

# 地盤條件의 變化가 開端鋼管말뚝의 舉動에 미치는 影響

Effects of Soil Conditions on the Behavior of Open-Ended Steel Pipe Pile

백 규 호\*1  
Paik, Kyu-Ho  
이 종 섭\*2  
Lee, Jong-Sub  
이 승 래\*3  
Lee, Seung-Rae

---

## Abstract

Model pile tests, using large calibration chamber in which the stress state and the relative density can be controlled, were performed in order to study on the effect of soil condition on the behavior of open-ended steel pipe pile. The model pipe pile was made up of two pipes to separately measure each component of bearing capacity of open-ended steel pipe pile. According to the test results, pile plugging and driving resistance of the pile installed in sand were primarily dependent on the horizontal stress and the relative density. Plug bearing capacity, outside skin friction and total bearing capacity were also mainly dependent on the horizontal stress and relative density. Moreover, the ratio of the horizontal stress acting on the outside wall of open-ended pipe pile after installation to the original horizontal stress was not nearly affected by original value of horizontal stress. It is bigger than one in the case of dense deposit, equal to one for medium deposit, and smaller than one for very loose deposit. It seems to be mainly dependent on the relative density for a given soil.

## 요 지

지반조건이 개단강관말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 응력상태와 상대밀도의 조절이 가능한 토조내에 포설된 모래지반에서 모형말뚝실험이 수행되었다. 모형말뚝은 개단강관말뚝의 각 부분에 작용하는 지지력을 분리측정하기 위하여 직경이 다른 두개의 파이프로 만들어 졌다. 실험결과에 의하면 모래지반에 타입된 개단말뚝의 폐색정도와 관입저항력은 지반의 수직

---

\*1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*2 현대건설(주) 기술연구소 연구원

\*3 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

응력보다는 수평응력과 상대밀도에 의하여 좌우되었으며, 관내토지지력과 외주면마찰력, 그리고 전체지지력도 수직응력보다는 수평응력과 상대밀도에 의하여 주로 영향받는 것으로 나타났다. 또한 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력은 원지반의 응력상태와는 관계없이 조밀한 지반의 경우에는 원지반의 수평응력보다 크게, 보통상태의 지반에서는 원지반과 비슷하게, 그리고 매우 느슨한 지반에서는 원지반보다 작게 측정되었다. 원지반의 수평응력에 대한 말뚝 설치후의 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력의 비는 주어진 모래지반의 경우 원지반의 수평응력과 관계없이 상대밀도에 따라 일정한 값으로 나타났다.

## 1. 서론

폐단말뚝에 비하여 관입저항력이 작은 개단강관말뚝은 지반에 설치되는 동안 말뚝 내부로 유입되는 흙에 의하여 관내토가 형성되며, 어느 깊이 이상 관입되면 관내토에 의하여 말뚝의 선단부가 폐쇄되어 폐단말뚝과 같은 거동을 하는 것으로 알려져 있다. 말뚝이 설치되는 동안에 관내토의 형성과정과 폐쇄효과에 대한 이론적·실험적 연구 및 재하시험을 통한 개단 및 폐단강관말뚝의 지지력 비교 등은 몇몇 연구자들에 의하여 연구된바 있으며, 이런 연구결과들을 통하여 개단강관말뚝의 지지력을 예측하기 위한 이론식과 경험식이 제안되기도 하였다.

연구결과 단위 관내토 지지력(단위 면적당 관내토의 지지력)은 정성적으로 말뚝의 내경이 작고 표면거칠기가 커질수록, 그리고 관입깊이가 깊어질수록 증가하는 것으로 알려지고 있다(5, 11). 그러나 정량적인 면에서 관내토가 개단강관말뚝의 지지력에 미치는 영향이나 말뚝의 내경, 표면거칠기, 선단부모양 등의 말뚝조건과 지반의 응력상태, 상대밀도, 압축특성(compressibility), 과압밀비 등의 지반조건, 그리고 말뚝의 관입깊이와 설치방법 등이 말뚝의 거동에 미치는 영향은 정확히 규명되지 않은 상태에 있기 때문에 기존 제안식들에 대한 신뢰도는 그다지 높지 않다고 할 수 있다. 그러므로 개단강관말뚝에 대한 올바른 지지력 해석과 경제적인 설계를 위하여는 말뚝이 설치되는 동안이나 하중이 재하되는 동안에 관내토의 거동을 잘 이해

하는 것과 동시에 말뚝조건과 지반조건이 말뚝의 지지력에 미치는 영향을 정확히 규명하는 것이 필요하다.

한편, 응력상태와 상대밀도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향은 토조를 이용하여 많이 연구되어 왔으나, 대부분의 연구가 선단지지력과 주면마찰력의 분리가 용이한 폐단말뚝에 대하여 실행되어 왔다. 반면 전체지지력을 관내토의 지지력과 말뚝 단면부의 지지력 그리고 외주면마찰력으로 정확하게 분리측정할 수 있는 방법이 제시되지 못하고 있는 개단말뚝의 경우에 대하여는 이러한 연구가 매우 부진한 형편이다.

본 연구에서는 말뚝의 관입특성과 지지력에 영향을 주는 여러 요소중에서 특히 중요하게 생각되는 지반의 상대밀도와 응력상태가 관내토와 개단강관말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다. 실험에는 상대밀도와 응력상태를 자유롭게 조절할 수 있는 토조와 두개의 파이프에 계측기를 부착하여 개단말뚝의 지지력 성분을 분리측정할 수 있는 모형 개단강관말뚝이 사용되었다.

## 2. 지반조건이 말뚝의 거동에 미치는 영향

지반조건이 말뚝의 거동에 미치는 영향에 대한 대부분의 연구들은 지반의 응력상태와 상대밀도의 조절이 가능한 토조에서 이루어졌으며, 선단지지력과 주면마찰력의 분리가 비교적 가능한 원추(cone)나 폐단말뚝을 이용하여 수행되었다.

먼저 Schmertmann<sup>(10)</sup>은 원추관입시험(CP-T)을 행하여 유효수직응력이 일정할 경우 상대 밀도와 선단저항력은 거의 선형관계에 있음을 밝혔으며, Villet과 Mitchell<sup>(12)</sup>은 상대밀도 뿐만 아니라 수직응력도 원추의 선단저항력에 영향을 준다고 보고하였다. Baldi 등<sup>(3)</sup>은 상대밀도는 일정하게 유지시키고, 수직 및 수평응력을 변화시키면서 토조에서 원추관입시험을 수행한 결과 선단저항력은 수직응력보다는 주로 수평응력에 의해 결정된다고 하였다. 또한 Housby와 Hitchman<sup>(4)</sup>은 토조에서 원추관입시험을 수행하여 원추의 선단저항력은 상대밀도 및 수평응력과 관계되며, 수직응력과는 거의 무관함을 알 수 있었다.

Vipulanandan 등<sup>(13)</sup>은 토조에 성형된 여러 상태의 지반조건에 대하여 모형 폐단말뚝을 타입한 후 재하시험을 수행하였다. 압축시험으로부터 전체지지력은 상대밀도와 수직응력에 거의 무관하고 수평응력에 크게 영향 받음을 알 수 있었으며, 인발시험으로부터 외주면마찰력은 상대밀도에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 그리고 관입저항력(단위깊이 관입에 필요한 타격수)도 지지력과 마찬가지로 지반의 수직응력에는 거의 영향을 받지 않지만 수평응력과 상대밀도에는 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면 백 세환 등<sup>(2)</sup>은 모형 폐단말뚝의 관입시험을 통하여 폐단말뚝의 선단지지력은 수직응력과

수평응력 모두와 관계되는 평균주응력에 의해 좌우된다고 보고하였다.

지반조건의 변화가 관내토의 거동이나 지지력에 미치는 영향에 대한 연구는 Klos와 Tejchman<sup>(6)</sup>의 실험을 제외하고는 거의 실행되지 않고 있다. 이들은 가압이 불가능한 토조에서 상대밀도만을 변화시키면서 개단말뚝의 재하시험을 수행하였다. 실험결과 상대밀도가 커질수록 관입깊이에 대한 관내토의 길이비로 정의되는 관내토 길이비, PLR(plug length ratio)과 말뚝의 전체지지력이 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 이 실험에서는 개단말뚝의 지지력을 분리측정하지 못함으로써 지반조건의 변화가 관내토의 지지력과 외주면마찰력에 미치는 영향은 규명하지 못하였다는 한계를 갖고 있다.

표 1은 이상에서 언급한 모든 결과들을 종합해 놓은 것으로 대체적으로 말뚝의 지지력은 수직응력보다는 수평응력과 상대밀도에 의해 좌우된다는 것을 보여주고 있다.

### 3. 시료 및 실험방법

#### 3.1 시료와 지반조성

지반조성을 위하여 사용된 시료는 한강 난지도에서 채취한 모래로, 공기중에서 장기간 건조시켰으며, 10번체를 통과한 시료만을 사용하였

표 1. 지반의 응력상태와 상대밀도가 말뚝의 지지력에 미치는 영향

	실험장치	수직응력	수평응력	상대밀도
Schmertmann(1972)	원추(cone)	-	-	영향 큼
Villet와 Mitchell(1981)	원추(cone)	조금	-	영향 큼
Baldi 등(1981)	원추(cone)	조금	영향	-
Housby와 Hitchman(1988)	원추(cone)	전혀무관	영향	영향 큼
Vipulanandan등(1989)	폐단말뚝	거의무관	영향 큼	거의 무관
백 세환 등 (1990)	폐단말뚝	영향	영향	-
Klos와 Tejchman(1977)	개단말뚝	-	-	영향 큼

다. 이 시료는 균등계수(Cu)가 2.21이고 곡률계수(Cc)가 1.23으로 통일분류법에서 SP에 해당되며, 비중은 2.64였다. 그리고 최대 및 최소진조단위중량은 각각 1.62g/cm<sup>3</sup>와 1.33g/cm<sup>3</sup>로 구해졌다.

토조내 모래지반은 전조모래의 낙하고를 일정하게 유지시키는 낙사법(sand raining method)에 의하여 조성되었으며, 성형되는 지반의 매층당 높이는 10cm로 일정하게 유지시켰다. 지반의 상대밀도가 말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 모형지반의 상대밀도는 23%(매우 느슨), 56%(보통), 90%(매우 조밀)의 세가지 상태로 조성되었다. 일반적으로 조성되는 모래지반의 상대밀도는 '모래상자-체-조성될 지반'간의 거리와 모래상자에 모래가 유출되는 구멍의 크기에 영향을 받는다고 알려져 있다. 그러나 두가지 방법으로 지반을 조성해본 결과 낙하거리만을 조절할 경우에는 약 15% 정도의 상대밀도 변화만을 얻을 수 있었으나, 낙하거리를 약간 변경시키고 대체로 모래가 유출되는 구멍의 크기를 조절함으로써 원하는 세가지 상태의 지반을 얻을 수 있었다.

시료의 강도정수와 모형말뚝의 벽면마찰각은 직접전단시험으로부터 구해졌으며, 전단시험시 시료조성은 모래지반 조성때와 마찬가지로 낙사법에 의하여 이루어졌다. 표 2는 각각의 상대

밀도에 대한 시료의 내부마찰각과 벽면마찰각을 나타낸 것이다.

표 2. 상대밀도의 변화에 따른 마찰각의 변화

상대밀도(%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi_{peak}$ (°)	$\phi_{residual}$ (°)	$\delta$ °
90	1.585	43.4	33.7	17.7
56	1.478	38.2	33.7	16.1
23	1.387	34.8	33.7	15.0

### 3.2 실험장치

실험에 사용된 토조는 직경이 775mm, 높이가 1250mm이며, 모형말뚝은 외경이 42.7mm, 내경이 36.5mm, 길이가 908mm로 말뚝의 외경에 대한 토조의 직경비는 18.2이다. 이 값은 일반적인 모래지반에서 변형률 경로기법(strain path technique)을 이용하여 계산된 폐단말뚝 선단부에 발생하는 소성영역의 크기인 말뚝직경의 7.5배<sup>(13)</sup>보다는 상당히 큰 값으로, 말뚝의 타입에 의하여 발생하는 소성영역이 토조내에 존재하므로 말뚝의 지지력에 대한 경계효과(boundary effect)는 그다지 크지 않을 것으로 기대된다. 그리고 토조내에는 옆면과 밑면에 두개의 고무막(membrane)을 설치하여 수평과 수직 응

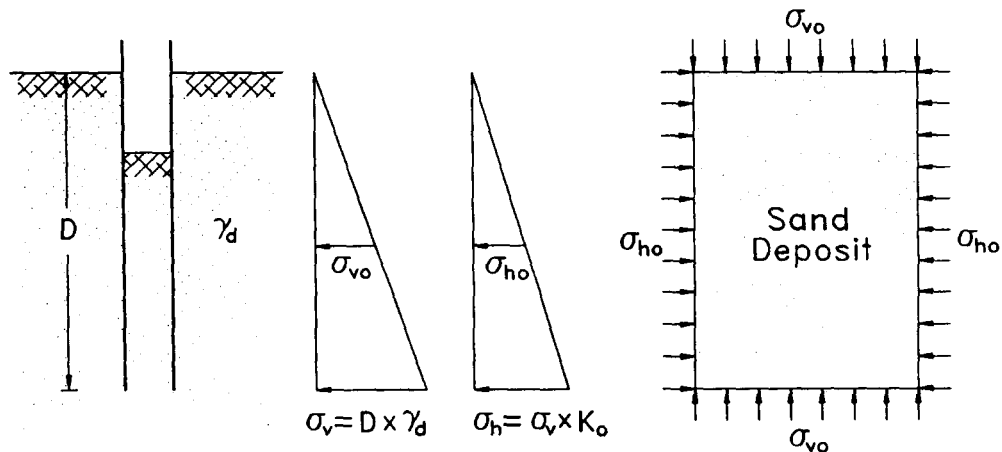


그림 1. 토조에서 지반의 응력상태 재현방법

력을 독립적으로 제어할 수 있도록 하였으며, 모형지반에 가해지는 수평과 수직응력은 모형지반과 같은 상태의 지반에 설치된 현장말뚝의 중간깊이에 해당되는 응력과 같은 크기로 가해졌다(그림 1).

모형말뚝은 직경이 다른 두개의 파이프로 구성되어 있으며, 지지력의 분리측정을 위하여 그림 2와 같이 내부와 외부파이프에 각각 18개와 2개의 strain gauge를 부착하였다.

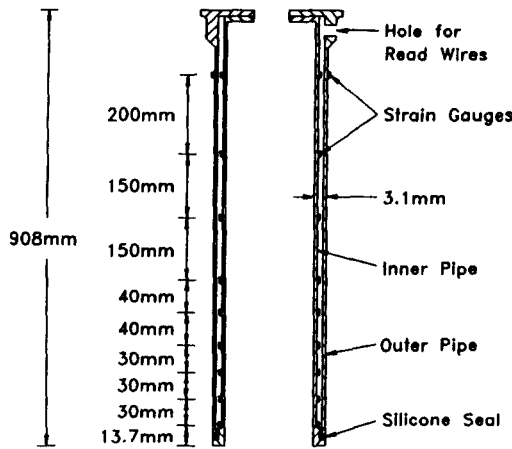


그림 2. 모형말뚝의 개략도

개단말뚝의 선단지지력(관내토에 의한 지지력과 말뚝 단면부에 작용하는 지지력의 합)은 내부파이프의 가장 위에 부착된 gauge를 통하여 측정되며, 말뚝의 단면부에 작용하는 지지력은 내부파이프의 가장 하단부에 부착된 두개의 gauge로부터 구한 관내토의 마찰응력이 말뚝 선단부까지 일정하게 작용한다는 가정하에 외삽법(extrapolation)에 의하여 구해졌다(그림 3).

그리고 외주면마찰력은 load cell로 부터 얻어지는 전체지지력과 선단지지력의 차이로 구해지며, 이값은 외부파이프에 부착된 strain gauge를 이용하여 검증하였다. 검증결과 두가지 방법으로부터 얻은 외주면마찰력은 거의 비슷

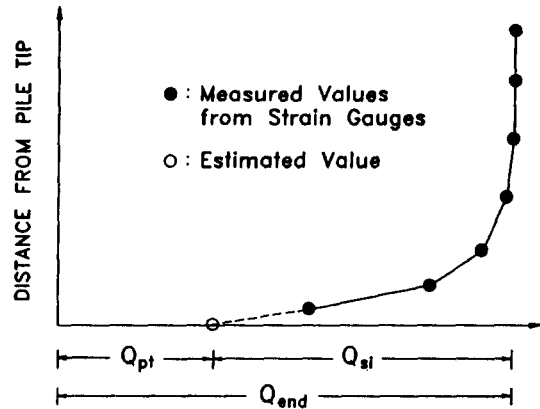


그림 3. 관내토지지력( $Q_{sl}$ )과 말뚝 단면부지지력( $Q_{pt}$ )의 산정방법

함을 보였다.

### 3.3 실험방법

지반조건의 변화가 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상대밀도가 상이한 세가지 상태의 시료를 토조에 조성하였으며, 조성된 지반에 가해진 응력상태는 표 3에 나타나 있다.

수직응력이 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수평응력과 상대밀도를 일정하게 유지시키고 수직응력만을 세단계로 변화(실험 VS, VL, NT)시켰으며, 수평응력의 영향을 알아보기 위하여 수직응력과 상대밀도를 일정하게 하고 수평응력만을 세단계로 변화(실험 NT, HS, HL)시키며 실험하였다. 또한 상대밀도가 말뚝의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수직과 수평응력은 일정하게 유지하고 상대밀도만을 세단계로 변화(실험 NT, DL, DS)시켜 보았다. 이러한 지반조건을 토압계수의 측면에서 보면  $K_0$ 가 0.4인 경우는 정규압밀 상태의 지반을 재현한 것이라 할 수 있으며,  $K_0$ 가 0.4보다 큰 경우는 OCR이  $K_0$ 에 미치는 영향<sup>17)</sup>을 고려하여 과압밀상태의 지반을 재현한 것으로 볼 수 있다.

표 3. 모형지반의 상대밀도와 응력상태

실험계획	상대밀도 Dr(%)	수직응력 $\sigma_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	수평응력 $\sigma_h$ (kg/cm <sup>2</sup> )	토압계수 K <sub>0</sub>
VS	90	0.4	0.4	1.0
VL	90	0.7	0.4	0.57
NT	90	1.0	0.4	0.4
HS	90	1.0	0.7	0.7
HL	90	1.0	1.0	1.0
DL	56	1.0	0.4	0.4
DS	23	1.0	0.4	0.4

말뚝실험은 토조내에 압력이 일정하게 유지 되도록 하기 위하여 모형지반에 압력을 가한지 30시간 경과 후에 실행하였다. 모형말뚝은 무게가 4.0kg인 햄머를 50cm의 높이에서 자유낙하시켜 관입시켰으며, 관입깊이에 따른 폐색정도를 알아보기 위하여 약 3cm의 관입마다 관내토의 높이를 측정하였다.

말뚝의 재하시험은 25cm, 42cm, 59cm, 76cm의 깊이에서 행해졌으며, 전체지지력의 측정을 위하여 말뚝 두부에는 load cell을 설치하였다. 그리고 재하시험전에 strain gauge는 영점조정되었으며, 재하시험동안에 gage의 결과는 data logger(M-M사의 V/E-20A)를 통하여 얻어졌다. 실험장치와 실험방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌(1)에 나타나있다.

#### 4. 실험결과 및 분석

그림 4는 지반조건의 변화가 말뚝의 관입깊이에 대한 관내토의 길이비로 정의되는 관내토 길이비(PLR)와 단위 관입깊이 증가에 대한 관내토 길이의 증분으로 정의되는 특정회수율( $\gamma$ , specific recovery ratio)에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 실험결과들은 지반조건이 관내토의 거동에 미치는 영향을 쉽게 파악하기 위

하여 실험 NT( $\sigma_v=1.0\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_h=0.4\text{kg/cm}^2$ )로부터 얻어진 결과에 의하여 규준화(normalize)되었다.

그림 4.a와 그림 4.b는 PLR의 비와 특정회수율의 비를 나타낸 것으로 수직응력을 변화시킨 실험 VS와 VL의 결과는 1.0 부근에 위치하므로써, 수직응력의 변화가 PLR이나 특정회수율에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 그리고 수평응력을 증가시킨 실험 HS와 HL의 결과는 1.0보다 큰곳에 위치하고, 상대밀도를 감소시킨 실험 DS와 DL의 결과는 1.0보다 작은 곳에 위치하므로써 수평응력과 상대밀도가 작아질수록 PLR과 특정회수율이 작아져서 말뚝의 폐색효과가 촉진됨을 알 수 있으며, 이러한 경향은 말뚝의 관입깊이가 깊어짐에 따라 더욱 확실해진다. 따라서 개단강관말뚝이 상대밀도와 수평응력이 작은 지반에 사용된 경우에는 말뚝의 폐색이 촉진되어 폐단말뚝과의 지지력차이가 줄어들므로 그렇지 않은 지반에 사용된 경우보다 더욱 효과적일 수 있다.

그림 5는 59cm의 관입깊이에서 행한 말뚝재하시험으로부터 얻어진 관내토의 하중전이 메카니즘을 나타낸 것으로, 여기에서 지반의 응력상태와 상대밀도가 관내토 내부에 유발된 수직응력의 분포에 미치는 영향을 살펴볼 수 있

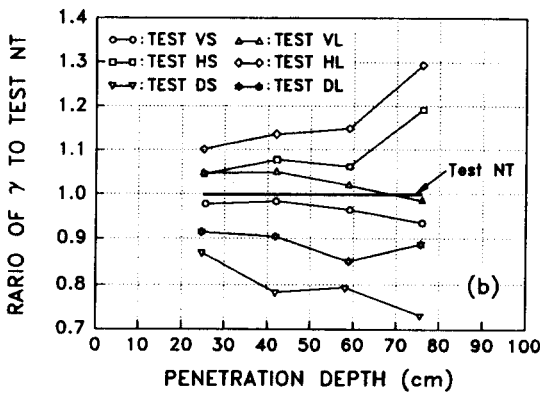
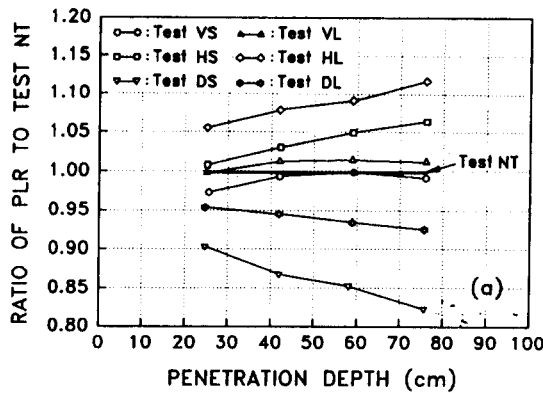


그림 4. 지반조건 변화가 관내토의 거동에 미치는 영향 (a) PLR에 미치는 영향 (b)  $\gamma$ 에 미치는 영향

다. 일반적으로 관내토는 말뚝과의 마찰에 의하여 관내토 지지력을 유발시키는 썬기영역(wedged plug)과 마찰은 유발되지 않고 썬기영역에 사하중으로 작용하여 관내토의 지지력을 증가시키는 역할을 하는 사하중영역(unwedged plug)으로 구분하고 있다.<sup>(8)</sup> 실험결과 상대밀도가 90%인 경우에 관내토의 썬기영역 길이는 말뚝선단부로부터 말뚝내경의 약 5배(18.25cm) 정도이며, 썬기영역의 길이는 말뚝의 관입깊이나 지반의 응력상태에 관계없이 거의 일정하다(그림 5.a와 그림 5.b). 그러나 지반의 상대밀도가 작아지면 썬기영역도 약간씩 작아지는 것을 그림 5.c에서 알 수 있다. 즉 상대밀도가 90%인 경우(실험 NT)에 썬기영역의 길이는

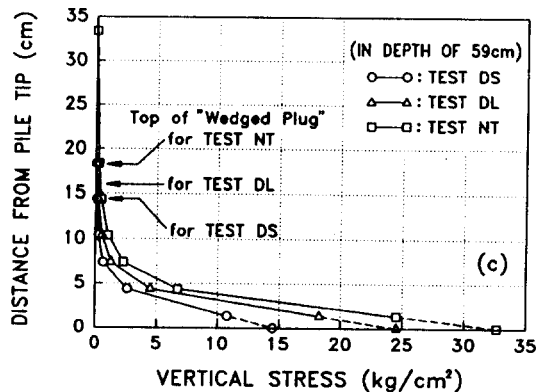
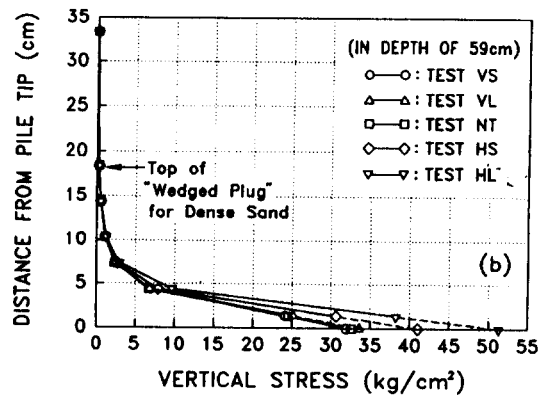
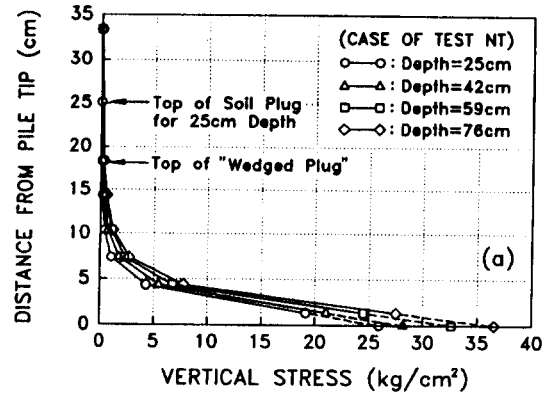


그림 5. 지반조건 변화가 관내토 내부에 유발되는 수직응력의 분포에 미치는 영향 (a) 관입깊이의 영향 (b) 지반응력의 영향 (c) 상대밀도의 영향

말뚝내경의 약 5배정도이나, 상대밀도가 56%(실험 DL)와 23%(실험 DS)로 감소함에 따라

쇄기영역의 길이도 말뚝내경의 약 4.4배(16.06cm)와 약 4.0배(14.60cm)로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러므로 관내토의 지지력을 유발시키는 쇄기영역의 길이는 말뚝의 관입깊이나 지반의 응력상태보다는 주로 지반의 상대밀도(혹은 말뚝의 벽면마찰각)에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

그림 6은 지반조건의 변화가 말뚝의 관입저항력에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 관입저항력은 일정 깊이까지 말뚝을 타입시키는데 필요한 향타수로 표시하였다.

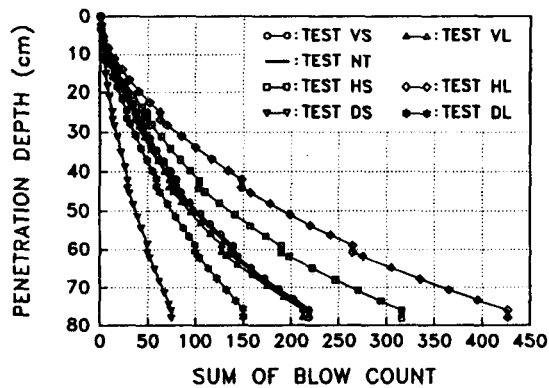


그림 6. 지반조건의 변화가 말뚝의 관입저항력에 미치는 영향

그림에서 보이는 것과 같이 관입저항력은 수직응력의 변화에 거의 영향을 받지 않지만, 수평응력과 상대밀도가 커질수록 관입저항력이 급격히 증가하고 있다. 따라서 수직응력보다는 수평응력과 상대밀도가 말뚝의 관입저항력에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 관입저항력 곡선으로부터 관입저항력이 어떠한 메카니즘에 의하여 발휘되는가 하는 것도 알 수 있다. 만약 외주면마찰력이 말뚝의 전길이에 걸쳐 거의 균일하게 작용하고 관입저항력이 주로 외주면마찰력에 의하여 발휘된다고 가정하면, 말뚝의 관입깊이가 깊어짐에 따라 관입저항력도 증가하게 된다. 이러한 생각에 근거하여 Yamagata<sup>(14)</sup>는 균질한 지반에서 말뚝의 관입저항력 곡선이 거의 직선으로 나타나는 현장실

험 결과를 분석하였으며, 분석결과 말뚝의 관입저항력의 대부분은 선단지지력에 의하여 발휘된다고 보고하였다.

말뚝의 관입이 네단계(0-25cm, 27-42cm, 44-59cm, 61-76cm)로 진행된 모형실험 결과에서도 첫번째 관입단계를 제외한 나머지 단계에서는 관입저항력 곡선이 거의 직선으로 나타났다. 이러한 실험결과로부터 말뚝의 외주면마찰력과 말뚝의 폐색정도가 관입저항력에 미치는 영향은 아주 작으며, 관입저항력은 말뚝의 선단지지력에 의하여 대부분 발휘된다는 Yamagata의 결론이 타당함을 확인할 수 있다. 말뚝재하시험 전후에 관입저항력 곡선의 기울기가 바뀌는 것은 말뚝의 정적관입(재하시험)으로 인하여 말뚝 선단부의 지반이 더욱 다져져서, 재하시험 후에 말뚝이 타입되는 동안 선단저항력이 전보다 증가되기 때문인 것으로 사료된다. 반면 첫번째 단계에서 관입저항력 곡선이 직선이 아닌 곡선으로 나타난 것은 관내토의 지지력을 발휘하는 관내토의 쇄기영역이 형성되는 단계에서 관입깊이가 증가함에 따라 쇄기영역의 형성과 더불어 관내토의 지지력이 증가하기 때문으로 사료된다.

그림 7은 지반의 응력상태와 상대밀도가 관내토의 지지력에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 먼저 관입초기에 수직응력은 관내토의 지지력에 거의 영향을 미치지 못하다가 관입깊이가 깊어지면서 수직응력이 증가함에 따라 관내토 지지력도 약간 증가하는 경향을 나타내며(그림 7.a), 지반의 수평응력과 상대밀도는 모든 관입깊이에서 관내토의 지지력에 매우 큰 영향을 미침을 그림 7.b와 그림 7.c에서 볼 수 있다. 따라서 수직응력보다는 수평응력과 상대밀도가 관내토의 지지력 결정에 더욱 중요한 요소라고 판단된다.

그림 8은 지반조건이 상이한 실험으로부터 얻어진 여러 외주면마찰력들을 실험NT( $\sigma_{vo}=1.0\text{kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{ho}=0.4\text{kg/cm}^2$ )에서 얻어진 외주면마찰력으로 표준화시켜서 나타낸 것으로, 실험VS와 VL로부터 얻어진 값들은 대략 1.0 부근에



존재하는 것으로 미루어 수직응력이 외주면마찰력의 크기에 전혀 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

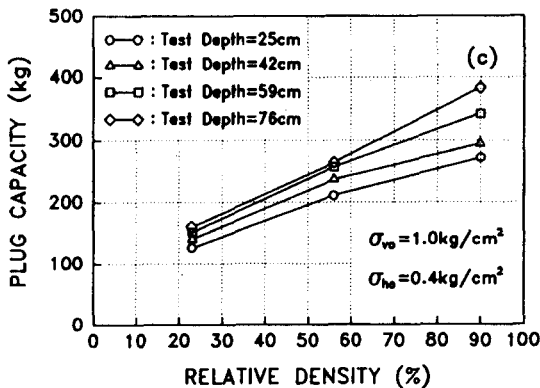
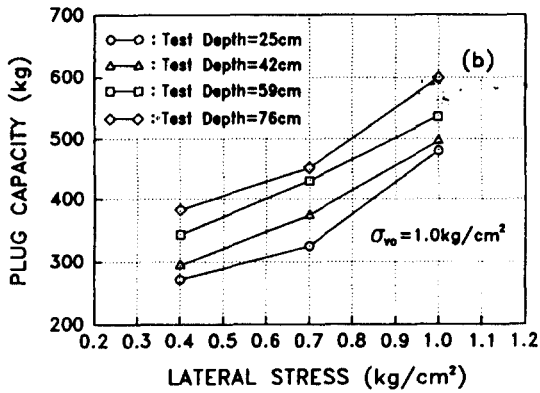
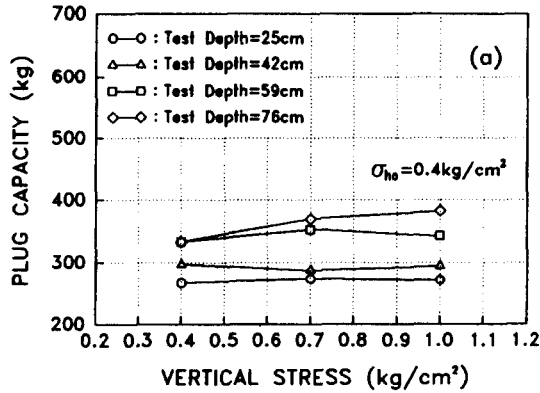


그림 7. 지반조건 변화가 관내토의 지지력에 미치는 영향 (a)수직응력의 영향 (b)수평응력의 영향 (c)상대밀도의 영향

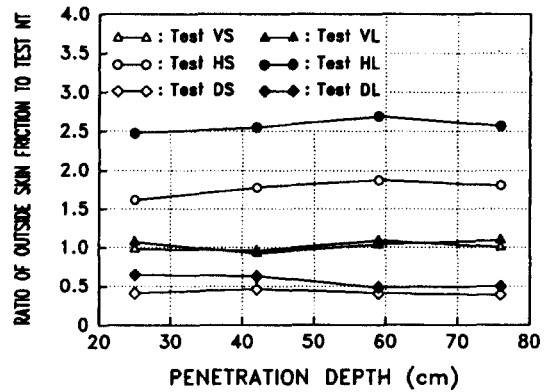


그림 8. 지반조건 변화가 외주면마찰력에 미치는 영향

그러나 수평응력이 변화된 실험 HS와 HL로부터 얻어진 값들의 평균치는 1.77과 2.58로, 실험 NT에 가해진 원지반의 수평응력에 대한 실험 HS와 HL에 가해진 원지반의 수평응력 비인 1.75 및 2.50과 거의 같은 값을 나타낸다. 따라서 개단말뚝의 외주면마찰력은 원지반의 수평응력과 밀접한 관계에 있음을 짐작할 수 있다. 또한 상대밀도가 작아지면 외주면마찰력도 작게 측정되는 실험 DS와 DL의 결과로부터 수평응력과 함께 상대밀도도 외주면마찰력에 영향을 주는 요소임을 알 수 있다. 이러한 결과는 느슨한 시료보다는 조밀한 시료에서 외주면마찰력이 크다는 Vipulanandan 등<sup>(13)</sup>의 실험결과와 일치된다.

그림 9는 아래 식을 이용하여 여러가지 지반 조건에서 측정된 외주면마찰력으로부터 구해진 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력( $\sigma_h$ )을 원지반의 수평응력( $\sigma_{ho}$ )으로 표준화시킨 값들을 나타낸 것이다.

$$Q_{so} = f_{so} A_{so} = (\sigma_h \tan \delta) A_{so}$$

여기서,

$Q_{so}$  = 개단말뚝의 외주면마찰력

$A_{so}$  = 말뚝 외주면의 면적

$f_{so}$  = 개단말뚝의 단위 외주면마찰력

$\sigma_h$  = 말뚝 이벽에 작용하는 수평응력

$\delta$  = 원지반에 대한 말뚝의 벽면마찰각

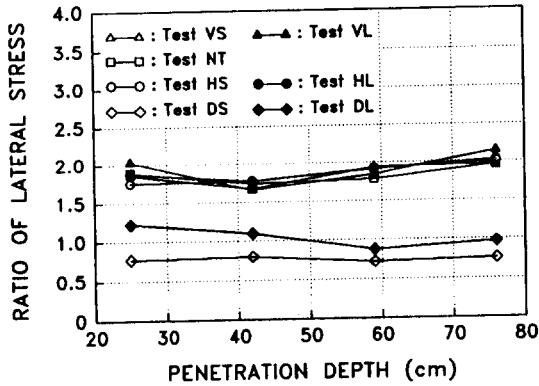


그림 9. 지반조건에 따른 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력의 변화

실험결과를 살펴보면 말뚝의 외벽에 작용하는 수평응력은 말뚝의 관입으로 인한 지반의 교란때문에 원지반의 수평응력과는 다르게 된다. 수평응력이 변화되는 비율은 말뚝의 관입 깊이와 원지반의 수평응력 크기에는 거의 무관하게 일정한 값을 가지며, 지반의 상대밀도에는 큰 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력의 크기를 살펴보면, 상대밀도가 90%로 지반이 매우 조밀한 상태에서는 원지반 수평응력의 1.882배로 말뚝을 타입하기 전보다 커지며, 상대밀도가 56%로 중간상태의 지반에서는 원지반 수평응력의 1.040 배로 수평응력이 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 또한 상대밀도가 23%로 매우 느슨한 지반에서는 응력비가 0.765로 원지반의 수평응력보다 오히려 작아졌음을 알 수 있다.

말뚝외벽에 작용하는 수평응력의 변화 비율이 상대밀도에 따라 차이가 발생하는 현상은 개단말뚝이 관입되면서 원지반을 교란시키는 정도가 다르기 때문으로 설명될 수 있다<sup>(9)</sup>. 즉 압축성이 큰 느슨한 지반에 말뚝을 관입시키면 말뚝벽면을 따라서 발생하는 흠 입자의 재배열은 벽면에 존재하는 흠의 부피를 감소시켜서 말뚝벽면에 작용하는 수평응력을 원지반의 수평응력보다 작게 한다. 그러나 교란시 팽창거동

을 나타내는 조밀한 지반의 경우에는 말뚝의 관입에 의해 벽면에 존재하는 흠의 부피는 팽창하며, 그로 인하여 수평응력은 원지반의 수평응력보다 커지게 되는 것이다. 그러므로 개단말뚝의 외주면마찰력을 정확히 산정하기 위해서는 원

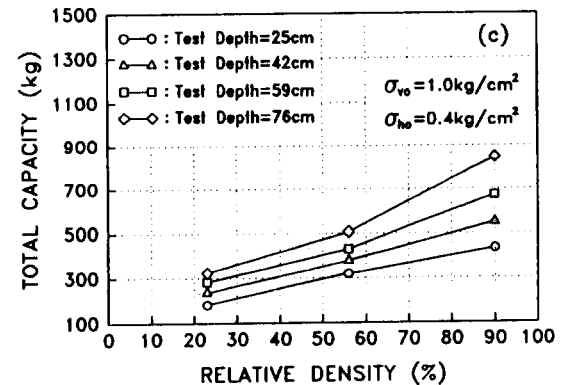
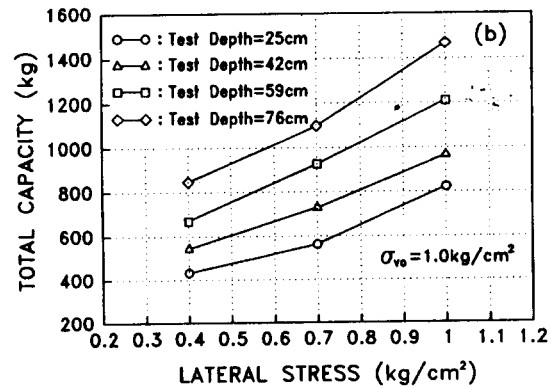
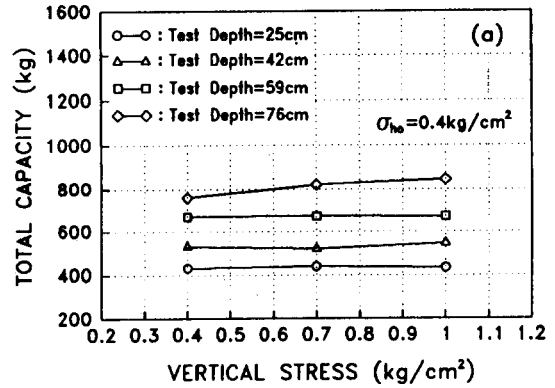


그림 10. 지반조건에 따른 전체지지력에 미치는 영향 (a)수직응력의 영향 (b)수평응력의 영향 (c)상대밀도의 영향

지반의 수평응력 뿐만 아니라 상대밀도에 따른 영향도 반영하는 것이 무엇보다도 중요하다고 사료된다.

그림 10은 수직응력과 수평응력, 그리고 상대밀도가 개단말뚝의 전체지지력에 미치는 영향을 각각의 관입깊이에 대하여 나타낸 것이다. 관내토 지지력과 마찬가지로 전체지지력도 수직응력에는 거의 영향을 받지 않으며, 수평응력과 상대밀도에 큰 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 따라서 개단말뚝의 지지력을 정확히 예측하기 위해서는 DMT(dilatometer test)나 PMT(pressuremeter test)등을 이용하여 원지반의 수평응력을 정확히 측정하는 것이 필요하다고 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 개단말뚝 각 부분에 작용하는 지지력의 분리측정이 가능하도록 제작된 모형 개단강관말뚝과 상대밀도와 응력상태를 자유롭게 조절할 수 있는 토조를 이용하여 지반조건이 개단말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하였으며, 실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 개단말뚝의 폐색정도는 수직응력의 변화와는 거의 무관하며, 수평응력과 상대밀도가 작을수록 관내토의 높이는 작아지고 폐색정도는 더욱 커지는 것으로 나타났다.
2. 관내토의 지지력이 발휘되는 췌기영역은 말뚝의 관입깊이나 지반의 응력상태와는 거의 무관하게 일정하였으나, 지반의 상대밀도가 감소함에 따라 췌기영역의 거리도 약간씩 줄어드는 경향을 나타냈다. 그러므로 관내토의 췌기영역 길이는 지반의 상대밀도나 말뚝의 벽면마찰각에 의하여 결정되는 것으로 생각된다.
3. 말뚝의 관입저항력은 지반의 수평응력과 상대밀도에 의존하는 경향이 두드러지며, 주면마찰력보다는 선단지지력에 의하여 좌우되는 것으로 사료된다.

4. 관내토의 지지력과 전체지지력은 모든 관입깊이에서 수평응력과 상대밀도에 매우 큰 영향을 받으며, 관입깊이가 깊어지면서 수직응력의 변화에도 약간의 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 말뚝이 관입된 후 말뚝 외벽에 작용하는 수평응력은 원지반의 수평응력에 관계없이 조밀한 상태의 지반에서는 원지반의 수평응력보다 크게, 보통상태의 지반에서는 원지반 수평응력과 거의 비슷하게, 그리고 매우 느슨한 상태의 지반에서는 원지반 수평응력보다 작게 측정되었다. 이러한 결과는 말뚝이 타입될 때 상대밀도에 따라 말뚝 벽면에 존재하는 흡입자의 거동이 달라지는 현상을 이용하여 설명될 수 있다.

이상의 실험에서 얻어진 실험치들과 결론들은 개단강관말뚝에 대하여 기존에 제안된 지지력 산정식의 정확도를 알아보는데 이용될 수 있으며, 기존 제안식의 지지력 예측 정확도가 높지 않을 경우에는 새로운 지지력 산정식을 만드는데도 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 필자들은 얻어진 결과들을 이용하여 기존 지지력 산정식의 정확도를 알아보는 것과 동시에 실험결과와 부합되는 새로운 지지력 산정식을 제안하고자 연구를 진행중에 있다.

## 참 고 문 헌

1. 백규호 · 이종섭 · 이승래(1993), "모래지반에 타입된 모형 개단강관말뚝의 지지력 분석," 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp.31-44.
2. 백세환 · 이명환 · 이원제(1990), "사질토 지반에서의 정적관입저항과 기준응력과의 관계," 대한토질공학회지, 제6권, 제4호, pp.33-42.
3. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiołkowski, M. and Pasqualini, E. (1981), "Cone Resistance in Dry NC and OC sands," Proc. Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp. 145-177.
4. Houlsby, G.T. and Hitchman, R. (1988), "Calibration Chamber Tests of a Cone Penetrom-

- eter in Sand," *Geotechnique*, Vol.38, pp.39-44.
5. Kishida, H. and Isemoto, N. (1977), "Behavior of Sand Plugs in Open-End Steel Pipe Piles," *Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol.1*, pp.601-604.
  6. Klos, J. and Tejchman, A (1977), "Analysis of Behavior of Tubular Piles in Subsoil," *Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol.1*, pp.605-608.
  7. Mayne, P.W. and Kulhaway, F.H.(1982), "K<sub>o</sub>-OCR Relationships in Soil", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 108, No.GT6, pp.851-872.
  8. O'Neill, M.W. and Raines, R.D. (1991), "Load Transfer for Pipe Pile in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 117, No.8, pp.1208-1226.
  9. Randolph, M.F. (1988), "The Axial Capacity of Deep Foundations in Calcareous Soil," *International Conference on Calcareous Sediments, Vol.2*, pp.837-857.
  10. Schmertmann, J.H.(1972), "Effect of In-situ Lateral Stress on Friction Cone Penetrometer Data in sand," *Proc. Fugro Sondeer Symposium, Fugro-Cesco, Holland*, pp.37-39.
  11. Szechy, C.H. (1959), "Tests with Tubular Piles," *AcTa Technica of the Hungarian Academy of Science, Vol.24*, pp.181-219.
  12. Villet, W.C.B. and Mitchell, J.K. (1981), "Cone Resistance, Relative Density and Friction Angles," *Proc. Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, pp.178-208.
  13. Vipulanandan, C., Wong, D., Ochoa, M. and O'Neill, M.W. (1989), "Modelling of Displacement Piles in Sand using a Pressure chamber," *Foundation Engineering : Current Principles and Practices, Vol.1, ASCE*, pp.526-541.
  14. Yamagata, K., Fukuya, T. and Omote, S. (1985), "Penetrability of Open Ended Steel Pipe Piles on Land," *Proceedings of International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles, San-Francisco, Vol.1*, pp. 123-126.

(접수일자 1993. 2. 18)