

Piled Raft 기초의 비선형 하중-침하 특성을 고려한 하중분담 해석

Load Sharing Analysis of Piled Rafts Based on
Non-linear Load-Settlement Characteristics

최 규 진 ¹	Choi, Kyu-Jin
박 동 규 ²	Park, Dong-Gyu
이 준 환 ³	Lee, Jun-Hwan

Abstract

The design of Piled Raft foundations considering the load sharing between raft and piles provides a more economical solution than the conventional design approach based on bearing capacity of piles only. Generally, numerical methods are used to analyze the behavior of Piled Rafts due to its complexity and load sharing ratio is also estimated by numerical methods about some limited cases under specific load level and soil conditions. In this study, a method to estimate the load sharing between the raft and piles was developed which is based on load-settlement characteristics of foundation elements. Normalized load-settlement curves of the raft and pile groups were derived individually, and the relationship between load sharing ratio and foundation settlement was proposed by using these curves. For each load-settlement curves, hyperbolic type was adopted in order to describe the non-linear behavior of foundations. Centrifuge test results were compared with the results from proposed method, and the trends of variation of load sharing ratio with settlement presented from both were similar.

요 지

말뚝과 raft의 하중 분담 효과를 고려한 Piled Raft 기초의 설계는, 말뚝의 지지력만을 고려하여 설계하는 기존의 말뚝기초 설계 방식에 비해 경제적인 설계를 가능하게 해준다. 일반적으로 Piled Raft 기초 거동의 해석 및 설계는, 해석의 복잡성으로 인해 주로 컴퓨터를 이용한 수치 해석을 이용하고 있으며, 하중 분담 효과에 대한 해석 또한 개별적 상황에 따른 수치해석의 결과로 이루어진다. 본 연구에서는 기초 요소의 하중-침하 특성을 고려하여 Piled Raft 기초에서의 수치하중에 대한 raft와 말뚝의 하중 분담 효과를 평가할 수 있는 모델을 제안하고자 하였다. 기초의 비선형 거동을 고려하여 말뚝과 raft의 거동을 각각 쌍곡선(hyperbolic curve) 형태의 정규화된 하중-침하 곡선(normalized load-settlement curve)으로 표현하고, 이를 통해 기초의 침하에 따른 말뚝과 raft의 하중 분담 정도를 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 제시한 모델의 적용성을 평가하기 위하여 Piled Raft 기초에 대한 원심모형실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 제시한 모델과 원심모형실험 결과로부터 나타난 침하에 따른 하중 분담률의 변화 양상이 전체적으로 유사한 형태를 보였다.

Keywords : Piled Rafts, Load sharing, Load-settlement, Hyperbolic curve

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate student, School of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph.D candidate, School of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

3 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 5월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기존의 말뚝기초 설계는 주로 말뚝의 극한지지력 및 허용지지력을 고려하여 이루어져왔으며, 이는 구조물의 침하를 필요 수준 이상으로 제어하거나, 말뚝캡 혹은 저면부의 지지력이 전혀 반영되지 않는 등 과다설계의 가능성도 포함하고 있다. 최근 보다 경제적인 기초 설계에 대한 수요 및 관심이 증가함에 따라, 구조물의 침하를 일정 수준 허용하며 raft와 말뚝의 지지 성능을 최대로 발휘할 수 있도록 하는 새로운 설계 개념의 Piled Raft 기초에 대한 연구가 국내외에서 진행되어왔다. 이미 독일, 이탈리아 등 유럽 지역에서는 고층 빌딩 등의 구조물에 이러한 형식의 Piled Raft 기초를 적용함으로써 그 성공 사례가 보고되었으며(Katzenbach et al., 2000; de Sanctis and Russo, 2008), 호주 및 일본에서도 다양한 연구 및 시공 관측 사례가 발표되고 있다(Horikoshi and Randolph, 1996; Poulos, 2001; Yamashita et al., 2010). 국내에서도 모형실험과 수치해석 등을 통하여 이에 대한 연구가 이루어지고 있으며(Kwon et al., 2005; Lee and Jeong, 2007; Park et al., 2009), 최근 경남 김해 지역의 연약지반 위에 시공된 철도제방에 Piled Raft 기초가 이용된 사례가 발표되었다(Kim et al., 2011).

현재 Piled Raft 기초에 대한 거동 해석 및 설계는 복잡한 기초 및 지반 요소 간의 상호관계를 구현하기 위하여 주로 수치 해석적 방법을 이용하고 있으며, 컴퓨터 성능이 발달함에 따라 최근에는 3차원 유한요소 해석법을 이용한 기초의 거동 해석이 이루어지고 있다(Reul, 2004; de Sanctis and Mandolini, 2006; Lee et al., 2010). 하중 분담에 관한 연구 또한 주로 수치 해석적 방법의 결과로써 제시되며, 일반적으로 특정 하중 조건, 또는 극한상태에서의 하중 분담률에 대한 연구가 이루어졌다. 또한 기존의 해석 방법은 대부분 기초와 지반의 선형적 탄성 거동을 가정하여 해석하고 있다.

본 연구에서는 Piled Raft 기초의 효율적 설계를 위해 각 기초 요소의 침하 거동을 고려한 하중 분담 해석 기법을 제시하고자 한다. 각 기초 요소의 비선형 거동을 반영하기 위하여 말뚝과 raft의 하중-침하 관계를 쌍곡선 함수(hyperbolic function)로 나타내었다. 이러한 각 기초 요소의 하중-침하 곡선을 정규화된 하중-침하 곡선(normalized load-settlement curve)으로 나타내고, 이를 이용하여 기초의 침하량에 따른 말뚝과 raft의 하중 분담률을 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 원심

모형실험 결과와의 비교를 통하여 본 연구에서 제시한 하중 분담률 산정 모델의 적용성을 평가하였다.

2. Piled Raft 기초의 하중 분담 특성

Poulos(2001)는 Piled Raft 기초의 하중-침하 거동을 Fig. 1과 같이 단순화된 형태로 나타내었다. 말뚝과 raft의 거동을 선형 탄성 거동으로 가정하고, 세 구간으로 이루어진 직선으로써 Piled Raft 기초의 하중-침하 곡선을 표현하였다. 원점으로부터 A까지의 구간에서는 기초에 작용하는 하중을 말뚝과 raft가 함께 분담하여 지지하며, 기초의 전체적인 거동은 탄성 거동을 유지한다. 그러나 작용 하중이 더욱 증가하여 말뚝의 파괴가 일어나는 하중 Q_1 을 넘어서게 되면, 기초 전체의 극한하중 (Q_u)에 도달하는 지점에 이르기까지(A-B 구간) 추가 하중을 모두 raft가 분담하게 된다.

Fig. 1의 단순화된 기초의 하중-침하 곡선에서, 각 구간으로부터 나타나는 직선의 기울기는 그 구간에서 발현되는 기초 거동의 강성(stiffness)을 의미한다. Randolph (1994)는 raft와 말뚝의 상호작용을 고려하여 Piled Raft 기초의 강성을 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$K_{pr} = \frac{K_p + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}{1 - \alpha_{rp}^2 (K_r / K_p)} \quad (1)$$

여기서, K_{pr} 은 Piled Raft 기초의 강성, K_r 과 K_p 는 각각 탄성 이론으로부터 구한 raft 및 말뚝의 강성을 나타내며, α_{rp} 는 raft와 말뚝의 상호작용을 고려하기 위한 계수

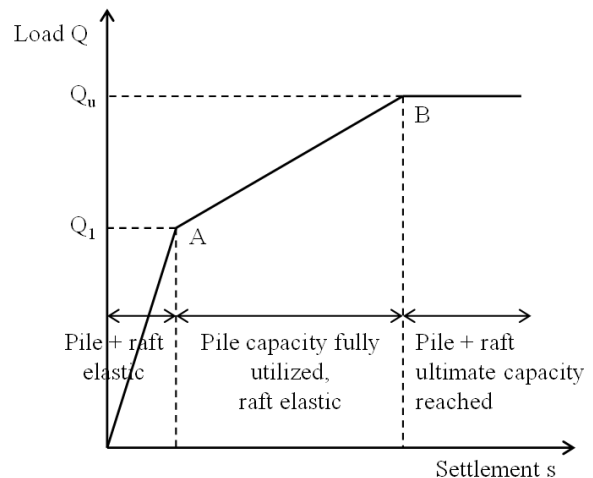


Fig. 1. Simplified load-settlement curve of Piled Raft (Poulos, 2001)

이다. 또한 Randolph(1994)는 Piled Raft 기초에 작용하는 총 수직하중(Q_T)에 대하여 raft가 부담하는 하중(Q_R)의 비율을 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\frac{Q_R}{Q_T} = \frac{(1 - \alpha_{rp})K_r}{K_p + (1 - 2\alpha_{rp})K_r} \quad (2)$$

Liu et al.(1994)은 raft와 말뚝 각각의 극한지지력에 대해 식 (3)과 같이 영향계수를 제안하여 Piled Raft 기초의 극한지지력 산정법을 제안하였다.

$$Q_{PR,ult} = \alpha_{UR} \cdot Q_{UR,ult} + \alpha_G \cdot Q_{G,ult} \quad (3)$$

여기서, $Q_{PR,ult}$ 는 Piled Raft 기초의 극한지지력, $Q_{UR,ult}$ 는 말뚝으로 지지되지 않는 raft의 극한지지력, $Q_{G,ult}$ 는 무리말뚝기초의 극한지지력을 나타내며, α_{UR} 와 α_G 는 raft와 말뚝의 상호작용으로 인해 고려되는 영향계수를 나타낸다. de Sanctis and Mandolini(2006)는 점토지반 조건에서의 Piled Raft 기초에 대한 3차원 유한요소해석을 통하여 이러한 영향계수를 기초의 형상과의 관계를 통하여 나타내었다.

$$\alpha_{UR} = 1 - 3[A_G / A / (s / d)] \quad (4)$$

$$A_G = [(\sqrt{n} - 1)s]^2 \quad (5)$$

여기서, A_G 는 raft에서 무리말뚝이 차지하는 면적, n 은 말뚝의 개수, s 는 말뚝중심간 간격을 나타낸다. 식 (4)와 (5)에서 보는 바와 같이, Piled Raft 기초의 형상과 말뚝의 기하학적 특성은 반영되어 있으나, 개념적으로 하중 분담 효과는 극한상태를 기준으로 평가됨을 알 수 있다. 실질적 설계에 있어 적용되는 성능수준과 허용침하량에 대한 기준은 제시되지 않으므로, raft의 하중 분담 효과에 대한 구체적 분석은 제한적이다.

3. 비선형 침하 거동을 고려한 하중 분담 효과 해석

3.1 Raft 및 말뚝의 정규화된 하중-침하 곡선

Raft와 말뚝의 하중 분담 정도는 기초를 구성하는 각

기초 요소(즉, raft와 말뚝)의 하중-침하 거동 특성에 따라 변화한다. Fig. 2는 Piled Raft 기초에서 일반적으로 나타나는 raft와 무리말뚝(pile group)의 하중-침하 거동을 분리하여 나타낸 것이다. 말뚝의 단면은 전면기초에 비해 매우 작으므로, 말뚝의 지지력 또한 raft에 비해 작은 침하 범위에서 발휘되며, 따라서 기초의 침하량이 작은 범위에서는 말뚝의 하중 분담률이 상대적으로 높게 나타난다. 그러나 기초의 침하가 점차 증가할수록 raft가 직접 지반에 전달하는 하중이 증가하고, 말뚝의 지지력이 모두 발휘되는 침하 범위를 넘어서게 되면 그 이상의 하중은 raft가 분담하게 되어 말뚝의 하중 분담률은 감소한다.

지반 혹은 기초의 비선형 하중-변위 곡선은 식 (6)과 같이 쌍곡선 함수(hyperbolic function)(Kondner, 1963)에 의해 표현될 수 있다.

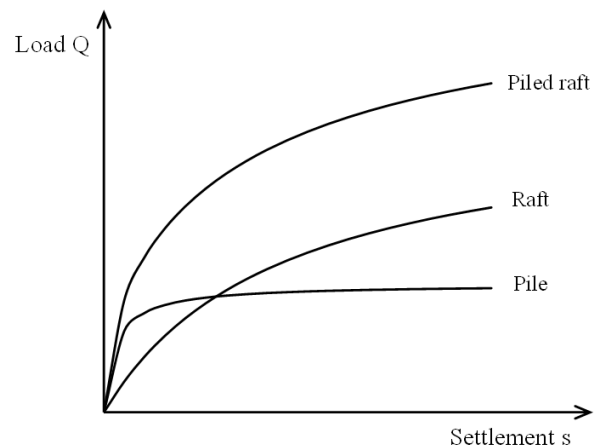


Fig. 2. Load-settlement behavior of raft and piles composing Piled Raft

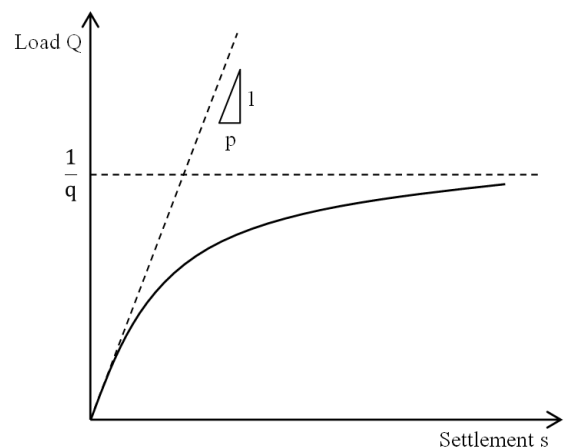


Fig. 3. Load-settlement curve of foundation expressed as hyperbolic function

$$Q = \frac{s}{p + qs} \quad (6)$$

여기서, Q 는 기초에 작용하는 하중, s 는 기초의 침하량을 나타내며, p 와 q 는 곡선의 형태 및 특징을 결정짓는 계수이다. Fig. 3에서와 같이 $1/p$ 은 곡선의 초기 기울기, 즉 기초의 초기 강성(initial stiffness)을 나타내며, $1/q$ 는 곡선의 최대 수렴값을 나타낸다.

Akbas and Kulhawy(2009)는 37개소 사질토 지역에서 수행한 125개의 raft 기초 현장 재하시험 자료를 바탕으로 수직하중에 대한 raft 기초의 거동 특성을 분석하였으며, 쌍곡선 함수를 이용하여 정규화된 형태의 하중-침하 곡선(normalized load-settlement curve)을 제시하였다. 본 연구에서는 Akbas and Kulhawy(2009)의 쌍곡선 함수를 토대로 다음과 같은 수정 쌍곡선 함수를 도출하였다.

$$\frac{Q}{Q_{UR,ult}} = \frac{\frac{s}{B}}{a^* + b^* \left(\frac{s}{B} \right)} \quad (7)$$

여기서, s 는 raft의 침하량, B 는 raft의 폭, Q 는 침하량 s 에서 raft에 가해지는 하중을 나타낸다. $Q_{UR,ult}$ 는 raft의 극한지지하중을 나타내며, 여기서는 0.1B 침하량에서의 지지하중을 극한지지하중으로 정의하였다(Cerato and Lutenegeger, 2006). 또한 a^* 와 b^* 는 식 (6)에서의 계수 p , q 와 마찬가지로 곡선의 계수를 나타내며, Akbas and Kulhawy(2009)의 연구 자료를 이용하여 그 값을 산정하였다. Fig. 4(a), (b)에 125개의 현장 재하시험으로부터 나타난 a^* 값 및 b^* 값의 분포 범위를 나타내었다. a^* 값의 범위는 0.004~0.075 정도로 나타나며, 평균값은 약 0.02 정도이다. b^* 값의 범위는 0.25~0.96 정도로 나타나며, 평균값은 약 0.8 정도로 나타난다.

말뚝 기초의 하중-침하 관계 또한 raft 기초의 거동과 유사하게 정규화된 쌍곡선 형태를 이용하여 나타낼 수 있다. Dithinde et al.(2011)은 사질토 및 점성토 지역에서의 현장 말뚝 재하시험 자료를 토대로 단일말뚝(single pile)에 대한 하중-침하 관계를 정규화된 쌍곡선 형태로 제시하였다. 본 연구에서는 이를 수정하여 다음과 같은 형태로 나타내었다.

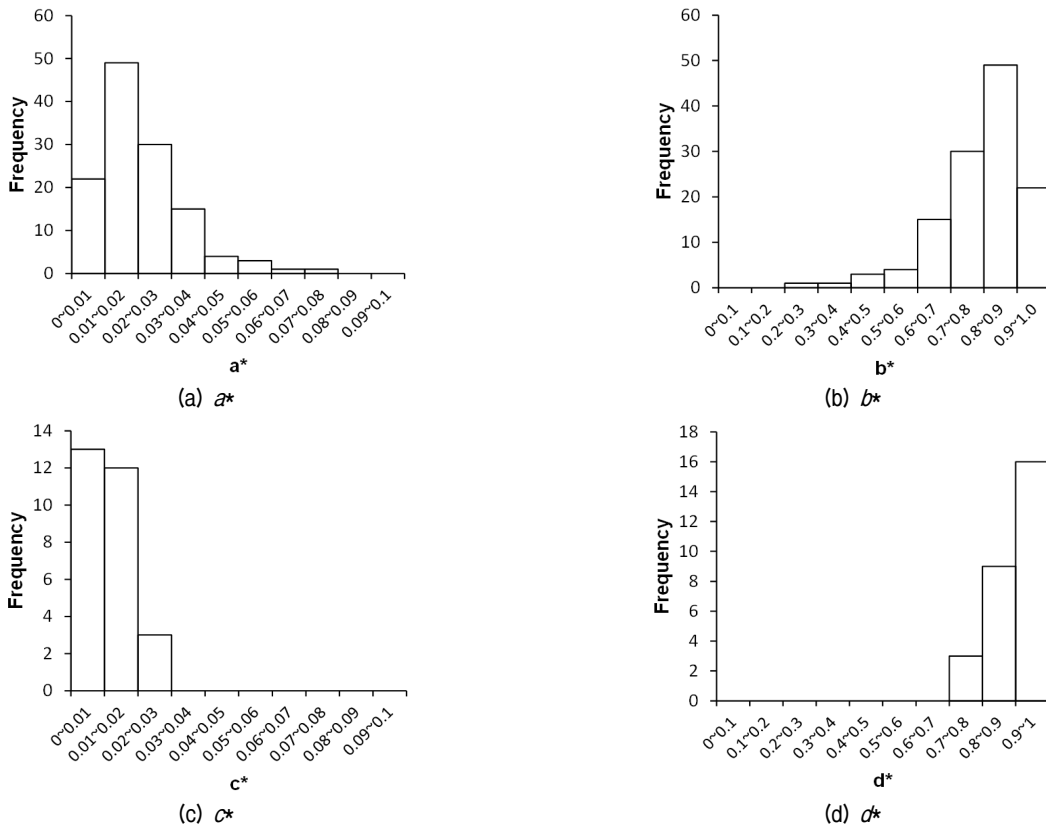


Fig. 4. Distribution of a^* , b^* , c^* , d^* values

$$\frac{Q}{Q_{SP,ult}} = \frac{\frac{s}{D}}{c^* + d^* \left(\frac{s}{D}\right)} \quad (8)$$

여기서, s 는 말뚝의 침하량, D 는 말뚝의 직경, Q 는 말뚝에 작용하는 수직하중을 나타낸다. $Q_{SP,ult}$ 는 단일말뚝의 극한지지하중을 나타내며, 여기서는 0.1D 침하량에서의 지지하중을 극한지지하중으로 정의하였다(BSI, 1986). c^* 와 d^* 는 곡선의 계수로써, Dithinde et al.(2011)의 연구 자료로부터 그 값을 산정하였다. Fig. 4(c), (d)에 사질토 지역의 배토말뚝(displacement pile)을 대상으로 수행한 28개의 현장 재하시험으로부터 산정된 c^* 및 d^* 값의 분포를 나타내었다. c^* 값의 범위는 0.001~0.028로 나타나며, 평균값은 약 0.01 정도로 나타난다. d^* 값의 범위는 0.72~0.99로 나타나며, 평균값은 약 0.9 정도로 나타난다.

3.2 기초의 침하량에 따른 하중 분담률 산정 모델

Fig. 5에 앞에서 결정한 raft와 단일말뚝의 정규화된 하중-침하 곡선을 함께 개략적으로 도식화하였다. 각각 raft의 폭(B) 혹은 말뚝 직경(D)의 10% 침하량에서 극한 지지력에 도달한다는 가정에 따라 $s/B = 0.1$, $s/D = 0.1$ 인 경우, $Q/Q_{UR,ult} = 1$, $Q/Q_{SP,ult} = 1$ 이 된다.

식 (7), (8) 및 Fig. 5는 개별 raft(unpiled raft)와 단일말뚝(single pile)에 대한 하중-침하 곡선을 나타낸 것으로써, Piled Raft 기초에서의 raft와 무리말뚝(pile group)의 하중-침하 거동과는 차이가 있다. Piled Raft 기초에서 수직하중이 작용할 경우, raft와 지반이 접촉하는 면적은 말뚝 단면이 차지하는 면적으로 인해 개별 raft의 단

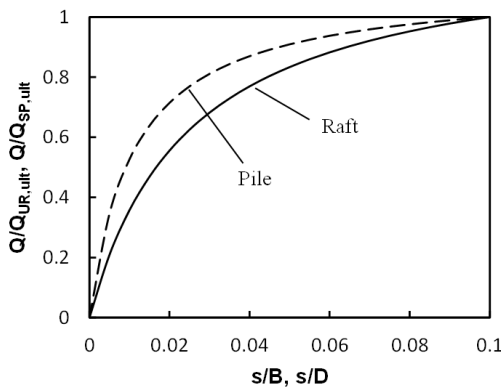


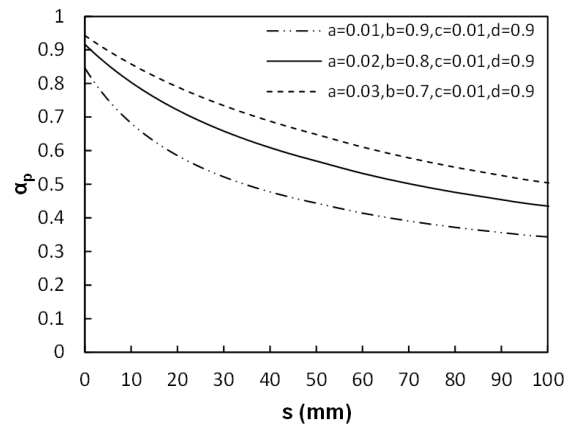
Fig. 5. Normalized load-settlement curves for raft and single pile

면적보다 작아지며, 결과적으로 raft에 의해 지지되는 하중(QR) 또한 줄어들게 된다. 이러한 영향을 반영하기 위해 식 (9)와 같이 단면적 감소 효과를 고려하였다. 또한 무리말뚝의 지지하중은 식 (10)과 같이 단일말뚝의 지지하중에 사용된 말뚝의 개수를 곱한 값으로 가정하였다.

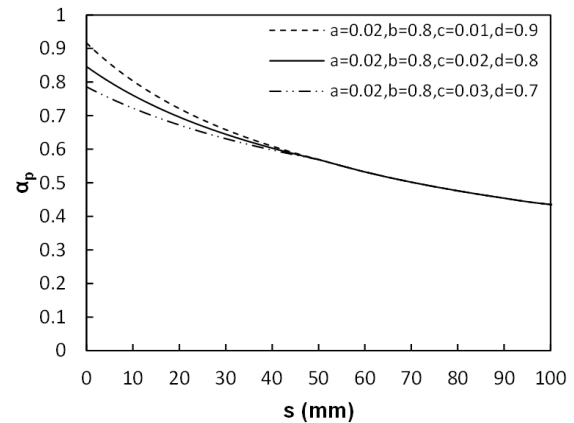
$$Q_R = \left(\frac{A_{PR} - nA_{SP}}{A_{PR}} \right) Q_{UR} = \left(1 - \frac{nA_{SP}}{A_{PR}} \right) Q_{UR} \quad (9)$$

$$Q_P = nQ_{SP} \quad (10)$$

여기서, A_{PR} 는 Piled Raft 기초의 전체 단면적을 나타내며, A_{SP} 는 단일말뚝이 차지하는 단면적의 크기를 나타낸다. Q_{SP} 와 Q_P 는 각각 단일말뚝과 무리말뚝의 지지하중을 나타내고, n 은 기초에 결합된 말뚝의 개수를 나타낸다.



(a) Effect of a^* and b^* values



(b) Effect of c^* and d^* values

Fig. 6. Effect of a^* , b^* , c^* , d^* values on load sharing ratio α_p

식 (7), (8) 및 식 (9), (10)을 이용하여 말뚝의 하중 분담률(α_p)을 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_p = \frac{Q_p}{Q_R + Q_p} = \frac{Q_{p,ult} \frac{s/D}{c^* + d^*(s/D)}}{Q_{R,ult} \frac{s/B}{a^* + b^*(s/B)} + Q_{p,ult} \frac{s/D}{c^* + d^*(s/D)}} \quad (11)$$

여기서 α_p 는 Piled Raft 기초에 가해진 수직하중에 대한 말뚝의 하중분담률을 나타내며, Q_R 과 Q_p 는 각각 raft와 말뚝이 분담하는 하중의 크기를 나타낸다.

식 (11)을 이용하여 기초의 침하에 따른 하중 분담률을 산정할 경우, 선택한 raft 및 말뚝의 곡선계수의 값에 따라 산정되는 하중 분담률의 값도 변화하게 된다. Fig. 6에 곡선계수 값에 따라 말뚝의 하중 분담률(α_p)이 변화하는 예를 나타내었다. 곡선계수 값의 변화 범위는 Fig. 4에 나타난 값의 범위를 참고하여 발생 확률이 높은 범위로 설정하였다.

4. 제안 모델의 검증

식 (11)로서 제시한 말뚝의 하중 분담률 산정 모델의 적용성을 평가하기 위하여 Giretti(2010)의 원심모형실

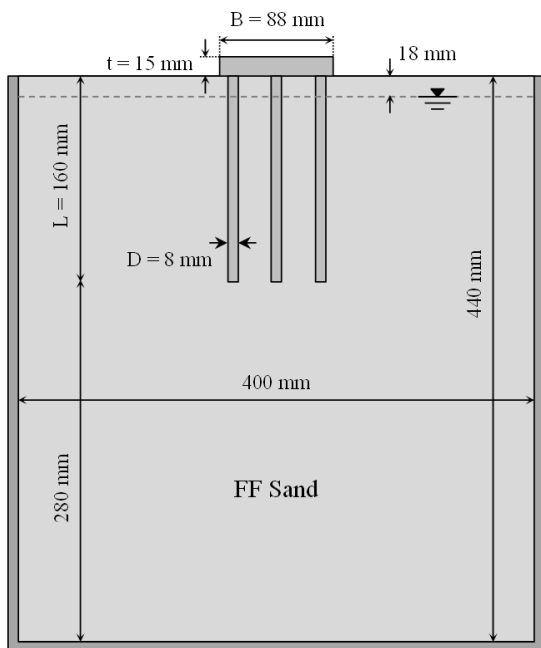
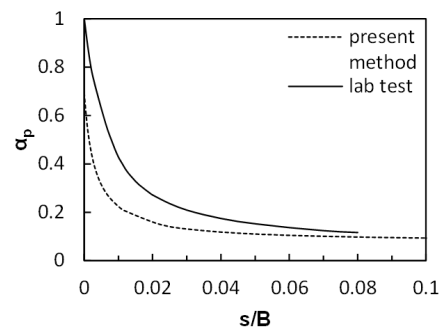


Fig. 7. Centrifuge model test set-up (Giretti, 2010)

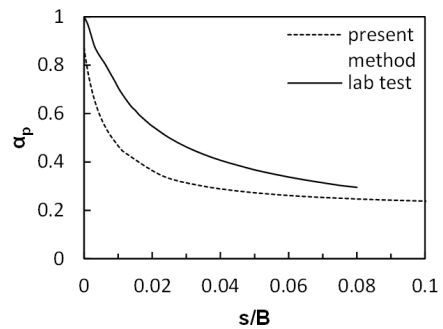
Table 1. Main characteristics of the performed tests (Giretti, 2010)

Test number	test 1	test 2	test 3
Relative density of soil (%)	34	32	35
Number of piles	1	3	7
Pile center to center spacing	-	8.66D	5D

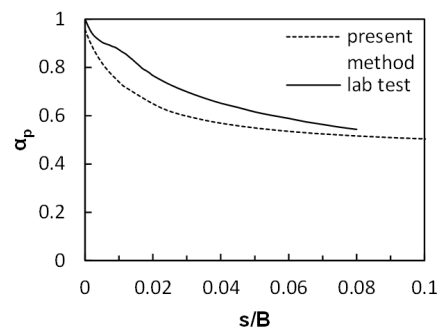
험 결과와 비교하였다. Giretti(2010)는 모형토조를 이용한 원심모형실험을 수행하여 사질토 지반에서 말뚝으로 지지된 원형기초의 거동을 분석하였으며, Fig. 7과 Table 1에 실험의 개요 및 실험 조건을 나타내었다. 여기서 비교를 위해 인용한 자료는 모두 배토말뚝(displacement pile)을 이용하여 설치된 Piled Raft 기초를 대상으로 하



(a) n=1



(b) n=3



(c) n=7

Fig. 8. Comparison between α_p from experimental results (Giretti, 2010) and proposed method

였다.

식 (11)을 이용하여 말뚝의 하중 분담률(α_p)을 산정하기 위해서는 raft와 말뚝의 극한지지하중($Q_{R,ult}$ 와 $Q_{P,ult}$)을 결정해야하며, 여기서는 이를 위해 Giretti(2010)의 각 실험 결과로부터 raft 및 말뚝의 극한지지하중을 결정하였다. 또한 곡선의 계수는 앞에서 제시한 a^* , b^* 와 c^* , d^* 값의 평균값을 이용하였다(즉, $a^*=0.02$, $b^*=0.8$, $c^*=0.01$, $d^*=0.9$). Fig. 8에 실험 결과로부터 나타난 말뚝의 하중 분담률(lab test)과 제안 모델을 이용하여 산정한 하중 분담률(present method)을 기초의 침하량에 따라 비교하여 나타내었다. Fig. 8(a)는 말뚝의 개수(n)가 1개인 경우이며, (b)와 (c)는 각각 3개, 7개인 경우를 비교하였다.

실험 결과와 제안 모델로부터 구한 하중 분담률의 산정 결과를 비교한 결과, 기초의 침하에 따른 하중 분담률의 변화 양상은 전체적으로 비슷한 경향을 보였으나, 제안 모델을 이용하여 산정한 말뚝의 하중 분담률이 실험 결과에 비해 작게 나타났다. 그 이유로는 첫째, 제안 모델에서 이용한 곡선계수의 값과 실험으로부터 나타난 곡선계수 값의 차이를 들 수 있다. 곡선의 계수는 raft 및 말뚝 하중-침하 곡선의 형태와 특징을 결정지으며, 따라서 Fig. 6에서와 같이 하중 분담률 산정에도 영향을 미친다. 제안 모델의 경우 a^* 와 b^* 의 값을 앞에서 제시한 평균값을 이용하였으나, 원심모형실험 결과로부터 나타난 raft의 거동은 큰 침하량에 도달할 때까지 탄성에 가까운 거동을 보였으며, 따라서 raft의 지지력 증가 비율이 상대적으로 작게 나타났다. 이는 곧 실험으로부터 나타난 a^* 값이 제시한 평균값에 비해 큰 값을 가진다는 것을 의미한다. 둘째로 말뚝과 raft, 그리고 지반 사이의 상호 작용의 영향으로 인하여 하중 분담률의 산정 결과에 차이가 발생하게 된다. 실제 Piled Raft 기초의 거동에는 말뚝과 말뚝, 말뚝과 지반, raft와 말뚝, raft와 지반 사이의 복합적 상호 작용 등으로 인하여 말뚝과 raft의 침하 거동이 변하게 되며, 이에 대한 영향으로 하중분담률 산정에 영향을 주게 된다. 그러나 본 연구에서 제시한 하중 분담률 산정 모델에서는 이러한 영향 요소를 고려하지 않았으므로, 실질적인 기초의 거동과 차이가 발생할 수 있다. 셋째, Giretti(2010)의 원심모형실험은 원형기초를 대상으로 하였으며, 제안 모델은 정사각 기초를 대상으로 제시하였으므로 이러한 기초의 형상에 의한 거동 차이에 의해 하중 분담률 산정에도 영향이 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

말뚝캡 혹은 raft의 하중 분담 효과를 고려한 Piled Raft 기초의 설계는 말뚝의 지지력만을 고려하는 기존의 말뚝기초 설계 방식에 비해 경제적인 기초 설계의 가능성을 제시해준다. 그러나 지반 조건의 다양성 및 기초의 복합적 거동 특성 등으로 인하여 이러한 하중 분담 효과를 정량적으로 규명하기에는 어려움이 존재하며, 따라서 하중 분담에 대한 연구는 대부분 수치해석을 통한 특수 조건 상황에서의 연구에 국한되어왔다. 본 연구에서는 raft 및 말뚝의 개별적 하중-침하 거동 특성을 이용하여 Piled Raft 기초에서의 수직하중에 대한 하중 분담률을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. Piled Raft 기초를 구성하는 raft 및 말뚝의 정규화된 하중-침하 곡선(normalized load-settlement curve)을 유도하였으며, 이를 통해 수직하중에 대한 말뚝의 하중 분담률을 산정할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 각각의 하중-침하 곡선은 기초의 비선형적 거동을 고려하기 위하여 쌍곡선(hyperbolic curve) 형태로 표현하였다.

원심모형실험 결과와 제안 모델로부터 산정된 기초의 침하에 따른 말뚝의 하중 분담률을 비교한 결과, 두 경우 모두 기초의 침하가 증가할수록 말뚝의 하중 분담률은 감소하는 경향을 보였으며, 전체적으로 제안 모델을 이용하여 산정한 말뚝의 하중 분담률이 실험 결과에 비해 작게 나타났다. 그 이유는 제안 모델에서 가정한 곡선계수의 값과 실험으로부터 나타난 곡선계수 값의 차이로 인해 하중 분담률 산정에 있어서도 차이가 발생하기 때문이다. 또한 말뚝-raft-지반의 복합적 상호작용 또한 기초의 하중-침하 거동에 영향을 줌으로써 하중 분담률 산정에 차이를 발생시키는 요인으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 선도연구센터(ERC)의 연구비 지원에 의해 수행된 “기후변화 적응형 지반구조물 설계 기술 개발”(No. 2011-0030845)의 연구결과 중 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Akbas, S. O. and Kulhawy, F. H. (2009), “Axial compression of

- footings in cohesionless soils. I: Load-settlement behavior”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.135, No.11, pp.1562-1574.
2. BSI (1986), “British standard code of practice for foundations”, BS8004, British Standard Institution (BSI), London.
 3. Cerato, A. B. and Lutenegeger, A. J. (2006), “Bearing capacity of square and circular footings on a finite layer of granular soil underlain by a rigid base”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.11, pp.1496-1501.
 4. De Sanctis, L. and Mandolini, A. (2006), “Bearing capacity of Piled Rafts on soft clay soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.12, pp.1600-1610.
 5. De Sanctis, L. and Russo, G. (2008), “Analysis and performance of Piled Rafts designed using innovative criteria”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.134, No.8, pp.1118-1128.
 6. Dithinde, M., Phoon, K. K., De Wet, M., and Retief, J. V. (2011), “Characterization of Model Uncertainty in the Static Pile Design Formula”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.137, No.1, pp.70-85.
 7. Giretti, D. (2010), *Modelling of Piled Raft foundations in sand*, Ph.D. Thesis, University of Ferrara.
 8. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), “Centrifuge modelling of Piled Raft foundations on clay”, *Geotechnique*, Vol.46, No.4, pp.741-752.
 9. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000), “Piled Raft foundation projects in Germany”, *Design Applications of Raft Foundations*, Hemsley, J. A. ed., Thomas Telford, London, pp.323-391.
 10. Kim, S. K., Song, S. O., Han, S. G., Jeon, J. K., and Lee, W. S. (2011), “Behavior of the embankment on normally consolidated clay supported by the Piled Raft”, *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.27, No.4, pp.33-41.
 11. Kondner, R. L. (1963), “Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.115-143.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Lee, J. H., Kim, Y. H., and Jeong, S. S. (2010), “Three-dimensional analysis of bearing behavior of Piled Raft on soft clay”, *Computers and Geotechnics*, Vol.37, No.1-2, pp.103-114.
 15. Liu, J., Huang, Q., Li, H., and Hu, W. L. (1994), “Experimental research on bearing behaviour of pile groups in soft soil”, *Proceedings of 13th ICSMFE*, Vol.2, 535-538.
 16. Park, J. O., Choo, Y. W., and Kim, D. S. (2009), “Evaluation of bearing capacity of Piled Raft foundation on OC clay using centrifuge and numerical modeling”, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.25, No.7, pp.23-33.
 17. Poulos, H. G. (2001), “Piled Raft foundations: design and applications”, *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
 18. Randolph, M. F. (1994), “Design methods for pile groups and Piled Rafts: state-of-the-art report”, *Proceedings of 13th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi 5, pp.61-82.
 19. Reul, O. (2004), “Numerical study of the bearing behavior of Piled Rafts”, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol.4, No.2, pp.59-68.
 20. Yamashita, K., Hamada, J., and Soga, Y. (2010), “Settlement and load sharing of Piled Raft of a 162m high residential tower”, *Proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference*, Shanghai, pp.26-33.

(접수일자 2012. 3. 9, 심사완료일 2012. 11. 20)