

## 강말뚝의 마찰지지력에 관한 연구

민 덕 기  
토 목 공 학 과  
(1981. 4. 10 접수)

### 〈요 약〉

말뚝 기초를 갖는 구조물의 설계시 말뚝의 마찰지지력은 가장 중요한 설계인자의 하나이다. 본 논문은 모래의 밀도와 말뚝의 직경과 길이의 비에 따르는 말뚝의 마찰지지력의 변화에 대하여 다루었다. 분석 결과 마찰지지력은 모래의 밀도의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 한강 하류부에서 채취한 모래에 대해 마찰지지력을 구하는 경험식을 제안하였다.

## A Study on the Skin Resistance of the Steel Piles

T. K. Min  
Dept. of Civil Engineering  
(Received April 10, 1981)

### 〈Abstract〉

In the design of drilled shaft foundations for certain classes of structures, the skin resistance of the shaft is an important design factor. This paper considers the variations of skin resistance due to the length-diameter ratio of the steel piles and the densification of the sand. Results of the analysis show that the skin resistances are increased linearly as the sand densities increase. And an empirical equation to predict the skin resistance of the piles in sand which is obtained from the downstream of the Han river is developed.

### I. 서 론

말뚝은 구조물의 지면에 접하는 토층이 충분한 지지력을 가지고 있지 못할 때 상부구조물 (Superstructure)의 하중을 지반의 깊은 부분에 전달하는 것으로서 말뚝 선단지지력(End Bearing)과 마찰력(Friction) 혹은 이들의 조합에 의하여 하중을 지지하게 된다.

최근 말뚝의 지지력에 대하여 Reese<sup>(1)</sup>, Das 와 Seeley<sup>(2)</sup>, Ismael 과 Klym<sup>(3)</sup>, Kulhawy<sup>(4)</sup> 등에 의해 연구가 활발히 진행되고 있으나, 지반내의 흙의 상태 및 말뚝의 거동등에 대한 확실한 지식이 없기

때문에 이론식의 개발이 매우 힘들다. 따라서 실험식이나 경험식에 의거하는 수가 많으나 기존 경험식들은 마찰계수의 산정방법이 각기 다르기 때문에 그 신뢰도를 알 수 없을 뿐 아니라 더우기 흙의 특성의 차이로 인하여 외국의 경험식을 그대로 우리나라 지반에 사용하는 데에는 많은 문제점이 있다.

말뚝의 지지력을 추정하기 위해서는 통상 재하실험(Load Test)을 실시하고 있으나 말뚝 재하실험에서는 말뚝이 End Bearing 과 Friction 을 동시에 받고 있기 때문에 각각을 따로 추정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 강말뚝에 대하여 인발실험(Uplift Test)을 실시하여 말뚝의 마찰지지력에 대한 실험식을 제안하고 그때의 말뚝의 거동

을 밝히려는데 본 연구의 목적이 있다.

## II. 실험

말뚝은 가능한 한 현장에 박혀 있는 말뚝과 동일한 상태 및 동일 하중 조건하에서 실험이 진행될 때 그 결과가 신빙성이 있다.

이를 위해 본 연구에서는 직경 50mm의 원형 강 말뚝을 제작하였으며 말뚝의 마찰지지력과 말뚝의 길이와 직경의 비  $L/D$ 와의 관계를 알기 위해  $L/D$ 가 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10의 7개의 말뚝에 대하여 실험을 행하였다.

### 1. Model Tank

모형실험을 위해 12mm 합판을 사용하여  $800 \times 800 \times 700$ mm의 Model Tank를 제작하였다. 이 Model Tank의 크기는 말뚝 직경의 16배로서 벽면이 말뚝지지력에 영향을 미치지 않을 정도의 충분한 크기이다.<sup>(6)</sup> 또한 이 Model Tank는 한쪽면의 개방이 가능하도록 제작되어 있어 모래의 치환을 용이하게 할 수 있게 하였다.

### 2. 모래의 특성 및 밀도 유지

본 실험에서 사용한 시료는 한강 하류부에서 채취한 모래로서 #4체를 통과하고 #100체에 남는 공기중 건조모래를 사용하였다. 이 모래의 주요 물리적 특성은 아래와 같다.

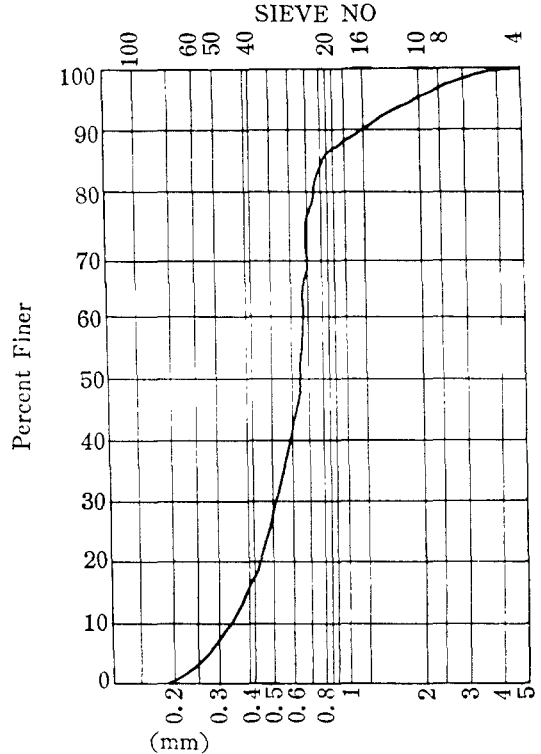
$$\begin{aligned} \gamma_{dmax} &= 17.16 \text{KN/m}^3 & \gamma_{dmin} &= 13.45 \text{KN/m}^3 \\ D_{max} &= 4.760 \text{mm} & D_{10} &= 0.315 \text{mm} \\ D_{30} &= 0.520 \text{mm} & D_{60} &= 0.665 \text{mm} \\ C_u &= 2.111 & C_c &= 2.291 \\ G_s &= 2.650 \end{aligned}$$

이 모래는 균등계수  $C_u = 2.111$ 로서 비교적 균등한 분포를 하고 있다. 본 실험에서 사용된 모래에 대한 체분석 결과는 <그림 1>과 같다.

모래의 밀도는 말뚝의 지지력을 변화시키는 가장 중요한 인자의 하나이므로<sup>(4)</sup> 각 말뚝에 대한 밀도를 4등급으로 변화시키며 실험을 행하였다. 또한 Model Tank 내의 모래의 상태를 균등하게 유지시키기 위하여 다음과 같은 조작을 반복하였다.

먼저 Model Tank의 중앙에 강말뚝을 설치한다. 다음 강말뚝의 1/4만큼만 모래를 흘려 넣는다. 이때 모래에 의해 말뚝의 수직상태가 변하지 않도록

주의한다. 다음 직경 150mm, 하중 5.0kg의 손잡이가 달린 원형판을 175mm의 높이에서 낙하시켜 모래에 다짐을 준다. 원형판 낙하시에는 2개의 원형판을 말뚝에 대칭이 되도록 동시에 낙하시켜 말뚝이 편심을 받는 것을 최대한으로 줄였으며 낙하되는 지역은 상호 겹치는 부분이 없고 또한 낙하



<그림 1> 체분석 결과

면적이 최대가 되도록 배치하였다. 이와같이 하여 한층의 다짐이 끝나면 다시 1/4 높이만큼 모래를 조심스럽게 흘려넣고 위에서 설명한 다짐작업을 되풀이 한다. 이와같은 방법으로 나머지 3, 4층의 다짐이 끝나면 Uplift Test를 실시하였다. 밀도의 변화는 각층의 다짐시 원형판의 낙하회수를 변화시켜 줌으로써 할 수 있었다. 이때 Small Level을 이용하여 지렛대의 수평을 계속 유지시키는데 주의하였다.

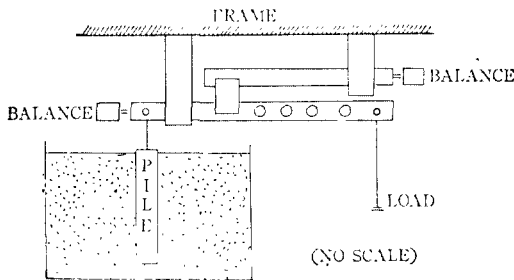
### 3. 재하 장치

재하장치 설계시 고려되어야 할 사항은 재하로 인한 충격이 말뚝 거동에 영향을 미치지 않을 정도로 하중의 증가분이 작아서 하중이 일정하게 재하되어

야 한다. 본 실험에서는 지렛대 구조의 재하장치를 사용하여 하중을 단계적으로 가하였다. 또한 모든 하중은 말뚝에 축방향으로 작용한다고 가정하였다. 이는 실험의 결과에서 밝혀지는 바와 같이 말뚝의 수직변위가 1mm 내외에서 최대치에 도달되므로 말뚝의 축방향으로 하중이 가해진다고 본 가정은 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 사려된다. 본 실험에서 사용된 지렛대 구조의 재하장치는 <그림 2>와 같으며 이 지렛대의 길이의 비는 1 : 8.67이었다. 지렛대는 Cross Brace에 의해 지지되어 있고 Cross Brace는 Model Tank에 영향을 주지 않도록 Model Tank와는 별도의 Frame에 연결되어 있다. Frame은 자중이 약 800kg으로 이는 말뚝에 가해지는 Uplift Force에 의해 지렛대에 영향을 주지 않을 정도의 충분한 무게이다.

4. 하중 재하 및 변위 측정

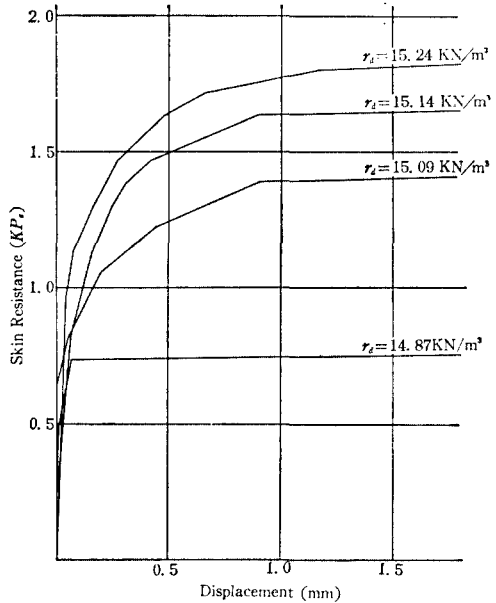
앞에서 설명한 재하장치를 사용하여 말뚝의 축방향으로 Uplift Force를 점차적으로 증가시켰다. 각 하중의 증가는 말뚝의 평형상태를 유지시킨 후 적당량(보통 전 하중 증가분의 1/2)을 재하했으며 각 하중 재하시 마다 Dial Guage를 사용하여 말뚝의 윗 방향 Settlement를 0.005mm까지 측정하였다. 여기서 평형상태라 함은 말뚝의 윗 방향 Settlement가 5분이 경과되어도 0.01mm이하의 처짐이 발생되었을 경우를 의미한다.



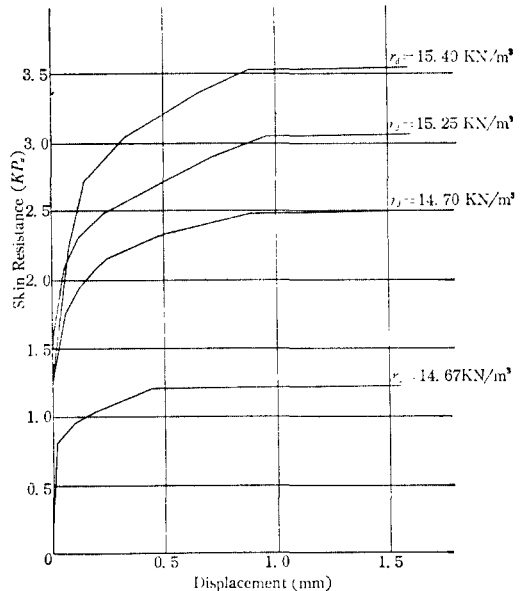
<그림 2> 재하장치

말뚝의 길이에 따르는 마찰지저력의 변화를 알기 위해 실험은 말뚝의 직경과 길이의 비  $L/D=4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ 의 7개의 경우에 대하여 행했다. 각 말뚝에 대해서 위에서 설명한 바와 같이 4등급의 밀도에 대해 실험을 실시하였으며 동일한 등급의 밀도에 대해서도 수회(최소 3회)의 실험을 실시하여 각 경우 말뚝의 처짐을 측정함으로써 실험의 정확을

기하였다. <그림 3>은  $L/D=5, 7$ 의 두 경우에 대한 Uplift Test 결과이다. 그림의 각 곡선은 동일 밀도하에서 수회 실험한 결과의 평균치 곡선이다.



a)  $L/D=5$



b)  $L/D=7$

<그림 3> 평균수직 변위-마찰지저력 상관도

### III. 결과의 분석

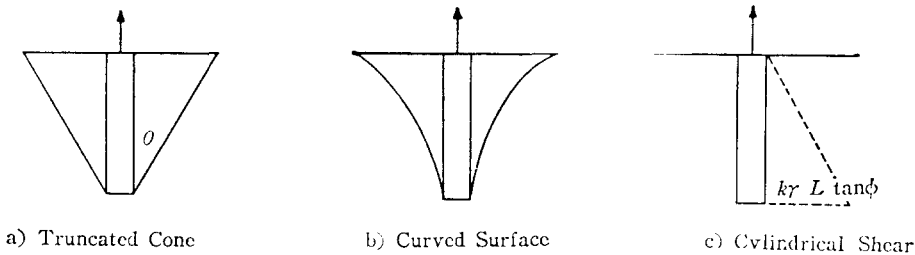
#### 1. 말뚝의 최대 마찰지지력

말뚝의 마찰지지력을 추정하는 많은 Model이 제안되어 있으나 그 기본적인 Model은 <그림 4>와 같은 3개의 유형으로 크게 나눌 수가 있다.<sup>(4)</sup> Truncated Cone Model에서는 마찰지지력은 말뚝과 Truncated Cone 속의 흙의 무게의 합이 되며, Curved Surface Model에서는 말뚝의 무게와 Curved Surface 위의 흙의 무게, Surface면을 따라 발생하는 점착력 및 마찰력의 합이 말뚝의 마찰

지지력이 되며 Cylindrical Shear Model에서는 말뚝을 따라 Cylindrical Surface 위에 전단파괴가 발생한다고 가정하여 말뚝의 무게와 전단강도가 말뚝의 마찰저항력이 된다.<sup>(4)</sup>

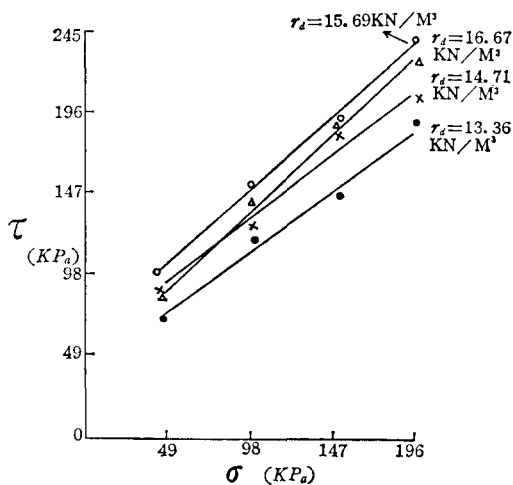
위의 3유형 어느 경우든 흙의 전단강도와 Interface를 알아야 마찰저항력을 추정할 수 있다. 그런데 Kulhawy와 Peterson<sup>(4)</sup>에 따르면 파괴면은 Interface 바깥 쪽에 위치한다. 따라서 전단강도만 알게 되면 마찰지지력을 추정할 수 있다.

흙의 전단강도를 구하기 위해서 본 연구에서는 실내에서 가장 손쉽게 행할 수 있는 직접전단실험(Direct Shear Test)을 행하였다. 본 실험에서 사



<그림 4> 마찰지지력의 모형

용된 전단실험기는 수동식 하부 고정식으로 실험방법은 변위제어식(Strain Control Type)을 택하였으며 재하속도는 보통 일반적으로 사용하는 0.005 mm/sec로 하였다. 전단실험의 결과는 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 직접 전단실험 결과

모래의 밀도는 상대밀도(Relative Density)로 표시해 주는 것이 효과적일 경우가 많다. 본 실험에 사용된 모래의  $\gamma_{dmax}$ ,  $\gamma_{dmin}$ 은 각각  $17.16 \text{ KN/m}^3$ ,  $13.45 \text{ KN/m}^3$ 이고 직접전단실험의 결과로부터 모래의 건조밀도와 내부마찰각과의 관계식을 구할 수 있으므로 이들 두 결과 식으로부터 상대밀도  $D_r$ 과 내부마찰각  $\phi$ 와의 상관식을 구하면

$$\phi = 0.0846 D_r + 35.82^\circ \dots\dots\dots(1)$$

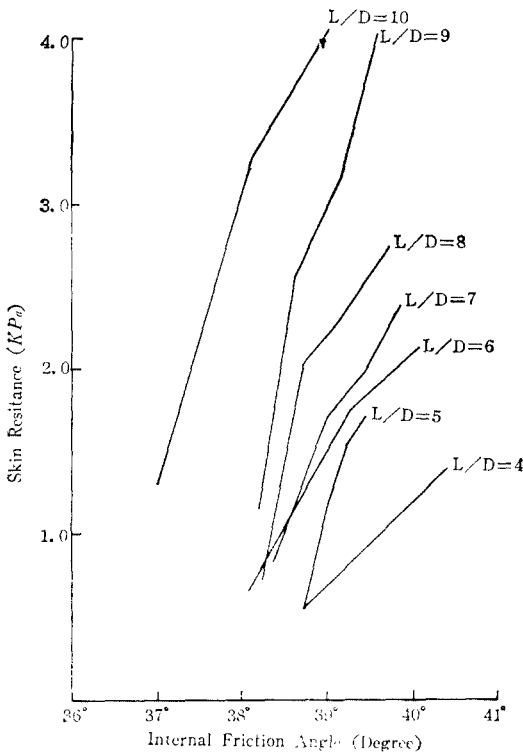
이다. 시료가 건조된 모래이고 \*100체 통과치를 제거했기 때문에 자연상태의 모래의 값에 비해 비교적 큰 전단강도 및 내부마찰각을 주고 있으나<sup>(5,7)</sup> 본 논문에서는 전 실험 결과에 이 관계식을 적용시켰다.

Uplift Test 결과 마찰지지력  $q_s$ 와 말뚝의 윗방향 처짐  $\delta$ 의 상관관계로부터 말뚝의 최대 마찰지지력을 구하는 방법으로는 1) 곡률반경이 최소가 되는 점에 해당하는 하중을 최대 마찰지지력으로 취하는 방법, 2) 두개의 직선부를 연장시켜 그 교점에 해당하는 하중을 최대 마찰지지력으로 취하는 방법, 3) 최대 처짐이 발생하는 순간의 하중을 최대 마찰지지력으로 취하는 방법등이 있으며<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 3)의 방법을 택하였다.

각 말뚝에 대한 최대 마찰지지력  $q_s$ 와 내부마찰각  $\phi$  곡선은 <그림 6>과 같다. 그림으로부터 최대 마찰지지력은 동일한 말뚝직경과 길이의 비  $L/D$ 에 대하여 내부마찰각에 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. <표 1>에는 자  $L/D$ 에 대해서 최대마찰지지력과 내부마찰각의 상관관계식이 있다. <표 1>로부터 최대 마찰지지력  $q_s$ —내부마찰각  $\phi$ —말뚝의 직경과 길이의 비  $L/D$  사이의 상관 관계식을 구하면

$$q_s = [0.16(L/D) - 0.14]\phi - [5.60(L/D) - 3.61] \dots\dots\dots(2)$$

이다.  $q_s$ 의 단위는  $KPa$ 이다.



<그림 6> 최대 마찰지지력—내부마찰각 상관도  
<표 1> 각  $L/D$ 에 따르는  $q_s$ — $\phi$  상관식

$L/D$	최대 마찰지지력—내부마찰각 상관식
4	$q_s = 0.51\phi - 18.99$
5	$q_s = 1.67\phi - 64.28$
6	$q_s = 0.72\phi - 26.67$
7	$q_s = 0.76\phi - 27.75$
8	$q_s = 1.27\phi - 47.38$
9	$q_s = 1.38\phi - 51.01$
10	$q_s = 1.38\phi - 49.45$

2. 말뚝의 수직 변위

말뚝의 수직 변위는 매 하중 재하시마다 Dial Guage를 사용하여 0.005mm까지 측정하였다. 측정 결과로부터 말뚝의 최대 수직 변위는 밀도가 증가함에 따라 다소 증가하고 있으며, 말뚝의 직경과 길이의 비  $L/D$ 가 증가했을 때에도 다소 증가하는 경향이 있으나 <그림 3 참조> 전 실험을 통해 최저 0.16mm, 최대 1.58mm가 발생했으며 이는 각각 말뚝 직경 50mm의 0.3%, 3.16%에 해당되는 것이다. Tomlinson<sup>(9)</sup>은 말뚝 직경의 0.5~1.0% 윗 방향 처짐만으로 말뚝의 최대 마찰지지력에 탈할 수 있음을 실험적으로 밝혔으며 본 실험의 결과는 이에 잘 부합되고 있다.

IV. 결 론

1. 일정한  $L/D$ 의 말뚝에 대해서 최대 마찰지지력은 모래의 내부마찰각의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.
2. 본 실험에서 사용된 한강 하류부의 모래에 대해 강말뚝의 마찰지지력을 식 (2)로 얻었다.
3. 말뚝의 최대 수직변위는 말뚝직경의 0.3~3.16%에서 발생하였다.

참 고 문 헌

1. Reese, L. C., 'Design and Construction of Drilled Shafts,' Journal of the Geotechnical Engineering Division, A. S. C. E. Vol.104 No. GT 1 Proc. Paper 13503 Jan. 1978 pp.91~116.
2. Das, Braja M. and Seeley, Gerald R., 'Uplift Capacity of Buried Model Piles in Sand', Journal of the Geotechnical Engineering Division, A. S. C. E. Vol.101 No. GT 10 Technical Note 11604 Oct. 1975 pp.1091~1094.
3. Ismael, Nabil F. and Klym, Tony W., 'Uplift and Bearing Capacity of Short Piers in Sand', Journal of the Geotechnical Engineering Division, A. S. C. E. Vol.105 No. GT 5 Proc. Paper 14568 May 1979 pp.579~

- 594.
4. Kulhawy, Fred H., Kozera, David W., and Withiam James, L., 'Uplift Testing of Model Drilled Shafts in Sand, Journal of the Geotechnical Engineering Division, A. S. C. E. Vol.105, No. GT 1, Proc. Paper 14301 Jan. 1979 pp.31~47.
  5. Bowles, Joseph E., 'Foundation Analysis and Design,' McGraw-Hill Book Company, 1st Edition 1968.
  6. Bowles, Joseph E., 'Foundation Analysis and Design,' McGraw-Hill Book Company, 2nd Edition 1977 pp.530~591.
  7. Lambe William T., Whitman Robert V., 'Soil Mechanics,' John Wiley & Sons INC 1969 p.147.
  8. Joseph P. E. Funston, Fredric M. Rusche, 'Developing a Deep Foundation with the End Bearing Pile,' Fourth Annual Spring Lecture, Soil Mechanics and Foundation Technical Group, Southeastern Branch-Michigan Section A.S.C.E. 1971.
  9. Tomlinson, M. J., 'Pile Design and Construction Practice,' A Viewpoint Publication, 1977 p.213.