 경우에 말뚝의 단위 선단지지력은 $q_b = 405\,\sigma_h'$ 로 표현되며, 토압계수가 $K_o = 0.4$인 정규압밀상태의 모래지반에서는 말뚝의 단위 선단지지력이 다시 $q_b = 160\,\sigma_v'$ 로 표현될 수 있다. 이것은 캐나다의 기초설계기준(1992)에서 조밀한 모래지반에 타입된 폐단말뚝의 단위 선단지지력으로 제시한 값의 1.3배에 달한다. 그러나 일반적으로 완전폐색상태에 있는 개단말뚝의 거동은 폐단말뚝의 거동과 동일한 것으로 알려져 있으며, 지반조건이 동일한 사질토 지반에서 개단말뚝의 선단지지력은 폐단말뚝의 선단지지력보다 작은 것으로 보고되고 있다. 따라서 식 (5)를 이용하여 개단말뚝의 선단지지력을 산정할 경우에 지반의 수평응력으로 규준화된 단위 선단지지력(q_b/σ_h')이 300을 넘지 못하도록 하였다. 또한 식 (5)를 이용해서 개단말뚝의 지지력을 산정하기 위해서는 말뚝의 *IFR*이 필요하며, 이것은 말뚝이 지반에 타입되는 동안 측정하거나 식 (2)를 통해서 예측이 가능하다.

5.2 주면마찰력

그림 8은 지반이 조밀한 경우(D_R=90%)에 말뚝의 *IFR*에 따른 $K_o\sigma_v'\tan\delta$로 규준화된 말뚝의 단위 주면마찰력의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 규준화된 말뚝의 단위 주면마찰력은 말뚝의 *IFR*이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이들간 관계는 식 (6)으로 표현될 수 있다.

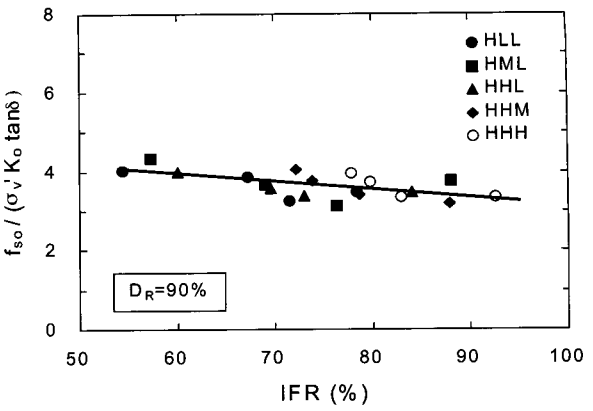


그림 8. 말뚝의 *IFR*과 규준화된 단위 주면마찰력의 관계

$$\frac{f_{so}}{(K_o\,\sigma_v'\tan\delta)\,\alpha} = 5.1 - 2.0\,\frac{IFR(\%)}{100} \qquad (6)$$

여기서, K_o는 말뚝이 타입되기 전 지반의 수평토압계수이고 σ_v'는 말뚝의 주면에 작용하는 유효수직응력이며 δ는 말뚝과 지반간의 마찰각이다. 그리고 α는 지반의 상대밀도와 관련되는 상수로 지반이 조밀한 경우에는 $\alpha = 1.0$이다. 식 (6)에 따르면 정규압밀된 조밀한 상태의 모래지반에서 완전폐색상태(*IFR*=0%)로 타입된 개단말뚝의 규준화된 단위 주면마찰력은 5.1이다. 이것은 완전폐색상태로 타입된 말뚝의 주면에 작용하는 수평응력은 말뚝이 타입되기 전에 말뚝에 작용하는 수평응력의 5.1배라는 것을 의미하는 것이다. 이러한 결과는 정규압밀된 조밀한 모래지반에 타입된 개단말뚝 주변지반의 토압계수는 K_o=0.4에서 K_o=2~3으로 5~7배 증가한다는 캐나다 기초설계기준(1992)의 설계기준과 일치하는 것이다. 그러나 본 논문에서 제안된 지지력 산정식들은 시간경과효과를 반영되지 않은 모형말뚝시험의 결과에 근거하여 얻어졌기 때문에 식 (5)와 (6)은 비교적 안전측의 지지력을 제공할 것으로 생각된다.

6. 결 론

개단말뚝의 지지력은 관내토에 의한 말뚝의 폐색정도에 큰 영향을 받으며, 말뚝의 폐색정도는 말뚝의 관입깊이 증분에 대한 관내토길이 증분의 비로 정의되는 관내토증분비, *IFR*에 의하여 적절히 표현될 수 있다. 그러나 개단말뚝의 지지력을 산정하는 대부분의 기준들은 *IFR*에 따른 말뚝 지지력의 변화를 전혀 고려하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 폐색정

도가 지지력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조를 이용한 일련의 모형말뚝시험을 수행하였다.

모형말뚝시험의 결과에 따르면 모래지반에 타입된 개단말뚝의 *IFR*은 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토길이의 비로 정의되는 관내토길이비(*PLR*)을 이용해서 예측이 가능한 것으로 밝혀졌다. 그리고 개단말뚝의 선단지지력은 *IFR*이 감소함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, *IFR*에 따른 선단지지력의 증가율은 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 커지는 경향을 보였다. 또한 개단말뚝의 주면마찰력은 *IFR*이 감소함에 따라 그리고 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 측정되었다.

이상과 같은 모형말뚝시험의 결과를 현장에 적용하기 위하여 모형시험의 결과를 토조의 크기효과에 대하여 보정하였다. 그리고 토조의 크기효과에 대하여 보정된 시험결과에 근거하여 사질토지반에 타입된 개단말뚝에 대한 지지력산정식을 제안하였으며, 이 산정식에는 말뚝의 폐색정도(*IFR*)가 지지력에 미치는 영향이 고려되었다. 그러나 본 논문에서 새롭게 제안된 지지력산정식에는 시간경과효과에 의한 지지력의 증가가 거의 반영되지 않았기 때문에 이들 산정식은 비교적 안전측의 지지력을 제공할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 박사후 해외연수사업의 지원을 받아 Purdue University에서 수행된 것으로 연구비를 지원해준 한국과학재단과 Purdue University의 Rodrigo Salgado교수에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 백규호 (1993), 사질토 지반에 타입된 개단강관말뚝의 지지력 특성, 한국과학기술원 박사학위 논문.
2. 백규호, 이준환 (2002), "모래지반에서 개단말뚝의 항타거동과 지지력 특성", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-C호, pp.275-286.
3. American Petroleum Institute(1991), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, 19th ed., API RP2A, Dallas, TX: America Petroleum Institute.
4. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Pasqualini, E.(1981), "Cone resistance in dry NC and OC sands", Proc. Cone Penetration Testing and Experience, Geotech. Engrg. Div., ASCE, pp.145-177.
5. Brucy, F., Meunier, J., and Nauroy, J. F.(1991), "Behavior of pile plug in sandy soil during and after driving", Proc. 23rd Annual Offshore Technology Conf., Houston, pp.145-154.
6. Canadian Geotechnical Society(1992), Canadian foundation engineering manual, 3rd ed., Bancouver, B.C.: The Canadian Geotechnical Society.
7. 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.
8. Houlsby, G. T., and Hitchman, R.(1988), "Calibration chamber tests of a cone penetration in sand", Geotechnique, Vol.38, No.1, pp.39-44.
9. 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.
10. Murff, J. D., Raines, R. D., and Randolph, M. F.(1990), "Soil plug behavior of piles in sand", Proc. 22nd Offshore Technology Conf., Houston, pp.25-32.
11. Nishida, H., Ohta, H., Matsumoto, T., and Kurihara, K.(1985), "Bearing capacity due to plugged soil on open-ended pipe pile", JSCE, Vol. 364, pp.219-227.
12. O' Neill, M. W., and Raines, R. D.(1991), "Load transfer for pipe piles in highly pressured dense sand", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.117, No.8, pp.1208-1226.
13. 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.
14. 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.
15. 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, pp.761~768.
16. Randolph, M. F., Leong, E. C., and Houlsby, G. T.(1991), "One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles", Geotechnique, Vol.41, No.4, pp.587-598.
17. Randolph, M. F., Steenfelt, J. S., and Wroth, C. P.(1979), "The effect of pile type on design parameters for driven piles", Proc. 7th Europ. Conf. on Soil Mech., British Geotechnical Society, London, U.K., Vol.2, pp.107-114.
18. Salgado, R., Michell, J. K., and Jamiolkowski, M.(1998), "Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand", J. of Geotech. and Geoenvir. Engrg., ASCE, Vol.124, No.9, pp.878-888.
19. 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, Vol.1, pp.753-758.
20. Szechy, C. H.(1959), "Tests with tubular piles", AcTa Technica of the Hungarian Academy of Science, Vol.24, pp.181-219.

(접수일자 2002. 3. 19, 심사완료일 2002. 5. 24)