

무리말뚝의 하중분담률에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Load Sharing Ratio of Group Pile

권 오 균¹ Kwon, Oh-Kyun

오 세 봉² Oh, Se-Bung

김 진 복³ Kim, Jin-Bok

Abstract

In this study, the large scale model tests were executed to estimate the Load Sharing Ratio (LSR) of raft in a piled footing under various conditions. The conditions such as the subsoil type, pile length, pile spacing, array type and pile installation method etc. were varied in the pile loading tests about the free-standing group piles and a piled footing. As a result of this study, it was found that there was no difference in the load-settlement curves, resulting from the pile installation method and subsoil type. The piles supported most of the external load until a yielding load of the piled footing, but the raft supported a considerable load after a yielding load. As the relative density of sands increased, the LSR decreased. As the pile spacing was wider and the pile length increased, there was a tendency for the LSR to increase. But it was also found that the LSR was not affected by the pile installation method and the subsoil type.

요 지

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에 대한 대규모 모형실험을 실시하여 여러 가지 조건에 따른 하중분담률을 측정하였다. 모형실험은 동일한 조건하에서 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초 두가지 상태로 실시되었고, 지반의 상대 밀도와 종류, 말뚝길이, 간격, 배열상태와 말뚝관입방법 등의 조건들을 변화시켜 실험을 실시하였다. 모형실험 결과, 말뚝관입방법과 지반 종류에 따른 하중-침하 곡선은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 재하하중이 작은 경우에는 대부분의 하중을 말뚝들이 부담하지만, 하중이 커지면 래프트도 상당한 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 모래지반의 상대밀도가 높을수록 말뚝지지 전면기초의 하중분담률은 감소하는 경향을 나타내며, 말뚝간격이 넓어지고, 말뚝길이 길어질수록 하중분담률은 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 말뚝관입방법과 하부 지반의 종류는 말뚝지지 전면기초의 하중분담률에 큰 영향을 주지 않는 것으로 평가되었다.

Keywords : Load sharing ratio (LSR), Piled footing, Pile loading test, Raft

1. 서 론

일반적으로 말뚝기초 시공시 단말뚝으로 시공하는 것보다 무리말뚝으로 시공하는 경우가 대부분이다.

이 경우 상부구조와 연결되는 말뚝두부는 얇은 기초형식인 래프트로 연결되어 있다. 대부분의 경우 래프트와 지반은 접촉된 상태이며, 래프트가 외부하중의 상당부분을 지지하게 되는데, 현행 설계에서는 래프

1 정회원, 계명대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ., ohkwon@kmu.ac.kr)

2 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

3 정회원, 계명대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ.)

트의 하중분담을 전혀 고려하지 않고 설계를 실시하므로 비경제적 설계가 이루어진다. 즉, 현재 무리말뚝의 지지력 산정시 래프트의 지지력을 무시하고 말뚝들만의 지지력으로 설계를 실시하고 있다. 그러나 기존의 계측 자료나 연구결과에 의하면, 래프트의 지지력은 20~50%까지 발휘되는 것으로 보고되고 있어(Cooke et al., 1981; Kuwabara, 1989; Yamashita et al., 1993), 현행 무리말뚝의 설계는 과다설계로 볼 수 있다. 그러므로 무리말뚝의 지지력 산정시 래프트의 지지력을 무시하면 실제 지지력을 과소평가하여 비경제적인 설계가 된다. 또한, 상부기초에 의한 지지효과를 고려하는 경우에 상부기초를 얇은 기초로서의 지지력과 무리말뚝의 지지력의 산술적인 합으로만 전체 지지력을 평가하는 것은 무리가 있을 수 있으며, 이는 상부기초인 래프트와 말뚝, 그리고 지반 간에 상호 간섭적인 거동이 발생하기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에 대한 모형실험을 실시하여 래프트의 하중분담률을 평가하였으며, 이를 위하여 모래층의 상대밀도, 말뚝의 배열형태, 말뚝간격, 말뚝길이, 말뚝의 시공방법 등을 변화시켜 모형실험을 수행하였다. 특히 우리나라의 경우 대부분의 말뚝은 토사층을 관통하여 암반층에 근입되므로 이를 모사한 모래-쇄석층의 이층지반 조건과 순수 모래층에서의 래프트 하중분담률을 비교 분석하기 위한 모형실험을 수행하였습니다.

2. 말뚝지지 전면기초의 하중분담률 특성

말뚝지지 전면기초의 하중분담률에 관한 연구는 모형실험, 현장실험, 수치해석, 현장계측 등의 방법으로 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. Poulos(1994)는 수치해석을 통하여 무리말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였으며, 말뚝갯수, 길이 및 직경이 증가하면 래프트의 분담하중이 감소한다고 보고하였다. Yamashita 등(1993)은 수치해석과 대규모실험을 통하여 공사초기에는 래프트가 하중을 많이 분담하지만, 공사가 진행됨에 따라 말뚝의 하중분담이 증가하여 최대 49% 정도로 증가한다고 보고하였다. Chow & Teh(1991)는 수치해석을 통하여 균일한 지반이 이층지반 보다 래프트의 분담하중이 작은 것으로 언급하였다. Cooke 등(1981)은 현장계측을 실시하여 래프트가 공사초기에 45%정도 하중을 분담하지만, 완료시에는 25%정도로 감소한다고 언급하였다. Horikoshi & Randolph(1996)는 점성토 지반에서

원심모형실험을 실시하여 말뚝의 개수와 시공기간 등에 따라 래프트의 하중분담이 변화한다고 보고하였다.

말뚝지지 전면기초의 거동특성에 영향을 미치는 요소는 그림 1과 같이 크게 지반과 말뚝간의 상호작용, 말뚝과 말뚝간의 상호작용, 지반과 래프트의 상호작용, 말뚝과 래프트의 상호작용 등 4가지로 구분할 수 있다(Katzenbach et al., 2000).

Kishida & Meyerhof(1965)에 의하면, 비접촉 무리말뚝 조건의 전체 지지력은 말뚝의 개별적인 항복, 또는 무리말뚝 전체가 하나의 말뚝형태로서 거동하는 형태의 항복하중으로 결정할 수 있고, 말뚝지지 전면기초의 지지력은 비접촉 무리말뚝의 지지력과 래프트의 영향을 고려하여 결정할 수 있는데, 래프트의 영향을 그림 2와 같이 래프트 전체 지지력과 래프트가 말뚝선단 지지력에 미치는 상대하중의 역할로서 고려할 수 있다고 하였다.

이 외에도 Hain & Lee(1978), Yamashita 등(1989), Poulos(1968), Kuwabara(1989), Ottaviani(1975), Vesic(1969) 등이 무리말뚝의 거동 특성에 관한 연구를 수행한 바 있다.

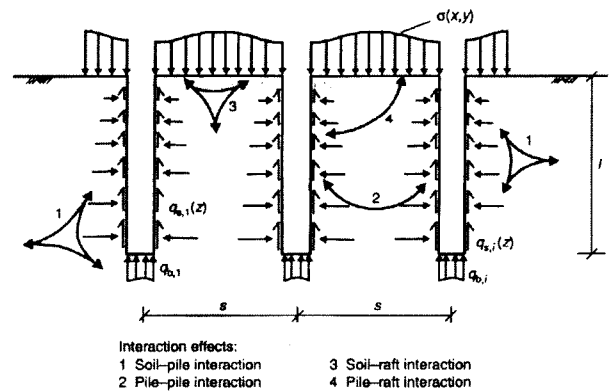


그림 1. 말뚝지지 전면기초의 상호간섭적 거동특성(Katzenbach et al., 2000)

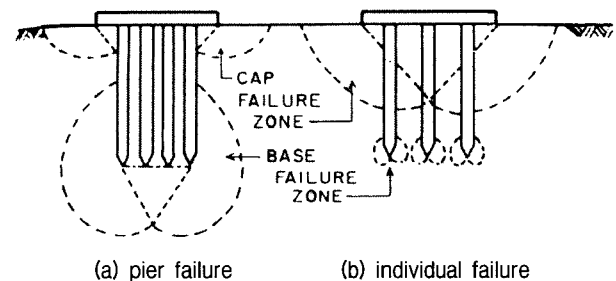


그림 2. 말뚝기초의 파괴영역(Kishida & Meyerhof, 1965)

3. 모형실험장치 및 방법

본 연구에서 수행한 모형실험 중에서 모래-쇄석으로 구성된 이층지반의 단면도는 그림 3과 같으며, 여기에서 토조의 크기는 2,200mm×2,000mm×2,200mm(가로×세로×높이)이다. 실험과정에 따른 지반의 추가응력 발생으로 인한 벽체의 변형을 방지하기 위하여 토조의 벽체는 10mm 두께의 강판으로 제작하였으며, 그림 4와 같이 각 벽체면당 3개의 H-빔을 추가적으로 사용하여 보강하였다. 모형실험에 사용된 강제 말뚝은 직경이 40mm이고, 두께가 3mm이고, 래프트는 Hain & Lee(1978)가 제안한 다음의 식 (1)과 같은 강성계산식에 근거하여 모든 래프트가 강성거동을 할 수 있도록 16mm의 두께로 제작하였다. Hain & Lee(1978)에 의하면 K_r 이 10보다 크면 강성기초로 판단하는데, 상대밀도 76%와 27%인 지반에 놓인 두께 16mm인 3×3배열 래프트의 K_r 은 각각 150과 600이므로 본 연구의 모형실험에 사용된 모든 래프트는 강성거동을 하는 기초로 볼 수 있다. 래프트 끝부분과 최외곽 말뚝중심까지의 거리는 도로교설계기준 해설(대한토목학회, 2001)을 참조하여 1.25D로 제작하였다(그림 5 참조).

$$K_r = \frac{4 \cdot E_r \cdot T_r \cdot B_r \cdot (1 - \nu^2)}{3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot L_r^4} \quad (1)$$

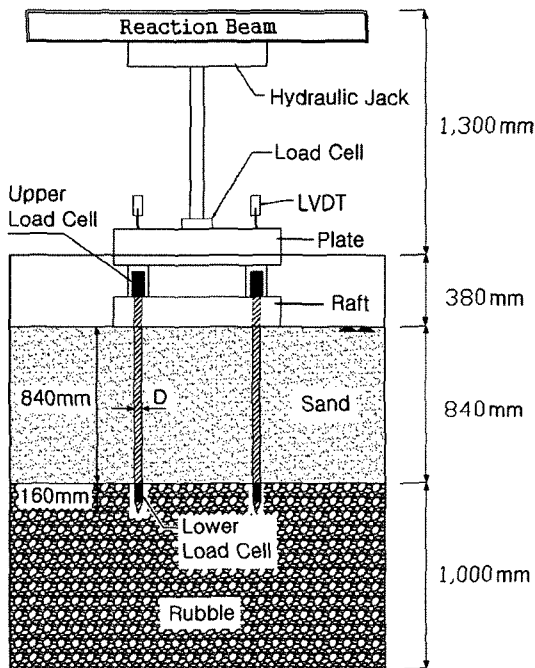


그림 3. 모형실험의 단면도

여기서, E_r : 래프트 탄성계수
 T_r : 래프트 두께
 B_r : 래프트 폭
 L_r : 래프트 길이
 ν : 지반의 포아송비
 E_s : 지반의 탄성계수

그리고 모형지반은 모래로 구성된 단일층 지반과 모래-쇄석으로 구성된 이층지반의 두 종류이다. 모래시료는 경상북도 성주지역의 낙동강에서 채취하여 10번 체를 통과한 시료만을 세척하여 건조시킨 것이며, 쇄석은 10번 체에 남은 시료(직경 2~5mm)만을 세척하여 건조

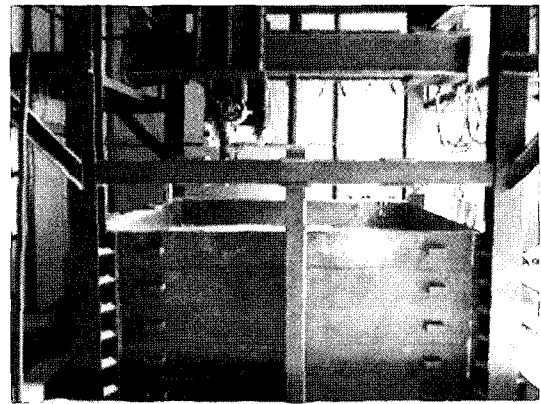


그림 4. 모형토조 모습

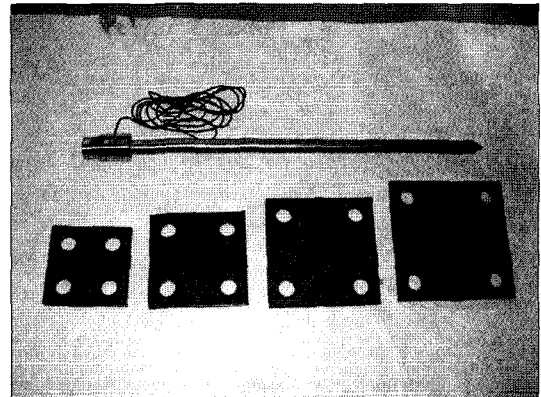


그림 5. 모형말뚝과 래프트

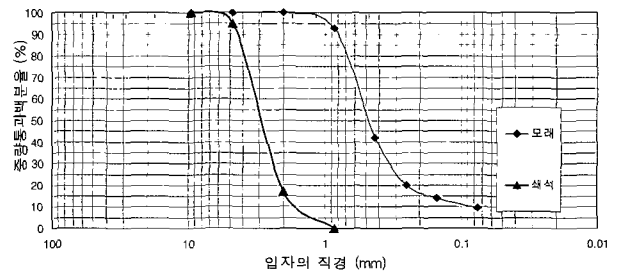


그림 6. 시료의 입도분포곡선

시켜서 사용하였다. 그림 6은 모형실험에 사용된 시료들의 입도곡선분포이며, 시료의 물리적 및 역학적 특성치는 표 1에 나타나 있다. 하부 쇄석층의 지반은 20cm마다 1회 층다짐을 실시하여 높이 1m까지 조성하였고, 느슨한 모래층 지반의 경우 시료를 최대한 지표면에 가까운 거리에서 포설하였고, 보통 지반은 20cm마다 1회 층다짐을 하였고, 조밀한 지반은 10cm마다 2회 층다짐을 실시하였다. 지반조성 시 소형 용기를 토조 내에 미리 설치하여 지반을 조성한 다음, 실험이 끝난 후 해체 시에 소형 용기에 담긴 시료의 무게를 측정하여 모래층의 상대밀도를 측정하였다. 실험에 사용된 모래층의 깊이별 상대밀도는 표 2와 같다.

본 연구에서는 표 3과 같이 지반종류, 말뚝길이, 말뚝배열, 말뚝시공방법, 모래층의 평균상대밀도 등을 변화시킨 모형실험으로부터 래프트의 하중분담률을 결정하였다. 모형실험은 모든 조건에서 2회 반복하여 실시하였다. 말뚝지지 전면기초는 말뚝과 래프트가 하나의 구조체로 거동하므로 모형실험에서도 이와 같은 거동을 할 수 있도록 설정되어야 한다. 따라서, 본 모형실험에서는 말뚝지지 전면기초가 일체로 거동할 수 있도록 말뚝과 래프트의 연결부분을 나사로 고정하였다. 모형실험

에서 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초가 받는 전체 하중은 재하판 상부에 위치한 로드 셀(최대하중 196.2MN)로 측정하였고, 말뚝선단과 말뚝두부에 설치된 로드 셀(최대하중 98.1 MN)로 각 말뚝의 두부하중과 선단하중을 측정하였다. 하중재하시 편심이 발생하지 않도록 재하판을 하중 재하장치의 중앙에 일치시켰으며, 하중재하에 따른 말뚝 및 래프트의 침하를 알기 위해 래프트의 각 모서리에 4개의 LVDT를 설치하여 침하량을 측정하였다. 본 모형실험에서 계측된 데이터들은 데이터 로거(TDS-602)를 이용하여 수집하였으며 데이터들은 10초 간격으로 측정하였다. 그림 7과 그림 8은 각각 2×2와 3×3 배열의 무리말뚝에 대한 하중재하실험 모습을 보여주고 있다.

모형말뚝은 항타식과 압입식으로 시공되었으며, 항타식인 경우 그림 9와 같이 추(무게 147kN)를 50cm 높이에서 낙하하여 말뚝을 설치하였고, 압입식은 그림 10과 같이 유압잭을 이용하여 1,200mm/min의 속도로 말뚝을 압입하여 시공하였다. 말뚝이 쇄석층에 근입되는 깊이는 말뚝직경의 4D가 되도록 설치하였다. 모형실험의 순서는 먼저 래프트가 지반과 떨어진 비접촉 무리말뚝 상태에서 하중재하실험을 실시한 다음, 래프트와 지반이 접촉하는 말뚝지지 전면기초 조건에서 하중재하실험을 실시하였다.

표 1. 시료의 물성치

구분	모래	쇄석
상대밀도	27%, 47%, 76%	-
내부마찰각	34°	43°
$\gamma_d (kN/m^3)$	14.62	14.22
$\gamma_{dmax} (kN/m^3)$	16.09	-
$\gamma_{dmin} (kN/m^3)$	13.54	-
비중	2.63	-
균등계수(c_u)	2.28	1.90
곡률계수(c_c)	1.14	1.03
통일분류법(USCS)	SP	SP

표 3. 모형실험의 조건

구분	내용
지반 종류	단일 지반(모래층), 이층지반(모래+쇄석)
모래층의 평균상대밀도	27%, 47%, 76%
말뚝 배열	2×2, 3×3
말뚝 길이	60cm, 80cm, 100cm
말뚝 간격	12cm, 16cm, 20cm, 24cm
말뚝 시공 방법	항타, 압입

표 2. 모래층의 깊이별 상대밀도

깊이 (cm)	지반조건					
	느슨(loose)		보통(medium)		조밀(dense)	
	$\gamma_d (kN/m^3)$	$D_r (%)$	$\gamma_d (kN/m^3)$	$D_r (%)$	$\gamma_d (kN/m^3)$	$D_r (%)$
-20	14.13	26.1	14.42	38.6	15.47	78.6
-40	14.18	28.3	14.67	48.5	15.34	74.4
-60	14.10	24.8	14.73	51.2	15.63	84.4
-80	14.21	30.2	14.86	56.2	15.37	75.2
-100	14.16	27.6	14.51	42.4	15.20	68.8
평균	14.16	27.4	14.64	47.4	15.40	76.3

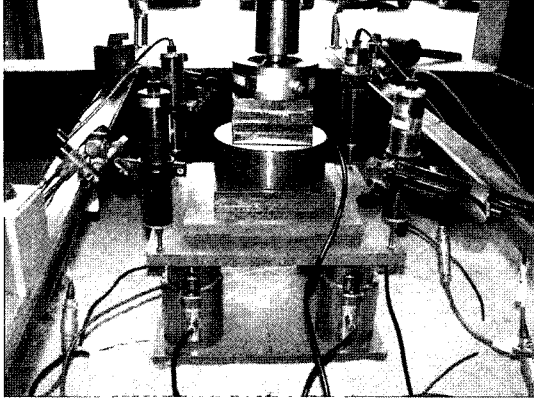


그림 7. 2×2 배열의 모형실험 모습

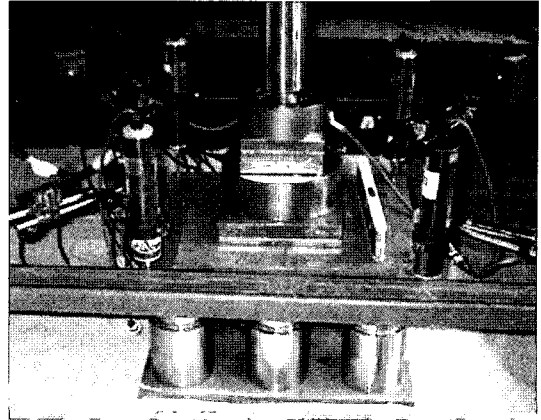


그림 8. 3×3 배열의 모형실험 모습

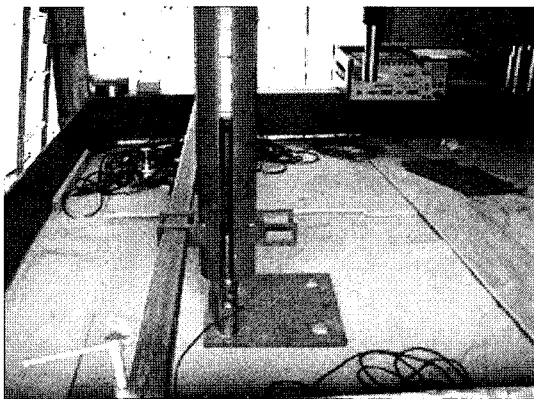


그림 9. 항타식 말뚝설치 모습

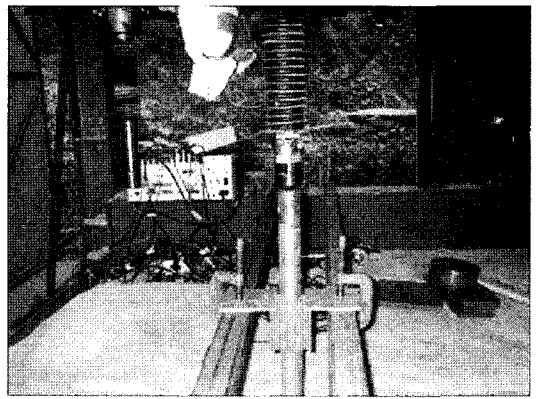


그림 10. 압입식 말뚝설치 모습

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 지반에 말뚝을 설치하여 등속도 재하 방법(0.3mm/min)으로 하중재하실험을 실시하였다. 말뚝길이 100cm, 3×3배열, 상대밀도 47%, 말뚝간격 5D (D : 말뚝직경)의 조건에서 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초에 대한 하중-침하곡선이 그림 11에 나타나 있다. 이 그림으로부터 비접촉 무리말뚝 보다 말뚝지지 전면기초의 하중-침하곡선의 초기 기울기가 가파르고, 지지력도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 말뚝지지 전면기초에서 침하가 작은 경우 대부분의 하중을 말뚝이 지지하지만, 침하가 진행됨에 따라 래프트가 분담하는 하중은 계속 증가한다. 말뚝이 지지하는 하중은 항복하중 이전까지 계속 증가하지만, 항복하중 발생 이후에는 증가율이 매우 완만하게 나타났으며, 래프트의 하중은 항복하중 이후에도 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 단일층과 이중, 항타식과 압입식 방법 사이의 하중-침하 곡선은 유사하게 나타났다. 이러한 결과로부터 말뚝지지 전면기초에 작용하는 하중은 항복하중 이전

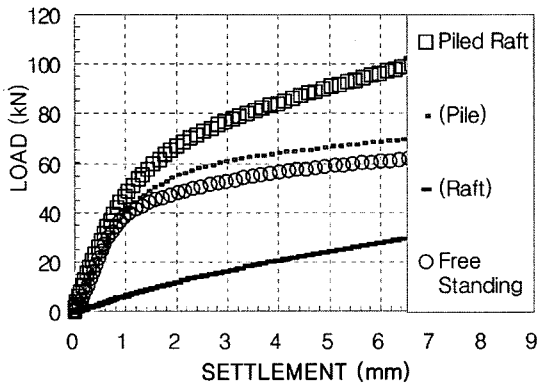
까지 말뚝이 대부분의 하중을 지지하지만, 항복하중 발생 이후부터 래프트가 전체하중의 상당부분을 분담하고 있음을 알 수 있다.

말뚝지지 전면기초에서 래프트가 전체하중의 일부를 분담하는데, 래프트가 지지하는 하중을 전체 하중으로 나눈 값을 래프트의 하중분담률(Load Sharing Ratio)로 정의하였다. 여러 가지 조건에 대한 모형실험으로부터 나타난 래프트 하중분담률의 특징은 다음과 같다.

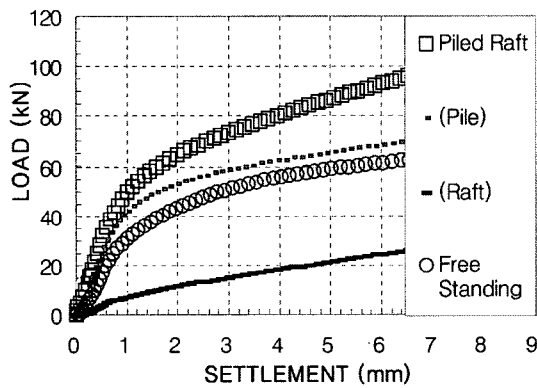
그림 12는 단일 모래층과 이중지반에서의 말뚝간격 비에 따른 래프트 하중분담률을 나타낸 그림이다. 모형 말뚝의 길이는 100cm이고, 모래층의 상대밀도는 47%이며, 말뚝은 압입식으로 시공된 경우이다. 이 그림으로부터 지층종류에 관계없이 말뚝간격이 넓어지면, 래프트의 하중분담률은 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 말뚝간격이 넓어짐에 따라 상대적으로 래프트의 크기가 커지고 래프트가 지반을 구속함에 따른 지반의 조밀화에 따른 것으로 판단된다. 그리고 말뚝선단이 쇄석층에 관입되어 있는 이중지반이나 단일 모래층의 경우 모두 하중분담률은 큰 차이가 없는 것으로

나타났다.

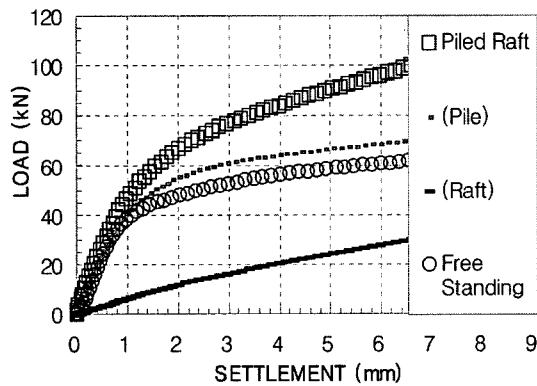
그림 13은 말뚝길이가 100cm이고, 상대밀도가 47%인 단일 모래층 지반에서 말뚝의 시공방법에 따른 래프트의 하중분담률을 나타낸 결과이다. 이 그림으로부터 항타식이나 압입식 시공방법 모두 하중분담률은 큰 차이없이 비슷하게 나타나, 말뚝의 시공방법이 래프트의 하중분담률에 미치는 영향은 거의 미미한 것으로 판단된다. 말뚝간격이 3D이고 3×3 말뚝배열의 경우 압입식 말뚝의 하중분담률이 항타식 말뚝보다 약간 더 작게 나



(a) 단일 모래층 지반에서의 항타식 시공



(b) 단일 모래층 지반에서의 유압식 시공



(c) 모래-쇄석 지반에서의 유압식 시공

그림 11. 모형실험에 의한 하중-침하 곡선

타났고, 말뚝간격 6D인 경우에는 압입식의 하중분담률이 조금 더 크게 나타났다. 말뚝간격이 작은 경우에는 압입식 보다 항타식으로 시공하였을 때 말뚝과 말뚝사이의 좁기 때문에 항타로 인한 지반 교란이 압입식보다 더 크게 일어나서 말뚝이 지지하는 하중이 작게 되어 상대적으로 래프트의 분담률이 크게 나타났으며, 말뚝간격 6D인 경우는 말뚝간격이 넓기 때문에 항타로 인한 교란보다는 말뚝과 말뚝사이의 지반이 더 조밀하게 구속되어 말뚝이 지지하는 하중이 증가하여 상대적으로 래프트의 분담률이 조금 작게 나타난 것으로 사료된다.

그림 14는 길이가 100cm인 말뚝이 항타 시공된 경우 모래층의 상대밀도와 말뚝간격비에 따른 래프트의 하중분담률을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 상대밀도가 작은 모래층의 하중분담률이 상대밀도가 큰 경우보다 대체로 크게 나타났으며, 말뚝간격이 커짐에 따라 약간 크게 나타났다. 래프트의 하중분담률은 지반의 상대밀도와 말뚝간격에 따라 10~23% 정도로 나타났다.

그림 15는 상대밀도가 47%인 단일 모래층에 말뚝이 항타 시공된 경우 말뚝간격비에 따른 래프트의 하중분담률을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 말뚝간격이 넓

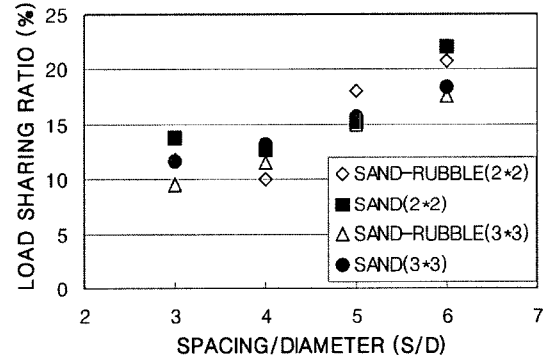


그림 12. 지층종류에 따른 말뚝간격비-하중분담률(L=100cm, $D_r=47\%$, 압입식)

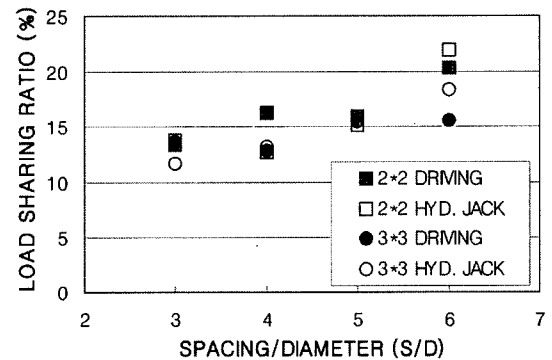


그림 13. 말뚝시공방법에 의한 말뚝간격비-하중분담률(L=100cm, $D_r=47\%$, 단일 모래층)

어짐에 따라 래프트의 하중분담률은 거의 선형적으로 비례하며, 말뚝간격비에 따른 하중분담률은 7~22% 정도로 나타났다.

그림 16은 단일 모래층에 길이가 100cm인 말뚝이 항타 시공된 경우 말뚝간격과 모래층의 상대밀도에 따른 래프트의 하중분담률을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 모래층의 상대밀도가 증가함에 따라 래프트의 하중분담률은 대체로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 전반적으로 상대밀도가 큰 경우보다 작은 경우의 래프트 하중분담률이 크게 나타나는 경향을 보여주고 있으나, 말뚝간격이 3D인 경우에서 상대밀도가 작은 래프트의 하중분담률이 상대밀도가 큰 경우보다 작게 나타났다. 이는 느슨한 지반에서 말뚝간격이 작음으로 인한 래프트의 지반구속효과가 크게 발생하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 또한 상대밀도가 큰 지반의 경우 래프트의 크기가 작더라도 지반이 단단하기 때문에 래프트가 하중을 바로 받을 수 있지만, 상대밀도가 작은 경우는 지반이 느슨하므로 하중이 작용하면 침하가 크게 발생하기 때문에 래프트의 분담률이 작은 것으로 판단된다.

그림 17은 쇄석층위에 상대밀도가 47%인 모래층으

로 구성된 지반에서 압입으로 말뚝이 시공된 경우 말뚝 길이와 간격에 따른 래프트의 하중분담률을 나타내고 있다. 말뚝길이에 따른 하중분담률은 서로 상이하게 나타났다으며, 말뚝간격이 3D인 경우에는 말뚝길이가 길어짐에 따라 하중분담률은 약간 크게 나타났고, 그 이외의 결과는 별다른 경향을 나타내지 못하고 있다.

이상의 결과로부터 말뚝의 시공방법과 지반의 지층은 래프트의 하중분담률에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 단일 모래층 지반에서 래프트의 하중분담률은 상대밀도와 말뚝길이가 증가함에 따라 감소하고, 말뚝간격이 넓어짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 모래-쇄석의 이층지반인 경우에서 말뚝길이가 증가하면 래프트의 하중분담률은 약간 증가하는 경향으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 지층의 종류, 말뚝길이, 말뚝간격, 말뚝배열, 말뚝시공방법 등에 따른 래프트의 하중분담률을 파악하기 위하여 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면

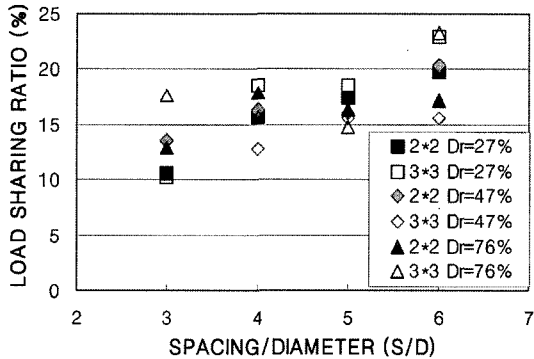


그림 14. 상대밀도에 따른 말뚝간격비-하중분담률(L=100cm, 단일 모래층, 항타식)

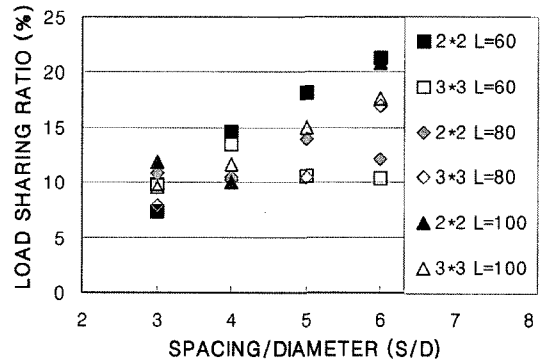


그림 15. 말뚝길이에 따른 말뚝간격비-하중분담률(Dr=47%, 단일 모래층, 항타식)

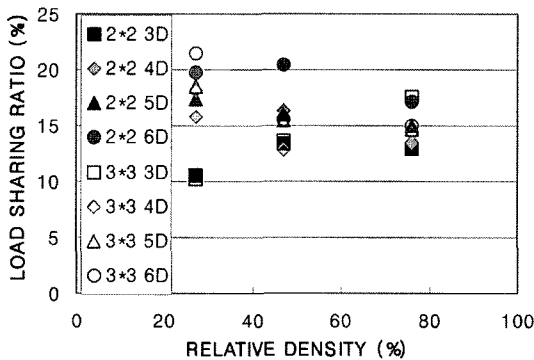


그림 16. 말뚝간격비에 따른 상대밀도-하중분담률(L=100cm, 단일 모래층, 항타식)

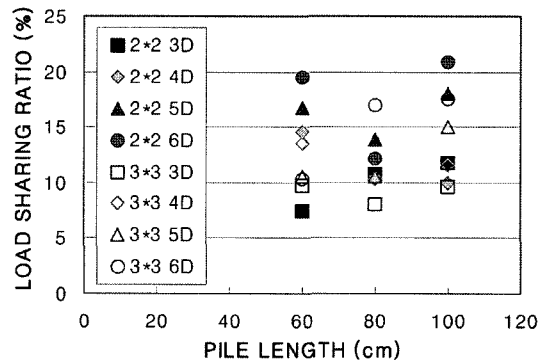


그림 17. 말뚝간격비에 따른 말뚝길이-하중분담률(Dr=47%, 이층지반, 압입식)

기초에 대한 하중재하실험을 실시하였다. 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝시공방법과 지층의 종류에 따른 하중-침하 곡선은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 말뚝지지 전면 기초의 경우 항복하중 이전에는 말뚝이 대부분의 하중을 지지하지만, 항복하중 이후에는 침하에 따른 말뚝의 지지력 증가가 둔화되어 래프트가 상당부분의 하중을 분담하는 것으로 나타났다.
- (2) 모형실험 결과, 항복하중 작용시 래프트의 하중분담률은 모래층의 상대밀도, 말뚝길이, 말뚝간격, 말뚝 배열 등에 따라 다소 차이가 있지만 대체로 8~26%의 범위로 나타났으며, 말뚝의 시공방법과 지층종류의 영향은 크지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 단일 모래층 지반에서 상대밀도와 말뚝길이의 증대에 따라 래프트의 하중분담률은 감소하고, 말뚝간격이 넓어짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 모래-쇄석층의 이층지반에서는 말뚝길이가 증가하면 하중분담률은 약간 증가하는 경향으로 나타났다.
- (4) 본 논문의 결과는 실내 대형 모형실험에 근거한 것이므로 이 결과를 실무에 적용하기 위해서는 현장에서 실물 크기의 말뚝지지 전면기초에 대한 계측 데이터와의 비교 및 분석이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2000년 산학연 공동연구 개발사업(R&D 200001010025)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 대한토목학회 (2001), 도로교 설계기준 해설(하부구조편), 건설정보사.
2. Chow, Y. K. and Teh, C. I. (1991). Pile-cap-pile-group interaction in nonhomogenous soil. *ASCE*, 117(11), 1655-1668.
3. Cooke, R. W., Bryden-Smith, D. W., Gooch, M. N., and Sillett, D. F. (1981), Some observations of the foundation loading and settlement of a multi-storey building on a piled raft foundation in London Clay. *Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1*, 70, 433-460.
4. Hain, S. J. and LEE, I. K. (1978), The analysis of flexible raft-piles systems. *Geotechnique*, 28(1), 65-83.
5. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay. *Geotechnique*, 46(4), 741-752.
6. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000), *Piled raft foundation projects in Germany* (Hemsley, J. A., Ed.). London: Thomas Telford.
7. Kishida, H., & Meyerhof, G. G. (1965), Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. *6th ICSMFE*, 2(4), Montreal, 270-274.
8. Kuwabara, F. (1989), An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil, *Soils and Foundations*, 22(1), 82-92.
9. Ottaviani, M. (1975), Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. *Geotechnique*, 25(2), 15-174.
10. Poulos, H. G. (1968), Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*, 20(18), 449-471.
11. Poulos, H. G. (1994), An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(20), 73-92.
12. Yamashita, K., Kakurai, M., and Matsuyama, K. (1989), Settlement analysis of large-diameter bored pile groups. *12th ICSMFE*, 2(10), Rio De Janeiro, 13-18.
13. Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T., and Kuwabara, F. (1993), Settlement behavior of a five-story building on a piled raft foundation. *Proceeding 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, 3(11), Rotterdam, 351-356.
14. Vesic, A. S. (1969), Experiments with instrumented pile groups in sand. *Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444*, 177-222.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)