

무리말뚝의 주면마찰력 분담비율 특성

Characteristics of Distribution Ratio for Skin Friction in Group Piles

이 준 대¹ Lee, Jun-Dae

안 병 철² Ahn, Byung-Chul

Abstract

H-pile can be more easily driven than pipe pile by pile driver and shows high skin friction and plugging effect. This experimental study was devoted to investigate skin friction of H group piles in granite soil under laboratory test. Pile arrangements (1×2, 1×3, 2×2, 2×3, 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. Distribution ratio of skin friction for total load decreased by 48~39% (dense soil), 32~27% (loose soil) as piles space ratio increases in case of 3×3 group piles. And the distribution ratio of skin friction by pile settlements under loose soil decreased by about 58~33.2% in 2×2 group piles and about 65~38% in 3×3 group piles respectively.

요 지

H pile은 원형말뚝에 비해 항타에 의해 쉽게 관입이 되며, 높은 주면마찰력과 폐색효과를 나타내는 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 실내시험을 통한 화강풍화토 지반에 관입된 H형강 무리말뚝의 주면마찰력 분포특성을 관찰하는데 목적이 있다. 말뚝의 배열(1×2, 1×3, 2×2, 2×3, 3×3), 말뚝설치간격(2D, 4D, 6D)과 지반밀도(40%, 80%)에 따른 재하시험을 실시하였다. 실험결과 전체 재하중에 대한 주면마찰력의 분포비율은 3×3무리말뚝의 경우 말뚝간격비가 증가할수록 조밀한 지반의 경우 48%~39%, 느슨한 지반의 경우에는 32%~27%로 각각 감소하였다. 그리고 말뚝침하량에 따른 주면마찰력 분포비율은 느슨한 지반조건에서 2×2무리말뚝의 경우 58%~33.2%, 3×3무리말뚝의 경우 65%~38%로 각각 감소되었다.

Keywords : Distribution ratio, Pile arrangements, Piles space ratio, Skin friction, Soil density

1. 서 론

국내에서는 근래에 들어 강관말뚝과 PHC말뚝 이외에도 H말뚝에 대한 실무적용 사례가 증가함에 따라 이에 대한 보다 합리적인 해석방법이 필요하게 되었다.

강관말뚝이나 H말뚝과 같은 개단말뚝이 지중에 타입되면 말뚝쪽에 흠기둥이 형성되고, 이로 인해서 관입

시에는 타입이 어려워지기도 하지만 관입이 계속되면 이 안쪽에 있는 흠기둥은 말뚝의 주면마찰력을 상당히 증가시키게 된다.

H형강 말뚝의 경우 PHC말뚝과 달리 타입시 플랜지와 웨브사이에 흠이 밀려들어가 마찰력이 더욱 증가하게 되며, 특히 무리말뚝형태로 시공되어 진 경우에는 인접말뚝의 영향으로 인해 주면마찰력의 변화가 예상된다.

1 정희원, 세명대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Semyung Univ., jdllee@semyung.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 충북대학교 토목공학과 공학박사 (Member, Ph. D., Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

말뚝의 설계를 위한 주변마찰력을 기존 이론식에 근거하여 산정하기도 하지만 이러한 방법은 말뚝의 지지력에 영향을 미치는 요소들에 대한 매개변수의 적용에 한계가 있기 때문에 보다 신뢰성 있는 방법으로 재해석에 의존하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 배열과 지반밀도가 서로 다른 무리말뚝의 하중에 대한 주변마찰력의 분담비율을 간격비와 침하량에 따라 서로 비교함으로써 무리말뚝에서 주변마찰력의 분담비율과 하중전이 특성을 규명하고자 하였다.

2. 주변마찰력 특성

말뚝이 매입, 압입 또는 항타등의 설치과정을 거치는 동안 말뚝의 주변지반에는 변형이 발생하며 말뚝표면 부근에서는 극심한 교란이 일어나게 된다. 이에 따라 지반의 흠구조에서는 상당한 변화가 발생하여 입자의 배열상태, 방향성, 간극비 등이 말뚝설치 이전과는 상이한 상태가 될 것이다.

일반적으로 인발저항력은 압축주변마찰저항에 비교하여 적은 값을 갖는다고 알려져 있으며, McClelland (1974)가 제안한 압축주변마찰저항의 70%의 값을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 하중의 작용방향에 관계없이 주변마찰력의 근본적인 거동에는 이론적으로는 차이가 없다는 주장도 있다(Fleming et. al., 1985).

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

첫째로, 주변마찰력은 선단지지력과 별개의 독립된 요소가 아니라 상호 함수관계에 있다는 주장이다(Broug, 1982). 따라서, 말뚝이 압축하중을 받아 저항할 경우 주변마찰력만을 따로 분리하여 고려하기가 곤란하다.

둘째로, 말뚝의 타입시 말뚝내부에 발생하여 존재하게 되는 잔류응력의 영향이다. Darrag(1987)는 이 잔류응력이 인발하중을 받을 경우 거의 소멸되므로 압축하중시와 다른 거동을 보일 수 있다고 제안하였다.

셋째로, 말뚝의 길이와 재질이 양자의 차이를 유발한다는 주장이다. 말뚝의 재질이 상대적으로 유연한 경우 압축시에는 말뚝의 횡방향 팽창변위가 발생하며 이로 인하여 지반의 방사능력 증가시켜 결과적으로 높은 주변마찰력이 나타나게 된다. 반대로 인장시에는 말뚝의 횡방향 수축과 상대적으로 낮은 주변마찰력이 발생된다.

이러한 영향은 말뚝의 인발시 주변마찰력을 압축시보다 10~20%까지 낮은 값을 갖게 할 수 있다.

Tang(1983)은 말뚝의 인발시 주변마찰력은 말뚝의 길이에 관계된다고 보고 실험결과를 분석하여 말뚝의 길이가 9m일 때는 압축시보다 0.78의 감소계수를 12m일 때는 0.98의 감소계수를 사용할 것을 제안하였다.

Chellis(1961)는 마찰 H말뚝의 경우 압축시의 75~90%를 제안하고 있으며, Poulos와 Davis(1980)도 압축시의 2/3값을 추천하고 있다. 그러나, 이와같은 제안들은 압축과 인발시의 거동에 대한 규명이 되지 못한 상태에서 인발하중 조건에서의 말뚝설계의 안전을 고려한 것이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시료의 특성

본 실험에서 사용된 화강풍화토의 특성은 표 1과 같이 나타났으며 체분석시험을 실시한 결과 0.074mm체 통과량 8.4%, 균등계수는 4.10, 곡률계수는 1.24로 나타나 통일분류법상 SP-SM으로 분류되었다.

3.2 실험장치

본 실험에서 사용된 모형 H말뚝의 제원은 표 2와 같으며, 하중을 받는 무리말뚝의 축방향력을 측정하기 위하여 말뚝선단부터 일정한 간격으로 변형률 게이지를

표 1. 대상시료의 물리·역학적 특성

항 목		결과값	
비 중		2.790	
단위중량	γ_{dmax} (gf/cm ³)	1.770	
	γ_{dmin} (gf/cm ³)	1.424	
체분석	C_u	4.100	
	C_c	1.240	
	D_{10} (mm)	0.150	
	D_{30} (mm)	0.340	
전단시험	ϕ	$D_r = 40\%$	31°
		$D_r = 80\%$	42°

표 2. H말뚝의 제원

재질	길이 (cm)	플렌지 (cm)	웨이브 (cm)	외경 (cm)	두께 (cm)	탄성계수 (kgf/cm ²)
강	45.0	2.0	2.0	2.25	0.1	2.14×10^6

부착하였다.

두께 약 12mm의 아크릴판으로 모형 말뚝캡을 제작하였으며, 말뚝머리는 볼트와 너트를 이용하여 말뚝캡에 고정시켰다.

모형토조는 55cm×55cm×60cm의 크기로 제작하였다. 경계조건의 영향을 검토하기 위하여 Baligh(1976)가 제안한 모래에서의 공동확장이론(cavity expansion theory)을 사용하여 경계조건의 영향을 검토하였다. 폐쇄효과가 전혀 없는 완전개방상태인 경우 H말뚝의 순단면적과 동일한 등가원형 단면적으로 환산하여 산정한 결과 공동확장으로 인한 지름은 약 55.4mm로 나타났다.

그리고 플랜지내부에 흠뻑기가 발생되어 완전폐단말뚝형태로 거동한다고 가정한다면 이때 공동확장으로 인한 지름은 133mm로 증가한다. 그러나 3×3형태의 무리말뚝배치상태에서 토조측면과의 거리가 143mm인 점을 고려한다면 토조의 경계조건이 말뚝의 지지력에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다.

말뚝선단과 모형 상자의 바닥과는 적어도 말뚝지름의 3~4배 이상의 간격을 두어 모형 상자 바닥의 영향을

배제시켰다.

3.3 실험 방법

화강풍화토를 이용하여 모형지반을 깊이에 따른 평균 상대밀도가 40%, 80%가 되도록 조성하였다. 상대밀도를 계산하기 위하여 한계밀도시험(ASTM D-2049)을 실시하여 시료의 최대단위중량과 최소단위중량을 찾았고, 이 결과로 여러번의 반복시험을 통해 각각의 상대밀도에 맞는 적합한 다짐에너지를 가해 지반조성을 실시하였다.

지반조성을 위한 모래의 다짐은 불충분다짐(Undercompaction)법(Ladd, 1978)을 사용하여, 흙을 다질 경우 맨 아래에 놓여지는 흙은 다짐 에너지로 인하여 맨위의 흙보다 더 많이 다져져서 밀도가 높아지기 때문에 각층의 다짐정도를 요구되는 최종밀도보다 낮게 계산하여 다짐을 실시하였다. 여러 개의 얇은 원통형 실린더를 지반에 설치하여 평균상대밀도를 측정하였다.

말뚝은 중량 2.5kgf의 철제 해머를 15cm의 높이에서 낙하시키는 방법으로 타입시켰다. 그림 2는 말뚝의 타입순서를 나타내며 중앙말뚝을 가장 먼저 설치한 후, 중앙말뚝을 중심으로 시계 방향의 순서로 나머지 말뚝들을 타입하였다.

말뚝의 근입깊이는 40cm로 하였으며, 말뚝간 중심간격은 말뚝지름의 2배, 4배, 6배로 각각 실험을 실시하였다. 말뚝 타입에 의한 잔류응력을 감소시키기 위하여 재하시험은 말뚝 타입후 24시간이 경과한 후에 수행하였다. 잔류응력의 영향을 변형률계이를 통해 관찰하였으며 본 실험에서 사용된 말뚝은 대상지반의 흙보다 더욱 단단하고 비압축성으로 여겨질 수 있으므로 잔류응력의 영향이 비교적 적어 무시할 수 있을 것으로 예측된다.

재하시험은 ASTM-D 1143-81에 규정된 급속재하시

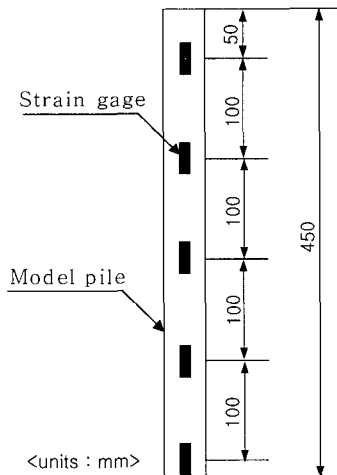


그림 1. 말뚝에 부착된 변형률계이지

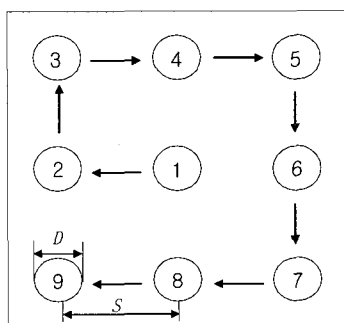


그림 2. 무리말뚝 설치방법

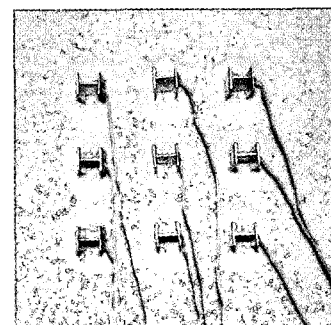


그림 3. 지반에 타입된 무리말뚝

험방법에 따라 설계하중의 300%까지의 하중을 20단계로 나누어 재하하였으며, 각 하중의 재하시간은 2.5~15분간 하중을 유지시켰다. 각 하중단계마다 데이터기록기(data logger)를 이용하여 하중과 침하량을 계속하였으며 말뚝표면에 부착된 변형률게이지를 통해 말뚝의 축하중분포를 관찰하였다.

그림 4는 말뚝재하용 시험장치로 압축을 먼저 실시한 후 인발시험을 실시하였다. 변위는 LVDT를 통해 얻었으며, 기록계를 통해 데이터를 출력하였다.

표 3. 재하시험조건

상대 밀도	하중방향	말뚝분류	말뚝배열	말뚝 간격비 (S/D)
40%	압축/인발	단말뚝	-	-
		무리말뚝	1×2	2 4 6
1×3				
2×2				
2×3				
80%		3×3		

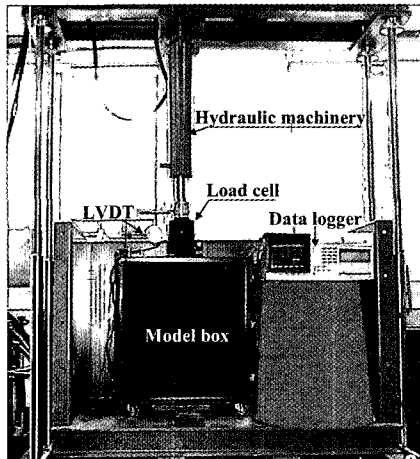


그림 4. 말뚝재하 시험장치

4. 실험결과 및 분석

4.1 무리말뚝의 하중전이특성

그림 6과 7은 간격비별로 극한하중을 대상으로 깊이별 축하중분포 경향을 3×3무리말뚝에 대하여 나타낸 것이다.

느슨한 지반의 경우에는 말뚝두부와 선단부에서의 축하중분포가 다른 경향을 보였다. 즉 말뚝두부하중은 간격비가 작은 무리말뚝이 더 높은 값을 보였으며, 말뚝 선단부에서는 간격비가 큰 무리말뚝일수록 높은 축하중을 나타냈다. 주변마찰력으로 비교하면 간격비가 6에서 2로 감소함에 따라 주변마찰력이 32%정도 증가하는 것으로 나타났다.

4.2 압축과 인발에 따른 주변마찰력 비교

극한지지력을 Davission 판정법으로 구한 다음 이 하중에 대한 하중전이 분포곡선으로부터 깊이 40cm에 해

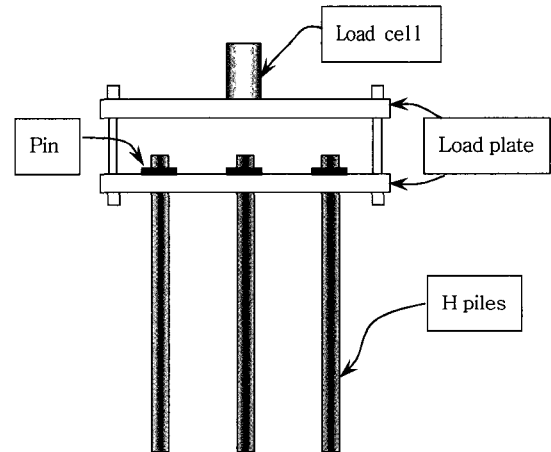


그림 5. 인발하중 재하 시 말뚝조립도

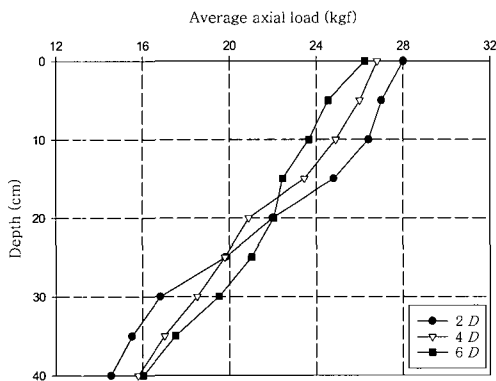


그림 6. 느슨한 지반에서의 간격비에 따른 축하중분포 곡선

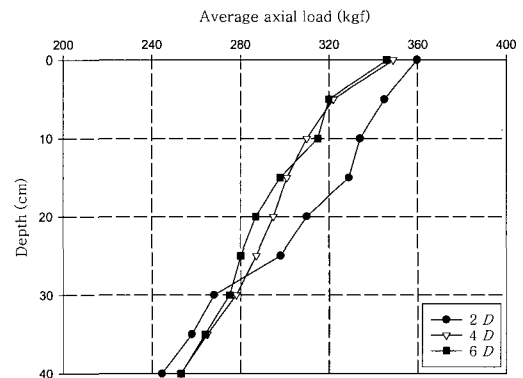


그림 7. 조밀한 지반에서의 간격비에 따른 축하중분포 곡선

당하는 하중을 선단지지력으로 하였으며, 극한지지력과 선단지지력의 차로부터 주면마찰력을 계산하였다.

그림 8과 9는 압축하중 작용시 주면마찰력과 인발저항력을 비교한 것이다. 간격비가 작고 말뚝수가 증가할수록 압축과 인발사이의 주면마찰력 차이는 증가하는 것으로 나타났다. 간격비가 2에서 6으로 증가함에 따라서는 점차적으로 하중에 따른 주면마찰력의 차가 감소하는 것으로 나타났다.

표 4. 말뚝간격에 따른 평균극한지지력

D_r (%)	S/D	평균극한하중 (kgf) (주면마찰력/선단지지력)				
		1×2	1×3	2×2	2×3	3×3
40	2	11.5/ 19.7	11.8/ 19.1	12.1/ 17.1	12.7/ 16.3	13.5/ 14.5
	4	9.8/ 18.7	10.0/ 18.2	10.3/ 17.3	10.7/ 16.5	11.0/ 15.8
	6	9.3/ 17.8	9.5/ 17.4	9.7/ 16.8	9.9/ 16.7	10.2/ 15.0
80	2	107.5/ 291.7	108.5/ 278.5	110.0/ 267.3	112.5/ 252.0	115.2/ 244.5
	4	92.8/ 276.0	93.5/ 267.5	94.0/ 264.0	95.2/ 256.8	96.0/ 253.0
	6	87.7/ 267.5	88.5/ 265.5	90.0/ 262.0	92.1/ 257.0	92.9/ 253.1

여러 배열의 말뚝중에서 3×3형태의 무리말뚝이 압축과 인발하중간 주면마찰력의 차이가 가장 크게 발생하였으며, 간격비가 증가함에 따라 약 35%정도의 주면마찰력비의 감소경향을 나타냈다.

조밀한 지반에 타입된 무리말뚝은 느슨한 지반의 경우와 마찬가지로 말뚝수가 증가할수록 압축력에 의한 주면마찰력이 인발 저항력보다 2.91~4.72배 크게 나타났다. 간격비가 2에서 4로 증가함에 따라 압축과 인발시 주면마찰력 차이가 급격히 감소하다가 간격비 6에서는 2.67~1.92로 그 차이가 감소하였다.

무리말뚝의 간격이 좁을수록 압축력을 받는 경우 흠이 플랜지와 웹사이에서 폐색됨에 따라 주면마찰력이 상대적으로 증가하는 것으로 판단된다.

4.3 주면마찰력 분담비율 분석

그림 10과 11은 3×3무리말뚝의 변위에 따른 주면마찰력과 선단지지력의 변화를 나타낸 것이다.

느슨한 지반의 경우에는 재하초기에는 선단지지력보다 주면마찰력이 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 변위가 증가함에 따라서는 선단지지력이 증가하면서 주면지지력보다 큰 지지력을 보였다.

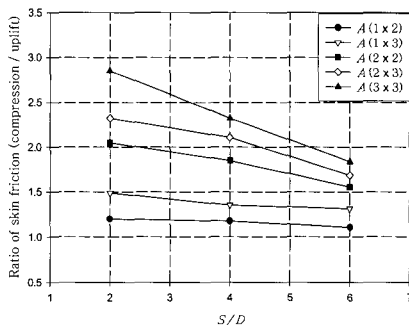


그림 8. 압축과 인발에 따른 주면마찰력비($D_r = 40\%$)

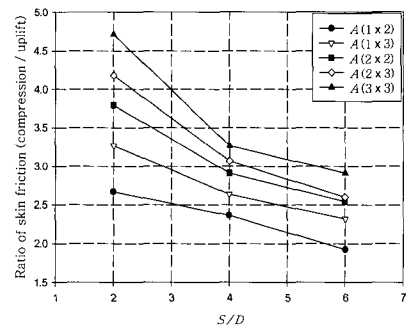


그림 9. 압축과 인발에 따른 주면마찰력비($D_r = 80\%$)

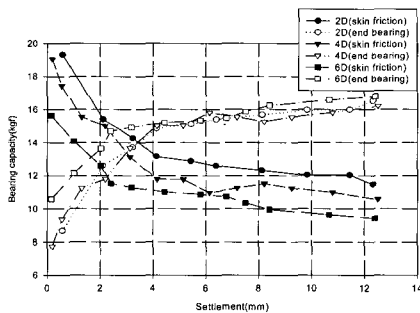


그림 10. 말뚝변위에 따른 주면지지력과 선단지지력 비교($D_r = 40\%$)

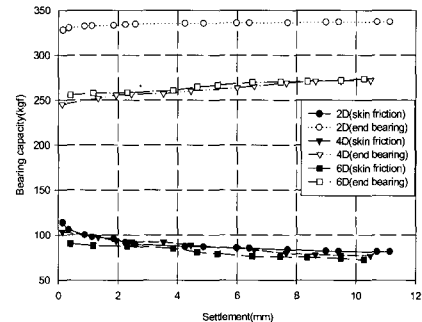


그림 11. 말뚝변위에 따른 주면지지력과 선단지지력 비교($D_r = 80\%$)

조밀한 지반의 경우에도 말뚝변위에 따라 선단지지력은 증가경향을 보이지만 주면마찰력은 감소하는 경향을 보였다.

그림 12와 13은 전체 압축하중에 대한 주면마찰력의 분담비를 간격비별로 나타낸 것이다. 간격비가 증가할수록 그리고 말뚝수가 감소할수록 주면마찰력 분담비율이 감소하는 것으로 나타났다. 느슨한 지반의 경우 3×3무리말뚝은 간격비가 2에서 6으로 증가함에 따라 전체 극한하중의 48~39%의 주면마찰력을 나타냈으며, 1×2무리말뚝의 경우에는 27~26%에 해당하는 마찰력을 나타냈다. 그리고 비교적 말뚝수가 적은 경우일수록 주면마찰력 분담비율이 작게 나타났다.

그림 14~17은 2×2, 3×3무리말뚝에서 전체 압축하중에 대한 주면마찰력 분담비율을 말뚝의 침하량에 따라 나타낸 것이다.

그림 14는 느슨한 지반에 타입된 2×2무리말뚝의 주면마찰력 분담비율을 나타낸 것으로 말뚝머리하중에 대한 말뚝주면하중의 분담비율이 침하가 증가함에 따라 평균 58%에서 33.2%로 감소하는 것으로 나타났다.

말뚝이 하중을 받아 변위가 증가하면서 주면마찰력 분

담비율은 감소하면서 약 3mm이후에서는 수렴하는 형태를 나타내고 있다. 말뚝의 초기변위 상태에서는 비교적 높은 주면마찰력 분담률을 보였는데 이것은 일반적으로 주면마찰력이 선단지지력보다 초기변위 상태에서는 먼저 발휘되고 변위가 증가함에 따라서는 점차적으로 주면마찰력이 수렴단계에 이르고 선단지지력이 증가하는 경향을 보여 이러한 현상을 나타낸 것으로 판단된다.

그림 15는 조밀한 지반에 타입된 2×2무리말뚝의 주면마찰력 분담비율을 나타낸 것이다. 침하가 증가함에 따라 평균 30.7%에서 20.7%로 감소하는 것으로 나타났다. 느슨한 지반과 달리 변위가 증가함에 따라 주면마찰력 분담비율은 계속해서 감소하는 결과를 나타냈다. 즉 조밀한 지반의 경우에는 주면마찰력이 모두 발휘되기 위해서 말뚝의 변위가 느슨한 지반보다 증가됨을 알 수 있다.

그림 16과 17은 3×3무리말뚝에 대한 주면마찰력 분담비율을 나타낸 것으로 2×2무리말뚝과 유사한 경향을 나타냈는데, 그림 16과 같이 느슨한 지반의 경우에는 약 4mm를 전후로 하여 주면마찰력의 분담비의 급격한 차이를 나타냈다. 초기변위에서는 약 65%로 주면마찰력

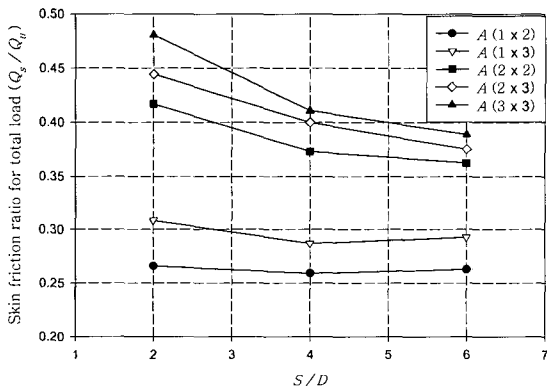


그림 12. 말뚝 간격에 따른 주면마찰력 분담비(D_r = 40%)

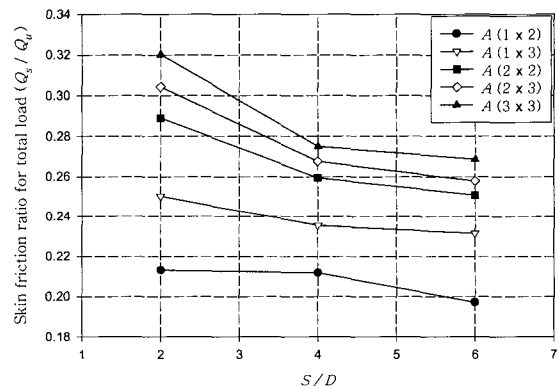


그림 13. 말뚝 간격에 따른 주면마찰력 분담비(D_r = 80%)

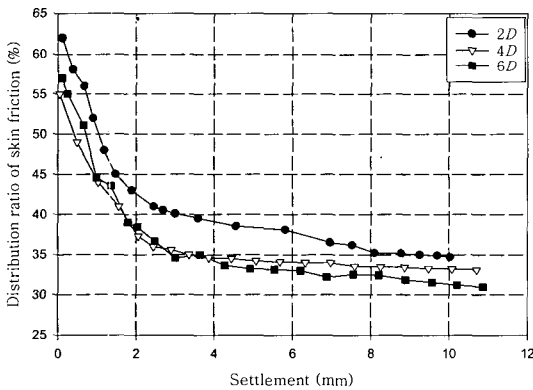


그림 14. 말뚝침하에 따른 주면마찰력 분담비율(D_r = 40%, 2×2)

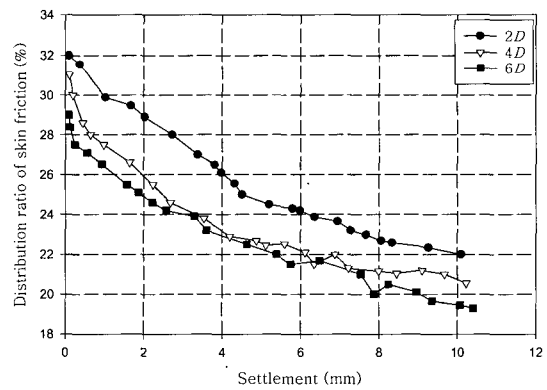


그림 15. 말뚝침하에 대한 주면마찰력 분담비율(D_r = 80%, 2×2)

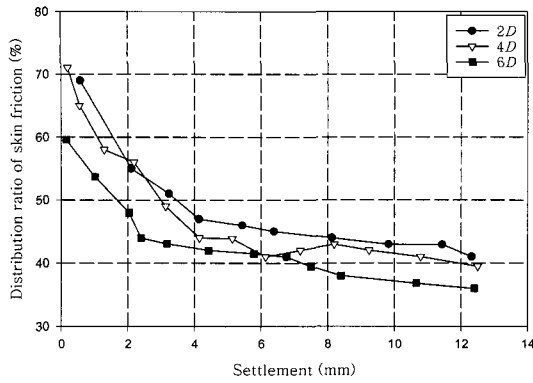


그림 16. 말뚝침하에 대한 주면마찰력 분담비율($D_r = 40\%$, 3×3)

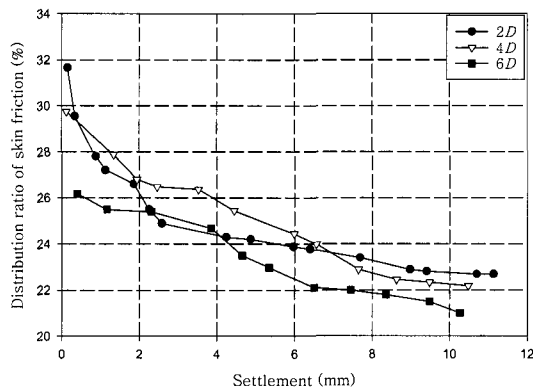


그림 17. 말뚝침하에 대한 주면마찰력 분담비율($D_r = 80\%$, 3×3)

의 분담비율이 나타나다가 항복점을 넘어서 최종변위에서는 약 38%의 분담비를 나타냈다.

그림 17은 조밀한 지반의 경우로 침하가 증가함에 따라 평균 25.9%에서 22.0%로 주면마찰력분담비율이 감소하는 것으로 나타났다. 느슨한 지반과 달리 변위가 증가함에 따라 거의 선형적으로 주면마찰력의 분담비율이 감소하는 것으로 나타나 조밀한 지반에 타입된 2×2 무리말뚝의 경우와 유사한 경향을 나타냈다.

5. 결론

말뚝의 배열과 지반 밀도가 서로 다른 무리말뚝의 하중에 대한 주면마찰력의 분담비율특성을 실내시험을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압축과 인발에 따른 주면마찰력 비교결과 상대적으로 압축력을 받는 말뚝이 인발력을 받는 경우보다 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝수가 비교적 많은 경우가 더 큰 상대적 주면마찰력 차이를 보였으며, 말뚝 중심간 간격이 증가할수록 주면마찰력 차이는

감소하는 결과를 나타냈다. 지반밀도에 따라서는 조밀한 지반의 경우가 느슨한 경우보다 더 큰 마찰력 차이를 나타냈다. 즉 압축력을 받는 경우에는 H형강의 경우 플랜지와 웨브사이에 흙이 폐색되는 현상으로 인해 주면마찰력의 증가를 보이거나 인발 시에는 이러한 폐색효과로 인한 주면마찰력의 증가 경향이 매우 적은 것으로 판단된다.

(2) 압축력을 받는 무리말뚝의 주면마찰력 분담특성결과 3×3무리말뚝의 경우 말뚝간격비가 증가할수록 조밀한 지반의 경우 48%~39%, 느슨한 지반의 경우에는 32%~27%로 각각 감소하였다. 그리고 말뚝 침하량에 따른 주면마찰력 분포비율은 느슨한 지반 조건에서 2×2무리말뚝의 경우 58%~33.2%, 3×3무리말뚝의 경우 65%~38%로 각각 감소되었다. 이는 말뚝간격이 좁을수록 말뚝-흙-말뚝간 상호작용효과로 추가적인 횡방향응력을 발생시켜 주면마찰력이 증가하는 것으로 판단된다.

(3) 말뚝침하에 따른 마찰력분담비율 결과 재하초기에는 느슨한 지반의 경우 주면마찰력이 선단지지력보다 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 변위가 증가함에 따라서는 선단지지력이 주면지지력보다 크게 발생되었다. 밀도가 증가하고 말뚝간 간격이 좁을수록 말뚝설치로 인한 다짐효과가 발생되어 선단지지말뚝으로서의 기능을 함으로써 말뚝변위가 증가함에 따라 선단지지력이 증가하는 경향을 나타냈다.

(4) 극한하중에서 간격비에 따른 깊이별 축하중분포 경향은 느슨한 지반의 말뚝두부에서는 간격비가 작은 무리말뚝일수록, 말뚝선단부에서는 간격비가 큰 무리말뚝일수록 높게 나타났으며, 간격비가 6에서 2로 감소함에 따라 주면마찰력은 느슨한 지반에서 32%, 조밀한 지반에서 24% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Baligh, M. M. (1976), "Cavity expansion in sands with curved envelopes", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.102, No.GT11, pp.1131-1147.
2. Chellis, R. D. (1961), *Pile Foundations*, 2nd ed., McGraw Hill Book Co., pp.111.
3. Davission, M. T. and Gill, H. L. (1963), "Laterally Loaded Piles in a Layered Soil System", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.89, No.SM 3, pp.63-93.

4. Fleming, et. al. (1985), *Pile Engineering*, Surrey University Press, pp.95-180.
5. Ladd, R. S. (1978), "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-23.
6. McClelland, B. (1974), "Design of Deep Penetration Piles for Oceans Structures", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, GT11, pp.1111-1127.
7. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*, John and Wiley & Sons, New York, pp.143-147, 231-232.

(접수일자 2006. 4. 3, 심사완료일 2006. 8. 30)