

# 하중 방향(압축-인발)과 말뚝 직경이 말뚝의 지지력에 미치는 영향에 관한 연구

—실내모형시험—

The Effect of Load Direction and Pile Size on  
the Pile Bearing Capacity : Model Pile Tests

이 인 모\*<sup>1</sup> 이 명 환\*<sup>2</sup>  
Lee, In-Mo Lee, Myung-Whan  
백 세 환\*<sup>3</sup> 김 동 현\*<sup>4</sup>  
Paik, Se-Whan Kim, Dong-Hyun  
이 정 학\*<sup>4</sup>  
Lee, Jeong-Hark

---

## Abstract

Model pile tests using calibration chamber are performed in this paper in order to clarify the effect of the fundamental differences between the newly developed SPLT(Simple Pile Loading Test) and the conventional pile loading test on the pile bearing capacity. They are: (1) the direction of the applied load to mobilize the skin friction; and (2) the use of reduced sized sliding core.

The conclusions obtained from the model pile tests are as follows :

- (1) The skin friction in tension loading is found to be somewhat smaller than that in compression loading. The average ratio is 0.73 with the coefficient of variation (COV) of 0.18.
- (2) The ratio of the tip resistance using the reduced sized sliding core to that using the whole shoe shows wide scattering ; its average is 0.99 and the COV is 0.28. The average of 0.99 means that there is no considerable difference in the tip resistance whether the reduced sized sliding core or the whole shoe is used, on condition that penetration depth ratio is larger than 4 ; if the boundary effect of the chamber test is considered, the resistance of the whole shoe might be even larger.

## 요 지

본 연구에서는 기존의 말뚝 재하시험과 새로 개발된 SPLT(Simple Pile Loading Test)간의 차이점이 말뚝지지력에 미치는 영향을 명확히 밝히기 위하여 모형토조(calibration chamber)를 사용한 실

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

\*<sup>2</sup> 정회원, (주)고려기초연구소 대표이사

\*<sup>3</sup> 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*<sup>4</sup> 정회원, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

내 모형 말뚝 시험이 계획되었다. 두 시험법 사이의 근본적인 차이점은 다음과 같다. 그 첫째는 주면마찰력 산정시 하중의 방향이 다르다는 점이고, 둘째는 선단 지지력의 산정시 축소된 선단부를 사용한다는 점이다.

이 논문에서는 모형토조를 이용한 모형시험을 실시하여 위와같은 두가지의 근본적인 차이점의 영향을 규명하고자 하였다. 본 실험 연구 결과를 요약하여 보면 다음과 같다.

- (1) 주면 마찰력은 일반하중시가 압축하중시보다 작은 현상을 보였으며 그 비의 평균은 0.73, 변동계수는 0.18 이었다.
- (2) 말뚝직경의 크기가 선단 지지력에 미치는 영향은 큰 직경에 대한 작은 직경의 비가 평균 0.99, 변동계수 0.28로서 넓은 분포를 보였다. 이 결과에 의하면 관입깊이비가 4보다 큰 한, 큰 직경의 말뚝 지지력이 작은 직경에 비하여 작지 않았으며 chamber의 경계효과를 고려한다면 큰 직경의 말뚝 지지력이 오히려 더 클 수도 있음을 보여주었다.

---

## 2. 하중방향에 따른 주면마찰력

### 1. 서 론

기존의 말뚝재하시험 방법에 수반되는 시간적, 경제적 노력을 줄이고 선단지지력과 주면마찰력의 분리측정이 가능한 간편한 말뚝재하시험 (SPLT ; simple pile loading test) 기법이 국내에 소개되어 몇몇 현장에 적용되었다.<sup>(2)</sup> 간편한 말뚝재하시험의 기본원리는 시험말뚝의 선단부에 말뚝본체와 분리될 수 있는 슈(shoe)를 부착하고 말뚝내부에 하중전달을 위한 내부강봉을 설치하여 이를 통해 하중을 분리할 수 있는 슈에 전달한다. 이 때 선단지지력에 대한 반력으로 말뚝의 주면마찰력이 저항하도록 함으로써 재하장치나 하중의 설치를 생략하였다.

위에서 언급한 간편한 말뚝재하시험은 기존의 방법과 2가지의 근본적인 차이점이 있는데 첫째, 주면마찰력이 압축하중에 대한 저항력이 아닌 인발저항력으로 산정된다는 것이며, 둘째 선단지지력의 측정시 축소된 선단부를 사용한다는 점이다.

새로운 시험방법은 기존의 방법들이 가지고 있는 난점을 상당부분 해소하였으나 기존의 시험방법과의 차이에서 발생하는 의문점 해소가 새로이 요구됨에 따라 본 논문에서는 모형토조를 사용한 실내모형시험을 행하여 간편한 말뚝재하시험의 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

축방향 압축하중이 작용하는 대부분의 말뚝기초에서는 말뚝설치방향으로 전단이 일어나게 되며 기존의 말뚝재하시험은 이러한 상황을 만족시킨다. 축방향 인발하중이 작용하는 SPLT에서는 말뚝설치과정과는 다른 흡구조 변화가 발생하여 주변지반의 전단특성에 영향을 주게된다. 이로부터 말뚝표면과 지반의 마찰력에도 변화가 있을 수 있음을 추측할 수 있다.<sup>(17)</sup>

일반적으로 인발저항력은 압축주면마찰저항에 비하여 작은 값을 갖는다고 알려져 있으며 McClelland가 제안한<sup>(14) (15)</sup> 압축주면마찰의 70%의 값을 사용하는 것이 설계에서 보편적으로 받아들여지고 있는 듯하다. 그러나 하중의 작용방향에 관계없이 주면마찰력에 근본적인 차이가 없다는 주장도 있다.<sup>(8)</sup>

그럼에도 불구하고 실제 양자의 차이가 발생하는 이유는 현재까지의 연구결과를 종합하여 볼 때 다음과 같이 세가지로 요약된다.

첫째, 주면마찰력은 선단지지력과 별개의 독립된 요소가 아니라 상호 함수관계에 있다는 주장이다<sup>(6)</sup>. 따라서 말뚝이 압축하중을 받아 저항할 경우 주면마찰력만을 따로 분리하여 고려하기가 곤란하다.

둘째, 말뚝타입시 말뚝내부에 발생하여 존재하

게 되는 잔류응력(residual stress)의 영향이다. 이 잔류응력은 인발하중을 받을 경우 거의 소멸되므로 압축하중시와 다른 거동을 보일 수 있다<sup>(7)</sup>. Hunter & Davisson의 연구결과에 따르면 이러한 잔류응력을 실측하고 이 값을 보정한 결과 인발저항력을 예측할 수 있었다<sup>(11)</sup>.

세번째로 말뚝의 길이와 재질이 양자의 차이를 유발한다는 주장이다: 상대적으로 가는 말뚝의 경우 지반의 방사능력(放射能力)은 인발하중시에 말뚝을 수축시켜서 주변마찰력을 감소시키는 경향이 있는 반면, 압축하중시에는 말뚝을 팽창시켜 주변마찰력을 증가시키는 경향이 있다.

### 3. 말뚝직경의 차이가 선단지지력에 미치는 영향

말뚝크기의 선단지지력에 대한 영향은 1960년경 Kerisel과 De Beer의 연구결과가 발표된 이래 아직까지 논란의 대상이 되고있다<sup>(8)(12)</sup>. 축소된 선단부로부터 측정된 선단지지력에 전체 선단부와와 단면적비를 고려하여 선단지지력을 산정하는 것은 양자의 크기차이로부터 발생하는 치수효과(scale effect)에 대한 의문을 야기시킬 수 있다.

소성이론을 근거로 한 말뚝지지력 해석에서 말뚝의 단위면적당 선단지지력은 다음의 식으로 표시될 수 있다.

$$q_p = cN_c + \sigma' N_q + \frac{1}{2} r' DN_r$$

여기서  $q_p$ : 단위면적당 선단지지력

$c$ : 흙의 점착력

$\sigma'$ : 말뚝선단부에서의 유효수직응력

$r'$ : 흙의 유효단위중량

$D$ : 말뚝의 직경

$N_c, N_q, N_r$ : 지지력 계수

말뚝의 폭은 상대적으로 작기 때문에 위식의 제 3항  $\frac{1}{2} r' DN_r$ 는 제 2항  $\sigma' N_q$ 의 값에 비하여 상

대적으로 낮은 값에 불과하며 따라서 사질토 지반에서 말뚝의 선단지지력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_p = A_p q_p = A_p \sigma' N_q$$

여기서  $Q_p$ : 말뚝선단부의 지지력

$A_p$ : 말뚝선단부의 면적

균질한 시질토 지반의 경우는 아래와 같이 표시된다.

$$Q_p = A_p (rL - r_w L_w) N_q$$

여기서  $r$ : 균질한 지반의 단위중량

$r_w$ : 물의 단위중량

$L$ : 말뚝의 길이

$L_w$ : 지하수위면으로부터 말뚝선단부까지의 깊이

균질한 사질토 지반에서 지지력 계수  $N_q$ 는 내부 마찰각  $\phi$ 에 의존하여 일정한 값을 갖게 되며 지하수위가 확정되면 말뚝의 선단지지력은 말뚝관입깊이의 1차함수가 되므로 말뚝의 선단지지력은 관입깊이에 따라서 선형증가하게 된다. 따라서 이론적인 말뚝해석시에는 말뚝크기에 관계없이 선단지지력이 계산됨을 알 수 있다. 이러한 형태의 변형은 말뚝선단부 아래쪽으로부터 일정한 형태 및 범위를 갖는다.

1950년대말 불란서의 Kerisel<sup>(12)</sup>은 이러한 이론해석과는 상이한 실측치들을 보고하였다. 시험결과에서 중요한 점은 말뚝 선단지지력과 관입깊이의 관계가 이론해석의 경우처럼 직선증가하지 않고, 일정한 관입깊이까지는 직선증가하나 그 이상이면 일정한 값에 수렴한다는 것이다. 이 이론은 1960년대에 Vesic에 의해서 확인된 바 있으며<sup>(11)</sup> 말뚝의 지지력이 수렴할 때의 깊이를 한계관입깊이(critical penetration depth)라고 부른다. 한계관입깊이는 말뚝의 직경과 상대밀도의 함수인 것으로 밝혀졌다. 따라서 한계관입깊이는 절대값보다는 상대관입깊이  $(L/D)_c$  ( $L$ : 관입깊이,  $D$ : 말뚝의 직경)에 의해 나타내는 것이 효율적이며 이 값은 느슨한 지반의 경우 4, 조밀한 지반의

경우에는 15정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

Kerisel은 또한 말뚝의 선단지지력은 말뚝의 직경이 커지면 상대적으로 낮은 극한값을 갖고 반대로 작은 직경의 관입체에서는 높은 극한 선단지지력이 나타난다고 하였다. 이는 공동확장이론에 의해서 설명될 수 있으며, 기본개념은 다음과 같이 설명할 수 있다. 말뚝이 지지층내를 관입하게 되면 관입깊이에 따라 말뚝선단부를 중심으로 한 구형의 변형구간이 형성되게 한다. 관입이 계속되면 변형구간의 범위도 확장되나 한계상태 도달 이후에는 그 크기가 일정하게 된다. 한계상태도달을 위해서는 말뚝직경의 일정배수에 해당하는 지지층내의 관입이 필요하며 그 절대값은 말뚝의 직경이 커지게 되면 증가하게 된다. 반면 말뚝직경이 작아지게 되면 절대값에 있어 작은 관입시에도 상대관입깊이는 큰 값을 갖게 되어 한계상태에 도달하게 된다.

#### 4. 실내실험

##### 4.1 실험장치 및 기구

현장에서의 응력조건을 실내지반으로 재현하기 위해서는 가압이 가능한 모형토조의 사용이 필수적이며 그 당위성이 인정되고 있는 추세이다. 이와 같이 가압이 가능한 모형토조가 calibration chamber이다. 모형토조(calibration chamber)를 사용함에 있어서는 단순히 응력조건을 재현뿐만 아니라 다음과 같은 요소들에 주의하여야 한다 (13) (16)

- (1) 모형토조의 크기, 즉 경계효과 (boundary effect)
- (2) 모형토조의 가압조건, 즉 경계조건(boundary condition)

모형토조의 크기는 사용되는 말뚝직경과 대비하여 어떤 값 이상 되어야 강성체인 벽면(rigid wall)의 영향을 없앨 수 있으며, 벽면이 강성체일 경우 관입체 직경의 약 200배 이상, 변위가 허용되는 유연한 관입체의 경우 약 20배 이상되어야 한다고 보고된 바 있다. 모형토조의 가압조건은 응력 또는 변위제어 방법이 있으나 응력제어 방법이

사용상 간편하여 많이 사용되고 있다 (4) (5)(10).

이와같은 점을 고려하여 그림 1과 같이 모형토조를 설계하였으며, 사용된 토조의 직경은 76.4cm 높이는 100cm로 모형말뚝과의 직경대비가 19로서 지반이 조밀할 경우 토조의 경계효과가 존재할 것으로 본다. 토조의 윗판은 토조와 볼트연결 하도록 되어 있으며 토조의 윗판에 모형말뚝의 관입을 위한 구멍외에 8개의 볼트구멍을 설치하여 재하시험시 토조의 윗판에 반력볼트를 설치할 수 있도록 하였다. 가압을 위한 고무막은 토조의 벽면과 바닥면에 그림 1과 같이 설치하였고 경계조건은 응력제어법을 선택하였다

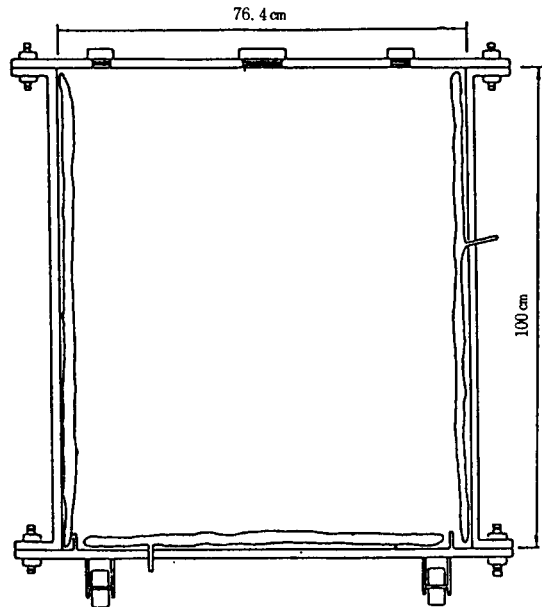


그림 1. 모형토조(calibration chamber)의 제원 및 고무막(membrane)의 설치

모형말뚝은 외경 4cm의 강철관에 슈(shoe)를 부착하여 현장에서의 SPLT를 실내시험으로 그대로 재현할 수 있게 하였다. 현장에서 사용되는 슈의 경사각이 53.9°임을 고려하여 모형실험에서는 60° 슈를 사용하였으며 슈의 제작을 위해 부득이 직경이 커지게 되었다. 지반조성에는 모래비 기법(raining method)이 사용되었다. 이 방법은

다른 모래의 다짐효과를 얻기 위해 일정한 높이에서 일정한 눈금의 체를 통과한 모래 입자가 자유낙하 하도록 한 것이며, 균질한 밀도의 지반을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>(19)</sup>. 이때 조성되는 지반의 밀도는 자유낙하고와 체의 눈금, 즉 모래의 공급량에 따라 변화하는데 체의 눈금이 일정하다고 가정할 경우 지반의 밀도는 자유낙하고가 커질수록 점차로 증가하나 일정높이 이상이 되면 어느 한계값에 도달한다고 한다<sup>(13)</sup>. 한편 모래낙하장치에는 매스 스프레더(mass spreader)와 트래블링 스프레더(travelling spreader) 두가지 방법을 고려할 수 있는데 트래블링 스프레더의 경우 시료의 균질성이 떨어지는 것으로 알려져 있으며<sup>(16)</sup> 이는 모래의 자유낙하시 공기흐름의 영향으로 낙하속도가 일정치 않기 때문이다. 본 실험에서는 10번 체를 사용하였으며 시료상자에서 체에 도달하는 높이는 47cm, 체로부터 바닥면까지의 높이는 56cm이며 층당 15cm로 조성하였고, 모래의 낙하장치는 매스 스프레더를 사용하였다. 모형지반의 조성과 가압 후 약 22시간이 지난 뒤에 모형토조내의 토압이 일정하게 유지된다는 연구결과에 따라<sup>(1)</sup> 실험은 24시간 이상 압력을 유지시킨 후 수행하였다.

재하장치로는 유압잭을 사용하였으며, 재하용량은 5ton이다. 하중측정에는 검력계가 사용되었으며 허용하중은 각각 400kgf, 3ton이다. 말뚝의 변위는 두개의 다이얼 게이지 (강도 1/100mm)를 말뚝 두부 내지 내부강봉에 대칭으로 부착하여 측정하였다. (그림 2 참조)

#### 4.2 시험용 모래

지반조성을 위한 시료는 모래비 기법을 위하여 함수비 2% 이내로 건조시켜 실험을 수행하였다. 모래비를 행한 시료의 밀도는 1.58ton/m<sup>3</sup>이며, 비중값은 2.59이다. 시험모래의 전단강도는 직접 전단시험을 시행하여 구하였으며, 그 결과 응력 수준이 0.8kg/cm<sup>2</sup> 이하인 경우는 내부마찰각  $\phi = 42^\circ$ , 벽면마찰각  $\delta = 28^\circ$ 이고, 그 이상인 경우에는 내부마찰각  $\phi = 32^\circ$ , 벽면마찰각  $\delta = 14^\circ$ 이다. 입도분포곡선은 그림 3과 같고, Cc값은 1.4 Cu값

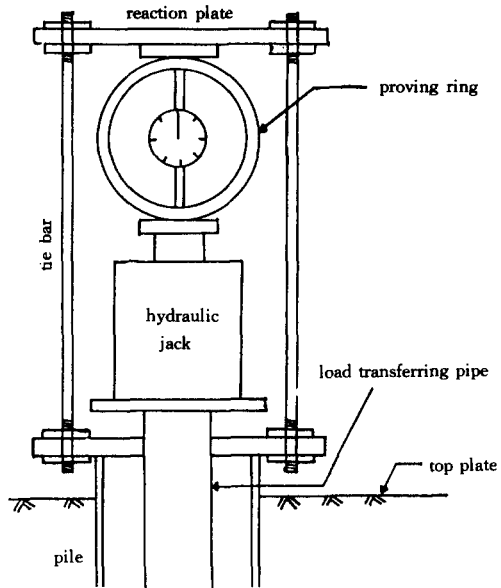


그림 2. 시험장치 개략도

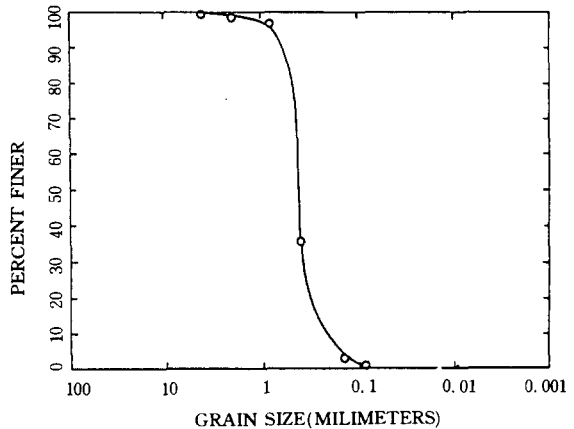


그림 3 입도분포곡선

은 1.8이며 통일분류법으로 시료를 구분하면 SP이다. 시험모래의 상대밀도는 90%이상으로 매우 조밀한 상태로 분류된다.

#### 4.3 시험방법

말뚝재하시험은 하중방향에 따른 주변마찰력의 차이, 축소된 선단부와 전체 선단부의 선단지력

의 차이등을 규명하기 위해 각 5단계의 실험을 실시하였다.

먼저 1단계에서는 현장에서의 SPLT를 그대로 재현하는 데, 이 때 선단지지력보다는 주면마찰력이 먼저 파괴에 도달하게 된다<sup>(2)</sup>. 이와같이 인발 저항력을 결정한 다음 제2단계로서 축소된 선단부의 지지력을 측정하는 데, 이 때 토조의 윗판에 반력볼트를 설치하고 이를 반력용 상부원판과 연결시켜 볼트의 인장력을 반력으로 사용한다. 이와 같이 축소된 선단부로부터 선단지지력을 얻어낸 다음 3단계에서는 말뚝과 분리될 수 있는 슈의 전체 단면적을 관입시켜 실제 선단지지력을 측정하는데 이 때 슈를 말뚝으로부터 파괴하중이 결정되기에 충분한 변위만큼 분리시킨다 (약 10mm). 4단계에서는 내부강봉을 제거하고 말뚝 전체를 재하하는데 이 때 슈가 말뚝본체와 분리되어 있으므로 이 변위만큼은 주면마찰력만이 저항할 것으로 기대되므로 압축재하시 말뚝의 주면마찰저항을 결정할 수 있다. 말뚝의 본체가 침하하여 분리된 슈와 접촉하게 되는 순간부터는 마지막 5단계로 주면마찰력과 선단지지력이 함께 저항하는 기존의 말뚝재하시험과 동일하게 된다.

이와 같이 각 5단계의 실험을 매 5cm 관입깊이 마다 수행하여 45cm까지 관입시킨다. 말뚝의 타입에는 낙하 추를 사용하였으며 추의 무게는 4.3kg, 낙하고는 40cm이다.

## 5. 시험결과 및 토의

실험은 압력수준의 변화에 따른 지지력의 변화를 고려하기 위하여 압력수준을  $\sigma_1=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$  kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시켰으며, 이때 수평 하중은 조밀한 모래의 입자가 모난 경우 내부마찰 각  $\phi$ 가 35°~45° 정도인 점을 고려하여 Jaky의 공식에 의거, 토압계수 K가 0.4의 값을 유지하도록  $\sigma_3=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8$  kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시켜 수행하였다. 말뚝은 항타에 의해 관입시켰으며 그 항타횟수를 관입깊이 40cm와 45cm의 경우에 대하여 아래의 표 1에 나타내었다. 극한하중은

하중-변위곡선으로부터 결정하였으며, 선단지지력의 경우 말뚝직경의 10%의 침하량이 발생하였을 때의 하중을 극한지지력으로 정의하였고, 주면마찰력의 경우 변위의 증가에도 하중의 증가가 없을 때로 하였다.

표 1. 항타 횟수

관입깊이(cm)	연직응력 (kg/cm <sup>2</sup> )					
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0
40	63	70	106	154	299	356
45	73	85	128	187	349	406

인발 주면 마찰력과 축소된 선단부 시험에서 구한 하중-침하량 관계의 전형적인 그림은 그림 4와 그림 5에 수록하였으며 특히 선단지지력의 지지력에 대한 예측과 실측치의 비교 검토 및 그 양상은 참고문헌<sup>(3)</sup>에 상세히 수록되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다. 인발과 압축시의 주면마찰력의 비는 그림 6에 수록하였고, 그림 7에는 관입깊이에 따라 말뚝의 직경이 작은 경우에 대한 큰 경우의 선단지지력의 비의 분포를 수록하였다.

주면마찰력 및 선단지지력은 관입깊이에 따라 증가하는 양상을 보였으나 인발과 압축시의 주면마찰력의 비 및 말뚝 선단부의 크기에 대한 선단지지력 비는 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 말뚝직경의 4배 이상 관입된 말뚝의 경우에는 응력수준 및 관입깊이에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 응력수준의 차이나 관입깊이의 차이에 의한 영향은 고려하지 않고 모든 실험 결과에 대하여 전체적으로 분석하였다.

분석결과를 보면 인발시의 주면마찰력이 압축시의 주면마찰력 값보다 평균적으로 27% 정도 작은 것으로 나타났으며, 그 비는 0.51에서 0.95까지 비교적 넓은 범위에 분포하나 일반적으로 0.65에서 0.85사이에 분포하고 있음을 알 수 있다.

또한 이 비의 평균값은 0.73, 변동계수 (COV)는 0.18의 값을 가지며, 『평균+1×표준편차』의 값은 0.863이다. 본 논문의 실험에서는 주면마찰

력만을 따로 분리하여 측정하였으며, 말뚝의 재질은 강관말뚝을 사용하였으므로 앞에서 언급한 여러 요인중 주로 인발하중시 잔류응력의 소멸에 의한 영향때문에 인발시의 주변마찰력이 더 작을 것으로 생각한다. 또한 말뚝의 직경이 작은 경우 (sliding core compression)에 대한 큰 경우 (total shoe compression)의 선단지지력의 비는 상당히 큰 분산을 나타내고 있으며, 평균값은 0.99, 변동계수는 0.28이며, 『평균-1×표준편차』의 값은 0.72임을 알 수 있다. 이는 chamber의 경계 효과에 대한 고려를 하지 않은 값들로서 그림 8에 보여주는 것과 같이 경계효과의 영향을 고려한다면<sup>(10)</sup> 말뚝의 직경이 큰 경우의 지지력이 작은 경우보다 더 클수도 있음을 보여준다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 모형토조를 이용하여 실내 모형 실험으로 간편한 말뚝 재하 시험이 가지고 있는

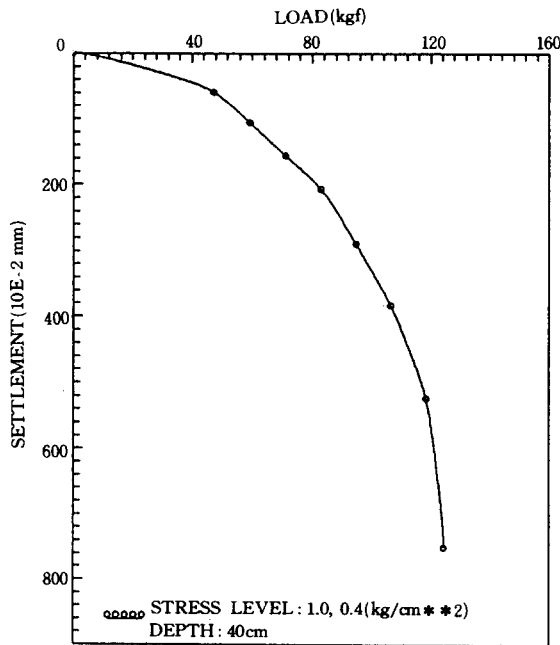


그림 4 하중 - 침하량 관계 (인발 주변마찰력)

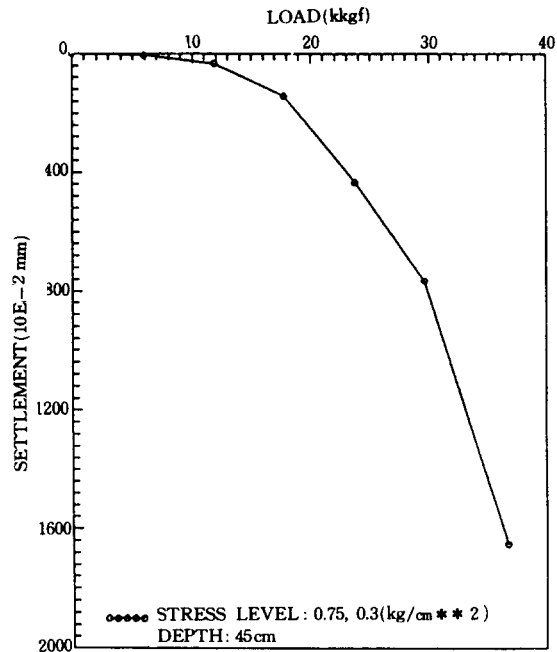


그림 5 하중 - 침하량 관계 (축소된 선단부)

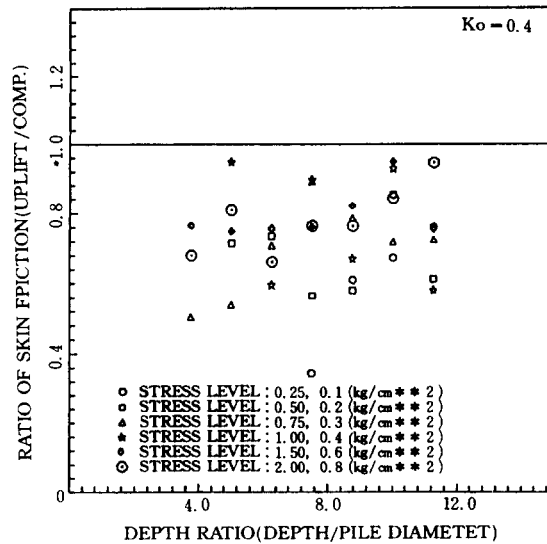


그림 6 인발과 압축시의 주변마찰력 비

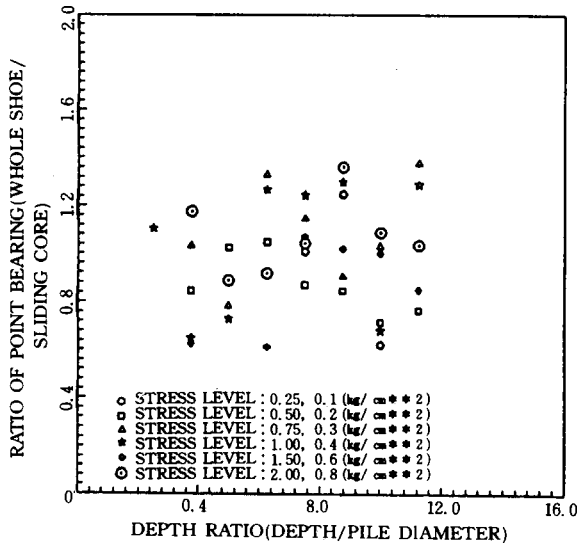


그림 7 말뚝선단부 크기에 대한 선단지지력 비

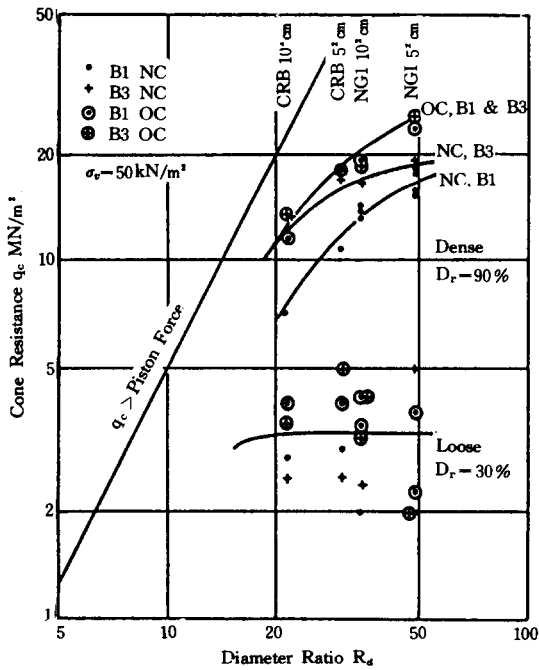


그림 8. 모형토조의 경제효과

두가지의 근본적인 문제를 해결하고자 하였으며, 그 결론은 다음과 같이 요약될 수있다.

1) 본 시험결과에 의하면 인발시의 주면마찰력이 압축시의 주면마찰력보다 적게 나타났으며 그 범위는 대부분 0.65에서 0.81 사이에 위치하며 평균값은 0.73, 변동계수는 0.18이었다. 이때 일반적으로 설계기준에 많이 사용되는 『평균+1×표준편차』의 값은 0.86이다.

2) 말뚝직경의 크기가 선단 지지력에 미치는 영향 (scale effect)을 규명하기 위한 시험결과에 의하면 말뚝선단부 크기에 대한 지지력비의 평균값이 0.99, 변동계수는 0.28로서 분포상태가 상당히 넓었다. 단, 본 연구에서의 선단지지력은 말뚝직경의 10%가 침하하였을 때를 극한하중으로 정의하였다. 결과를 요약하여 보면 말뚝직경의 4배이상 관입된 말뚝의 경우에는 말뚝선단부의 크기에 대한 선단지지력의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 이 실내시험결과로부터 설계기준치로 많이 제시되는 『평균-1×표준편차』의 값은 0.72이다.

본 실내모형시험 결과는 말뚝이 현장시험보다 아주 작을 수 밖에 없는 모형말뚝이라는 점과, 우리나라 대부분의 지지층의 풍화토 혹은 풍화암인데 반하여 건조한 모래를 사용했다는 사실등이 약점이 될 수 있다. 그러나 사용된 모래의 상대밀도를 90% 이상으로 함으로써 현장의 매우 단단한 선단부 지반조건을 재현하려고 하였으며, 현장의 선단부 응력을 재현한 calibration chamber test라는 점 등에서 본 연구결과와 신뢰도는 인정되어야 한다고 생각한다. 차후의 과제로서 본 실내 모형시험 결과와 함께, 현장의 원형말뚝에 대하여 같은 수순으로 규명 시험을 하여, 실내 모형 시험의 한계를 극복하는 것이 필요하다고 본다.

### 감사의 글

본 연구는 산학 협동의 일환으로 삼성종합건설(주)의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.



## 참고문헌

1. 백세환, 사상호, 이장덕, 이명환, "사질토 지반에서의 말뚝관입으로 인한 흙의 변형에 관한 연구," 대한토질공학회지 제 6권 제 3호, 1990, pp. 31-40
2. 백세환, 윤성진, 이원제, 이명환, "간단한 말뚝재하시험(SPLT)의 개요," 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1990, pp. 381-384.
3. 이인모, 이명환, 백세환, 이정학, 김동현, 임병석, "모형토조실험을 통한 말뚝지력의 평가" 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 1992, pp 13-40
4. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E., "Cone resistance of a dry medium sand," Proceedings, 10th ICSMFE, Stockholm, 2, 1981, pp, 427-432.
5. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., jamiolkowski, M. and Pasqualini, E., "Cone resistance in dry N.C. and O.C. sands," Proceedings, Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Div. ASCE, 1981. pp. 145-177.
6. Broug, N. W. A., "The analysis of cone resistance 'q<sub>c</sub>' and sleeve friction 'f<sub>s</sub>' as interactive stresses, resulting in a new pile bearing capacity design method," Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, 1982, pp. 469-478.
7. Darrag, A. A., "Capacity of driven piles in cohesionless soils including residual stresses," Ph. D. thesis, Purdue University, 1987.
8. De Beer, E. E., Lousberg, E., De Jonghe, A., Carpentier, R. and Wallays. M., "Analysis of the results of loading tests performed on displacement piles of different types and sizes penetrating at a relatively small depth into a very dense sand layer," Proceedings, Recent Developments in the Design and Construction of Piles, ICE. London, 1979, pp.199-211.
9. Fleming, W. G. K., Weltman, A. J, Randolph, M. F. and Elson, W.K., Piling Engineering, Halsted Press, John Wiley and Sons Inc., New York, 1985
10. Holden, J. C., "Laboratory research on static penetrometers," University of Florida, Gainesville, Department of Civil Engineering, Internal Report, CE-SM-71-1, 1971.
11. Hunter, A. H. and Davisson, M. T., "Measurement of pile load transfer," Performance of Deep Foundations, ASTM, STP 444, 1969, pp. 106-117.
12. Kerisel, J., "La mecanique des sols, recherches et investigation recentes," Rev. Trav., Paries, 1958, pp. 874-878.
13. Lee, M. W., "End bearing capacity of a pile in cohesionless soils," Ph. D. thesis, University of Birmingham. 1987.
14. McClelland, B., "Design and performance of deep foundations," Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, held at Purdue Univ., June, 1972.
15. McClelland, B., "Design of deep penetration piles for ocean structures." Journal of Geotechnical Engineering Div. ASCE, Vol.100, GT7, July, 1974.
16. Parkin, A.K. and Lunne, T., "Boundary effects in the laboratory calibration chamber of a cone penetrometer for sand." NGI publication No. 138, 1982, pp. 307-312.
17. St. John, H.D., Rendolph, M.F., McAnoy, R.P. and Gallagher, K.A., "Design of piles for tethered platforms," Proceedings, Developments in the Design and Construction of Offshore Structures, ICE, 1983, pp.61-72.
18. Vesic, A.S., "Tests on instrumented piles, Ogeechee River site," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering ASCE, Vol.96, SM2, 1970, pp. 561-584.
19. Walker, B.P. and Whitaker, T., "An apparatus for forming uniform beds of sand for model foundation tests," Geotechnique, Vol.17, No.2 pp.161-167.

(접수일자 1992. 2. 10)