Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 35, No. 4: 853-861/ August, 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.4.0853

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Geotechnical Engineering **지반공학**

축대칭 조건 및 경계면 요소를 이용한 Piled Raft 기초의 유한차분 모델링 연구

유광호* · 김형렬** · 배상한***
You, Kwang Ho*, Kim, Hyung Ryul**, Bae, Sang Han***

Finite Difference Modeling of a Piled Raft Foundation with Axisymmetry Condition and Interface Element

ABSTRACT

In this study, FDM modelling with axisymmetry condition and interface element was verified whether it is reasonable to estimate compositive behavior of a piled raft foundation. To this end, the modelling validity of piled raft foundations was estimated by comparing and analyzing numerical analysis results and laboratory model test results. Also, load bearing ratio of a raft is analyzed by performing sensitivity analysis of foundation parameters with the actual field conditions. As a result of this study, correlation between bearing capacity and vertical displacement of numerical results turned out to be similar with that of a laboratory model test. In addition, ultimate bearing capacity of piled rafts and load bearing ratio of the raft is calculated to be similar in both cases. The load bearing ratio of the raft was also estimated to be in the range of 33% to 52% from the sensitivity analysis. The results were confirmed to be similar to the previous studies. Therefore, it can be inferred that piled rafts can be effectively modelled applying axisymmetry condition and interface element.

Key words : Piled raft foundation, Load bearing ratio of raft, Finite difference analysis, Interface element, Axisymmetry condition

초 록

본 연구에서는 수치해석을 이용한 piled raft 기초의 복합적인 거동평가를 위해 축대칭 조건 및 경계면 요소를 적용한 유한차분해석 모델링 방법이 합리적인지 검증하였다. 이를 위해 실내모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교·분석하여 piled raft 기초의 모델링 방법의 적합성을 평가하였다. 그리고 실제 현장조건을 고려한 기초 매개변수에 대한 민감도분석을 수행하여 raft의 하중분담율을 분석하였다. 연구 결과, 실내모형실험과 수치해석 결과에서 지지력-수직변위의 상관관계가 동일한 경향을 보였으며, piled raft 기초의 극한지지력과 raft의 하중분담율이 비교적 유사하게 산정되었다. 그리고 민감도분석을 통해 raft의 하중분담율은 약 33%~52% 사이에서 산정되어, 기존 연구 결과와 유사함을 확인하였다. 따라서 piled raft 기초는 축대칭 조건 및 경계면 요소를 이용하여 효과적으로 모델링될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : Piled Raft 기초, Raft의 하중분담율, 유한차분해석, 경계면 요소, 축대칭조건

* 정회원 · 교신저자 · 수원대학교 토목공학과 정교수 (**Corresponding Author** · The University of Suwon, Professor · khyou@suwon.ac.kr)
** 수원대학교 토목공학과 석사과정 (The University of Suwon, Master Student · rlagudfuf2@suwon.ac.kr)
*** 정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사과정 (The University of Suwon, Ph.D. Student · spinshot8259@naver.com)

Received January 21, 2015/ **revised** May 21, 2015/ **accepted** June 3, 2015

Copyright ⓒ 2015 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근까지 현장에서 시공되고 있는 말뚝기초는 raft의 지지력을 고려할 수 있음에도 불구하고 말뚝의 지지력만을 고려함으로써 말뚝의 과다설계로 인한 비경제적인 시공을 수행하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 보다 합리적인 시공방법으로 raft와 말뚝이 상재하중을 분담하는 기초형식인 piled raft 기초가 적용될 수 있다. piled raft 기초의 raft는 지반과 접촉되어 상부하중의 상당부분을 부담하는 역할을 하며, 국외의 많은 현장실험 및 모형실험결과에 의하면 raft가 상부하중의 약 35%~50%를 분담한다고 보고되고 있다(Song, 2003). 하지만 국내의 piled raft 기초에 대한 연구는 주로 실내모형실험으로 수행되고 있으며, 실제 기초의 스케일을 고려하기 위해 수치해석을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 말뚝과 지반사이에서 발생되는 불연속면의 거동에 대한 모사가 미흡한 실정이다(Kim, 2014).

Seo(2004)는 유한요소를 기반으로 하는 PLAXIS 프로그램을 통한 연약점토지반에 대한 기초형식으로 사용될 수 있는 piled raft 기초의 설계변수가 지지력 및 침하특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 대상지역과 동일한 지반조건을 적용하고 기초구조물이 대칭인 점을 감안하여 반 단면 해석을 실시하였다. 그 결과, 상부 지층의 강성과 raft의 침하는 반비례 관계임을 확인하였다. 또한 pile길이 역시 기초 전체의 침하량에 반비례하며 pile의 지름은 기초 전체의 침하량에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다.

Kim(2013)은 다층암반에서 단일 말뚝기초의 선단지지력에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해, Hoek-Brown 파괴기준을 바탕으로 한 2차원 유한차분해석을 통해 축대칭 조건과 경계면요소를 이용하여 단일 말뚝기초를 모델링하였다. 연구의 적합성을 검증하기 위해 현장재하 실험의 하중-변위 곡선과 비교하였다. 그 결과, 현장의 지층정보를 상세하게 입력하였을 경우 하중-변위 곡선이 현장재하시험과 매우 유사하게 나타나 축대칭조건을 사용한 단일 말뚝의 모델링이 적합함을 확인하였다.

본 연구에서는 단일 말뚝이 아닌 piled raft 기초에 대한 수치해석적 적합성을 유한차분법을 기반으로 한 FLAC 2D를 이용하여 말뚝과 지반 사이의 불연속면 거동을 경계면 요소(interface element)로 모사함으로써 검증하였다. 이를 위해 문헌조사를 통한 piled raft 기초의 실내모형실험과 동일조건에서 얻은 결과와 수치해석 결과를 비교·분석하였다. 이때 말뚝을 수치해석으로 모사하기 위해 지반과 동일한 연속체 요소와 축대칭 조건(axisymmetry condition)을 적용하였다.

또한 실제 현장조건을 고려한 해석방법의 적합성을 검증하기 위해 민감도분석을 수행하여 raft의 하중분담율을 분석하였다. 이를 위해 piled raft 기초의 말뚝 길이와 raft의 직경을 매개변수로 선정하였다. 말뚝의 길이는 PHC(Pre-tensioned spun High strength Concrete) 말뚝 규격을 고려하였으며, raft의 직경은 말뚝길이에 대한 비율인 raft의 직경비를 적용하여 선정하였다. 최종적으로 매개변수 조합에 따라 산정된 piled raft 기초의 지지력과 raft의 하중분담율을 비교·분석하였다.

2. Piled raft 기초 및 하중분담율

Piled raft 기초는 Fig. 1과 같이 말뚝, raft 및 기초지반 총 3개의 지지요소로 이루어진 복합 구조체이며, 상부 구조물로 인해 작용되는 하중을 raft와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어 있다. raft는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 raft의 과도한 침하를 억제시켜 상부 구조물에 대한 상호·보완적인 역할을 한다. piled raft 기초는 무리말뚝에 비해 소요되는 말뚝의 길이 및 개수를 현저하게 줄일 수 있으며, 전면기초보다 최대 침하량 및 부등 침하량을 줄임으로써 구조물의 사용성을 향상시킬 수 있는 기초이다. 또한 지지력 관점에서 무리말뚝과 전면기초와 달리 말뚝과 raft가 하중을 분담하기 때문에 기초의 지지력을 향상시킬 수 있다(Song, 2003).

Raft의 하중분담율은 전체하중에 대해 raft가 부담하는 지지력의 비(a_{pr})로 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다. $a_{pr} = 0$ 인 경우, raft의 접지압이 작용하지 않은 상태에서 말뚝이 전체하중을 부담하는 깊은 기초의 지지거동을, $a_{pr} = 1$ 인 경우, 전체하중을 raft가 전부 부담하는 얕은 기초의 지지거동을 나타낸다. 또한 $0 < a_{pr} < 1$인 경우, 말뚝과 raft가 하중을 분담하는 piled raft 기초의 지지거동을 보인다(Kim, 2013).

$$a_{pr} = \frac{R_{raft}}{R_{total}} \tag{1}$$

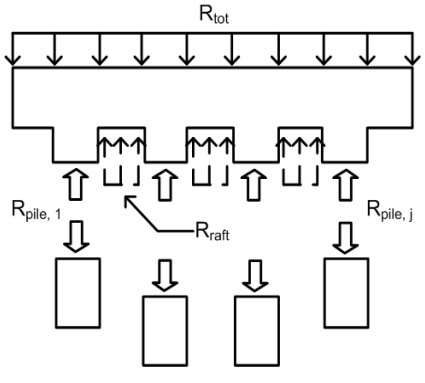


Fig. 1. Piled Raft Foundation as a Composite Structure (After Katzenbach and Reul, 1997)

3. Piled Raft 기초 모델링을 위한 경계면 요소

본 연구에서 사용된 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 2D는 Itasca consulting group에서 상용화한 지반해석용 2차원 연속체 유한차분 프로그램이다. 이 프로그램은 암석역학 및 토질역학 분야에서 편리하게 사용할 수 있으며, 다양한 기능 및 해석의 정확성 때문에 많이 사용되고 있는 코드이다. 또한 광범위한 역학적 문제를 해결하기 위해 다양한 구성방정식과 비선형 지질모델이 포함되어 있다. 이 외에 마찰 조건을 모델링할 수 있는 경계면 요소(interface element), 평면변형률, 축대칭 등과 같은 요소 및 모델을 고려할 수 있다. 그리고 FLAC은 자체 언어인 FISH를 이용하여 사용자가 원하는 기능이나 구성모델 등을 추가할 수 있는 장점을 지니고 있다.

한편 지반공학 개념에서의 불연속면은 말뚝, 옹벽 등의 지중구조물과 지반의 접촉면을 포함 절리 및 단층 등을 말한다. 이러한 불연속면은 Fig. 2에서 개념적으로 나타낸 경계면 요소를 이용하여 모사할 수 있으며, Mohr-Coulomb의 파괴규준을 이용하여 불연속면에 대한 물성치를 고려할 수 있다. 또한 slider와 spring으로 연결되어 있는 A와 B 경계면의 응력, 변형 특성은 수직강성(K_n)과 전단강성(K_s)에 의해 좌우된다.

4. Piled Raft 기초의 실내모형실험

Piled raft 기초의 수치해석 검증을 위해 Lee(2003)의 실내모형실험 결과를 이용하여 수치해석결과와 비교·분석하였다. 모형실험은 piled raft 기초의 거동특성과 raft의 하중분담율을 파악하기 위해 강관(steel pipe)으로 제작된 모형 말뚝과 raft를 이용하여 지반종류, 말뚝길이, 말뚝간격 그리고 말뚝배열 등의 실험조건을 달리하여 수행되었다. 이때, 말뚝의 직경(D)은 $40mm$, 두께는 $3mm$이며, raft의 두께는 $16mm$이다. 그리고 말뚝과 raft의 일체거동을 위해 연결부분은 나사로 고정되었다. 기초에 작용하는 하중은 하중재하 장치를 이용한 등속도 재하방식을 통해 $0.3mm/min$의 속도로 재하되었다. 이때 발생된 하중은 로드셀과 토압계로 측정되었고 변위는 LVDT를 이용하여 측정되었다.

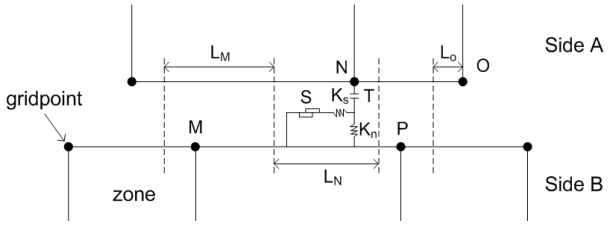
본 연구에서는 piled raft 기초의 수치해석 검증을 위해 실험조건이 조밀한 지반(D_r = 76.3%), 말뚝배열 2×2, 말뚝간격 3D인 실험결과를 비교 대상으로 선정하였다. 대상 실험결과의 지지력-변위 그래프를 확보하기 위해 Lee(2003)의 결과를 계수화(digitizing)하였다. 이때, 단일말뚝에 대한 수치해석 검증을 위하여 말뚝배열이 2×2인 실내모형실험 결과를 단일말뚝에 관한 결과값으로 환산하여 Fig. 3과 같이 도시하였다. 여기서, 말뚝의 지지력은 Eq. (2)와 같은 Converse-Labarre 공식을 이용하여 단일말뚝의 지지력을 산정하였다(Gunaratne, 2005). 그리고 raft의 지지력은 단일말뚝에 해당되는 면적의 지지력을 가지도록 raft 지지력의 0.25배로 환산하였다.

$$R_a = \frac{R_{ag}}{E \times N} \tag{2}$$

$$E = 1 - \frac{\psi}{90}\left\{\frac{(n-1)m+(m-1)n}{mn}\right\},\ \psi = \tan^{-1}\frac{D}{S}$$

여기서, R_a : 군말뚝의 지지력, R_{ag} : 단일말뚝의 지지력,
N : 말뚝의 총 수, E : 군항의 지지력 효율,
n : 말뚝의 열수, m : 한 열의 말뚝 개수,
D : 말뚝의 직경(m), S : 말뚝의 중심간격(m)

그래프를 분석한 결과, raft의 지지력은 변위가 발생됨에 따라 지속적으로 증가하는 반면, 말뚝은 약 2 mm에서 항복하여 지지력의 증가폭이 감소하는 경향으로 나타났다. 여기서, 말뚝직경을 고려한 침하량을 기준으로 말뚝의 극한지지력을 정의하는 침하량 기준법으로 산정하였다. 본 연구에서는 다양한 침하량 기준법 중



S : Slider, T : Tensile strength
K_n : Normal stiffness, K_s : Shear stiffness
L_N : Length associated with gridpoint N
L_M : Length associated with gridpoint M

Fig. 2. An Interface Represented by Side A and B, Connected by Shear and Normal Stiffness Springs (ITASCA, 2005)

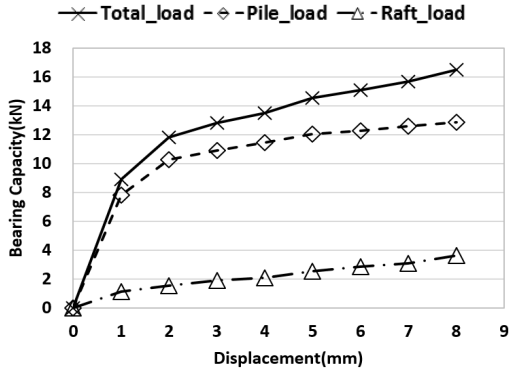


Fig. 3. A Result of Laboratory Model Test of a Single Pile

침하량이 선단직경의 10%일 때의 하중을 항복 하중으로 하는 기준인 BS Bishop 판정법을 적용하여 침하량이 선단직경의 10%인 4 mm가 발생할 때의 지지력을 극한지지력으로 산정하였다(Park, 2001). 최종적으로 말뚝의 극한지지력은 11.5kN, raft의 극한지지력은 2.1kN, raft의 하중분담율은 약 15.4%로 산정되었다.

5. Piled raft 기초의 수치해석 모델링

5.1 해석개요 및 모델링 방법

본 연구에서는 축대칭 조건과 경계면 요소를 이용한 piled raft 기초 모델링 방법이 합리적인지 검증하기 위해 유한차분법을 기반으로 한 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 2D를 이용하여 실내모형실험과 수치해석의 지지력-변위 상관관계를 비교·분석하였다. 이를 위해 piled raft 기초의 말뚝과 raft를 연속체 요소로 모델링하고 말뚝과 지반 사이의 불연속면의 거동은 경계면 요소(interface element)를 적용하여 모사하였다. 그리고 말뚝의 원형 단면을 고려하기 위해 말뚝의 중심축을 기준으로 축대칭 조건(axisymmetry condition)을 적용하여 반단면 해석을 수행함으로써 단일말뚝에 대한 결과를 분석하였다.

해석단면의 경계면은 해석결과에 영향을 미치지 않도록 설정하였다. 하부경계의 경우, 예비해석을 통해 말뚝 선단부에서 하부방향으로 말뚝 길이의 0.5배의 해석영역을 적용하였다. 그리고 우측경계는 얕은 기초의 전단파괴 영향범위를 고려하여 raft 끝단으로부터 raft 직경의 5배만큼 해석영역을 적용하였다(Jeon, 1998). 여기서, 2차원 해석을 위한 측면경계 및 하부경계는 각각 수평방향과 수직방향으로 구속하였다. 그리고 지반은 항복거동을 비교적 잘 나타낼 수 있는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 항복규준을 적용하였다. Table 1은 본 해석에서 적용된 사질토 물성치로써 Lee(2003), Jeang(2004) 및 Choi(2013)가 사용한 물성치를 종합하여 선정한 것을 나타낸다. 여기서, 탄성계수의 경우 실제지반이 아닌 인위적으로 지반을 형성한 모형지반인 것을 감안하여 하한치로 선정하였다.

그리고 요소의 분할 수와 크기로 인한 영향을 최소화하기 위해 말뚝과 raft 근접부분의 요소망의 크기를 말뚝 두께의 50%인 1.5 mm로 충분히 작게 적용하고 그 외의 영역은 점차적으로 크기를 증가시켰다. 해석영역 개요 및 경계조건이 적용된 2차원 요소망은 Fig. 4와 같으며, Table 2는 수치해석에 사용된 piled raft 기초의 규격으로 이는 실내모형실험과 동일한 조건이다.

한편 경계면 요소를 이용할 경우, 초기응력을 재현하는 해석과정에서도 동일하게 적용되기 때문에 불연속면 사이에서 발생되는 변위차이를 줄이기 위해 큰 수직 및 전단강성을 적용하였다(Itasca, 2005). 즉, 초기응력 재현 시 수직강성은 $1.0\times10^2\,GPa/m$, 전단강성은 $0.5\times10^2\,GPa/m$로 적용하였으며, 불연속면의 분리와 미끄러짐을 방지하기 위해 경계면 요소의 옵션인 'glued'와 'bslip off'를 적용하였다. 여기서, 지반의 측압계수(K_0)를 1.0으로 가정하였다.

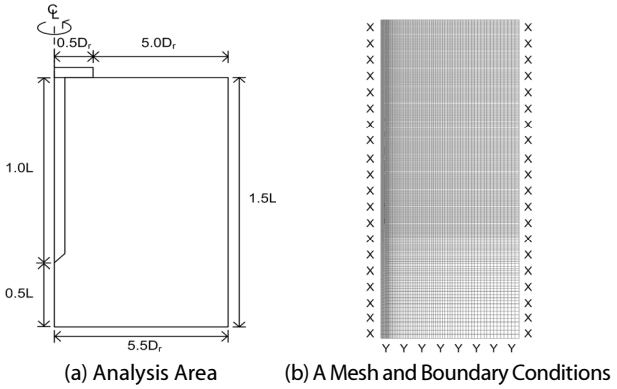
본 연구에서 적용된 piled raft 기초의 설치방법은 말뚝을 매입말뚝으로 고려함으로써 초기응력 재현 후 말뚝과 raft가 설치되는 영역의 물성치를 강제(steel) 물성치로 변경하여 모델링하였다. Table 3은 적용된 강제의 물성치를 정리한 것이다. 그리고 실내모형실험과 동일한 조건을 만족시키도록 말뚝 내부를 제거하고, 말뚝과 raft는 파괴가 발생하지 않는 탄성체로 모델링하였다. 또한 실제 모형말뚝과 동일한 형상을 고려하기 위해 말뚝 선단부를 원뿔각도 45°로 모델링하였다. Fig. 5는 설치된 piled raft 기초와 경계면 요소를 나타낸다. 여기서, 실내모형실험과 동일한 조건으로 말뚝과 raft를 일체화하기 위해 A_line 부분에 'attach' 명령어를 적용하여 말뚝과 raft의 요소망을 결합하였다.

Table 1. Sandy Properties Applied to This Analysis

Unit weight (kN/m^3)		Elastic modulus (MPa)
15.1		3.0
Poisson's ratio	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
0.25	0.1	39.5

Table 2. The Specification of a Piled Raft Foundation

Sort	Length (m)	Diameter (m)	Thickness (m)
Pile	1.0	0.04	0.003
Raft	-	0.124	0.016



(a) Analysis Area (b) A Mesh and Boundary Conditions

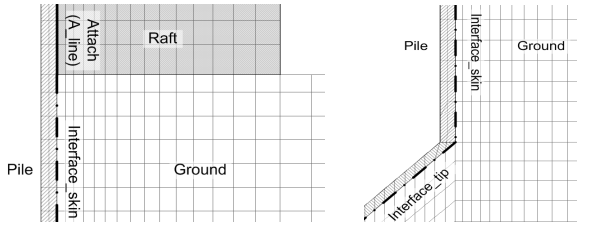
Fig. 4. Numerical Overview of a Piled Raft Foundation

Table 3. Steel Properties Applied to a Piled Raft Foundation

Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
66.4	200	0.3

한편 말뚝과 지반 사이의 불연속면 거동을 모사하기 위하여 경계면 요소의 선택조건(option)을 'unglued'와 'bslip on'로 적용하였다. 그리고 경계면 요소의 물성치 중 점착력 및 내부마찰각을 O'Neill et al.(1994)이 제안한 원지반 물성치의 50%를 적용하였다. 여기서, 내부마찰력은 tan ϕ에 대한 50%로 고려하였다. 그 외의 응력 및 변형 특성을 결정하는 수직강성(K_n)과 전단강성(K_s)은 모형실험 결과와 유사한 지지력이 산정되도록 역해석을 수행하여 산정하였다.

기초에 작용하는 하중은 내부 프로그래밍 언어인 FISH를 이용하여 raft 및 말뚝의 두부에 일정한 속도 $1.0\times10^{-8}m/step$을 가함으로써 재하하였다. Fig. 6은 수치해석상에서 하중을 재하하는 방법과 지지력을 산정하는 위치를 나타낸 개념도이다. 이때, 실내모형실험 결과와 비교하기 위해 모형실험과 동일한 최종변위 $8mm$가 발생될 때까지 속도를 가하였다. 기초에 발생된 지지력은 FISH를 이용하여 Fig. 6과 같이 지지력이 발생되는 영역의 응력을 측정함으로써 산정하였다. 여기서, raft의 지지력 및 말뚝의 선단지지력을 산정하기 위해 요소에 발생된 수직응력을 측정하였고, 말뚝의 주면마찰력 산정을 위해 요소의 전단응력을 측정하였다. 측정된 응력들은 축대칭 조건에 의하여 산정된 값으로 응력 발생영역에 대한 면적을 곱함으로써 최종적인 지지력과 주면마찰력을 산출하였다.



(a) Side of Pile-Head (b) Side of Pile-End Point

Fig. 5. A Piled Raft Foundation and Interface Element

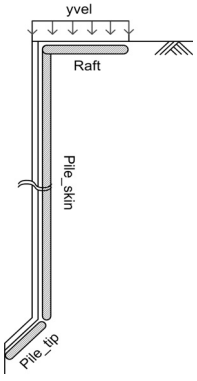


Fig. 6. Loading Mechanism and Bearing Capacity Measuring Locations

5.2 실내모형실험 및 수치해석 결과 비교·분석

실내모형실험과 수치해석의 결과를 비교·분석하기 위하여 실내모형실험과 유사한 결과를 얻도록 경계면 요소의 수직 및 전단강성에 대한 역해석을 수행하였다. 해석 결과 Fig. 7과 같이 말뚝의 선단지지력, 주면마찰력, 및 raft의 지지력에 대한 지지력 - 수직변위 상관관계를 얻었다. 이때 역해석으로 얻어진 말뚝 경계면 요소의 수직 및 전단강성은 Table 4와 같다.

Fig. 7과 같이 주면마찰력은 약 $1.0mm$에서 항복하는 반면, 선단지지력 및 raft의 지지력은 변위가 발생됨에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 piled raft 기초에 일정한 속도로 변위를 가하여 하중을 재하함으로써 지반에 작용하는 수직응력이 지속적으로 증가하기 때문으로 사료된다. 한편 수치해석 시 piled raft 기초의 극한지지력은 침하량 기준법 중 BS bishop 판정법에 근거하여 직경의 10%에 해당하는 변위가 발생할 때의 지지력으로 산정하였다.

최종적으로 Fig. 8과 같이 실내모형실험 및 수치해석의 지지력-변위 상관관계를 도시하고, Table 5와 같이 극한지지력 및 raft의 하중분담율을 정리하였다. 그래프를 분석한 결과, 말뚝과 raft에 대한 지지력-변위 상관관계의 경향이 동일하게 나타났다. 그리고 말뚝과 raft의 극한지지력의 평균 오차율은 약 7.8%, raft의 하중분담율의 오차율은 약 2.6%로 실내모형실험과 수치해석의 극한지지력은 비교적 유사하게 나타난 것을 확인하였다. 따라서 축대칭 조건 및 경계면 요소를 이용한 piled raft 기초의 모델링 방법은 적합한 것으로 판단된다.

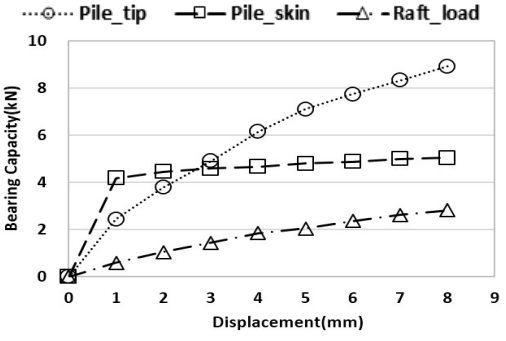
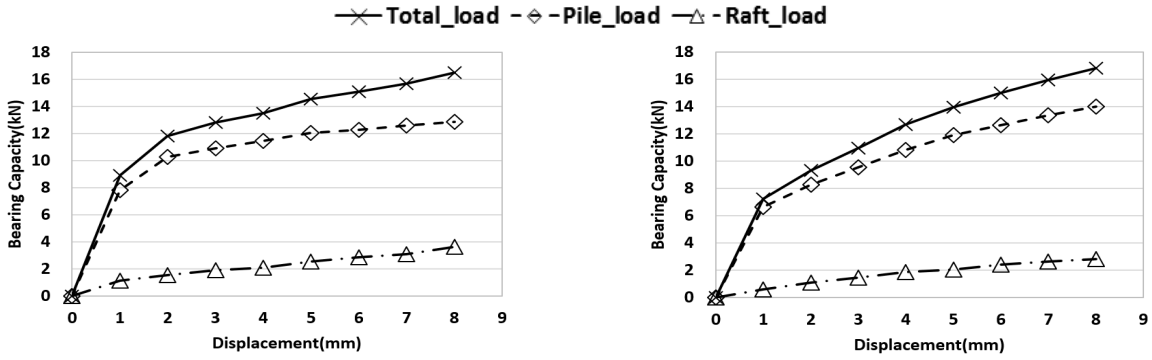


Fig. 7. Correlation between Bearing Capacity and Displacement Obtained from Numerical Analysis

Table 4. Normal and Shear Stiffness Calculated through a Back Analysis

Sort	Normal stiffness (GPa/m)	Shear stiffness (GPa/m)
Skin	1,000	500
Tip	1.0	500



(a) Laboratory Model Test (b) Numerical Analysis

Fig. 8. Correlation between Bearing Capacity and Displacement of Laboratory Model Test and Numerical Analysis

Table 5. Results of Laboratory Model Test and Numerical Analysis

Sort		Laboratory model test	Numerical analysis
Bearing capacity (kN)	Pile	11.5	10.8
	Raft	2.1	1.9
Load bearing ratio of raft (%)		15.4	15.0

Table 6. Soil Properties Used for Sensitivity Analysis (Kim, 2002)

Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
20.0	20.0	0.3	10.0	30.0

Table 7. Parameters Selected for Sensitivity Analysis

Pile length (m)	Ratio of diameter to pile length (D_r/L, %)
7.0	30.0
11.0	40.0
15.0	50.0

Table 8. Properties of a Piled Raft Foundation Used for Sensitivity Analysis (Kim, 2008)

Sort	Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Pile	13.44	12.50	0.25
Raft	25.00	30.00	0.20

6. Piled raft 기초의 민감도분석

6.1 민감도분석 개요

본 연구에서는 풍화토에 근입된 piled raft 기초의 하중분담율을 분석하기 위해 실제 현장조건을 고려한 민감도분석을 수행하였다. 이를 위해 piled raft 기초의 형상에 따른 매개변수를 선정하여 raft의 지지력과 말뚝의 선단지지력 및 주면마찰력의 상호영향을 비교·분석하였다. Table 6은 해석영역에 적용된 풍화토 물성치를 나타낸다.

민감도분석을 위해 piled raft 기초 중 말뚝의 길이 및 raft의 직경을 매개변수로 선정하였다. 여기서 말뚝의 길이는 PHC(Pre-tensioned spun High strength Concrete) 말뚝 규격을 근거하여 1 본 당 길이인 $7m$, $11m$, $15m$로 선정하였다(Korean Agency for Technology and Standards, 2014). 또한 raft의 직경은 말뚝 중심 간의 최소 거리인 $2.5D$(D : 말뚝의 직경)를 만족하며 raft의 지지력을 정량적으로 산정할 수 있도록 말뚝의 길이(L)에 대한 raft의 직경(D_r)의 비율인 raft의 직경비(D_r/L, ratio of diameter to pile length)를 적용하였다. 즉, 각 말뚝 길이에 대한 raft의 직경비를 30%, 40%, 50%로 선정하여 모델링하였다. 따라서 본 연구에서 수행한 매개변수 조합은 말뚝의 길이(3) × raft의 직경비(3)로 총 9개에 대한 민감도분석을 수행하였다. Table 7은 민감도분석을 위한 매개변수의 종류를 나타낸다.

PHC 말뚝의 제원은 직경 $0.5m$, 두께 $0.08m$이며, 선단부의 형상은 실제 PHC 말뚝의 형상과 동일한 평판형(flat type)으로 하였다. 여기서, 일정 두께를 갖는 PHC 말뚝을 내부가 채워진 solid 형태로 모델링하였다. 따라서 말뚝의 단위중량의 경우, 두께가 $0.08m$인 PHC 말뚝의 단위중량 $25.0kN/m^3$을 단면적을 고려하여 solid 형태에 대한 단위중량으로 환산함으로써 말뚝의 단위중량을 $13.44kN/m^3$으로 적용하였다. 그리고 raft는 콘크리트 재질로 국내·외에서 해석 시 사용된 25~34 GPa의 평균인 30 GPa을 적용하였다. Table 8은 민감도 분석에 사용된 말뚝과 raft의 물성치를 정리한 것이다.

한편 경계면 요소(interface element)의 입력 물성치인 수직 및 전단강성에 대한 정량적인 기준은 국내·외적으로 명확하지 않은 실정이다. Lee et al.(2012)은 경험적인 방법을 토대로 Table 9와

Table 9. Properties of Interface Element Summarized through Previous Studies (Lee et al., 2012)

Sort	Layer	Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)
Pile-soil	Weathered soil	30	15
Pile-rock	Weathered rock	700	350
	Soft rock	2,000	1,000
Rock discontinuity	Soft rock	400	400

Table 10. Properties of Interface Element Applied to Sensitivity Analysis

Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
30	15	5	16.1

같이 기존에 제안된 수직 및 전단강성에 대한 범위를 요약하였다. 따라서 본 연구에서는 풍화토에 근입된 piled raft 기초의 거동평가를 위한 민감도분석을 위해 Table 9에 근거하여 경계면 요소에 적용한 물성치를 Table 10과 같이 정리하였다. 여기서, 점착력과 내부마찰각은 O'Neill et al.(1994)이 제안한 원지반 물성치의 50%를 적용하였다. 또한 말뚝의 주면부와 선단부의 수직 및 전단강성은 같다고 가정하였다.

6.2 매개변수에 대한 해석결과 분석

매개변수로 선정된 piled raft 기초의 형상(말뚝의 길이, raft의 직경비)에 대한 지지력-변위 상관관계 및 raft의 하중분담율을 분석하였다. 이를 위해 침하량 기준법 중 BS bishop 판정법을 적용하여 선단직경의 10%인 50mm의 침하량이 발생했을 때의 하중을 극한지지력으로 산정하였다. 해석 결과, 각 매개변수 조합에 대한 지지력-변위 상관관계를 Fig. 9와 같이 도시하였고, 극한지지력 및 raft의 하중분담율을 Table 11과 같이 정리하였다.

그래프를 분석해본 결과, 선단지지력 및 raft의 지지력과는 달리 주면마찰력은 특정 변위에서 항복하는 경향을 보였다. 말뚝 길이가 7m인 경우, 약 10mm에서 주면마찰력이 항복하였고, 말뚝 길이가 11m인 경우와 15m인 경우는 각각 약 15mm, 약 20mm에서 항복하는 것을 확인하였다. 즉, 말뚝 길이가 증가함에 따라 항복되는 변위가 증가하는 것으로 나타났다. Table 11과 같이 극한지지력을 분석해본 결과, 말뚝 길이가 증가할수록 주면마찰력과 raft의 지지력은 지속적으로 증가하는 반면, 선단지지력은 비교적 유사한 값으로 산정되는 경향으로 나타났다. 이는 동일한 지반조건에서 해석이 수행되었기 때문에 선단지지력이 유사한 값을 나타나는 것으로 사료된다.

한편 raft의 하중분담율을 분석하기 위하여 Table 12와 같이 piled raft 기초의 매개변수에 대한 raft의 하중분담율 및 평균 증가량을 정리하고, 하중분담율의 경향분석을 위해 Fig. 10과 같이

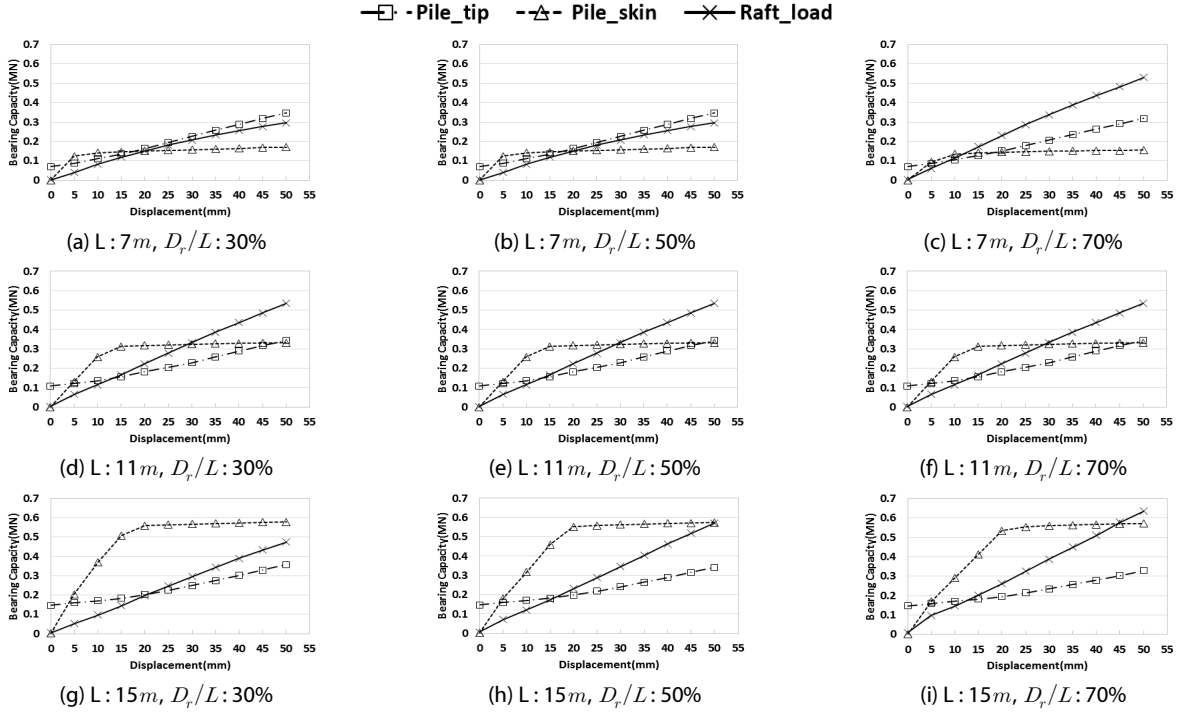


Fig. 9. Correlation between Bearing Capacity and Displacement obtained through Sensitivity Analysis

Table 11. Ultimate Bearing Capacity According to Parameter Combinations

Sort		Pile length (m)	End bearing (MN)	Skin friction (MN)	Bearing capacity of a raft (MN)
Ratio of diameter to pile length (D_r/L, %)	30	7	0.35	0.17	0.30
		11	0.36	0.34	0.41
		15	0.36	0.58	0.48
	50	7	0.33	0.16	0.44
		11	0.34	0.33	0.53
		15	0.34	0.57	0.57
	70	7	0.32	0.16	0.53
		11	0.33	0.33	0.60
		15	0.33	0.57	0.64

Table 12. Load Bearing Ratio of Raft and Average Increment According to Pile Parameters

Sort		Ratio of diameter to pile length (D_r/L, %)			The average increment of load bearing ratio per 10 % of D_r/L increasing(%)
		30	50	70	
Pile length (m)	7	36.59	47.31	52.48	4.0
	11	36.94	44.17	47.62	2.7
	15	33.80	38.51	41.56	1.9

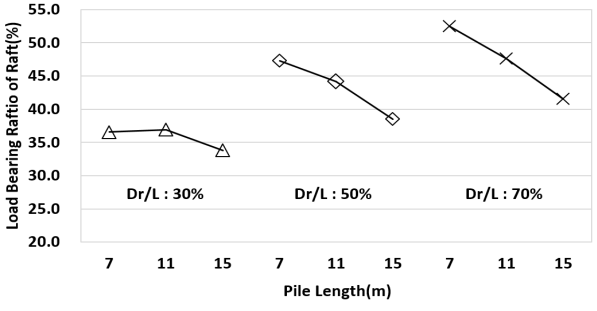


Fig. 10. Comparison of Load Bearing Ratio of Raft

도시하였다. Fig. 10으로부터 알 수 있듯이 raft의 하중분담율은 말뚝 길이가 증가할수록 감소하며, raft의 직경비가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 여기서, 하중분담율의 증가량은 말뚝 길이가 길수록, raft의 직경비가 작을수록 증가하는 것으로 나타났다. 이때 raft의 직경비가 10%씩 증가함에 따른 하중분담율의 평균 증가량을 산정한 결과, 말뚝 길이에 따라 각각 4.0%, 2.7%, 1.9%로 산정되었다. 즉, 말뚝 길이가 짧을수록 raft의 직경비에 대한 효과가 증가하는 것으로 판단된다. 최종적으로 raft의 하중분담율은 약 33%~52% 범위 내에서 산정되어 전체 지지력의 상당부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 기존 문헌에서 언급한 raft의 하중분담율의 범위인 35%~50%와 거의 유사한 값을 보였다. 따라서 경계면 요소를 이용한 piled raft 기초의 모델링 방법은 적합한 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 축대칭 조건(axisymmetry condition) 및 경계면 요소(interface element)를 이용하여 piled raft 기초에 대한 수치해석 모델링 방법을 검증하였다. 이를 위해 유한차분법을 기반으로 한 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 2D를 이용한 수치해석 결과와 실내모형실험 결과를 비교·분석하였다. 그리고 실제 현장조건을 고려한 raft의 하중분담율을 비교·분석하기 위하여 piled raft 기초의 매개변수에 대한 민감도분석을 수행하였다. 연구 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 실내모형실험과 수치해석 결과를 비교·분석한 결과, 말뚝과 raft에 대한 지지력-변위 상관관계의 경향이 동일하게 나타났다. 또한 raft의 하중분담율은 실내모형실험에서 약 15.3%, 수치해석의 경우 약 15.0%로 산정되었다. 따라서 수치해석의 결과는 실내모형실험과 비교적 유사하게 산정된 것으로 사료된다.

(2) 민감도분석을 수행한 결과, raft의 하중분담율은 약 33%~52%의 범위 내에서 산정되어 기존 연구에서 언급된 범위와 유사한 것으로 확인하였으며, 말뚝 길이가 감소할수록, raft의 직경비가 클수록 증가하는 경향으로 나타났다. 그리고 raft의 직경비가 10%씩 증가함에 따른 하중분담율의 평균 증가량은 말뚝 길이가 $7m$, $11m$, $15m$일 때 각각 4.0%, 2.7%, 1.9%로 산정되었다. 따라서 말뚝 길이가 짧을수록 raft의 직경비에 대한 효과가

증가하는 것으로 나타났다.

(3) 실내모형실험과 수치해석 결과를 비교·분석하고 민감도분석을 통한 raft의 하중분담율을 산정한 결과, 유한차분해석을 이용하여 축대칭 조건 및 경계면 요소를 적용한 piled raft 기초의 모델링 방법은 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 축대칭 조건 및 경계면 요소를 적용함으로써 단일말뚝에 대한 수치해석 모델링 방법을 검증하였다. 따라서 추가적으로 군말뚝을 고려한 모델링 방법의 연구를 수행하기 위해 경계면 요소가 아닌 pile 요소를 이용한 모델링 검증이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 경계면 요소를 이용하여 단일말뚝에 대한 연구를 수행할 경우, 보다 정확한 불연속면의 거동을 모사하기 위해 경계면 요소의 물성치인 수직 및 전단강성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Choi, K. J. (2013). *Analysis of behavior and load sharing of piled rafts*, Master's Dissertation, Yonsei University (in Korean).

Gunaratne, M. (2005). *The foundation engineering handbook*, CRC Press, Boca Raton.

Itasca Consulting Group, Inc. (2005). *Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.

Jeang, Y. K. (2004). *Study on soil properties and earth pressure at domestic multi-layer*, Master's Dissertation, Hankyong National University (in Korean).

Jeon, S. K. (1998). *Design manuals of foundation structure for practitioners*, Sciencebook (in Korean).

Kateznbach, R. and Reul, O. (1997). "Design and performance of piled rafts." *Proc. 14th ICSMFE, Hamburg*, Vol. 4, pp. 2,253-2,256.

Kim, B. S. (2013). *Finite element analysis on the behavior of piled raft installed in soft clay*, Master's Dissertation, Pukyong National University (in Korean).

Kim, C. K. (2002). *3-D Behavior of adjacent structures in tunnelling induced ground movement*, Master's Dissertation, Dankook University (in Korean).

Kim, H. R. (2014). *The estimation of bearing capacity for a piled raft foundation using finite element method*, Master's Dissertation, University of Suwon (in Korean).

Kim, S. M. (2008). *Analysis of axial load sharing of piled raft in layered soil*, Master's Dissertation, Yonsei University (in Korean).

Kim, T. J. (2013). *A numerical investigation on end bearing capacity of single pile installed in fractured rock mass*, Master's Dissertation, Sungkyunkwan University (in Korean).

Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2014). *Pretensioned spun high strength concrete piles*, KS F 4306 (in Korean).

Lee, J. H., Cho, H. Y., You, K. H. and Jeong, S. S. (2012). "A study on the ultimate point resistance of rock socketed drilled shafts using FLAC 3D and UDEC." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 29-39 (in Korean).

Lee, W. (2003). *A study on load bearing ratio of raft in piled raft on granular soil*, Ph.D. Dissertation, Keimyung University (in Korean).

O'Neill, M. W. and Hassan, K. M. (1994). "Drilled shaft : Effects of Construction on Performance and Design criteria." *Federal Highways Administration*, Vol. 1, pp. 137-187.

Park, S. K. (2001). *A study on the interaction of the piled raft foundation from model test*, Master's Dissertation, Hongik University (in Korean).

Seo, Y. K. (2004). "Piled-raft foundation on soft clay in Gimhae area." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 20-25 (in Korean).

Song, J. W. (2003). *A study on load bearing capacity of piled raft using finite element analysis*, Master's Dissertation, Sunmoon University (in Korean).