

# 인발력을 받는 무리말뚝의 응력-변위 특성

이준대<sup>†</sup> · 안병철<sup>\*</sup>

세명대학교 토목공학과 · \*충북대학교 토목공학과  
(2005. 6. 29. 접수 / 2005. 9. 10. 채택)

## Characteristics of Stress-Displacement on Uplift Loaded Group Piles

Jun-Dae Lee<sup>†</sup> · Byeong-Cheol Ahn<sup>\*</sup>

Department of Civil Engineering, Semyung University

<sup>\*</sup>Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received June 29, 2005 / Accepted September 10, 2005)

**Abstract** : This experimental study was devoted to investigate skin friction of H group piles with uplift loading conditions in granite soil under laboratory test. Model piles made of steel embedded in weathered granite soil were used in this study. Pile arrangements(2×2, 3×3), pile space(2D, 4D, 6D), and soil density( $D_r=40\%$ , 80%) were tested. The main results obtained from the model tests can be summarized as follows.

The series of tests found that ultimate uplift load and displacement for group piles were increased as piles space ratio increases to  $D_r=40\%$  of soil density. In the relative density of  $D_r=80\%$ , bearing capacity for group piles was greater than for single pile.

In the relative density of  $D_r=40\%$ , the theoretical value of skin friction for group piles was greater than practical value. In the relative density of  $D_r=80\%$ , both theoretical and practical value of skin friction for group piles were increased as piles space ratio increases.

**Key Words** : skin friction, H group piles, weathered granite soil, ultimate uplift load

### 1. 서론

구조물의 대형화와 함께 택지의 부족현상이 심화되고 있는 현실을 극복하기 위하여 다양하고 복잡한 연약지반에 말뚝기초가 시공되어 지고 있다. 국내에서는 근래에 들어 강관말뚝과 PHC말뚝 이외에도 H말뚝에 대한 실무적용 사례<sup>1,3)</sup>가 증가함에 따라 이에 대한 보다 합리적인 해석방법이 필요하게 되었다.

일반적으로 기초에 사용되는 말뚝은 압축하중을 받도록 설계되지만 고층건물과 송전탑, 높은 굴뚝 등에 사용되는 기초말뚝은 압축하중과 함께 주로 인발하중<sup>4,5)</sup>을 받도록 설계되어 진다. 이러한 경우 지지력 산정 시 압축하중을 받는 경우와 인발력을 받는 경우의 주면마찰력의 크기를 동일하게 산정

하거나 또는 압축주면마찰저항의 70%의 값을 인발 저항력으로 산정하는 경우가 일반적이다.

그러나 말뚝의 주면마찰력을 기존 이론식에 근거하여 산정하는 경우에는 연구자에 따라 값이 각기 다르게 산정되며, 특히 말뚝의 지지력에 영향을 미치는 요소들<sup>6,7)</sup>에 대한 매개변수의 적용에 한계가 있기 때문에 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 재하시험에 의존하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 무리말뚝에 인발하중을 가하여 간격비와 배열 그리고 지반밀도에 따른 무리말뚝의 주면마찰력을 구하여 서로 비교함으로써 무리말뚝의 인발하중에 따른 변위 특성을 분석하고 타당성의 검증을 위하여 주면마찰력에 대한 기존의 이론식과도 비교 분석하였다.

### 2 인발하중을 받는 말뚝의 주면마찰력 이론

말뚝과 주변지반의 상대변위에 의한 마찰은 한

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jdlee@semyung.ac.kr

계평형이론에 따른 Mohr-Coulomb의 파괴이론이 일반적으로 사용되며 사질토 지반의 경우 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(z) = K\sigma_v \tan\delta \quad (1)$$

여기서,  $f(z)$  : 깊이  $z$ 에서의 마찰력(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $K$  : 토압계수  
 $\sigma_v$  : 유효상재압력 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\delta$  : 벽마찰각

말뚝의 인발 저항력에 미치는 요소로는 토압계수, 말뚝의 직경과 근입깊이, 유효응력, 벽면 마찰각, 말뚝의 설치방법, 한계깊이 등이 있다.

### 1) 말뚝의 직경과 근입깊이

말뚝의 단위 주변마찰저항은 압축하중이나 인발하중에 관계없이 근입깊이가 커질수록 선형적인 증가를 보이다가 어느 일정한 깊이 이상에서는 일정한 값에 이르는 것으로 알려져 있으며, 이를 한계깊이라고 한다. 한계깊이는 절대값보다는 상대관입깊이 ( $L/D$ )에 의해 나타내는 것이 효율적이며 이 값은 보통 느슨한 지반의 경우에는 4정도, 조밀한 지반의 경우에는 15정도의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

### 2) K값의 결정

토압계수  $K$ 는 흙의 밀도, 말뚝의 설치방법, 세장비( $L/D$ ) 그리고 말뚝의 표면 거칠기 정도에 따라 달라지게 된다.  $K$ 값을 정확히 결정하기가 어렵기 때문에 일반적으로 정지토압계수( $K_0$ )를 산정한 후에 지반의 과압밀비<sup>6)</sup>를 고려하여 이 값을 수정하여 사용하고 있다.

### 3) 유효수직응력의 결정

Meyerhof(1977)<sup>8)</sup>의 이론에 의하면  $\sigma_v$ 는 단순한 유효수직응력이 아니라 하중조건에 따른 변화를 고려한 값을 사용해야 한다. 즉 압축하중을 가한 경우에는 유효수직응력이 증가하고 인발하중을 작용시킨 경우에는 오히려 그 값이 감소하기 때문에 이에 따른 적절한 값을 결정하여 사용해야 한다. 인발계수  $K_u$ 는 지반의 내부마찰각이 증가할수록 증가하며, 또한 평균단위마찰력은 말뚝의 관입깊이  $L$ 의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.

말뚝의 인발저항력은 말뚝표면과 지반사이의 마

찰력에 의존하게 되며, 다음의 식과 같이 표현된다.

$$P_u = (c_a + p_o' K_u \tan\delta) A_s \quad (2)$$

여기서,  $A_s$  : 말뚝의 표면적 (cm<sup>2</sup>)  
 $c_a$  : 흙과 말뚝사이의 부착력 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $K_u$  : 인발계수  
 $p_o'$  : 유효연직 평균토압 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $P_u$  : 인발저항력 (kgf)

### 4) 벽면 마찰각의 결정

$\delta$  값은 실내에서 직접전단 시험을 통하여 측정할 수 있으며, 또는 변위 후 말뚝과 주변지반의 접촉면의 상태는 극한파괴상태라고 간주하여야 하므로  $\delta$ 는 흙의 잔류마찰각  $\phi_{cv}$ 과 같다고 Vesic(1963)<sup>9)</sup>이 제시한 바 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. 시료의 특성

본 실험에서 사용된 화강풍화토의 특성을 알아보기 위하여 체분석시험을 실시한 결과 0.074mm체 통과량 8.4%, 균등계수는 4.10, 곡률계수는 1.24, 액성한계시험과 소성한계시험은 모두 NP로 나타났다. 이것을 기준으로 통일분류법에 의해 흙을 분류한 결과 SP-SM으로 나타났다.

기초의 지지력 계산에 사용되는 시료의 내부마찰각을 결정하기 위하여 직접전단시험을 실시하였으며, 대상시료의 기본 물성치를 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of weathered granite soil

| Contents                  |                          | Results       |     |
|---------------------------|--------------------------|---------------|-----|
| Specific gravity          |                          | 2.790         |     |
| Density test results      | $\gamma_{dmax}(gf/cm^3)$ | 1.770         |     |
|                           | $\gamma_{dmin}(gf/cm^3)$ | 1.424         |     |
| Sieve analysis results    | Cu                       | 4.100         |     |
|                           | Cc                       | 1.240         |     |
|                           | $D_{10}$ (mm)            | 0.150         |     |
|                           | $D_{30}$ (mm)            | 0.340         |     |
| Direct shear test results | $\phi$                   | $D_r = 40 \%$ | 31° |
|                           |                          | $D_r = 80 \%$ | 42° |

Table 2. Specification of model H-pile (unit : cm)

| Materials | Length | Flange | Web | Outer diameter | Thickness | Elastic modulus (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------|--------|-----|----------------|-----------|--|
| Steel     | 45.0   | 2.0    | 2.0 | 2.25           | 0.12      | 2.14 × 10 <sup>6</sup>                 |

### 3.2. 실험장치

본 실험에서 사용된 모형 H말뚝은 탄성계수가 2.14 × 10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>인 스테인리스이며, 두께 1.2mm, 길이 45cm, 플랜지와 웨브의 길이는 각각 2.0cm의 크기로 제작하였다. 모형말뚝의 제원을 Table 2에 나타내었다.

하중을 받는 무리말뚝의 축방향력을 측정하기 위하여 말뚝선단부터 일정한 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다. 말뚝배열과 간격에 따른 무리말뚝 시험을 수행하기 위해 두께 약 12mm의 아크릴판으로 모형 말뚝캡을 제작하였으며, 말뚝머리는 볼트와 너트를 이용하여 말뚝캡에 고정시켰다.

실험에 사용된 모형토조는 55cm × 55cm × 60cm 크기의 강체로 제작되었으며, 토조의 크기효과(scale effect)를 검토하기 위하여 Baligh(1976)<sup>11)</sup>가 제안한 모래에서의 공동확장이론(cavity expansion theory)을 이용하였다. 확장된 반지름( $R_p$ )은 확장전의 반지름( $R$ )과 모래의 강성과 관련된 계수( $I_{rr}$ )를 이용하여 식 (3)로 계산할 수 있다.

$$R_p = R(I_{rr} \cdot \sec \phi_i)^{1/2} \quad (3)$$

무리말뚝내 모든 말뚝들이 플랜지와 웨브사이 흠뻑기(soil plugging)가 발생되어 완전폐단말뚝형태로 거동한다고 가정한다면, 이때 말뚝의 선단부 단면적의 증가로 공동확장으로 인한 지름은 133mm로 증가한다. 따라서 3×3형태의 무리말뚝배치상태에서 토조측면과의 거리가 143mm인 점을 고려한다면 토조의 경계조건이 말뚝의 지지력에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

### 3.3. 실험 방법

본 실험을 위한 지반조성은 undercompaction 방법을 사용하여 9개의 층으로 나누어 모래를 다짐하였으며, 말뚝의 중심간격, 말뚝의 배열에 따라 인발하중을 받는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 화강 풍화토를 이용하여 모형지반을 깊이에 따른 평균 상대밀도가 40%, 80%가 되도록 조성하였으며 말뚝의 두부 구속조건은 말뚝캡에 고정되어 있는 형식으로 고정단과 비슷하다. 말뚝의 근입깊이는 40cm

로 하였으며, 무리말뚝은 2×2, 3×3배열로 이루어진 경우에 대해서 하중-변위거동을 관측하였다. 말뚝의 중심간격은 말뚝지름의 2배, 4배, 6배인 경우에 대하여 각각 실험을 실시하였으며, 말뚝 타입에 의한 잔류응력을 감소시키기 위하여 재하시험은 말뚝 타입후 24시간이 경과한 후에 수행하였다.

재하시험은 설계하중의 300%까지의 하중을 20 단계로 나누어 재하하였으며, 각 하중의 재하시간은 2.5~15분간 하중을 유지시켰다. 각 하중단계마다 data logger를 이용하여 하중과 침하량을 계측하였으며 말뚝표면에는 변형률게이지를 부착하여 말뚝의 축하중분포를 관찰하였다.

Fig. 1은 H형강에 부착된 변형률게이지를 나타낸 것이며, Fig. 2는 모형지반에 타입된 말뚝두부에 캡을 설치한 후 그 위에 하중재하판을 설치하여 캡과 연결시킨 후 롤러를 통해 단계별 하중이 말뚝에 가해지도록 설계하였다. 말뚝의 캡과 하중재하판이 완전결합이 이루어지도록 하여 변형에 의한 영향을 최소화시켰다.

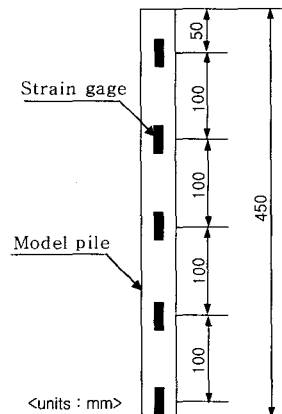


Fig. 1. Strain gauge adhered to H-pile.

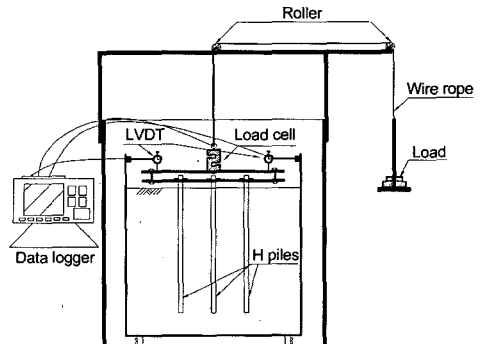


Fig. 2. A schematic diagram of uplift load test.

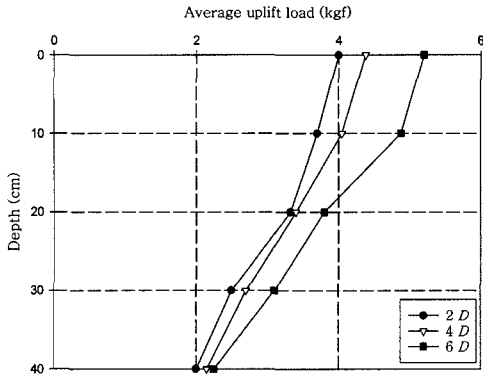


Fig. 3. Load transfer curve of 3x3 group piles in  $D_r=40\%$ .

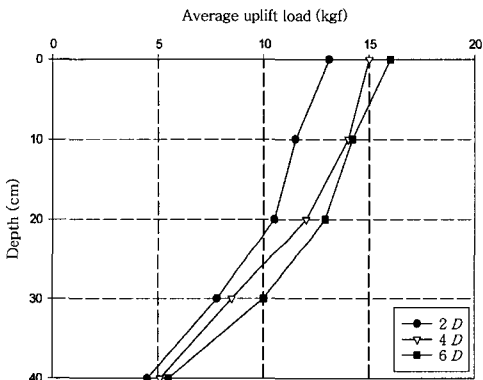


Fig. 4. Load transfer curve of 3x3 group piles in  $D_r=80\%$ .

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1. 무리말뚝의 축하중분포

Fig. 3과 4는 3x3배열의 무리말뚝을 대상으로 간격비에 따른 하중분포경향을 나타낸 것이다. Fig. 3과 같이 느슨한 지반의 경우에는 말뚝두부에 작용하는 하중이 간격비에 따라 차이가 발생하였지만 말뚝 선단부로 갈수록 하중분포경향이 비슷하게 나타났다. Fig. 4의 경우에도 느슨한 지반과 유사한 분포경향을 보였으나, 조밀한 지반일수록 말뚝두부와 선단부의 하중차이가 많이 발생하는 것으로 나타났다.

### 4.2. 인발하중을 받는 무리말뚝의 하중-변위 곡선

여러 배열의 무리말뚝중 2x2, 3x3무리말뚝에 대해 간격비(S/D)를 2, 4, 6으로 하여 인발하중을 작용시킨 결과 Fig. 5~8과 같은 무리말뚝의 하중-변위곡선을 얻을 수 있었다. 단말뚝과의 하중비교를 위해 무리말뚝에 가한 하중을 말뚝수로 나누어 평

균인발하중으로 무리말뚝의 하중을 평가하였다.

Fig. 5는 느슨한 지반에 타입된 2x2무리말뚝에 대한 하중-변위곡선으로 초기하중단계에서는 하중과 비례하여 변위가 증가하다가 최대 극한인발 하중점을 지나서는 변위의 증가양상이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 최대 인발하중은 말뚝의 상방향 변위가 약 7~10mm정도 발생하였을 때 발휘되는 것으로 나타났다. 이것은 말뚝직경의 6.5~10.6% 범위에 해당되며, 단말뚝의 경우에는 27%인 것으로 나타났다. 또한 간격비가 증가함에 따라 평균극한하중이 증가하였으며, 극한하중이 발생하는 말뚝의 변위도 증가하는 것으로 나타났다.

단말뚝과 무리말뚝의 하중-변위관계를 비교해 보면 2mm정도의 변위에서는 비슷한 하중경향을 보이다가 점차 변위가 증가함에 따라 단말뚝이 무리말뚝의 평균인발저항력보다 더 크게 나타났다. 이것은 무리말뚝간 응력의 중첩으로 인해 상방향 인발시 저항력의 감소를 가져다주며, 말뚝간격이 좁을수록 이러한 현상이 더욱 두드러지게 발생된다.

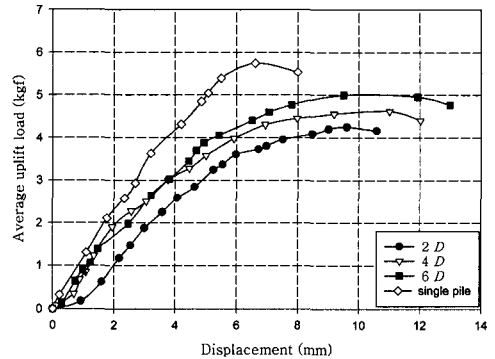


Fig. 5. Load-displacement curve of single pile and 2x2 group piles in  $D_r=40\%$ .

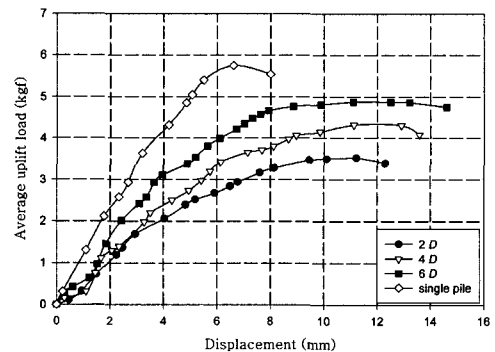


Fig. 6. Load-displacement curve of single pile and 3x3 group piles in  $D_r=40\%$ .

Fig. 6은 3×3무리말뚝에 대한 인발재하시험 결과로 전체적인 경향은 2×2무리말뚝과 비슷하나 간격비에 따른 하중차이가 점차적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 극한하중이 발생하는 말뚝의 변위는 약 8~12mm인 것으로 나타났다. 이것은 말뚝직경의 3.1~6.4% 범위에 해당된다.

Fig 7~8은 조밀한 지반에 설치된 무리말뚝에 대한 인발재하시험 결과이다. Fig. 7은 느슨한 지반의 2×2무리말뚝과 비슷한 양상을 보였으며 간격비가 6인 무리말뚝의 하중분포경향과 단말뚝의 하중분포경향이 느슨한 지반보다는 더 근접하는 것으로 나타났다. 그리고, 간격비가 2와 4인 무리말뚝의 경우에는 하중분포경향이 비슷하게 나타났다. 또한 극한인발력이 발생하는 변위는 조밀한 지반일수록 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 조밀한 지반에 타입된 3×3무리말뚝의 하중-변위곡선으로 간격비에 따른 무리말뚝의 하중분포경향의 차이가 감소함을 알 수 있다. 그러나 단

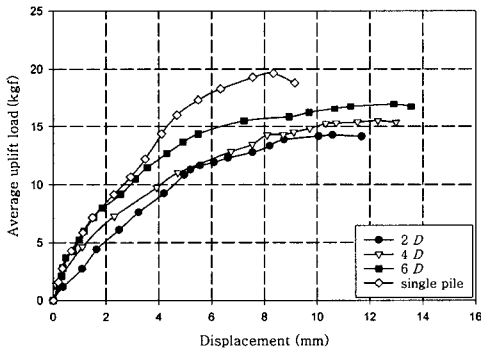


Fig. 7. Load-displacement curve of single pile and 2×2 group piles in  $D_r = 80\%$ .

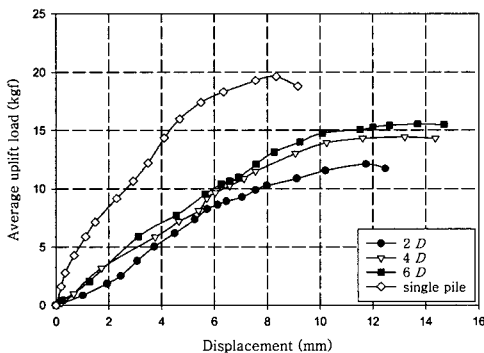


Fig. 8. Load-displacement curve of single pile and 3×3 group piles in  $D_r = 80\%$ .

말뚝과 무리말뚝간 하중분포 경향은 큰 차이를 나타냈다. 이것은 지반이 조밀해질수록 무리말뚝간 응력중첩으로 인해 파괴각의 감소를 발생시키기 때문에 상대적으로 단말뚝과의 하중차이가 크게 발생함을 알 수 있었다.

### 4.3. 이론식과의 주면마찰력 비교

정적지지력 이론식들 중 인발저항력 산정이론으로는 Meyerhof의 한계마찰이론을 적용하여 재하시험에 의해 실측된 값과 비교 분석하였다.

Fig. 9와 10은 인발하중을 받는 무리말뚝의 주면마찰력을 Meyerhof의 한계마찰이론과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9는 느슨한 지반의 경우로 말뚝간격이 좁을수록 이론치와 차이가 크게 발생되었으며 간격이 증가할수록 이론치에 근접하는 것으로 나타났다. 무리말뚝의 배열에 따라서는 말뚝수가 적은 경우가 이론치에 근접하는 경향을 보였다.

느슨한 지반에 타입된 무리말뚝은 플랜지 사이의 흠에 의한 폐쇄효과<sup>10)</sup>로 인해 발생된 잔류응력이 인발 시 거의 소멸되어 버리기 때문에 이론식에 의한 주면마찰력이 더 크게 산정되는 것으로 판단된다. 그러므로 말뚝수가 많을수록 평균주면마찰력이 감소하기 때문에 비교적 말뚝수가 적은 무리말뚝이 이론식에 근접하는 결과를 나타냈다.

Fig. 10과 같이 조밀한 지반의 경우에는 느슨한 지반과 달리 간격비에 따른 주면마찰력의 차이가 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 말뚝간격이 작은 경우에는 이론식에 의한 값이 최대 2.5kgf 정도 더 크게 산정되었으며 간격비가 6으로 증가함에 따라서는 실측치가 2.3kgf 정도 더 크게 측정되었다.

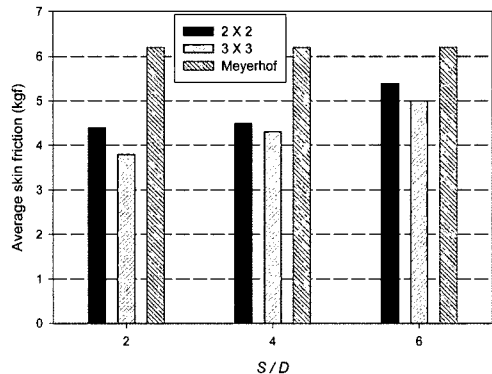


Fig. 9. Comparison of skin friction with theory in  $D_r = 40\%$ .

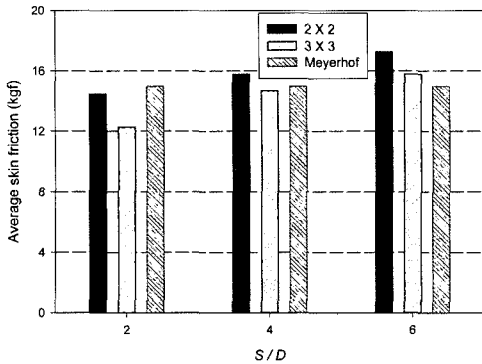


Fig. 10. Comparison of skin friction with theory in  $D_r=80\%$ .

전체적으로 느슨한 지반에 비해 실측치와 이론치가 유사한 경향을 나타냈는데 이는 조밀한 지반일수록 말뚝 타입 시 발생된 잔류응력이 더 크게 작용함으로써 주면마찰력이 증대되어 Meyerhof의 이론식에 보다 근접하는 것으로 분석되었다.

### 5. 결론

무리말뚝에 인발하중을 가하여 간격비와 배열 그리고 지반밀도에 따른 무리말뚝의 주면마찰력을 구하고 기존의 이론식과 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 느슨한 지반에 타입된 무리말뚝에 대한 인발하중과 변위의 관계에서 최대 극한인발 하중점을 지나서는 변위가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 인발하중은 무리말뚝의 상방향 변위가 3x3 무리말뚝에서 말뚝직경의 6.5~10.6%, 2x2 무리말뚝에서 말뚝직경의 3.1~6.4% 범위일 때 발휘되는 것으로 나타났다. 또한 간격비가 증가함에 따라 평균 극한하중도 증가하였으며, 극한하중이 발생하는 말뚝의 변위도 증가하는 것으로 나타났다.

2) 조밀한 지반에 설치된 무리말뚝에 대한 인발재하시험 결과 극한인발력이 발생하는 변위는 조밀한 지반일수록 증가하는 것으로 나타났으며, 간격비에 따른 단말뚝과 무리말뚝간 하중분포 경향이 큰 차이를 나타내었다.

3) 느슨한 지반의 경우 말뚝간격이 좁은 경우에 비하여 간격이 증가할수록 평균주면마찰력이 이론식에 보다 근접하는 경향을 나타냈다. 지반밀도가 증가함에 따라서는 말뚝간격에 영향을 받지 않고 비교적 이론식과 유사한 경향을 보였다.

### 참고문헌

- 1) Hegedus, E., and Khosla, V. K., "Pullout Resistance of H - Piles", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 100, No. 9, pp. 1274 ~1290, 1984.
- 2) Lam, T. S. K., Tse, S. H., Cheung, C. K., and Lo, A. K. Y., "Performance for Two Steel H-Pile Founded in Weathered Meta-Siltstone", Hong Kong Geotechnical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 5.6.1 ~ 5.6.10., 1985
- 3) Ho, J., and Weber, L., "The Use of High Strength H Bearing Piles in Hong Kong", 4th International DFI Conference, pp. 249~254, 1991.
- 4) Das, B. M., "A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles", Soil and Foundation, Vol. 23, No.3, pp.122~126, 1983.
- 5) Tang, N. C., "Static Uplift Capacity of Board Piles", Proceedings of Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp. 197~202, 1983.
- 6) Darrag, A. A., "Capacity of Driven Piles in Cohesionless Soils Including Residual Stresses", Ph. D. Thesis, Purdue University, pp. 20~60, 1987.
- 7) Matsumoto, T., and Takei, M., "Effects of Soil Plug on Behaviour of Driven Pipe Piles", Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanic and Foundation Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 14 ~ 34, 1991.
- 8) Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, No. GT3, pp. 197~228, 1977.
- 9) Vesic, A. S., "Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand", Highway Research Record 39, Highway Research Board, National Research Council, Washington D, C., pp. 112~153, 1963.
- 10) 김명모, "개단 말뚝의 폐색효과에 대한 모형실험 연구", 대한토목학회논문집, 제7권, 제3호, pp. 175~181, 1987.
- 11) Baligh, M. M., "Cavity Expansion in Sands with Curved Envelopes", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, No. GT11, pp. 1131 ~ 1147, 1976.