

원심모형실험을 통한 사질토 지반에서의 말뚝지지 전면기초 상호작용 분석

Analysis of Piled Raft Interactions in Sand with Centrifuge Test

박 동 규¹ Park, Dong-Gyu

최 규 진² Choi, Kyu-Jin

이 준 환³ Lee, Jun-Hwan

Abstract

In the design of a piled raft, the axial resistance 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, act as a key element changing resistances of the raft and group piles. In this study, a series of centrifuge model tests have 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) in sands with different relative densities. The test results revealed that the increase of settlement resistance occurs separately with settlement by group pile - soil interactions. The axial resistance of group piles (at piled raft) increases by group pile - raft (pile cap) interactions and that of raft (at piled raft) decreases by group pile - raft (pile cap) interactions.

요 지

말뚝지지 전면기초는 무리말뚝과 전면기초의 지지력을 함께 설계에 적용할 수 있는 기초형식이다. 그러나 변위장 증첩과 구속응력의 증가 등으로 대변되는 무리말뚝 - 지반 - 전면기초 상호작용으로 인해 각각의 무리말뚝기초와 전면기초의 지지력 특성은 변화하게 되며, 이는 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, 조밀하고 느슨한 사질토 지반에서의 무리말뚝-지반, 무리말뚝-지반-전면기초의 상호작용을 하중단계에 따른 지지력 특성변화를 기준으로 분석하였다. 실험결과 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 무리말뚝기초의 지지력은 증가하는 것으로 나타났으며, 전면기초의 경우 무리말뚝의 영향에 의해 지지력이 감소하는 것으로 확인되었다.

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

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 (Member, Prof., 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 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

대규모 구조물의 기초로써 자주 적용되는 말뚝지지 전면기초는 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지지력과 무리말뚝기초의 지지력을 함께 설계에 반영할 수 있는 경제적인 기초형식이다. 그러나 동일한 지반을 대상으로 각각 다른 지지력 메커니즘을 갖는 무리말뚝기초와 전면기초가 함께 설치되는 말뚝지지 전면기초의 특성에 의해 변위장의 중첩과 구속응력의 증가 등의 상호작용이 발생하며 각각의 무리말뚝기초와 전면기초의 지지력 특성은 변화하게 된다. 이와 같은 말뚝지지 전면기초 상호작용의 불확실성으로 인해 말뚝지지 전면기초의 설계 및 설계 시방서에 있어 전면기초의 지지력에 의한 하중 분담효과 및 침하량 억제 특성들은 반영되지 못한 과다 설계가 이루어지고 있다(Poulos, 2001).

Liu 등(1985)과 Phung(1993)은 사질토지반에서 수행한 무리말뚝, 단독 말뚝기초, 말뚝지지 전면기초 현장시험을 토대로 전면기초, 무리말뚝 기초의 상호작용을 분석하였으며, 개별적 지지력 요소들의 합산으로 말뚝지지 전면기초의 지지력 산정법을 제안하였다. Randolph와 Wroth(1978)은 말뚝기초에 작용하는 하중에 의해 말뚝기초 주변의 지반에 방사형의 수직침하가 발생하며, 이를 산정하기 위해 말뚝기초의 중심을 기준으로 반경에 따른 지반 침하량 산정식을 제안하였다. Lee 등(2007)은 Randolph와 Wroth(1978)의 산정법을 수정하여 무리말뚝기초에서의 변위장 중첩, 말뚝기초와 지반 접촉면의 미끄럼 현상 및 말뚝기초-지반-전면기초의 상호작용을 반영한 말뚝지지 전면기초 근사해석 프로그램을 개발하였다.

Lee 등(2001)은 사질토지반에서 수행된 말뚝지지 전면기초 현장시험을 통하여 말뚝기초-지반-전면기초의 상호작용에 의해 무리말뚝기초의 극한지지력이 증가하는 특성을 확인하였다. Lee 등(2000)과 Lee와 Chung(2003)은 말뚝지지 전면기초의 모형실험을 통하여 말뚝기초의 위치에 따른 상호작용을 분석하였으며, 중앙(Center), 가장자리(Edge), 모서리(Corner)에서의 말뚝기초 - 지반 - 전면기초의 상호작용을 반영한 극한지지력 산정법을 제안하였다. 그러나 사질토지반의 조밀하고 느슨한 정도에 따른 말뚝지지 전면기초의 상호작용 및 하중단계에 따른 상호작용 특성변화를 반영한 무리말뚝기초와 전면기초의 지지력 특성변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 많은 연구들이 극한상태에서의 말뚝지지

전면기초 상호작용 및 지지력산정에 연구의 주안점을 두고 있어 실질적인 설계 기준인 허용침하량 내에서의 상호작용과 개별 지지력 요소들의 특성 변화에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 지지력요소들의 상호작용을 규명하기 위해 원심모형시험을 적용한 단독 말뚝기초, 전면기초, 무리말뚝기초, 말뚝지지 전면기초의 하중-재하 시험을 수행하였으며, 조밀한 사질토지반과 느슨한 사질토지반을 대상으로 동일한 실험조건을 반영하여 지반 조건에 따른 상호작용 특성변화를 분석하고자 하였다. 말뚝지지 전면기초의 상호작용은 각각 무리말뚝기초-지반, 무리말뚝-지반-전면기초의 상호작용으로 구분하여 각각의 영향인자 및 하중단계에 따른 기초의 하중-침하 특성을 분석하였다.

2. 말뚝지지 전면기초의 상호작용

2.1 말뚝지지 전면기초 개요

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). 말뚝지지 전면기초는 Fig. 1과 같이 무리말뚝-지반-무리말뚝, 무리말뚝-지반-전면기초 사이의 상호작용이 각각 발생하며, 무리말뚝의 깊이, 전면기초의 폭, 무리말뚝의 간격 등에 따라 각 기초요소의 지지력 특성이 변화하게 된다(Liu 등, 1985).

Poulos(2001)는 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력 산

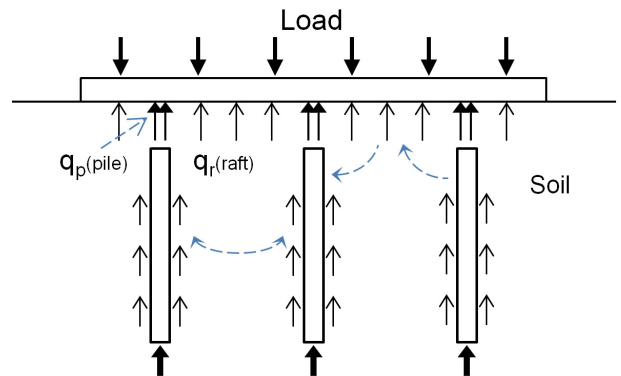


Fig. 1. Piled raft interaction (Katzenbach et al., 1998, 2000)

정에 있어 각각의 개별적인 무리말뚝기초의 극한지지력과 말뚝 캡 부분에 의해 지지되는 전면기초의 극한지지력의 단순 합산을 통하여 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 산정법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$Q_{PR} = Q_R + Q_P \quad (1)$$

여기서, Q_{PR} 는 말뚝지지 전면기초의 극한지지력, Q_R 는 무리말뚝 기초의 말뚝 캡(전면기초)에 의해 지지되는 극한 지지력, Q_P 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 (1)에 포함되어 있는 지지력의 요소로써 적용하기에는 한계점들이 있다.

2.2 말뚝지지 전면기초의 상호작용

말뚝지지 전면기초는 동일한 지반을 대상으로 각각 다른 지지력 메커니즘을 갖는 무리말뚝기초와 전면기초(말뚝 캡)가 함께 설치되는 기초형식으로 하중 재하시 지지력 메커니즘의 중첩으로 상호작용이 발생한다. 말뚝지지 전면기초의 지지력 요소로써 작용하는 무리말뚝기초와 전면기초(말뚝 캡)의 경우 동일한 기초 및 지반 조건에서의 무리말뚝기초 및 전면기초와는 다른 거동특성을 갖게 된다. 말뚝지지 전면기초의 상호작용은 Fig. 2에서와 같이 무리말뚝기초와 지반, 말뚝 기초와 전면기초의 상호작용으로 분류할 수 있다.

Fig. 2의 (a)는 무리말뚝기초와 지반 사이에 발생하는 상호작용으로 말뚝기초에 작용하는 재하하중이 지반으로 전달되어 인접한 다른 말뚝기초에 추가적인 수직방향의 응력이 작용하게 된다. 무리말뚝기초 사이에 발생하는 변위장 중첩으로 말뚝기초의 침하량은 말뚝기초 자체의 침하량과 주변 말뚝기초의 변위장 영향에 의해 발생하는 지반침하로 단독 말뚝기초에 비해 추가적인 침하가 발생한다(Randolph와 Wroth, 1978). 또한 무리말뚝기초에 작용하는 하중의 지반전달은 지중의 응력을 증가시켜 무리말뚝기초의 수평방향의 범선응력이 증가하게 되며, 말뚝기초의 주변마찰력이 증가하는 효과가 발생하게 된다(Phung, 1993; Lee와 Chung 2003).

Fig. 2의 (b)는 말뚝기초와 전면기초 사이에 발생하는

상호작용으로 전면기초 재하하중은 지반으로 전달되어 말뚝기초 주변 지반의 침하 및 수직응력 증가로써 작용하게 되며, 침하량 증가 및 부마찰력 현상이 발생하게 된다. 또한 전면기초에 작용하는 하중은 지중의 응력상태를 증가시켜 말뚝기초의 수평방향 범선응력이 증가하게 되며, 말뚝기초의 주변 마찰력을 증대시키는 효과를 발생하게 된다. Fig. 2의 (c)는 전면기초와 말뚝기초 사이에 발생하는 상호작용으로 하중재하에 따른 말뚝기초 침하로 주변 지반의 수직변형이 발생하며, 저면지반의 침하는 말뚝지지 전면기초 내의 전면기초(말뚝 캡) 지지력에 영향을 미치게 된다.

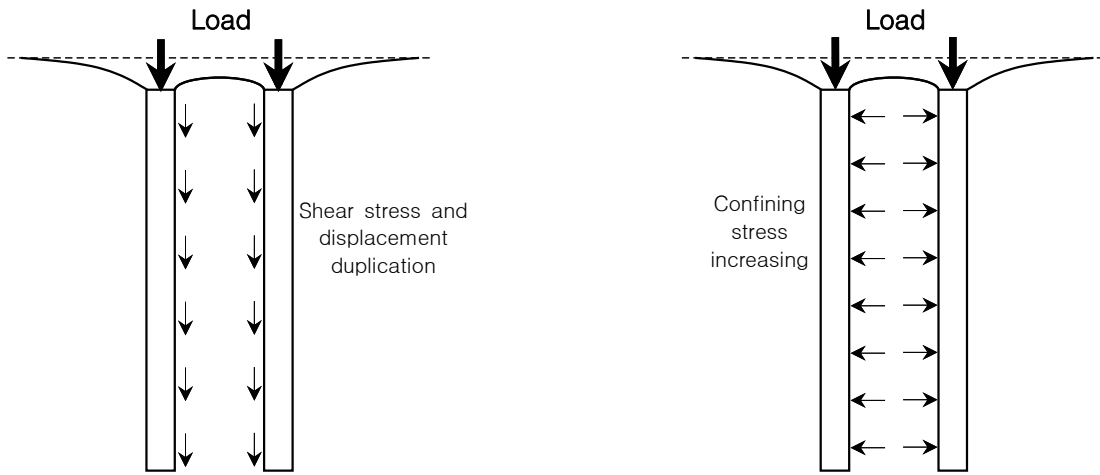
그러나 실제 말뚝지지 전면기초 거동특성에 있어 무리말뚝기초 및 전면기초의 지지력을 증가시키는 상호작용과 감소시키는 상호작용 효과는 동시에 복합적으로 발생하게 되어 전체 지지력의 변화를 예측하는 것은 매우 어렵다. 또한 무리말뚝내의 말뚝의 위치, 말뚝의 설치효과 등 다양한 효과들에 있어 상호작용의 변화는 명확히 분리되어서 설계에 반영되어야 한다.

2.3 사질토 지반에서의 말뚝지지 전면기초의 상호작용

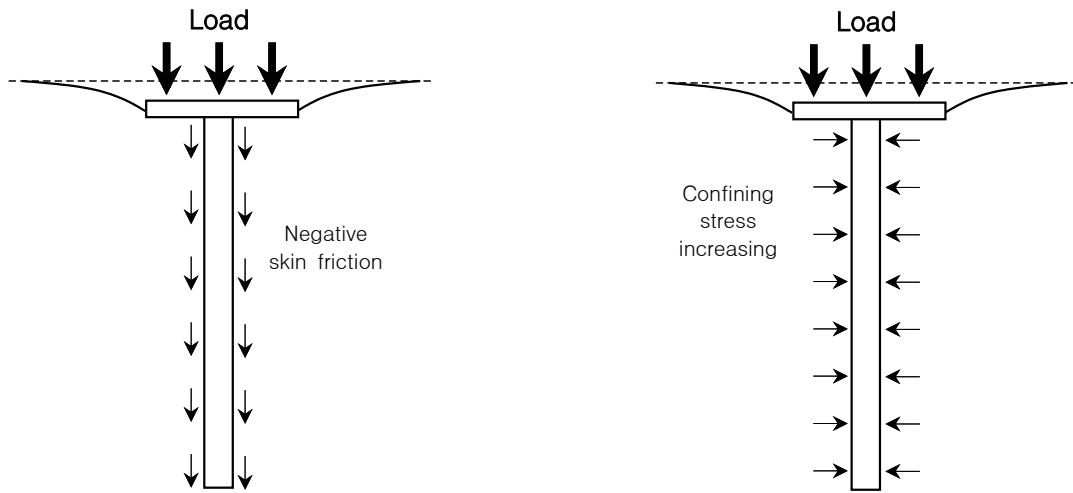
Liu 등(1985)은 총 51개의 무리말뚝기초와 23개의 단독 말뚝 현장시험을 통하여 무리말뚝기초의 거동특성, 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 분석하였으며, 이를 토대로 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡(전면기초)과 말뚝기초의 주변마찰력, 선단 지지력 등의 상호작용을 규명하였다. 또한 대규모의 무리말뚝기초, 단독 말뚝기초의 현장시험결과 및 군말뚝 효과, 말뚝지지 전면기초에서 전면기초에 의한 지반-말뚝의 상호작용을 고려한 설계방법을 제안하였으며 각각의 개별적인 요소의 합을 통하여 전체 말뚝지지 전면기초의 극한지지력을 산정하는 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$Q_{PR} = Q_{GP,s} + Q_{GP,p} + Q_R = \eta_s n q_s + \eta_p n q_p + Q_R \quad (2)$$

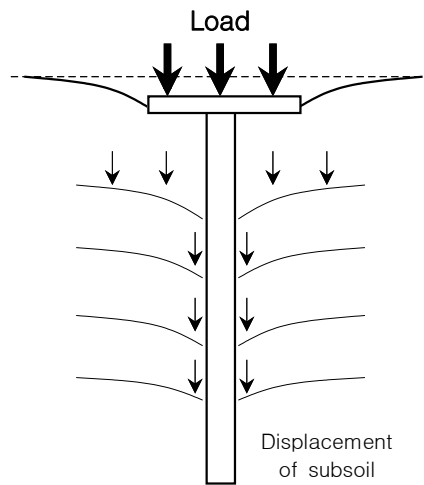
여기서 Q_{PR} , $Q_{GP,s}$, $Q_{GP,p}$, Q_R 는 말뚝지지 전면기초, 말뚝지지 전면기초 내에 설치된 무리말뚝기초의 주변마찰력, 선단지지력, 전면기초(말뚝기초 캡)의 지지력을 나타내며, 이는 다음과 같이 단말뚝 기초의 주변마찰력(q_s)과 선단지지력(q_p)과 무리말뚝기초의 말뚝기초 개수(n), 그리고 각각의 주변마찰력과 선단지지력의 말뚝지지 전면기초 상호작용계수(η_s , η_p)을 통하여 산정할 수



(a) Group pile-soil interaction



(b) Group pile-soil-raft interaction



(c) Raft-soil-group pile interaction

Fig. 2. Piled raft interaction

있도록 제안하였다.

Lee 등(2000)과 Lee와 Chung(2003)은 4×4 행렬의 말뚝 배열을 가지는 말뚝지지 전면기초의 모형시험을 통

하여 말뚝지지 전면기초의 지반-전면기초-무리말뚝의 상호작용에 대해 규명하였으며 각각의 요소에 대한 상호작용 계수를 통하여 식 (3)과 같이 말뚝지지 전면기초

의 극한지지력 산정법을 제안하였다.

$$Q_{PR} = n_c (\eta_{1sc} \eta_{2sc} \eta_{3sc} Q_{P,s} + \eta_{1pc} \eta_{2pc} \eta_{3pc} Q_{P,p}) + n_e (\eta_{1sc} \eta_{2sc} \eta_{3sc} Q_{P,s} + \eta_{1pc} \eta_{2pc} \eta_{3pc} Q_{P,p}) + \eta_4 Q_R \quad (3)$$

여기서, n_c 와 n_e 는 각각 중앙부 말뚝과 외곽부 말뚝의 개수, η_{isc} , η_{ipc} , η_{isc} , η_{ipe} ($i=1, 2, 3$)는 말뚝 위치에 따른 말뚝기초-지반과 지반-전면기초-말뚝기초의 상호작용을 고려하는 주변마찰력과 선단지지력에 대한 영향계수[자세한 계수 설명은 Lee와 Chung(2003) 참조], η_4 는 말뚝지지 전면기초의 전면기초-말뚝기초 상호작용을 고려하는 영향계수, $Q_{P,s}$ 와 $Q_{P,p}$ 는 무리말뚝과 동일한 지반조건에 설치된 단말뚝 기초의 설계 침하량에서의 주변마찰력과 선단지지력, Q_R 는 캡과 동일한 크기의 전면기초의 설계침하량에서의 지지력이다.

그러나 최근의 말뚝지지 전면기초 연구사례에 의하면 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 말뚝 캡(전면기초)의 지지력은 동일한 조건에서의 수행된 전면기초의 지지력에 비해 작게 나타나고 있으며, 무리말뚝기초의 개수가 증가할수록 지지력의 감소폭이 더욱 크게 나타나는 경향을 보이고 있다(Fioravante, 2010). 또한 말뚝지지 전면기초의 하중단계에 따라 전면기초-지반-말뚝기초의 상호작용에 의해 개별적인 지지력 요소들의 거동특성이 다르게 나타나고 있다(Fioravante, 2010). 따라서 (2)와 (3)과 같이 극한상태 기준에서 제안된 상호작용을 통하여 전반적인 말뚝지지 전면기초의 거동특성을 하기에는 제한점들이 존재하며, 실질적인 설계기준으로 적용되는 허용침하량 범위 25.4mm(Meyerhof,

1956)내에서의 말뚝지지 전면기초 상호작용을 설계에 적용해야 한다.

3. 말뚝지지 전면기초 원심모형 수행

3.1 원심모형시험 개요

본 연구에서는 실제 규모에서의 말뚝지지 전면기초 상호작용 분석을 위해 원심모형시험을 적용한 하중재하실험을 수행하였으며, 국내 교량기초에서 자주 적용되는 PHC 말뚝기초를 모형화 하여 말뚝지지 전면기초의 거동특성 변화를 분석하였다. 이를 위해 분산 공유실험 시스템인 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터내의 원심모형시험기[자세한 제원은 Kim et al.(2012) 참조]를 활용하였으며, 각각의 단독 말뚝기초, 전면기초, 무리말뚝기초, 말뚝지지 전면기초의 하중 재하시험을 수행하여 상호작용에 따른 전면기초와 무리말뚝기초의 하중-침하 특성 변화를 분석하고자 하였다. 자세한 실험조건 및 실제 규모에서의 각각의 기초조건은 Table 1과 같으며, 조밀한 사질토지반, 느슨한 사질토지반을 대상으로 총 8 세트의 원심모형실험을 수행하였다.

실제 규모에서의 말뚝기초의 역학적 거동을 실험에 반영하기 위해 Table 2와 같이 원심모형시험 상사비를 적영하여 모형기초를 제작하였으며, 실험 수행 가속도인 60g를 기준으로 역학적 상사비를 적용하여 원심모형 실험에 반영하였다. 각각의 실험에서 적용된 모형기초는 알루미늄 합금(Aluminum alloy)를 적용하여 제작하였으며 단말뚝기초 및 말뚝지지 전면기초에 적용된 말

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)	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	Raft (9m×9m)	Dense sand	7	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Dense sand
4	Raft (9m×9m)	Loose sand	8	Piled raft (4×4, D=600mm, s=4D, L=15m)	Loose sand

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

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

뚝기초는 외경 10mm, 내경 8mm, 길이 250mm의 중공관으로 제작하여 60g 실험조건에서 길이 15m, 외경 600mm, 두께 120mm의 PHC 무리말뚝, 단독말뚝기초 특성을 실험에 반영되도록 하였다. 전면기초와 말뚝지지 전면기초의 말뚝 캡(전면기초), 무리말뚝기초의 말뚝 캡은 모두 150mm로 제작하여 실제 규모 9m의 정사각형 기초가 반영되도록 하였으며, 무리말뚝기초와 말뚝지지 전면기초의 간격은 40mm로 제작하여 60g 조건에서 말뚝기초 간격 2.4m(4D; D=0.6m) 4×4 배열의 16개 말뚝기초의 거동이 반영되도록 하였다. 무리말뚝기초의 경우 270mm의 길이로 말뚝기초를 제작하여 말뚝지지 전면기초와 동일한 근입조건(250mm)에서 말뚝캡과 지반이 접합하지 않는 조건에서 하중재하실험이 수행되도록 실험 조건을 적용하였다.

말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초에는 Fig. 3의 (a)와 같이 제작된 센서말뚝기초를 설치하였으며, 말뚝기초 벽면에 변형률계를 부착하여 재하하중 단계에 따른 하중-전이 특성을 분석할 수 있도록 하였다. 말뚝지지 전면기초내의 말뚝기초의 위치, 재하하중 단계에 따른 무리말뚝기초 - 지반 - 전면기초의 상호작용 및 지지력특성 변화를 분석하기 위해 Fig. 3의 (b)와 같이 중앙(Center: A), 가장자리(Edge: B), 모서리부분(Corner: C)으로 분류하여 센서말뚝을 설치하였다. 또한 총 6개의 센서말뚝(A, A':더미 센서말뚝기초; B, B'; C, C')을 Fig. 3의 (b)에서와 같이 Center, Edge, Corner부분의 대응되는 부분에 동일한 더미 센서말뚝을 설치하여 센서 손상

에 따른 데이터 손실을 최소화 하였다.

3.2 원심모형시험 모형지반 조성 및 실험절차

본 연구에서 사질토 지반에서의 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석하기 위하여 조밀한 경우의 지반(상대밀도 74%)과 느슨한 경우의 지반(상대밀도 42%)을 대상으로 실험을 수행하였다. 사질토 지반의 조성을 위하여 Fig. 4와 같이 이동식 강사장치를 활용하였으며, 강사량과 강사 높이를 조절하여 조밀하고 느슨한 경우의 실험지반을 조성하였다. 모형지반의 깊이방향 균질성 확보를 위해 5mm~10mm 정도의 얇은 층을 반복적으로 강사하는 방법을 적용하였으며, 이동식 강사장치를 통하여 형성되는 모형지반 층의 두께 만큼 강사장치의 높이를 계속적으로 증가시켜 동일한 높이에서 강사가 이루어지도록 하였다. 모형지반 조성을 위한 토조는 직경 900mm, 높이 400mm의 원형으로써 실험에 적용된 중력가속도 60g 조건에서 각각 54m, 24m의 지반조건을 실험에 반영하도록 하였다. 사질토 지반에 적용된 규산질 모래의 기본물성치는 최대건조단위중량 $\gamma_{d,max} = 16.12 kN/m^3$, 최소건조단위중량 $\gamma_{d,min} = 12.19 kN/m^3$, $D_{50} = 0.21 mm$, 균등계수 $C_u = 1.96$, 200번체 통과량은 1%, 한계상태 내 부마찰각 $\phi_c = 33^\circ$ 이다.

원심모형실험은 다음과 같이 3 단계로 구분되어 수행되었다.

- ① 원심모형실험을 위한 기초지반의 조성.
- ② 모형기

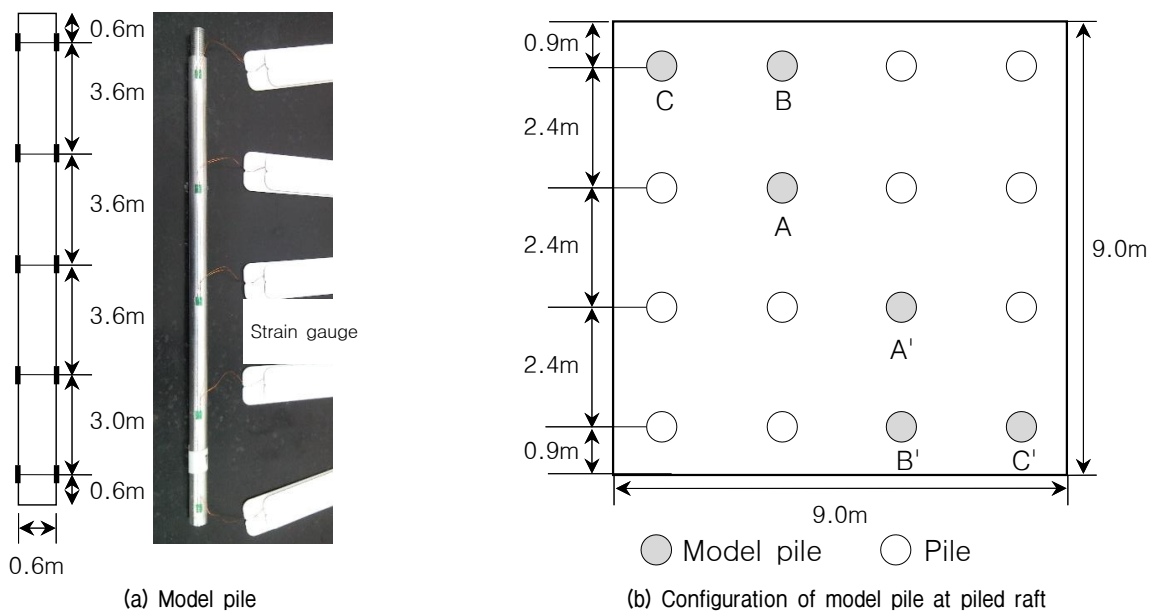


Fig. 3. Model pile and Configuration of model piles at piled raft

초의 관입 및 계측장비의 설치. ③ 실험목표가속도 60g에서의 하중재하실험 수행. 지반조성이 완료된 실험토조를 원심모형실험기로 이동하여 Fig. 5와 같이 가속도



Fig. 4. Sand specimens with raining method with a sand diffuser

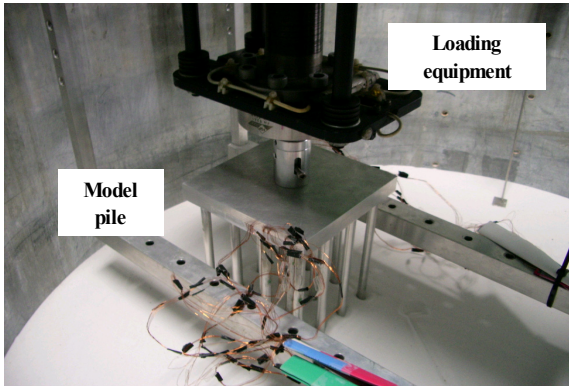


Fig. 5. Piled raft installation

1g 상태에서 모형기초를 지반에 관입하였으며, 하중재하기 및 계측장치들을 설치하였다. 각각의 기초에 대한 하중재하실험은 Fig. 6에서와 같이 3가지 기초형식에 대해 순차적으로 수행하는 방법을 적용하였으며, 기초의 하중재하실험이 완료된 후 실험기초를 제거한 뒤 다음 순서의 기초를 관입하여 동일한 조건에서 실험이 진행되도록 하였다. 실험 수행에 의한 지반의 교란정도를 최소화 하기위해 단독 말뚝기초, 무리말뚝기초, 말뚝지지 전면기초의 순서로써 진행하였으며, Fig. 6과 같이 배치하여 경계조건 및 선행실험에 의한 영향을 최소화 하고자하였다. 전면기초의 하중재하 실험은 동일한 지반조건을 적용한 추가적인 실험을 통하여 수행하였으며, 기초의 배치는 말뚝지지 전면기초와 동일하게 적용하였다. 또한 무리말뚝기초와 말뚝지지 전면기초의 하중재하실험은 근입깊이(250mm, 60g 조건에서 15m)에서의 결과비교를 위하여 6의 (b)에서와 같이 말뚝지지 전면기초(PR)의 경우 250mm의 근입조건에서 전면기초가 지반에 완전히 접합되도록 하였으며, 무리말뚝기초의 경우 250mm 근입된 조건에서 실험지반과 말뚝캡 사이에 20mm의 이격을 두어 하중재하실험 수행중 말뚝캡과 지반의 접촉이 발생하지 않도록 하였다. 각각의 모형기초 하중재하실험에 있어 원심모형실험기의 하중재하장치가 지원하는 최대하중 범위(45kN) 까지 수행하였으며, 극한지지력보다 상회하는 경우 실험이 가능한 최대 침하량 범위(무리말뚝기초: 10mm, prototype: 600mm;

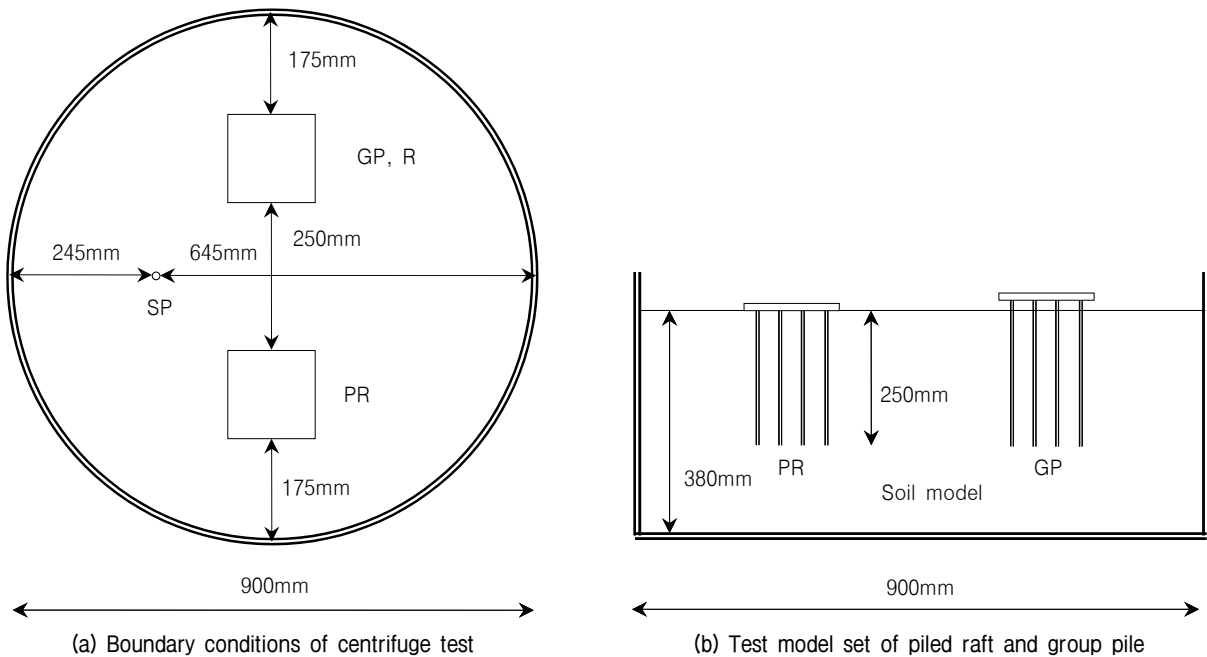


Fig. 6. Boundary conditions and test model set-up for loading tests

단독 말뚝기초: 5mm, prototype: 300mm, 말뚝지지 전면 기초:극한지지력 도달 기준; 전면기초: 극한지지력 도달 기준) 까지 실험을 수행하였다. 또한 모든 기초의 하중 재하 실험에서 속도변위 제어(0.04mm/s)를 통하여 하중 재하 실험을 수행하였다.

4. 말뚝지지 전면기초 상호작용에 의한 무리말뚝 기초의 지지력 특성변화 분석

4.1 무리말뚝기초 - 지반의 상호작용 분석

Fig. 7은 본 연구에서 수행한 무리말뚝기초(Group Pile, GP)와 무리말뚝기초의 개수(16) 만큼 지지력을 증가시킨 단독 말뚝기초(단독 말뚝기초의 지지력×16배; 16*SP) 하중재하 실험 결과를 도시한 것이다. 초기 재하하중에서는 Fig. 7에서와 같이 무리말뚝기초와 지지력을 16배 증가시킨 단독 말뚝기초의 하중-침하 곡선이 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 재하하중 증가에 따라 무리말뚝기초의 침하량이 점차적으로 16*SP의 침하량보다 증가하는 특성을 보여주고 있으며, 이와 같은 경향은 조밀한 사질토지반과 느슨한 사질토지반에서 동일하게 발생하고 있다.

극한상태 기준에서의 지지력특성은 Brinch-Hansen(1961)의 방법에 의해 추정되었으며, Fig. 7에서와 같이 사질토지반의 조밀하고 느슨한 정도에 따라 무리말뚝기초의 효율은 다르게 나타나고 있다. 조밀한 사질토지반의 경우 Fig. 7의 (a)에서와 같이 무리말뚝기초의 극한지지력과 16*SP의 극한지지력이 유사한 것으로 확인되고 있으며, 무리말뚝기초의 극한지지력 산정 시 적용되는 무리말뚝기초의 효율은 근사적으로 단위 값인 1로 간주할

수 있다. 이는 Kishida와 Meyerhof(1965)에 의해 제안된 조밀한 사질토지반에서의 무리말뚝기초 효율 $1(d/D=4, d: 무리말뚝기초의 간격, D: 말뚝기초의 직경, \phi = 41^\circ)$ 과 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 느슨한 사질토지반의 경우 무리말뚝기초의 극한지지력이 16*SP에 비해 크게 나타나고 있으며, 무리말뚝기초의 효율은 약 1.12로 산정되고 있다. 이와 같이 느슨한 사질토지반에서 무리말뚝기초의 효율이 1보다 크게 나타나는 것은 무리말뚝효과에 의해 말뚝기초 주변의 사질토가 조밀해지는 특성에 의한 것으로서, Kishida와 Meyerhof (1965)가 제안한 느슨한 사질토지반에서 무리말뚝기초의 효율을 $1.2(d/D=4, d: 무리말뚝기초의 간격, D: 말뚝기초의 직경, \phi = 36^\circ)$ 에 비해 작은 값이 나타나고 있다.

이를 통하여 무리말뚝기초-지반의 상호작용은 침하량 및 재하하중을 기준으로 다르게 작용하는 것을 확인할 수 있다. 초기 하중조건에서는 무리말뚝기초-지반의 상호작용이 발생하지 않으며, 재하하중 증가에 따라 Randolph와 Wroth(1978)가 제안한 변위장 중첩효과가 발생하여 무리말뚝기초의 침하량이 16*SP에 비해 크게 나타나게 된다. 그러나 지속적인 침하량 증가는 무리말뚝의 지지력을 증가시키는 요소로써 작용되며, 무리말뚝기초-지반의 상호작용에 의해 무리말뚝기초의 극한지지력은 16*SP와 유사(조밀한 사질토지반)하거나 더욱 크게(느슨한 사질토지반) 나타나게 된다.

4.2 무리말뚝기초 - 전면기초 상호작용 분석

Fig. 8은 사질토 지반에서 수행된 무리말뚝기초(Group Pile, GP)와 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초(Piled raft-GP)의 하중 재하실험 결과를 도시한 것이다. Fig. 8

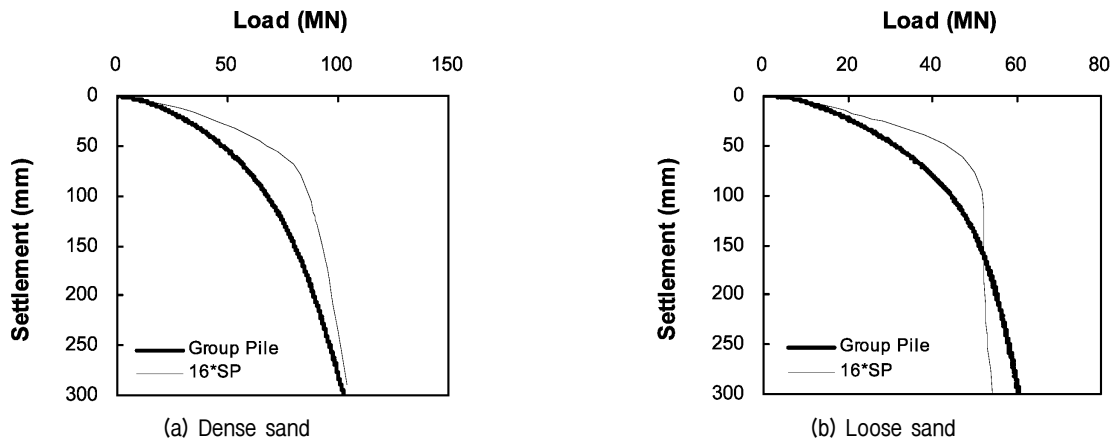


Fig. 7. Load-settlement curves of group pile and 16 × single pile

에서와 같이 조밀한 사질토지반, 느슨한 사질토 지반 모두 초기 재하하중 단계에서는 무리말뚝기초와 말뚝지지 전면기초 내의 무리말뚝기초의 하중-침하 특성이 동일한 것으로 나타나고 있다. 그러나 재하하중의 증가에 따라 무리말뚝기초-지반-전면기초의 상호작용이 발생하여 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초(Piled raft-GP) 지지력이 동일한 조건에서의 무리말뚝기초(GP)의 지지력에 비해 증가되는 특성이 나타나고 있다. 조밀한 사질토지반의 경우 약 70mm의 침하량을 기준으로 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초(Piled raft-GP)의 지지력이 무리말뚝기초(GP)의 지지력에 비해 크게 나타나는 특성이 확인되고 있으며, 느슨한 사질토 지반의 경우 약 100mm의 침하량을 기준으로 동일한 경향이 나타나고 있다. 무리말뚝기초 - 전면기초 상호작용에 의한 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초(Piled raft-GP) 지지력 증가량은 조밀한 사질토지반에서 크게 나타나고 있으며, 느슨한 사질토지반의 경우 지지력 증가폭이 크지 않는 것으로 나타나고 있다.

따라서 무리말뚝기초 - 전면기초의 상호작용은 초기 재하하중 단계에서는 나타나지 발생하지 않는 것으로 사료되며, 말뚝지지 전면기초에 충분한 하중이 작용(조밀한 사질토 지반: 약 60MN, 느슨한 사질토 지반: 약 55MN)하여 전면기초(말뚝 캡)에 의한 지중응력이 상당 부분 증가된 조건에서 작용하는 것으로 판단된다. 또한 사질토지반의 조밀하고 느슨한 정도에 따라 상호작용에 의한 지지력 증가특성은 다르게 나타나고 있으며, 조밀한 사질토지반, 느슨한 사질토 지반 모두 전면기초의 접지압이 크게 작용하는 조건에서 발생하는 것으로 해석될 수 있다. 그러나 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용

은 많은 침하(조밀한 사질토지반: 70mm, 느슨한 사질토지반: 100mm)가 발생한 후에 작용하는 특성을 보이고 있으며, 실질적인 설계기준으로 적용되는 허용침하량 범위에서는 작용하지 않는 것으로 사료된다.

4.3 센서말뚝 분석을 통한 무리말뚝기초-전면기초 상호작용 분석

Fig. 9는 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초에 설치된 센서 말뚝기초의 두부에서 측정된 하중-침하 곡선으로 Fig. 3의 말뚝지지 전면기초 Center, Edge, Corner 말뚝기초에서 계측된 지지력과 전체 침하량을 기준으로 도시하였다. Fig. 9에서와 같이 말뚝지지 전면기초내의 말뚝기초 하중-침하 특성은 말뚝기초의 위치에 따라 다르게 나타나고 있으며, 기존 연구에서 수행된 사질토지반에서의 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용 특성과 동일한 경향을 보여주고 있다(Liu, 1985; Lee 등, 2000; Lee와 Chung, 2003; Lee 등, 2001).

조밀한 사질토지반의 경우 Fig. 9의 (a)에서와 같이 Corner 말뚝기초의 지지력이 가장 작게 나타나고 있으며, Edge 말뚝기초에서 가장 큰 지지력이 확인되고 있다. 또한 침하량이 증가에 따라 Center, Edge, Corner의 말뚝기초 모두 지지력이 계속적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며, Center와 Edge의 말뚝기초에서 증가폭이 더욱 크게 나타나고 있다. 느슨한 사질토지반의 경우 초기 재하하중 단계에서는 Center, Edge, Corner 말뚝기초 모두 동일한 하중침하 특성을 보이고 있다. 그러나 Fig. 9의 (b)에서와 같이 약 100mm의 침하량을 기준으로 각각 말뚝기초의 하중-침하 특성은 변화하고 있으며,

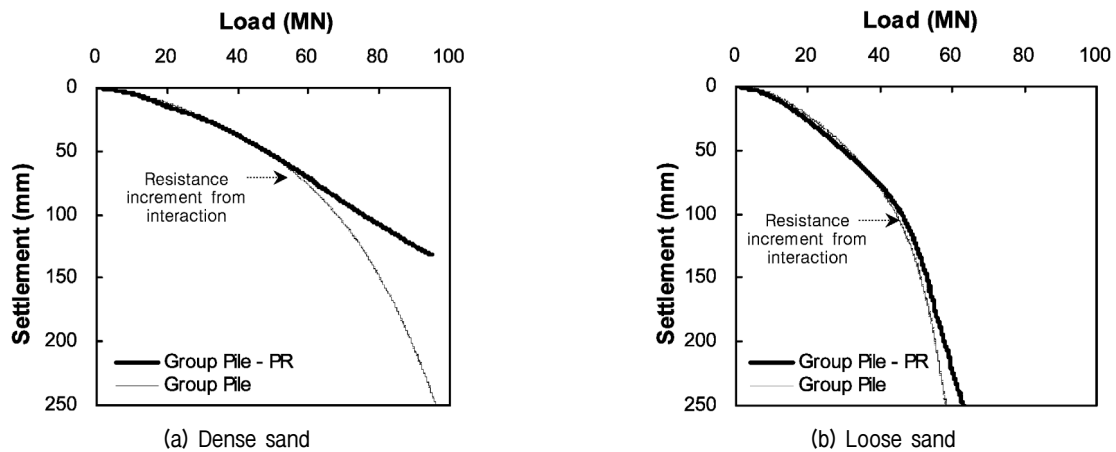


Fig. 8. Load-settlement curves of group pile and group pile at the piled raft

침하량 증가에 따라 Center의 말뚝기초의 지지력이 점차 증가하여 Edge 말뚝기초의 지지력보다 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 조밀한 사질토지반에서와 같이 Corner 말뚝기초의 지지력이 가장 작게 나타나고 있다.

이와 같이 Center 및 Edge 말뚝기초에서 지지력이 크게 나타나고 있는 것은 무리말뚝기초 - 지반의 상호작용에 의해 말뚝기초 주변의 사질토지반이 조밀해지는 특성(Kishida와 Meyerhof, 1965)과 전면기초 - 지반 - 무리말뚝의 상호작용에 의한 지중응력 증가특성 등의 복합적인 영향에 의한 것으로 사료된다. 전면기초 - 지반 - 말뚝기초의 상호작용은 지반과 전면기초 사이의 접지압(contact pressure)에 의해 발생하는 것으로서, 전면기초에 작용하는 하중의 지반전달로 말뚝기초 주변 지반의 지중응력을 증가시키며, 말뚝기초 주변의 수직응력 증가로 말뚝기초의 주변마찰력은 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 증가하게 된다. 이와 같은 특성은 상대적으로 전면기초와의 접합면이 작은 Corner 말뚝기초에서의 영향은 크게 나타나지 않게 되며, Center, Edge 말뚝기초에서 크게 나타나게 된다(Lee 등, 2001). 또한 Fig. 8에서 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용이 나타나는 침하량(조밀한 사질토지반: 70mm, 느슨한 사질토지반: 100mm)을 기준으로 Center와 Edge 말뚝기초에서 계속적으로 지지력이 증가하는 것은 말뚝지지 전면기초 상호작용에 의한 주변마찰력 증가특성에 의한 것으로 사료되며, 전면기초에 작용하는 하중이 증가할수록 지반의 지중응력 또한 계속 증가하여 말뚝기초의 지지력이 수렴하지 않고 증가하는 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 10과 11은 말뚝지지 전면기초내의 무리말뚝기초

에 설치된 센서말뚝 기초와 단독 말뚝기초에서 측정된 말뚝기초의 하중-전이 곡선을 도시한 것이다. 단독 말뚝기초의 경우 침하량 증가에 따라 주변마찰력의 증가특성이 나타나지 않는 극한상태에 도달하게 되며, 이후의 영역에서는 주변마찰력의 변화를 배제한 선단지지력 증가에 의한 전체 지지력 증가특성을 보이고 있다. 그러나 말뚝지지 전면기초내에 설치된 센서말뚝기초의 경우 말뚝지지 전면기초의 상호작용에 의해 주변마찰력이 변화하는 하중-전이곡선을 보이고 있으며, 이는 지반 조건과 센서말뚝기초의 설치 위치에 따라 다르게 나타나고 있다.

조밀한 사질토 지반의 경우 Fig. 10에서와 같이 단독 말뚝기초는 재하하중 5.0MN을 기준으로 주변마찰력이 극한상태에 도달하게 되며, 이후의 증가하는 재하하중은 말뚝기초의 선단부를 통하여 지반에 전달된다. 말뚝지지 전면기초의 경우 Fig. 10에서와 같이 재하하중 증가에 따라 주변마찰력이 계속적으로 증가하는 특성을 보여주고 있으며, 재하하중 4.0MN을 기준으로 Center, Edge 말뚝기초의 상부부분에서 주변마찰력이 급격한 증가가 일어나고 있다. 그러나 이와 같은 주변마찰력 증가특성은 Corner 말뚝기초에서는 나타나지 않고 있다.

느슨한 사질토 지반의 경우 Fig. 11에서와 같이 단독 말뚝기초의 재하하중 2.7MN을 기준으로 침하량 증가에 주변마찰력의 증가특성이 나타나지 않는 극한상태에 도달하게 되며, 이후의 영역에서 재하하중 증가에 따른 주변마찰력 변화특성은 나타나지 않고 있다. 말뚝지지 전면기초의 경우 Fig. 11에서와 같이 Center, Edge 말뚝기초에서 재하하중 증가에 따라 주변마찰력이 계속적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며, 조밀한 사질토

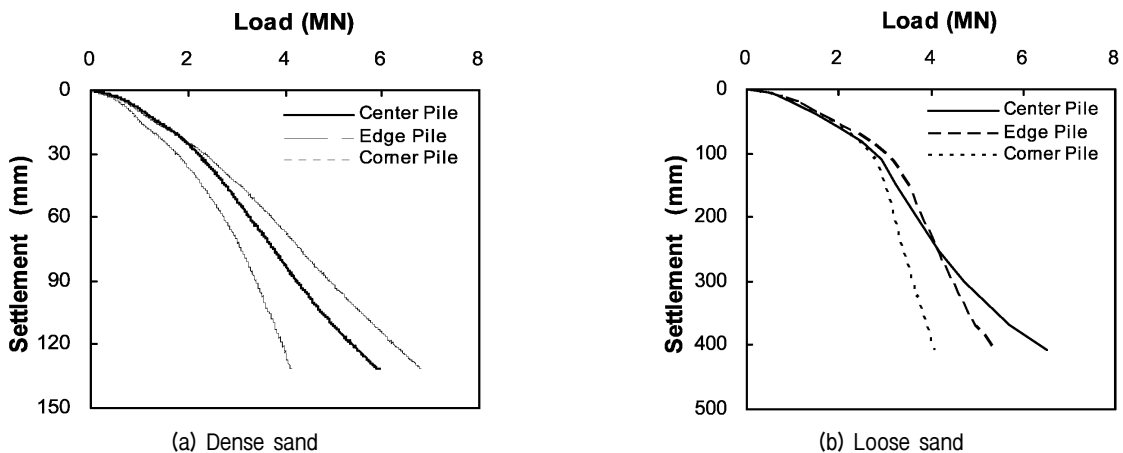


Fig. 9. Load-settlement curves of center, edge, corner pile

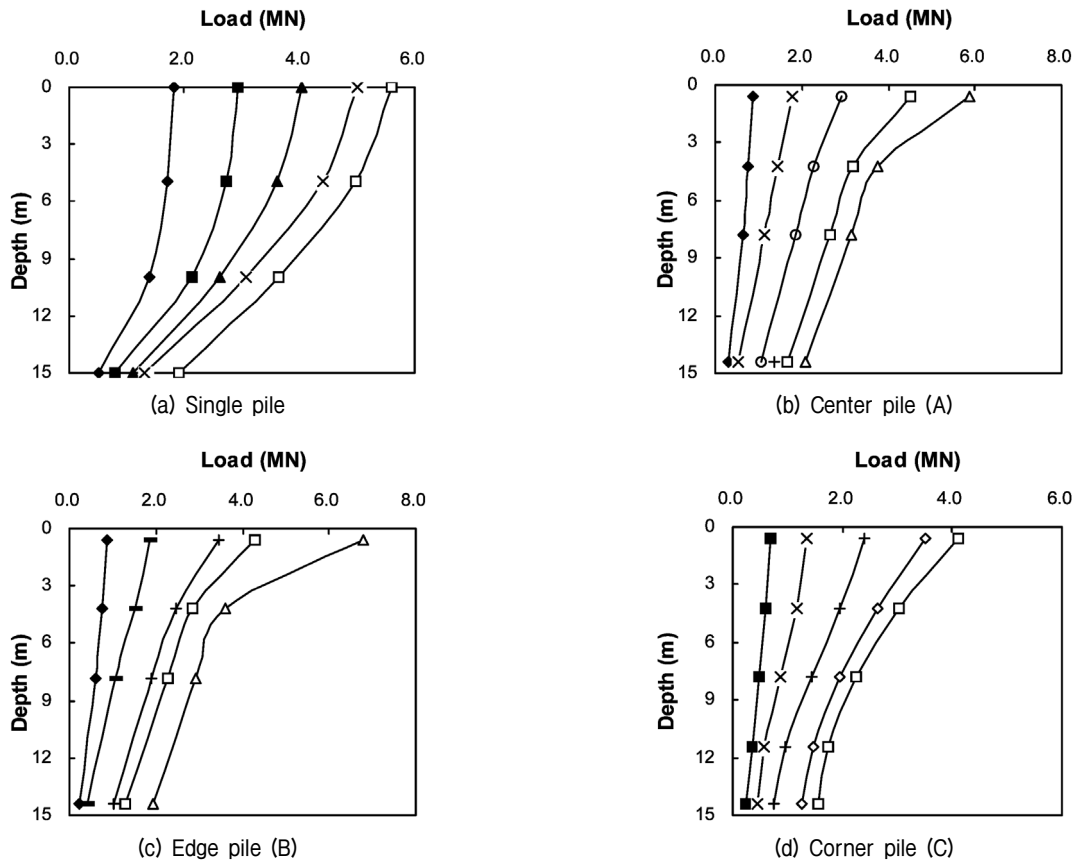


Fig. 10. Load- distribution of model piles at dense sand

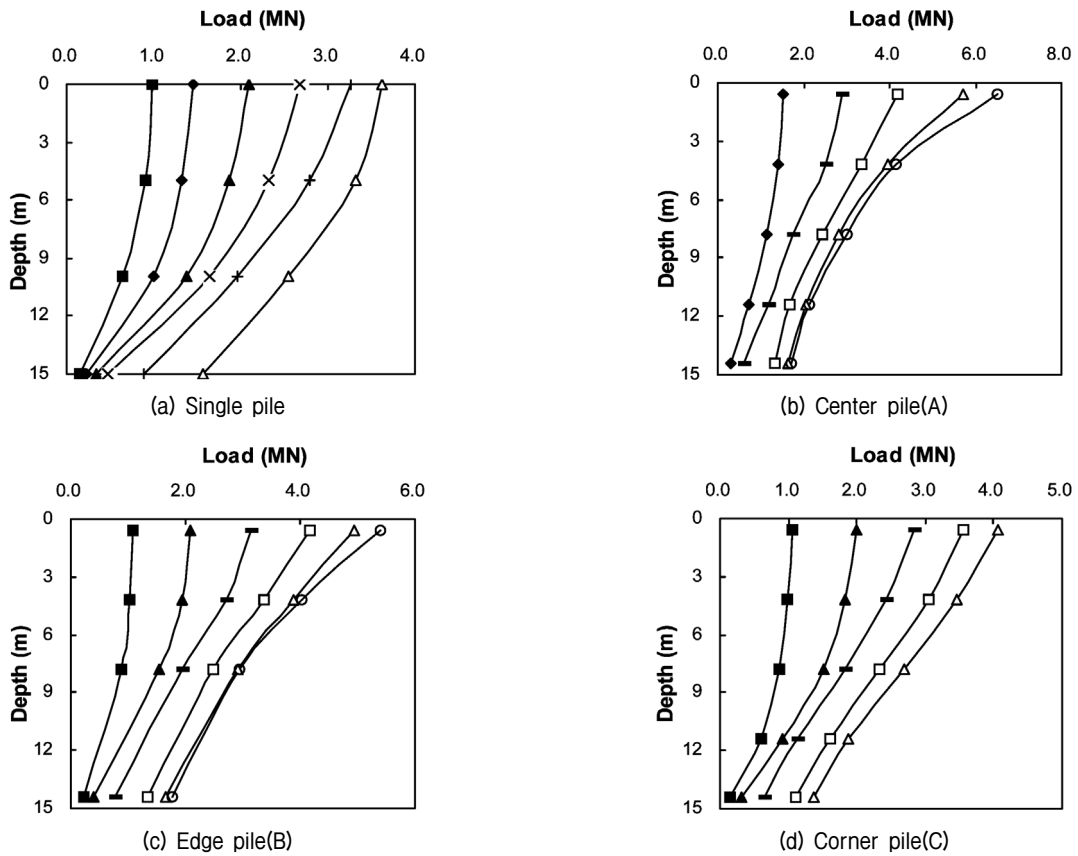


Fig. 11. Load- distribution of model piles at loose sand

지반에서와 같이 Corner 말뚝기초에서는 주변마찰력의 증가특성이 나타나지 않고 있다. 또한 조밀한 사질토지반의 실험결과에서와 같이 주변마찰력의 증가특성은 말뚝기초 상부부분에서 발생하고 있으며, 주변마찰력의 증가량은 조밀한 사질토 지반에 비해 적은 것으로 나타나고 있다. 따라서 Liu 등(1985)과 Phung(1993)에 의해 제안된 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용은 말뚝기초의 상부부분에서 집중적으로 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 전면기초(말뚝 캡)에 의한 구속응력 증가특성은 Center, Edge 말뚝기초의 지지력을 증가시키는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 10과 11에서와 같이 무리말뚝기초-전면기초의 상호작용에 의한 지지력 증가폭은 사질토지반의 조밀하고 느슨한 정도에 따라 다르게 나타나고 있으며, 조밀한 사질토지반에서 상호작용에 의한 무리말뚝기초의 지지력 증가특성이 더욱 큰 것으로 확인되고 있다.

5. 말뚝지지 전면기초 상호작용에 의한 전면기초의 지지력 특성변화 분석

Fig. 12는 말뚝지지 전면기초에서 전면기초(말뚝 캡)에 의해 증대되는 지지력과 동일한 지반조건에서 수행된 전면기초의 하중-침하 곡선을 도시한 것으로서, 증가된 지지력은 동일한 침하량 기준에서 무리말뚝기초의 지지력 대비 말뚝지지 전면기초의 지지력증가량을 기준으로 산정하였다. Fig. 12에서와 같이 조밀한 사질토지반, 느슨한 사질토지반 모두 침하량 증가에 따라 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(Raft-PR)에 의한 지지력이 동일한 조건에서 수행된 전면기초에 비해 크게 감소하

는 경향을 보이고 있다.

조밀한 사질토지반의 경우 25.4mm침하량 기준에서 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(Raft-PR)에는 4.3MN의 지지력이 작용하고 있으며, 동일한 지반조건에서 수행한 전면기초의 지지력 12.8MN에 비해 작게 나타나고 있다. 느슨한 사질토지반의 경우에서도 25.4mm침하량 기준에서 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(Raft-PR)에는 5MN의 지지력이 나타나고 있으나, 전면기초의 지지력 7.3MN에 비해 적은 지지력이 확인되고 있다.

이와 같이 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(Raft-PR)의 지지력이 동일 조건에서의 전면기초에 비해 감소하는 것은 Fig. 2의 (c)에서와 같이 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용에 의해 전면기초 저면지반의 수직변위에 의한 것으로 사료되며, 하부지반의 침하로 인해 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(Raft-PR)의 지지력이 감소하는 특성이 나타나는 것으로 사료된다. 이와 같은 특성은 기존의 말뚝지지 전면기초 모형실험에서는 나타나지 않고 있으나, 실제 규모에서의 거동특성을 반영하는 원심모형실험에는 작용하는 것으로 확인되고 있다 (Fioravante, 2011).

Fig. 13은 식 (3)의 전면기초의 지반-전면기초-말뚝기초 상호작용을 고려하는 영향계수 η_4 를 도시한 것으로서, 식 (4)와 같이 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(말뚝 캡)에 의해 증대되는 지지력을 동일한 침하량 기준에서의 전면기초 지지력에 대한 비율로 나타낸 것이다.

$$\eta_4 = \frac{P_{PR-Raft}}{P_{Raft}} \quad (4)$$

여기서, η_4 는 전면기초의 지반-전면기초-말뚝기초 상호작용 영향계수, $P_{PR-Raft}$ 은 말뚝지지 전면기초내의 전

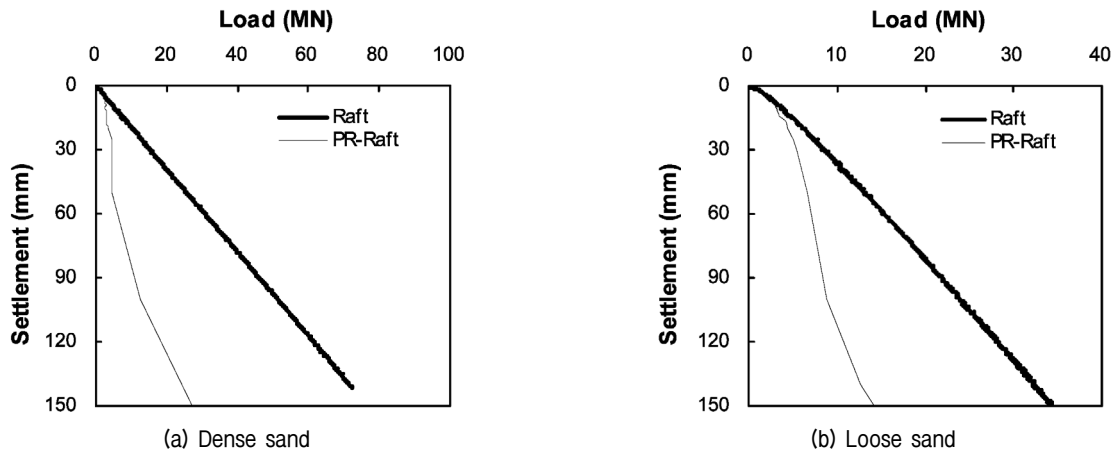


Fig. 12. Load-settlement curves of raft and raft at the piled raft (PR-Raft)

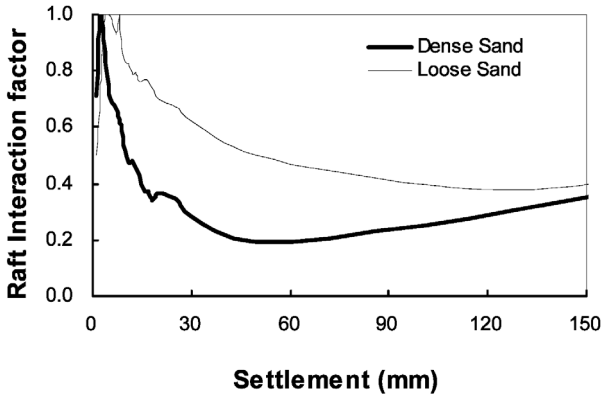


Fig. 13. Raft-group pile interaction factor η_4

면기초(말뚝 캡)에 의해 증대되는 지지력, P_{Raft} 는 동일한 조건에서의 전면기초 지지력이다.

전면기초 - 지반의 상호작용은 Fig. 13에서와 같이 침하량 증가에 따라 변화하는 특성을 보이고 있으며, 이로 인해 말뚝지지 전면기초에서 전면기초(말뚝 캡)의 지지력이 동일한 조건의 전면기초 지지력에 비해 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 25.4mm 침하량 기준으로 조밀한 사질토지반의 경우 약 66%, 느슨한 사질토 지반의 경우 약 32%의 지지력 감소특성을 확인할 수 있으며, 침하량 증가에 따라 조밀한 사질토 지반의 경우 최대 80%, 느슨한 사질토 지반의 경우 최대 60%의 지지력 감소특성이 나타나고 있다. 이를 통하여 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용으로 말뚝지지 전면기초내의 전면기초(말뚝 캡)의 지지력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 상호작용에 의한 지지력 감소특성은 조밀한 사질토 지반에서 더욱 크게 작용하는 것으로 확인되고 있다. 따라서 Liu 등(1985), Phung(1993) 및 Lee와 Chung(2003)에 의해 제안된 영향계수 η_4 값 1을 기준으로 말뚝지지 전면기초의 지지력을 산정하는 것은 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용을 적절히 반영하지 않은 기준으로 사료된다. 본 연구에서는 제한적으로 적용될 수 있는 지반-전면기초-말뚝기초 상호작용 영향계수 η_4 (조밀한 사질토지반: $\eta_4=0.2$; 느슨한 사질토지반: $\eta_4=0.4$)를 제안하였으며, Fig. 13에서와 같이 변화하는 η_4 의 값을 기준으로 안전축의 값을 선정하여 적용하였다. 또한 말뚝지지 전면기초의 설계에 있어 상호작용 영향계수 η_4 값은 Fig. 13에서와 같이 침하량 기준에 따라 다르게 적용될 수 있으며, 본 연구에서 제한적으로 제안된 η_4 값을 기준으로 말뚝지지 전면기초의 상호작용이 반영된 전면기초의 지지력을 설계에 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초에서 발생하는 지지력요소들의 상호작용을 규명하기 위해 원심모형시험을 적용한 무리말뚝, 말뚝지지 전면기초, 전면기초, 단독 말뚝기초의 하중-재하 시험을 수행하였다. 이를 통하여 무리말뚝기초-지반 및 무리말뚝기초-지반-전면기초의 상호작용에 따른 개별적 지지력요소들의 특성변화를 분석하였으며, 침하량 기준에서의 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용 계수를 제안하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 무리말뚝기초-지반의 상호작용은 침하량을 기준으로 복합적으로 작용하고 있으며, 초기의 재하하중에서는 침하량 증가 효과가 더욱 크게 작용하며, 많은 침하가 발생한 이후에는 지지력 증대효과가 더욱 큰 것을 확인할 수 있다.
- (2) 무리말뚝기초 - 전면기초 상호작용으로 전면기초 침하에 의한 부마찰력 발생효과보다 응력증첩에 의한 지중응력 증가 및 지지력 증대효과가 크게 작용하는 것으로 나타났다. 무리말뚝기초-전면기초 상호작용은 말뚝지지 전면기초 내에서 Center, Edge 말뚝기초의 상부부분에서 발생하여 말뚝기초의 주변마찰력을 증대시키며, 이는 조밀한 사질토 지반에서 더욱 크게 나타났다. 그러나 무리말뚝기초 - 전면기초 상호작용은 전면기초에 의해 충분한 지중응력 증가효과가 발생한 후에 나타나고 있으며, 실질적인 설계기준인 허용침하량 기준에서는 발생하지 않고 있다.
- (3) 전면기초-무리말뚝기초의 상호작용으로 전면기초(말뚝 캡)의 지지력은 감소하는 것으로 나타났으며, 25.4mm 침하량 기준에서 조밀한 사질토지반의 경우 66%, 느슨한 사질토 지반의 경우 32%의 지지력 감소하는 것으로 확인되었다. 또한 본 연구에서는 실험결과를 기준으로 제한적으로 적용될 수 있는 지반-전면기초-말뚝기초 상호작용 영향계수 η_4 (조밀한 사질토지반: $\eta_4=0.2$; 느슨한 사질토지반: $\eta_4=0.4$)를 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수

행된 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반연구” 및 한국 과학재단 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. Brinch Hansen, J. (1961), “The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces”, Bulletin No.12, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, pp.5-9.
2. Fioravante, V. and Giretti, D. (2010), “Contact versus noncontact piled raft foundations”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.47, No.11, pp.1271-1287.
3. Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, Chr., and Reul, O. (1998), “Piled raft foundation-Interaction between piles and raft”, in International Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering, Darmstadt, 8-9 October 1998, Vol.2, No.4, pp.279-96.
4. Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, Chr. (2000), “Piled raft foundation projects in Germany”, Design Applications of Raft Foundations, Ed. by J.A. Hemsley, Thomas Telford Ltd., 323-391.
5. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W., and Cho, G. C. (2012), “A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea”, KSCE Journal of Civil Engineering: (Posted online ahead of print) doi: 10.1007/s12205-013-1350-5.
6. Kishida, G. and Meyerhof, G. G. (1965), “Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand”, Proceeding 6th ISCMFE, Totonto, Vol.2, pp.270-274.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Lee, Y. N., Lee, H. L., and Park, Y. H. (2001), “Behavior of Small - Scale Pile Group Under Vertical Loading”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.17, No.6, pp. 37-46.
12. Meyerhof, G.G. (1956), “Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils”, *Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE*, Vol.82, No.SM1, January, pp.1-19.
13. Phung, D. Long (1993), “Footing with settlement-reducing piles in non-cohesive soil”, Ph. D Dissertation, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology.
14. Poulos, H. G. (2001), “Piled-raft foundation: design and applications”, *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
15. 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.
16. 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.

(접수일자 2012. 4. 10, 심사완료일 2012. 10. 18)