

개단 고강도 콘크리트(PHC)말뚝의 실용성 검토

Investigation for Possible Practical Applicability
of Open-Ended PHC Pile

백규호* · 이승래** · 박현일*

Paik, Kyu Ho · Lee, Seung Rae · Park, Hyoun Il

Abstract

Opening the tip of a PHC pile, under a constant driving energy, can result in an increment of penetration depth due to the decrement of driving resistance. Therefore, the bearing capacity of an open-ended PHC pile may become larger than that of a closed-ended PHC pile by virtue of the increased embedded length. However, two main problems can be caused by opening the end of PHC pile. First problem is the variation of bearing capacity by opening the pile tip, and the second one is whether the tip of an open-ended PHC pile will be failed by a high pressure developed by the soil plug. In this study, model pile tests in calibration chamber were performed to investigate the practicability of open-ended PHC pile in view of both the pile bearing capacity and the possible failure of the pile tip. According to the test results, the total bearing capacity of open-ended piles approaches the total bearing capacity of closed-ended piles with the increase of the penetration depth. The failure of pile tip could be occurred in the region of 0.8~1.1 times as the inside diameter from the pile tip.

요 지

PHC말뚝의 선단부를 개방시켜서 사용하면 관입저항력의 감소로 인하여 관입깊이가 증가되며, 결과적으로 지지력의 증가를 가져온다. 그러나 개단 PHC말뚝의 사용을 위해서는 다음의 두가지 문제가 해결되어야 한다. 첫째는 말뚝의 선단부를 개방시킴에 따른 지지력의 변화이며, 둘째는 말뚝 내부로 유입되는 관내토에 의한 말뚝 선단부의 파괴여부이다. 따라서 본 연구에서는 개단 PHC말뚝의 실용성을 검토하기 위하여 먼저 말뚝의 선단부 형상에 따른 지지력 비교를 목적으로 두개의 폐단말뚝과 두개의 개단말뚝을 이용하여 토조에서 모형말뚝실험을 수행하였다. 실험결과로부터 말뚝의 선단부 형상에 따른 관입저항력과 지지력의 변화 및 PHC말뚝 선단부의 파괴여부가 검토되었다. 실험결과 동일한 관입깊이에서 개단말뚝의 전체지지력은 관입깊이가 증가함에 따라 폐단말뚝의 전체지지력과 비슷해지며, PHC말뚝의 경우 말뚝선단부로부터 말뚝내경의 0.8~1.1배되는 영역에서 균열발생의 가능성이 제시되었다.

* 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

* * 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 조교수

1. 서 론

기초공사에서 공사비의 절감을 위해서는 기초의 경제적인 설계 뿐만 아니라 말뚝의 지지력을 향상시킬 수 있는 시공방법의 개발이 필수적이다. 말뚝의 지지력을 향상시킬 수 있는 가장 간단한 방법으로는 지지층에 관입되는 말뚝의 길이를 증가시키는 것을 들 수 있다. 최근들어 이러한 방법을 통한 기초공사의 공비절감을 위한 방안의 하나로 기존의 PC말뚝을 PHC (pretensioned spun high strength concrete)말뚝으로 전환하는 과정에 있다. 그러나 PC말뚝을 말뚝 자체의 강도가 상당히 증가된 PHC말뚝으로 대체함으로써 관입깊이를 어느 정도 증가시킬 수는 있으나, 그것에 비례하여 관입저항력 또한 상당히 증가하기 때문에 말뚝의 향타가 어려워 질 수 있다는 또다른 문제에 직면하게 된다.

말뚝을 타입하는 동안에 관입저항력을 줄여서 말뚝의 파손을 방지하고, 그와 더불어 관입깊이를 더욱 증가시키기 위해서는 PHC말뚝의 선단부를 개방(open)상태로 만드는 것이 더욱 유리할 것으로 사료된다. 가까운 일본만 하더라도 오래전부터 기초공사에 사용되는 말뚝의 상당수는 선단부를 개방시킨체로 사용하고 있다.^(1,15) 그러나 말뚝의 선단부를 개방시킨체로 사용하기 위해서는 다음과 같은 두가지 문제점이 해결되어야 한다. 첫째는 말뚝 선단부의 구조적인 문제이다. 일반적으로 개단말뚝이 지반에 타입되면서 말뚝 내부에 발생하는 관내토는 매우 큰 응력상태로 다져지기 때문에 말뚝 내면에는 상당한 크기의 수평압력이 작용하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 말뚝 선단부가 관내토에 의해 유발되는 수평압력에 의하여 파괴되지 않도록 말뚝의 선단부를 적절히 보강하는 작업이 필요하다. 이러한 보강 정도를 결정하기 위해서는 일반적인 지반조건 하에서 관내토에 의하여 말뚝 내부에 작용되는 수평압력의 크기가 조사되어야 한다. 둘째는 말뚝의 지지력 문제로 동일한 조건의 지반에 설치된 폐단말뚝과 비교하여 개단 PHC말뚝의 지지력이 어느 정도나 되는지 하는 것이다.

본 연구에서는 PHC말뚝의 선단부를 개방함에 따른 문제점들을 규명하기 위하여 실제 지반상태를 적절히 재현할 수 있는 토조를 이용한 모형말뚝 실험을 수행하였다. 선단부의 개방정도에 따른 지

지력 특성과 폐단말뚝과의 지지력 비교를 위하여 각각 두 종류의 모형개단말뚝(부분개방형과 완전개방형)과 모형폐단말뚝(원추형과 평면형)이 사용되었다. 특히 개단말뚝의 경우에는 관내토에 의하여 말뚝 내벽에 작용하는 수평압력과 말뚝의 외벽에 작용하는 수평압력을 측정하여 개단 PHC말뚝의 선단부 파괴 가능성과 최적 선단모양의 결정, 그리고 선단부 파괴시 보강대책마련과 관련된 기초자료 등을 제시하고자 하였다.

2. 개단말뚝과 폐단말뚝의 타입성 비교

말뚝의 타입성(drivability)은 말뚝의 선단부 형상과 벽면마찰각 그리고 지반조건에 의하여 주로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 여러가지 실험결과에 의하면 사질토 지반에서 말뚝을 일정한 깊이까지 타입하는데 필요한 향타수는 폐단말뚝에 비하여 개단말뚝이 상당히 작으며, 관입깊이가 깊어질수록 개단말뚝의 폐색정도가 증가함에 따라 향타수의 차이는 점차 감소하는 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁹⁾ 반면 점성토 지반의 경우에는 폐단말뚝의 타입에 필요한 향타수가 개단말뚝의 향타수보다 약간 크거나 거의 같은 것으로 측정되었다.^(5,12) 한편 Szechy⁽¹⁴⁾의 모형실험 결과에 따르면 사질토 지반에서 일정한 극한지지력을 얻는데 필요한 향타수를 기준으로 할 때 평면 폐단말뚝이 가장 비경제적이며, 말뚝직경에 대한 관입깊이의 비가 10 이상인 경우에는 개단말뚝이, 그리고 그 비가 10 미만인 경우에는 원추형 폐단말뚝이 가장 경제적이라는 결과가 보고되었다. 반면 사질토 지반에서 개단말뚝의 관입저항력은 관내토에 의한 저항력으로 인하여 폐단말뚝의 경우보다 더 크다는 실험결과와 수치해석 결과가 보고된 바도 있다.^(8,11) 그러나 PC말뚝의 타입성을 향상시키기 위하여 말뚝의 선단부를 종래의 원추폐쇄형에서 개방형으로 변형시켜 사용할 경우에는 관내토에 의한 압력으로 인하여 말뚝의 선단부에 종방향 균열이 발생한다는 보고도 있다.⁽¹⁵⁾

한편 일본에서는 1960년대에 여러 지반을 대상으로 하여 폐쇄형 PC말뚝과 두종류의 개방형 PC말뚝(말뚝 내경이 일정한 완전개방형 PC말뚝과 선단부의 구멍이 말뚝의 내경보다 작은 부분개방형 PC말뚝)의 타입성 및 말뚝 선단부의 파손율을 비

교하였다.⁽¹⁾ 조사결과에 의하면 지반이 자갈이 섞인 사질토층인 경우에는 폐쇄형보다는 개방형 PC말뚝의 타입성이 우수하였으며, 선단부 파손을 면에서도 원추폐쇄형 PC말뚝의 파손율은 90% 이상인 반면 개방형 PC말뚝의 경우는 10% 미만으로 개방형 PC말뚝이 더욱 효율적인 것으로 나타났다. 모래지반의 경우에는 관내토에 의한 선단부 폐쇄효과로 인하여 개방형과 폐쇄형 PC말뚝의 타입성이 거의 비슷하게 측정되었으나, 완전개방형의 경우에는 선단부에 종방향 균열이 발생하였다. 또한 화강풍화토나 또다른 지지층으로 구성된 지반의 경우에 폐쇄형 PC말뚝의 상당수는 타입중에 좌굴등에 의하여 파괴되는 반면 부분개방형 PC말뚝은 전혀 문제 없이 타입되었다. 이러한 경우에도 완전개방형 PC말뚝은 관내토 압력으로 인하여 말뚝의 선단부에 종방향 균열이 발생하였다.

표준관입시험(SPT)의 N치가 10이하인 연약지반의 경우에 폐쇄형 PC말뚝은 타입시에 발생하는 지반의 비배수탄성변형으로 인한 말뚝의 리바운드(rebound)가 커서 연속타격이 불가능하게 된다. 그러나 개방형 PC말뚝은 지반의 이러한 탄성변형량을 줄일 수 있는 반면 관내토에 발생하는 과잉간극수압으로 인하여 선단부가 파손될 가능성이 있기 때문에 부분개방형 PC말뚝의 사용을 권장하고 있다.⁽⁹⁾ 또한 상부는 연약층이고 하부는 지지층으로 구성된 전형적인 지반에 말뚝기초가 적용되는 경우에도 연약지반에서 말뚝의 항타시 발생하는 지반의 탄성변형량과 지지층 관입시 발생가능한 말뚝 선단부의 파손을 고려하여 부분개방형 PC말뚝이 적합하다고 보고하고 있다.

따라서 위에 언급된 실험결과들에 근거하면 타입성의 향상과 타입중에 말뚝의 파손을 방지하기 위해서는 모든 지반에 대하여 폐쇄형 PC말뚝보다는 개방형(특히 부분개방형) PC말뚝이 적합하며, 완전개방형 PC말뚝은 말뚝 선단부가 타입시 파손되는 것을 방지하기 위하여 말뚝 선단부에 적절한 보강이 필요하다고 생각된다. 그러나 개단 PHC말뚝은 완전개방형이라 할지라도 말뚝 자체의 강도가 PC말뚝보다 크기 때문에 관내토에 의한 말뚝 선단부의 파손율이 PC말뚝보다는 줄어들 것으로 사료되며 이에 대한 적절한 검토가 요구된다.

3. 개단말뚝과 폐단말뚝의 지지력-침하량 특성

말뚝의 극한지지력은 말뚝이 타입되는 지반조건 뿐만 아니라 말뚝의 관입특성과도 밀접한 관계를 갖는다. 특히 개단말뚝의 경우에는 폐단말뚝과는 달리 말뚝의 관입특성에 영향을 미치는 중요한 요소인 폐쇄정도가 증가함에 따라 지지력이 증가하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 전체지지력 중에서 선단 지지력의 비중이 큰 사질토지반에 말뚝이 관입되는 경우 관입초기에는 개단말뚝의 지지력이 폐단말뚝의 지지력보다 상당히 작지만, 관입깊이가 깊어지면서 개단말뚝에서 발생하는 폐쇄효과가 말뚝의 선단 지지력을 상당히 증가시키기 때문에 극한지지력의 차이는 줄어들게 된다.⁽¹⁰⁾ 반면 전체지지력에서 선단 지지력이 차지하는 비중이 작은 점성토지반에서는 개단말뚝의 폐쇄효과가 전체지지력에 큰 영향을 미치지 못한다고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

사질토 지반에서 실행된 여러 실험결과를 종합하여 보면 개단말뚝의 극한지지력은 폐단말뚝의 극한 지지력보다 일반적으로 작으며, 개단말뚝의 외주면 마찰력도 폐단말뚝의 외주면마찰력보다 약 20~40% 정도까지 작게 나타나는 것으로 밝혀졌다. 그러나 말뚝의 관입깊이가 일정할 때 개단말뚝과 폐단말뚝 간의 극한지지력 차이는 말뚝의 설치를 위하여 필요한 항타수의 차이보다는 상대적으로 작게 나타났다.⁽¹³⁾ 한편 말뚝의 관입깊이가 말뚝직경의 17배 이상되면 개단과 폐단말뚝의 선단지지력은 큰 차이를 나타내지 않으며, 그 비가 30배 이상이 되면 주면 마찰력의 차이도 무시할 수 있다는 실험결과가 보고된 바도 있다.⁽⁷⁾ 그리고 극한지지력 상태에서 개단말뚝의 침하량은 폐단말뚝의 경우보다 상당히 큰 것이 보통이며, 이러한 실험결과는 모래지반에서 말뚝의 타입으로 인한 말뚝 선단부 아래에 존재하는 지반의 간극비 변화를 측정한 Szechy⁽¹⁴⁾의 실험결과로부터 알 수 있다. 이 실험결과를 보면 그림 1에 보이는 바와 같이 개단말뚝보다는 폐단말뚝을 타입한 경우에, 그리고 원추폐단말뚝보다는 평면폐단말뚝의 경우에 지반이 더욱 조밀해 지는 것으로 나타났다. 이것은 원추형 콘(cone)의 선단저항력이 평면형 콘의 선단저항력의 0.64배라는 Durgunoglu와 Mitchell⁽⁶⁾의 결과와도 어느 정도 일치되는 것이다.

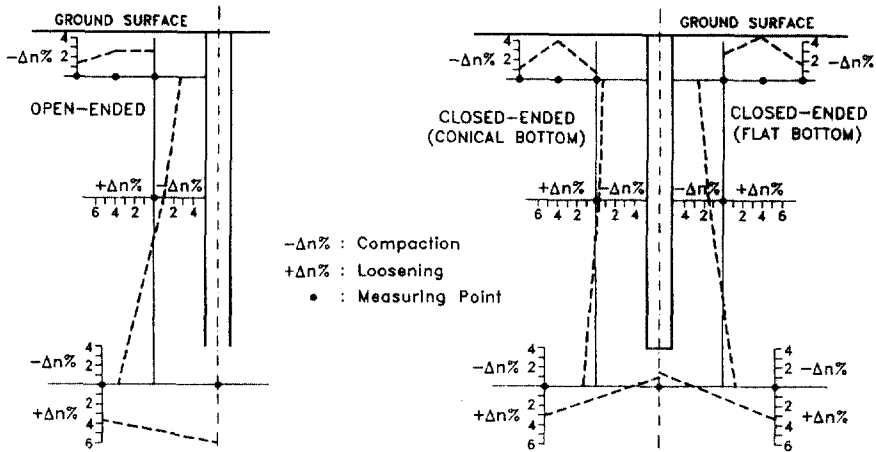


그림 1. 말뚝의 선단부 형상에 따른 지반의 간극비 변화(Szechy, 1961)

4. 지반조성과 실험방법

4.1 시료와 지반조성

본 실험에서 지반조성에 사용된 모래는 한강 난지도 부근에서 채취한 것으로 장기간 공기중에서 건조하였으며 10번체 통과분만을 사용하였다. 모래 시료는 비중(G_s)이 2.64이고 균등계수(C_u)가 2.21, 곡률계수(C_c)가 1.23으로 매우 균등한 상태이며, 통일분류법으로 분류할 때 SP에 해당된다.

토조에 조성된 모형지반은 건조모래의 낙하고를 일정하게 유지시키는 낙사법(raining method)에 의하여 상대밀도 90% 상태로 형성되었으며, 매 층당 높이를 10 cm로 유지하였다. 뿐만 아니라 모래의 분산과 낙하에너지를 일정하게 유지하기 위하여 모래가 8번체와 10번체로 구성된 모래 분산장치(sand diffuser)를 통과하도록 하였으며, 모래지반이 조성되는 동안 모래가 낙하되는 공간과 외부를 비닐(rainer shell)로 막아서 외부의 공기흐름이 낙하에너지에 주는 영향을 최소화하였다(그림 2). 이상과 같은 방법으로 조성된 모래지반은 $K_0=0.4$ 의 상태로 가압하여 30시간 동안 동일압력으로 유지시킴으로써 토조에 토압이 일정하게 작용되도록 한 후 모형 말뚝실험을 수행하였다.

모형지반의 내부마찰각, ϕ 와 모래와 모형말뚝의 벽면마찰각, δ 는 직접전단시험으로부터 구해졌으며, 전단시험을 위한 시료의 조성은 지반조성때와 마찬가지로 낙사법에 의하여 이루어졌다. 시험결과 상

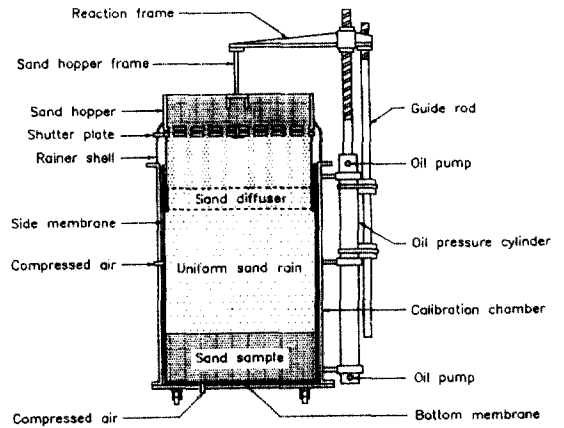


그림 2. 모형지반의 조성을 위한 장치

대밀도 90%의 지반에 대하여 $\phi_{peak}=43.4^\circ$, $\phi_{residual}=33.7^\circ$ 그리고 $\delta=17.7^\circ$ 로 구해졌다.⁽³⁾

4.2 실험장치와 실험방법

토조를 이용한 모형말뚝실험에서 모형지반과 현장지반의 차이를 최소화 하기 위하여 토조내 경계 조건은 수평응력과 수직응력의 조절이 가능한 응력 조절법($\Delta\sigma_h=0$, $\Delta\sigma_v=0$)을 채택하였으며, 토조의 수평응력은 현장말뚝의 중간깊이에 해당하는 응력과 같은 크기로 가해졌다. 따라서 모형지반에 가해진 토조의 수직응력($\sigma_{vo}=1.0 \text{ kg/cm}^2$)과 토조의 수평응력($\sigma_{ho}=0.4 \text{ kg/cm}^2$)은 토조에 조성된 모래지반과 같은 상태의 현장지반에서 12.6 m의 깊이에서의 응

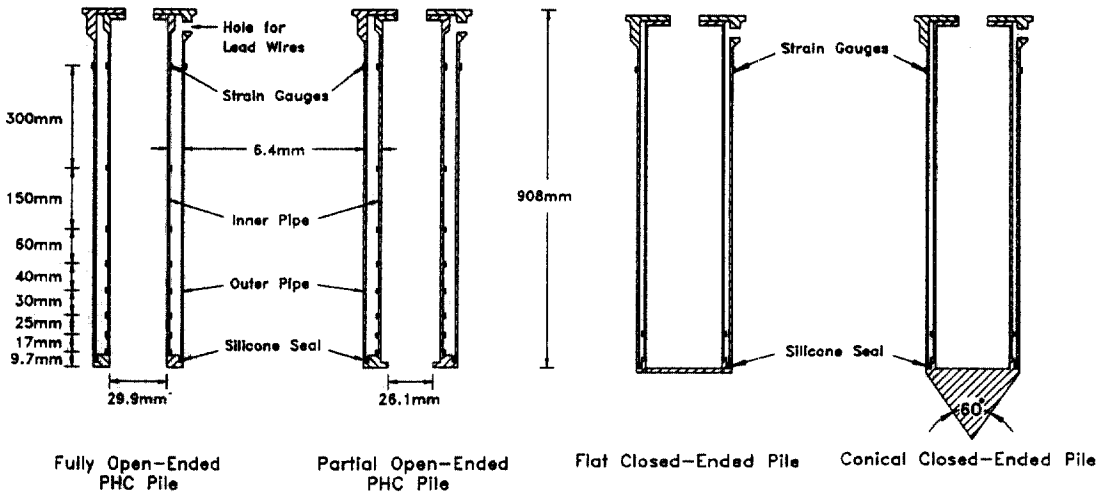


그림 3. 모형 개단말뚝과 폐단말뚝의 개략도

력상태를 재현한 것으로 볼 수 있다.⁽³⁾ 그리고 토조 크기의 제한으로 인하여 발생할 수 있는 경계효과는 본 실험에서는 그다지 크지 않을 것으로 생각되며, 이것에 대한 자세한 사항은 참고문헌 (2)에 나타나 있다.

본 실험에서는 말뚝의 선단부 형상이 말뚝의 타입성과 지지력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각 두개씩의 개단말뚝과 폐단말뚝이 사용되었다 (그림 3). 모형개단말뚝은 현장에서 가장 많이 사용되는 $\phi 350$, A형 PHC말뚝(외경 350 mm, 두께 60 mm)을 0.13배로 축소 재현하여 외경을 42.7 mm, 내경을 29.9 mm로 하였다. 그리고 말뚝의 개방정도에 따른 말뚝의 거동 변화를 측정하기 위하여 말뚝 선단부의 구멍크기와 말뚝 내경의 크기를 같게 한 완전개단말뚝(fully open-ended pile)과 선단부의 구멍크기가 말뚝내경보다 3.8 mm 작은 부분개단말뚝(partially open-ended pile)이 사용되었다. 폐단말뚝으로는 평면폐단말뚝(flat closed-ended pile)과 원추폐단말뚝(conical closed-ended pile)이 사용되었다.

실험에 사용된 모형말뚝들은 각 부분에 작용하는 지지력의 분리측정을 위하여 직경이 서로 다른 두개의 파이프를 만들어 졌으며, 내부파이프에 작용하는 지지력이 외부파이프로 전달되는 것을 방지하기 위하여 말뚝 선단부에 존재하는 두 파이프 사이의 공간은 silicone으로 밀봉되었다. 조립이 완료된 모

형말뚝은 무게가 4.0 kg인 햄머를 50 cm 높이에서 자유낙하시켜 지반에 타입하였다.

특히 개단말뚝의 지지력을 말뚝 단면부에 작용하는 지지력(Q_{pt})과 내주면마찰력(Q_{si}), 그리고 외주면마찰력(Q_{so})으로 분리하여 측정할 수 있도록 내부파이프의 외벽에는 대칭으로 16개의 strain gage를 부착하였다. 파이프 양쪽에 대칭으로 부착된 strain gage의 평균값을 그 위치에서의 변형율로 하였으며, 이 변형율은 예비실험에서 구한 변형율-하중 관계를 통하여 하중으로 전환되었다. 먼저 개단말뚝의 선단지지력(Q_{end}), 말뚝 단면부지지력과 내주면마찰력의 합)은 내부파이프의 가장 윗부분에 부착된 strain gage로부터 얻어졌으며, 전체지지력과 선단지지력의 차이를 외주면마찰력으로 이용하였다.⁽²⁾

말뚝의 선단부 형태에 따른 타입성의 변화를 관찰하기 위하여 말뚝이 타입되는 동안 관입깊이에 따른 항타수를 측정하였으며, 개단말뚝의 경우에는 말뚝의 폐색정도를 계산하기 위하여 관내토의 길이도 측정하였다. 모형말뚝의 재하시험은 말뚝의 관입깊이가 25 cm, 42 cm, 59 cm, 76 cm일 때 행해졌으며, 전체지지력의 측정을 위하여 말뚝의 두부(head)에는 3 ton 용량의 load cell을 설치하였다. 그리고 재하시험 전에 모든 strain gage와 load cell에 대하여 영점조정을 행하였다. 재하시험 동안 지지력의 분리측정을 위하여 부착한 strain gage의 결과들은 data logger(UCAM-70A)를 이용하여 측

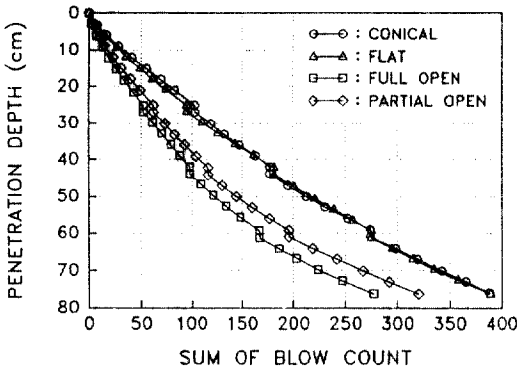


그림 4. 말뚝의 선단부 형상에 따른 항타수의 변화

정되었으며, 말뚝의 침하량은 말뚝 두부에 대하여 대칭으로 설치된 dial gage를 이용하여 측정하였다.⁽²⁾

5. 실험결과 및 분석

5.1 말뚝의 선단부 형상에 따른 항타에너지의 변화

그림 4는 여러종류의 말뚝에 대하여 일정한 깊이까지 말뚝을 타입하는데 필요한 항타수를 비교한 것으로, 여기서 말뚝의 선단부 형상에 따른 타입성의 변화를 알 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 원추 폐단말뚝(CONICAL로 표시)과 평면폐단말뚝(FLAT으로 표시)의 타입을 위한 항타수는 모든 관입깊이에서 거의 비슷하였다. 그리고 개단말뚝에 대한 항타수는 폐단말뚝에 비하여 상당히 작았으며, 개단말뚝과 폐단말뚝간의 항타수 차이는 관입깊이가 깊어짐에 따라서 점차 감소하는 것으로 나타났다. 즉 폐단말뚝에 대한 완전개단말뚝(F-OPEN으로 표시)의 항타수의 비는 25 cm에서는 0.547이지만 76 cm에서는 0.712로 관입깊이가 증가함에 따라 항타수의 비가 점차 증가한다. 또한 관입깊이가 어느정도 이상되면 곡선의 기울기는 폐단말뚝과 개단말뚝의 경우가 거의 같아지므로 말뚝이 계속 타입되면 항타수의 차이는 거의 없어질 것으로 생각된다. 이것은 관입깊이가 증가함에 따라 개단말뚝의 폐색정도가 커지기 때문으로 사료된다.

또한 개단말뚝 중에서도 관내토에 의한 내주면마찰을 작게 하기 위하여 마찰감쇄기(friction reducer)를 설치한 부분개단말뚝(P-OPEN으로 표시)보다는 마찰감쇄기를 설치하지 않은 완전개단말뚝의 타입

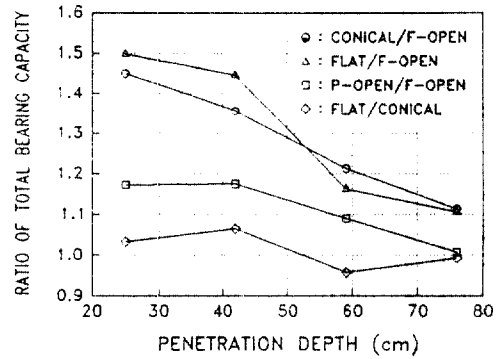


그림 5. 말뚝의 선단부 형상에 따른 전체지지력의 변화

성이 더 좋게 나타났다. 일반적으로 말뚝이 사질토 지반에 타입되는 동안에 개단말뚝은 말뚝에 하중이 재하되는 동안과는 달리 완전폐색상태에 도달되지 않으며,⁽²⁾ 말뚝의 관입저항력은 말뚝의 외주면마찰력보다 선단지지력에 의하여 발휘된다⁽¹⁶⁾고 알려져 있다. 그러므로 이러한 실험결과는 부분개단말뚝의 선단부 면적이 완전개단말뚝의 선단부 면적보다 커서, 말뚝이 타입되는 동안에 부분개단말뚝의 선단저항력이 완전개단말뚝의 선단저항력보다 크기 때문으로 생각된다.

5.2 말뚝의 선단부 형상에 따른 지지력의 변화

그림 5부터 그림 7까지는 말뚝의 선단부 형상에 따른 전체지지력과 선단지지력 그리고 외주면마찰력의 변화를 완전개단말뚝의 지지력에 대한 비율로 나타낸 것이다. 먼저 그림 5에서 보이듯이 관입초기에 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝의 전체지지력은 완전개단말뚝의 전체지지력보다 약 45~50% 정도 크지만, 76 cm의 관입깊이에서 나타난 전체지지력의 차이는 약 10% 정도로 감소하게 된다. 따라서 개단말뚝과 폐단말뚝의 관입깊이가 동일하고 관입깊이가 깊은 경우에 완전개단말뚝의 전체지지력은 폐단말뚝의 전체지지력에 크게 뒤지지 않을 것으로 생각된다.

그리고 부분개단말뚝의 전체지지력은 관입초기에 완전개단말뚝의 전체지지력보다 약 17% 정도 크게 측정되지만, 관입깊이가 증가하면서 완전개단말뚝과 부분개단말뚝의 전체지지력은 거의 같아지게 된다. 또한 평면폐단말뚝의 전체지지력은 관입초기에는 원추폐단말뚝보다 약간 크지만, 관입깊이가 증가되

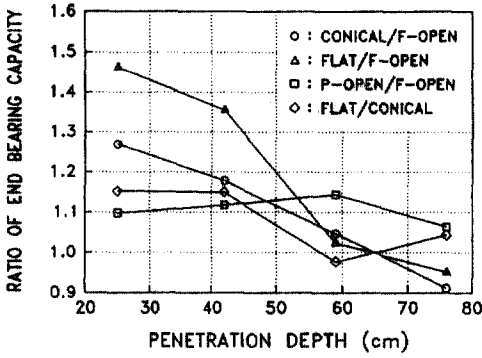


그림 6. 말뚝의 선단부 형상에 따른 선단지지력의 변화

면서 두 폐단말뚝의 전체지지력은 거의 같아지는 것으로 나타났다.

완전개단말뚝의 선단지지력은 관입초기에는 원추 폐단말뚝의 79%, 그리고 평면폐단말뚝의 68%이지만, 관입깊이가 증가하면서 폐색정도의 증가로 인하여 폐단말뚝의 선단지지력과 거의 같아지게 된다 (그림 6). 그리고 원추폐단말뚝의 선단지지력은 관입초기에는 평면폐단말뚝에 대한 선단지지력의 약 87%이지만 관입깊이가 증가하면서 두 폐단말뚝의 선단지지력은 비슷해진다. 이것은 평면폐단말뚝과 원추폐단말뚝의 관입메카니즘에 의하여 설명될 수 있다. 즉 관입초기에 말뚝의 선단부에 의하여 하부로 밀리는 흙의 양이 원추폐단말뚝보다는 평면폐단말뚝의 경우에 더 많아서 말뚝 선단부에 존재하는 지반의 다짐정도는 평면폐단말뚝의 경우가 원추폐단말뚝의 경우보다 더 크게 된다. 따라서 관입초기에는 원추폐단말뚝보다 평면폐단말뚝의 선단지지력이 더 크게 된다. 그러나 말뚝이 계속 관입되면서 평면폐단말뚝의 선단부에는 원추형 흙썩기(soil plug)가 형성되어 관입메카니즘이 원추폐단말뚝과 비슷하게 된다. 따라서 관입깊이가 깊어지면서 평면폐단말뚝과 원추폐단말뚝의 선단지지력은 거의 같아지게 된다.

한편 그림 7에서 보이듯이 관입초기에 완전개단 말뚝의 외주면마찰력은 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝에서 측정된 외주면마찰력의 32%와 55%에 불과하다. 그러나 관입깊이가 증가하면서 폐색정도의 증가로 인하여 개단말뚝의 외주면마찰력이 증가하여, 완전개단말뚝의 외주면마찰력에 대한 원추폐단

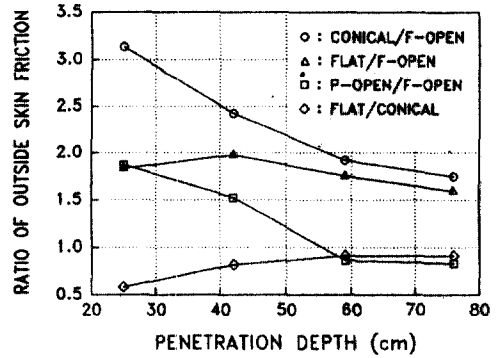


그림 7. 말뚝의 선단부 형상에 따른 외주면마찰력의 변화

말뚝과 평면폐단말뚝의 외주면마찰력 비는 약 1.64에 수렴하는 경향을 보인다. 그러므로 말뚝의 관입깊이가 깊을 때 개단말뚝과 폐단말뚝의 선단지지력이 거의 같아지는 것을 생각하면 개단말뚝과 폐단말뚝의 전체지지력 차이는 주로 외주면마찰력의 차이로부터 기인됨을 알 수 있다. 그리고 부분개단말뚝의 외주면마찰력은 관입초기에는 완전개단말뚝에 대한 외주면마찰력의 1.87배이나, 관입깊이가 깊어지면서 두 개단말뚝의 외주면마찰력은 거의 비슷해졌다. 또한 관입초기에 평면폐단말뚝의 외주면마찰력은 원추폐단말뚝에 대한 외주면마찰력의 0.58배에 해당된다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 말뚝의 관입깊이가 증가하면 평면폐단말뚝의 관입메카니즘이 원추폐단말뚝의 관입메카니즘과 같아져서 수평으로 밀리는 흙의 부피가 비슷해지므로 두 폐단말뚝의 외주면마찰력은 같아지게 된다.

5.3 개단 PHC말뚝의 실용성 검토

5.2절에서 언급되었듯이 동일한 관입깊이에 대하여 말뚝의 관입깊이가 깊어지더라도 개단말뚝의 전체지지력은 여전히 폐단말뚝의 전체지지력보다 약간 작게 나타난다. 그러나 완전개단말뚝의 전체지지력을 향타수 또는 타입성과 연관시켜서 생각하면 앞의 해석과는 약간 다른 결과를 얻게 된다. 최종관입깊이 (76 cm)까지 완전개단말뚝을 관입시키기 위한 향타수는 277타로, 이것은 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝을 56 cm의 깊이로 타입시키기 위한 향타수(각각 274타와 275타)에 해당된다. 또한 76 cm의 관입깊이에서 완전개단말뚝의 전체지지력은 832 kg이며,

관입깊이 56 cm에서 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝의 전체지지력은 각각 786 kg과 753 kg으로 측정되었다. 그러므로 항타수를 기준으로 할 때 완전개단말뚝의 전체지지력은 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝에 대한 전체지지력의 1.06배와 1.10배로, 폐단말뚝의 전체지지력보다 약간 크게 된다. 따라서 PHC말뚝의 선단부를 개방시켜서 사용하면 관입깊이가 증가되기 때문에 전체지지력은 폐단말뚝과 같거나 오히려 약간 클 것으로 사료된다.

개단 PHC말뚝이 타입되는 동안에 말뚝 선단부의 파손여부를 알아보기 위해서는 관내토에 의하여 말뚝의 내벽에 작용되는 수평응력과 고강도 콘크리트의 인장강도 등을 알아야 한다. 먼저 관내토에 의한 수평응력을 계산하기 위하여 아래와 같은 두가지 가정이 사용되었다.

(1) 관내토에 의한 수평응력은 하중이 측정되는 점들 사이에서는 일정하다.

(2) 계산의 간편성을 위하여 말뚝의 벽면마찰각, δ 는 원지반에 대한 값과 동일하다.

이러한 가정에 근거하면 관내토의 수평응력은 식 (1)에 의하여 계산될 수 있다.⁽²⁾

$$\sigma_{hs,ij} = \frac{Q_{p,i} - Q_{p,j}}{\pi B_i \Delta Z_{ij} \tan \delta} \quad (1)$$

여기서,

$\sigma_{hs,ij}$ = i점과 j점의 중간위치에서 관내토의 수평응력

$Q_{p,i}, Q_{p,j}$ = i점과 j점에 부착된 strain gauge로부터 측정된 하중

ΔZ_{ij} = i점과 j점간의 거리

B_i = 말뚝의 내경(=29.9 mm)

말뚝 선단부의 파괴를 유발시키는 관내토의 수평력, F_{plug} 는 PHC말뚝에 사용되는 고강도 콘크리트의 인장력, F_c 와 말뚝에 배근된 나선(spiral)철근에 의한 인장력, F_s , 그리고 말뚝의 외벽에서 작용하는 토압, F_{out} 에 의하여 지지된다(그림 8 참고).

먼저 단위길이의 말뚝에 작용하는 관내토에 의한 x방향의 수평력은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$F_{plug} = 2 \int_0^{n/2} \sigma_{hs} \cos \theta \frac{B_i}{2} d\theta = \sigma_{hs} B_i \quad (2)$$

그리고 PHC말뚝에 사용되는 고강도 콘크리트의

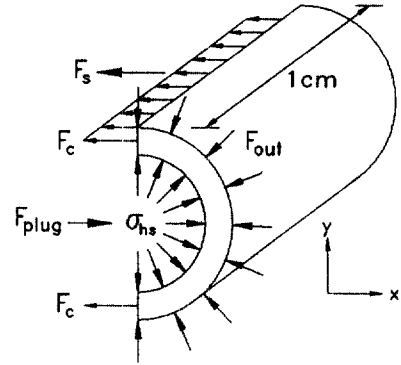


그림 8. 말뚝에 작용하는 힘요소

압축강도는 800 kg/cm^2 이고, 인장강도는 $\sigma_{ct} = 55 \text{ kg/cm}^2$ 이며, 탄성계수는 $E_c = 4.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이다.⁽⁴⁾ 따라서 말뚝의 벽두께가 t인 단위길이의 말뚝에 작용하는 콘크리트의 인장력은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$F_c = \sigma_{ct} t = 55 t \quad (3)$$

또한 단위길이의 말뚝에 배근된 나선철근의 단면적이 A_s 이고 탄성계수가 E_s 이며, 콘크리트의 인장과 괴시 변형율이 $\epsilon_c (= 1.80 \times 10^{-4})$ 일 때⁽⁴⁾ 나선철근에 의한 수평력은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$F_s = E_s \epsilon_c A_s \quad (4)$$

한편 말뚝의 외경이 $B_o (= 42.7 \text{ mm})$ 이고 지반이 매우 조밀한 경우, 말뚝의 외벽에 작용하는 수평응력이 원지반 수평응력, σ_{ho} 의 약 1.88배인 것을 고려하면⁽³⁾ 단위길이의 말뚝에 대한 토압에 의한 수평력은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$F_{out} = 1.88 \sigma_{ho} B_o \quad (5)$$

일반적으로 기존 $\phi 350$ A형 PHC말뚝의 경우 선단부에서 나선철근의 배근간격은 50 mm이며, 나선철근의 직경은 3.2 mm이다. 이것을 0.13배로 축소된 모형말뚝에 적용하면 나선철근의 직경은 0.416 mm이고, 말뚝 선단부에서의 배근간격은 6.5 mm, 단위 길이당 나선철근의 단면적은 $A_s = 0.0021 \text{ cm}^2$ 로 된다. 그리고 INSTRON 8506을 이용한 나선철근의 인장 실험으로부터 철근의 탄성계수는 $E_s = 1.81 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 으로 구해졌다. 이러한 값들과 원지반의 응력 상태($\sigma_{vo} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ho} = 0.4 \text{ kg/cm}^2$)를 이용하면

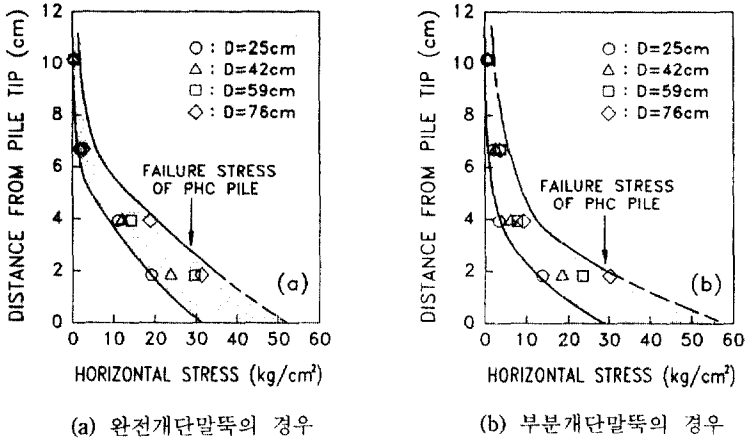


그림 9. 말뚝 내벽에 작용하는 관내토의 수평응력

단위길이의 말뚝에 작용하는 힘요소들은 $F_c=35.2$ kg, $F_s=0.68$ kg, 그리고 $F_{out}=3.21$ kg으로 계산된다. 이때 말뚝의 선단부가 파괴되지 않기 위해서는 관내토의 수평력이 콘크리트와 나선철근에 의한 인장력과 외벽에 작용하는 토압의 합보다 작아야 한다. 이러한 점을 고려하면 말뚝의 선단부가 파괴되지 않기 위해서는 개단 PHC말뚝이 식 (6)의 조건을 만족해야만 한다. 그러므로 개단 PHC말뚝의 경우 관내토에 의한 수평응력이 25.07 kg/cm²보다 작은 경우에만 말뚝이 파괴되지 않게 된다.

$$F_{plug} < 2(F_c + F_s) + F_{out} \quad (6)$$

그림 9는 완전개단말뚝과 부분개단말뚝의 선단부에 작용하는 관내토의 수평응력을 계산한 것이다. 말뚝의 내벽에 작용하는 관내토의 수평응력은 말뚝의 관입깊이가 증가할수록 폐색정도의 증가로 인하여 커지는 경향을 보이고 있으며, 선단부에서는 원지반 수평응력의 75~150배에 해당하는 매우 큰 응력이 말뚝 벽면에 작용하고 있다. 따라서 본 실험의 경우에 완전개단말뚝은 말뚝 선단부로부터 내경의 1.1배되는 지점까지, 그리고 부분개단말뚝은 선단부로부터 내경의 0.8배되는 지점까지 관내토 수평응력이 파괴응력을 넘고 있다.

또한 현장에서 말뚝의 관입깊이가 매우 깊어져서 지반의 수평응력이 더욱 커질 경우에는 관내토에 의한 수평응력 또한 어느정도까지는 지반응력에 비례하여 커지게 되므로⁽³⁾ 이런 경우에는 말뚝 선단

부의 손상정도가 더욱 커질 것으로 생각된다. 그러므로 PHC말뚝의 선단부를 개방시켜서 사용하기 위해서는 최소한 관내토지지력의 90% 이상을 지지하는 말뚝선단부로부터 내경의 2배되는 영역이 보장되어야 하며, 보장방법으로는 말뚝 선단부에 배근되는 나선철근의 배근간격을 좁히거나 철근의 강도를 증가시키는 것 등을 들 수 있다.

또한 부분개단말뚝의 선단부 파괴범위는 완전개단말뚝의 경우보다 약간 작기는 하지만 말뚝 선단부에 작용하는 관내토의 수평응력은 완전개단말뚝의 경우와 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. 이것은 내주면마찰의 감소를 위한 말뚝 선단부의 직경과 말뚝 내경의 차이가 그리 크지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서 관내토에 의한 수평응력을 더욱 감소시키기 위해서는 말뚝 선단부의 직경과 말뚝내경의 차이를 더욱 크게 하여야 한다. 그러나 PHC말뚝의 선단부를 부분개방으로 할 경우에는 완전개방시에 비하여 제조과정이 복잡하게 되므로 경제성의 비교가 검토되어야 한다.

6. 개단 PHC말뚝의 실용화에 따른 장점

개단 PHC말뚝이 실용화될 경우에 유발되는 장점으로는 말뚝의 타입성(drivability)향상과 항타시 발생하는 소음과 진동의 감소등을 들 수 있다. 말뚝의 선단부를 개방(open)시키면 말뚝 선단부에 존재하는 흙이 말뚝 내부로 유입됨에 따라 관입저항

력이 감소되어 타입성이 증가하게 된다. 따라서 말뚝이 지지층까지 확실히 설치되어 지지력이 증가될 수 있으며, 항타중에 말뚝이 파괴되는 정도가 폐단 말뚝의 경우에 비하여 상당히 감소하게 되므로⁽⁹⁾ 시공성이 향상될 수 있다.

한편 최근들어 도심지에서의 소음규제등으로 인하여 말뚝의 중공부를 통해 나선오가(spiral auger)로 선단지반을 선굴착하면서 말뚝을 압입하는 속파기공법등의 저공해공법이 현장에 도입되고 있다. 그러나 PHC말뚝에 이러한 공법들을 적용하기 위해서는 말뚝의 선단부를 개방시키는 것은 필수적이다. 그러므로 PHC말뚝의 선단부를 개방시키면 몇몇 저공해공법의 도입이 가능하게 되며, 항타공법으로 시공하는 경우에도 관입저항력이 감소되어 항타로 인한 소음 진동의 감소가 가능하게 된다.

7. 결 론

사질토 지반에서 개단 PHC말뚝의 실용성 검토를 위하여 토중에서 모형실험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 완전개단말뚝의 관입저항력은 폐단말뚝의 경우보다 29~44% 정도 작았으며, 이 관입저항력의 차이는 말뚝의 관입깊이가 증가함에 따라 폐색정도의 증가로 인하여 점차 감소한다.
2. 완전개단말뚝의 전체지지력은 관입초기에 폐단말뚝의 경우보다 약 30% 정도 작으나, 관입깊이가 증가함에 따라 폐단말뚝에 대한 전체지지력의 약 90% 정도까지 증가한다. 그러므로 관입깊이가 깊은 곳에서 개단말뚝과 폐단말뚝의 전체지지력 차이는 그다지 크지 않을 것으로 사료된다.
3. 관입초기에 평면폐단말뚝의 선단지지력은 원추폐단말뚝의 선단지지력보다 크지만, 관입깊이가 증가되면서 평면폐단말뚝의 선단부에 흠뻑이의 형성으로 인하여 원추폐단말뚝과 평면폐단말뚝의 선단지지력은 거의 같아진다.
4. 관입초기에 완전개단말뚝의 외주면마찰력은 폐단말뚝에 대한 외주면마찰력의 30~50%에 불과하며, 관입깊이가 증가하면서 그 차이는 상당히 줄어들지만 결코 같아지지는 않는다.
5. 개단 PHC말뚝은 타입성의 증가로 인하여 동일 항타수에 대하여 폐단말뚝보다 관입깊이가 깊어지게

된다. 따라서 동일 항타수에 대하여 얻어지는 말뚝의 전체지지력은 개단 PHC말뚝이 폐단 PHC말뚝보다 클 수도 있다.

6. 완전개단말뚝과 부분개단말뚝이 매우 깊은 깊이로 타입될 경우에는 말뚝 선단부에 균열이 발생할 것으로 예상된다. 그러므로 PHC말뚝의 선단부를 개방시켜서 사용하기 위해서는 말뚝의 선단부에 설치되는 나선철근의 배근간격을 좁히거나 철근의 강도를 증가시키는 것과 같은 보강대책이 수립되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호 : 931-1200-005-2)의 목적기초 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 대립콘크리트공업(주), Pile 선단연구, 연구보고서, 1992.
2. 백규호, 이종섭, 이승래, "모래지반에 타입된 모형 개단강관말뚝의 지지력 분석", **한국지반공학회지**, Vol. 9, No. 1, 1993, pp. 31-44.
3. 백규호, 이종섭, 이승래, "지반조건의 변화가 개단 강관말뚝의 지동에 미치는 영향", **한국지반공학회지**, Vol. 9, No. 3, 1993, pp. 23-34.
4. 장효완, 주성문, 말뚝기초 설계편람, 탐구문화사, 1991.
5. Carter, J.P., Randolph, M.F. and Wroth, C.P., "Some Aspects of the Performance of Open- and Close-Ended Piles", *Numerical Method in Offshore Piling*, London, 1979, pp. 165-170.
6. Durgunoglu, H.T. and Mitchell, J.K., "Static Penetration Resistance of Soil: II-Evaluation of Theory and Implication for Practice", *Proc. of the Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol. 1, 1975, pp. 152-189.
7. Klos, J. and Teichman, A., "Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles", *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 2, 1981, pp. 751-753.
8. Lu, S.S., "Pile Driving Practice in China", *Proc. of International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles*, San Francisco, Vol. 1, 1985, pp. 13-20.

9. Nakagawa, H. and Matsubara, N., "Improvement of Driving Penetrability of Concrete Piles Driven into Hard Ground", *Proc. of International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles*, San Francisco, Vol. 1, 1985, pp. 113-116.
10. Paikowsky, S.G. and Whitman, R.V., "The Effect of Plugging on Pile Performance and Design", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, 1990, pp. 429-440.
11. Smith, I.M., To, P. and Wilson, S.M., "Plugging of Pipe Piles", *Proc. of the 3rd International Conference on Numerical Method in Offshore Piling*, Nantes, France, 1986, pp. 53-73.
12. Soo, C.F., Lin, C.C., Wang, R.F., Ou, C.D. and Moh, Z.C., "Plugging of Open-End Steel Pipe Piles", *Proc of the 6th Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Taipei, 1980, pp. 315-325.
13. Szechy, C.H., "Tests with Tubular Piles", *Acta Technica of the Hungarian Academy of Science*, Vol. 24, 1959, pp. 181-219.
14. Szechy, C.H., "The Effect of Vibration and Driving upon the Voids in Granular Soil Surrounding a Pile", *Proc. of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Vol. 2, 1961, pp. 161-164.
15. Uchiyama, K., Machinaga, K. and Fuji, T., "The Failure of Prestressed Concrete Piles", *Proc. of International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles*, San Francisco, Vol. 1, 1985, pp. 145-148.
16. Yamagata, K., Fukuya, T. and Omote, S., "Penetrability of Open Ended Steel Pipe Piles on Land", *Proc. of International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles*, San-Francisco, Vol. 1, 1985, pp. 123-126.

(接受：1994. 3. 1)