

원심모형시험을 통한 Piled Raft 기초의 지지력증가 특성 분석

Analysis of Piled Raft Bearing Capacity Increase with Centrifuge Test

박 동 규¹ Park, Dong-Gyu

최 규 진² Choi, Kyu-Jin

김 동 욱³ Kim, Dong-Wook

정 문 경⁴ Chung, Moon-Kyung

이 준 환⁵ Lee, Jun-Hwan

Abstract

In the conventional design of a piled raft, the axial resistance offered by the raft itself is typically neglected and only that of the group pile is accounted in estimating the total axial resistance of the piled raft. As a consequence, piled rafts are usually designed conservatively by neglecting the raft resistance. In this study, a series of centrifuge model tests have been performed to compare the axial behavior of a group pile with that of a piled raft (both having 16 component piles with an array of 4×4) in sands with different relative densities and in clays with different preconsolidated pressures. The test results revealed that, with respect to the allowable settlement of 25 millimeters for bridge foundations, the piled raft resistances were greater than those of the group pile by 13% for dense sand, by 22% for loose sand, by 30% for stiff clay, and by 22% for soft clay. Furthermore, the ratio of piled raft resistance to group pile resistance increased as the settlement increased.

요 지

말뚝지지 전면기초는 무리말뚝 기초뿐만 아니라 전면기초까지도 연직력에 대하여 효과적으로 저항하기 때문에 지지력의 증가, 부등침하의 감소, 전체 침하량 억제 등의 장점이 있어 경제적인 기초형식으로 간주될 수 있다. 그러나 실제 말뚝지지 전면기초의 설계 및 설계 기준에 있어 전면기초의 지지력을 고려하고 있지 않기 때문에 전면 기초에 의한 지지력 증가 및 침하량 억제 효과는 고려되지 못하는 실정이다. 본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 분석하고 전면기초에 의한 지지력 증대효과를 정량화하기 위하여 원심모형시험을 수행하였다. 이를 위해 말뚝지지 전면기초, 무리말뚝기초, 전면기초, 단독 말뚝기초 등 각 기초형식에 대해 별도의 실험을 수행하였으며, 말뚝지지 전면기초의 지지력 특성 변화를 분석하고 다른 기초형식의 지지력 특성변화 분석 결과와 비교하였다.

Keywords : Piled raft, Group pile, Bearing capacity, Settlement, Centrifuge test

1 정희원, 연세대학교 토목환경 공학과 박사과정 (Ph.D candidate, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목환경 공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ.)

3 정희원, 한국건설기술연구원, 박사후 연구원 (Post-Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea institute of construction technology)

4 정희원, 한국건설기술연구원, 연구위원 (Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea institute of construction technology)

5 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Professor, School of Civil and Environmental Eng, Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-5796, Fax: +82-2-364-5300, Junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

대규모 구조물의 기초형식으로 적용되고 있는 말뚝 지지 전면기초는 무리말뚝 기초와 전면기초(말뚝 캡)의 지지력을 함께 활용할 수 있는 경제적인 기초형식이다. 그러나 말뚝지지 전면기초의 설계에 있어 전면기초에 의한 지지력은 고려되지 않은 무리말뚝기초만의 지지력으로써 설계가 적용되고 있으며, 전면기초로부터 발현되는 지지력 증가, 부동침하의 감소 및 전체 구조물의 침하량 억제효과 등의 말뚝지지 전면기초의 장점이 충분히 반영되지 않은 설계가 이루어지고 있다(Poulos, 2001). 이는 각각 다른 지지력 메커니즘을 갖는 무리말뚝기초와 전면기초가 함께 설치되는 말뚝지지 전면기초의 구조적특성에 의한 전면기초(말뚝 캡) 하중분담효과 및 상부구조물 허용침하량 기준에서의 무리말뚝기초와 전면기초의 거동특성 예측의 어려움에 기인한다.

국내에서도 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 규명하기 위하여 실험적, 해석적, 근사적 해석 기법 등을 적용한 많은 연구가 수행되었다. Kim 등(1999)은 말뚝지지 전면기초의 거동 특성 분석에 있어 판으로 이루어진 전면기초와 스프링지지력으로 말뚝지지 전면기초를 묘사한 근사적 해석기법을 적용하여 복합거동을 분석하였으며, Kim 등(2000)은 유전자 알고리즘을 적용하여 말뚝지지 전면기초의 지지력특성을 규명하였다. 또한 말뚝지지 전면기초의 모형토조 실험 및 현장재하실험을 기반으로 말뚝지지 전면기초의 극한지지력, 하중분담특성 및 전반적인 거동특성에 대한 연구가 수행되었으며(Lee et al., 2000; Kim et al., 2002, Lee and Chung. 2003; Lee et al., 2003; Kwon et al., 2005), 말뚝지지 전면기초-지반의 경계조건을 적용한 3차원 유한요소 해석을 통하여 점성토지반에서 말뚝지지 전면기초 상호작용, 무리말뚝기초의 지지력특성 및 하중분담효과에 대한 연구가 수행되었다(Lee and Jeong, 2007). Park 등(2009)은 원심모형실험을 적용하여 실제규모에서의 말뚝지지 전면기초의 하중분담특성에 대한 연구를 수행하였으며, 유한요소해석을 통하여 과압밀 점성토지반에서의 설계기법을 개발하였다. 그러나 많은 부분의 연구들이 극한 지지력과 하중분담특성에 연구의 주안점을 두고 있어, 기초형식, 지반조건을 반영한 실제규모에서의 말뚝지지 전면기초의 거동특성과 함께 실질적인 설계 기준으로 적용되는 허용침하량 범위 내에서의 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증대효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초 거동특성 및 전면기초에 의한 지지력 증대효과를 분석하기 위하여 원심 모형시험을 수행하였으며, 동일한 지반조건을 적용한 전면기초, 무리말뚝기초, 말뚝지지 전면기초의 실험을 수행하여 무리말뚝기초 대비 말뚝지지 전면기초의 지지력 증가특성 및 기초형식에 따른 거동특성을 분석하였다. 또한 사질토지반과 점성토지반을 함께 실험지반으로 적용하여 다른 지반조건에서의 말뚝지지 전면기초의 거동특성 변화와 함께 지반조건에 따른 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가특성을 분석하고자 하였다.

2. 말뚝지지 전면기초의 거동 특성

2.1 말뚝지지 전면기초 개요

말뚝지지 전면기초는 세 가지 역학적 요소 (전면기초, 말뚝기초, 지반특성의 상호작용과 개별적인 지지력 요소들의 거동특성)에 의해 전반적인 하중-침하 특성이 결정되며, 기존 연구(Poulos, 2001; Randolph, 1994; Randolph and Wroth, 1978; Katzenbach et al., 2000)에서 이들의 상호작용을 반영시켜 무리말뚝기초와 전면기초의 하중분담 특성에 대하여 분석하였다. 말뚝지지 전면기초는 Figure 1과 같이 무리말뚝기초와 전면기초의 지지력의 합으로써 전체 지지력을 산정할 수 있으며, 각각의 무리말뚝-지반-무리말뚝, 무리말뚝-지반-전면기초 사이의 상호작용으로 인해 각각의 기초요소에서의 지지력 특성이 변화하게 된다(Liu et al., 1985).

Poulos(2001)는 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산정에 있어 각각의 개별적인 무리말뚝기초의 극한 지지력과 말뚝 캡 부분에 의해 지지되는 전면기초의 극한지

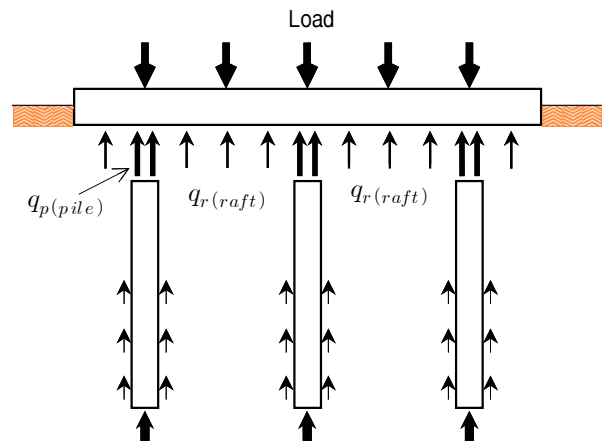


Fig. 1. Piled raft interaction (Katzenbach et al., 2000)

지력의 단순 합산을 통하여 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산정법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$Q_{PR,ult} = Q_{UR,ult} + Q_{G,ult} \quad (1)$$

여기서, $Q_{PR,ult}$ 는 말뚝지지 전면기초의 극한지지력, $Q_{UR,ult}$ 는 무리말뚝 기초의 말뚝 캡(전면기초)에 의해 지지되는 극한 지지력, $Q_{G,ult}$ 는 무리말뚝기초의 극한 지지력이다.

Figure 2는 단순화된 말뚝지지 전면기초의 하중 침하 그래프로서 말뚝기초와 전면기초(말뚝 캡)의 극한지지력과 침하량에 따른 지지력특성 변화를 기준으로 거동 특성을 나타내고 있다(Poulos, 2001). 초기 재하하중부터 점(A)의 P_1 까지는 말뚝기초, 전면기초 모두 극한지지력에 도달하지 않은 탄성침하 영역으로 말뚝지지 전면기초 지지력의 많은 부분을 말뚝기초가 분담한다. 하중이 점(A)에 근접하면 말뚝기초는 극한지지력에 도달하게 되며, 이후의 영역에서는 전면기초의 하중분담효과가 크게 작용하기 시작한다. 이 구간에서의 말뚝지지 전면기초는 전면기초의 하중-침하 특성을 나타내게 되며, 재하 하중의 증가에 따라 상대적으로 큰 침하량이 발생하게 된다. 전면기초의 지지력 메커니즘에 따르면 상당한 침하량(예: 전면기초 폭 B의 10%)이 발생할 경우 전면기초가 극한지지력이 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서와 같이 허용침하량 내에서의 말뚝지지 전면기초의 지지력과 전면기초에 의한 지지력 증대효과를 분석하려고 할 경우, ‘무리말뚝기초의 극한 지지력 $Q_{G,ult}$ ’과 ‘전면기초의 극한지지력 $Q_{UR,ult}$ ’의 합으로 말뚝지지 전

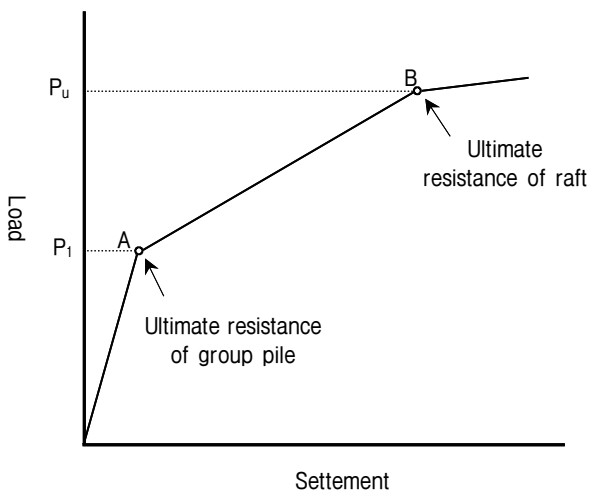


Fig. 2. Simplified piled raft load-settlement curve

면기초의 지지력을 예측하는 식 (1)의 사용은 합리적이지 않다.

2.2 사질토지반에서의 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산정

Liu et al.(1985)은 총 51개의 무리말뚝과 23개의 단독말뚝 현장시험을 통하여 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 분석하였으며, 이를 토대로 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡(전면기초)과 말뚝기초의 주변마찰력, 선단 지지력 등의 상호작용을 규명하였다. 또한 대규모의 무리말뚝과 단독말뚝의 현장시험결과, 무리말뚝효과, 말뚝지지 전면기초에서 전면기초에 의한 지반-말뚝의 상호작용을 고려한 설계 방법을 제안하였으며 각각의 개별적인 요소의 합을 통하여 말뚝지지 전면기초의 극한지지력을 산정하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$P_u = P_{su} + P_{pu} + P_c = \eta_s n Q_{su1} + \eta_p n Q_{pu1} + P_c \quad (2)$$

여기서 P_{su} , P_{pu} , P_c 는 각각 말뚝지지 전면기초의 무리말뚝 주변마찰력, 선단 지지력, 전면기초(말뚝기초 캡)의 지지력을 나타내며, 결과적으로 말뚝지지 전면기초의 극한지지력을 식 (2)와 같이 단말뚝 기초의 주변마찰력(Q_{su1}), 선단지지력(Q_{pu1}), 무리말뚝의 말뚝 개수(n), 각각의 주변마찰력과 선단지지력의 말뚝지지 전면기초 상호작용계수(η_s 과 η_p)의 조합으로 제안하였다.

Lee 등(2000), Lee와 Chung(2003)는 4×4 행렬의 말뚝 배열을 가지는 말뚝지지 전면기초의 모형시험을 통하여 말뚝지지 전면기초의 지반-전면기초-무리말뚝의 상호작용에 대해 규명하였으며 각각의 요소에 대한 상호작용 계수를 통하여 식 (3)과 같이 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 산정법을 제안하였다.

$$P_g = n_c (\eta_{1sc} \eta_{2sc} \eta_{3sc} P_{ss} + \eta_{1pc} \eta_{2pc} \eta_{3pc} P_{sp}) + n_e (\eta_{1sc} \eta_{2sc} \eta_{3sc} P_{ss} + \eta_{1pc} \eta_{2pc} \eta_{3pc} P_{sp}) + \eta_4 P_c \quad (3)$$

여기서, n_c 와 n_e 는 각각 중앙부 말뚝과 외곽부 말뚝의 개수, η_{isc} , η_{ipc} , η_{ise} , η_{ipe} ($i=1, 2, 3$)는 말뚝 위치에 따른 말뚝-지반과 지반-전면기초-말뚝의 상호작용을 고려하는 주변마찰력과 선단지지력에 대한 영향계수[자세한 계수 설명은 Lee와 Chung(2003) 참조], η_4 는 지지 전면

기초의 지반-전면기초-말뚝 상호작용을 고려하는 영향 계수, P_{ss} 와 P_{sp} 는 무리말뚝과 동일한 지반조건에 설치된 단말뚝 기초의 설계 침하량에서의 주면마찰력과 선단지지력, P_c 는 캡과 동일한 크기의 전면기초의 설계침하량에서의 지지력이다.

그러나 최근의 말뚝지지 전면기초 연구사례에 의하면 동일한 크기의 전면기초(말뚝 캡)에서도 무리말뚝의 간격과 개수 침하량 기준에 따라 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증대효과는 다르게 나타나고 있으며(Fioravante and Giretti, 2010), 식 (3)에서와 같이 지반조건 및 무리말뚝 기초의 거동특성을 고려하지 않은 일정한 계수로써 전면기초(말뚝 캡)의 지지력 증대효과를 반영하기에는 많은 제한점들이 존재한다.

2.3 점성토지반에서의 극한지지력과 하중분담율

Borel(2001)은 Poulos(2001)의 기존의 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 산정법을 수정하여 무리말뚝 기초에 의한 극한 지지력과 전면기초에 의한 극한 지지력에 식 (4)와 같이 영향계수를 도입함으로써 수정된 극한 지지력 산정법을 제안하였다.

$$Q_{PR,ult} = \alpha_{UR} \cdot Q_{UR,ult} + \alpha_G \cdot Q_{G,ult} \quad (4)$$

여기서, $Q_{PR,ult}$ 는 말뚝지지 전면기초의 극한지지력, $Q_{UR,ult}$ 는 무리말뚝 기초의 말뚝 캡(전면기초)에 의해 지지되는 극한 지지력, $Q_{G,ult}$ 는 무리말뚝기초의 극한 지지력, α_{UR} 과 α_G 는 각각 말뚝지지 전면기초에서의 전면기초(무리말뚝 캡)와 무리말뚝 기초의 극한지지력 영향계수이다.

일반적으로, 말뚝지지 전면기초의 침하가 증가하면 말뚝지지 전면기초가 극한지지력($Q_{PR,ult}$)에 도달하기 전에 무리말뚝의 극한지지력($Q_{G,ult}$)이 발현되기 때문에 말뚝지지 전면기초의 극한지지력을 예측함에 있어 α_G 는 1로 가정할 수 있다(Sanctis and Mandolini, 2006). 반면에, 말뚝지지 전면기초의 극한지지력은 전면기초가 극한지지력($Q_{UR,ult}$)에 이르기 전에 발현되기 때문에 일반적으로 α_{UR} 는 1보다 적은 값을 가진다. Sanctis and Mandolini(2006)는 기존에 수행된 시험결과 분석과 다양한 해석적 연구를 통하여 정사각형 형상을 가지는 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산정법을 제안하였다.

그의 연구에 따르면 전면기초(무리말뚝 캡)의 극한지지력 하중분담율(α_{UR})은 무리말뚝에 적용된 개별말뚝 개수(n)와 직경(d), 개별말뚝 사이의 간격(s), 무리말뚝의 말뚝 캡 부분(전면기초)의 넓이(A)의 함수이며 다음의 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_{UR} = 1 - 3[A_G/A/(s/d)] \quad (5)$$

여기서, A_G 는 무리말뚝의 최외곽 말뚝 중심을 이은 선으로 형성되는 정사각형의 단면적이며 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$A_G = [(\sqrt{n} - 1)s]^2 \quad (6)$$

3. 말뚝지지 전면기초 원심모형실험

3.1 원심모형실험 개요

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초 거동특성과 함께 전면기초에 의한 지지력 증대효과를 분석하기 위하여 말뚝지지 전면기초에 대한 원심모형 재하시험을 수행하였다. 실험에 적용한 모형기초는 국내 교량기초에서 자주 적용되는 PHC 무리말뚝기초를 대상으로 하였으며, Table 1에 나타난 원심모형시험 상사비를 고려하여 원심모형실험을 계획하였다. 이를 위해 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터 내의 원심모형시험기를 활용하였으며 말뚝지지 전면기초, 무리말뚝기초, 전면기초 및 단독말뚝기초 등 다양한 기초형식을 대상으로 실험을 실시하였다. 또한 조밀한 사질토지반, 느슨한 사질토지반, 단단한 점성토지반, 연약한 점성토지반에 대하여 원심모형시험을 수행하여 지반조건에 따른 말뚝지지 전면기초의 거동특성과 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가효과를 규명하고자 하였으며, 자세한 지반조건과 실험조건은 Table 2와 같다.

지반조건, 지반조성, 모형기초 제작과 실험 조건 등의 결정에 있어 Table 1과 같이 원심모형시험의 역학적 상사비를 반영하였으며, 원심모형시험의 실제 적용 가속도인 60G 기준에서의 물리량 변화를 기준으로 다양한 조건들을 반영하였다. 원심모형시험의 하중재하 시험결과 해석에 있어서도 모형기초 재하시험을 통해 산출된 실험데이터를 Table 1의 역학적 상사비를 통하여 실

제규모에서의 물리량으로 역환산하여 거동특성을 분석하였다. 각각의 모형기초는 알루미늄 합금(Aluminum alloy)을 적용하여 제작하였으며, 단독 말뚝기초 및 무리말뚝 기초는 외경 10mm, 내경 8mm, 길이 25cm의 중공관으로 이루어진 폐단말뚝으로 제작하여 60G의 실험 조건에서 길이 15m, 외경 600mm, 두께 90mm의 PHC 말뚝기초의 특성이 실험에 반영되도록 하였다. 또한 알루미늄 모형말뚝기초 제작에 있어 주면거칠기에 따른 지지력변화를 최소화하기 위해, 길이방향 직각으로 그라인딩 연삭작업을 수행하여 미세한 요철이 발생하도록 하였다. 전면기초와 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡, 무리말뚝기초 말뚝 캡은 15cm×15cm의 정사각형으로 제작하여 원심모형시험 가속도 60G 실험조건에서 9m×9m의 정사각형 전면기초, 말뚝 캡의 거동특성을 반영하였다. 또한 전면기초 및 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡은 원심모형시험 조건에서 강성기초의 거동특성을 반영할 수 있도록 충분한 두께(2cm)를 적용하였다. 무리말뚝기초와 말뚝지지 전면기초의 제작에 있어 무리말뚝 기초

와 전면기초의 일체화된 거동특성을 반영하기 위하여 모형말뚝기초와 전면기초를 결합하는 방법을 적용하여 4×4 PHC 무리말뚝기초, 4×4 PHC 말뚝지지 전면기초 모형기초를 제작하였다.

3.2 사질토 및 점성토를 이용한 모형지반 조성

본 연구에서 다양한 지반조건에서의 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석하기 위하여 점성토지반과 사질토지반을 각각 조성하였다. 사질토지반의 조성을 위하여 Figure 3과 같이 이동식 강사장치를 활용하였으며 목표 상대밀도에 따라 강사량과 강사 높이를 조절하여 대상 지반을 조성하는 방법을 적용하였다. 모형지반 조성에 있어 깊이방향에 따른 균질성을 확보하기 위하여 0.5cm~1.0cm 정도의 얇은 층을 반복적으로 강사하여 실험 토층을 조성하였으며 강사장치 한 번의 이동으로 형성되는 지반의 층의 두께 만큼 강사장치의 높이를 높이도록 설정하여 균질한 모형지반이 조성되도록 하였다(Figure

Table 1. Similarity relationships at centrifuge test

Quantity	Scaling Factor	Quantity	Scaling Factor
Stress	1	Force	1/N ²
Mass density	1	Volume	1/N ³
Length	1/N	Time(Diffusion)	1/N ²
Acceleration	N	Energy Density	1
Strain	1	Frequency	N

Table 2. Main characteristics of the performed tests

Test no	Test name	soil condition	Test no	Test name	soil condition
1	Single pile(PHC, D=600mm, L=15m)	Dense sand	5	Group pile (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Dense sand
2	Single pile(PHC, D=600mm, L=15m)	Loose sand	6	Group pile (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Loose sand
3	Single pile(PHC, D=600mm, L=15m)	Stiff clay	7	Group pile (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Stiff clay
4	Single pile(PHC, D=600mm, L=15m)	Soft clay	8	Group pile (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Soft clay
5	Raft(9m×9m)	Dense sand	11	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Dense sand
6	Raft(9m×9m)	Loose sand	12	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Loose sand
7	Raft(9m×9m)	Stiff clay	11	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Stiff clay
8	Raft(9m×9m)	Soft clay	12	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Soft clay

참고: Dense sand: relative density 74% / Loose sand: relative density 42%

Stiff clay: pre-consolation loading 300kPa / Soft clay: pre-consolation loading 50kPa

3(a)). 그 결과 조밀한 사질토지반은 상대밀도가 74%였으며 느슨한 사질토지반은 상대밀도를 42%인 것이 확인되었다.

원심모형시험에 적용된 모형지반 토조는 직경 900mm, 높이 400mm의 원형으로써 실험에 적용된 중력가속도 60G 조건에서 Table 2의 원심모형실험 상사비를 통하여 각각 직경 54m, 깊이 24m의 균질한 사질토지반으로 실험에 반영되도록 하였다. 사질토지반에 적용된 규사질 모래의 기본 물성치는 최대건조단위중량 $\gamma_{d,max} = 16.12kN/m^3$, 최소건조단위중량 $\gamma_{d,min} = 12.19kN/m^3$, 평균 입도 $D_{50} = 0.21mm$, 균등계수 $C_u = 1.96$, 200번체 통과량은 1%, 한계상태 내부마찰각 $\phi_c = 33^\circ$ 이다.

점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 분석하기 위해 모형 점성토지반을 조성하였으며, 분말 상태의 카올리나이트(Kaolinite)에 일정한 양의 물을 첨가하는 방법을 적용하여 동일한 성분의 점성토지반이 실험에 적용되도록 하였다. 점성토 실험지반은 단단한 점성토지반과 연약한 점성토지반으로 조성되었으며, 일정한 함수비(120%)의 카올리나이트(Kaolinite) 슬러리를 조성한 후 선행압밀하중을 다르게 적용시켜 각각 단단한 점성토지반(선행압밀하중: 300kPa), 연약한 점성토지반(선행압밀하중: 50kPa) 조건을 실험에 적용하였다. Figure 3(b)는 점토 교반기(Clay mixer)를 활용하여 점토슬러리(Slurry)를 조성하는 모습이며, 진공(Vacuum) 장치를 활용하여 점토 슬러리 조성 시 카올리나이트 분말 사이의 공기가 강제로 배출시켜 완전 포화된 상태의 점성토지반을 구현하였다. 슬러리 상태의 점토지반은 일축압밀기를 사용하여 선행압밀하중을 제하하였으며, 압밀하중은 점차적으로 증가시켜 압밀에 따른 지반교란이 발생하지 않도록 하였다. 또한 원형토조 밀면엔 모래배수층을 포설하였으며, 슬러리지반의 옆면, 윗면, 아랫면에 모두 배수재를 설치하여 양방향 배수가 이루어지도록 하였다. 점성토지반의 조성을 위해 총 4일 동안 선행압밀하중을 제하하였으며, 각각의 하중조건에서 압밀침하량이 발생하지 않는 것을 확인한 후 원심모형실험을 수행하였다. 조성된 점성토지반은 단단한 점성토지반의 경우 약 45kPa, 연약한 점성토지반의 경우 약 10kPa의 비배수전단강도가 측정되었으며, 깊이에 따라 일정한 값을 갖는 것으로 확인되었다.

조성된 실험지반은 원심모형실험기의 실험대위로 이동하여 모형기초를 설치하였으며, 하중재하장치, 로드셀 및 변위계측을 위한 LVDT 등을 설치한 후 하중재하



(a) Sand specimens with raining method with a sand diffuser



(b) Clay specimens using clay mixer

Fig. 3. Preparing the chamber specimens

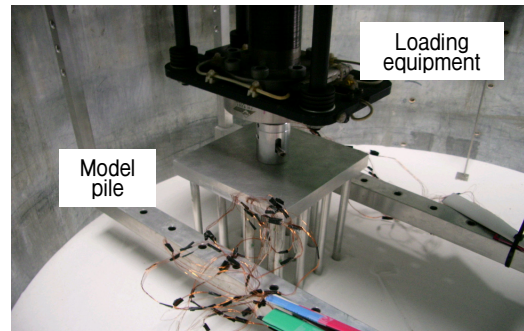


Fig. 4. Piled raft installation

실험을 수행하였다.

4. 개별 기초형식에 대한 하중-침하거동 분석

Figure 5는 본 연구에서 수행한 전면기초의 단위하중-침하 곡선으로서 원심모형시험의 역학적 상사비를 적용하여 실제크기 9m 전면기초의 거동특성을 보여주고 있다. 조밀한 사질토지반의 경우 하중 재하 장치의 최대 재하 용량의 한계 때문에 침하량이 최대 약 30cm가 될 때까지 실험이 수행 되었으며 추세선법을 적용하여 전면기초의 파괴수준인 0.1B에서의 극한 지지력을 산정하였다. 그 외의 점성토지반과 느슨한 사질토지반의 경우 전면기초의 침하량이 0.1B에 해당하는 90cm까지 하

중 재하실험을 수행하여 극한지지력을 산정하였다.

사질토지반에서 수행된 전면기초 실험의 경우 일반적인 전면기초의 극한지지력이 발현되는 침하량 기준 $0.1B(90\text{cm}, B = 9\text{m})$ 까지의 전 범위에서 침하량을 증가시킨 결과 지지력의 증가율이 일정하게 증가하는 선형 침하의 거동을 보였다. 이에 비해 점성토지반에서의 전면기초 거동특성은 침하량 $0.04B(B=\text{전면기초의 폭})$ 까지 지지력이 일정하게 증가하는 탄성영역의 거동특성을 보이며, 그 이후의 영역에서는 침하량 증가에 따라 지지력 증가폭이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

전면기초의 극한지지력은 Figure 5에서와 같이 전면기초의 침하량 $0.1B(90\text{cm})$ 기준에서 조밀한 사질토지반의 경우 $5.4\text{MPa}(437\text{MN})$ 로 추정되었고, 느슨한 사질토지반의 경우 $1.95\text{MPa}(158\text{MN})$ 으로 측정되었다. 이는 삼축시험 결과를 통하여 예측된 극한지지력 6.0MPa (조밀한 사질토지반), 2.15MPa (느슨한 사질토지반)에 비해 약 10% 적은 값이다. 점성토지반에서는 극한지지력은 Figure 5에서와 같이 전면기초의 침하량 $0.1B(90\text{cm})$ 기준에서 단단한 점성토지반의 경우 $0.27\text{MPa}(21.8\text{MN})$, 연약한 점성토지반의 경우 $0.05\text{MPa}(4\text{MN})$ 로 측정되었으며, 비배수 전단강도에 의해 산정된 점성토지반에서의 극한지지력 0.3MPa (단단한 점성토지반), 0.062MPa

(연약한 점성토지반)의 예측 값에 비해 약 10~20% 적게 측정되었다.

Figure 6은 직경 60cm, 깊이 15m의 단독 말뚝기초 하중재하 시험결과로서 지반조건에 따라 다른 하중-침하 거동특성을 보여주고 있다. 사질토지반의 경우 재하하중 증가에 따라 점차 침하량이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 말뚝기초의 극한지지력 도달까지 비선형 하중-침하 특성을 나타내고 있다. 점성토지반의 경우 침하량 증가에 따른 점진적인 지지력 증가 없이 상대적으로 매우 적은 침하량에서 극한지지력에 도달하게 되며 이후의 영역에서는 일정한 지지력을 갖는 것으로 나타나고 있다.

단독 말뚝기초의 극한지지력은 사질토지반의 경우 침하량 $6\text{cm}(0.1D, D=\text{말뚝기초의 직경: } 60\text{cm})$ 기준에서 각각 2.9MN (느슨한 사질토지반), 4.5MN (조밀한 사질토지반)로 측정되었으며, 점성토지반의 경우 초기 침하량 기준에서 약 0.16MN (연약한 점성토지반), 0.76MN (단단한 점성토지반)로 측정되었다.

Figure 7은 말뚝사이 간격이 4D인 4×4 무리말뚝 기초(Group Pile, GP)의 하중-침하 곡선으로서 지반조건에 따라 다른 하중-침하 특성을 나타내고 있다. 사질토지반의 경우 Figure 7(a)와 같이 하중 증가에 따라 점차적으

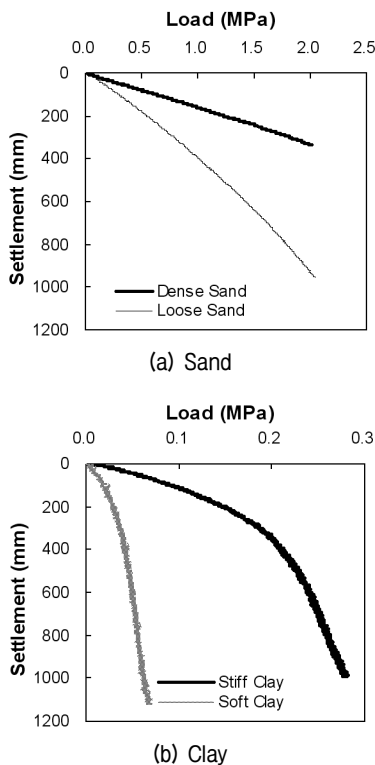


Fig. 5. Load-settlement curves for raft

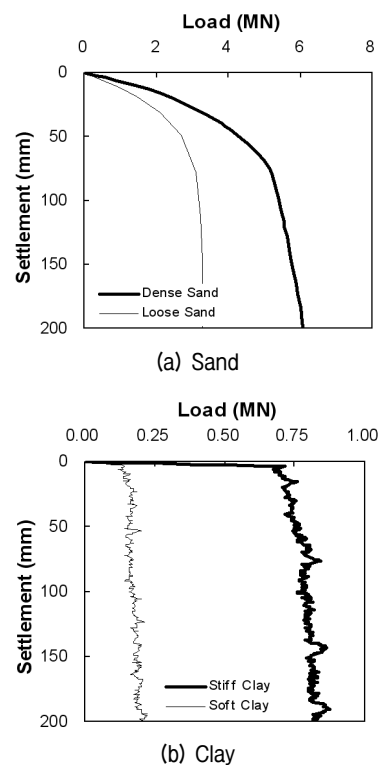
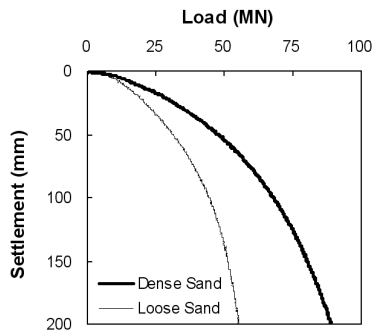
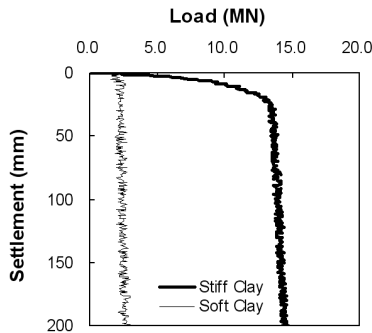


Fig. 6. Load-settlement curves for single pile



(a) Sand



(b) Clay

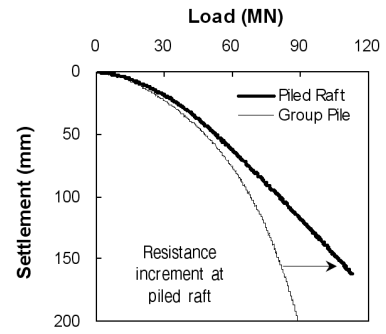
Fig. 7. Load-settlement curves for group pile

로 침하량이 증가하는 특성을 보이고 있으며, 극한지지력 기준에서 무리말뚝 기초의 효율은 단위 값인 1로 확인되고 있다. 점성토지반의 경우 Figure 7(b)와 같이 재하하중 증가에 따라 급작스러운 파괴가 나타나고 있으며, 사질토지반에 비해 적은 침하에서 극한지지력이 나타나고 있다. 점성토지반에서도 극한지지력 기준에서 무리말뚝 기초의 효율은 1로 나타나고 있으며, 기존 연구사례에서 확인된 무리말뚝의 간격 3D, 6D에서의 나타난 실험 결과(Park 등, 2009) 등을 종합하여 무리말뚝 기초의 블록파괴는 무리말뚝의 간격 4-D 미만에서 발생하는 것으로 확인할 수 있다. 구조물 기초 설계기준으로 적용되는 허용침하량 25mm 기준에서 조밀한 사질토지반의 경우 31.5MN, 느슨한 사질토지반의 경우 21MN, 단단한 점성토지반의 경우 13.2MN, 연약한 점성토지반의 경우 500kN의 지지력이 나타나고 있다.

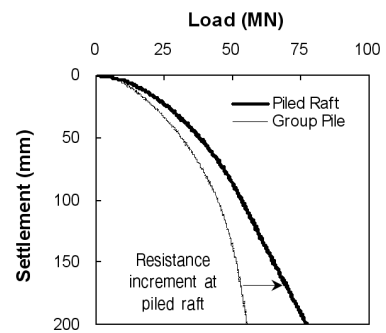
5. 말뚝지지 전면기초의 지지력 증가특성

5.1 하중-침하 특성

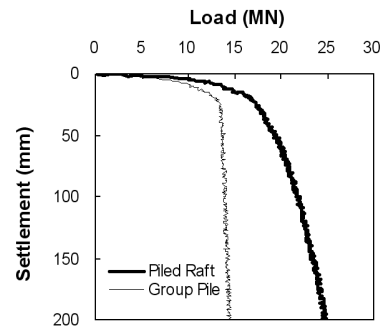
Figure 8은 말뚝지지 전면기초(Piled Raft, PR)와 무리말뚝기초(Group Pile, GP)의 하중재하 시험 결과를 함께



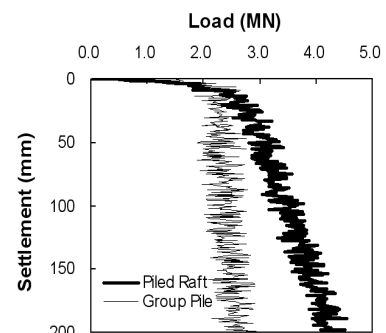
(a) Dense sand



(b) Loose sand



(c) Stiff clay



(d) Soft clay

Fig. 8. Load-settlement curves for group pile and piled raft

도시한 것으로서, 동일한 침하량 기준에서 말뚝지지 전면기초의 지지력 증가량을 통하여 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가 효과를 확인할 수 있다. 사질토지반의 경우 Figure 8 (a), (b)에서와 같이 무리말뚝 기초가 극한

지지력에 도달할 때 까지 말뚝지지 전면기초는 무리말뚝기초와 유사한 거동특성을 보이고 있으며, 일정부분 전면기초에 의한 지지력 분담효과가 나타나고 있다. 또한 침하량 증가에 따라 무리말뚝 기초의 극한지지력 도달 이후 전면기초에 의한 지지력 분담효과는 크게 나타나고 있으며, Figure 8(b)에서와 같이 구조물의 허용침하량 기준인 25mm에서의 지지력 증대효과는 느슨한 사질토지반에서 크게 나타나고 있다. 이를 통하여 Figure 2에서의 변곡점 A를 기준으로 말뚝지지 전면기초의 거동특성이 변화함을 확인할 수 있으며, 일반적인 구조물의 허용침하량 내에서도 전면기초에 의한 하중분담효과가 나타나고 있다.

점성토지반에서 수행한 말뚝지지 전면기초 하중재하시험의 경우 Figure 8(c), (d)에서와 같이 무리말뚝 기초가 급작스럽게 파괴되는 특성으로 말뚝지지 전면기초의 거동특성이 변화하는 변곡점 A 이후의 영역에서 전면기초에 의한 지지력 증가효과가 크게 나타나고 있다. 전면기초에 의한 지지력 증가효과는 연약한 점성토지반, 단단한 점성토지반에서 모두 사질토지반에 비해 크게 나타나고 있으며, 단단한 점성토지반에서의 지지력 증가량이 더욱 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나 동일 지반에서의 수행된 무리말뚝 기초의 지지력과의 비교를 통하여 연약한 점성토지반에서도 상당부분 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가효과가 나타나는 것으로 확인되고 있다.

5.2 지지력 증대 효과

Figure 9는 침하량에 따른 전면기초의 지지력 증대효과를 나타내고 있다. Figure 9에서 보는 바와 같이 모든 경우에서 말뚝 캡(전면기초)에 의한 지지력 증대효과가 모든 지반조건에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 침하량 증가에 따라 증대효과가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 말뚝지지 전면기초의 초기 재하하중에서부터 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증대효과가 나타나고 있으며, 엄밀한 설계 기준인 허용침하량 범위 내에서도 전면기초(말뚝 캡)의 지지력 증대효과를 반영하여 효율적인 설계가 이루어 질 수 있음을 확인할 수 있다.

전면기초(말뚝 캡)의 지지력 증대효과는 구조물 기초 설계기준으로 적용되는 허용침하량 25mm 기준에서 조밀한 사질토지반의 경우 4.3MN(약 421t), 느슨한 사질토지반의 경우 4.7MN(약 460t)로 나타났다. 이를 통하

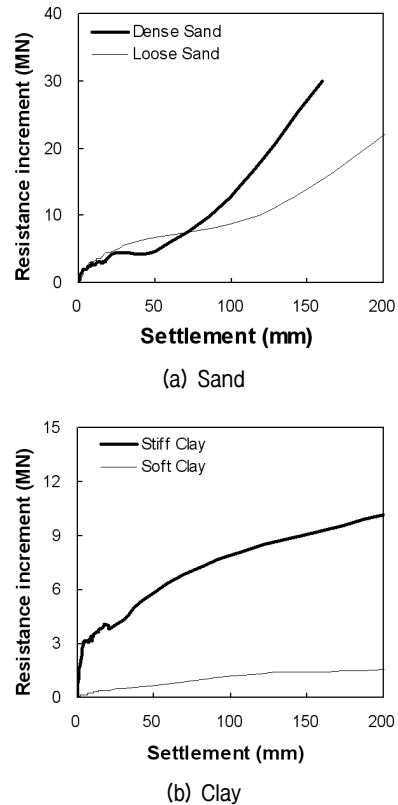


Fig. 9. Resistance increase from the bearing capacity of raft at the piled raft

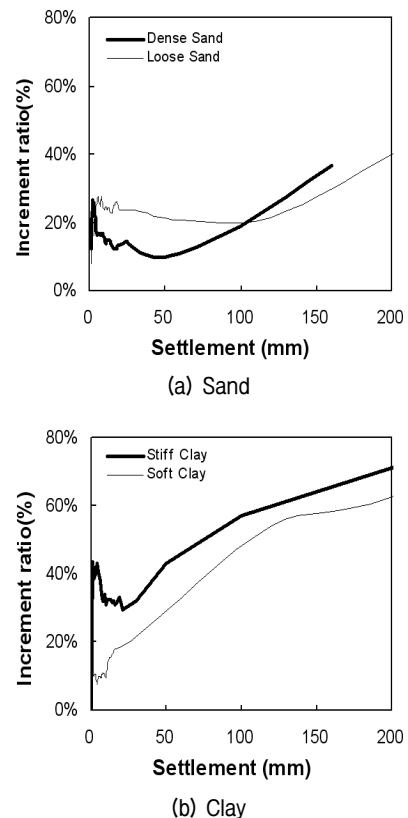


Fig. 10. Increasing ratio of piled raft resistance divided by group pile resistance

여 허용침하량 범위 내에서도 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 기준 조건에서 무리말뚝 기초의 지지력이 조밀한 사질토지반의 경우 31.5MN(약 3100t: 말뚝 1 본당 약 180톤), 느슨한 사질토지반의 경우 21MN(약 2100t: 말뚝 1 본당 약 130톤)인 것을 감안할 때 동일한 25mm 침하량 기준에서 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가 효과를 직접적으로 설계에 반영할 경우 Figure 10(a)에서와 같이 조밀한 사질토지반의 경우 2본(12% 감소), 느슨한 사질토지반의 경우 3본(18% 감소)의 말뚝기초 개수를 줄일 수 있는(기준 16본)의 경제적 효과가 발생하게 된다.

점성토지반에서 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증대효과는 동일한 기준의 침하량 25mm에서 단단한 점성토지반의 경우 4MN(약 390t), 연약한 점성토지반의 경우 500kN(약 49t)로 나타나고 있다. 이를 통하여 점성토지반에서도 허용침하량 범위 내에서 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가효과가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며 동일한 기준 조건에서 무리말뚝 기초의 지지력이 단단한 점성토지반의 경우 13.2MN(약 1300t: 말뚝 1 본당 약 80톤), 연약한 점성토지반의 경우 2.2MN(약 220t: 말뚝 1 본당 약 13.5톤)인 것을 고려할 때 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가 효과를 직접적으로 설계에 반영할 경우 Figure 10(b)에서와 같이 단단한 점성토지반의 경우 4본(25%), 연약한 점성토지반의 경우 3본(18% 감소)의 말뚝기초 개수를 줄일 수 있는(기준 16본)의 경제적 효과가 발생하게 된다. 자세한 말뚝지지 전면기초의 지지력 증가효과는 Table 3과 같다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 교량기초에서 자주 적용되는

PHC 말뚝지지 전면기초를 대상으로 실제 규모에서의 거동특성을 다양한 지반조건에 따라 분석하였으며, 이를 통하여 실제 무리말뚝기초의 설계 기준이 되고 있는 허용침하량 기준에서의 말뚝지지 전면기초의 지지력 증대효과를 확인하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 4×4(말뚝 간격:4d) PHC 무리말뚝 기초의 극한지지력은 사질토지반, 점성토지반에서 모두 단독 말뚝 기초의 극한지지력에 무리말뚝의 개수인 16배한 값과 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 무리말뚝의 극한지지력 산정 시 적용되고 있는 무리말뚝 효율 반영은 타당한 것으로 확인되었다.
- (2) 말뚝지지 전면기초의 전면기초에 의한 지지력 증대효과는 모든 지반조건에서 발생하는 것으로 확인되었으며, 실제 구조물 기초설계의 기준이 되고 있는 허용침하량 기준에서도 상당량 지지력 증대효과가 발생하는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 허용침하량 25mm 기준에서 조밀한 사질토지반의 경우 무리말뚝의 지지력 대비 약 13%(4.3MN), 느슨한 사질토지반에서는 약 22%(4.7MN), 단단한 점성토지반에서는 약 30%(5MN), 연약한 점토질 지반은 약 22%(0.5MN)의 지지력 증대효과가 확인되었으며, 침하량이 증가할수록 전면기초에 의한 지지력 증대효과는 더욱 증가하는 경향을 보이고 있다.
- (3) 말뚝지지 전면기초의 거동특성은 지반조건에 따라 다르게 나타나고 있으며, 무리말뚝 기초의 극한지지력이 발생하는 침하량을 기준으로 전면기초의 거동특성이 변화하고 있음을 확인하였다. 사질토지반의 경우 단독말뚝기초의 극한지지력이 나타나는 0.1D 보다 큰 침하량에서 무리말뚝 기초의 극한지지력이 발생하였으며, 구조물 설계기준의 허용침하

Table 3. Resistance increasing of piled raft at 25mm settlement

Soil	resistance increase	increment ratio	resistance of group pile	Saving pile for 16 group pile
Dense sand	4.3MN(421t)	13%	31.5MN (3100t: 180t/pile)	2 (12%)
Loose sand	4.7MN(470t)	22%	21MN (2100t: 130t/pile)	3 (18%)
Stiff clay	5MN(500t)	30%	13.2MN (1300t: 80t/pile)	4 (25%)
Soft clay	0.5MN(50t)	22%	2.2MN (220t: 13.5t/pile)	3 (18%)

량 25mm 범위 밖에서 전면기초의 거동특성이 변화하는 변곡점이 나타나고 있다. 점성토지반의 경우 무리말뚝 기초의 파괴는 구조물 설계기준의 허용침하량인 25mm 범위 내에서 발생하였으며, 허용침하량 내에서의 전면기초에 의한 지지력 증가효과는 사질토지반에 비해 큰 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행된 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반연구” 및 한국과학재단 선도연구센터(ERC) “기후변화 적응형 지반구조물 설계 기술 개발”(No. 2011-0030845)의 결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Borel, S. (2001), “Comportement et dimensionnement des fondations mixtes.” Ph.D. thesis de ENPC, Spécialité Géotechnique, Paris.
- Fioravante, V. and Giretti, D. (2010), “Contact versus noncontact piled raft foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.3, pp.716-730.
- Katzenbach, R., Arslan, U. and Moormann, Chr. (2000), “Piled raft foundation projects in Germany”, *Design Applications of Raft Foundations*, Ed. by J.A. Hemsley, Thomas Telford Ltd., pp.323-391.
- Kim, H. T., Kang, I. K., Jeon, E. J. and Park, S. W. (2000), “Optimum design of piled raft foundations using a genetic algorithm”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.16, No.3, pp.47-55.
- Kim, H. T., Kang, I. K., Park, J. J. and Park, S. K. (2002), “Laboratory model test on load sharing characteristics of piled raft foundations applied vertical loads on sandy soils”, *Journal of KSCE*, Vol.22, No.2-c, pp.111-120.
- Kim, K. N., Lee, S. H., Chung, C. K. and Lee, H. S. (1999), “Optimal pile placement for minimizing differential settlements in piled raft foundations”, *Journal of KSCE*, Vol.19, No.3-4, pp. 831-839.
- Kwon, O. K., Oh, S. B. and Kim, J. B. (2005), “Experimental study on the load sharing ratio of group pile”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.21, No.5, pp. 51-58.
- Lee, J. H. and Jeong, S. S. (2007), “Three dimensional numerical analysis of piled raft on soft clay”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.23, No.5, pp.63-75.
- Lee, S. H. and Chung, C. K. (2003), “New design method for pile group under vertical load”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.19, No.1, pp.31-40.
- Lee, S. H., Kwon, O. K., Oh, S. B. and Kim, B. I. (2003), “Load distribution of piled raft”, *Journal of KSCE*, Vol.23, No.3-c, pp.143-150.
- Lee, S. H., Park, Y. H. and Song, M. J. (2007), “A practical analysis method for the design of piled raft foundation”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.23, No.12, pp.83-94.
- Lee, S. H., Choi, Y. S., Chung, C. K. and Kim, M. M. (2000), “Influence of pile cap on the behaviors of vertically loaded pile groups”, *Journal of KSCE*, Vol.20, No.1-c, pp.91-98.
- Liu, J. L., Yuan, Z. L. and Shang, K. P. (1985), “Cap-pile-soil interaction of bored pile groups”, *Proceeding of 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol.3, pp.1433-1436.
- Nabil F. Ismael (2001), “Axial load tests on bored piles and pile groups in cemented sands”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.9, pp.766-773.
- Park, J. O., Choo, Y. W. and Kim, D. S. (2009), “Estimation of slope behavior by soil temperature”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.25, No.7, pp.23-33.
- Poulos, H. G. (2001), “Piled-raft foundation: design and applications”, *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
- Randolph, M. F. (1994), “Design methods for pile groups and piled rafts”, *Proc 13th Inter. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol.5, pp.61-82.
- Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1978), “Analysis of deformation of vertically loaded piles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.104, No.12, pp.1465-1488.
- Sanctis, L. and Mandolini, A. (2006), “Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.132, No.12, pp.1600-1610.

(접수일자 2012. 3. 14, 심사완료일 2012. 7. 16)