

# 무리말뚝의 간격비에 따른 변위 및 지지력특성

최기봉 · 안병철

충청대학 안전경영설계과

## 1. 서론

최근 국내에서는 강관말뚝과 PHC말뚝 이외에도 H말뚝에 대한 실무적용 사례가 증가함에 따라 이에 대한 보다 합리적인 해석방법이 필요하게 되었다. H말뚝은 재료의 강도가 좋기 때문에 강력한 항타에너지를 사용하여 견고한 지반까지 관입하는 것이 가능하며, 항타로 인한 지반의 융기 및 인근 구조물에 미치는 유해한 영향을 줄일 수 있으며, 선단부에 적절한 보호구를 설치하면 호박돌과 같은 장애물이 있는 곳에서도 타입이 가능한 우수한 장점을 가지고 있다.

말뚝을 보다 안전하고 경제적으로 설계하기 위해서는 말뚝의 지지력 및 말뚝과 지반 사이의 상호작용에 관한 분석이 필요하다. 무리말뚝은 단독말뚝과 달리 말뚝의 간격비에 따라 다양하고 복잡한 상호작용으로 인해 전체 지지력을 단순히 각 개별 말뚝의 지지력의 합으로 산정할 수 없다. 따라서 보다 정확한 무리말뚝 지지력의 산정을 위해서는 무리말뚝을 구성하는 각 말뚝 요소들 사이의 상호작용인 변위장 중첩 또는 응력장 중첩 등과 같은 무리말뚝의 거동에 대한 합리적인 고려가 필요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 들어 현장시공이 활발히 이루어지고 있으나, 연구결과가 상대적으로 적은 H형강 말뚝을 이용하여 무리말뚝의 배열과 간격비에 따른 거동특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 대상시료 및 모형말뚝

모형지반 조성을 위하여 사용한 시료는 건조시킨 화강 풍화토로, 체분석시험결과 통일분류법에 의해 SP-SM으로 분류되었으며, 본 실험에서 사용한 시료의 기본 물리적 특성치는 Table 1과 같다.

본 실험에서 사용된 모형 H말뚝은 탄성계수가  $2.14 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 인 스테인레스이며, 두께가 1.2 mm이고 길이는 45 cm이며 플랜지와 웨브의 길이를 2.0 cm의 같은 크기로 제작하였다. 선단부의 지지력과 주면마찰력을 관찰하기 위하여 플랜지의 겉표면에 일정한 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다. 무리말뚝을 고정시킬 캡은 두께 약 12 mm의 강판으로 제작하였다.

### 2.2 실험방법

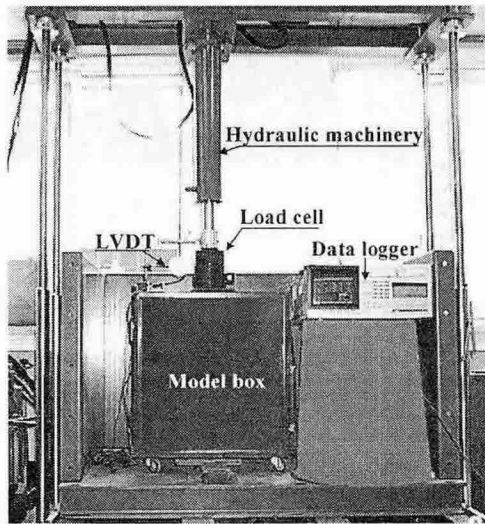


Fig. 1 Pile load test

중의 300%까지의 하중을 20단계로 나누어 재하하였으며, 각 하중의 재하시간은 2.5내지 15분간 하중을 유지시켰다(Fig. 1). 말뚝의 근입깊이는 40 cm로 하였으며, 말뚝의 중심간격(S)은 말뚝지름(D)의 2D, 4D, 6D인 경우에 대하여 각각 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 모형토조는 55 cm×55 cm 크기의 강체로 제작되었으며, 토조의 크기효과(scale effect)를 Baligh(1976)가 제안한 모래에서의 공동확장이론(cavity expansion theory)을 이용하여 검토하였다.

말뚝항타를 위해 중량 2.5 kgf의 철제 해머를 이용하여 15 cm의 높이에서 낙하시켰다. 말뚝 타입순서는 중앙말뚝을 기준으로 시계 방향으로 나머지 말뚝들을 각각 설치하였다.

말뚝 타입에 의한 잔류응력을 감소시키기 위하여, 재하시험은 말뚝 타입후 24시간이 경과한 후에 수행하였다. 재하시험은 설계하

Table 1 Soil Properties used in this study

Contents		Results	
Specific gravity of soil		2.790	
Density test	Maximum dry density (gf/cm <sup>3</sup> )	1.770	
	Minimum dry density (gf/cm <sup>3</sup> )	1.424	
Sieve analysis	Uniformity coefficient ( $C_u$ )	4.100	
	Coefficient of curvature ( $C_c$ )	1.240	
	$D_{10}$ (mm)	0.150	
	$D_{30}$ (mm)	0.340	
	$D_{60}$ (mm)	0.680	
Direct shear test	Friction angle( $\phi$ )	$D_r = 40\%$	31°
		$D_r = 80\%$	42°

### 3. 실험결과 및 분석

무리말뚝의 간격비(S/D)를 2, 4, 6으로 하고, 말뚝의 배열을 각각 1×2, 1×3, 2×2, 2×3, 3×3 형태로 느슨한 지반과 조밀한 지반에 대해서 모형재하실험을 실시하였다.

#### 3.1 무리말뚝의 지지력분석

Fig. 2는 느슨한 지반에 타입된 무리말뚝의 극한하중분포를 해당 말뚝수로 나누어 평균값을 나타낸 것이다. 동일간격비 조건하에서 말뚝수가 적을수록 평균극한하중값이 높게 나타났으며, 간격비가 증가할수록 모든 말뚝들의 평균극한하중값이 감소하는 것으로 나타났다.

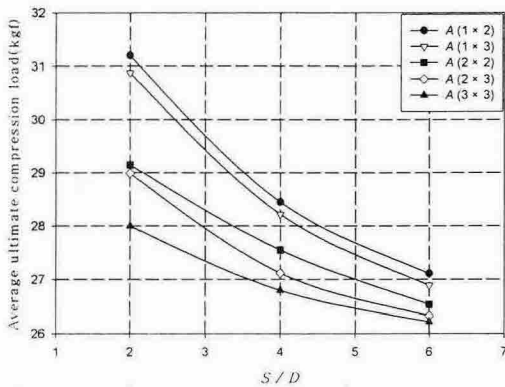


Fig. 2 The ultimate compression load of pile group with pile spacings in loose soil

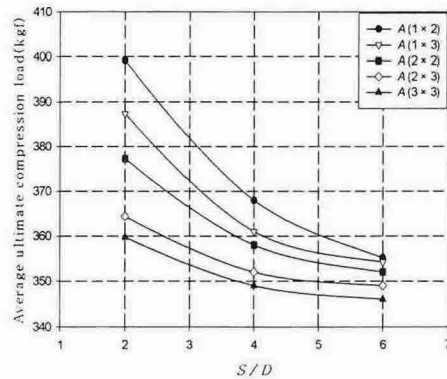


Fig. 3 The ultimate compression load of pile group with pile spacings in dense soil

간격비가 증가할수록 평균극한하중값이 감소하는 이유는 좁은 간격으로 설치된 무리말뚝일수록 상호간에 다짐중첩효과가 증대되어 선단부의 지지력과 주변마찰력을 증대시키기 때문에 간격비가 작을수록 평균극한지지력은 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 조밀한 지반에 타입된 무리말뚝에 대한 평균극한하중값을 간격비별로 나타낸 것이다.

전체적인 경향은 느슨한 지반의 경우와 같은 것으로 나타났으며, 평균 극한하중값은 지반밀도의 증가로 인해 느슨한 지반보다 크게 나타났다. 또한 무리말뚝의 간격비 증가로 인한 극한하중의 감소경향은 느슨한 지반보다 작게 발생하였다.

Table 2는 압축하중을 받는 무리말뚝의 평균극한하중을 지반밀도와 간격비별로 나타낸 것이다. 말뚝수가 증가할수록 전체 극한하중값은 증가하며 지반밀도가 높을수록 극한하중값은 증가하는 것으로 나타났다.

Table 2 Average ultimate compression load with pile spacing

Relative density (%)	Spacing ratio of piles(S/D)	Average ultimate compression load (kgf)				
		1×2	1×3	2×2	2×3	3×3
40	2	31.20	30.88	29.15	28.99	28.00
	4	28.45	28.22	27.55	27.12	26.80
	6	27.11	26.89	26.54	26.33	26.22
80	2	399.25	387.33	377.25	364.36	359.72
	4	368.00	361.00	358.00	352.00	349.00
	6	355.15	354.20	352.00	349.00	346.00

### 3.2 유한요소해석결과

#### 3.2.1 해석조건

본 연구에서는 압축재하시험을 통해 얻어진 실험결과값과 비교·분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 해석에는 3차원 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON 3D 를 사용하였다.

해석시 지반은 Mohr-Coulomb의 항복기준과 유동법칙에 부합되는 탄소성 재료로 모델링 되었으며, 상부에서 H말뚝을 2차원 평면변형 조건에서 모델링을 한 후 심도별로 투영하여 3차원 해석을 실시하였다. 지반은 8절점 육면체요소를 사용하였으며, H말뚝과 캡은 4절점 쉘요소를 사용하여 모델링 하였다(Fig. 4).

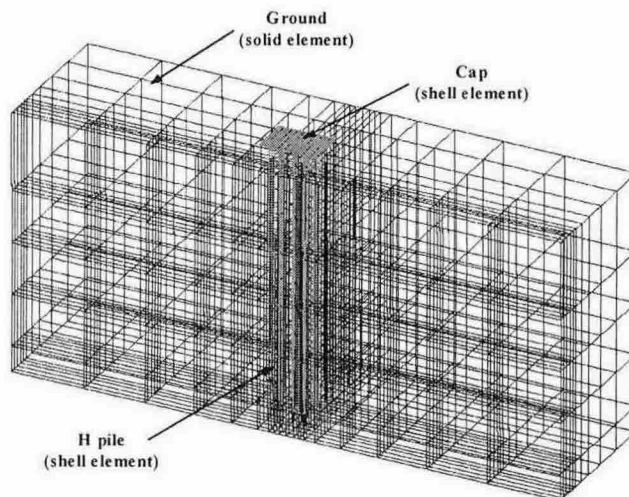


Fig. 4 Mesh configuration for H pile

### 3.2.2 해석결과

해석은 대상 모형의 전단면을 모델링하고, 강성재하 조건으로 등분포하중을 재하하여 압축하중을 받는 무리말뚝에 대한 파괴형태를 관찰하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 간격이 2D로 비교적 작은 무리말뚝에 대한 파괴율과 변형도를 나타낸 것으로, 파괴발생영역이 말뚝주변에는 확장되지 않고 말뚝내부에만 파괴가 발생하는 현상을 나타냈다. 그리고 지반밀도가 조밀할수록 파괴가 발생하는 영역이 감소되었다.

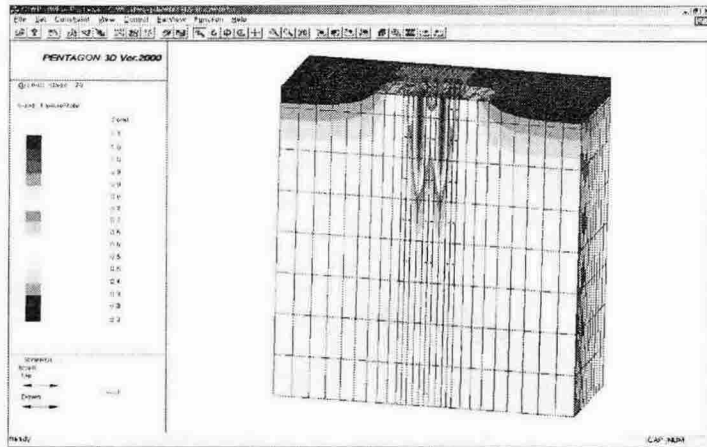


Fig. 5 Failure rate and shape of H-pile group(  $D_r = 40\%$ , 2D)

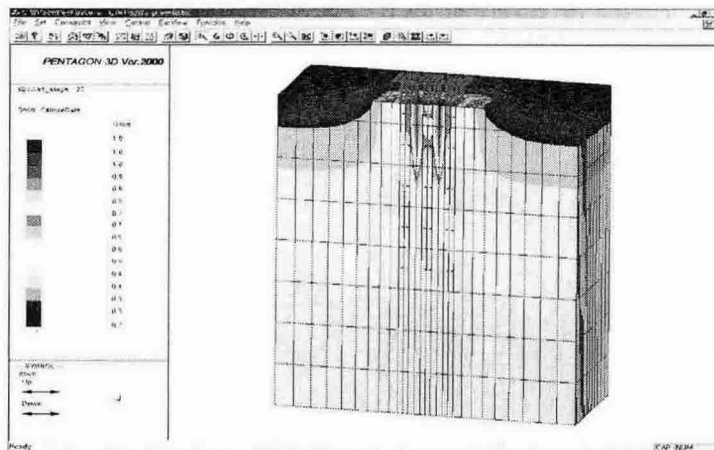


Fig. 6 Failure rate and shape of H-pile group(  $D_r = 80\%$ , 2D)

#### 4. 결 론

간격비에 따른 H형강 무리말뚝에 대한 재하실험을 토대로 하여 유한요소해석과 함께 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일 간격비에서 말뚝수가 증가할수록 평균압축하중이 감소하였으며, 간격비가 작을수록 압축하중이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 좁은 간격으로 설치된 무리말뚝일수록 상호간에 다짐중첩효과가 증대되어 선단부의 지지력과 주변마찰력을 증가시킨 것으로 판단된다.
2. 무리말뚝은 지반밀도에 따라 평균극한지지력의 차이를 나타냈으며, 지반밀도가 증가할수록 평균극한하중이 증가하였으며, 간격비 증가로 인한 극한하중의 감소경향은 느슨한 지반에 비해 작은 것으로 나타났다.
3. 무리말뚝에 대한 파괴형태와 변형을 분석한 결과 간격비가 작은 경우에는 파괴발생영역이 말뚝주변에는 확장되지 않고 말뚝내부에만 파괴가 발생하는 현상을 나타냈으며, 지반밀도가 조밀할수록 파괴발생영역이 감소하는 결과를 보였다.

#### 참고문헌

- 1) 김영수, 허노영, 김병탁, 김대만(2000) 사질토 지반에서의 강관 말뚝의 수직거동 연구, 한국지반공학회논문집, Vol. 16, No. 6, pp. 5~13.
- 2) 신방웅, 여병철(2000) 고강도 H말뚝의 연직 지지력 특성, 한국지반공학회논문집, Vol. 16, No. 3, pp. 135~143.
- 3) 이수형, 정충기(2003) 연직하중을 받는 무리말뚝의 새로운 설계 방법, 한국지반공학회논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 31~40.
- 4) 정상훈, 정상섭(2001) 실내모형실험을 통한 군말뚝기초의 거동분석, 한국지반공학회논문집, Vol. 17, No. 6, pp. 193~205.
- 5) Coyle, H. M., and Castello, R. R., "New Design Correlations for Piles in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 107, No. GT7, 1981, pp. 965~986.
- 6) Guo, W. D., and Randolph, M. F., "Vertically Loaded Piles in Non-Homogeneous Media", International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol. 21, 1997, pp. 507~532.
- 7) Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, No. GT3, 1976, pp. 197~228.