

모래지반에서 말뚝의 향타에너지가 강관말뚝의 지지력에 미치는 영향

Effect of Pile Driving Energy on Steel Pipe Pile Capacity in Sands

백 규 호* Paik, Kyu-Ho

Abstract

Open-ended pipe piles are often used for the foundations of both land and offshore structures because of their relatively low driving resistance. In this study, load tests were performed on model pipe piles installed in calibration chamber samples in order to investigate the effects of pile installation method on soil plugging and bearing capacity. Results of the test program showed that the incremental filling ratio (IFR), which is used to indicate the degree of soil plugging in open-ended piles, decreased (i) with increasing hammer weight for the same driving energy and (ii) with increasing hammer weight at the same fall height. The base and shaft resistance of the piles were observed to increase (i) with increasing hammer weight for the same driving energy and (ii) with increasing hammer weight at the given same fall height. The jacked pile was found to have higher bearing capacity than an identical driven pile under similar conditions, mostly due to the more effective development of a soil plug in jacking than in driving.

요 지

개단 강관말뚝은 관입저항이 상대적으로 작다는 장점 때문에 육상과 해상구조물의 기초로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 말뚝의 향타에너지가 강관말뚝의 폐색효과와 지지력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 토조를 이용한 모형말뚝시험을 수행하였다. 시험결과로부터 말뚝의 폐색정도는 동일 향타에너지에서 햄머의 중량이 클수록, 그리고 동일 낙하높이에 대해서도 햄머의 중량이 클수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 폐색정도의 경우와 마찬가지로 향타에너지가 일정한 경우와 햄머의 낙하높이가 일정한 경우 모두에 대하여 햄머의 중량이 증가할수록 말뚝의 선단지 지지력과 주변마찰력이 증가하는 것으로 나타났다. 한편 압입말뚝(jacked pile)의 경우에는 말뚝의 설치과정에서 발생하는 폐색효과가 동일 깊이로 타입된 향타말뚝에 비해 상당히 크게 나타났으며, 그로 인해 지지력 또한 향타말뚝 보다 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Calibration chamber test, Driven pile, Jacked pile, Pile driving energy, Pile load capacity, Soil plugging effect

1. 서 론

말뚝기초는 이미 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 기초형식중의 하나로 선단부의 형태에 따라 선단부가 개방된 상태에서 시공되는 개단말뚝(open-ended pile)과 선단부가 막힌 상태에서 시공되는 폐단말뚝(closed-ended pile)으로 구분된다. 특히 강관말뚝의 경우에는 말

뚝이 지반에 타입되는 동안 발생하는 관입저항력을 감소시키기 위하여 선단부를 개방시킨 채로 사용하는 경우가 대부분이다. 최근들어 국가경제의 발전으로 내륙지방의 도시화가 급속히 확대되면서 지반조건이 양호한 건설부지가 부족하게 됨에 따라 지반강도가 작고 연약층이 두꺼운 지역에 구조물을 건설하는 경우가 증가하고 있다. 이처럼 지반조건이 불량한 지역에서는 구조물의

* 정회원, 관동대학교 이공대학 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ.)

안정을 위하여 말뚝기초의 채택이 필수적이며, 더욱이 말뚝기초의 원활한 시공을 위해서는 이음시공이 용이하고 관입저항력이 상대적으로 작은 강관말뚝의 사용이 요구된다. 그럼에도 불구하고 강관말뚝과 관련된 국내의 기술수준은 매우 낮아서 말뚝의 거동에 영향을 미치는 인자들이 강관말뚝의 폐색효과와 지지력에 어떠한 영향을 미치는지 조차도 제대로 규명되어 있지 않은 실정이다.

이제까지 여러 연구자들에 의하여 관내토에 의한 강관말뚝의 폐색메카니즘(Smith 등, 1986)과 관내토에 의한 폐색정도가 지지력에 미치는 영향(Kishida와 Isemoto, 1977), 그리고 강관말뚝의 직경에 따른 말뚝의 거동변화(Brucy 등, 1991; Paikowsky 등, 1989) 등이 이론적으로 또는 각종 실험을 통해서 연구되어 왔다. 그 결과 강관말뚝이 모래지반에 관입되는 동안 발생하는 관내토는 일반적으로 말뚝을 부분폐색상태로 만들며, 강관말뚝의 거동특성과 지지력은 말뚝의 폐색정도에 따라 크게 달라지는 것으로 밝혀졌다(Paikowsky와 Whitman, 1990; Miller와 Luteneqgar, 1997). 그리고 몇몇 연구결과들은 강관말뚝의 폐색정도는 지반조건(흙의 종류, 지반의 응력상태, 상대밀도 등)과 말뚝조건(말뚝의 직경, 관입깊이, 말뚝 표면의 거칠기 등) 뿐만 아니라 말뚝의 설치방법, 특히 항타에너지에 따라서도 크게 달라진다고 보고하고 있다(Brucy 등, 1991; Meyerhof, 1976; Tan과 Hanna, 1974). 특히 항타말뚝(driven pile)과 압입말뚝(jacked pile)의 거동 및 지지력 차이를 규명하기 위한 몇몇 시험결과에 의하면 두 말뚝의 지지력과 거동 차이는 큰 것으로 나타났다(Nauroy와 Le Tirant, 1983; De Nicolar와 Randolph, 1977). 이상의 연구결과들에 따르면 말뚝의 설치방법과 항타말뚝의 경우에는 항타에너지가 말뚝의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 반면, 말뚝의 항타방법은 말뚝의 지지력에 거의 영향을 미치지 않는다는 연구결과도 보고된 바 있다(Mansur와 Hunter, 1970).

본 연구에서는 말뚝의 거동과 지지력에 영향을 미치는 요소중 하나로 알려진 말뚝의 항타방법, 그 중에서도 항타에너지의 변화가 강관말뚝의 폐색효과와 지지력에 미치는 영향을 규명하고 동시에 항타말뚝과 압입말뚝의 거동을 비교하기 위하여 토조를 이용한 실내 모형말뚝시험을 수행하였다. 모형말뚝시험은 항타말뚝과 압입말뚝에 대하여 수행되었다. 항타말뚝은 다양한 방식의 항타에너지에 의하여 타입되었으며, 압입말뚝은 유압재

을 이용하여 일정한 관입속도로 지반에 압입되었다. 지반에 관입이 완료된 말뚝에 대해서는 말뚝재하시험이 실시되었다. 그리고 말뚝의 항타방법에 따른 주변지반의 거동 변화를 조사하기 위하여 말뚝이 지반에 관입되는 동안과 말뚝재하시험이 수행되는 동안 토조에 설치된 토압계를 이용하여 말뚝 주변지반의 토압이 측정되었다.

2. 설치방법에 따른 말뚝거동의 변화

말뚝의 설치방법은 말뚝이 설치되는 동안에 발생하는 말뚝 주변의 다짐정도와 말뚝이 설치된 후에 말뚝에 작용하는 잔류응력(residual stress)에 영향을 줌으로써 결국 지지력에도 영향을 미치게 된다(Randolph 등, 1979; Tan과 Hanna, 1974). Szechy(1961)는 진동개단말뚝(vibrated open-ended pile)과 항타개단말뚝(driven open-ended pile)을 시공할 때 주변지반의 간극비 변화를 측정하였다. 그 결과 진동말뚝의 선단부 지반은 다져지는 반면 타입말뚝의 선단부 지반은 원지반보다 느슨해지는 것을 발견하였으며, 말뚝의 주변부에 존재하는 지반의 다짐정도 또한 타입말뚝과 진동말뚝의 경우에 다른 것으로 측정되었다. 이러한 실험결과에 근거하여 Szechy는 진동말뚝은 주로 선단지지력에 의하여 하중이 지지된다는 연구결과를 보고하였다. 반면 Choi와 O'Neill(1997)은 모형말뚝시험을 통해 항타에 의해 설치된 강관말뚝이 진동방식으로 설치된 말뚝에 비해 폐색정도와 지지력 측면에서 상대적으로 우수하다는 연구결과를 발표하였다. 또한 Meyerhof(1976)는 각종 형태의 말뚝에 대한 재하시험 결과들을 분석하여 말뚝의 주변마찰력은 항타말뚝이 가장 크고 다음으로 압입말뚝과 선굴착말뚝(bored pile)의 순으로 크다는 연구결과를 보고한 바 있다. 이와 같이 말뚝의 시공방법에 따라 지지력이 변한다는 사실은 많은 연구결과를 통해서 확인되고 있다.

한편 Paikowsky 등(1989)은 해양말뚝에 대한 항타결과와 재분석을 통해서 개단 강관말뚝은 타입되는 동안보다도 지반에 정적(static)으로 관입될 때 더 큰 폐색효과가 발생함을 발견하였다. 이러한 현상은 타입말뚝과 압입말뚝의 거동을 비교한 De Nicola와 Randolph(1997)의 실험결과에서도 찾아볼 수 있다. 그리고 Brucy 등(1991)은 길이 2.0 m의 강관말뚝을 이용한 현장시험에서 항타에너지에 따른 강관말뚝의 폐색효과 변화를 측

정한 결과 햄머의 낙하속도가 커질수록 강관말뚝의 폐색 효과는 저하된다는 연구결과를 발표하였다. 이상에서 언급한 바와 같이 말뚝의 설치방법에 따른 말뚝의 거동 변화와 관련한 연구의 대부분은 말뚝의 설치방법(즉 항타 말뚝, 압입말뚝, 선굴착말뚝 등)별 지지력 특성을 규명한 것으로, 항타방법 혹은 항타에너지의 변화에 따른 말뚝의 거동 변화를 규명한 연구결과는 찾아보기 힘들다.

3. 모형말뚝 시험

3.1 토조와 지반 조성

현장의 지반조건, 특히 상대밀도와 응력상태를 실내에서 재현하기 위하여 본 시험에서는 그림 1에 보이는 직경이 775 mm이고 높이가 1250 mm인 토조(calibration chamber)가 사용되었으며, 모형지반의 조성을 위해서는 주문진 모래가 사용되었다. 본 시험에 사용된 모래는 입경이 0.25 mm보다 작거나 0.85 mm보다 큰 입자들은 시료에서 배제한 정제된 것으로, 통일분류법에 의해서는 SP로 분류되었다. 시료의 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 $\gamma_{d,max}=1.64 \text{ g/cm}^3$ 와 $\gamma_{d,min}=1.34 \text{ g/cm}^3$ 로 측정되었으며, 비중은 $G_s=2.66$ 이었다. 그리고 토조에 조성된 77%의 상대밀도를 갖는 시료에 대하여 직접전단시험을 수행한 결과 모형지반의 내부마찰각은 40.1° 로 측정되었으며, 말뚝과 동이한 재질의 철판과 상대밀도 77%의 모래시료와의 전단시험을 통해 측정된 말뚝과 지반간의 마찰각은 16.8° 였다. 이처럼 말뚝과 지반간의 마찰각이 일반적인 값보다 작은 것은 시험에 사용된 모형말뚝이 표면이 아주 매끄러운 스테인레스 파이프로 만들어 졌

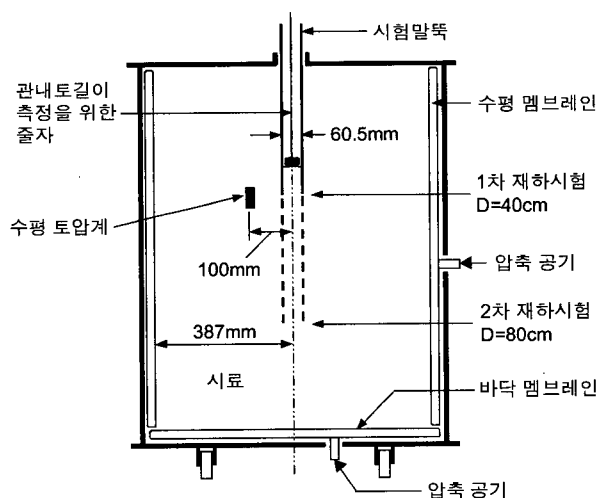


그림 1. 토조의 개략도

기 때문이다.

모형지반은 모래입자의 낙하높이와 유출량을 조절함으로써 지반의 상대밀도를 조절하는 모래비법(raining method)에 의하여 조성되었다. 이때 모래입자의 낙하에너지를 일정하게 하고 모래입자가 토조내에 적절히 분산되도록 하기 위하여 낙하하는 모래입자들은 8번과 10번 체로 구성된 모래분산망(sand diffuser)을 통과하도록 하였다. 본 시험에서는 모래입자의 순수 낙하높이 즉 모래분산망으로부터 모형지반 상부까지의 거리는 약 60 cm로, 그리고 모래유출상자로부터 모래분산망까지의 거리는 약 38 cm로 유지하면서 모래의 유출량을 작게 함으로써 상대밀도 77%의 지반을 조성하였다. 또한 지반조성 시 지반의 균질성을 유지하기 위하여 모형지반의 1회당 조성높이를 10 cm로 유지시켰다. 그 후 토조에 조성된 모형지반은 0.5 kg/cm^2 의 유효연직응력과 0.2 kg/cm^2 의 유효수평응력으로 약 30시간동안 압밀되었다. 이러한 압밀압력은 그림 1에 보이는 바와 같이 토조의 바닥과 측면에 설치된 독립된 두 개의 고무 멤브레인(membrane)에 의해서 가해졌다. 모형지반의 조성과 관련한 세부적인 내용들은 백규호 등(1993)의 연구결과에서 서술되어 있다.

반면 토조를 이용한 실내시험은 현장상태의 재현을 위해서 상대밀도 및 지반응력을 조절함에도 불구하고 제한된 토조 크기로 인하여 실제 현장상태를 완벽하게 재현하는데는 한계가 있을 수 있다. 따라서 토조의 크기가 시험결과에 영향을 미칠 수 있으며, 이것을 토조의 크기효과(chamber size effect)라 한다. Parkin과 Lunne (1982)는 조밀한 모래지반의 경우 토조의 크기효과를 제거하기 위해서는 토조의 직경이 콘 직경의 50배 이상 되어야 한다는 시험결과를 보고하였다. 그리고 Salgado 등(1998)은 수치해석을 통해서 토조를 이용한 콘 관입 시험에서 콘의 관입저항(cone resistance)에 대해 토조의 크기를 배제하기 위해서는 콘에 대한 토조의 직경비가 약 100배 이상 되어야 한다는 해석결과를 얻었다. 반면, 본 연구에서 사용된 모형말뚝과 토조의 직경은 각각 60.5 mm와 775 mm로 직경비는 약 13에 불과하다. 따라서 이상에 언급된 기존의 연구결과들과 본 연구에서 사용된 토조의 경계조건(boundary condition) 및 말뚝과 토조의 직경비를 고려할 때, 본 시험에서 얻어지는 말뚝의 지지력은 현장치보다 어느 정도 작을 것으로 생각된다. 그러나 이러한 시험결과가 말뚝의 거동을 정성적으로 분석한 결과에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

3.2 모형말뚝과 계측기 설치

개단 강관말뚝의 지지력 메카니즘은 말뚝이 관입되는 동안 발생하는 폐색정도에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다(Paikowsky와 Whitman, 1989; Smith 등, 1986). 말뚝이 완전개방(fully coring)이나 부분폐색(partially plugged) 상태에서 지반에 관입되면 개단말뚝의 지지력은 관내 토지지력과 단면부지지력, 그리고 주면마찰력으로 구성된다. 그러나 말뚝의 선단부가 관내토에 의해 완전히 막히게 되는 완전폐색(fully plugged)상태에서 말뚝의 지지력은 말뚝 선단부에 균등하게 작용하는 선단지지력과 주면마찰력으로 구성된다. 그러나 모래지반에 타입되는 대부분의 개단말뚝은 부분폐색상태에서 관입되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 모래지반에 설치되는 개단말뚝의 지지력 특성을 분석하기 위해서는 말뚝의 지지력을 세 개의 지지력 요소로 분리해서 측정하는 것이 필요하다.

이를 위해서 본 시험에서는 그림 2에 보이는 바와 같이 직경이 다른 두 개의 스테인레스 파이프로 구성된 모형말뚝을 제작하였다. 제작이 완료된 모형말뚝의 외부 및 내부직경은 60.5 mm와 51.8 mm였으며, 말뚝의 길이는 908 mm였다. 그리고 내부파이프에 작용하는 하중이 외부파이프로 전달되는 것을 방지하기 위하여 말뚝 선단부근의 내부파이프와 외부파이프간에 약 4 mm의 공간을 두었으며, 말뚝이 타입될 때 이 공간으로 흙입자가 유입되는 것을 방지하기 위하여 이 공간은 실리콘으로 밀봉되었다.

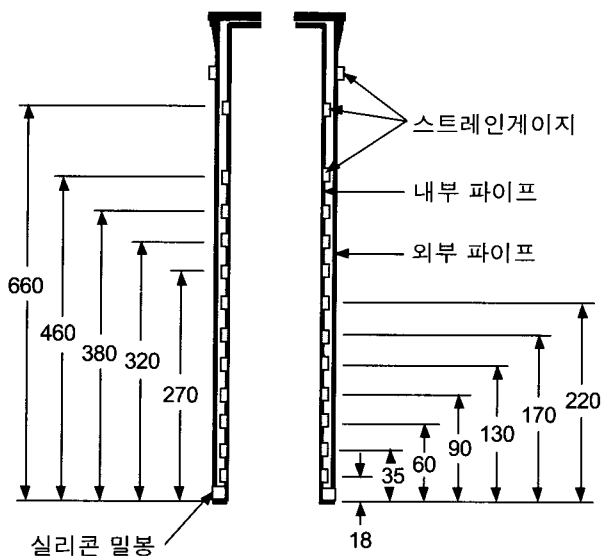


그림 2. 모형말뚝 (치수는 mm)

모형말뚝의 선단지지력(관내토지지력과 단면부지지력의 합)과 주면마찰력은 모형말뚝의 내·외부파이프에 부착된 스트레인게이지를 통해서 직접 측정되었다. 이제까지 수행된 몇몇 연구(Paik과 Lee, 1993; Lehane과 Gavin, 2001)에서는 스트레인게이지로부터 얻은 결과에 그림 3과 같이 말뚝과 관내토간에 발생하는 마찰력은 말뚝의 선단부근에서 일정하다는 가정과 외삽법(extrapolation method)을 적용하여 개단말뚝의 선단지지력을 다시 관내토지지력과 단면부지지력으로 분리하였다. 그러나 말뚝과 관내토간의 마찰력이 말뚝의 선단부근에서 급격히 변한다는 여러 실험결과들을 고려할 때 외삽법을 이용해서 얻어진 관내토지지력과 단면부지지력에는 오차가 내포된다고 볼 수 있으며, 이 오차의 정도는 말뚝의 선단부로부터 말뚝 선단에서 가장 인접해서 부착된 스트레인게이지까지의 거리가 멀수록 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 시험결과의 해석과정에서 발생할 수 있는 이와 같은 오차를 제거하기 위하여 시험결과의 분석에 관내토지지력과 단면부지지력 대신 선단지지력을 사용되었다. 모형말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 측정하기 위하여 모형말뚝의 일부인 내부파이프의 외벽에는 24개의 스트레인게이지가 대칭으로 부착되었으며, 외부파이프의 두부(head) 부분 외벽에는 2개의 스트레인 게이지가 역시 대칭으로 부착되었다. 그리고 말뚝의 선단지지력은 그림 3에 보이는 바와 같이 내부파이프에 부착된 스트레인게이지의 값이 더 이상 변하지 않는 지점의 하중으로부터 구해졌다. 또한 주면마찰력은 외부파이프에 부착된 스트레인게이지로부터 구해졌으며, 이

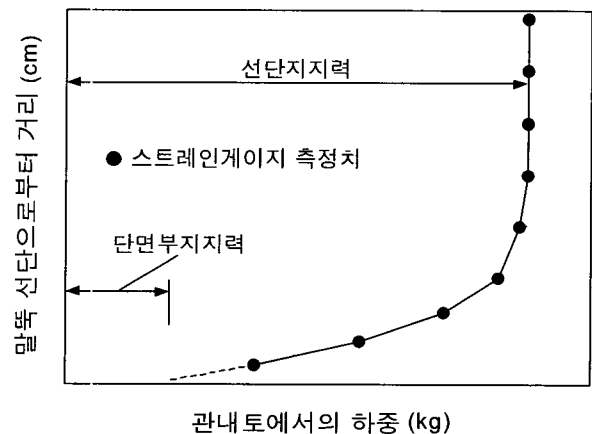


그림 3. 관내토의 하중전이곡선을 이용한 말뚝 선단지지력의 결정

값은 전체지지력과 선단지지력의 차이로부터 계산된 값과 잘 일치하였다.

한편, 말뚝의 항타에너지가 말뚝 주변지반의 응력변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 말뚝의 중심부에서 수평으로 10 cm, 모형지반의 지표면에서 아래로 40 cm 떨어진 지점에 수평토압계가 설치되었다(그림 1). 이 수평토압계를 이용해서 말뚝이 지반에 타입되는 동안과 재하시험이 진행되는 동안에 말뚝의 지지력에 직접적인 영향을 미치는 지반의 수평응력변화가 측정되었다.

3.3 시험방법

모형말뚝시험은 총 8회에 걸쳐 수행되었다. 그중 7회는 항타말뚝에 대한 것이고, 나머지 1회는 압입말뚝에 대한 것이다. 항타말뚝에 대해서는 항타에너지에 따른 말뚝의 거동 변화를 조사하기 위하여 동일 항타에너지 일지라도 햄머(hammer)의 중량을 변화시키면서 말뚝을 타입하였으며, 햄머의 낙하높이가 동일한 경우에 대해서도 햄머의 중량을 변화시키면서 말뚝을 지반에 타입시켰다. 즉, 항타에너지가 1 kg-m로 일정한 상태에서 햄머의 중량과 낙하높이를 변화시키면서 4회의 시험(W2H50, W4H25, W6H16.7, W8H12.5)을 수행하였고, 햄머의 낙하높이를 50 cm로 일정하게 하고 햄머의 중량을 2, 4, 6, 8 kg으로 변화시키면서 4회의 시험(W2H50, W4H50, W6H50, W8H50)을 수행하였다. 시험말뚝의 항타에 사용된 항타장치는 햄머와 유도막대(guide rod)로 구성되며, 이 유도막대가 시험말뚝의 두부에 설치된 구멍에 고정된 상태에서 햄머를 자유낙하시킴으로써 말뚝을 타입하였다. 그리고 압입말뚝은 유압잭을 이용해서 1 cm/sec의 속도로 지반에 압입하였다. 전체적인 시험방법은 표 1에 요약되어 있다.

모형말뚝이 지반에 설치되는 동안 말뚝의 폐색정도

를 조사하기 위하여 관입깊이가 4 cm 증가할 때마다 관내토의 높이를 측정하였으며, 동시에 지반에 설치한 수평토압계를 이용해서 말뚝 주변지반의 수평응력 변화를 측정하였다. 말뚝에 대한 정재하시험(static load test)은 40 cm와 80 cm의 관입깊이에서 연속적으로 수행되었으며, 재하시험이 진행되는 동안 말뚝에 가해진 하중은 말뚝의 두부에 설치된 하중계(load cell)에 의하여 측정되었다. 말뚝의 침하량은 말뚝 두부에 설치된 2개의 선형변위계(LVDT)에 의하여 기록되었으며, 말뚝재하시험은 말뚝의 침하량이 말뚝직경의 약 41%인 25 mm에 이를 때까지 계속되었다. 그리고 재하시험의 최종단계에서 말뚝이 거의 극한상태에 도달되는 것이 하중-침하량 곡선을 통해서 확인됨에 따라 말뚝의 극한지지력은 재하시험의 최종단계에서의 하중으로 간주되었다. 그리고 시험말뚝에 부착된 모든 스트레인게이지를 비롯한 각종 계측장비들은 재하시험 전에 초기화되어졌으며, 각종 계측결과는 자료획득장치(data logger)를 통해서 얻어졌다.

4. 시험결과

4.1 관내토의 거동

개단말뚝의 거동은 관내토에 의한 폐색효과(soil plugging effect)에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 말뚝의 폐색정도를 정의하기 위한 방법은 여러 가지 제안되었으나, 그중에서도 식 (1)과 같이 말뚝의 관입깊이 증분(ΔD)에 대한 관내토 길이 증분(ΔL)의 비로 정의되는 관내토증분비, IFR(Incremental filling ratio)이 말뚝의 폐색정도를 적절히 표현할 수 있는 것으로 밝혀졌다(Paikowsky 등, 1989; Paik과 Lee, 1993). 따라서 본 연구에서는 말뚝의 폐색정도를 정의하기 위하여 관내토증분비인 IFR을 사용하였다.

표 1. 시험방법

시험명	햄머중량 (kg)	햄머의 낙하높이 (cm)	항타에너지 (kg-m)	연직압입압력 (kg/cm ²)	수평압입압력 (kg/cm ²)
W2H50	2.0	50.0	1.0	0.5	0.2
W4H25	4.0	25.0	1.0	0.5	0.2
W6H16.7	6.0	16.7	1.0	0.5	0.2
W8H12.5	8.0	12.5	1.0	0.5	0.2
W4H50	4.0	50.0	2.0	0.5	0.2
W6H50	6.0	50.0	3.0	0.5	0.2
W8H50	8.0	50.0	4.0	0.5	0.2
Jacked	-	-	-	0.5	0.2

$$IFR = \frac{\Delta L}{\Delta D} \times 100 (\%) \quad (1)$$

그림 4와 5는 각각 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토 길이와 관내토중분비의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 말뚝이 관입되는 동안 관내토 길이는 항타에너지가 동일할지라도 햄머의 중량이 증가할수록, 그리고 햄머의 낙하높이가 일정하더라도 항타에너지가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 항타말뚝에 대한 관내토중분비는 관입초기에는 상당히 큰 값을 보이다가 관입깊이가 증가하면서 급격히 감소해서 항타방법에 따라 약간씩 차이는 있지만 IFR=40-70%의 범위에서 수렴하는 경향을 보였다(그림 5). 또한 말뚝에 동적하중(dynamic load)이 전달되는 항타 과정과는 달리 정적하중(static load)이 가해지는 재하시험 과정에서는 항타 과정에서 측정된 폐색정도와 항타방법에 관계없이 모든 말뚝이 완전폐색상태(IFR=0%)로 거동하는 것을 그림 4와 5에서 볼 수가 있다. 이러한 결과는 Paikowsky 등(1989)과 Paik과 Lee (1993)의 연구 결과에서도 찾아볼 수 있다.

한편, 그림 5에서는 말뚝의 폐색현상과 관련해서 항타말뚝과 압입말뚝의 거동 차이를 볼 수 있다. 항타말뚝은 말뚝이 최종 관입깊이에 도달할 때 까지도 완전폐색상태에 도달하지 못하는 반면, 압입말뚝은 말뚝 외경의 약 9배에 달하는 55 cm의 관입깊이에서 완전폐색상태에 도달하는 것으로 나타났다. 이것은 Paikowsky와

Whitman (1990)이 사질토 지반에 설치되는 말뚝이 완전 폐색상태에 도달하기 위한 관입깊이로 제시한 말뚝직경의 25-35배보다 작은 값이다. 또한 동일 관입깊이에서 항타말뚝보다 압입말뚝의 폐색효과가 우수하다는 것은 Paikowsky 등 (1989)과 De Nicola와 Randolph (1997)의 실험결과와도 일치하는 것이다.

항타에너지가 말뚝의 폐색정도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 햄머의 중량과 항타에너지에 따른 IFR의 변화를 그림 6에 나타냈다. 그림에서 보이는 바와 같이 IFR은 햄머의 낙하높이가 동일하더라도 항타에너지가 증가할수록, 그리고 동일 항타에너지에서도 햄머의 중량이 클수록 즉, 햄머의 낙하높이가 작아질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 말뚝의 IFR은 항타에너지나 햄머중량의 증가에 따라 무한히 증가하지 않고 어떤 값 이상의 범위에서는 일정한 값에 수렴하는 거동을 보였다. 이것은 항타에너지를 증가시키면 IFR이 증가한다는 Bruzy 등 (1991)과 Bruno와 Randolph (1999)의 실험결과와는 상반되는 것이다. 그러나 Bruzy 등(1991)의 실험결과를 재분석해보면 동일한 낙하높이에서 햄머의 중량을 증가시키므로써 항타에너지를 증가시키면 IFR이 감소한다는 또 다른 결론을 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 실험결과와 Bruzy 등의 연구결과를 종합할 때 말뚝의 폐색정도는 항타에너지보다는 주로 햄머의 낙하높이에 의해 좌우된다고 판단된다.

또한 그림 6(b)에서는 동일한 관입깊이에서 항타말뚝

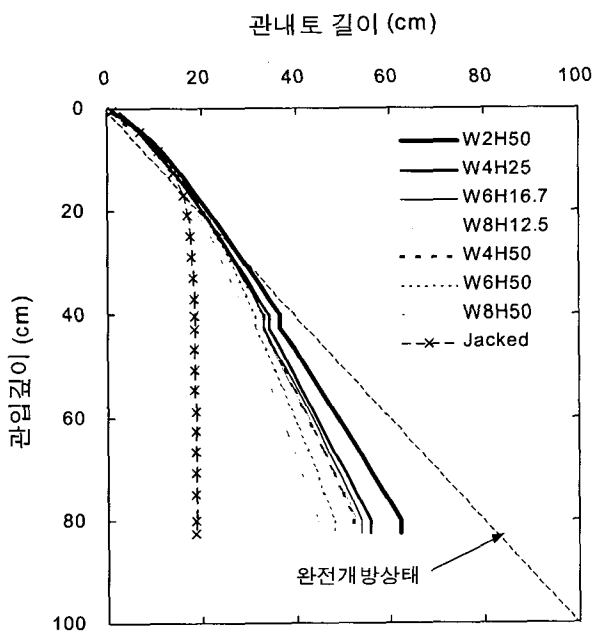


그림 4. 관입깊이에 따른 관내토의 변화

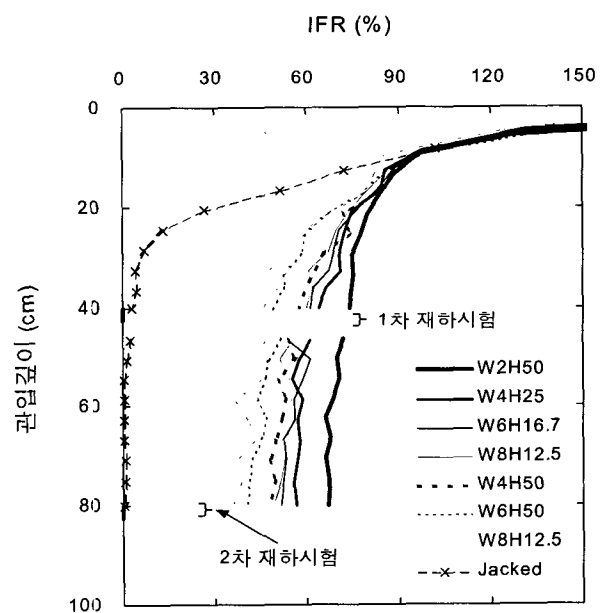
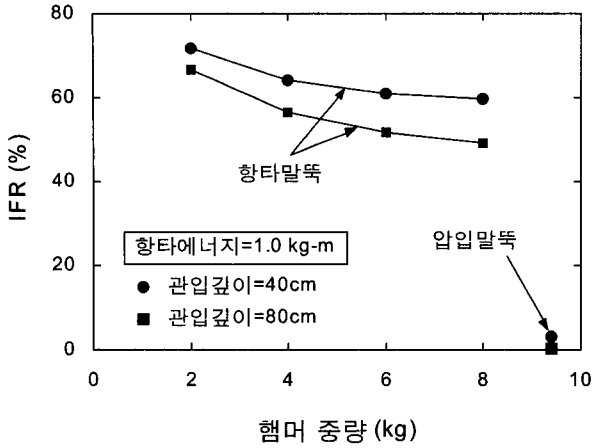
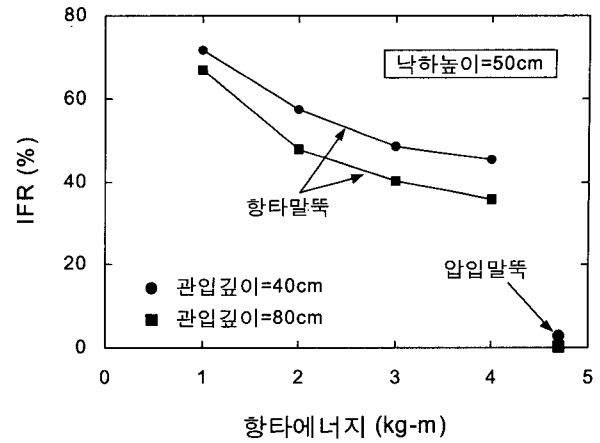


그림 5. 말뚝의 관입에 따른 IFR의 변화



(a) 동일 항타에너지에서 햄머 중량에 따른 변화



(b) 항타에너지에 따른 변화

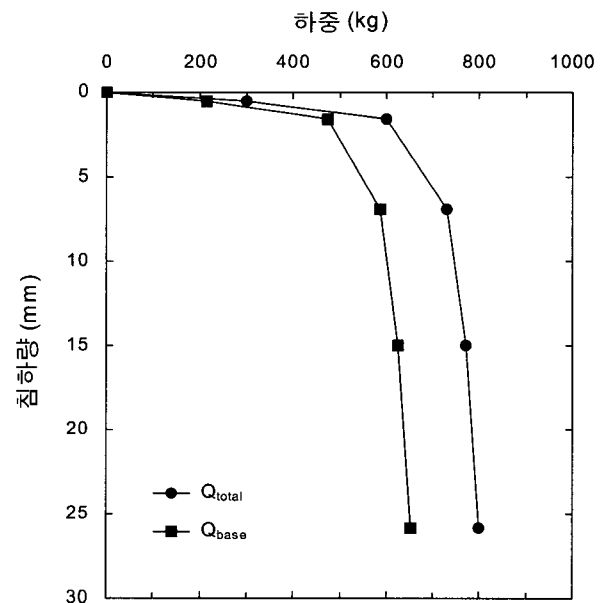
그림 6. 항타방법에 따른 IFR의 변화

의 IFR이 압입말뚝의 경우보다 항상 크다는 것을 명확히 볼 수 있다. 이것은 말뚝의 항타에너지에 의한 조밀한 모래지반의 팽창거동(dilation)과 말뚝의 항타시 관내토에 발생하는 관성력 때문으로 생각된다. 말뚝이 조밀한 사질토 지반에 타입될 때 항타에 의한 동적에너지가 관내토로 전달되면서 조밀한 상태의 관내토는 팽창거동을 하게 되므로 관내토의 길이가 증가하게 된다. 이러한 현상은 구속응력이 작아서 흙의 팽창성이 큰 관입 초기에 뚜렷하게 나타나며, 압입말뚝보다는 말뚝의 설치를 위해 항타에너지가 사용되는 항타말뚝의 경우에 더욱 두드러진다. 따라서 조밀한 사질토 지반에 설치되는 말뚝의 관입초기에는 관내토 길이가 말뚝의 관입깊이보다 크게 되며, 이러한 현상이 압입말뚝보다는 항타말뚝에서 더욱 깊은 깊이까지 지속되는 것을 그림 4에서 볼 수 있다. 또한 관내토 길이는 말뚝이 지반에 타입되는 동안 관내토에 발생하는 관성력에도 영향을 받는다. 말뚝이 타입되는 동안 관내토에 발생하는 관성력은 말뚝의 관입가속도와 관계되며, 말뚝의 관입가속도가 클수록 관성력이 커져서 관내토 길이가 증가하게 된다. 결국 항타말뚝의 관입속도가 압입말뚝에 비해 상당히 크게 되므로 동일 관입깊이라 할지라도 압입말뚝보다는 항타말뚝에서 관내토 길이가 더 길게 된다. 따라서 이상의 두가지 사항을 고려할 때 사질토 지반에서 항타말뚝이 완전폐색상태에 이르는 것은 매우 어려울 것으로 생각되며, 동일 관입깊이라 할지라도 항타말뚝의 폐색정도는 압입말뚝에 비해 항상 뒤질 것으로 생각된다.

4.2 하중-침하 거동

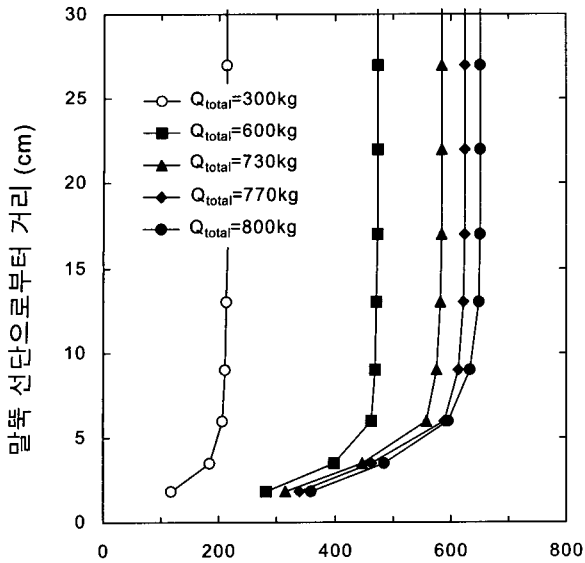
지반에 타입 혹은 압입된 모형말뚝에 대하여 40 cm와 80 cm의 관입깊이에서 정재하시험이 실시되었다. 그림 7은 4 kg의 햄머를 25 cm의 높이에서 낙하시켜서 말뚝을 타입시킨 W4H25 시험중 80 cm의 관입깊이에서 수행한 정재하시험의 결과를 나타낸 것이다.

그림 7(a)는 시험말뚝에 대한 하중-침하량 곡선을 나타낸 것으로, 그림에서 보이는 선단지지력에 대한 하중-침하량 곡선은 그림 7(b)의 관내토 하중전이곡선에서 결정된 선단지지력을 이용해서 구해졌다. 이들 하중-침하량 곡선에서 구해진 전체지지력과 선단지지력의 극



(a) 하중-침하량 곡선

그림 7. W4H25 시험에 대한 정재하시험 결과



관내토 내부의 하중 (kN)

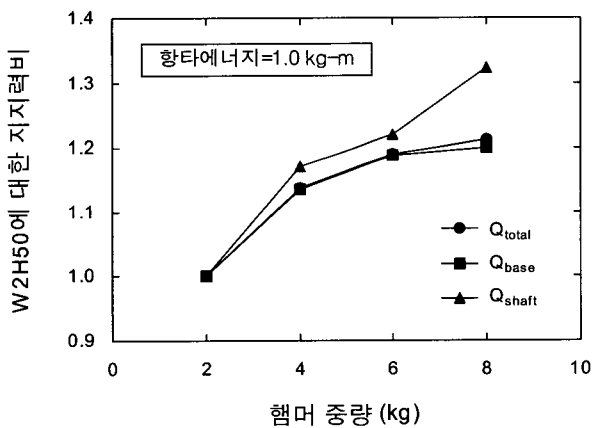
(b) 관내토에서 하중전이곡선

그림 7. W4H25 시험에 대한 정재하시험 결과

한값은 각각 800 kg과 650 kg이었다. 그리고 관내토에 의한 지지력의 대부분은 관내토의 전 길이가 아닌 말뚝 선단부로부터 말뚝직경의 2.5배에 달하는 범위에 있는 관내토와 말뚝간의 마찰력에 의해서 유발되는 것을 그림 7(b)에서 알 수 있다. 각종 항타방법으로 타입된 말뚝에 대한 정재하시험의 결과가 표 2에 정리되어 있다.

4.3 항타에너지에 따른 지지력의 변화

그림 8의 W2H50에 대한 지지력비는 식 (2)와 같이 일정한 항타에너지로 지반에 타입된 말뚝의 지지력 요



(a) 관입깊이=40 cm

표 2. 말뚝재하시험 결과

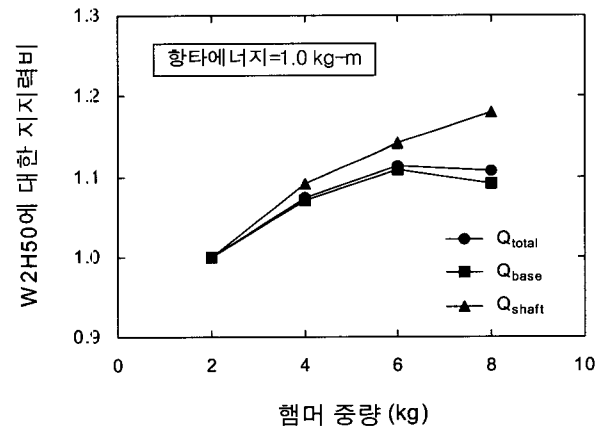
시험명	관입깊이 (cm)	IFR (%)	전체지지력 (kg)	선단지지력 (kg)	주면마찰력 (kg)
W2H50	40	71.8	470	421.9	48.1
	80	66.8	745	610.0	135.0
W4H25	40	64.0	535	478.7	56.3
	80	56.5	800	652.6	147.4
W6H16.7	40	60.9	560	501.3	58.7
	80	51.6	830	675.8	154.2
W8H12.5	40	59.7	570	506.4	63.6
	80	49.1	825	665.7	159.3
W4H50	40	57.4	545	489.7	55.3
	80	47.8	838	669.4	168.6
W6H50	40	48.6	565	503.7	61.3
	80	40.2	850	680.6	169.4
W8H50	40	45.4	563	504.5	58.5
	80	35.8	855	686.1	168.9
Jacked	40	3.0	606	545.6	60.4
	80	0.4	840	669.5	172.5

소를(전체지지력, 선단지지력, 주면마찰력)을 중량 2 kg의 햄머를 50 cm의 높이에서 낙하시켜서 말뚝을 타입시킨 W2H50 시험에서 구한 지지력 요소들로 나눈 값이다.

W2H50에 대한 지지력비

$$= \frac{\text{임의의 시험에서 측정된 지지력}}{\text{W2H50 시험에서 측정된 지지력}} \quad (2)$$

그림에서 보이듯이 항타에너지가 일정함에도 불구하고 햄머의 중량이 커질수록, 즉 햄머의 낙하높이가 작아질수록 말뚝의 지지력은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 햄머의 중량이 6 kg을 넘어서면서 그 이상의 중량 증가에 대해서는 선단지지력이 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 말뚝의 선단지지력은 폐색정도에 크게 영향을 받는데, 앞에서 언급한 바와 같이 항타 에너지가 일정한 경우에 말뚝의 폐색정도는 햄머의 중



(b) 관입깊이=80 cm

그림 8. 항타에너지가 동일한 경우 햄머 중량과 말뚝의 지지력비와의 관계

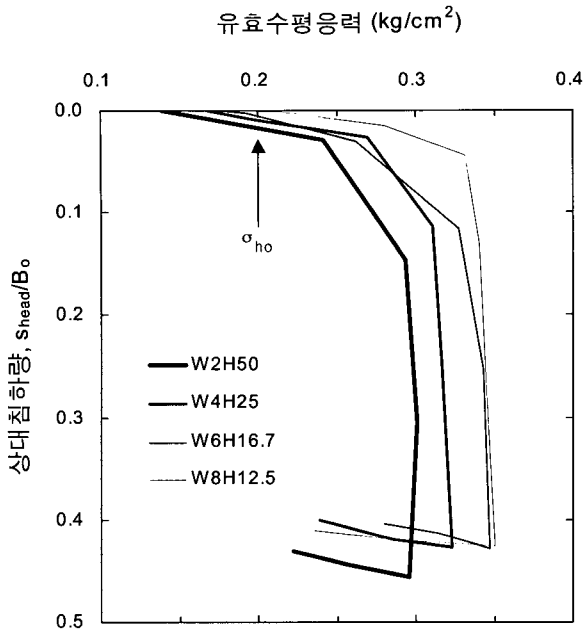


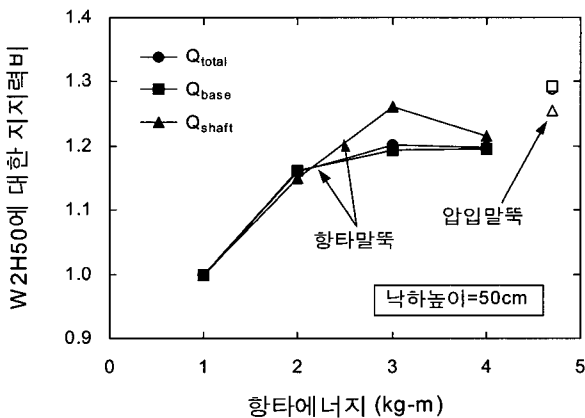
그림 9. 동일한 항타에너지로 타입된 말뚝의 재하시험시 측정된 말뚝 주변지반의 수평응력 변화

량이 증가함에 따라 증가하다가 어떤 범위 이상에서는 일정한 값으로 수렴하기 때문이다. 그리고 햄머 중량의 증가에 따른 주변마찰력의 증가율이 선단지지력의 증가율보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 항타에너지의 조절을 통한 말뚝 지지력의 증가는 말뚝의 지지력을 주로 선단지지력에 의존하는 선단지지말뚝보다는 주변마찰력에 의존하는 마찰말뚝의 경우에 더 효율적인 것으로 생각된다.

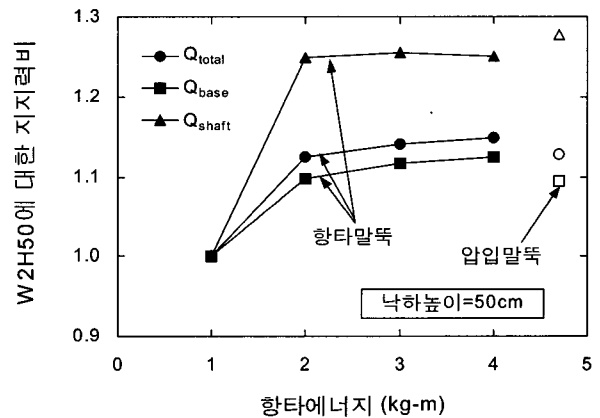
항타에너지가 일정한 경우 햄머의 중량에 따른 주변마찰력의 변화는 재하시험을 수행하면서 측정된 말뚝 주변지반의 수평응력 변화에 의하여 설명될 수 있다. 그

림 9는 80 cm의 관입깊이에서 말뚝재하시험이 수행되는 동안 지반에 매설된 수평토압계에 의하여 측정된 말뚝 주변부에 작용하는 수평응력의 변화를 나타낸 것으로, 여기서 상대침하량은 말뚝의 외경에 대한 말뚝 두부의 침하량 비로 정의된다. 그림에 보이는 바와 같이 말뚝길이 중간부분의 주변에 작용하는 수평응력은 항타에너지가 일정하더라도 햄머의 중량이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 항타에너지가 일정할 때 햄머의 중량이 증가함에 말뚝의 IFR이 감소해서 말뚝이 타입되는 동안 발생하는 주변지반의 다짐정도가 커지기 때문으로 생각된다. 이러한 영향은 말뚝이 타입된 직후에 측정된 지반의 수평응력이 햄머의 중량이 커질수록 크게 측정되는 것에서도 찾아볼 수 있다(그림 9). 또한 그림으로부터 말뚝 관입 직후에 말뚝 중심으로부터 10cm 떨어진 지점에서 측정된 수평응력이 원지반의 수평방향 구속압력인 0.2 kg/cm²보다 작다는 것을 발견할 수 있다. 이것은 말뚝이 타입되면서 말뚝 주변부에 존재하는 흙입자들이 말뚝과 함께 아래로 끌려 내려가면서 말뚝 주변부에 존재하는 흙의 상대밀도가 감소한다는 Robinsky와 Morrison (1964)의 연구결과에 의해 설명될 수 있다.

그림 10 또한 그림 8과 마찬가지로 항타에너지에 따른 말뚝의 지지력 변화를 W2H50 시험에서 측정된 지지력에 대한 비로 나타낸 것이다. 항타에너지가 일정할 때 햄머의 중량에 따른 말뚝 지지력의 변화와 마찬가지로 말뚝의 지지력은 햄머의 낙하높이가 일정한 상태에서 햄머의 중량을 증가시키는 방법으로 항타에너지를 증가시키에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 경우에도



(a) 관입깊이=40 cm



(b) 관입깊이=80 cm

그림 10. 항타에너지와 말뚝의 지지력비의 관계

항타에너지의 증가에 따른 주변마찰력의 증가율이 선단지지력의 증가율을 상회하는 경향을 보였다. 그러나 주변마찰력은 항타에너지가 증가하면서 무한히 증가하지 않고 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다.

한편, 항타말뚝의 전체지지력과 선단지지력은 40 cm의 관입깊이에서는 압입말뚝의 지지력보다 작았으나, 80 cm의 관입깊이에서는 압입말뚝의 지지력에 근접하는 경향을 보였다. 이것은 낮은 관입깊이에서는 압입말뚝의 폐색정도가 항타말뚝보다 월등히 크지만, 말뚝이 계속 관입되면서 80 cm의 관입깊이에서는 항타말뚝의 폐색정도가 상당히 증가했기 때문으로 생각된다. 그리고 압입말뚝의 주변마찰력은 모든 깊이에서 항타말뚝보다 크거나 같았다. 이것은 말뚝이 지반에 관입되면서

발생하는 말뚝 주변지반의 다짐정도 차이 때문으로 설명될 수 있다. Randolph 등 (1979)에 따르면 말뚝의 관입으로 인한 주변지반의 다짐정도는 말뚝이 부분폐색상태로 관입될 때보다는 완전폐색상태에서 관입될 때 더 큰 것으로 나타났으며, 주변지반의 다짐정도가 클수록 지반의 수평응력은 커지게 된다. 따라서 부분폐색상태에서 관입되는 항타말뚝보다는 거의 완전폐색상태에서 관입되는 압입말뚝에 의한 주변지반의 다짐정도가 더 크게 되며, 이러한 효과로 인하여 압입말뚝에 작용하는 수평응력이 항타말뚝에 작용하는 수평응력보다 크게 된다. 한편, 항타말뚝과는 달리 말뚝의 관입직 후 압입말뚝의 주변에 작용하는 수평응력은 원지반에 작용하는 수평압력보다 크게 측정되었다(그림 11). 이러한 현상은 말뚝의 폐색정도와 관련된 것으로 Nauroy와 Le Tirant (1983)의 시험결과에서도 보고된 바 있다.

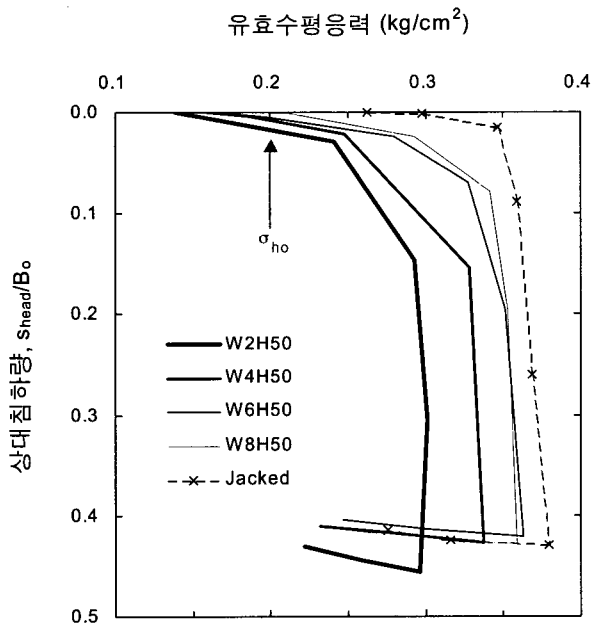


그림 11. 다양한 항타에너지로 타입된 말뚝의 재하시험시 측정된 말뚝 주변지반의 수평응력 변화

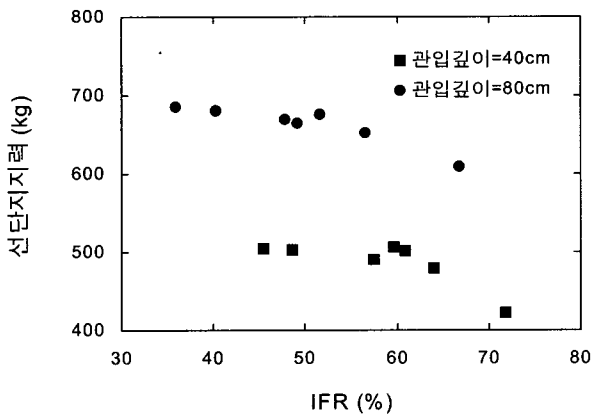


그림 12. IFR에 대한 말뚝 선단지지력의 변화

4.4 폐색정도에 따른 선단지지력 변화

말뚝의 폐색정도에 따른 항타말뚝의 선단지지력 변화를 그림 12에 나타냈다. 이 그림에서 말뚝의 선단지지력은 말뚝의 항타과정에서 측정된 폐색정도가 증가(IFR 감소)함에 따라 증가한다는 일반적인 사실을 확인할 수 있다. 또한 말뚝의 관입깊이가 다르다면, 말뚝이 지반에 관입되는 동안에 측정된 IFR이 같아하더라도 말뚝의 선단지지력이 다를 수 있다는 사실을 그림에서 발견할 수 있다. 시험결과에 따르면 동일한 지반조건과 말뚝조건을 갖는 두 말뚝의 폐색정도가 동일하다 할지라도 각각 40 cm와 80 cm의 관입깊이로 타입된 두 말뚝의 선단지지력 차이는 최대 30%에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 이들 두 개의 말뚝이 관입깊이를 제외하고는 지반조건과 말뚝조건은 물론 말뚝의 폐색정도까지 동일하다는 것을 고려할 때 이와 같은 선단지지력의 차이는 관내토 길이의 차이에 의해서 유발되는 것으로 생각될 수 있다. 즉, 말뚝의 폐색정도가 동일하더라도 관내토 길이가 길수록 말뚝의 선단지지력은 증가한다고 볼 수 있다. 이와 같은 시험결과는 De Nicola와 Randolph (1997)의 모형시험을 통해서도 확인된 바 있으며, 1차원 관내토 해석법(1-dimensional soil plug analysis)에 썩기영역 관내토(wedged soil plug)와 사하중영역 관내토(unwedged soil plug)의 개념을 도입한 O'Neill과 Raines (1991)과 Randolph 등(1991)의 연구결과에서도 찾아볼 수 있다.

그들의 제안에 따르면 관내토에 가해지는 하중의 대부분은 썩기영역 관내토에 의하여 저항되며, 사하중영역 관내토는 단지 썩기영역 관내토에 사하중을 가함으로써 관내토지지력의 일부만을 증가시키는 역할을 한다는 것이다. 따라서 이러한 개념은 본 시험결과에서 발견되는 결과와 일치하는 것이다.

일반적으로 개단말뚝의 지지력을 산정하는 방법은 크게 두 가지로 분류될 수 있으며, 그 첫 번째가 API의 설계기준(1993)을 이용하는 것이고 두 번째가 1차원 관내토해석법(Randolph 등, 1991)을 이용하는 것이다. API 기준은 말뚝의 선단지지력을 오직 두 경우의 폐색조건(완전개방과 완전폐색)과 지반조건 및 말뚝조건을 기준으로 산정하고 있는 반면, 1차원 관내토해석법은 지반조건과 말뚝조건은 물론 관내토 길이 또한 강관말뚝의 선단지지력을 산정하기 위한 자료로 사용하고 있다. 특히 De Nicola와 Randolph (1997)는 그들의 실내시험 결과에 근거하여 1차원 관내토해석법에서 관내토 길이의 영향을 보다 강조한 지지력 산정식을 제안한 바 있다. 따라서 본 시험결과를 고려할 때 개단말뚝의 선단지지력을 보다 정확히 산정하기 위해서는 지반조건과 말뚝조건 뿐만 아니라 말뚝의 폐색정도와 관내토 길이가 지지력에 미치는 영향이 고려된 새로운 설계기준이 필요한 것으로 생각된다.

5. 결론

개단말뚝의 지지력은 주로 말뚝의 폐색정도에 영향을 받으며, 말뚝의 폐색정도는 지반조건과 말뚝조건 뿐만 아니라 말뚝의 설치방법, 특히 항타에너지에 의해서도 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 항타에너지에 따른 개단말뚝의 거동 변화를 조사하기 위하여 토조를 이용한 모형말뚝시험을 실시하였다. 본 시험을 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 항타말뚝의 폐색정도는 햄머의 낙하높이가 일정할 때 항타에너지가 증가할수록, 그리고 항타에너지가 동일한 경우에도 햄머의 중량이 증가할수록(낙하높이가 감소할수록) 커지는 경향을 보였다.
- (2) 말뚝의 폐색정도와 마찬가지로, 말뚝의 지지력 또한 햄머의 낙하높이가 일정한 경우 항타에너지가 커질수록, 그리고 항타에너지가 일정한 경우에도 햄머의

중량이 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

- (3) 항타에너지나 햄머 중량의 증가에 따른 주면마찰력의 증가율은 선단지지력의 증가율보다 컸다. 따라서 주면마찰력이 선단지지력보다 항타방법에 더 크게 영향 받는 것으로 밝혀졌다.
- (4) 압입말뚝은 관입초기부터 완전폐색(IFR=0%)상태에 도달한 반면, 항타말뚝은 최종 관입깊이에 이를 때까지도 완전폐색상태에 도달하지 못하였다. 이것은 말뚝 타입시 관내토에서 발생하는 관성력과 항타에너지에 의한 조밀한 모래지반의 팽창(dilation)현상 때문으로 생각된다.
- (5) 항타말뚝의 선단지지력은 관입초기에는 압입말뚝에 비해 낮은 폐색정도로 인해서 압입말뚝보다 작았지만, 관입깊이가 증가하면서 폐색정도가 증가해서(여전히 압입말뚝보다는 작지만) 압입말뚝의 선단지지력에 접근하는 경향을 보였다. 그리고 압입말뚝의 주면마찰력은 시험에서 고려한 모든 관입깊이의 범위에서 항타말뚝보다 항상 크게 측정되었다.
- (6) 지반조건과 말뚝조건 및 말뚝의 폐색정도가 동일할 지라도 말뚝의 관입깊이 혹은 관내토 길이가 다르면 개단말뚝의 선단지지력도 달라지는 것으로 나타났다. 따라서 개단말뚝의 선단지지력을 정확히 산정하기 위해서는 지반조건과 말뚝조건은 물론 말뚝의 폐색정도와 관내토 길이에 의한 영향까지 고려할 수 있는 설계기준이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 학술진흥재단의 지원(2000-003-E00525)에 의하여 연구된 것으로 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 백규호, 이종섭, 이승래 (1993), "모래지반에 타입된 모형 개단 강관말뚝의 지지력 분석." 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp. 31~44.
2. American Petroleum Institute (1991), Recommendation Practice of Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 19th ed., API RP2A, Dallas, TX: American Petroleum Institute.
3. Brucy, F., Meunier, J., and Nauroy, J. F. (1991), "Behavior of Pile Plug in Sandy Soils during and after Driving." Proc. 23rd Annual Offshore Technology Conf., Vol.1, pp.145~154.
4. Bruno, D. and Randolph, M. F. (1999), "Dynamic and Static Load Testing of Model Piles Driven into Dense Sand." J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Vol.125, No.11, pp.988~998.

5. Choi, Y. and O'Neill, M. W. (1997), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile during Earthquake Motion." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.10, pp.975~982.
6. De Nicola, A. and Randolph, M. F. (1997), "The Plugging Behavior of Driven and Jacked Piles in Sand." *Geotechnique*, London, UK, Vol.47, No.4, pp.841~856.
7. Kishida, H. and Isemoto, N. (1977), "Behavior of Sand Plug in Open-End Steel Pipe Piles." *Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Tokyo, 1977, Vol.1, pp.601~604.
8. Lehane, B. M. and Gavin, K. G. (2001), "Base Resistance of Jacked Pipe Piles in Sand." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.127, No.6, pp.473~480.
9. Mansur, C. I. and Hunter, A. H. (1970), "Pile Tests-Arkansas River Project." *J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.95, No.5, pp.1545~1582.
10. Meyerhof, G. G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations." *J. of Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.102, No.3, pp.197~228.
11. Nauroy, J. F. and Le Tirant, P. (1983), "Model Tests on Piles in Calcareous Sands." *Proc. Conf. on Geotech. Practice in Offshore Engrg.*, Austine, pp.356~369.
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 Georesource 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. Paikowsky, S. G. and Whitman, R. V. (1990), "The Effects of Plugging on Pile Performance and Design." *Can. Geotech. J.*, Canada, Vol.27, pp.429~440.
16. Parki, A. K. and Lunne, T. (1982), "Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer for Sand." *Proc. 2nd Europ. Symp. Penetration Testing*, Vol.2, pp.761~768.
17. Randolph, M. F., Leong, E. C., and Houlsby, G. T. (1991), "One-Dimensional Analysis of Soil Plug in Pipe Piles", *Geotechnique*, Vol.41, No.4, pp.587~598.
18. Randolph, M. F., Steinfeldt, J. S., and Wroth, C. P. (1979), "The effect of Pile Type on Design Parameters of Driven Piles." *Proc. 7th Europ. Conf. on Soil Mech.*, Brighton, U.K. British Geotechnical Society, London, Vol.2, 107~114.
19. Robirsky, E. I. and Morrison, C. E. (1964), "Sand Displacement and Compaction around Model Friction Piles." *Can. Geotech. J.*, Canada, Vol.1, 2:81.
20. Salgado, R., Michell, J. K., and Jamiolkowski, M. (1998), "Calibration Chamber Size Effects on Penetration Resistance in Sand." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.878~888.
21. Smith, I. M., To, P., and Willson, S. M. (1986), "Plugging of Pipe Piles." *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Method in Offshore Piling*, Nantes, France, pp.53~73.
22. Szechy, C. H. (1961), "The Effect of Vibration and Driving upon the Voids in Granular Soil Surrounding a Pile." *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.* Paris, Vol.2, pp.161~164.
23. Tan, R. H. S. and Hanna, T. H. (1974), "Long Piles under Tensile Loads in Sands." *Geotech. Engrg.* Vol.5, No.2, pp.109~124.

(접수일자 2001. 7. 26, 심사완료일 2001. 12. 14)