한국지반공학회논문집 제28권 9호 2012년 9월 pp. 57 ~ 67

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.9.57

원심모형실험을 통한 점토지반에서의 말뚝지지 전면기초 상호작용

Analysis of Piled Raft Interactions on Clay with Centrifuge Test

박 동 규[1] Park, Dong-Gyu

최 규 진[2] Choi, Kyu-Jin

이 준 환[3] Lee, Jun-Hwan

Abstract

In the design for piled rafts, the load capacity of the raft is in general ignored and the load capacities of pile are only considered for the estimation of the total load carrying capacity of the piled raft. The axial resistance of piled raft is offered by the raft and group piles acting on the same supporting ground soils. As a consequence, pile - soil - raft and pile - soil interactions, occurring by stress and displacement duplication with pile and raft loading conditions, acts as a key element in the design for piled rafts. In this study, a series of centrifuge model tests has been performed to compare the axial behavior of group pile and raft with that of a piled raft (having 16 component piles with an array of 4×4) at the stiff and soft clays. From the test results, it is observed that the interactions of piles, soil, and raft has little influences on the load capacities of piles and raft in piled rafts compared with the load capacities of group piles and raft at the same clay soil condition.

요 지

말뚝지지 전면기초 설계에 있어 전면기초의 지지력은 반영되지 않은 무리말뚝기초의 지지력으로써 많은 부분 설계가 이루어지고 있다. 이는 다른 지지력 메커니즘을 갖는 무리말뚝기초와 전면기초가 동시에 작용되는 말뚝지지 전면기초의 지지력특성으로 각각의 무리말뚝기초와 전면기초의 지지력 특성은 변화하게 되며, 변위장 중첩 및 지중응력증가 등으로 대변되는 무리말뚝 - 지반 - 전면기초 상호작용 및 이에 따른 지지력특성 변화는 말뚝지지 전면기초의 설계에 있어 중요한 요소로써 작용한다. 본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 지지력요소들의 상호작용을 규명하기 위해 원심모형시험을 이용한 전면기초, 단독 말뚝기초, 무리말뚝(16본; 4×4), 말뚝지지 전면기초(16본; 4×4) 하중-재하 시험을 수행하였으며, 단단한 점성토지반과 연약한 점성토 지반에서의 무리말뚝-지반, 무리말뚝-지반-전면기초의 상호작용을 하중단계에 따른 지지력 특성변화를 기준으로 분석하였다. 실험결과 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 무리말뚝기초 및 전면기초의 지지력 변화에 대한 영향은 작은 것으로 나타났다.

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

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

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

3 정회원, 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 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

대규모 구조물의 기초로써 자주 적용되는 말뚝지지 전면기초는 무리말뚝기초에 의한 지지력과 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력 증가 및 침하량 억제 효과를 함께 설계에 적용할 수 있는 경제적인 기초형식이다. 그러나 실제 말뚝지지 전면기초의 설계 및 설계 시방서에 있어 전면기초의 하중분담에 의해 발생하는 지지력 증가 및 침하량 억제 특성들은 고려되지 못한 설계가 적용되고 있다(Poulos, 2001). 이는 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 무리말뚝-지반-전면기초(말뚝 캡)의 상호작용으로 전면기초 및 무리말뚝기초의 지지력 메커니즘이 변화하며, 지반의 설계 정수로써 지지력의 변화를 반영할 수 없는 말뚝지지 전면기초의 거동특성에 기인한다.

Randolph(1983)는 말뚝기초와 전면기초의 강성도 및 말뚝지지 전면기초 상호작용 계수를 적용하여 상대강성도, 말뚝기초의 영향범위에 따른 말뚝지지 전면기초의 지지력산정법을 제안하였다. Horikoshi and Randolph 1996) 및 Conte et al.(2003)은 원심모형실험을 적용한 말뚝지지 전면기초 하중재하시험을 수행하였으며, 점성토지반에서의 상호작용 특성을 분석하였다. Sanctis and Mandolini(2006) 및 Lee and Jeong(2007)은 수치해석을 통하여 점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초 거동특성을 분석하였으며, 말뚝기초 - 지반 - 전면기초(말뚝 캡)의 상호작용에 따른 하중분담특성 및 상호작용 영향계수를 제안하였다. Lee et al.(2007)은 무리말뚝기초에서의 변위장 중첩 및 말뚝기초-지반-전면기초의 상호작용을 반영한 말뚝지지 전면기초 근사설계 프로그램을 개발하였으며, Park et al.(2009)는 원심모형실험을 통하여 점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초 하중분담률을 분석하였다. 그러나 점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초 상호작용 분석에 있어 실험조건의 구현, 하중재하장치 및 지반조성 등의 한계성에 기인하여 원심모형실험을 적용한 제한적인 실험 사례를 기준으로 분석이 이루어져 왔다. 따라서 점성토지반에서 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 특성과 함께 상호작용 효과를 반영한 전면기초(말뚝 캡) 및 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초의 지지력 특성변화 등의 상호작용에 대한 분석은 아직까지 불분명하며, 계속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 지지력요소들의 상호작용을 규명하기 위해 원심모형시험을 적용한 무리말뚝, 말뚝지지 전면기초, 전면기초, 단독 말뚝기초의 하중-재하 시험을 수행하였으며, 무리말뚝-지반, 무리말뚝-지반-전면기초의 상호작용으로 구분하여 각각의 영향인자와 하중단계에 따른 지지력 특성변화를 분석하였다. 또한 동일한 조건의 말뚝지지 전면기초 하중-재하시험을 단단한 점성토지반과 연약한 점성토지반에서 수행하여 지반특성에 따른 말뚝지지 전면기초의 상호작용 변화를 분석하였다.

2. 말뚝지지 전면기초의 상호작용

2.1 기초 요소에 따른 상호작용

말뚝지지 전면기초는 각각 다른 지지력 메커니즘을 갖는 무리말뚝기초와 전면기초(말뚝 캡)가 함께 설치되는 기초형식으로 하중재하 시 지지력 메커니즘의 중첩으로 상호작용이 발생한다(Randolph and Wroth, 1978; Phung, 1993; Lee and Chung, 2003; Horikoshi and Randolph, 1996; Fioravante and Giretti, 2010). 말뚝지지 전면기초의 지지력 요소로써 작용하는 무리말뚝기초와 전면기초(말뚝 캡)의 경우 동일한 기초 및 지반 조건에서의 무리말뚝기초 및 전면기초(unpiled raft)와는 다른 거동특성을 갖게 된다. Figure 1의 (a)는 무리말뚝기초와 지반 사이에 발생하는 상호작용으로 말뚝기초에 작용하는 재하하중이 지반으로 전파되어 인접한 다른 말뚝기초에 추가적인 수직방향의 응력이 작용하게 된다. 무리말뚝기초 사이에 발생하는 변위장 중첩으로 말뚝기초의 침하량은 말뚝기초 자체의 침하량과 주변 말뚝의 변위장 영향에 의한 침하량의 합으로써 나타나게 되어 단독말뚝 기초에 비해 추가적인 침하가 발생한다(Randolph and Wroth, 1978). 또한 무리말뚝기초에 작용하는 하중의 지반전파는 지중의 응력을 증가시켜 무리말뚝기초의 수평방향의 법선응력이 증가하게 되며, 말뚝기초의 주면마찰력이 증가하는 효과가 발생하게 된다(Phung, 1993; Lee and Chung, 2003).

Figure 1의 (b)는 말뚝기초와 전면기초 사이에 발생하는 상호작용으로 전면기초 재하하중은 지반으로 전파되어 말뚝기초 주변 지반의 침하 및 수직응력 증가로써 작용하게 되며, 침하량 증가 및 주면마찰력 감소특성이 나타나게 된다. 또한 전면기초에 작용하는 하중은 지중의 응력상태를 증가시켜 말뚝기초의 수평방향 법선응력이 증가하게 되며, 말뚝기초의 주면 마찰력을 증대시키는 효과를 발생하게 된다(Horikoshi and Randolph, 1996).

Figure 1의 (c)는 전면기초와 말뚝기초 사이에 발생하는 상호작용으로 하중재하에 따른 말뚝기초 침하로 주변 지반의 수직변형이 발생하며, 저면지반의 침하는 말뚝지지 전면기초 내의 전면기초(말뚝 캡) 지지력을 감소시키는 영향을 미치게 된다(Fioravante and Giretti, 2010).

Randolph(1983)는 Figure 2와 같이 단순화된 말뚝지지 전면기초의 해석적 연구를 통하여 전면기초와 말뚝기초 사이에 발생하는 상호작용을 분석하였으며, 식 (1)과 같이 말뚝기초의 직경, 전면기초의 직경 및 지반의 깊이별 탄성계수를 고려한 말뚝지지 전면기초 상호작용 계수 α_{rp}을 제안하였다.

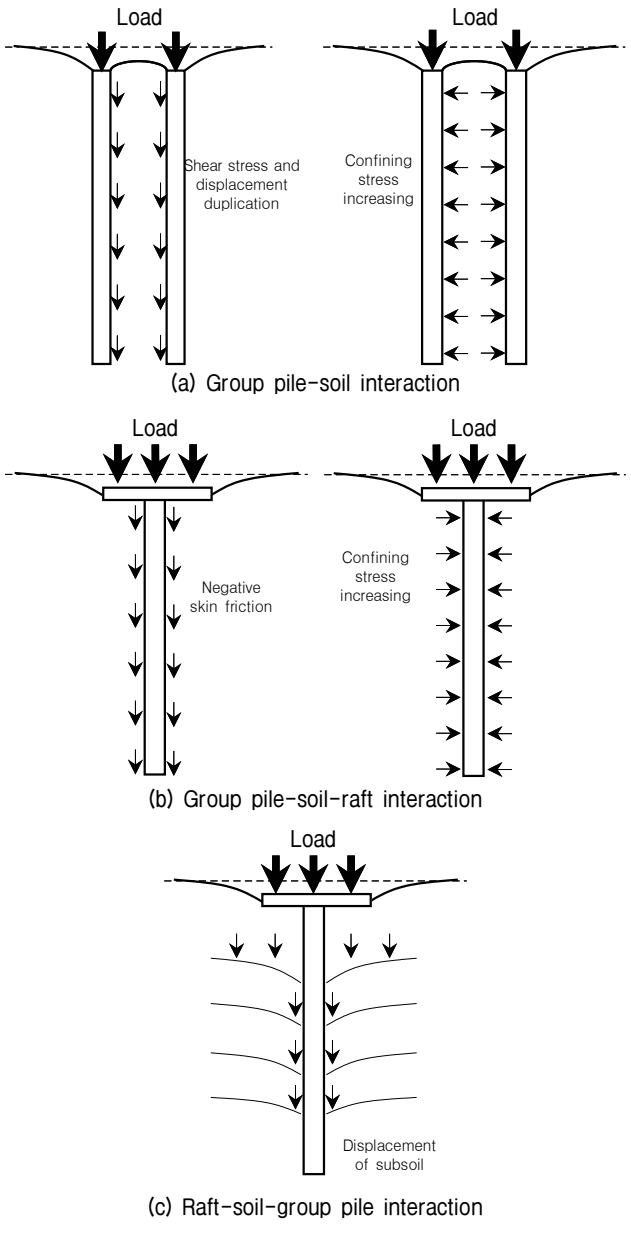


Fig. 1. Piled raft interaction

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_0)}{\ln(r_m/r_0)} \tag{1}$$

$$r_m = 0.25 + \frac{E_{sl}}{E_{sb}}\left(2.5\frac{E_{sav}}{E_{sl}}(1-\upsilon) - 0.25\right) \tag{2}$$

여기서, α_{rp}은 전면기초에의한 무리말뚝기초의 상호작용계수, r_c는 전면기초의 직경, r_0는 말뚝기초의 직경, r_m은 말뚝기초의 최대 영향반경, E_{sl}, E_{sb}, E_{sav}는 각각 말뚝기초 두부, 말뚝기초 선단에서의 지반의 탄성계수 및 말뚝기초 주면마찰력이 작용하는 지반에서의 평균 탄성계수이다(Figure 2 참조).

Randolph(1983)는 개별적 지지력요소인 말뚝기초와 전면기초의 강성도(하중/변위)를 기준으로 말뚝지지 전면기초의 지지력 산정법을 식 (3)과 같이 제안하였으며, 식 (1)의 말뚝지지 전면기초의 상호작용 계수 α_{rp}를 반영하여 침하량 기준에서의 말뚝지지 전면기초의 지지력을 제안하였다.

$$k_{pr} = \frac{k_p + (1-2\alpha_{rp})k_r}{1-\alpha_{rp}^2(k_r/k_p)} \tag{3}$$

여기서, k_{pr}은 말뚝지지 전면기초의 강성도, k_p는 말뚝기초의 강성도, k_r은 전면기초의 강성도, α_{rp}은 말뚝지지 전면기초 상호작용계수이다. 전면기초의 강성도는 Fraser and Wardle(1976) 및 Mayne and Poulos(1999)의 탄성이론을 적용하여 산정할 수 있으며, 무리말뚝기초의 강성도는 Poulos and Davis(1980), Fleming et al.(1992) 및 Poulos(1989)의 탄성해석을 통하여 반영될 수 있다.

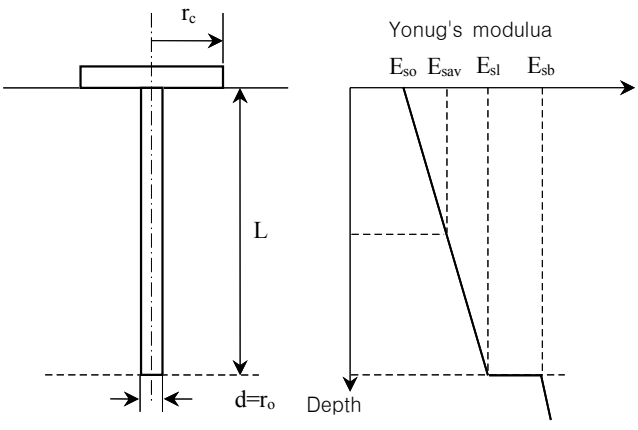


Fig. 2. Simplified representation of pile-raft

Clancy and Randolph(1993)는 대단면 말뚝지지 전면기초를 대상으로 해석적 연구를 수행하였으며, 무리말뚝기초의 개수 및 무리말뚝기초의 단면이 증가할수록 무리말뚝기초의 간격(s/d), 무리말뚝기초의 개수, 강성도에 상관없이 말뚝지지 전면기초 상호작용계수 α_{rp}은 일정한 값(0.8)으로 수렴하는 것을 제안하였다. 이를 기준으로 식 (3)를 수정하여 식 (4)와 같이 말뚝지지 전면기초 지지력 산정법을 적용할 수 있다.

$$k_{pr} = \frac{1-0.6(k_r/k_p)}{1-0.64(k_r/k_p)} k_p \tag{4}$$

2.2 점성토지반에서 말뚝지지 전면기초 극한지지력 및 상호작용

말뚝지지 전면기초의 지지력은 세 가지 역학적 요소: 무리말뚝기초, 전면기초, 지반특성에 의해 결정되며, 기존 연구는 이들의 상호작용을 정량화하여 작용하중에 대한 전면기초, 말뚝기초 각각에 대한 하중분담 특성 및 극한지지력에 대한 연구결과가 주로 포함되어 있다(Poulos, 2001; Randolph, 1994; Katzenbach et al., 2000). Poulos(2001)는 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산정에 있어 각각의 개별적인 무리말뚝기초의 극한지지력과 말뚝 캡 부분에 의해 지지되는 전면기초의 극한지지력의 단순 합산을 통하여 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 산정법을 식 (5)과 같이 제안하였다.

$$Q_{PR,ult} = Q_{UR,ult} + Q_{G,ult} \tag{5}$$

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

그러나 실질적인 말뚝지지 전면기초의 거동분석에 있어 말뚝 설치효과의 중첩, 말뚝들 사이의 상호작용, 무리말뚝과 캡과의 상호작용 등에 의한 영향들은 동시에 발생하기 때문에 각각의 요소들에 대한 영향을 명확히 구분하여 직접적으로 식 (5)에 포함되어 있는 지지력의 요소로써 적용하기에는 한계점들이 있다.

Borel(2001)은 Poulos(2001)의 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 산정법 식 (5)를 수정하였으며, 말뚝지지 전면기초의 개별적인 지지력 요소인 무리말뚝기초와 전면기초의 상호작용을 반영하여 식 (6)와 같이 말뚝지지 전면기초 극한지지력 산정법을 제안하였다.

$$Q_{PR,ult} = \alpha_{UR} \cdot Q_{UR,ult} + \alpha_G \cdot Q_{G,ult} \tag{6}$$

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}, α_G는 상호작용효과가 반영된 말뚝지지 전면기초에서의 전면기초(말뚝 캡)와 무리말뚝기초의 영향계수이다.

Sanctis(2006)는 기존에 수행되었던 점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초의 실험결과(Cooke, 1986; Conte et al., 2003; Sales, 2000) 분석을 통하여 식 (7)에서와 같이 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 영향계수ξ_{PR}를 정의하였으며, 값의 범위가 0.8에서부터 1.0내에 존재함을 확인하였다.

$$\xi_{PR} = \frac{Q_{PR,ult}}{Q_{UR,ult} + Q_{G,ult}} \tag{7}$$

여기서, ξ_{PR}는 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 영향계수, $Q_{PR,ult}$는 말뚝지지 전면기초의 극한지지력, $Q_{UR,ult}$는 전면기초의 극한지지력, $Q_{G,ult}$는 무리말뚝기초의 극한지지력이다. 또한 말뚝지지 전면기초의 수치해석 연구를 통하여 전면기초의 상호작용 계수α_{UR}를 Figure 3과 같이 분석하였으며, 말뚝지지 전면기초의 기초형상을 기준으로 식 (8)과 같이 상호작용 계수α_{UR}를 산정할 것을 제안하였다.

$$\alpha_{UR} = 1 - 3[A_G/A/(s/d)] \tag{8}$$

여기서, α_{UR}는 말뚝지지 전면기초에서의 전면기초

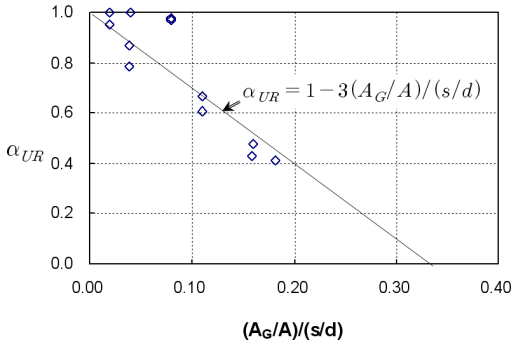


Fig. 3. Piled raft interaction factor (α_{UR})

(무리말뚝 캡)의 극한지지력 영향계수, A_G는 무리말뚝의 단면적, A는 말뚝지지 전면기초의 전면기초 면적(무리말뚝 캡), s는 무리말뚝 사이의 간격, d는 무리말뚝에 적용된 개별말뚝의 직경이다.

3. 말뚝지지 전면기초 원심모형 수행

3.1 원심모형시험 개요

말뚝지지 전면기초의 상호작용 특성을 분석하기 위해 원심모형시험을 수행하였으며, 국내 교량기초에서 자주 적용되는 PHC 무리말뚝기초를 모형화 하여 말뚝지지 전면기초의 거동특성 변화를 분석하였다. 이를 위해 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터내의 원심모형시험기를 활용하였으며 말뚝지지 전면기초(PR), 무리말뚝기초(GP), 전면기초(UR), 단독 말뚝기초(SP)의 하중 재하시험을 수행하여 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의한 개별지지력 요소들의 거동특성을 분석하고자 하였다. 실험에 적용된 지반종류는 점성토지반으로 총 8세트의 원심모형시험-하중재하시험을 수행하였으며, 자세한 실험조건 및 실험에 적용된 모형기초의 제원은 Table 1과 같다.

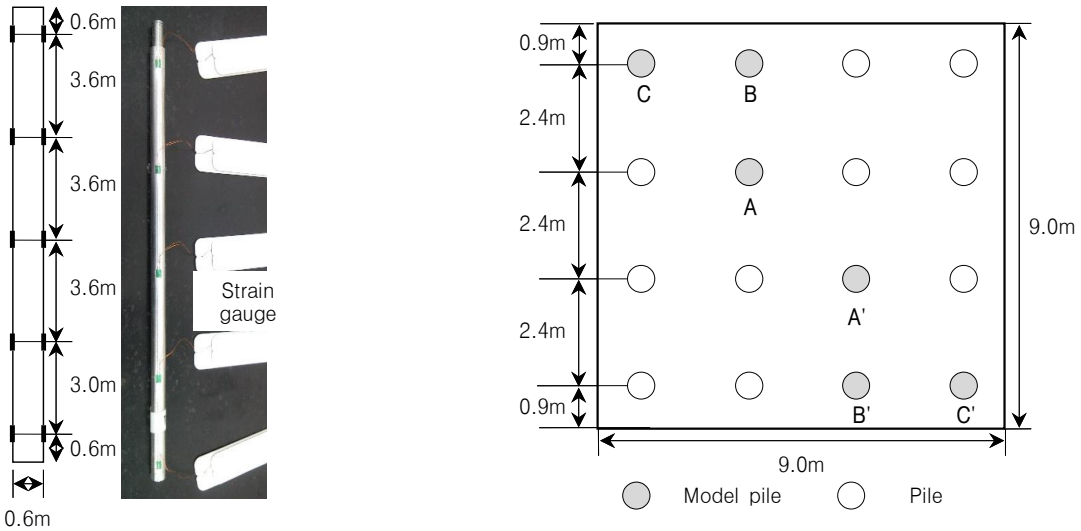
Table 1. Main characteristics of the performed tests

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

Reference: Stiff clay: Preconsolidation pressure 300kPa/ Soft clay:Preconsolidation pressure 50kPa

Table 2. 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



(a) Model pile (b) Configuration of model pile at piled raft

Fig. 4. Model pile and Configuration of model piles at piled raft

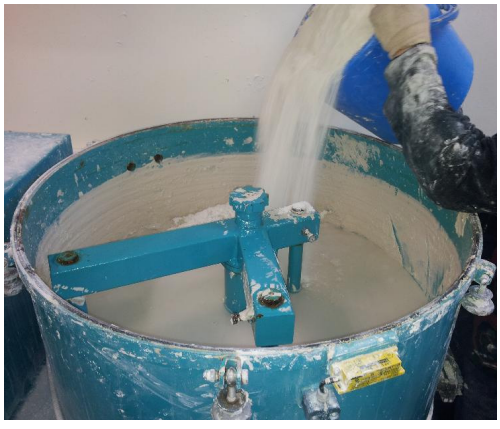
모형기초의 제작, 모형기초실험의 하중-침하곡선 및 실험의 경계조건 등은 Table 2와 같은 원심모형실험의 역학적 상사비를 적용하여 실험을 계획하였으며, 실험 수행 가속도인 60g에서의 상사비를 적용하여 각각의 물리량 등을 환산하였다. 각각의 실험에서 적용된 모형기초는 알루미늄 합금(Aluminum alloy)를 적용하여 제작하였으며, PHC 말뚝기초의 탄성계수(35GPa)와 알루미늄의 탄성계수(70GPa)를 고려하여 각각의 단말뚝기초 및 무리말뚝 모형기초에 적용된 외경 10mm, 내경 8mm, 길이 25cm의 알루미늄 말뚝기초는 60g 실험조건(prototype)에서 외경 600mm, 두께 140mm(내경 320mm), 깊이 15m의 PHC 말뚝기초의 특성을 반영하도록 적용하였다. Figure 4의 (a)는 가속도 60g 조건에서의 실규모로 도식한 센서말뚝으로 말뚝기초 벽면에 변형률계를 부착하여 재하하중 증가에 따른 하중-전이 특성을 분석할 수 있도록 하였다. 또한 Figure 4의 (b)와 같이 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초에 센터, 가장자리, 모서리 부분에 센서말뚝을 설치하여 재하하중 단계에 따른 무리말뚝 기초의 하중-전이 특성을 분석하고자 하였으며, 무리말뚝기초 - 지반 - 전면기초의 상호작용에 따른 지지력특성 변화를 분석하고자 하였다. 전면기초와 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡(전면기초), 무리말뚝기초 말뚝캡은 모두 15cm로 제작하여 실제 규모 9m의 정사각형 기초의 거동특성을 원심모형시험에 반영하도록 하였다. 무리말뚝기초와 전면지지 말뚝기초 모두 단독 말뚝기초와 동일한 조건의 모형말뚝기초를 전면기초에 결합하는 방법을 적용하여 4×4 PHC 무리말뚝기초, 4×4 PHC 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 실험에 적용하였으며, 무리말뚝 및 말뚝지지 전면기초의 말뚝간격은 4D(D: 말뚝기초의 직경)으로 설정하여 말뚝간격은 4D에서의 블록파괴의 유무 및 무리말뚝기초의 효과가 없는 것으로 간주되는 범위(말뚝기초의 간격 5D이상, Jeong and kim, 1998)내에서의 거동특성을 분석하고자 하였다.

3.2 원심모형실험 모형지반 조성

원심모형실험을 적용한 모형기초의 재하실험은 점성토지반을 대상으로 수행되었으며, 단단한 상태와 연약한 상태로 구분하여 모형지반을 조성하였다. 점성토지반의 조성은 분말성분의 카올리나이트(Kaolinite) 점토를 물과 혼합하여 인공적으로 조성하는 방법을 적용하였으며, 사용한 카올리나이트는 정제된 판상의 결정 구조를 가진 분말 형태의 제품으로 소성지수(PI)=34.5, 통일분류법상의 기준에서 CH, 단위중량은 16.5kN/m^3으로 자세한 화학적 성분은 Table 3과 같다. 실험지반의 지반조성에 있어 균질한 성분조성을 위해 동일한 함수비(120%) 조건으로 분말형태의 점토와 물을 교반기를 통하여 점토슬러리를 조성하였으며, 완전포화된 점성토지

Table 3. Chemical composition of kaolinite (%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	T_iO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Ig.Loss
51.3	38.2	0.51	0.45	0.13	0.06	0.7	0.12	0.12



(a) Clay mixer

(b) Preconsolidation of clay slurry

Fig. 5. Modeling of sample clay ground

반의 구현을 위해 Figure 5의 (a)와 같이 진공(Vaccum) 장치가 설치된 점토 교반기(Clay mixer)를 사용하였다. 또한 점성토지반의 교반 시에 진공장치를 같이 사용하여, 점성토지반의 교반과 함께 강제적인 공기배출이 함께 수행되어 분말 점토입자 사이의 공극이 완전 포화되도록 지반을 조성하였다. 조성된 점토슬러리는 선행압밀하중을 통하여 단단한 점성토지반과 연약한 점성토지반으로 지반조건을 구현하였으며, Figure 5의 (b)에서와 같이 일축압밀기를 사용하여 단단한 점성토지반(선행압밀하중: 300kPa)과 연약한 점성토지반(선행압밀하중: 50kPa)으로 조성하였다. 또한 점성토지반의 압밀에 있어 원형토조의 벽면, 아랫면, 윗면에 배수재 및 배수층을 설치하여 점토슬러리의 배수가 원활하도록 하였으며, 충분한 시간간격을 두고 점차적으로 선행압밀하중을 증가하여 지반의 교란이 발생하지 않도록 하였다.

조성된 점성토지반은 원심모형실험기의 실험대 위로 이동하여 하중재하실험 기기를 설치하였으며, 하중재하기, 로드셀, 모형기초, LVDT 등의 계측장비 설치 및 모형기초 계측센서의 데이터로고 연결을 완료하였다. 모형기초의 관입은 가속도 1g 상태에서 수행하였으며, 연결된 센서의 신호여부 및 기타 실험준비가 완료된 이후 원심모형시험기를 작동하여 실험가속도 60g조건에서 하중재하실험을 수행하였다.

4. 상호작용에 의한 지지력 특성변화

4.1 무리말뚝기초-지반의 상호작용 분석

Figure 6은 본 연구에서 수행한 무리말뚝기초(Group Pile, GP)의 하중재하 실험결과와 무리말뚝기초의 개수(16본) 만큼 지지력을 증가시킨 단독 말뚝기초(단독 말뚝기초의 지지력×16배; 16*SP) 하중재하 실험 결과를 도시한 것이다. 단단한 점성토지반의 경우, Figure 6의 (a)에서 보는바와 같이 초기 재하하중에서 약 5MN 까지의 재하하중 구간에서 무리말뚝기초와 16배 지지력을 증가한 단독 말뚝기초의 하중-침하 곡선이 비슷한 경향을 보이고 있으나, 점차적인 하중증가에 따라 무리말뚝기초의 침하량이 증가하는 특성을 나타내고 있다. 극한지지력 기준에서는 무리말뚝기초의 경우 약 13.5MN, 16배한 단독말뚝기초의 경우 약 11MN으로 측정되었으며, 16배한 단독말뚝기초에 비해 무리말뚝기초에서 약 22% 큰 것으로 나타나고 있다. 연약한 점성토지반의 경우 Figure 6의 (b)에서와 같이 초기재하하중에서부터 극한지지력에 도달할 때 까지 무리말뚝기초와 16배한 단독 말뚝기초는 유사한 하중-침하 특성을 보이고 있다. 그러나 극한지지력 기준에서는 무리말뚝기초의 경우 약 2.2MN, 16배한 단독말뚝기초의 경우 약 2.5MN으로 나타나고 있으며, 무리말뚝기초에 비해 16배한 단독말뚝기초에서 약 13% 큰 것으로 확인되고 있다. 무리말뚝기초의 효율(η)은 식 (9)와 같이 무리말뚝기초의 극한지지력과 단독말뚝기초의 극한지지력, 무리말뚝기초의 개수(n)을 통하여 산정될 수 있으며, 본 연구에서 산정된 무리말뚝기초의 효율은 단단한 점성토지반의 경우 1.22, 연약한 점성토지반의 경우 1.13으로 나타나고 있다.

$$Q_{GP,ult} = \eta \cdot n \cdot Q_{SP,ult} \tag{9}$$

여기서, $Q_{GP,ult}$, $Q_{SP,ult}$는 각각 무리말뚝기초의 극한지지력, 단독말뚝기초의 극한지지력, η는 무리말뚝기초의 효율, n은 무리말뚝기초의 개수이다.

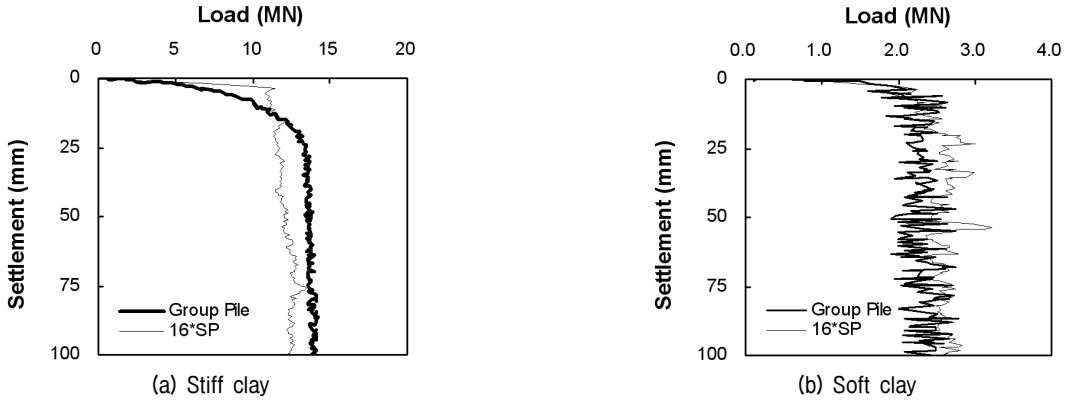


Fig. 6. Load-settlement curves of group pile and 16 × single pile

Park et al.(2009)은 점성토지반에서의 무리말뚝기초의 간격(s/d; s=말뚝기초의 간격, d=말뚝기초의 직경)이 3일 경우 무리말뚝기초의 효율(η)이 크게 감소하여 0.35(5×5; 25개의 무리말뚝기초)~0.6(3×3; 9개의 무리말뚝기초)의 분포를 나타내고 있으며, 무리말뚝기초의 간격이 6일 경우 무리말뚝기초 효율이 1로 나타나는 것을 실험적으로 확인하였다. Park et al.(2009)의 실험결과와 본 연구에서의 분석을 통하여 점성토지반에서 자주 발생하는 것으로 나타나고 있는 무리말뚝기초의 블록파괴는 지반조건에 상관없이 무리말뚝기초의 간격이 4D 미만(본 연구의 경우 4×4 배열, 16개 무리말뚝기초)에서 발생하는 것으로 확인되었으며, 기존의 연구에서 제안되었던 점성토지반에서의 블록파괴 기준인 말뚝기초의 간격 4D 미만(De Mello 1969; Cooke 1986) 및 Jeong and kim(1998)이 제안한 5D 등의 기준에 상응하는 것으로 나타나고 있다. 기초구조물의 보편적 허용침하량으로 간주되는 25mm 기준에서, 무리말뚝기초는 극한지지력에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 무리말뚝기초-지반의 상호작용에 의한 영향은 극한지지력 기준 무리말뚝기초의 설계에 있어 크게 작용하지 않는 것을 확인되고 있다. 또한 무리말뚝기초의 지지력은 극한지지력 도달 이후 침하량 증가에 따라 일정한 값을 나타내고 있어, 전체지지력의 주면마찰력에 의해 주도되고 있음을 알 수 있다. 아울러 Figure 1의 (a)의 무리말뚝기초-지반의 상호작용에 의한 지지력 증대효과는 점성토지반에서는 뚜렷이 관찰되지 않는 것으로 확인되었다.

4.2 무리말뚝기초-전면기초 사이의 상호작용 분석

Figure 7은 점성토지반에서 수행된 무리말뚝기초(Group Pile, GP)와 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초(Piled raft-GP)의 하중 재하실험 결과를 도시한 것이다. 무리말뚝기초 및 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초의 극한지지력은 Figure 7에서와 같이 단단한 점성토지반 연약한 점성토지반 모두 비슷한 값을 보이고 있다. 단단한 점성토지반의 경우 약 14MN, 연약한 점성토지반의 경우 약 2.5MN의 극한지지력을 나타나고 있으며, 침하량 증가에 따라 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초의 지지력 증가특성은 없는 것으로 확인되었다. 또한 단단한 점성토지반의 경우 침하량 증가에 따라 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초에서 지지력이 감소하는 특성이 나타나고 있다. 이는 기존의 연구에서 제안되었던 점성토지반의 말뚝지지 전면기초 실험결과와 다른 경향으로써, 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의한 지반의 강도증가 및 말뚝기초 주면마찰력 증가특성(Horikoshi and Randolph, 1996)은 본 실험 결과에서 나타나지 않고 있다. Horikoshi and Randolph(1996)는 점성토 실험지반조성 후에 지반의 슬러리화를 방지하기 위해 약 5mm(prototype: 50cm)의 사질토층을 타설하여 원심모형실험을 수행하였으며, 사질토지반을 제거하지 않은 조건에서 하중-재하 실험을 수행하였다. 따라서 말뚝지지 전면기초 상호작용 분석에 있어 말뚝기초 상부에는 사질토지반의 상호작용이 반영되어 주면마찰력의 증가특성이 나타난 것으로 사료된다.

이를 통하여 점성토지반에서의 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의한 말뚝기초의 지지력특성 변화는 크게 작용하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 기존의 연구에서 제안되었던 무리말뚝기초-지반-전면기초에 의한 지중응력 증가 및 무리말뚝기초의 지지력 증대효과는 지지력증대효과는 미미한 것으로 나타나고있다.

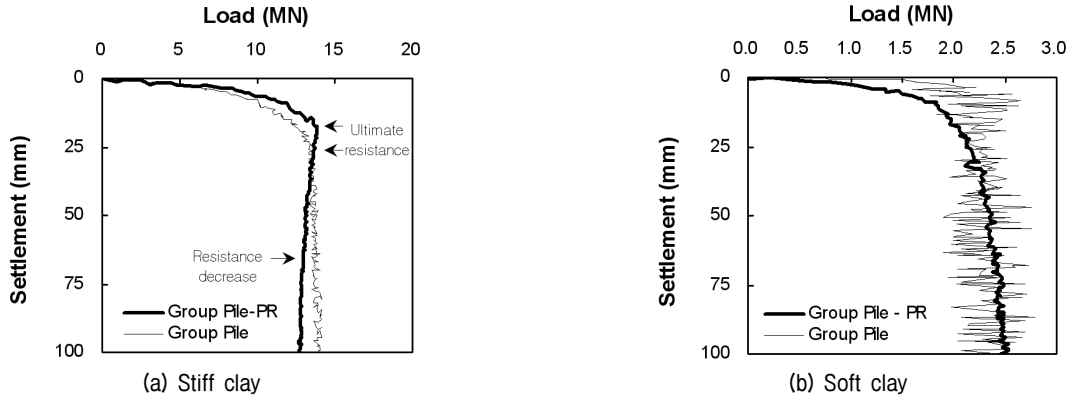


Fig. 7. Load-settlement curves of group pile and group pile at the piled raft

4.3 센서말뚝 분석을 통한 무리말뚝기초-전면기초 상호작용 분석

Figure 8는 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초에 설치된 센서 말뚝기초의 두부에서 측정한 하중-침하 곡선으로 Figure 4에서와 같이 말뚝지지 전면기초의 중앙(Center: A, A'=더미 센서말뚝기초), 가장자리(Edge: B, B'), 모서리(Corner: C, C') 말뚝기초에서 계측을 수행하였다.

단단한 점성토지반의 경우 Figure 8의 (a)에서와 같이 말뚝지지 전면기초내의 말뚝기초 위치에 따라 극한지지력과 하중-침하 특성이 다르게 나타나고 있다. 말뚝기초의 극한지지력은 중앙 말뚝기초(A)에서 약 0.7MN, 가장자리 말뚝기초(B)에서 약 0.85MN, 모서리 말뚝기초(C)에서 약 1.0MN로 측정되었으며, 중앙 말뚝기초에서 가장 작고 모서리 말뚝기초에서 가장 큰 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 경향성은 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의한 것으로 간주할 수 있다. Figure 1의 (b)에서와 같이 전면기초의 침하는 전면기초 저면지반의 수직변형을 수반하며, 이와 같은 영향이 가장 크게 작용하는 중앙 말뚝기초의 경우 주면마찰력의 저하로 극한지지력이 가장 작게 나타나게 된다. 또한 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의해 말뚝기초의 지지력이 감소하는 특성이 나타나고 있으며, Figure 8의 (a)에서와 같이 중앙 말뚝기초의 경우 극한지지력 도달이후 침하량 증가에 따라 지지력이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 Figure 1의 (b)에서 언급한 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 사료되며, 전면기초의 침하로 인하여 말뚝기초 주변의 지반에 변위장의 중첩 및 수직변위의 발생으로 말뚝기초에 부마찰력이 작용하여 지지력이 감소되는 것으로 판단된다.

연약한 점성토지반의 경우 Figure 8의 (b)에서와 같이 말뚝기초 위치에 따른 극한지지력 변화특성은 나타나지 않고 있으며, 중앙, 가장자리, 모서리 말뚝기초에서 약 0.16MN의 일정한 값이 측정되었다. 그러나 중앙 말뚝기초의 경우, 단단한 점성토지반과 마찬가지로 침하량 증가에 따라 지지력이 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 점성토지반에서 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의한 말뚝기초의 지지력 특성 변화는 위치에 따라 다르게 작용하는 것을 나타내고 있다. 중앙 말뚝기초의 경우, 최대값 이후 지지력이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 가장자리, 모서리 말뚝기초의 경우 이러한 지지력 감소효과는 나타나고 있지 않음을 알수있다.

4.4 기초 상호작용에 의한 전면기초의 지지력 변화 특성

Figure 9는 말뚝지지 전면기초에 설치된 전면기초와 단독 전면기초(unpiled raft)의 하중-침하 곡선을 도시한 것으로써, 말뚝지지 전면기초내의 전면기초 지지력은 전체 지지력에서 무리말뚝기초의 지지력을 제외한 전면기초만의 지지력으로 산정하였다. 단단한 점성토지반의 경우 2.5cm침하량 기준에서 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(PR-Raft)에는 4MN의 지지력이 작용하고 있으며, 단일 전면기초의 지지력 2.8MN에 비해 크게 나타나고 있다. 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(PR-Raft)의 지지력은 약 120mm의 침하량을 기준으로 전면기초의 지지력과 동일하게 나타나고 있으며, 이후의 영역에서는 전면기초보다 작게 나타나고 있다. 연약한 점성토지반의 경우 2.5cm침하량 기준에서 말뚝지지 전면기초

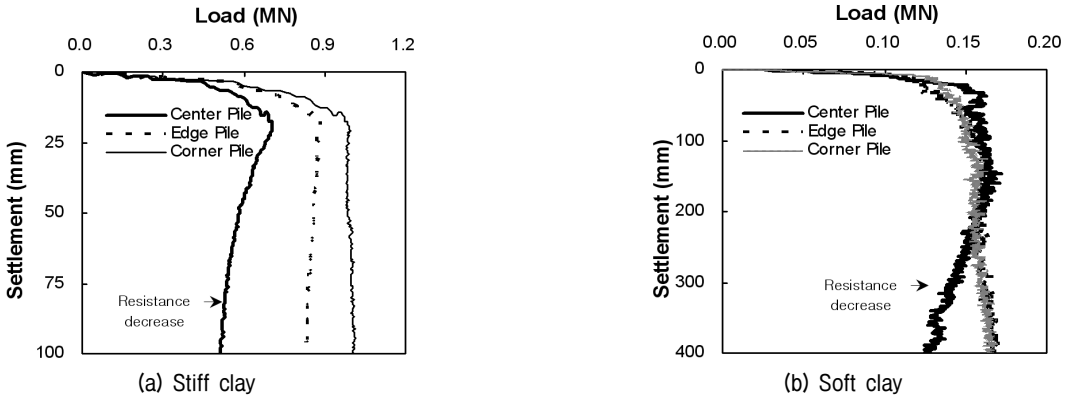


Fig. 8. Load-settlement curves of center, edge, corner pile

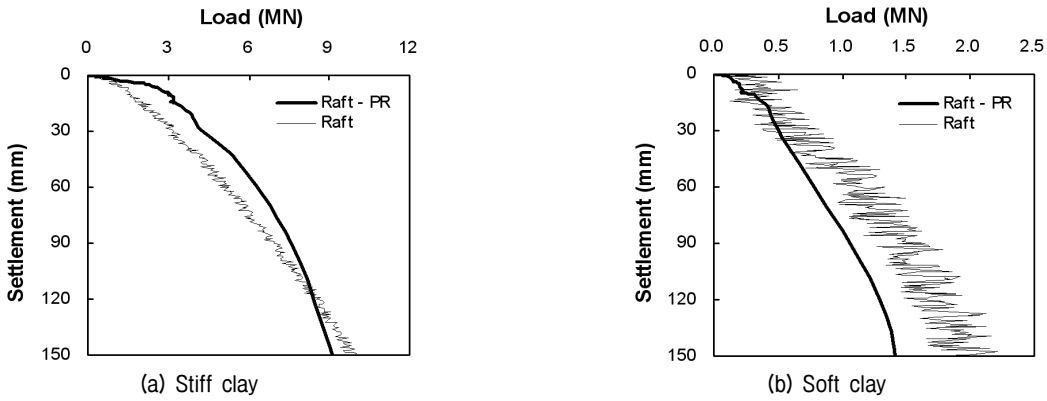


Fig. 9. Load-settlement curves of raft and raft at the piled raft (Raft-PR)

내의 전면기초(PR-Raft)에는 0.46MN의 지지력이 작용하고 있으며, 단일 전면기초의 지지력 0.53MN에 비해 적게 나타나고 있다. 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(PR-Raft)의 지지력은 침하량의 증가에 따라 전면기초의 지지력보다 적게 나타나는 경향을 보이고 있다.

이를 통하여 Figure 3의 (c)에서와 같이 전면기초 - 지반 - 말뚝기초 상호작용이 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(PR-Raft)에 미치는 영향은 크지 않는 것을 확인할 수 있으며, 점성토지반에서는 말뚝기초의 침하에 따른 전면기초 저면지반의 영향은 매우 적은 것으로 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 점성토지반을 대상으로 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 지지력요소들의 상호작용을 규명하기 위해 원심모형시험을 적용한 무리말뚝, 말뚝지지 전면기초, 전면기초, 단독 말뚝기초의 하중-재하 시험을 수행하였다. 이를 통하여 무리말뚝기초-지반, 무리말뚝기초-지반-전면기초, 전면기초-지반-무리말뚝기초의 상호작용에 따른 개별적 지지력요소들의 특성변화를 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 점성토지반에서의 무리말뚝기초 - 지반의 상호작용으로 지지력 증대효과 보다 침하량 증가 특성이 더욱 크게 작용하고 있으며, 상호작용에 무리말뚝기초의 수평방향의 법선응력 증가 및 말뚝기초의 주면마찰력 증가 효과는 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

(2) 점성토지반에서의 무리말뚝기초 - 전면기초 상호작용에 의한 말뚝기초의 지지력특성 변화는 크게 작용하지 않는 것으로 나타났으며, 기존의 연구에서 제안되었던 무리말뚝기초-지반-전면기초에 의한 지중응력 증가 및 무리말뚝기초의 지지력 증대효과는 적용되지 않는 것으로 확인되었다. 말뚝지지 전면기초 중앙에 설치된 말뚝기초의 경우 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의해 지지력이 감소하는 경향이 나타나고 있으나, 전체 무리말뚝기초 지지력의 감소량은 크지 않는 것으로 확인되었다.

(3) 점성토 지반에서의 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용으로 인한 말뚝지지 전면기초내의 전면기초의 지지력 감소특성은 나타나지 않고 있으며, 말뚝기초 침하에 따른 전면기초 저면지반의 영향은 적은 것으로 확인되었다.

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

1. Borel, S. (2001), “Comportement et dimensionnement des fondations mixtes.” Ph.D. thesis de ENPC, Spécialité Géotechnique, Paris.
2. Clancy, P. and Randolph, M. F. (1993), “An Approximate Analysis procedure for Piled Raft Foundations”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.17, pp.849-869.
3. Conte, G., Mandolini, A., and Randolph, M. F. (2003), “Centrifuge

modelingto investigate the performance of piled rafts." *Proc., Geotech. Int. Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Van Impe and Haegeman, eds., pp.379-386.
4. Cooke, R. W. (1986), "Piled raft foundations on stiff clays: A contribution to design philosophy." *Geotectonics*, 362, 169-203.
5. De Mello, V. F. B. (1969), "Foundations of buildings on clay", State of the Art Report, Proc. VII ICSMFE, Vol.1, pp.49-136.
6. Fioravante V. and Giretti. D. (2010), "Contact versus noncontact piled raft foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.3, pp.716-730.
7. Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., and Elson, W. K. (1992), "Piling engineering", *2nd edn*. Surrey University Press.
8. Fraser, R. A. and Wardle, L. J. (1976), "Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations", *Geotechnique*, Vol.26, No.4, p.613.
9. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), "Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay", *Getechnique*, Vol.46, No.4, pp.741-752.
10. Jeong, S. S. and Kim, S. I. (1998), "Interaction factors of pile groups due to downdrag", *Soils and foundations*, Vol.38, No.2, pp.49-61.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Mayne, P. W. and Poulos, H. H. (1999), "Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations.", *J. Geotech. Geoenviron Engng*, Vol.125, No.6, pp.453-460.
16. 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.
17. Phung, D. Long. (1993), "Footing with settlement-reducing piles in non-cohesive soil", Ph. D Dissertation, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology.
18. Poulos, H. G. (1989), "Pile behaviour: theory and application.", *Geotechnique*, Vol.39, No.3, pp.365-415.
19. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980). Pile foundation analysis and design. New York: Wiley.
20. Poulos, H. G. (2001), "Piled-raft foundation: design and applications", *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
21. Randolph, M. F. (1983). "Design of Piled Raft Foundations", *Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, pp.525-537.
22. 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.
23. 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.
24. Sales, M. M. (2000), "Anàlise do comportamento de sapatas estaqueadas" Ph.D. thesis em Geotecnia, Univ. de Brasilia.
25. 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. 5. 2, 심사완료일 2012. 9. 19)