말뚝직경이 개단말뚝의 폐색정도와 지지력에 미치는 영향

Effects of Pile Diameter on the Plugging Rate and Bearing Capacity of Open-Ended Piles

백 규 호*1
Paik, Kyu-Ho
김 영 상*2
Kim, Young-Sang
이 승 래*3
Lee, Seung-Rae

Abstract

Model pile tests, using a calibration chamber in which the stress state and the relative density can be controlled, were performed in order to study the effects of pile diameter on the plugging rate and bearing capacity of open-ended pile. The model piles used in the test series were devised so that the bearing capacity of an open-ended pile could be measured out into three components. The test results showed that fully plugging depth of an open-ended pile increased with increase in pile diameter and soil density. Moreover, it was found that unit plug capacity decreased with increase in pile diameter, though the penetration ratio or plugging rate of piles was constant. However, the existing formulae for estimation of plug capacity give plug capacity which is constant or increased with increase in pile diameter, when penetration ratio or plugging rate of piles is equal. Thus, it is proposed that the effect of pile diameter as well as plugging rate on bearing capacity of pile must be considered in plug capacity estimation.

요 지

말뚝직경이 개단말뚝의 폐색정도와 지지력에 미치는 영향을 규명하기 위하여 응력상태와 상대밀도의 조절이 가능한 토조와 직경이 다른 세개의 모형말뚝을 이용하여 모형말뚝실험을 수행하였다. 모형말뚝은 말뚝의 지지력 성분을 분리측정하기 위하여 직경이 다른 두개의 파이프로 만들어 졌다. 실험결과에 의하면 말뚝이 완전폐색 상태로 되는 관입깊이는 말뚝직경과 지반의 상대밀도가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있었으며, 관입비와 관내토 중분비가 동일하더라도 단위 관내토 지지력은 말뚝의 직경이 커질수록 감소하는 경향을 보였다. 그러나 기존의 지지력

*1 정회원, 포스코개발(주) 기술연구소 주임연구원
*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*3 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

산정식은 말뚝의 관입비나 폐색정도가 동일한 상태에 대하여 관내토 지지력은 말뚝의 직경에 관계없이 일정하거나 직경이 증가할수록 커지는 결과를 주고 있다. 이는 본 연구의 실험결과와 상반되는 것으로서 관내토 지지력의 산정시 말뚝의 폐색정도 뿐만 아니라 크기효과도 고려하는 것이 필요한 것으로 밝혀졌다.

Keywords : Scale Effect, Open-Ended Pipe Pile, Plugging Effect, Calibration Chamber Test.

1. 서 론

말뚝의 거동은 지반의 응력상태와 상대밀도 등의 지반조건과 말뚝의 직경, 선단부 형상, 관입깊이, 설치방법, 벽면 거칠기 등의 말뚝조건에 따라 크게 달라진다. 따라서 말뚝의 지지력을 산정하는 대부분의 산정식들은 지반의 강도정수와 말뚝의 직경 및 관입깊이 등을 변수로 사용하므로써 이들 요소들이 지지력에 미치는 영향을 산정식에 반영하고 있다. 그러나 말뚝의 직경이 지지력에 미치는 영향인 크기효과(scale effect)는 아직까지도 정량적 뿐만 아니라 정성적으로도 논란의 대상이 되므로써 지지력 산정식의 신뢰도를 떨어뜨리는 요소로 작용하고 있다.

이제까지의 연구결과에 의하면 말뚝의 단위면적당 지지력은 말뚝 직경에 영향을 받으며, 폐단말뚝의 경우 동일한 관입깊이에서 말뚝의 직경이 커지면 상대적으로 작은 단위 극한 선단지지력을 갖고 직경이 작은 말뚝에서는 높은 단위 극한 선단지지력이 발생하는 것으로 알려져 있다(Kerisel, 1958). 이러한 크기효과는 공동확장이론(cavity expansion theory)과 한계관입깊이(critical depth)를 이용하여 설명될 수 있다(Vesic, 1970, 1972). 즉, 말뚝이 지지층에 관입되면 말뚝의 선단부에는 탄환모양의 소성변형 영역이 형성되며, 이러한 소성영역은 한계 관입깊이에 도달해서야 완전한 모양으로 된다. 따라서 말뚝의 관입깊이가 깊은 상태에서는 이 소성영역이 완전한 모양으로 되기 때문에 단위 면적당 선단지지력이 최대로 되지만, 소성영역이 완전한 모양에 이르지 못하는 관입깊이가 얕은 상태에서는 말뚝의 단위 면적당 선단지지력이 상대적으로 작게 된다는 것이다(Berezantsev 등, 1961). 그러나 말뚝의 선단부가 열린채로 시공되는 개단말뚝의 경우에는 말뚝의 직경이 변화함에 따라 크기효과 뿐만 아니라 폐색정도(plugging rate)도 지지력에 영향을 미치기 때문에 폐단말뚝의 경우와는 또 다른 해석이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 말뚝의 직경변화가 개단말뚝의 관내토 거동과 지지력에 미치는 영향을 규명하기 위하여 두가지 상태의 지반조건에 대하여 응력조절이 가능한 토조와 직경이 다른 세개의 모형 개단말뚝을 이용하여 실내모형실험을 수행하였다. 또한 실험을 통하여 개단말뚝이 일정한 폐색상태에 도달하는 관입깊이를 말뚝의 관입비로 규정하는 현재의 방법에 대한 타당성과 개단말뚝의 경제적인 시공조건에 대해서도 검토하였다.

2. 말뚝직경이 개단말뚝의 거동에 미치는 영향

일반적으로 개단말뚝의 폐색정도는 말뚝의 관입깊이 증분 대비 관내토 길이의 증분으로 정의되는 관내토 증분비(incremental plug length ratio, γ)에 의하여 파악될 수 있으며, 관내토 증분비의 크기가 $\gamma \geq 100\%$일때는 완전개방상태로, $0\% < \gamma < 100\%$일때는 부분개방상태로 $\gamma = 0\%$일때는 완전폐색상태로 규정되고 있다(백규호 등, 1993a). 이러한 폐색정도는 말

뚝의 관입깊이 뿐만 아니라 말뚝의 직경에 따라서도 변하는 것으로 알려져 있으나, 말뚝 관입깊이에 의한 영향을 규명하기 위한 노력은 많은 실험을 통하여 행해진 반면 말뚝 직경이 폐색정도에 미치는 영향은 소수의 모형실험을 통해서만 정성적으로 밝혀진 바 있다.

Szechy(1959)는 개단말뚝의 직경이 작아질수록 말뚝 내부에 형성되는 관내토의 간극비도 작아진다는 모형실험의 결과를 통하여 말뚝직경이 말뚝의 폐색정도와 관내토지지력에 관련됨을 규명하였다(그림 1). 즉, 개단말뚝의 직경이 작아질수록 관내토의 다짐정도가 증가하므로 동일한 관입깊이에서 큰 직경의 말뚝보다는 작은 직경의 말뚝이 더 빨리 폐색되며, 관내토의 상부보다는 하부의 다짐정도가 크게 나타났다.

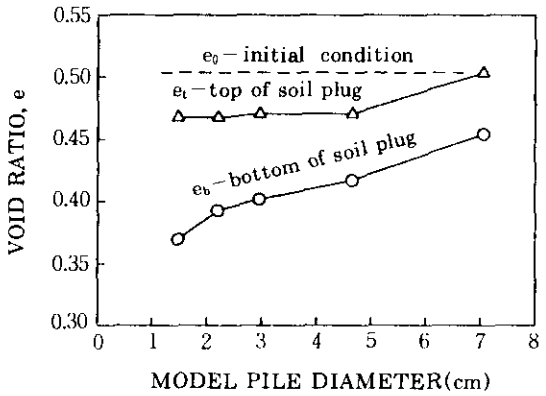
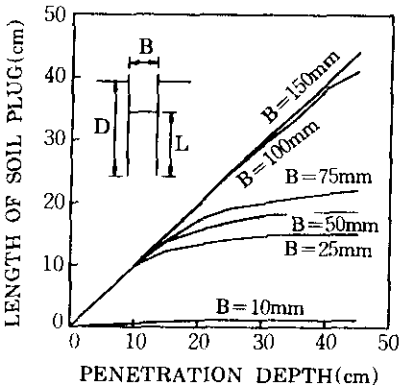
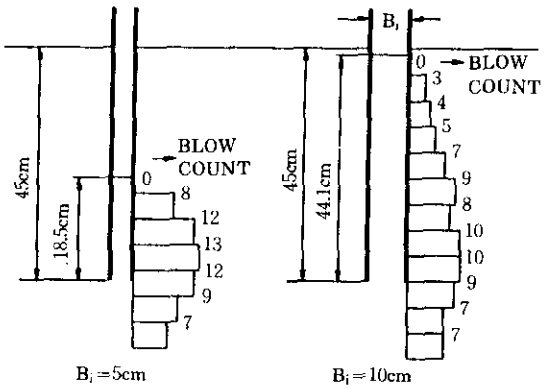


그림 1. 말뚝 직경에 따른 관내토 간극비의 변화 (Szechy, 1959)

그리고 Kishida(1967)는 직경이 다른 다섯개의 개단말뚝을 동일한 깊이로 타입하면서 말뚝내부에 형성되는 관내토의 높이 변화를 측정하였으며, 직경이 50mm와 100mm인 말뚝에 대해서는 관내토에서 직경 6mm의 모형 원추를 이용하여 항타시험을 수행하였다(그림 2). 실험결과 직경이 25~75mm인 말뚝은 30~45 cm의 관입깊이에서 관내토 길이가 더 이상 증가하지 않는 완전폐색상태에 도달하지만, 직경이 100mm와 150mm인 말뚝은 관입깊이가 45cm에 도달할 때 까지도 관내토가 거의 선형적으로 증가해서 부분폐색상태와 완전개방상태로 존재하였다. 이처럼 개단말뚝의 타입시에 발생하는 관내토는 말뚝의 관입깊이는 물론 직경에 따라서도 그 거동이 틀려진다. 또한 말뚝의 직경이 50mm에서 100mm로 두배 커짐에 따라 관내토의 높이도 두배 이상 증가하였으나, 말뚝 선단부에서 관내토에 타입된 원추의 타격회수는 오히려 13타에서 10타로 감소하였다. 이것으로부터 말뚝의 직경이 작을수록 관내토의 다짐정도가 커져서 말뚝의 폐색정도가 증가하기 때문에 관내토의 높이는 작아지는 것



(a) 말뚝의 관입깊이에 따른 관내토의 상태



(b) 말뚝 직경에 따른 관내토의 다짐정도

그림 2. 모래지반에 타입된 모형 개단말뚝의 시험결과 (Kishida, 1967)

을 알 수 있다. 이러한 현상은 이암(mudstone)에 직경이 다른 두개의 개단말뚝을 이용하여 현장실험을 수행한 Matsumoto와 Takei (1991)의 실험결과와 동일하다.

한편, 말뚝의 지지력은 말뚝이 관입될 때 말뚝의 외부로 밀리는 흙의 체적과도 관계되며, 외부로 밀리는 흙의 체적은 개단말뚝의 직경에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Azzouz, 1986 : Szechy, 1959). 즉, 사질토 지반에서 말뚝의 직경이 작아서 관내토가 조밀해지면 폐색효과가 커지게 되므로 더 많은 양의 흙이 말뚝의 외부로 밀리게 되고, 결국 주변지반의 밀도증가로 인하여 말뚝의 지지력은 상당히 향상된다. 그러나 말뚝의 직경이 커지면 관내토는 상대적으로 느슨해져서 폐색정도가 떨어지게 되므로 말뚝의 외부로 밀리는 흙의 양이 작아지게 되고, 결국 말뚝 주변지반의 밀도증가가 크지 않게 되어 직경이 작은 경우에 비해서 지지력의 증가는 상대적으로 작게 된다. 따라서 Szechy(1959)는 말뚝의 직경이 클수록 지지력의 증가보다는 관입에너지의 증가와 극한지지력 상태에서 말뚝의 침하량이 더욱 커질 수 있기 때문에 지지력의 실질적인 증가를 위해서 개단말뚝의 직경을 무조건 증가시키는 것은 경제적이지 못하다는 결과를 보고한 바 있다.

3. 모형말뚝 실험

3.1 실험장치 및 기구

본 연구에 사용된 실험장치로는 응력조절이 가능한 토조와 직경이 다른 세종류의 모형말뚝을 들 수 있다. 먼저 실험에 사용된 토조는 크게 지반이 조성되는 용기와 이 용기에 지반 조성을 위하여 건조모래를 낙하시키는데 필요한 지반조성장치로 구성되어 있다. 용기는 직경이 775mm이고 높이가 1250mm로, 본 실험에 사용된 최대 직경의 모형말뚝(외경=89.1mm)과 비교할 때 직경비는 약 8.7에 이른다. 이 값은 일반적인 모래지반에서 변형률 경로기법(strain path technique)을 이용하여 계산된 폐단말뚝 선단부에 발생하는 소성영역의 크기인 말뚝직경의 7.5배보다 큰 값으로, 말뚝의 타입에 의하여 발생하는 소성영역이 토조내에 존재하므로 말뚝의 거동에 대한 경계효과(boundary effect)는 본 실험에서는 그다지 크지 않을 것으로 기대된다(Baligh, 1985). 그리고 토조의 내부에는 옆면과 밑면에 고무막(membrane)을 설치하여 수평응력과 수직응력을 독립적으로 제어할 수 있도록 하였다(백규호 등, 1993a).

또한, 말뚝의 직경변화에 따른 개단말뚝의 지지력 특성과 관내토의 거동특성을 알아보기 위하여 표1 과 같이 직경이 다른 세개의 모형말뚝이 사용되었다. 그리고 말뚝의 외경과 내경의 비가 말뚝의 거동에 영향을 미친다는 연구결과에 따라 이들 세개의 모형말뚝은 외경 대비 내경의 비를 0.82 내외로 거의 일정하게 유지시켰다.(Szechy, 1959).

표 1. 모형말뚝의 규격

외경 (mm)	내경 (mm)	벽두께 (mm)	내경/외경	길이 (mm)
42.7	36.5	3.1	0.85	908
60.5	47.8	6.35	0.79	908
89.1	74.2	7.4	0.83	908

각 모형말뚝은 직경이 다른 두개의 파이프로 구성되어 있으며, 지지력의 분리측정을 위하여 그림 3과 같이 내부와 외부파이프에 각각 18개와 2개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 개단 말뚝의 선단지지력(관내토 지지력과 말뚝 단면부 지지력의 합)은 내부파이프의 가장 위에 부착된 게이지를 통하여 측정되며, 말뚝의 단면부에 작용하는 지지력은 내부파이프의 가장 하단부에 부착된 두개의 게이지로부터 구한 관내토의 마찰응력이 말뚝 선단부까지 일정하게 작용한다는 가정하에 외삽법(extrapolation)에 의하여 구해졌다(그림 4). 그리고 외주면마찰력은 하중계(load cell)로 부터 얻어지는 전체지지력과 선단지지력의 차이로 구해지며, 이 값

은 외부파이프에 부착된 스트레인 게이지를 이용하여 검증하였다.

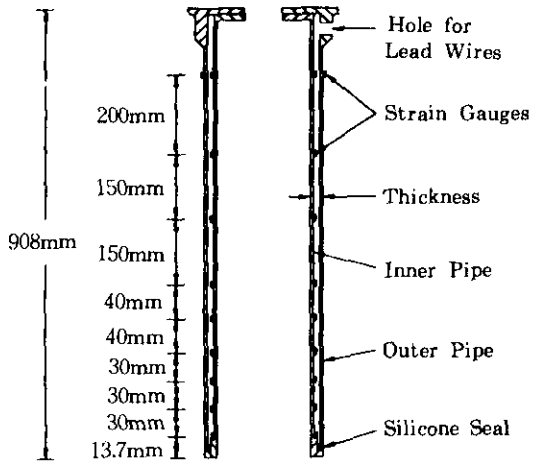


그림 3. 모형 개단말뚝의 개략도

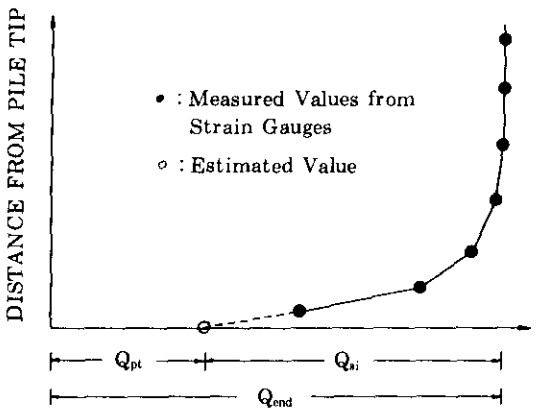


그림 4. 관내토지지력(Q_{si})과 말뚝 단면부지지력(Q_{pt})의 산정방법

3.2 시료와 지반조성

지반조성을 위하여 사용된 시료는 균등계수(Cu)가 2.21이고 곡률계수(Cc)가 1.23인 한강모래로 비중은 2.64이며 통일분류법에서 SP로 분류되었다. 그리고 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 1.62g/cm³와 1.33g/cm³로 구해졌으며, 시료의 유효직경(D_{10})은 0.17mm였다.

토조내 모래지반은 지반의 균질성을 확보하기 위하여 건조모래의 낙하고를 일정하게 유지시키는 낙사법(sand raining method)에 의하여 조성되었으며, 성형되는 지반의 매층당 두께는 10cm로 일정하게 유지시켰다. 그리고 개단말뚝의 거동이 지반의 상대밀도에 상당한 영향을 받는다는 사실을 고려하여 모형지반의 상대밀도를 55%와 90%의 두가지 상태로 조성하였다(백규호 등, 1993b). 이러한 상태로 조성된 지반은 시료의 유효직경에 대한 말뚝직경의 비가 실제와 다르므로써 내적크기효과(internal scale effect)가 발생하여 말뚝의 거동에 영향을 줄 수 있다. 그러나 본 실험에서는 시료의 유효직경에 대한 말뚝직경의 비가 250 이상으로 Peterson(1988)이 내적크기효과가 무시될 수 있는 값으로 제안한 50보다 상당히 크기 때문에 내적크기효과는 무시될 수 있다.

3.3 실험방법

말뚝직경이 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상대밀도가 상이한 두가지 상태의 모형지반에 직경이 각기 다른 세가지 종류의 모형말뚝을 실험하였다. 토조에 조성된 지반은 상대밀도가 55%와 90%이며, 지반에 가해진 압밀응력은 수평응력과 수직응력이 각각 0.4kg/cm²과 1.0kg/cm²이었다.

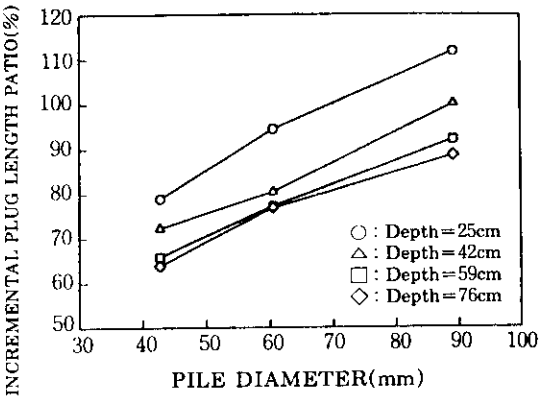
말뚝실험은 토조내에 압력이 일정하게 유지되도록 하기 위하여 모형지반에 압력을 가한지 30시간 경과 후에 실행하였다. 모형말뚝은 무게가 4.0kg인 햄머를 47cm의 높이에서 자유낙하시켜 관입시켰으며, 관입깊이에 따른 폐색정도를 알아보기 위하여 막대자를 이용하여 약 3.5cm의 관입마다 관내토의 높이를 측정하였다. 이처럼 측정된 결과로부터 말뚝의 폐색정도를 나타내는 관내토 충분비(Paikowsky, 1989)와 관내토 길이비(Kindel, 1977)를 계산하였으며, 이들 계산치는 폐색정도가 말뚝의 직경변화에 따른 개단말뚝의 지지력에 미치는 영향을 규명하는데 이용하였다. 또한 직경변화

에 따른 개단말뚝의 타입성과 경제성을 비교·분석하기 위하여 말뚝이 타입되는 동안에 세종류의 말뚝에 대하여 항타수가 측정되었다.

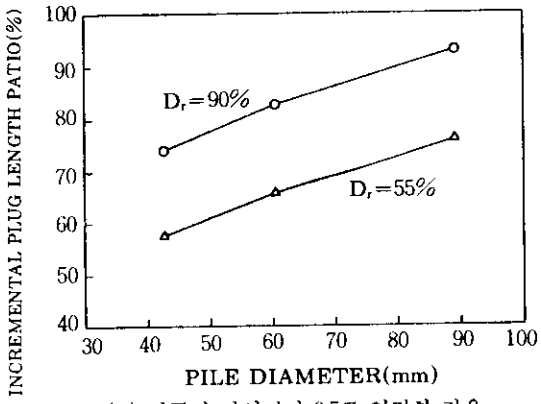
말뚝의 재하시험은 25cm, 42cm, 59cm, 76cm의 깊이에서 연속적으로 행해졌으며, 전체 지지력의 측정을 위하여 말뚝 두부에는 5톤 용량의 하중계(load cell)를 설치하였다. 재하시험 전에 스트레인 게이지는 영점 조정되었으며, 재하시험동안에 게이지의 결과는 데이타로거를 통하여 얻어졌다. 그리고 말뚝의 하중-침하량 특성을 조사하기 위하여 말뚝에 대칭으로 2개의 다이얼게이지를 설치하여 측정치의 평균값을 말뚝의 침하량으로 사용하였다.

4. 실험결과 및 분석

그림 5는 말뚝의 직경변화가 폐색정도에 미치는 영향을 나타낸 것으로, (a)는 상대밀도가 90%인 지반에서 수행한 실험결과로 말뚝의 관입깊이가 일정한 상태에서의 영향을 나타낸 것이고 (b)는 말뚝의 관입비(=관입깊이/말뚝직경)가 8.5로 일정한 상태에서의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 말뚝의 관입깊이가 일정한 상태에서 말뚝의 직경이 작아질수록, 그리고 말뚝의 직경이 일정한 상태에서는 말뚝의 관입깊이가 증가할수록 말뚝의 폐색정도를 나타내는 관내토 증분비가 감소하므로써 말뚝의 폐색정도가 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 5(a)). 또한 말뚝이 관입비와 지반조건이 일정한 상태에서는 말뚝의 직경이 작아질수록, 그리고 말뚝의 직경과 관입비가 일정한 상태에서는 사질토 지반의 상대밀도가 작을수록 역시 말뚝의 폐색정도가 커짐을 알 수 있다(그림 5(b)). 이것은 말뚝의 관입깊이가 증가할수록 관내토와 말뚝간의 마찰력이 커져서 관내토의 다짐정도가 증가하게 되므로 폐색정도가 커지게 되고 지반이 느슨할수록 말뚝을 타입하는 동안에 발생하는 관내토의 다짐정도가 커져서 폐색효과가 커지는 것으로 생각할 수 있다(백규호 등, 1993b).



(a) 말뚝의 관입깊이가 일정한 경우



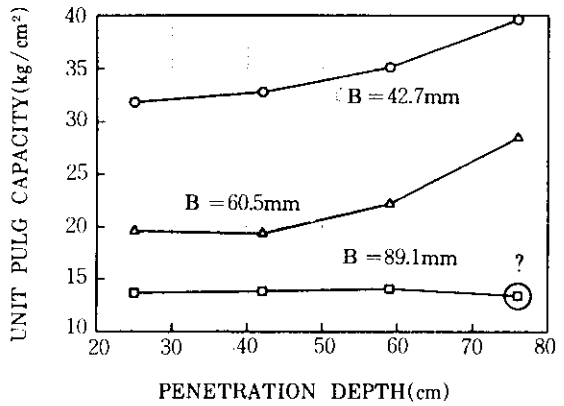
(b) 말뚝의 관입비가 8.5로 일정한 경우

그림 5. 말뚝의 직경변화가 폐색정도에 미치는 영향

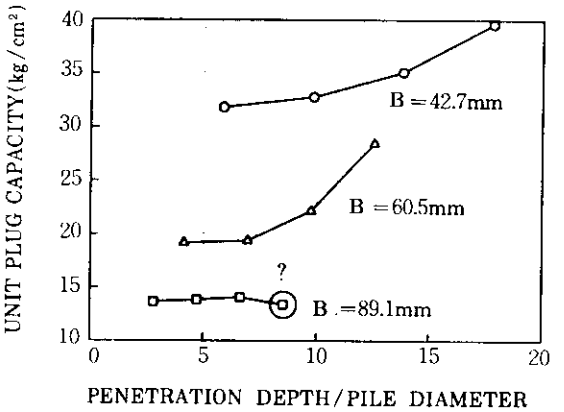
한편, 이제까지 말뚝이 완전폐색 상태에 도달되는 관입깊이는 많은 실험연구를 통하여 제안되어 왔다. Beringen(1979)은 현장실험을 통하여 말뚝이 직경의 15배 이상 관입되면 완전폐색된다고 하였으며, Szechy(1959)는 개단말뚝이 직경의 10배 이상 관입되면 완전폐색상태에 도달되어 지지력이 폐단말뚝의 경우와 거의 같게 된다고 하였다. 그리고 Klos와 Tejchman(1981)은 말뚝의 관입깊이가 직경의 17배 이상되면 개단말뚝과 폐단말뚝의 선단지지력은 큰 차이를 나타내지 않으며, 관입깊이가 직경의 30배 이상되면 주면마찰력의 차이도 무시할 수 있다는 실험결과를 보고한 바 있다. 이처럼 대부분의 연구결과들은 동일한 지반조건 하에서 말뚝의 직경 대비 관입깊이로 정의되는 관입비

에 따라 말뚝의 폐색정도를 규정하였다. 그러나 그림 5(b)에 보이는 바와 같이 지반조건이 동일하고 말뚝의 관입비가 8.5로 일정함에도 불구하고 말뚝의 폐색정도는 말뚝의 직경이 작아짐에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 지반조건이 동일한 경우일지라도 말뚝이 일정한 폐색정도에 도달하는 관입깊이는 단순히 말뚝의 관입비에 의해서만 규정될 수 없음을 알 수 있다.

그림 6은 말뚝의 관입깊이와 관입비가 일정한 경우에, 그림 7은 관내토 길이비와 관내토 증분비가 일정한 경우에 말뚝의 직경 변화에 따른 단위 면적당 관내토 지지력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일 말뚝 직경에 대하여 말뚝의 관입깊이와 관입비가 커질수록 말뚝의 폐색정도 증가로 인하여 단위 면적당 관내토 지지력은 증가하였으며, 말뚝의 관입깊이와 관입비가 동일한 상태에서도 말뚝의 직경이 작아질수록 단위 면적당 관내토 지지력은 커지는 경향을 보였다(그림 6). 또한 동일한 말뚝 직경에 대하여 말뚝의 폐색정도를 나타내는 관내토 길이비와 관내토 증분비가 작아질수록(즉 폐색정도가 커질수록)단위 면적당 관내토 지지력은 증가하는 경향을 보였으며, 말뚝의 관내토 길이비와 관내토 증분비가 일정한 상태에서도 말뚝의 직경이 작아질수록 단위 면적당 관내토 지지력은 커지는 경향을 보였다(그림 7).

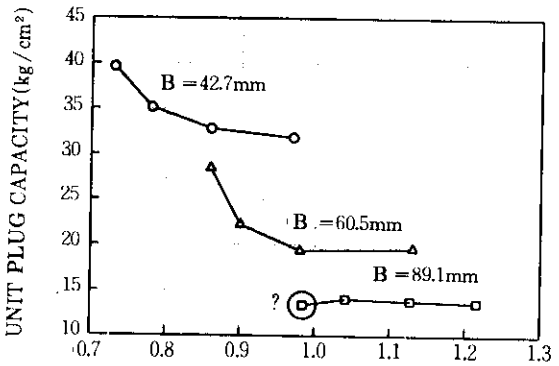


(a) 관입깊이에 따른 변화

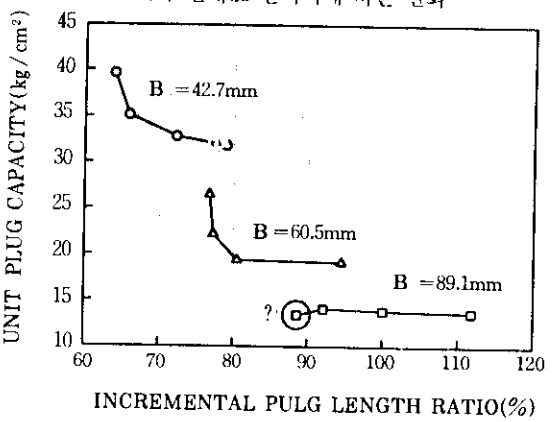


(b) 관입비에 따른 변화

그림 6. 말뚝의 관입깊이에 따른 단위 관내토 지지력의 변화



(a) 관내토 길이비에 따른 변화



(b) 관내토 증분비에 따른 변화

그림 7. 말뚝의 폐색정도에 따른 단위 관내토 지지력의 변화

이러한 실험결과는 일반적으로 관내토 지지력의 산정을 위하여 사용하고 있는 지지력 산정식의 계산 결과가 나타내는 경향과 일치하지 않는 것이다. 즉 해상구조물의 기초설계에 많이 사용되는 API Code(1991)의 경우에는 지반조건과 말뚝의 관입깊이만 동일하면 말뚝의 직경에 무관하게 같은 크기의 단위 면적당 관내토 지지력이 발휘되는 것으로 하고 있다. 그리고 관내토 지지력의 산정을 위하여 Randolph 등(1991)이 관내토 1차원 해석법을 이용하여 제안한 아래의 식은 관내토 지지력을 상당히 과소평가하는 결과를 줄 뿐만 아니라 관내토 길이비가 일정한 경우에도 직경이 커지면 단위 면적당 관내토 지지력이 증가하는 실험결과와 상반된 결과를 주고 있다(그림 8).

$$q=e^{\frac{4\beta}{B}L_w}\left(\frac{\gamma B}{4\beta}+\gamma L_u\right)-\frac{\gamma B}{4\beta}$$

여기서,

q=단위 면적당 관내토 지지력

γ, B=지반의 단위중량과 말뚝의 직경

β=말뚝과 관내토간의 마찰계수(0.15~0.23)

L_w=관내토와 말뚝간에 마찰이 발생되는 관내토 길이

L_u=관내토와 말뚝간에 마찰이 발생되지 않는 관내토 길이

그림 8은 개단말뚝의 폐색정도를 규정하는 기준의 하나인 관내토 길이비(PLR=관내토 길이/관입깊이)가 0.98이고 마찰계수(β)는 Randolph 등(1991)이 제안한 값의 상한치와 하한치인 0.23과 0.15인 경우에 대한 관내토 1차원 해석법의 결과를 보여주는 것으로, 계산에 필요한 각종 변수값은 실험으로부터 측정된 표 2의 값을 사용하였다.

표 2. 관내토 1차원 해석에 사용된 변수값

말뚝직경 (mm)	관입깊이 (cm)	L_w (cm)	L_u (cm)	관내토 길이비
42.7	25.85	17.2	7.9	0.971
60.5	42.0	23.2	18.0	0.981
89.1	71.7	35.2	35.6	0.987

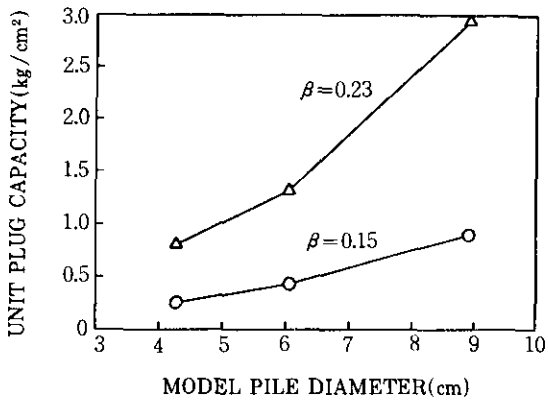


그림 8. 관내토 1차원 해석법에 의한 말뚝직경에 따른 단위 관내토지지력의 변화

이처럼 기존의 지지력 산정식들은 말뚝의 직경이 관내토 지지력에 미치는 영향을 정량적으로는 물론 정성적으로도 반영하지 못하므로써 개단말뚝의 지지력을 실제보다 과대 혹은 과소평가 할 수 있는 소지를 갖고 있다. 따라서 보다 정확한 지지력 산정을 통한 경제적인 시공을 위해서는 말뚝의 폐색효과 뿐만 아니라 직경변화에 따른 지지력의 변화를 고려한 지지력

표 3. 직경변화에 따른 개단말뚝의 경제성 비교(관입깊이 59cm의 경우)

말뚝직경	Q_t(kg)	항타수	수정항타수	Q_t/항타수	Q_t/수정항타수
42.7mm	610 kg	118	118	5.17 kg	5.17 kg
60.5mm	1113 kg	244	174	4.56 kg	6.39 kg
89.1mm	1671 kg	431	239	3.88 kg	6.98 kg

(주) Q_t : 개단말뚝의 전체지지력

수정항타수 = 항타수×적정 햄머중량(톤)÷2.5톤

산정식의 개발이 시급하다.

표 3은 말뚝의 직경변화에 따른 경제성을 비교한 것으로, 실험에 사용된 직경이 42.7mm, 60.5mm, 89.1mm인 모형말뚝을 각각 현장에서 일반적으로 사용되는 406mm×8t, 609mm×9t, 914mm×10t의 실물 강관말뚝으로 가정하였다. 그리고 디젤햄머의 선정기준(일본도로협회, 1993)에 의하면 직경 406mm, 609mm, 914mm의 강관말뚝에 대한 적정 햄머가 각각 2.5톤 3.5톤, 4.5톤이므로 실험에서 동일 항타에너지를 기준으로 측정된 각 항타수를 각 말뚝의 제원에 적합한 항타에너지에 대한 항타수로 변환하기 위하여 2.5톤에 해당하는 항타에너지를 기준으로 하여 각 모형말뚝의 타입에 소요된 항타수를 표 3과 같이 보정하였다.

위 표에서 보이듯이 개단말뚝의 직경이 커지면 말뚝의 관입저항력이 증가함에 따라 말뚝을 설치하는데 소요되는 항타수도 증가한다. 그리고 단위 항타수당 얻어지는 말뚝의 지지력을 알아보기 위하여 위 표에서 항타수를 이용하는 경우, 즉 말뚝의 직경에 관계없이 일정 중량의 햄머를 사용하는 경우에는 단위 항타수당 얻어지는 말뚝의 전체지지력은 말뚝의 직경이 커질수록 감소하게 된다. 그러나 위 표에서 수정 항타수를 사용하는 경우, 즉 말뚝의 직경에 적절한 햄머를 사용하여 말뚝을 시공하는 경우에는 단위 항타수당 얻어지는 말뚝의 전체지지력이 말뚝의 직경이 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 따라서 본 실험결과에 의하면 말뚝기초의 시공시에 해당 말뚝의 제원에 적합한 햄머를 사용하면 개단말뚝의 직경이 증가하여도 작은 직경의 말뚝과 비교하여 충분한 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

말뚝의 직경이 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 토조와 모형말뚝을 이용한 실내모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 지반조건에서 말뚝의 관입비가 일정하더라도 폐색정도는 말뚝의 직경이 커질수록 감소하는 경향을 보이므로 개단말뚝이 일정한 폐색상태에 도달하는 관입깊이는 단순히 말뚝의 관입비로 규정될 수 없다.

2. 개단말뚝의 관입비와 폐색정도를 나타내는 관내토 길이비 및 관내토 증분비가 동일함에도 불구하고 말뚝의 직경이 커지면 단위 관내토지지력은 감소하게 된다. 따라서 관입비나 관내토 길이비 및 관내토 증분비가 동일하면 말뚝의 직경에 비례하는 단위 관내토지지력을 주거나 이들 값에 무관하게 일정한 크기의 단위 관내토 지지력을 주는 기존의 지지력 산정식들은 수정되어야 할 필요성이 있다.

3. 개단말뚝의 직경에 적합한 햄머를 사용할 경우 말뚝의 직경이 커지더라도 단위 항타수당 얻어지는 말뚝의 지지력은 증가한다. 따라서 개단말뚝의 경제적인 시공을 위해서는 말뚝의 제원에 적합한 햄머를 이용하여 시공하는 것이 무엇보다도 중요하다.

참 고 문 헌

1. 백규호 · 이종섭 · 이승래(1993a), "모래지반에 타입된 모형 개단강관말뚝의 지지력 분석", 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp.31~44.
2. 백규호 · 이종섭 · 이승래(1993b), "지반조건의 변화가 개단강관말뚝의 거동에 미치는 영향", 한국지반공학회지, 제9권, 제3호, pp.23~34.
3. 日本道路協會(1993), 杭基礎施工便覽, 267p.
4. API(1991). "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform." American Petroleum Institute Recommended Practice 2A(RP 2A), API, 19th Ed., Washington, D.C.
5. Azzouz, A.S.(1986). "Role of Load Tests in Friction Piles Design." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, No. 4, pp.407~423.
6. Baligh, M.M.(1985), "Strain Path Method", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1108~1136.
7. Berezantsev, V.G., Kristoforov, V.S. & Golubkow, V.N.(1961), "Load Bearing Ca-

pacity and Deformation of Piled Foundations", Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol.2, pp. 11~15.
8. Beringen, F.L.(1979). "Results of Loading Tests on Driven Piles in Sand." Recent Developments in the Design and Construction of Piles, London, pp.213~225.
9. Kerisel, J.(1958), "La Mecanique des sols : Recherches et Investigations Recentes", Rev. Trav., Paris, pp. 874~878.
10. Kindel, C.E.(1977). "Mechanism of Soil Resistance for Driven Pipe Piles." 4th Annual Symposium of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division of ASCE, Long Beach, pp. 251~268.
11. Kishida, H.(1967). "The Ultimate Bearing Capacity of Pipe Piles in Sand." Proc. of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 196~199.
12. Klos, J. and Tejchman, A.(1981). "Bearing capacity Calculation for Pipe Piles." International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, Stockholm, Vol. 2, pp. 751~753.
13. Matsumoto, T. and Takei, M.(1991). "Effects of Soil Plug on Behavior of Driven Pipe Piles." Soils and Fouancations, Vol. 31, No. 2, pp. 14~34.
14. Paikowsky, S.G.(1989). A Static Evaluation of Soil Plug Behavior with Application to the Pile Plugging Problem." Sc. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Massachusatte Institute of Technology, Cambridge, MA, 523p.
15. Peterson, R.W.(1988), "Laboratory Inverstigation of the Penetration Resistance of Fine Cohesionless Meterials", Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, pp. 895~901.
16. Randolph, M.F., Leong, E.C. & Houlsby, G. T.(1991), "One-Dimensional Analysis of Soil Plugs in Pipe Piles", Geotechnique, Vol. 41, No.4, pp.587~598.
17. Szechy, C.H.(1959). "Tests with Tubular Piles." AcTa Technica of the Hungarian Academy of Science, Vol. 24, pp. 181~219.
18. Vesic, A.S.(1970), "Tests on Instrumented Piles, Ogeechee River Site", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 96, SM2, pp. 561~584.
19. Vesic, A.S.(1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 98, SM3, pp.265~290.

(접수일자 1995. 12. 29)