

무리말뚝의 하중분담율에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on Load Sharing Ratio of Group Pile

권오균¹⁾, Oh-kyun Kwon, 오세봉²⁾, Se-Bung Oh 김진복³⁾, Jin-Bok Kim, 박종운⁴⁾, Jong-Un Park

¹⁾계명대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng, Keimyung Univ

²⁾영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng, Yeungnam Univ

³⁾계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Keimyung Univ

⁴⁾계명대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Keimyung Univ

SYNOPSIS : 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 the results of this study, it was found that there were no differences of the load-settlement curves, along with 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. And it was also found that the LSR didn't be affected by the pile installation method and the subsoil type. 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.

Key word : Load Sharing Ratio(LSR), piled footing, Piled Raft

1. 서론

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 래프트의 하중분담을 전혀 고려하지 않고 설계를 실시하므로 비경제적 설계가 이루어진다. 즉, 현재 무리말뚝의 지지력 산정시 래프트의 지지력을 무시하고 말뚝들만의 지지력으로 설계를 실시하고 있다. 그러나 기존의 계측자료나 연구결과에 의하면, 래프트의 지지력은 2050%까지 발휘되는 것으로 보고 되고 있어, 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 하중분담율을 평가하였다. 모형실험에서는 지반의 상대밀도, 배열형태, 말뚝간격, 말뚝길이, 말뚝의 시공방법 등을 변화시켰다.

2. Piled raft의 하중분담을 특성

무리말뚝의 하중분담율에 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 1.과 같이 크게 지반과 말뚝간의 상호작용, 말뚝과 말뚝간의 상호작용, 지반과 래프트의 상호작용, 말뚝과 래프트의 상호작용 등 4가지로 구분할 수 있다(Katzenbach et al., 2000). 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.

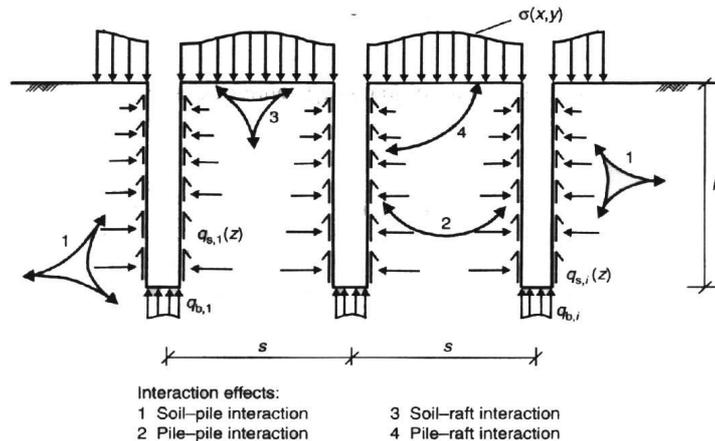


그림 1. 말뚝지지 전면기초의 상호간섭적 거동특성(Katzenbach et al., 2000)

3. 모형실험장치 및 방법

본 연구의 모형실험에 사용된 토조는 2200mm×2000mm×4000mm(가로×세로×높이)의 크기이고, 벽체는 10mm의 강판으로 제작하였다. 모형실험에 사용된 말뚝은 최대 9개이고, 말뚝지경은 40mm, 두께 3mm로 제작하였다. 그리고 래프트는 Hain & Lee(1978)가 제안한 다음의 식(1)과 같은 강성계산식에 근거하여 모든 래프트가 강성거동을 할 수 있도록 16mm의 두께로 제작하였다.

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

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 본 연구에서는 모형지반을 순수한 사질토 지반과 사질토층과 쇄석층으로 구성된 이층지반의 두 종류에 대하여 실험을 실시하였다. 모래시료는 경상북도 성주지역의 낙동강에서 채취하여 10번 체를 통과한 시료만을 세척하여 건조시킨 것이며, 쇄석은 10번 체에 남은 시료(직경: 2-5mm)만을 세척하여 건조시켜 사용하였다. 그림 2.는 모형실험에 사용된 시료들의 입도곡선분포이며, 시료의 물리적 및 역학적 특성치는 표 1.에 나타나 있다.

본 연구에서는 지반 2종류, 말뚝길이 3종류(60cm, 80cm, 100cm), 말뚝배열 2종류(2*2, 3*3), 항타와 압입의 말뚝시공방법, 모래층의 상대밀도 3종류($D_r=27\%$, 47% , 76%) 등의 변화에 대하여 모형실험을 실시하여 래프트의 하중분담율을 결정하였다. 모형실험에서는 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초가 받는 전체 하중을 측정하기 위하여 재하관 상부에 로드셀(20 tonf 용량)을 설치하였고, 말뚝선단과 말뚝두부에 설치된 로드셀을 이용하여 각 말뚝의 두부하중과 선단하중을 측정하였다. 하중재하시 편심이 발생하지 않도록 재하관을 하중 재하장치의 중앙에 일치시켰으며, 하중재하에 따른 말뚝 및 래프트의 침하를 알기 위해 래프트의 각 모서리에 4개의 LVDT를 설치하여 침하량을 측정하였다. 본 모형실험에서 계측된 데이터들은 TDS-602를 이용하여 수집하였으며 데이터들은 10초 간격으로 측정하였다. 그림 3.은 모형실험 단면도, 그림 4.는 하중재하실험 모습을 보여주고 있다.

표 1. 시료의 물성치

	모래	쇄석
상대밀도	47.4%	-
내부마찰각	34°	43°
$\gamma_d (t/m^3)$	1.49	1.45
$\gamma_{dmax} (t/m^3)$	1.64	-
$\gamma_{dmin} (t/m^3)$	1.38	-
비중	2.63	-
균등계수(c_u)	2.28	1.90
곡률계수(c_c)	1.14	1.03
통일분류법	SP	SP

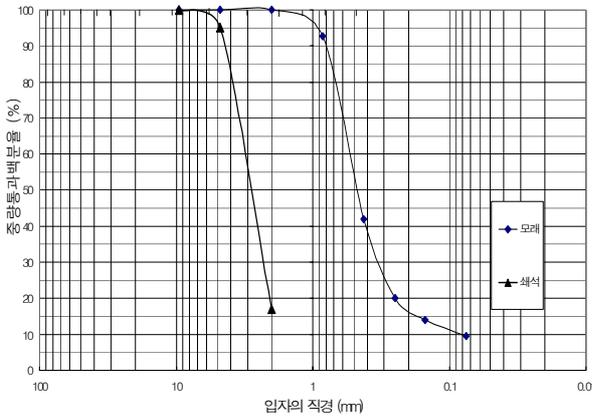


그림 2. 시료의 입도분포곡선

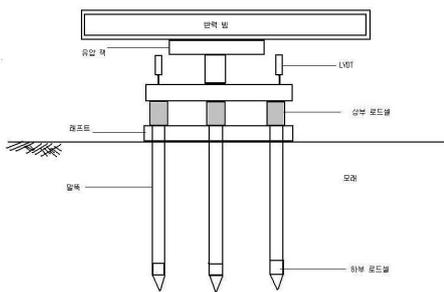


그림 3. 모형실험 단면도

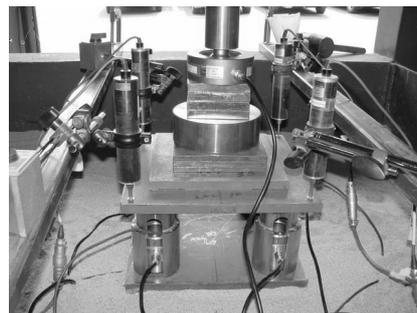


그림 4. 2×2 말뚝에 대한 모형실험

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 지반에 말뚝을 설치하여 등속도 재하방법(0.3mm/min)으로 하중재하실험을 실시하였다. 말뚝길이가 100cm이고, 3×3배열, 말뚝간격 5D(D:말뚝직경)의 조건에서 비접촉 무리말뚝과 말뚝지

지 전면기초에 대한 하중-침하곡선이 그림 5.7.에 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 나타났다. 그리고 단일층과 이층, 항타말뚝과 압입말뚝 사이의 하중-침하 곡선은 유사하게 나타났다. 이러한 결과로부터 말뚝지지 전면기초에 작용하는 하중은 항복하중 이전까지 말뚝이 대부분의 하중을 지지하지만, 항복하중 발생 이후부터 래프트가 전체 하중의 상당부분을 분담하고 있음을 알 수 있다.

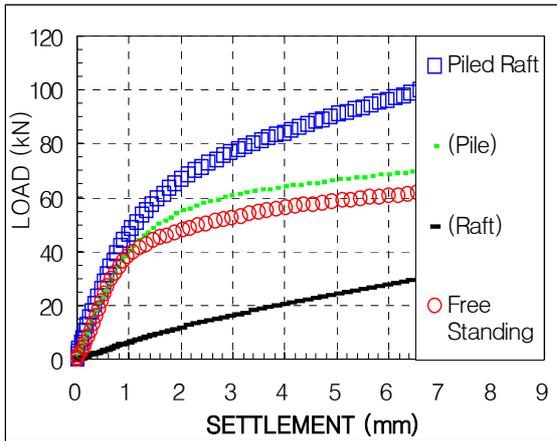


그림 5. 단일지반에서의 항타 시공방법

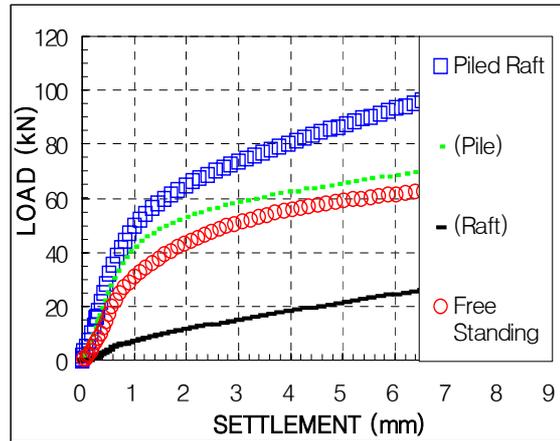


그림 6. 단일지반에서의 유압잭 시공방법

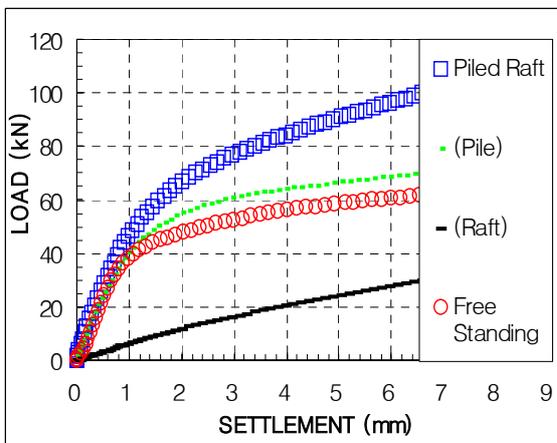


그림 7. 이층지반에서의 유압잭 시공방법

말뚝지지 전면기초에서 래프트가 하중의 일부분을 분담하게 되는데, 래프트의 하중분담율(Load Sharing Ratio)은 래프트의 지지하중을 전체 하중으로 나눈 값이다. 여러 가지 조건을 변화시킨 모형실험으로부터 나타난 래프트의 하중분담율의 특징은 다음과 같다. 그림 8.은 단일 모래층과 이층지반에서의 말뚝간격비에 따른 래프트 하중분담율을 보여주고 있다. 모형말뚝의 길이는 100cm이고, 모래층의 상대밀도는 47%이며, 말뚝은 유압잭을 이용한 압입방법으로 시공된 경우이다. 이 그림으로부터 지층종류에 관계없이 말뚝간격이 넓어지면 래프트의 하중분담율은 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 말뚝선단이 쇄석층에 관입되어 있는 경우나 모형지반이 단일 모래층의 경우 모두 하중분담율은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

그림 9.는 단일 모래층에서 말뚝길이 100cm이고, 상대밀도가 47%인 지반에서 하중재하실험을 실시

하여 말뚝의 시공방법에 따른 하중분담율을 나타낸 결과이다. 말뚝의 시공방법에 따른 결과로부터 항타식이나 압입식에 관계없이 하중분담율은 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 말뚝의 시공방법의 차이가 하중분담율에 미치는 영향은 거의 미미한 것으로 보인다.

그림 10.은 말뚝길이가 100cm이고, 항타로 말뚝이 시공된 경우 각 지반의 상대밀도에에서 말뚝간격비에 따른 래프트의 하중분담율을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 상대밀도가 작은 모래층의 하중분담율이 상대밀도가 큰 경우보다 대체로 크게 나타났으며, 래프트의 하중분담율은 지반의 상대밀도와 말뚝간격에 따라 1023% 정도로 나타났다.

그림 11.은 상대밀도가 47%인 단일 모래층에서 항타로 말뚝이 시공된 경우 말뚝간격비에 따른 래프트의 하중분담율을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 말뚝간격이 커짐에 따라 래프트의 하중분담율이 크게 나타났으며, 말뚝간격비에 따라 하중분담율은 7~22% 정도로 나타났다.

그림 12.는 말뚝길이가 100cm이고 단일 모래층에서 항타로 말뚝이 시공된 경우 말뚝간격과 모래층의 상대밀도에 따른 래프트의 하중분담율을 나타내고 있다. 모래층의 상대밀도의 증가에 따라 래프트의 하중분담율은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그림 13.은 상대밀도가 47%인 모래층 아래에 쇄석층이 있는 지반에서 압입으로 말뚝이 시공된 경우 말뚝길이와 간격에 따른 래프트의 하중분담율을 나타내고 있다. 대체로 말뚝의 길이가 길어지면 래프트의 하중분담율은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

이상의 결과로부터 말뚝의 시공방법과 지반의 지층은 래프트의 하중분담율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 단일층의 모래지반에서 래프트의 하중분담율은 상대밀도의 증가와 말뚝길이의 증가하면 감소하고, 말뚝간격이 넓어짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이층지반인 경우 말뚝길이가 증가하면 하중분담율은 약간 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

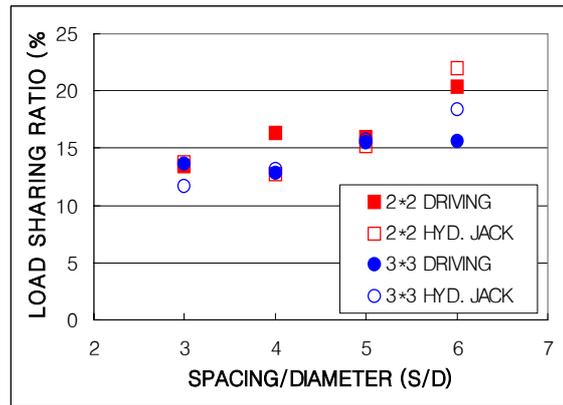
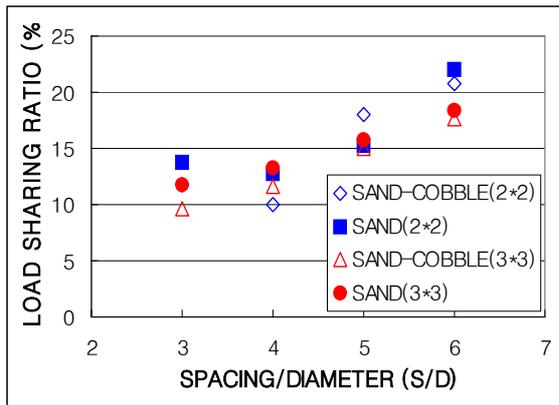


그림 8. 지층종류에 따른 말뚝간격비-하중분담율

그림 9. 말뚝시공방법에 의한 말뚝간격비-하중분담율

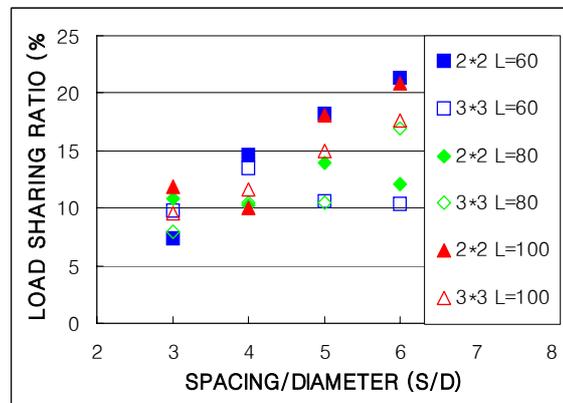
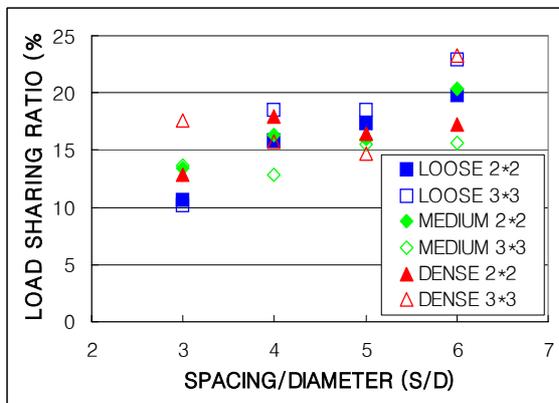


그림 10. 상대밀도에 따른 말뚝간격비-하중분담율

그림 11. 말뚝길이에 따른 말뚝간격비-하중분담율

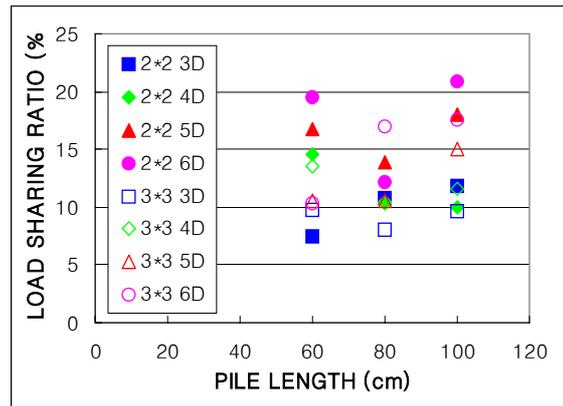
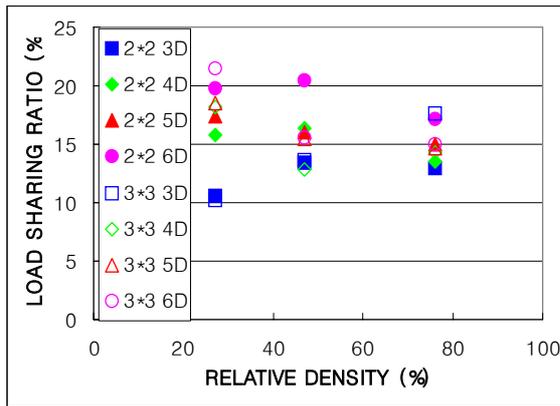


그림 12. 말뚝간격비에 따른 상대밀도-하중분담율 그림 13. 말뚝간격비에 따른 말뚝길이-하중분담율

5. 결론

본 연구에서는 지층의 종류, 말뚝길이, 말뚝간격, 말뚝배열, 말뚝시공방법 등에 따른 래프트의 하중분담율을 파악하기 위하여 비접촉 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초에 대한 하중재하실험을 실시하였다. 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 말뚝시공방법과 지층의 종류에 따른 하중-침하 곡선은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 말뚝지지 전면기초의 경우 항복하중 이전에는 말뚝이 대부분의 하중을 지지하지만, 항복하중 이후에는 침하에 따른 말뚝의 지지력 증가가 둔화되어 래프트가 상당부분의 하중을 분담하는 것으로 나타났다.
2. 모형실험 결과, 래프트의 하중분담율은 말뚝의 시공방법과 지층종류의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 단일층의 모래지반에서 래프트의 하중분담율은 상대밀도의 증가와 말뚝길이의 증가하면 분담율은 감소하고, 말뚝간격이 넓어짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이층지반인 경우 말뚝길이가 증가하면 하중분담율은 약간 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 대한토목학회 (2001), **도로교 설계기준 해설(하부구조편)**, 건설정보사.
2. 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.
3. Horikoshi, K., and Randolph, M. F. (1996). Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay. *Geotechnique*, 46(4), 741-752.
4. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000). *Piled raft foundation projects in Germany* (Hemsley, J. A., Ed.). London: Thomas Telford.
5. Kuwabara, F. (1989). An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil, *Soils and Foundations*, 22(1), 82-92.
6. 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.
7. 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.
8. Vesic, A. S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. *Performance of Deep Foundations*, ASTM STP 444, 177-222.