

## 말뚝직경 변화에 따른 개단강관말뚝의 관내토 거동특성

### Effects of Pile Diameters on Soil Plug Behavior of Open -Ended Steel Pipe Pile

이승래\*, SEUNG-RAE LEE, 김영상\*\*, YOUNG-SANG KIM, 조성은\*\*, SUNG-EUN CHO

\* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

Synopsis : Factors which affect the capacity and the soil plug condition of an open-ended pile can be broadly divided into three categories: i.e., pile conditions, soil conditions and penetration methods. It has been found that the relative density and the horizontal stress have much effects on the soil plug behavior than other soil conditions. Also, it has been found that the pile diameter is the most important factor among pile conditions. However, a few investigations have been performed to account for both soil conditions and pile conditions. In this paper, a number of calibration chamber tests have been conducted with three different sized open-ended model piles. The model pile was driven into siliceous sand, with varying soil conditions, to clarify coupled effects of pile diameter and soil conditions on the plug behavior, the capacity, and the load transfer mechanism of soil plug. The model piles are composed of two stainless steel pipes so as to measure the plug capacity, the tip resistance, and the outside skin friction, separately.

#### 1. 서 론

개단말뚝은 선단부의 개방효과로 관입 시 관입저항력이 매우 작아 관입이 훨씬 쉽다는 장점이 있으며 관입 초기에는 폐단말뚝에 비해 지지력이 다소 떨어 지지만 관입깊이가 증가함에 따라 관내부에 말뚝벽면과 유입되는 관내토 사이의 마찰력에 의한 폐색현상으로 지지력이 증가하여 결과적으로 관입깊이가 크게되면 폐단말뚝의 지지력에 근접하게 된다. 이때 개단말뚝의 폐색정도는 개단말뚝의 관입특성 및 지지력특성을 변화시키는 주요원인이라 할 수 있다.

개단말뚝의 폐색정도와 지지력에 영향을 미치는 요인으로는 크게 말뚝조건, 지반조건, 설치방법 등으로 구분할 수 있다. 이중 지반조건인 경우 지지력성분의 분리특성이 용이하지 않은 개단말뚝 보다는 폐단말뚝을 대상으로 연구한 경우가 많으므로 폐색현상에 따라 크게 영향을 받는 개단말뚝에 대한 연구결과는 많지 않다. Klos와 Teichman (1977)은 지지력의 분리특성이 불가능한 개단말뚝을 이용하여 지반의 상대밀도가 개단말뚝의 지지력에 큰 영향을 미친다고 보고하였으며 최근에 백규호등(1993)은 지지력성분의 분리특성이 가능한 모형 개단말뚝을 이용하여 수직응력 보다는 지반의 수평응력과 상대밀도가 모형 개단말뚝의 지지력에 큰 영향을 미치는 것으로 보고 하였다.

말뚝조건인 경우에 선단부의 형상은 주로 관입저항과 관련이 있고 폐색이나 지지력에는 큰 영향이 없다고 보고되었다. 직경의 변화에 따른 폐색정도나 지지력특성 변화에 대한 연구결과들의 경우에는 지반조건 변화에 대한 고려 없이 단순히 직경의 크기만을 변화시킴으로써 지반조건에 따라 폐색정도와 지지력특성이 크게 영향을 받는 개단말뚝의 특성을 적절히 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 수평응력과 상대밀도의 변화가 개단말뚝의 폐색정도에 크게 영향을 미치므로 지지력 특성과 관입특성을 변화시킨다는 백규호등(1993)의 연구결과를 고려하여 각 지지력성분의 분리특성이 가능한 세종류의 크기를 갖는 개단말뚝을 대상으로 상대밀도와 응력조건이 변화가 가능한 토조내에 조성된 모래지반에서 실내실험을 수행하였다. 얻어진 실험결과로부터 직경변화와 지반조건 변화에 따른 각 개단말뚝의 폐색정도와 이와 관련된 지지력특성, 관내토의 하중 전이특성을 중점적으로 고찰하였다. 그 결과를 바탕으로 말뚝직경 변화에 따라 말뚝의 각 지지력성분에 중요하게 영향을 미치는 지반조건을 평가하였고 직경증가에 따른 말뚝의 지지력특성 변화와 관내토의 하중 전이특성 변화를 살펴보았다.

#### 2. 말뚝직경 변화에 따른 개단말뚝의 거동특성

Szechy(1959)는 말뚝직경 변화에 따라 개단말뚝내에 형성된 관내토의 간극율과 관입시의 항타에너지 및 지지력을 측정함으로써 개단말뚝의 직경이 줄어들수록 폐색이 더 빨리 유발된다고 하였다. 이것은 말뚝의 직경이 증가할수록 말뚝내부벽면에 작용하는 구속응력이 감소하여 이로 인한 마찰저항이 감소하기 때문이며 따라서 말뚝직경이 큰 경우에는 말뚝내부에 유입된 관내토가 효과적으로 다져지지 못하여 느슨한 상태로 형성된다. 그리고 이와같이 느슨하게 형성된 관내토는 말뚝 밖으로 밀어내는 흙의 부피를 현저히 줄이게 되며 결국 외부의 지반밀도도 느슨하게 되므로 지지력이 오히려 감소한다고 보고 하였다. 또한 Kishida(1967)도 직경 50mm, 100mm의 개단말뚝을 같은 깊이로 타입한 뒤 원추형의 모형cone을 이용하여 항타시험을 행하였으며 같은 관입깊이에서 말뚝의 직경이 작을수록 관내토의 길이는 줄어들고 더 조밀하게 다져지며 위부분보다는 아래부분이 더 다져지는 경향이 있음을 밝혔다. Paikowsky(1989)는 이론적인 접근에 의하여 일정한 관내토길이와 벽면마찰각에 대하여 관내토에 작용하는 수직응력의 총합( $P_z$ )은 직경이 증가할수록 점차 감소하다가 어떤 특별한 직경이 되면 다시 증가하는 형태를 보인다고 보고해 주어진 관내토 길이에 대하여 폐색현상이 일어나는 특별한 직경이 존재한다고 하였다.

그러나 기존의 결과들은 한가지 지반상태에 대하여 실시한 실험이므로 개단말뚝의 관내토 형성 및 지지력특성이 지반조건 변화에 크게 영향을 받는다는 사실을 무시하고 있다. 또한 지지력성분의 분리특성이 불가능한 말뚝을 사용함으로써 직경변화에 따른 관내토 거동에 대하여는 그 경향을 밝히지 못했다는 한계를 갖고 있다. 따라서 본 실험에서는 지지력성분의 분리특성이 가능한 말뚝을 사용함으로써 관내토 거동변화를 살펴보고 상대밀도와 응력상태를 조절함으로써 그동안의 연구에서 고려하지 못했던 지반상태변화를 포함한 직경변화에 따른 개단강관말뚝의 거동을 고찰하였다.

#### 3. 모 형 실험

실험에서 모형지반의 조성을 위하여 사용한 모래는 한강 난지도 부근에서 채취한 것으로 시료의 대표적인 특성치는 표.3.1에 나타나 있다.

표 3.1 시료의 대표적인 특성

시료의 특성	특성 및 특성치
함수비	2%이하
균등계수	2.21
곡률계수	1.23
비중	2.64
최소건조 단위중량	13.03 $kN/m^3$
최대건조 단위중량	15.88 $kN/m^3$
통일분류법상 분류	SP(Poorly graded sand)
$D_{10}$	0.17mm

\* 모형지반의 균질성을 위해 시료는 10번 체 통과분만을 사용.

또한, 지반의 응력상태와 상대밀도가 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상대밀도가 상이한 두가지 상태의 모형지반을 토조에 조성하였으며, 조성된 지반에 응력을 30시간동안 가한 후에 재하시험을 실시하였다. 토조에 가해진 응력상태 및 지반조건은 표 3.2에 나타나 있다.

표 3.2 모형지반의 상대밀도와 응력상태

말뚝직경 (mm)	상대밀도 (%)	수직응력 $\sigma_{vo} (kg/cm^2)$	수평응력 $\sigma_{hs} (kg/cm^2)$	토압계수 (Ko)
89.1	90	1	0.4	0.4
89.1	90	1	0.7	0.7
89.1	55	1	0.4	0.4
60.5	90	1	0.4	0.4
60.5	90	1	0.7	0.7
60.5	55	1	0.4	0.4
42.7	90	1	0.4	0.4
42.7	90	1	0.7	0.7
42.7	55	1	0.4	0.4

본 실험에서 사용된 모형말뚝들은 개단말뚝의 전체지지력을 세가지 지지력 성분으로 분리하여 측정할 수 있도록 그림3.1에서 보이는 바와 같이 만들어졌으며 조립이 완료된 세종류의 모형말뚝들은 표3.3과 같은 규격을 갖고 있다.

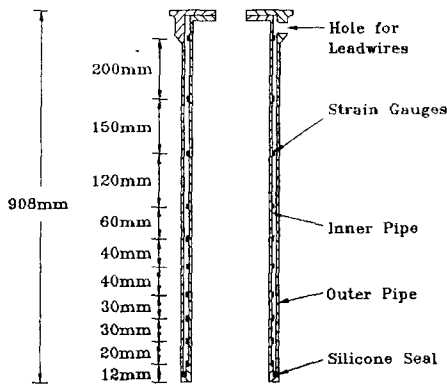


그림 3.1 모형말뚝 조립도

표 3.3 모형말뚝의 규격

	외부파이프 외경(mm)	내부파이프 외경(mm)	조립말뚝의 벽두께(mm)	내경/외경	길이 (mm)
$\phi 42.7$	42.7	36.5	3.1	0.854	908
$\phi 60.5$	60.5	50.8	6.35	0.790	908
$\phi 89.1$	89.1	76.3	7.4	0.833	908

모형지반의 조성이 완료되면 말뚝은 재하시험이 수행될 깊이까지 무게 39.2N인 햄머를 47cm의 높이에서 자유낙하시켜 관입시켰으며, 각각 25cm, 42cm, 59cm, 76cm 깊이에서 정적하중 재하시험을 실시하였다. 재하시험 시 결과들은 data logger(UCAM -70A-10)를 이용하여 얻어졌으며 말뚝에 대칭으로 부착된 strain gage에서 측정된 결과들의 평균값을 해석에 사용하였다. 말뚝을 제외한 실험장비들은 참고문헌(백규호,1994)에 자세히 소개되어 있다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 지반조건 변화에 따른 각 말뚝의 폐색정도

개단말뚝의 폐색정도는 개단말뚝의 거동특성과 관입특성 그리고 개단말뚝의 지지력에 가장 큰 영향을 주는 요소로 본 절에서는 두가지 상대밀도 ( $Dr=55\%$  와  $Dr=90\%$ ) 와 두가지 수평응력( $\sigma_{hs} = 0.4kg/cm^2$  와  $\sigma_{hs} = 0.7kg/cm^2$ )에 대한 지반조건 변화와 직경변화에 따른 관내토의 폐색정도를 관찰하였다. 먼저 그림4.1에서는 각 말뚝의 폐색정도에 대하여 알아보았다. 그림4.1은 모든 지반조건에 대해 네지점의 관입깊이에서 측정된 관내토중분비( $\gamma$ )로서 모든 말뚝의 폐색정도를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 모든말뚝이 관입이 진행됨에 따라 점차적으로 폐색정도가 증가함을 알 수 있고 말뚝의 직경이 증가함에 따라 관내토중분비( $\gamma$ )가 증가하여 폐색이 잘 일어나지 않음을 보이고 있다.

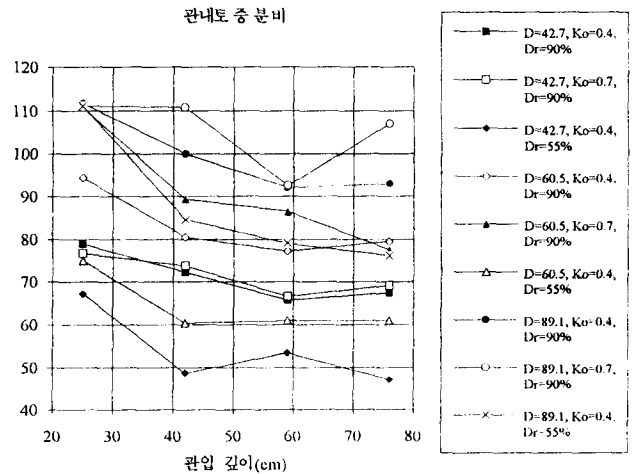


그림4.1 관입깊이와 직경에 따른 폐색정도

각 말뚝의 경우 두가지의 수평응력에 대한 폐색경향은 큰 차이는 없지만 수평응력이 작을수록 폐색이 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 또한 상대밀도가 55%로 낮은 경우가 90%의 상대밀도를 가질때 보다 얇은 깊이에서 빠르게 폐색이 일어나며 최종 폐색정도도 상당히 큰 것을 볼 수 있다.

각 말뚝의 폐색정도 변화에 대하여 좀더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저 직경42.7mm의 말뚝에 대한 관내토중분비를 나타내면 그림4.2와 같으며 상대밀도가 90%로 일정할 경우 큰 차이는 없지만 수평응력이 작은 경우가 수평응력이 큰 경우보다 폐색이 잘 일어난다.

다음으로 수평응력을  $\sigma_{hs} = 0.4kg/cm^2$ 로 일정하게 유지하고 상대밀도를 변화시킨 경우에는 상대밀도가 낮은 경우( $Dr=55\%$ )가 큰 경우( $Dr=90\%$ )보다 훨씬 폐색이 잘 일어난을 알 수 있다. 비록 76cm깊이에 도달했을 때에도 관입시 완전폐색은 발생하지 않았지만 상대밀도가 55%로 낮은 경우 관내토중분비가 약47%로 가장 낮은 값을 보여 역시 폐색정도가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 관입깊이에 따라 정적재하시험을 실시한 위치에서는 관내토중분비 ( $\gamma$ )가 대부분 0 이므로 완전폐색상태로 거동함을 알 수 있다.

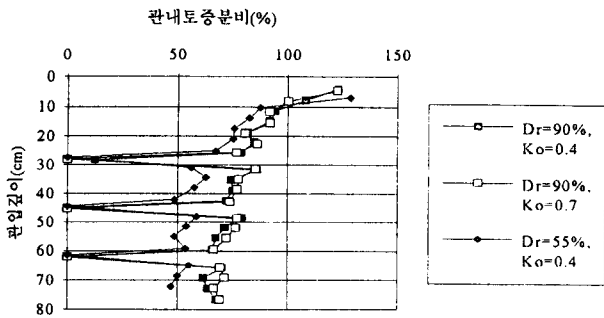


그림 4.2 지반조건에 따른 관내토중분비(직경42.7mm의 경우)

다음 그림 4.3은 직경60.5mm인 중간말뚝의 폐색정도를 지반조건에 따라 관내토중분비로 비교한 것이다. 보는 바와 같이 소말뚝의 경향과 크게 다르지 않아 상대밀도90%에 대하여 수평응력이 변화하는 경우는 수평응력이 0.4로 작은 경우에 더 폐색이 잘 발생하는 것을 볼 수 있고 수평응력이 같은 경우 상대밀도가 낮을 수록 폐색이 잘 일어나는 경향을 보이고 있다. 또한 정적재하시험 위치에서는 소말뚝과 마찬가지로 대부분 완전폐색저항을 보이는 것을 알 수 있다.

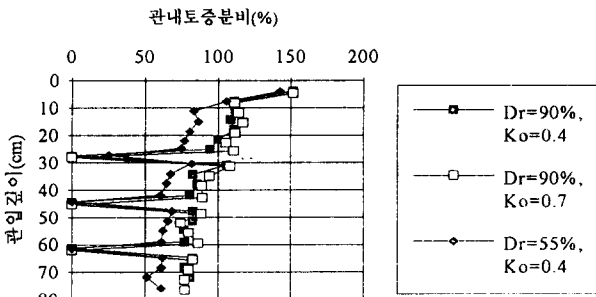


그림 4.3 지반조건에 따른 관내토중분비(직경60.5mm의 경우)

마지막으로 직경89.1mm인 대말뚝의 폐색정도를 지반상태에 따라 비교해 보면 그림 4.4와 같이 상대밀도가 낮을수록, 수평응력이 작을 수록 폐색이 잘 일어나는 경향은 다른 직경을 가진 말뚝의 경우와 같다. 그러나 다른말뚝과 달리 관입깊이25cm에서 실시한 정적재하 시험결과 관내토중분비가 0에 도달하지 않고 있다. 이것은 말뚝직경이 큰 경우 25cm 관입깊이로는 아직 충분히 관내토가 다져지지 않아 폐색이 거의 일어나지 않은 상태에 있기 때문으로 사료된다.

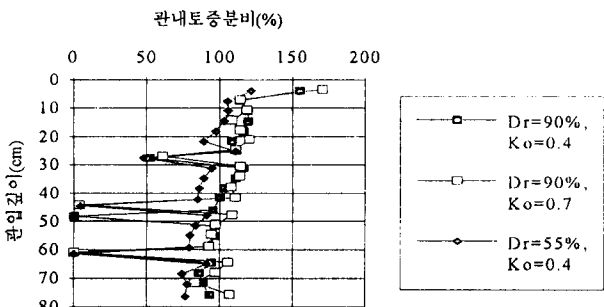


그림 4.4 지반조건에 따른 관내토중분비(직경89.1mm의 경우)

Kindel(1977)은 Mexico만의 62곳에서 실대형 말뚝의 폐색정도를 측정하여 대부분의 말뚝이 동적관입되는 동안에는 거의 폐색이 발생하지 않음을 보고하기도 하였으며 최근에 Niyama 등(1994)은 비록 정적하중이 가해질 때라 하더라도 폐색되지 않은 상태처럼 관내토의 변위가 발생할 수 있음을 지적하였다. 따라서 이 결과는 직경이 커짐에 따라 관내토가 잘 폐색되지 않고 이에 따라 정적재하 시에도 관내토의

변위가 발생할 수 있음을 보이는 좋은 결과라 볼 수 있다. 그러므로 현장에서 실제로 사용하고 있는 직경이 큰 실대형 말뚝의 경우에는 Kindel(1977)과 Niyama 등(1994)이 지적한 바와 같이 거의 폐색이 일어나지 않을 수도 있으므로 현재 개단말뚝의 지지력을 산정하기 위하여 개단강관말뚝이 충분히 관입된 후에 정적하중을 받으면 완전폐색상태 와 같이 거동한다는 가정하에서 폐단말뚝과 같은 방법으로 지지력을 산정하는 경우에는 개단말뚝의 실제지지력과 많은 차이가 있을 수 있다고 사료된다.

#### 4.2 직경과 지반조건에 따른 지지력성분 변화

##### 4.2.1 직경과 수평응력변화에 따른 지지력성분 변화

그림 4.5는 상대밀도가 90%인 경우, 수평응력값에 따라 각각 직경42.7mm인 소말뚝의 전체지지력을 기준으로 다른 직경을 갖는 말뚝의 전체지지력을 규준화하여 나타낸 것이다. 직경이 증가함에 따라 전체 지지력이 2배~3배 정도로 증가하는 경향을 보이지만 수평응력의 변화에는 별로 큰 차이를 보이지 않으며 이는 수평응력에 따라서 폐색정도의 차이가 그리 크지 않은 것과 일치하는 결과이다.

그림 4.6은 내주면마찰력 성분만을 비교한 것으로 중간말뚝의 경우 수평응력이 각각 0.4, 0.7일때 1.27, 1.46배 증가하고 대말뚝의 경우에는 수평응력이 0.7인 경우 2배를 약간 넘고 수평응력이 0.4인 경우 1.75배 정도로 증가하는 경향을 볼 수 있어 일정한 상대밀도에서 직경이 증가함에 따라 내주면마찰력이 증가함을 알 수 있다. 그러나 전체 지지력과 마찬가지로 수평응력 변화에 의한 차이가 별로 크지 않아 그 영향은 그다지 크지 않다고 사료된다.

그림 4.7은 소말뚝에 대해 외주면마찰력을 규준화한 결과로 직경이 증가함에 따라 중간말뚝은 수평응력이 0.4, 0.7인 경우에 대해 각각 3.11배, 2.43배정도로 증가하고 대말뚝인 경우에는 수평응력이 각각 0.4, 0.7일때 7.05배, 4.08배 정도로 증가해 외주면마찰력은 직경증가와 함께 수평응력에도 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

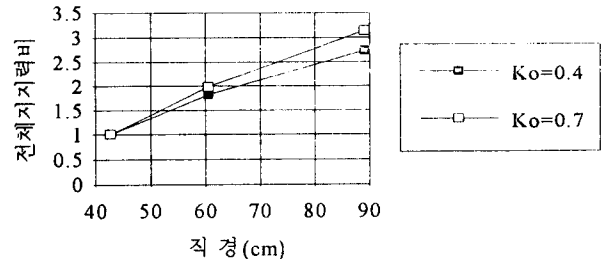


그림 4.5 직경과 수평응력변화에 따른 전체지지력비(Dr=90%)

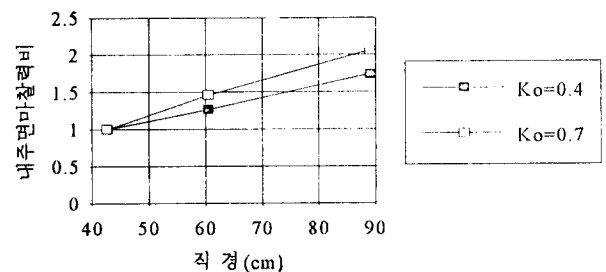


그림 4.6 직경과 수평응력변화에 따른 내주면마찰력비(Dr=90%)

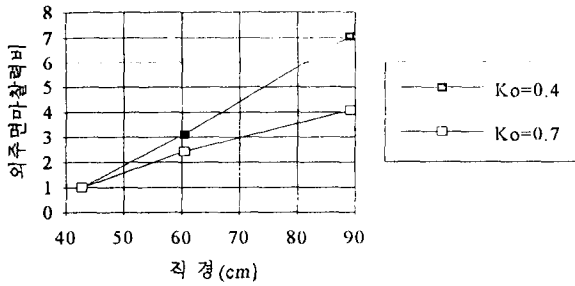


그림4.7 직경과 수평응력변화에 따른 외주면마찰력비(Dr=90%)

또한 외주면마찰력의 절대값은 물론 수평응력이 0.7인 경우가 크지만 규준화된 외주면마찰력 증가량은 다른 성분과 달리 수평응력이 0.4로 작은 경우에 더 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 수평응력이 작을 경우에는 직경이 커지더라도 관내도의 폐색이 비교적 빠르게 일어나 직경이 커질수록 외부로 밀려나는 흙의 부피가 충분히 관련되므로 외주면마찰력의 증가비를 높인 것으로 사료된다. 하지만 수평응력이 큰 경우에는 원지반의 구속응력 증가로 폐색이 빨리 유발되지 않아 직경이 커질수록 외부로 밀려나는 흙의 부피가 작아져 외주면마찰력의 증가비가 그다지 커지지 않는 것으로 사료된다. 결국 지지력성분이 한 요소에 의해 독립적으로 영향을 받는 것이 아니라 각 성분간 상호유기적인 관계에서 거동하고 있음을 보이는 예라 할 수 있다.

#### 4.2.2 직경과 상대밀도변화에 따른 지지력성분의 변화

지반조건 중 수평응력이  $\sigma_{hr} = 0.4kg/cm^2$ 로 일정하고 상대밀도가 90%와 55%로 각각 변화할 때 직경변화를 함께 고려하여 지지력성분 변화를 관찰하여 보면 다음과 같다. 그림4.8은 직경42.7mm의 소말뚝을 기준으로 다른 말뚝들의 전체 지지력을 규준화하여 나타낸 것이다.

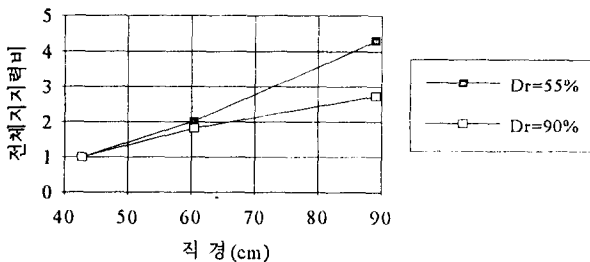


그림4.8 직경과 상대밀도변화에 따른 전체지지력비(Ko=0.4)

중간말뚝의 경우 전체지지력 증가비가 소말뚝 전체지지력의 2배정도 증가하며 상대밀도가 낮은 55%인 경우가 90%보다 증가비가 약간 크게 나타난다. 대말뚝에서는 상대밀도에 따라 전체지지력 증가비가 55%일때는 약 4.3배, 90%일때는 약 2.74배 정도로 상대밀도 변화에 따라 증가비가 크게 차이는 것을 볼 수 있다. 전체적으로는 직경이 증가함에 따라 전체지지력은 증가하는 경향을 보이며 상대밀도가 낮을 수록 절대값은 작더라도 전체지지력의 증가비는 큰 것으로 나타났는데 이는 상대밀도가 낮을 수록 폐색이 잘되는 경향과 일치하는 결과이다.

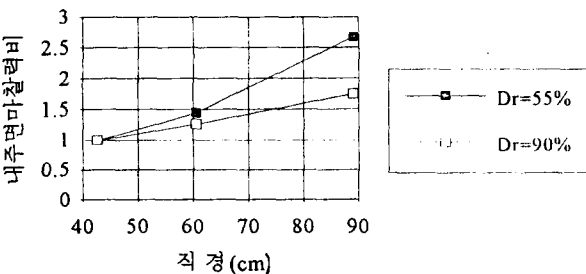


그림4.9 직경과 상대밀도변화에 따른 내주면마찰력비(Ko=0.4)

그림4.9는 내주면마찰력비를 비교한 것으로 전체지지력과 마찬가지로 직경이 증가함에 따라 중간말뚝은 상대밀도 55%인 경우 1.44배, 상대밀도 90%인 경우에는 1.27배로 증가했으며 대말뚝의 경우 상대밀도가 낮은 경우에는 2.67배 정도, 상대밀도가 높은 경우에는 1.75배정도도 증가된 것을 볼 수 있다. 역시 직경이 증가함에 따라 내주면마찰력이 증가하는 경향을 보였고 상대밀도가 낮은 경우 내주면마찰력의 증가비가 큰 것을 볼 수 있는데 이는 같은 수평응력에서 상대밀도가 작을 수록 폐색이 잘 일어나는 경향과 일치하는 결과이다[백규호등(1993)].

외주면마찰력의 경우에는 그림4.10과 같이 직경이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보였고, 상대밀도에 따라서 매우 작은 차이를 보였다. 따라서 그림4.7과 4.10의 결과에 의하면 외주면마찰력 성분의 증가는 상대밀도 변화에 따라 압축과 팽창거동에 의하여 주로 영향을 받으며 이때 수평응력의 크기가 폐색속도에 영향을 미치고 이에 따른 주변지반이 영향을 받는 효과가 달라지므로 이들의 상호유기적인 효과를 충분히 고려하여야 할 것이다.

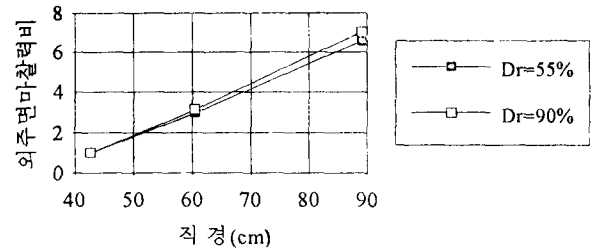


그림4.10 직경과 상대밀도변화에 따른 외주면마찰력비(Ko=0.4)

#### 4.3 직경 변화에 따른 관내도 하중 전이특성

개단말뚝의 내부 벽면으로부터 전달된 마찰력을 관내도에 전달하는 메카니즘에 대해서는 몇몇 연구자들에 의하여 연구가 수행되었다. 특히 Kishida 와 Isemoto (1977)는 실험형 크기의 말뚝에 관내도를 낙사법에 의하여 90%의 상대밀도로 조성하고 관내도 높이를 변화시키면서 저면에 설치된 강판을 밀어올리는 방법의 실험을 수행하였다. 또한 수치해석을 병행함으로써 관내도 내부에 발생하는 하중 전이특성을 알아내고자 하였다. 연구결과에 의하면 관내도에 발생하는 대부분의 하중은 관내도의 저면부에서부터 말뚝직경의 약 2배 이내에서 지지되며 단위면적 당 극한하중은 직경이 증가함에 따라 감소한다고 하였다.

그러나, 직경변화와 지반조건을 동시에 고려한 구체적인 거동에 대해서는 거의 연구가 수행되지 않았으며 이번 절에서는 수평응력과 상대밀도 등의 지반상태와 말뚝의 직경을 동시에 변화시키면서 관내도에 유발된 수직응력 변화를 관찰함으로써 직경변화에 따른 관내도의 하중 전이특성 변화를 알아보고자 하였다.

그림4.11은 각 말뚝의 가장 밑부분에 위치한 strain gage에서 얻은 값들을 이용하여 구한 관내도 수직응력을 직경변화에 따라 나타내고 있다. 직경이 증가함에 따라 관내도의 저면에서 발생하는 관내도 수직응력이 점차 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 직경이 증가하면 직경이 작은 말뚝보다 관내도가 느슨하게 다져지고 폐색이 잘 일어나지 않으므로 관내도가 분담하는 수직하중이 줄어드는 사실과 잘 일치함을 알 수 있다.

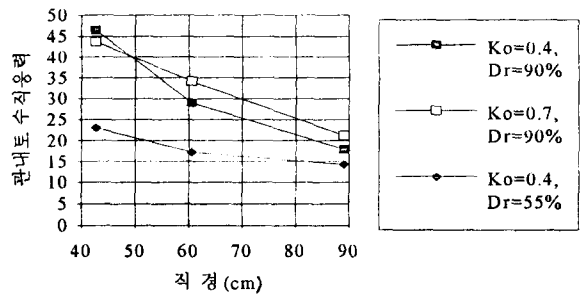


그림4.11 직경과 지반조건에 따른 관내도 수직응력(kg/cm<sup>2</sup>)의 변화

또한 각 직경에서 지반조건에 따른 분포를 보면 직경이 작은 소말뚝의 경우 상대밀도 변화에 대해서만 관내토에 발생하는 수직응력의 차이가 큰데 이는 소말뚝의 경우 수평응력에 따른 폐색정도에는 차이가 별로 없지만 상대밀도 변화에는 폐색정도의 차이가 큰것이 반영된 것이라 볼 수 있다. 그러나 직경이 커질수록 지반조건에 따른 차이가 줄어들며 이것은 지반조건 변화에 따라서 폐색정도가 크게 변하지 않는 사실과 비교적 일치하는 결과를 보이므로 말뚝의 폐색정도가 관내토 수직응력의 크기와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그림4.12는 직경89.1mm의 대말뚝에 발생하는 관내토 수직응력분포를 말뚝선단부로부터 두부방향으로 나타내는 그림이다. 수평응력의 변화에는 관내토 수직응력 분포의 큰 차이를 볼 수 없지만 상대밀도가 55%인 경우에는 관내토 저면에 작용하는 관내토 수직응력의 절대값과 수직응력의 분포가 달라 특별히 상대밀도가 다른 경우 폐색정도의 차이가 관내토 하중전이 특성의 차이를 일으키는 것을 볼 수 있다.

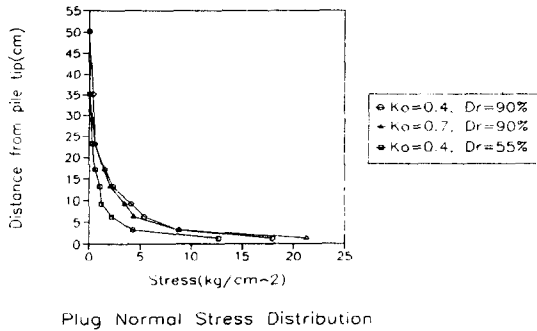


그림 4.12 지반조건에 따른 관내토 수직응력 분포(D=89.1)

중간말뚝이나 소말뚝의 분포도 비슷한 결과를 보이며 대말뚝의 경우 상대밀도나 수평응력의 변화에는 별로 관계없이 저면부로부터 약 35cm정도 이상에서 관내토 수직응력이 거의 없으므로 그 이상의 부분에서는 말뚝면과 관내토 사이에 마찰력이 거의 유발되지 않음을 알 수 있다.

또한 저면부로부터 약35cm 높이까지는 수직응력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데 상대밀도가 낮은 55%의 경우 말뚝저면에서 산정된 수직응력의 90%가 9.2cm 까지 사이에서 발현되는 것을 볼 수 있다. 또한 상대밀도가 90%로 일정하고 수평응력이 0.4인 경우 14cm에서, 수평응력이 0.7인 경우 13.2cm에서 수직응력의 90%가 발현되는 것과 비교해 볼 때 각각 직경의 1.03, 1.57, 1.48배 높이에서 수직응력의 90%가 발현되는 것으로 역시 상대밀도가 낮은 경우가 더 짧은 구간에서 대부분의 수직응력이 발현됨을 알 수 있다.

표4.1은 대말뚝에 대하여 설명한 내용을 각 말뚝직경에 대하여 비교 정리한 결과로 하중의 90%를 지지하는 높이는 소말뚝과 중간말뚝의 경우에는 별로 차이가 없이 약 7 ~ 10cm정도인데 반해 대말뚝의 경우는 약 9 ~ 14cm까지 약간 큰 변화를 주는 것을 알 수 있다. 즉 대말뚝과 같이 직경이 증가할 경우에는 하중을 지지하는 높이가 증가하므로 관내토의 하단부가 작은 말뚝에 비하여 상대적으로 잘 폐색되지 않음을 보이는 결과라 할 수 있다. 그러나 각 말뚝의 직경으로 표준화할 경우에는 Kishida와 Isemoto(1977)의 결과와 같이 직경의 2배 정도에서 90%정도의 대부분의 하중을 지지하는 것을 볼 수 있다.

또한 관내토 수직응력이 유발되지 않는 높이를 보면 소말뚝과 중간말뚝의 경우 지반조건에 관계없이 일정한 값을 보이고 대말뚝의 경우 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것 역시 소말뚝과 중간말뚝의 경우는 대부분의 지반조건에서 상당한 정도의 부분폐색을 보이거나 대말뚝의 경우 폐색이 잘 일어나지 않는 것과 관계된 것이라 생각된다. 관내토 수직응력이 유발되지 않는 길이와 하중의 90%를 전달하는 길이의 차이를 그림4.13에 나타내었다.

표4.1 각 말뚝직경에 대한 하중지지 높이

<하중의 90%를 지지하는 높이>

지반조건	소말뚝(42.7mm)	중간말뚝(60.5mm)	대말뚝(89.1mm)
Ko=0.4, Dr=90%	9cm(2.1)	7cm(1.16)	14cm(1.57)
Ko=0.7, Dr=90%	9cm(2.1)	6.2cm(1.02)	13.2cm(1.48)
Ko=0.4, Dr=55%	10cm(2.34)	8cm(1.32)	9.2cm(1.03)

<관내토 수직응력이 거의 유발되지 않는 높이>

Ko=0.4, Dr=90%	17.2cm(4.03)	17.2cm(2.84)	35cm(3.92)
Ko=0.7, Dr=90%	17.2cm(4.03)	17.2cm(2.84)	35cm(3.92)
Ko=0.4, Dr=55%	17.2cm(4.03)	17.2cm(2.84)	35cm(3.92)

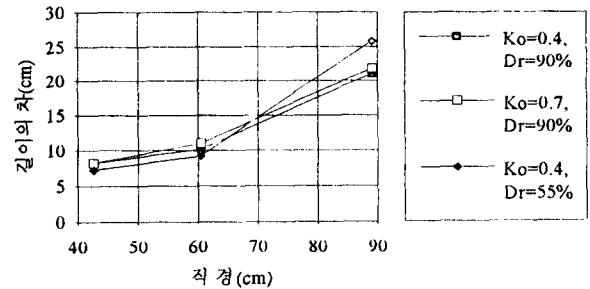


그림4.13 관내토 수직응력이 유발되지 않는 길이와 하중90% 전달 길이의 차

그림4.13은 직경이 증가할수록 관내토의 대부분의 하중을 전달하는 길이와 실제 마찰력이 발생하는 전체길이의 차이가 커지는 경향이 있다는 것으로 작은말뚝일 수록 두 길이 사이에 차이가 적은 것을 알 수 있어 폐색이 잘 일어나 관내토가 조밀하게 다져지는 소말뚝이나 중간말뚝의 경우 일정구간이 대부분의 하중을 전달하고 그 이상은 하중지지 역할이 크지 않다는 것이다.

결국 소말뚝이나 중간말뚝의 경우 폐색이 잘 일어나 짧은 영역에서 하중을 전달하지만 폐색이 잘 일어나지 않은 대말뚝의 경우 긴 구간에 걸쳐서 하중을 전달하는 특성을 보이는 것이다. 그러나 폐색영역이 확실히 생성된 소말뚝과 중간말뚝은 영역의 전체구간에서 하중을 전달하고 대말뚝은 길게 형성된 전체구간 중 비교적 다져진 저면으로부터 짧은구간에서 많은 하중을 전달하게 되므로 수직응력이 유발되지 않는 길이와 하중의 90%를 지지하는 길이의 차이가 증가하는 것으로 사료된다. 그러므로 보통 말뚝직경이 증가해 폐색이 잘 일어나지 않는다고 말할 때 전체적으로 관내토가 다져지지 않지만 이에도 실제 대부분의 하중은 말뚝의 저면부로부터 짧은 거리에서 지지하는 메커니즘을 갖는 것으로 사료된다.

#### 4.4 직경과 지반조건의 변화에 따른 단위면적 당 지지력성분 변화

##### 4.4.1 직경변화와 수평응력 변화에 따른 단위면적 당 지지력성분

4.2.1과 4.2.2에서 살펴 본 바와 같이 개단말뚝의 직경과 지반조건의 변화를 동시에 고려할 때 말뚝의 직경이 증가함에 따라 지지력성분은 당연히 증가함을 알 수 있다. 이것은 직경이 증가하면 말뚝내부와 외부의 주면장이 증가하므로 직경의 증가에 따른 폐색정도가 감소하거나 말뚝내부의 관내토가 조밀하게 다져지지 않는 현상에 의하여 나타나는 지지력변화를 왜곡하는 경향이 있다. 따라서 본 절에서는 지지력성분을 단위면적 당 힘으로 환산하여 비교함으로써 주면장 증가에 의한 영향을 배제하고 직경증가에 따른 폐색정도의 변화에 의한 단위면적 당 지지력변화만을 관찰하고자 하였다. 또한 직경증가에 의한 영향만을 중점적으로 알아보기 위해 소말뚝을 기준으로 중간말뚝과 대말뚝의 지지력성분들을 규준화하여 표현하였다.

먼저 직경과 수평응력의 변화에 의한 단위면적 당 지지력성분 변화를 살펴보면 그림4.14와 4.15와 같다. 그림4.14를 살펴보면 직경이 증가 하는 경우 중간말뚝은 수평응력이 각각 0.4, 0.7일때 각각 0.91과 1.05을 나타내고 대말뚝의 경우에는 각각 0.41과 0.48을 나타내 단위면적 당 내주면마찰력이 소말뚝과 중간말뚝인 경우에는 별 차이가 없지만 대말뚝의 경우 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 4.3절에 설명된 바와 같이 대말뚝의 경우 다른 말뚝과는 현저히 다른 하중전이 특성을 가지기 때문인 것으로 사료된다.

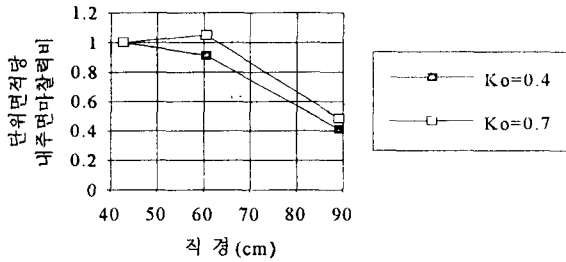


그림 4.14 직경과 수평응력 변화에 따른 단위면적 당 내주면마찰력비 (Dr=90%)

또한 수평응력이 변하는 경우 두 수평응력에 대한 단위면적 당 내주면마찰력비의 차이가 크지 않아 수평응력의 차이는 직경증가에 대한 내주면마찰력 차이에는 기여하는 바가 그리 크지 않은 것을 볼 수 있다. 전체적인 경향을 폐색정도와 연결하여 생각할 때 직경이 큰 대말뚝의 경우 관내토의 폐색정도가 낮고 관입깊이가 작을 때에는 심지어 정적 재하시험에서도 완전폐색거동을 보이지 않는 점과 일치하는 결과로 볼 수 있어 말뚝의 지지력을 크게 하기 위하여 직경을 크게하는 경우 완전폐색이 잘 일어나지 않으므로 무조건 직경을 크게하는 것이 경제적이지 않음을 지적한 Szechyi(1959)의 실험결과와도 일치하는 것을 알 수 있다.

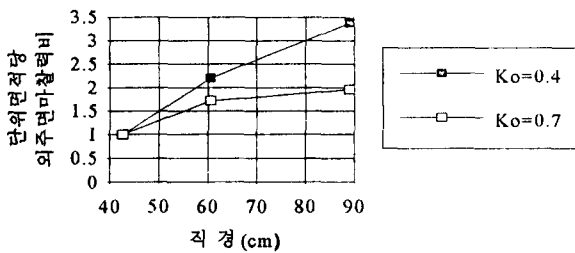


그림4.15 직경과 수평응력 변화에 따른 단위면적 당 외주면마찰력비 (Dr=90%)

그림4.15에서는 내주면 마찰력과 달리 폐색정도에 의해 직접적인 영향이 적은 외주면 마찰력은 직경이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 수평응력 변화에 대해서는 절대값은 수평응력이 큰  $\sigma_{hr} = 0.7 \text{ kg/cm}^2$  경우가 더 크지만 단위면적 당 증가비를 보면 수평응력이 0.4로 작은 경우가 더 크며 이는 수평응력이 작을 수록 폐색속도가 빨라 외부로 밀려난 흙의 부피증가가 더 크기때문인 것으로 사료되며 수평응력의 변화가 내주면마찰력의 변화에는 별로 영향을 주지 않았지만 외주면마찰력에는 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

##### 4.4.2 상대밀도와 직경변화에 따른 단위면적 당 지지력성분

수평응력의 변화가 폐색정도에 크게 영향을 미치지 않고 단위면적 당 내주면마찰력에도 영향을 주지 않았던 것과는 달리 그림4.16과 같이 상대밀도가 낮은 경우 직경이 증가함에 따라 단위면적 당 내주면 마찰력비가 감소하는 비율이 중간말뚝과 대말뚝의 경우에 상대밀도가 작을 경우가 훨씬 적은 것을 볼 수 있다. 이런 결과는 상대밀도가 높은 경우 직경이 증가함에 따라 폐색정도가 크게 감소하는 반면 상대밀도가 낮은 경우에는 직경이 증가하여도 상당한 정도의 부분폐색이 일어나는 사실과 일치하는 것이다. 또한, 중간말뚝의 경우 상대밀도 변화와 수평응력 변화에 대하여 단위면적 당 내주면마찰력이 크게 감소하지 않고 소말뚝의 단위면적 당 내주면마찰력과 비슷한 크기를 갖는데 이로 부터 직경이 증가함에 따라 지지력성분이 무조건 감소하는 것이 아니라 어느정도의 말뚝크기까지는 폐색이 잘 일어나 지지력 성분에도 크게 변화가 없다가 일정크기 이상되면 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이와같이 폐색정도와 내주면마찰력과 의 정량적 상관관계 도출을 위해서는 계속적인 연구가 뒷받침되어 지반조건 변화와 직경 변화에 의한 폐색정도에 따른 지지력 감소를 적절히 고려하는 것이 필요하다고 사료된다.

그림4.17에서는 직경이 증가함에 따라 모든 상대밀도에서 단위면적 당 외주면마찰력이 증가함을 보이고 있다. 서로 다른 상대밀도에 대한 증가는 거의 비슷하지만 상대밀도가 90%로 높은 경우가 약간 높은데 이는 상대밀도가 큰 경우에 말뚝의 관입 시 주변지반이 팽창하려는 특성을 나타내기 때문이다.

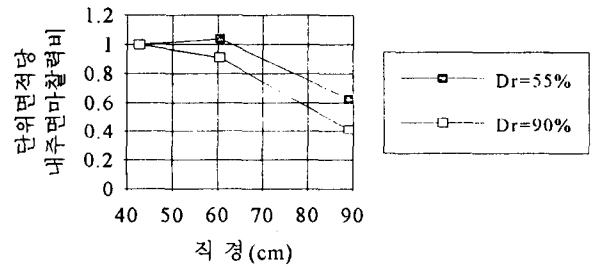


그림4.16 직경과 상대밀도 변화에 따른 단위면적 당 내주면마찰력비 (Ko=0.4)

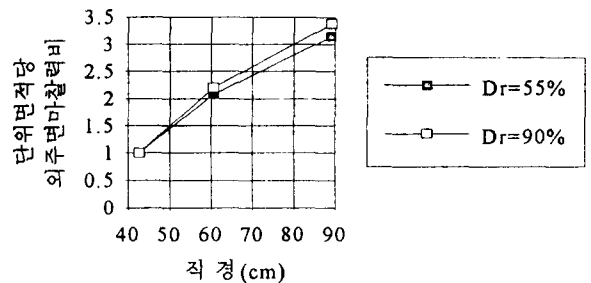


그림4.17 직경과 상대밀도 변화에 따른 단위면적 당 외주면마찰력비 (Ko=0.4)

지금까지의 결과로 볼때 수평응력 변화는 외주면마찰력 성분, 상대밀도는 내주면마찰력 성분에게 크게 영향을 주는 지반요소이며, 상대밀도는 특히 폐색정도에 크게 영향을 미쳐 내주면마찰력 성분의 증가비율에 크게 영향을 주므로 폐색정도와 관내토 지지력 추정 시 상대밀도는 반드시 고려해야 할 요소로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 앞으로 사용이 날로 증가될 전망이다 대형 개단말뚝의 지지력을 올바로 추정하기 위하여 각 지지력성분에 영향을 주는 요소의 대표적인 영향인자인 말뚝의 직경변화와 상대밀도 및 수평응력 변화를 고려하여 개단말뚝의 폐색정도와 지지력 성분변화를 중점적으로 관찰하였다. 그리고 관찰한 결과들을 이용하여 이러한 요소들이 폐색정도에 주는 영향과 폐색정도가 지지력성분에 어떠한 영향을 미치는지 알아봄으로써 직경이 증가될 경우 어떤 요소들을 고려하여 지지력을 추정해야 할 것인지를 평가하고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 고려된 응력수준과 지반의 상대밀도에 대해 말뚝의 직경이 증가할수록 측정된 관내토중분비( $\gamma$ )가 증가하여 큰 말뚝일수록 폐색이 잘 일어나지 않음을 알 수 있다.
- (2) 관입깊이가 증가함에 따라 폐색정도가 증가하는 경향을 보이며 직경이 큰 모형말뚝일 경우에는 관입깊이가 작은 경우 정적재하 시험에서도 완전폐색 거동을 보이지 않은 경우도 있다.
- (3) 수평응력 변화는 외주면 마찰력의 증가변화에 미치는 영향이 크며 상대밀도 변화는 내주면 마찰력의 증가변화에 큰 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.
- (4) 단위면적 당 내주면마찰력은 중간말뚝까지는 변화가 없다가 대말뚝에 이르면 크게 감소하였으며 이는 말뚝직경에 따라 폐색정도가 크게 영향을 받는다는 것을 나타낸다.
- (5) 단위면적 당 외주면 마찰력은 직경이 증가함에 따라 지반조건에 관계없이 크게 증가했으며 이때 상대밀도보다는 수평응력 변화에 따라 증가비율이 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (6) 관내토 저면에 발생하는 최대 수직응력의 크기는 직경이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하며, 이때 상대밀도가 낮은 경우는 비교적 완만한 정도로 감소해 각 말뚝의 폐색정도가 관내토 수직응력의 크기와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.
- (7) 직경증가에 따른 관내토의 수직하중 전이특성은 직경이 작은 말뚝은 확실한 썩기영역이 형성되므로 짧은 구간에서 대부분의 하중을 전달하는 것을 볼 수 있지만 직경이 증가할수록 확실한 썩기영역이 형성되지 않아 하중을 지지하는 전체 길이는 증가하지만 이때도 대부분의 하중은 어느정도 다져진것으로 추측되는 관내토 저면에서 부터 짧은 거리내에서 지지된다.

## 6.참 고 문 헌

- 백규호(1994), "사질토지반에 타입된 개단강관말뚝의 지지력 특성", 한국과학기술원, 공학박사 학위논문, p111.
- 백규호, 이종섭, 이승래(1993), "지반조건의 변화가 개단강관말뚝의 거동에 미치는 영향", 한국지반공학회지, 제9권, 제3호, pp 23-34.
- 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.
- 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.
- Kishida, H. and Isemoto, N. (1977), "Behavior of Sand Plugs in Open-End Steel Pipe Piles", Proc. of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Toyko, 1977, Vol. 1, pp. 601-604.

- Klos, J. and Tejchman, A. (1977), "Analysis of Behavior of Tubular Piles in Subsoil", Proc. of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Toyko, Vol. 1, pp. 605-608.
- Niyama, S., Oshima, A. and Takada, N. (1994), "Toe Resistance Evaluation in Open Toe Piles", XIII ICSMFE, pp. 237-240.
- 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, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 523 p.
- Szechy, C.H. (1959), "Tests with Tubular Piles", Acta Technica of the Hungarian Academy of Science, Vol. 24, pp. 181-218.
- Vipulanandan, C., Wong, D., Ochoa, M. and O'Neill, M.W. (1989), "Modelling Displacement Piles in Sand using a Pressure Chamber", Foundation Engineering: Current Principles and Practices, ASCE, Vol. 1, pp. 526-541.