

지반조건이 Piled Raft 기초의 거동에 미치는 영향 평가를 위한 매개변수 연구

A Parametric Study to Estimate the Behavior of a Piled Raft Foundation Influenced by Ground Conditions

유 광 호¹ You, Kwang-Ho

정 연 학² Jung, Yeun-Hak

Abstract

In this study, a sensitivity analysis was carried out by using numerical analysis under the consideration that it is difficult to analyze the behavior of real piled raft foundations on different ground conditions through a real scale test. The program used for numerical analysis is FLAC 3D based on the finite difference method. Piles were modelled by using pile element that is one of the structure elements of FLAC 3D and the ground and raft were modelled by using continuum element. With a fixed pile arrangement of 3×3 , the diameter, length, space of piles, and ground conditions were selected as sensitivity parameters and their mutual correlation were investigated. As a result, the bigger and longer pile diameter, length and pile space are, the bigger the bearing capacity of the piled raft becomes. When pile space exceeded a specific value, however, the piled raft foundation behaved like a shallow foundation supported by only a raft. Also it can be confirmed that the better ground conditions are, the more total bearing capacity of the piled raft foundation increases.

요 지

본 연구에서는 지반조건에 따른 실제 piled raft 기초의 거동을 실험을 통해 분석하기가 어려운 점을 감안하여 수치해석을 이용한 민감도분석을 수행하고자 하였다. 수치해석에 사용한 프로그램은 유한차분법 기반의 FLAC 3D이다. 말뚝의 수치해석 모델링은 FLAC의 구조요소 중 하나인 말뚝요소를 사용하여 모델링하였고, 지반과 래프트는 연속체 요소를 이용하여 모사하였다. 말뚝의 배열은 3×3 으로 고정하고 말뚝직경, 말뚝길이, 말뚝간격 그리고 지반조건을 민감도 매개변수로 선정하고 상관관계를 규명하였다. 그 결과, 말뚝직경이 크고 말뚝의 길이가 길수록, 그리고 말뚝의 간격이 넓을수록 piled raft 기초의 전체 지지력은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 지반조건에 따라 말뚝간격이 일정 간격 이상이 될 경우, piled raft 기초의 거동이 래프트만으로 지지되는 얕은기초와 유사한 거동을 보였다. 또한 지반조건이 좋아질수록, piled raft 기초의 전체 지지력은 증가함을 확인할 수 있었다.

Keywords : Piled raft foundation, Load bearing ratio of raft, 3D finite difference analysis, Group pile foundation

1 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon, Tel: +82-31-220-2566, Fax: +82-31-220-2522, khyou@suwon.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)

2 비회원, 건화 엔지니어링 사원 (Kunhwa Engineering & Consulting, Employee)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 건설현장에서 시공되고 있는 기초의 형태는 래프트의 지지력은 고려하지 않은 채, 말뚝의 지지력만을 고려함으로써 필요 이상의 말뚝설계로 인한 비경제적인 시공이 이루어지고 있는 실정이다. 보다 합리적인 기초의 시공을 위해서는 래프트와 말뚝의 지지력을 모두 고려하는 기초형식인 piled raft 기초를 적용하여야 한다. Piled raft 기초의 래프트는 지반과 맞닿아 있기 때문에, 상부하중의 상당부분을 분담한다. 이는 국내·외에서 다양한 실험 및 연구에 의해 래프트의 하중분담률은 약 35%~50%를 분담한다고 보고된 바가 있다(Song, 2003). 하지만 대부분의 piled raft 기초에 대한 연구는 실제 스케일을 반영하기가 힘들어 대부분 수치해석을 이용한 연구가 이루어지고 있다. 또한 piled raft 기초는 지반-말뚝-래프트의 복잡한 상호관계에 의해 정확한 설계 기준이 제시되어 있지 않다는 문제가 있다. 따라서 정확한 piled raft 기초의 거동분석을 위해서 말뚝과 래프트의 규격이 기초에 미치는 거동을 분석한 연구(Park, 2001; Song, 2003)가 수행된 적이 있으나, 지반조건이 piled raft 기초의 거동에 미치는 영향을 분석한 연구는 전무한 실정이다.

Bae(2015)는 건축구조물 기초설계 시 래프트의 지지력을 고려했을 때의 이점을 분석하기 위하여 piled raft 기초의 경제성 분석을 수행하였다. 또한 실내모형실험의 결과와 FLAC 2D, FLAC 3D를 이용한 2차원 및 3차원 수치해석 결과를 비교하여 말뚝배열이 2×2, 2×3, 3×3인 piled raft 기초의 모델링 방법의 타당성을 검증하였다. 그 결과 말뚝의 지지력은 래프트의 지지력과 반비례하고 말뚝의 직경, 개수 및 길이와는 비례함을 확인하였다. 하지만, 대상현장의 특정한 지반조건에 대한 연구로서 다양한 지반조건을 고려하지는 못하였다.

Le et al.(2011)과 You et al.(2015)은 각각 벤텡기초 및 piled raft 기초의 지지력 산정을 위한 수치해석 시 하중재하를 모사하기 위해 직접 하중을 가하는 방법 대신 일정 속도를 가하는 방법을 적용하였다. Le et al.(2011)은 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS(Ver. 6.10)을 사용하여 지반에 설치된 벤텡기초의 지지력을 분석하였고, You et al.(2015)은 경계면 요소와 축대칭 조건을 적용한 유한차분해석을 통해 piled raft 기초의 거동을 평가하였다. 수치해석과 실내모형실험 결과를 비교·분석한 결과, 지지력과 수직변위의 경향이 서로 동일하게 나

타났고, 래프트의 하중분담률과 piled raft 기초의 극한 지지력이 유사하게 산정되었다. 하지만 적용된 모델링 방법은 경계면 요소와 축대칭 조건을 적용하였기 때문에 말뚝과 래프트 형상이 원형이고, 단일말뚝인 경우에만 사용 가능하다는 단점이 있다.

Choi et al.(2012)은 말뚝과 래프트의 거동 특성 분석을 통해 하중분담률을 평가할 수 있는 모델을 제안하고, 이를 모형토조에서 실시된 원심모형시험 결과와 비교함으로써, 형상에 따른 기초의 거동을 분석하였다. 설정한 모델과 원심모형실험을 비교한 결과, 두 시험 모두 침하량이 증가할수록 말뚝의 하중분담률은 감소하는 경향을 보였으나 제안된 모델이 원심모형시험 결과보다 하중분담률의 감소량이 적음을 확인하였다.

Seo(2004)는 2층 지반에 설치된 무리말뚝 길이에 따른 거동특성을 분석하기 위해 모형실험을 실시하였고 동일한 조건으로 DEFIG(Ver. 8.1)를 이용해 수치해석을 수행하여 모형실험 결과를 검증하였다. 그 결과 말뚝의 하중지지력은 항복하중 이후에 서서히 증가하지만, 래프트의 하중지지력은 항복하중 이후에도 지속적으로 증가하여 상당한 하중을 분담하였다. 또한 말뚝간격이 넓어질수록 래프트의 하중분담률도 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 말뚝길이 및 간격에 관한 연구만 수행되었기 때문에 말뚝직경, 지반조건 등의 매개변수가 추가된 연구가 필요하다고 판단된다.

Tatsunori et al.(2010)은 말뚝두부조건에 따른 piled raft 기초의 거동특성을 3차원 변형해석을 이용하여 분석하고자 하였다. 이를 위해 말뚝의 두부를 각기 다른 조건을 적용한 piled raft 기초모델에 하중재하시험을 실시하였다. 그 결과, 말뚝두부조건은 수직하중을 받는 균 말뚝과 piled raft 기초에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 또한, 래프트가 수평변위를 감소시키는 역할을 수행하기 때문에 piled raft의 수평강도가 균말뚝보다 큰 결과가 도출되었다. 하지만 사질토 지반에서만 연구가 진행되었기 때문에 다양한 지반에서의 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 실제 스케일의 piled raft 기초의 거동 분석을 위한 시험이 어려운 점을 감안하여 3차원 수치해석을 사용하여 지반조건을 고려한 piled raft 기초의 거동을 분석하고자 하였다. 이를 위해 말뚝은 FLAC 3D의 구조요소(structural element) 중 하나인 말뚝요소(pile element)를 이용해 3×3의 배열을 갖는 piled raft 기초에 한하여 말뚝의 직경, 길이, 간격 그리고 지반조건을

매개변수로 선정하고 민감도분석을 실시함으로써 각 매개변수간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 실제로 piled raft 기초는 보통 연약지반에 적용되지만, 본 연구는 지반조건에 따라 piled raft의 거동이 어떤 차이를 보이는지 알아보기 위해 풍화토뿐만 아니라 풍화암 및 연암도 포함하여 비교·분석을 실시하였다. 또한 piled raft 기초의 지지력 - 변위 곡선 및 래프트의 하중분담률을 이용하여 지반-래프트-말뚝의 복잡한 상호관계를 갖는 piled raft 기초의 거동을 분석하고자 하였다.

2. Piled Raft 기초 개요

Piled raft 기초는 Fig. 1과 같이 말뚝-래프트-기초지반의 지지요소로 이루어진 복합 구조체로, 상부 구조물의 하중을 말뚝과 래프트를 통해 지반으로 전달하는 기초 형태이다. 래프트는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 충분한 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 래프트의 과도한 침하를 억제시킴으로써 상부 구조물에 대한 상호·보완적인 역할을 한다. Piled raft 기초는 무리말뚝 기초보다 소요되는 말뚝길이 및 개수를 절감할 수 있으며, 래프트만으로 이루어진 전면기초보다 최대 침하량 및 부등 침하량을 경감함으로써 구조물의 사용성을 증대시킬 수 있는 기초형태이다. 또한 말뚝과 래프트가 상부 구조물하중을 분담하기 때문에 기초의 전체 지지력을 향상시킬 수 있다(Katzenbach and Reul, 1997).

래프트의 하중분담률은 전체 상부구조물 하중에서 래프트가 분담하는 지지력의 비(a_{pr})로 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다. $a_{pr} = 0$ 인 경우, 말뚝이 전체하중을 부담하는 깊은기초의 지지거동을, $a_{pr} = 1$ 인 경우, 래프트가 전체하중을 모두 부담하는 얕은기초의 지지거동을 나타낸다. 또한 $0 < a_{pr} < 1$ 인 경우, 말뚝과 래프트가 하중

을 분담하는 piled raft 기초의 지지거동을 보인다(Kim, 2013).

$$a_{pr} = \frac{R_{raft}}{R_{total}} \quad (1)$$

또한, 래프트 크기가 기초 지반의 전단파괴 양상 및 기초의 침하에 미치는 영향은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 이는 기초가 지표면과 맞닿아 있을 때, 기초 지반에서 발생하는 전단파괴 형상을 도시한 것이다. Fig. 2에 나타난 d 및 f 값은 기초 지반 전단파괴의 연직 및 수평방향 범위를 나타내기 위한 계수를 의미한다.

3. Piled Raft 기초의 극한지지력 판정

말뚝의 극한지지력을 산정하기 위해 하중-침하량 곡선은 중요한 결과물이다. 그러나 일반적으로 하중-침하량 곡선만으로 말뚝의 파괴하중이나 지지력의 기준을 정의하는 것은 매우 어렵다. 따라서 Davisson(1972), De Beer(1965) 등이 제시한 다양한 방법들을 통해 말뚝의 극한지지력을 산정하고 있기 때문에 사용한 판정법에 따라 말뚝의 극한지지력이 다소 차이가 있을 수 있다.

Davisson 판정법은 항타말뚝 분석에 가장 적합한 방법으로 하중재하 시험결과를 이용하여 말뚝의 파괴하중을 비교적 일관되게 결정할 수 있는 방법이다. 이 방법은 하중재하 시간이 1시간 이내로 재하시간이 짧은 경우에 적합하다. 이는 24시간 이상의 재하시간을 갖는 경우에는 지반의 크리프 변형이나 압밀이 발생하여 실제보다 지지력이 낮게 산정될 수 있기 때문이다.

먼저 지지력-변위 곡선을 그린 후 하중에 따른 말뚝의 탄성침하량에 $D/120(D$; 말뚝의 직경)만큼 x축으로 평행이동 시킨 직선을 작도한다. 그리고 그 직선과 하중

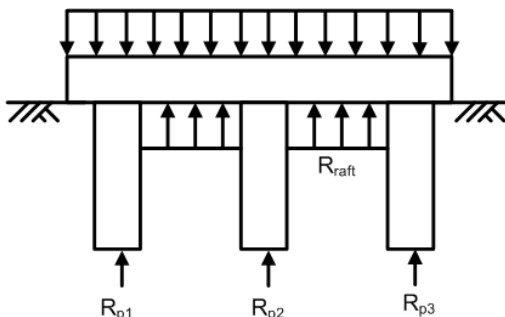


Fig. 1. Piled raft foundation as a composite structure (after Katzenbach and Reul, 1997)

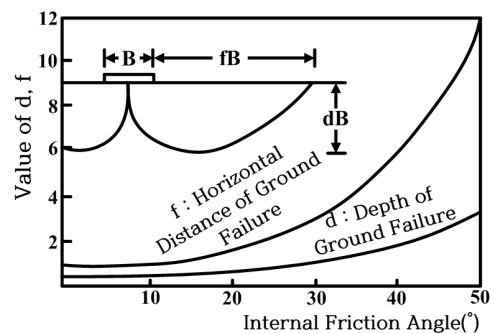


Fig. 2. Soil shear failure range of raft foundation (Jeon, 1998)

- 침하량 곡선이 만나는 지점에서의 하중을 파괴하중으로 판정하고, 안전율 2.0을 적용하여 허용하중을 산정한다. Fig. 3은 Davisson 방법의 예를 나타낸 것으로 탄성 침하량 계산에 사용된 Q는 하중, L은 말뚝의 길이, A는 말뚝의 단면적, E는 말뚝의 탄성계수를 의미한다.

De Beer 판정법은 지지력 - 변위 곡선에서 하중의 변화는 없으나, 침하량이 지속적으로 증가하여, 극한상태의 판정이 어려울 때 많이 사용되는 말뚝기초의 지지력 판정법이다. 이러한 침하량 판정법은 특정 침하량이 발생하였을 때의 하중을 극한하중으로 정의하며, 개인 오차가 적고 적용이 용이하여 널리 이용되고 있다. 침하량

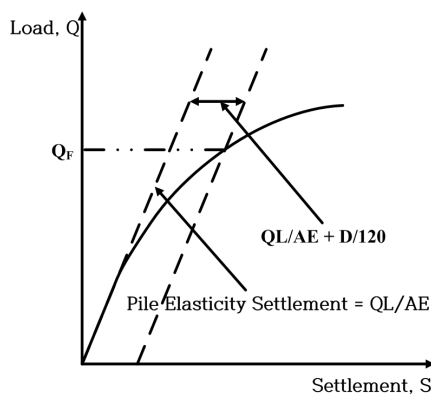


Fig. 3. An example for Davisson's method

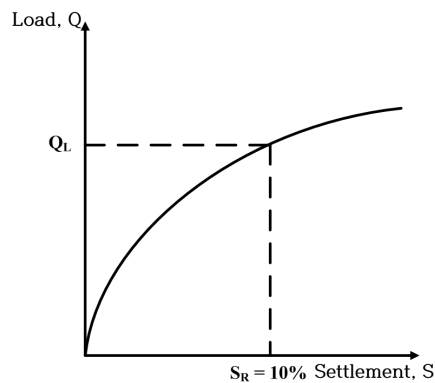


Fig. 4. An example for De Beer's method

판정법은 기준에 따라 절대 침하량, 단위하중 당 침하량, 말뚝직경을 고려한 침하량 그리고 침하율 등으로 분류할 수 있다.

이러한 침하량 판정법 중 지지력 - 변위 곡선에서 하중의 변화는 없으나 침하량이 지속적으로 증가하여 극한상태의 판정이 어려울 경우에 사용하는 방법이 De Beer 판정법이다. 이 방법은 선단직경의 10%에 해당하는 침하량이 발생할 때의 하중을 항복하중으로 판단한다. Fig. 4는 De Beer 판정법의 예시를 나타낸 것이다.

이 외에도 극한하중을 판정하기 위한 다양한 방법이 있다. Table 1은 다양한 기초의 극한지지력을 판정하기 위해 제안된 기준들을 정리한 것으로 전침하량과 순침하량을 기준으로 나누어 구분할 수 있다. 전침하량을 기준으로 하는 경우 침하량이 일정 기준에 도달하면 그때의 하중을 극한하중으로 판단하는 방법이다. 또한 하중 제거 시 탄성침하량을 배제한 잔류침하량인 순침하량을 기준으로 판단하는 방법이 있으며, 이는 지반 특성을 보다 잘 반영할 수 있다는 장점이 있다.

4. Piled Raft 기초의 수치해석 모델링

본 연구에서는 Jung(2016)이 piled raft 기초의 거동분석을 위해 수행한 모델링 방법에 기초하여 지반조건 및 말뚝규격에 대한 매개변수 조건을 확장시켜 보다 자세한 piled raft 기초의 거동을 분석하였다. 즉, 유한차분법을 기반으로 한 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D를 이용하여 piled raft 기초의 지지력-변위관계 및 래프트의 하중분담률을 분석하였다. 지반은 생성된 요소(zone)에 지반의 물성을 입력하는 연속체 모델(continuum model)을 이용하여 모델링 하였으며, Mohr-Coulomb 항복규준을 적용하여 지반의 항복거동을 잘 모사할 수 있도록 하였다. 말뚝은 해석프로그램 내의 구조요소 중 하나인 말뚝요소(pile element)를 이용하여 모델링하였다. 말

Table 1. Estimation criterion for the ultimate bearing capacity of piled raft foundations (Seo, 2015)

Sort	Code or proposer	Reference value (mm)
Total settlement	German code DIN 4014, France, Belgium	20.0
	Austria	25.0
	Terzaghi and peck	25.4
	De bear, british standard code	10% of pile diameter
Net settlement	German code DIN 4206, Japan structure standard	2.5% of pile diameter
	AASHTO	6.3
	Boston standard, woodward	12.7

뚝요소는 말뚝 자체의 거동모사를 위한 구조요소(structure element) 및 말뚝과 지반사이의 접촉면 거동모사를 위한 경계면요소(interface element)로 구성된다. 구조요소는 탄성모델을 적용하였고, 경계면요소는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 한편, 접촉면의 힘-변위 관계를 위해 수직강성(K_n) 및 전단강성(K_s)을 사용하였다. 래프트는 지반과 마찬가지로 연속체요소로서 철근콘크리트의 물성을 입력하였으며 파괴가 발생하지 않는 탄성체로 모델링하였다. Fig. 5는 수치해석 상에 사용된 지반요소와 말뚝요소를 보여준다.

해석영역의 크기는 예비해석을 통해 충분히 큰 해석영역을 설정하여 해석결과에 영향이 미치지 않도록 적용하였다. 이를 통해 하부 경계의 경우, 말뚝선단부에서 해석영역의 최하단부까지는 말뚝길이의 0.5배를 여유치로 적용하였다. 그리고 좌·우측 경계면은 Fig. 2에 언급된 Jeon(1998)이 제시한 래프트 기초의 전단파괴 영향범위를 고려하여 설정하였다. 예를 들어, 해석에 사용된 연암의 경우, Fig. 2를 이용하면 지반파괴의 전단파괴 범위를 나타내는 계수 f 가 약 5.0으로 나타났다. 이러한 방법을 이용하여 본 연구에서 사용한 해석영역의 좌·우 폭은 약 50m를 적용하였다. Fig. 6은 본 연구에서 사용된 해석영역의 크기를 나타낸 것이다. 한편 직육면체

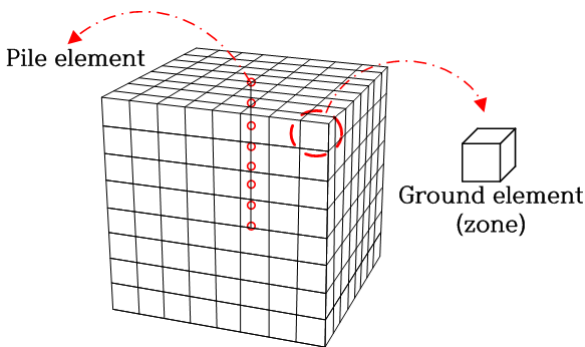


Fig. 5. Ground element and pile element on numerical analysis

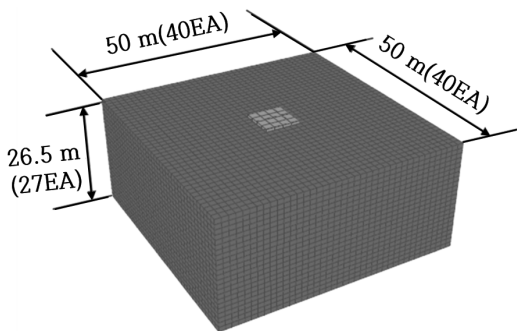


Fig. 6. Size of analysis region

요소 하나의 크기는 $1.25\text{m} \times 1.25\text{m} \times 0.98\text{m}$ 를 적용하였으며, 이러한 요소를 x 방향 40개, y 방향 40개, z 방향 27개 총 43,200개의 요소로 지반을 모델링하였다.

래프트의 경우는 민감도분석에 사용된 매개변수에 따라 크기를 달리하여 적용하였으나, 래프트를 구성하는 요소와 지반요소의 크기를 유사하도록 함으로써 해석시 발생할 수 있는 오류를 최대한 줄이고자 하였다. 관(pipe) 형태의 말뚝을 수치해석 상에서 모사하기 위해 주변장, 단면적, 단면 2차모멘트 그리고 극관성모멘트를 이용하여 속이 채워진 형태의 기둥과는 차별화하였다. 해석의 좌·우 측면경계는 x 방향을, 앞·뒤 측면경계는 y 방향을, 하부 바닥경계는 z 방향의 변위를 구속함으로써 해석단면을 설정하였다.

또한 수치해석 시, Le et al.(2011) 및 You et al.(2015)과 같이 기초에 일정한 속도를 가해($1 \times 10^{-7}\text{m/step}$) 변위를 발생시킴으로써 하중재하를 모사하였다. 즉 FLAC 3D의 내부 프로그래밍 언어인 FISH를 이용해 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 래프트 상단의 모든 절점에서 동일한 연직(z 방향) 속도를 가하여 하중을 가하였다. 또한 하중재하 시 발생하는 지지력은 FISH를 이용하여 Fig. 7에서와 같이 래프트, 주변, 선단으로 각각 나누어 산출하였다.

그리고 해석의 종료는 기초의 극한지지력을 확인할 때까지 수행되었으며, 본 연구에서는 하중과 침하량이 지속적으로 증가하여 항복하중 판정이 모호하기 때문에, 객관적이고 일관성 있는 분석을 위하여 De Beer(1965)의 침하량 기준의 극한지지력 판정법을 적용하였다. 즉, 말뚝침하량이 말뚝직경의 10%에 해당하는 변위가 발생할 때까지 해석을 수행하였다.

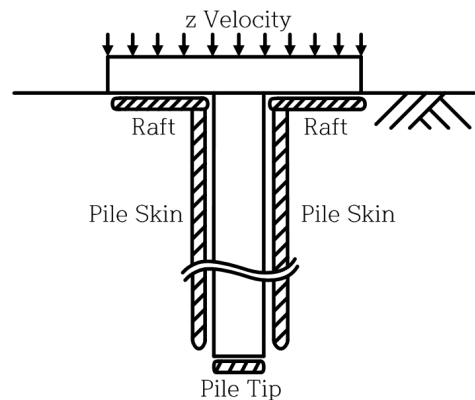


Fig. 7. Loading mechanism and bearing capacity measuring locations

5. Piled Raft 기초에 대한 민감도분석

5.1 민감도분석을 위한 매개변수 선정

본 연구에서는 지반조건 및 말뚝규격 변화가 piled raft 기초의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 지반은 풍화토, 풍화암 그리고 연암을 매개변수로 선정하였다. 말뚝직경은 PHC 말뚝규격을 고려하여 400mm, 450mm, 500mm를 선정하였다. 동일 지반조건에서 말뚝간격, 길이를 매개변수로 래프트의 하중분담률을 분석하기 위해 말뚝직경과 길이의 비를 사용한 Kwon(2007)의 연구를 참고하여 말뚝길이는 Fig. 8과 같이 말뚝직경(D)의 25D, 30D, 35D를 적용하였다. 말뚝간의 중심간격은 Prakash and Sharma(1989)가 주장한 말뚝간격과

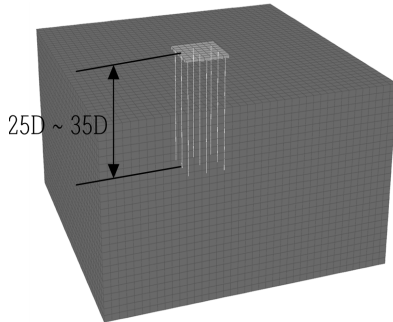


Fig. 8. Variation of pile length

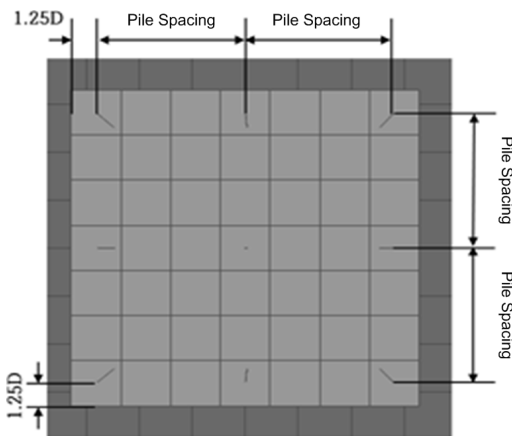


Fig. 9. Arrangement of piles and size of raft

기초거동의 관계에서 균말뚝 거동을 보이는 말뚝간격인 3D~7D를 고려하여 3D, 5D, 7D를 적용하였다. 단, Fig. 9와 같이 한국도로교통협회(2001)의 도로설계기준에 제시된 최외곽부 말뚝과 래프트 끝단 거리를 1.25D로 적용함으로써 말뚝직경과 간격에 따라 래프트 크기가 달라지도록 하였다. 한편 다층지반에서 말뚝길이, 말뚝개수 등을 매개변수로 하여 piled raft 기초의 하중분담률을 비교한 Kim(2008)의 연구와 같이 래프트의 두께를 50cm로 고정하여 해석을 수행하였다.

본 연구에 사용된 매개변수는 지반조건(3) × 말뚝직경(3) × 말뚝길이(3) × 말뚝간격(3)으로 총 81개의 경우에 대하여 민감도분석을 수행하였다. 민감도분석에 사용된 매개변수는 Table 2와 같이 정리하였다.

5.2 해석에 사용된 물성치

본 연구에서는 지반조건 및 말뚝 규격변화에 따른 piled raft 기초의 지지력 평가를 위해 지반물성을 달리 하여 piled raft 기초의 복합적인 거동을 분석하였다. 이를 위해 매개변수 중 지반조건으로 선정한 풍화토, 풍화암, 연암의 물성치는 문헌조사를 통해 다양한 지역의 물성을 참고하여 대푯값을 적용한 Nam(2003)의 입력물성을 인용하였으며 해석에 사용된 물성은 Table 3과 같이 정리하였다. 또한 측압계수(K_0)는 모든 경우의 해석에서 지층의 포아송비를 이용한 탄성론에 의해 산출된 값을 적용하였다. 즉 풍화토층의 측압계수가 0.54, 풍화암층과 연암층의 측압계수가 0.43으로 모델링되었다.

해석에 사용된 말뚝과 래프트는 철근콘크리트의 물성을 참고하여 모델링하였다. 말뚝과 래프트 모두 단위

Table 2. Parameters selected for sensitivity analysis

Ground condition	Pile diameter (Thickness, mm)	Pile length	Pile spacing
Weathered soil	400 (65)	25D	3D
Weathered rock	450 (70)	30D	5D
Soft rock	500 (80)	35D	7D

Table 3. Soil properties applied to this analysis (Nam, 2003)

Ground condition	Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Friction angle ($^\circ$)	Cohesion (kPa)	Coefficient of lateral pressure
Weathered soil	19	31.5	0.35	28	36	0.54
Weathered rock	22	98.0	0.3	35	49	0.43
Soft rock	23	500	0.3	40	100	0.43

중량(24kN/m^3), 탄성계수(35GPa), 포아송비(0.2)를 함께 적용하였으며, 이때 래프트는 해석 시 파괴가 발생하지 않는 탄성체로 모델링하였다. Table 4는 해석에 사용된 piled raft 기초의 물성을 정리하여 나타낸 것이다.

한편 말뚝요소를 적용하여 말뚝과 지반사이 접촉면의 힘-변위 관계를 수치해석적으로 모사하기 위해서는 수직강성(K_n)과 전단강성(K_s)이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 Nam(2003)이 말뚝과 지반 사이의 접촉면 거동을 모사하기 위해 사용한 K_n , K_s 값을 참고하였다. 그리고 접촉면의 파괴를 고려하기 위해 사용된 Mohr-Coulomb 모델 물성치인 접촉면의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)은 Lee et al.(2012)이 수치해석 시 적용한 바와 같이, 원지반 물성치의 50%를 적용하였다. 이때 내부마찰각의 경우, ϕ 의 50%를 적용하는 것이 아니라, 내부마찰계수($\tan \phi$)의 50%를 적용하였다. Table 5는 지반조건에 따른 말뚝요소의 입력 물성치를 정리한 것이다.

5.3 매개변수에 따른 민감도분석 결과

매개변수로 선정된 지반 및 piled raft 기초의 말뚝규

Table 4. Properties of a piled raft foundation used for sensitivity analysis

Foundation		Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Reinforced concrete	Pile Raft	24.0	35.0	0.2

Table 5. Pile element properties applied to analysis considering soil condition

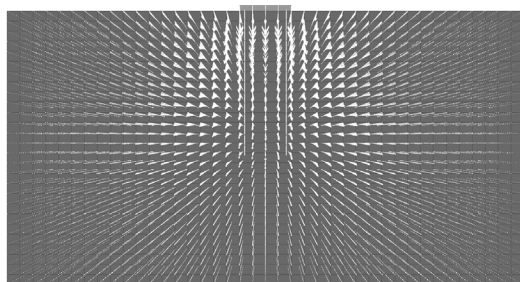
Ground condition	Normal stiffness K_n (MN/m/m)	Shear stiffness K_s (MN/m/m)	Cohesion (kPa)	Friction angle ($^\circ$)
Weathered soil	30	15	18.0	14.8
Weathered rock	700	350	24.5	19.3
Soft rock	2,000	1,000	50.0	22.7

격(말뚝길이, 말뚝직경, 말뚝간격)에 대해 지지력-변위 상관관계 및 래프트의 하중분담률을 분석하였다. 이를 위해 침하량 기준법 중 De Beer(1965) 판정법을 적용하여 선단직경의 10%에 해당하는 침하량이 발생했을 때의 지지력을 극한지지력으로 판정하였다.

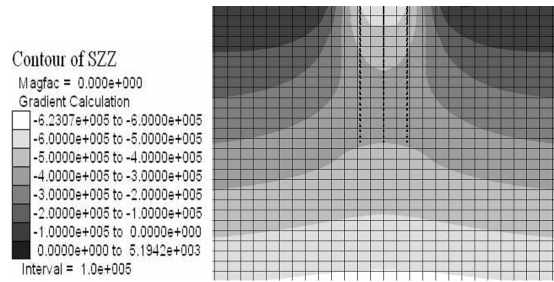
지반조건 및 말뚝의 매개변수 변화에 따른 민감도분석 결과인 지지력-변위 곡선 및 래프트의 하중분담률을 통해 piled raft 기초의 거동을 분석하였다. Fig. 10(a)는 민감도분석 결과 중 지반조건이 풍화암, 말뚝직경(D) 450mm, 말뚝길이(L) 30D, 말뚝간격(S) 5D인 경우로 piled raft 기초에 하중재하 시 발생된 기초 및 인접지반에 발생된 변위벡터를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 래프트 하단 중앙부에서 최대변위 5.12cm가 발생하였다. 또한 piled raft 기초뿐 아니라 기초와 인접한 지반에서 변위가 발생함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 10(b)은 piled raft 기초에 작용하는 수직응력(SZZ) 등고선도를 보여주는데, 래프트의 중앙 하단부에서 수직응력의 분포가 집중되고 래프트의 끝단으로 갈수록 작용하는 수직응력은 작아짐을 확인할 수 있다.

5.3.1 말뚝길이의 영향

Piled raft 기초에서 말뚝의 길이가 piled raft 기초(PRF) 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 지반조건 및 말뚝간격(S)은 고정변수로 설정하고, 말뚝길이(L)가 25D, 30D, 35D로 변할 때, piled raft 기초의 지지력-변위 곡선을 비교·분석하였다. Fig. 11은 민감도분석 결과



(a) Displacement vector diagram



(b) Vertical stress contour (Pa)

Fig. 10. Outputs of numerical analysis (Weathered rock, Diameter 450 mm, Spacing 5D)

중 지반조건이 풍화암, 말뚝간격이 5D인 경우의 해석결과를 도시한 것이다.

Fig. 11과 같이, 하중재하를 통해 일정 변위 이상이 되면 말뚝의 선단지지력과 말뚝의 주면마찰력은 항복하는 경향을 보인 반면, 래프트 지지력의 경우는 지속적으로 증가하여 기존 연구(Seo, 2004)와 동일한 경향이 나타났다. 또한 말뚝길이가 길어질수록 래프트의 지지력은 거의 변화가 없었으나, 말뚝의 지지력은 증가하였다.

Table 6은 말뚝길이에 따른 말뚝, 래프트 및 piled raft 기초의 전체 지지력을 비교한 것이다. 말뚝길이가 25D에서 30D로 증가할 때 말뚝의 주면 마찰력과 선단 지지력을 합한 말뚝 지지력은 약 19.0% 증가하고, 래프트 지지력은 약 2.4% 감소하였다. 또한 말뚝길이가 30D에서 35D로 증가할 때의 말뚝 지지력은 약 23.5% 증가하고, 래프트의 지지력은 약 1.6% 감소하였다. 한편 piled raft 기초의 전체 지지력은 말뚝의 길이가 25D에서 30D, 30D에서 35D로 증가할 때 각각 7%, 11% 증가하였다. 따라서 말뚝길이가 piled raft 기초 전체의 지지력이 증가하는 데에 영향을 준다고 판단된다. 그러므로 말뚝의 길이가 증가하면 말뚝의 하중분담률이 증가하고 래프트의 하중분담률은 감소하지만 piled raft 기초의 전체 지지력은 증가하는 경향을 보여 Bae(2015)의 연구에서 말뚝길이가 증가할 때의 경향과 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구와 Seo(2004) 및 Bae(2015)의 기존연구 결과는 실험조건이 달라서, 정확한 수치 비교는 어렵지만,

말뚝길이에 비례하여 지지력이 증가하는 동일한 경향을 보였기 때문에 본 연구의 수치해석 모델링이 합리적이라고 판단된다.

5.3.2 말뚝간격의 영향

말뚝간격과 말뚝직경의 비(S/D)가 piled raft 기초의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 지반 및 말뚝길이를 고정변수로 하고, 말뚝간격 변화에 따른 지지력-변위 곡선을 비교·분석하였다. Fig. 12는 매개변수를 이용한 민감도분석 결과 중 지반은 풍화암, 말뚝직경은 450mm, 말뚝길이는 30D인 경우의 지지력-변위 곡선을 도시한 것이다.

Fig. 12와 같이 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력은 말뚝의 간격과 무관하게 약 10mm의 변위가 발생할 때 항복거동을 보였으나, 래프트 지지력은 하중을 재하하는 동안 지속적으로 증가하였다.

Table 7은 말뚝간격에 따른 piled raft 기초의 말뚝 지지력, 래프트의 지지력, 래프트 하중분담률 및 piled raft의 지지력을 정리한 것이다. 말뚝의 간격이 3D에서 5D로 증가할 때 말뚝 지지력의 경우 16.5MN에서 18.0MN으로 약 9% 증가하고, 래프트 지지력은 5.6MN에서 16.9MN 약 200% 증가함을 보였다. 그리고 말뚝의 간격이 5D에서 7D로 증가할 때는 31.6MN에서 55.1MN으로 말뚝 지지력이 약 4% 증가하였고, 래프트의 지지력은 16.9MN에서 32.6MN 약 90% 증가함을 확인하였다.

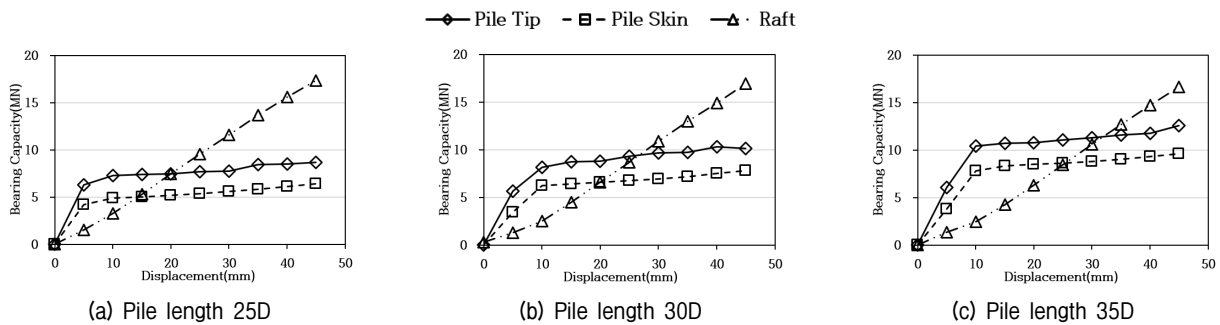


Fig. 11. Effect of pile length on bearing capacity (Weathered rock, Diameter 450 mm, Spacing 5D)

Table 6. Load bearing ratio of raft and bearing capacity of foundation applied to pile length (Weathered rock, Pile diameter 450 mm, Spacing 5D)

Pile length	Bearing capacity of a pile (MN)			Area of raft (m ²)	Bearing capacity of raft (MN)	Load bearing ratio of raft (%)	PRF bearing capacity (MN)
	Skin	Tip	Total				
25D	6.5	8.7	15.2	31.6	17.4	53.4	32.6
30D	7.8	10.2	18.0		16.9	48.4	34.9
35D	9.7	12.6	22.3		16.7	42.8	39

말뚝간격이 3D에서 2D씩 증가할 때 piled raft 기초의 지지력은 평균 약 50% 증가하였다.

5.3.3 말뚝직경의 영향

말뚝의 직경변화가 piled raft 기초에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 다른 조건은 모두 동일하게 하고 말뚝직경을 변화시켜가며 piled raft 기초의 지지력-변위 곡선을 비교·분석하였다. Fig. 13은 지반조건은 풍화암이며, 말뚝의 길이가 30D, 말뚝간격이 5D인

경우의 지지력-변위 곡선이다. 분석 결과, 3가지 직경 모두 변위가 10mm 이상에서 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력이 항복거동을 보이며 직경이 클수록 항복 후 잔류강도가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 래프트의 지지력은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

풍화암 지반조건에서 말뚝직경이 50mm씩 증가할 때 piled raft 기초(PRF)의 전체 지지력, 말뚝 및 래프트 지지력 변화를 분석한 결과를 Table 8과 같이 정리하였다. 직경이 400mm에서 450mm로 50mm 증가할 때 말뚝 지

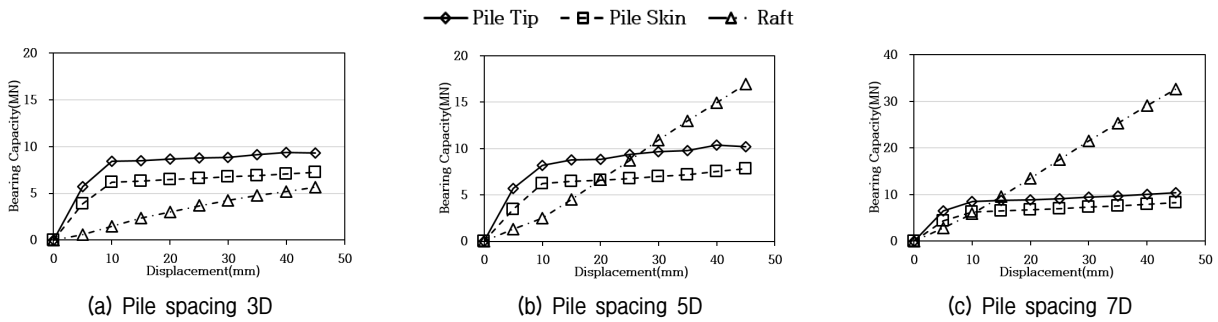


Fig. 12. Effect of pile spacing on bearing capacity (Weathered rock, Diameter 450 mm, Length 30D)

Table 7. Load bearing ratio of raft and bearing capacity of foundation applied to pile spacing (Weathered rock, Pile diameter 450 mm, Length 30D)

Pile spacing	Bearing capacity of a pile (MN)			Area of raft (m ²)	Bearing capacity of raft (MN)	Load bearing ratio of raft (%)	PRF bearing capacity (MN)
	Skin	Tip	Total				
3D	7.2	9.3	16.5	14.6	5.6	25.4	22.1
5D	7.8	10.2	18.0	31.6	16.9	48.5	33.9
7D	8.2	10.4	18.6	55.1	32.6	63.7	51.2

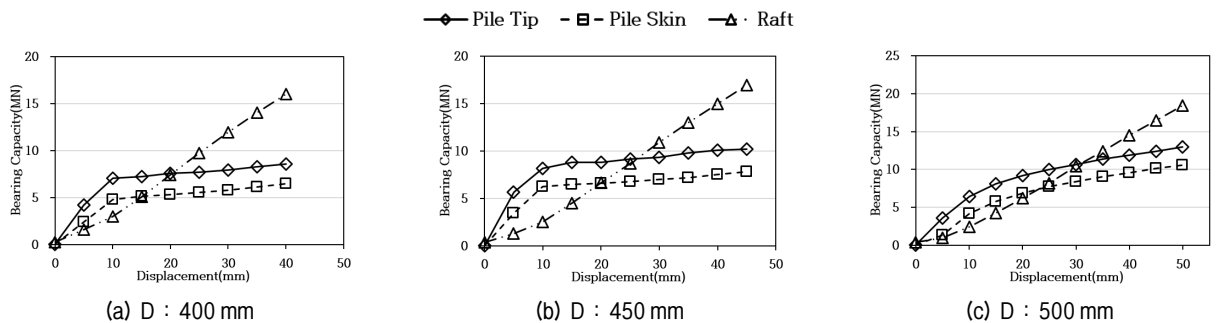


Fig. 13. Effect of pile diameter on bearing capacity (Weathered rock, Length 30D, Spacing 5D)

Table 8. Load bearing ratio of raft and bearing capacity of foundation applied to pile diameter (Weathered rock, Length 30D, Spacing 5D)

Pile diameter	Bearing capacity of a pile (MN)			Area of raft (m ²)	Bearing capacity of raft (MN)	Load bearing ratio of raft (%)	PRF bearing capacity (MN)
	Skin	Tip	Total				
400	6.5	8.6	15.1	31.6	16.0	51.5	31.1
450	7.8	10.2	18.0		16.9	48.5	34.9
500	10.1	12.4	22.5		19.5	43.8	42.0

지력은 15.1MN에서 18.0MN으로 약 20.0% 증가하고, 래프트의 지지력은 16.0MN에서 16.9MN로 약 5.7% 증가하였다. 그리고 말뚝직경이 450mm에서 500mm로 증가할 때는 말뚝 지지력이 18.0MN에서 22.5MN 약 25.2%, 래프트의 지지력은 16.9MN에서 19.5MN으로 약 15.0% 증가함을 확인하였다. 또한, 래프트의 하중분담률은 말뚝직경이 50mm씩 증가할 경우 평균적으로 약 3.9% 포인트 감소하였다. 이때, 말뚝직경 증가에 따라 래프트의 지지력이 증가하는 것은 해석에 사용한 극한지지력 판정법에 따른 것으로, 동일변위에서는 직경이 클수록 래프트의 지지력은 감소하였다. Piled raft 기초의 전체 지지력은 말뚝직경이 400mm에서 50mm씩 증가할 때 마다 31.1MN에서 34.9MN, 42.0MN로 각각 12%, 20% 증가하였다. 따라서 말뚝직경이 증가할수록 래프트의 하중분담률은 감소하였지만 말뚝과 래프트 모두 지지력이 증가하여 piled raft 기초 전체 지지력이 증가하는 경향을 보였다. 따라서 말뚝직경 역시 증가하면 piled raft 기초의 지지력도 증가하여 큰 영향을 미친다고 판단된다.

최종적으로 해석에 사용한 매개변수 중 piled raft 기초 지지력에 가장 큰 영향을 주는 변수를 확인하였다. 말뚝간격의 경우 간격이 증가함과 동시에 래프트의 크기도 증가하므로, 객관적인 비교·분석이 쉽지 않다. 따라서 풍화암 지반에서 말뚝간격이 5D일 때 말뚝길이가 25D에서 5D 증가할 때와, 말뚝직경이 400mm에서 50mm 증가할 때 piled raft 기초의 전체 지지력을 비교하였다. 그 결과 말뚝길이가 약 17% 증가하면 전체 지지력이 약 9% 증가하고, 말뚝직경이 약 12% 증가하면 piled raft의 전체 지지력은 평균 약 16% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 풍화암뿐만 아니라 풍화토 및 연암에서도 확인되었다. 따라서 말뚝직경이 말뚝길이보다 piled raft 기초의 전체 지지력 증가에 좀 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

5.3.4 지반조건의 영향

지반조건 변화가 piled raft 기초 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해, 말뚝직경이 450mm, 말뚝의 길이는 35D, 말뚝간격은 5D로 고정하고 지반조건 변화에 따른 piled raft 기초의 거동을 분석하였다. Fig. 14는 지반조건 변화에 따른 지지력-변위 곡선을 나타낸 것이다.

Fig. 14와 같이, 풍화토와 풍화암 지층조건에서는 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력이 일정 변위 이상에서는 항복거동을 보였다. 그러나 래프트의 경우 하중을 재하할수록 지지력이 지속적으로 상승하였다. 반면, 연암의 경우에는 풍화토 및 풍화암 지반에서와는 달리, 지지력-변위 곡선에서 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력의 지지력 증가율은 다소 감소하지만, 지지력은 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

지반조건 변화에 따른 piled raft 기초의 거동분석 결과, 지반조건이 견고할수록 말뚝과 래프트의 지지력 모두 증가함을 확인할 수 있다. 풍화토에서 풍화암으로 지반조건이 변할 때 말뚝의 주변과 선단지지력의 증가율은 각각 약 42%, 37%, 래프트의 지지력 증가율은 약 260%로 나타났다. 또한 풍화암에서 연암으로 지반조건이 변할 경우, 선단지지력과 주변마찰력은 각각 약 190%, 140% 증가하였으며, 래프트의 지지력은 약 370% 증가함을 확인하였다. 이러한 분석결과를 통해, 지반조건에 따른 지지력 변화는 말뚝의 지지력보다 래프트의 지지력에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 상부하중을 기반암에 전달하는 말뚝기초와 달리 래프트가 지반과 맞닿고 있는 piled raft 기초의 특성 때문에, 상층의 지반이 견고할수록 래프트가 받아주는 지지력이 더 커지기 때문으로 사료된다.

끝으로, Fig. 15는 본 연구에서 선정된 매개변수 변화에 따른 piled raft 기초의 극한지지력 및 래프트의 하중분담률을 도시한 것이다. Fig. 15(a)와 같이 풍화암층에

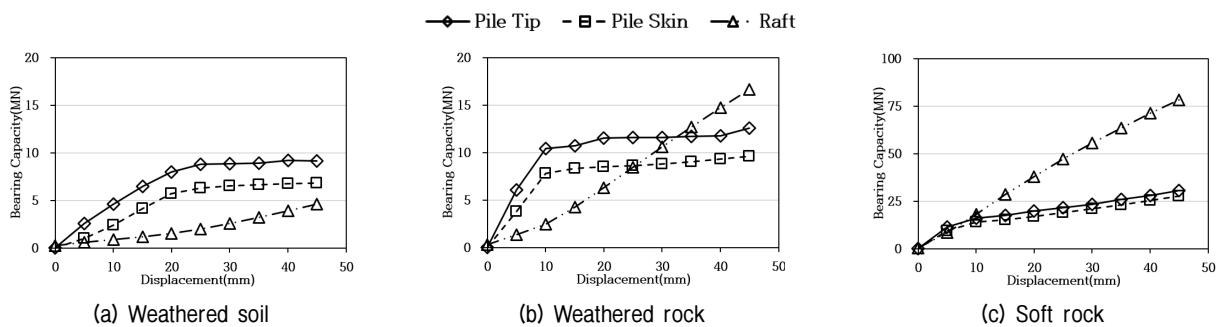


Fig. 14. Effect of ground conditions on bearing capacity (Diameter 450 mm, Length 35D, Spacing 5D)

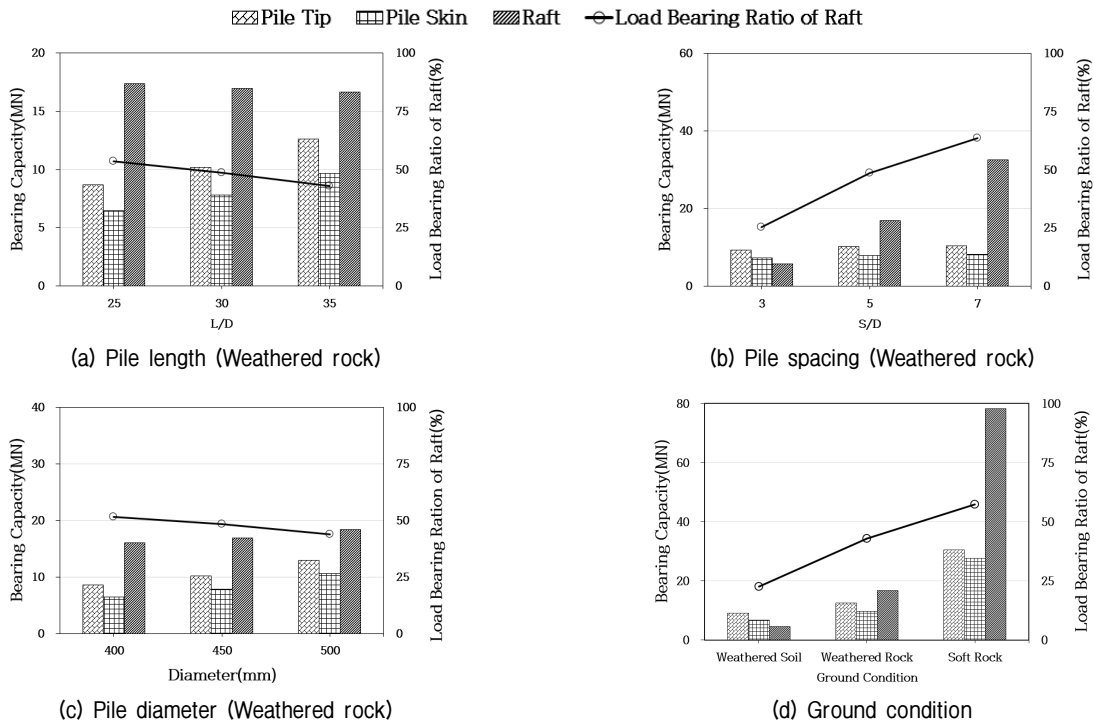


Fig. 15. Behavior of piled raft foundation by parameter variation

서는 말뚝길이가 길어질수록 말뚝의 선단지지력 및 주변마찰력은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝길이 (L)가 말뚝직경(D) 만큼 커질 때, 래프트의 지지력은 약 0.4% 감소하였고, 주변마찰력과 선단지지력은 각각 4.7%, 2.0% 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 래프트의 지지력은 감소하고, 말뚝의 지지력은 증가하므로 전체 지지력에서 래프트가 분담하는 하중분담률은 감소함을 보였다.

풍화암 지반에서 말뚝간격 변화에 따른 결과인 Fig. 15(b)에서 말뚝간격이 말뚝의 직경만큼 넓어질 때 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 각각 약 3.0% 증가하여 큰 차이가 없었다. 그러나 래프트 지지력은 약 150%의 큰 증가폭을 보였다. 따라서 풍화암 지반에서는 말뚝의 간격이 증가할수록 래프트의 하중분담률은 크게 증가하였다.

그리고 말뚝직경 변화에 따른 결과인 Fig. 15(c)를 통해 말뚝직경이 50mm 증가할수록, 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력은 약 20%의 증가폭을 보였으며, 래프트 지지력은 약 10%의 증가폭을 나타냈다. 즉, 말뚝의 직경이 증가할수록 래프트의 하중분담률은 감소하는 경향을 보였다.

마지막으로, 지반조건 변화에 따른 결과를 나타낸 Fig. 15(d)에서 보는 바와 같이, 지반조건이 좋아질수록, 말뚝지지력과 래프트의 지지력 모두 증가하는 것을 한눈

에 확인할 수 있다. 그러나 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력 증가폭이 약 42%와 37%를 나타내, 약 260%의 증가폭을 보인 래프트의 지지력보다 증가폭이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 지반조건이 좋을수록 래프트의 하중분담률은 더 커짐을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 지반조건을 달리하였을 때 piled raft 기초의 지지력 변화를 분석하고자 하였다. 이를 위해 유한차분법을 기반으로 하는 수치해석 프로그램인 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D를 사용해 piled raft 기초에 대한 민감도분석을 실시하였다. 그리고 말뚝의 배열이 3 × 3인 piled raft 기초에 관한 해석결과를 기반으로 래프트의 하중분담률 및 piled raft 기초의 지지력 - 변위 관계를 분석하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 말뚝간격이 넓을수록, 말뚝길이가 길수록, 말뚝직경이 클수록 piled raft 기초의 전체지지력은 증가하는 양상을 나타내었다. 하지만 말뚝간격이 연암지반 3D, 풍화암 지반 5D, 풍화토지반 7D 이상일 때 래프트의 하중분담률이 50%를 초과하여 얇은기초

와 유사한 거동을 보였다.

- (2) Piled raft 기초의 매개변수 중 말뚝길이와 직경 모두 piled raft 기초 전체 지지력 증가에 영향을 미쳤지만 말뚝직경을 증가시켰을 때가 더욱 효과적임을 확인하였다.
- (3) 기초의 전체 지지력은 지반조건이 좋아질수록 증가하고, 래프트 지지력의 증가폭이 말뚝 지지력의 증가폭보다 크기 때문에 지반이 견고할수록 래프트의 하중분담률이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 래프트의 하중분담률은 piled raft 기초의 전체 지지력 중 최소 11%, 최대 74%를 지지하는 것으로 나타났다. 또한 민감도 분석을 통해, 래프트의 하중분담률은 말뚝의 직경 및 길이와 반비례하고 말뚝의 간격과 비례함을 확인하였다. 그리고 지반조건이 좋을수록 래프트의 하중분담률은 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 단일지층 조건의 3×3 배열을 갖는 piled raft 기초에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 piled raft 기초의 복합적인 지지 거동을 확인하였다. 하지만 지층구조가 복잡한 실제 현장에서는 piled raft 기초의 거동에 차이가 있을 수 있으므로 향후 복합지반에 대한 추가 연구가 수행될 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 말뚝간격이 증가할 때 래프트의 크기도 동시에 증가하므로 정확한 분석을 하지 못했다. 따라서 래프트의 크기를 일정하게 유지하면서 말뚝간격이 piled raft 기초 전체 지지력에 미치는 영향을 분석하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 수치해석 결과를 검증하기 위해 추후 실내 모형실험 및 현장 계측을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Bae, S. H. (2015), *A study on the economical feasibility of a piled raft foundation using finite difference analysis*, Doctoral Dissertation, University of Suwon, 110p (in Korean).
2. Choi, K. J., Park, D. G., and Lee, J. H. (2012), "Load Sharing Analysis of Piled Rafts based on Non-linear Load-settlement Characteristics", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.11, pp. 30-40 (in Korean).
3. Davisson, M. T. (1972), "High Capacity Piles", Proceeding of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, *American Society of Civil Engineers*, pp.81-112.
4. De Beer, E. E. (1965), "Bearing Capacity and Settlement of Shallow

- Foundations on Sands", Proceeding Symposium on the Bearing Capacity and Settlement of Foundation, Duke University, pp.15-34.
5. Jeon, S. K. (1998), *Design manuals of foundation structure for practitioners*, Sciencebook (in Korean).
6. Jung, Y. H. (2016), *A parametric study on the estimation of the behavior of a piled raft foundation considering ground conditions by 3D numerical analyses*, Master's Dissertation, University of Suwon (in Korean).
7. Katzenbach, B. and Reul, O. (1997), "Design and Performance of Piled Rafts", *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol.4, pp.2,253-2,256.
8. 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).
9. Kim, S. M. (2008), *Analysis of axial load sharing of piled raft in layered soil*, Master's Dissertation, Yonsei University (in Korean).
10. Korea Road & Transportation Association (2001), *Road design standard*, Korea Road & Transportation Association, 392p.
11. Kwon, O. K. (2007), "Load Sharing Ration of Raft in Piled Raft on Granular Soils by Model Test", *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.8, No.3, pp.67-75.
12. Le, C. H., Jeong, J. U., and Kim, S. R. (2011), "Numerical Analysis on Bearing Capacity of a Suction Bucket in Clay", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.25-33 (in Korean).
13. 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).
14. Nam, D. S. (2003), *A numerical study on reinforcement effect for large-diameter drilled deep foundations*, Master's Dissertation, Yonsei University (in Korean).
15. Park, S. K. (2001), *A study on the interaction of the piled raft foundation from model test*, Master's Dissertation, Hongik University (in Korean).
16. Prakash, S. and Sharma, H. D. (1989), *Pile foundations in engineering practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 768p.
17. Seo, J. W. (2015), *Feasibility analysis of helical pile by static load test*, Master's Dissertation, Joongbu University (in Korean), 51p.
18. Seo, C. H. (2004), *The behavior characteristics of piled raft in two-layered soils with pile length*, Master's Dissertation, Keimyung University (in Korean), 66p.
19. Song, J. W. (2003), *A study on load bearing capacity of piled raft using finite element analysis*, Master's Dissertation, Sunmoon University (in Korean).
20. Tatsunori, M., Hisashi, N., Hiroshi, M., Kou, Y., Toshioaki, A., and Pastsakorn, K. (2010), "Load Tests of Piled Raft Models with Different Pile Head Connection Conditions and their Analysis", *Soils and Foundations*, Vol.50, No.1, pp.63-81.
21. You, K. H., Kim, H. R., and Bae, S. H. (2015), "Finite Difference Modeling of a Piled Raft Foundation with Axisymmetry Condition and Interface Element", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.35, No.4, pp.853-861 (in Korean).

Received : May 26th, 2016

Revised : June 30th, 2016

Accepted : July 1st, 2016