

조립토 Piled Raft 시스템의 침하량 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Settlement for Granular Piled Raft System

신방웅* · 채현식** · 김홍택***

Shin, Bang-Woong · Chae, Hyun-Sik · Kim, Hong-Taek

Abstract

Granular piled raft systems have been effectively used in soft ground foundation not only to reduce settlements but also to improve bearing capacity. In the present study, the finite element method of analysis on a basis of the plate theory is proposed to predict non-uniform settlements at the interface between the raft and foundation soils. To verify the validity of the proposed method of analysis and the predicted settlements of granular piled raft systems, comparisons are made with the results presented in the previous research(Kim et al., 1999). Finally, behavior characteristics with various patterns of the granular piled raft systems and effects of the settlement reduction are analyzed in connection with the design parameters.

Keywords : Granular piled raft system, Plate theory, Non-uniform settlement, Finite element method

요 지

조립토 piled raft 시스템은 상부 raft 기초 하부의 연약지반을 조립토 다짐말뚝으로 보강하여 침하를 감소시키고 또한 지지력 증대를 도모하는 효과적인 공법으로 사용되어 왔다. 본 연구에서는, 말뚝 사이의 상호작용 효과 및 말뚝과 raft의 상호작용 효과 등을 고려하고 또한 판이론(plate theory)을 토대로, raft와 기초지반 사이 접촉면에서 발생하는 지점별 불균등 침하량을 예측하기 위한 유한요소 해석기법을 제시하였다. 제시된 해석기법은 조립토 piled raft 시스템의 다양한 배치형태에 대해 지점별 침하량 예측이 가능하며, 제시된 기법의 적합성 확인을 위해 예측된 침하량을 기존 연구결과(김 등, 1999)와 비교·분석하였다. 이외에도 제시된 기법을 이용하여, 조립토 piled raft 시스템의 배치형태별 거동특성 분석이 이루어 졌으며, 또한 침하량 감소효과를 관련 설계변수와 연계하여 분석을 수행하였다.

주요어 : 조립토 piled raft 시스템, 판이론, 불균등침하, 유한요소해석

1. 서론

조립토 piled raft 시스템(그림 1)은 raft 기초 하부의 연약지반을 조립토 다짐말뚝(granular compaction piles)으로 보강

하여 침하를 감소시키고 또한 충분한 지지력을 확보하여 상부구조물을 지지하는 기초이다. 조립토 다짐말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 자갈, 쇄석 또는 모래 등의 조립질 재료로 연약한 기초지반을 10~35% 정도 치환함으로써, 기초지반

* 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

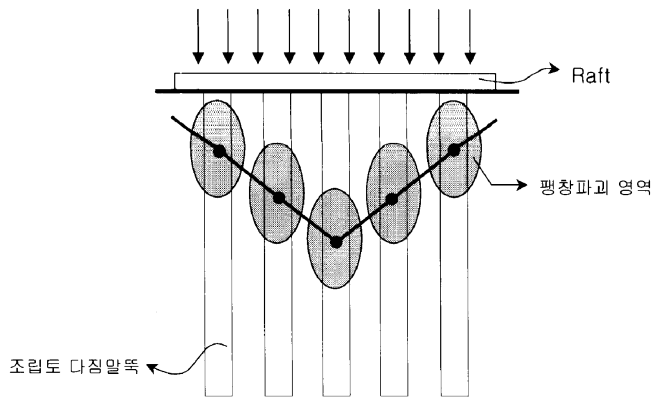


그림 1. 조립토 piled raft 시스템

의 지지력 증가와 침하량의 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과 등을 도모하며, 특히 사질토 지반에 적용할 경우에는 지진 발생시 액상화 방지도도 효과적인 공법으로 알려져 있다.

연약지반 보강에 주로 적용되는 조립토 piled-raft 시스템의 거동특성을 파악하기 위한 실험적 및 이론적 접근은 Hu 등 (1997)을 비롯한 여러 연구자들에 의해, 유럽 및 미국 등을 중심으로 지난 20여년 동안 이루어져 왔다. 그러나 조립토 말뚝의 경우 대부분 강성 raft와 더불어 군(group) 형태로 설치되며, 이 경우에 단(single) 말뚝의 경우와는 달리, 인접하여 말뚝이 존재함에 따른 구속효과 및 변형억제 등과 같은 상호작용이 하부 기초지반과 맞물려 복합적인 거동특성을 지니게 된다. 따라서, 이와 같은 상호작용을 정량적으로 평가하여 설계에 적절히 반영하기에는 여의치 않은 점이 많다.

일반적으로 조립토 piled raft 시스템의 설계는 주로 지지력의 관점에서 실시되어 왔으나, 구조물의 사용성 측면을 감안할 때, 침하량의 관점에서 설계하는 것이 보다 효과적인 접근방법이라고 판단되며, 관련된 국내의 연구결과로는 김 등(1998, 1999)이 raft 기초 하부에 정방형 군형태로 설치되는 조립토 다짐말뚝의 경우에 대해, 각 말뚝의 팽창파괴 발생지점까지의 깊이, 극한지지력 및 침하량 등을 예측할 수 있는 기법을 제시한 바 있다. 기존 연구결과에서는 서로 이질적인 물성치를 가지는 조립토 다짐말뚝과 연약지반을 하나의 합성물성치로 평가하여 해석을 수행하게 되며, 이 과정에서 raft에 설치된 말뚝은 띠기초 형태의 정방형 대칭배열만을 고려할 수 있다는 해석상의 제약이 있었으며, 각 요소간의 상호작용 등을 적절히 반영하지 못한 측면이 존재했다.

본 연구에서는 이와 같이 미흡한 점에 착안하여, 말뚝 사이의 상호작용 효과 및 말뚝과 raft의 상호작용 효과 등을 고려하고 또한 판이론(plate theory)을 토대로, raft와 하부 기초지반 사

이 접촉면에서 발생하는 지점별 불균등 침하량을 예측하기 위한 유한요소 해석기법을 제시하였다. 제시된 해석기법은 조립토 piled raft 시스템의 다양한 배치형태에 대해 지점별 침하량 예측이 가능하며, 또한 제시된 기법의 부분적인 적합성 확인을 위해 예측된 침하량을 기존 연구결과(김 등, 1999)와 비교·분석하였다. 이외에도 제시된 기법을 이용하여, 조립토 piled raft 시스템의 배치형태별 거동특성 분석과 침하량 감소효과를 관련 설계변수와 연계한 분석 등을 수행하였다.

2. 조립토 piled raft 시스템의 침하량 예측기법

조립토 piled raft 시스템의 하중-침하량 관계를 규명하기 위해서, 기존의 여러 연구자들에 의해 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 일반적으로 조립토 piled raft 시스템에서 고려하는 상호작용 효과는 말뚝사이 및 말뚝과 raft 사이의 상호작용 효과 등으로 구분할 수 있으며, 이를 침하량 산정시 반영하게 된다. 이와 관련된 기존 연구결과(김 등, 1999)는 서로 이질적인 물성치를 가지는 조립토 다짐말뚝과 연약지반을 하나의 합성물성치로 평가하여 해석을 수행하게 되며, 이 과정에서 합성토체의 물성치 및 변위감소계수 결정 등을 경험식에 의존해야 했다. 또한, raft에 설치된 말뚝은 띠기초 형태의 정방형 대칭배열만을 고려할 수 있다는 해석상의 제약이 있었으며, 각 요소 사이의 상호작용 등을 적절히 반영하지 못한 측면이 존재했다.

따라서, 본 연구에서는 기존 연구의 해석방법과는 달리, 조립토 다짐말뚝을 1차원 봉요소로 모델링한 다음, 말뚝의 다양한 배치형태에 따른 침하량 예측을 가능하게 하였으며, 말뚝과 연약지반의 합성물성치 및 변위감소계수 등 불확실한 입력변수의 영향을 최소화시켰다. 해석방법은 군말뚝에 대한 해석과 raft에 대한 해석을 따로 수행하여, 말뚝과 raft의 동일 절점에서 연직

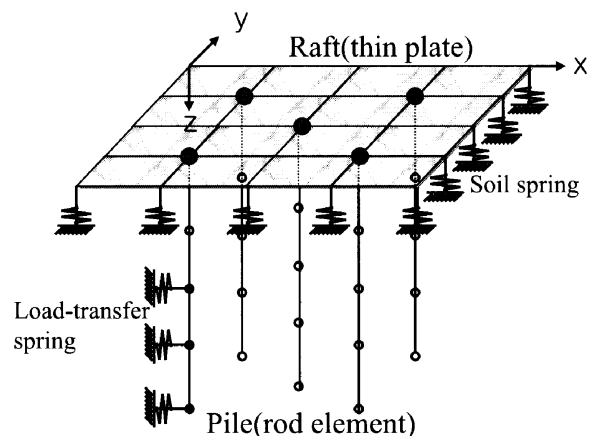


그림 2. 조립토 piled raft 시스템의 해석모델링 개요도

자유도(degree of freedom)를 통합한 다음, raft와 말뚝 사이의 상호작용 효과를 추가적으로 고려하여 각 지점별 침하량을 산정하게 된다. 조립토 piled raft 시스템의 해석모델링에 대한 개요도는 그림 2와 같다.

2.1 조립토 균말뚝 해석

균형대로 존재하는 조립토 다짐말뚝을 해석하기 위해선, 인접 말뚝의 영향으로 인한 말뚝-말뚝 사이의 상호작용 효과가 규명되어야 한다. Poulos(1968)는 인접한 서로 다른 두 개의 말뚝에서 임의의 단일말뚝에 발생하는 침하량은 인접한 말뚝에 의해서 침하의 영향을 받는다는 원리를 적용함으로써 즉, 일정한 하중이 재하되었을 때 말뚝은 하중에 의해 침하가 발생하게 되며, 인접한 말뚝에 의해서 추가적인 침하량이 유발된다는 이론을 전개한 바 있다. 이러한 현상은 상호작용계수에 의해 표현가능하며, 말뚝의 간격, 세장비(길이/말뚝반경) 및 지반강도정수에 영향을 받는다. 상호작용계수를 평가하기 위한 주된 접근방법은 모형실험이나 경험식에 의한 근사해석이 대부분이며, 일부 경험식의 경우 말뚝의 길이를 고려하여 적절한 평가를 수행할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 균형대로 존재하는 말뚝 사이의 상호작용 효과를 고려하기 위해, 반무한 탄성체내의 임의의 점에 집중하중이 작용할 경우 인접지역의 변위영향을 평가할 수 있는 Mindlin의 탄성해를 사용하였다. 실제 해석에는 식 (1)과 같이 유연도 영향계수(f_{ij})가 강성행렬 구성에 반영되며, j 점의 집중하중으로 인한 i 점 변위의 유연도 영향계수는 다음과 같다.

$$f_{ij} = \frac{1}{16\pi G_s(1-\nu_s)} \left[\frac{3-4\nu_s}{R_1} + \frac{8(1-\nu_s)^2 - (3-4\nu_s)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu_s)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6zc(z+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (1)$$

여기서, R_1 은 $\sqrt{\gamma^2+(z-c)^2}$, R_2 는 $\sqrt{\gamma^2+(z+c)^2}$, G_s 는 지반의 전단탄성계수, ν_s 는 지반의 포아슨 비이며, c , z 및 γ 등은 각각 j 점의 깊이, i 점의 깊이 및 상호작용이 계산되는 절점간의 수평간격 등을 의미한다.

이를 토대로, 본 연구에서는 조립토 piled raft 시스템 상부에 연직하중이 작용할 경우, 말뚝-말뚝 간의 상호작용 특성 등을 반영한 raft와 하부 기초지반 사이 접촉면의 각 지점별 불균등 침하량을 예측하고자 한다. 이를 위해 말뚝요소는 각 절점에서 1개의 자유도(축방향 변위)를 갖는 1차원 봉(rod) 요소로, 말뚝 주변 흙의 공동확장에 의한 지반반응은 하중-전이(load-

transfer) 스프링, k_{sc} 으로 모델링하였다.

$$k_{sc} = \frac{2\pi \cdot \exp\left(\frac{p_{ult} - \sigma_h}{s_u} - 1 + \ln s_u\right) \cdot l'}{\ln \frac{2.5l(1-\nu_s)}{\gamma_0}} \quad (2)$$

여기서, p_{ult} 는 공동확장이론에 의한 극한공동압, σ_h 는 말뚝의 절점에 작용하는 수평응력, l' 은 말뚝 절점간의 간격, l 은 말뚝의 길이, γ_0 는 말뚝의 반경, s_u 는 점성토의 비배수전단강도 등을 의미한다.

2.2 Raft 해석

연직하중을 받는 raft를 해석하는 방법은 박판(thin plate) 또는 후판(thick plate) 등으로 해석이 가능하다. Clancy (1993)는 적용가능한 여러 요소들을 대상으로 raft에 가장 적합한 요소를 분석하였으며 그 결과, 4절점-직사각형-박판 유한 요소가 piled raft 시스템에서 실제 거동을 보다 정확히 예측할 수 있다고 제시하였다. 본 연구에 사용된 raft의 해석방법은 연직 하중조건과 균질·반무한체의 지반조건에 대해서만 해석이 가능하며, raft 요소는 2차원 직사각형 plate-bending 유한요소를 적용하였다.

또한 raft의 각 절점에 지반반응 스프링을 부착하여 raft와 지반과의 상호작용을 모델링하였다(그림 2 참조). 따라서, 본 연구에서 사용하고 있는 박판 유한요소의 각 절점은 4개의 자유도(w , $\partial w/\partial x$, $\partial w/\partial y$, $\partial^2 w/\partial x \partial y$)를 가지며, 구성되는 강성행렬식을 요약·정리하면 식 (3)과 같다(Smith & Griffiths, 1988).

$$KM = \int \int B^T D B dx dy \quad (3)$$

여기서, $M = D A w_r$, $B = A N$, t = raft의 두께, ν = raft의 포아슨 비, N = 형상계수,

$$D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad w_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

등을 의미한다.

또한, raft 각 절점에서의 지반반응은 단위하중을 받는 직사각형판의 침하에 대한 Giroud(1968)의 해석식을 사용하여 계산되며, raft 각 절점에서의 연직하중에 대한 유연도 반응계수

f_{ru} 는 식 (4)와 같은 형태로 강성행렬 구성에 반영된다.

$$f_{ru} = \frac{1-\nu_s^2}{\pi E_s b'} \left[\ln(b'/a') + \sqrt{1+(b'/a')^2} + b'/a' \ln \left(1 + \frac{\sqrt{1+(b'/a')^2}}{b'/a'} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, b'/a' 는 직사각형 요소 한 변의 길이를, E_s 는 지반의 탄성계수를 의미한다.

2.3 Pile-raft 조합해석

전술한 바와 같이 조립토 군말뚝에 대한 해석과 raft에 대한 해석을 통합하여 전체 조립토 piled raft 시스템의 해석을 수행하게 되며, 말뚝과 raft의 공동 절점에서 자유도의 중첩원리를 이용하여 말뚝과 raft를 조합한 침하량 해석이 가능하다. 아울러 말뚝-raft 간의 상호작용계수가 추가적으로 해석에 포함된다. 이 때, raft는 강체로 간주하며 조립토 piled raft 시스템의 하중-변위 관계를 정리하면, 다음의 식 (5)와 같은 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} w_p \\ w_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/K_p & \alpha_{pr}/K_r \\ \alpha_{pr}/K_p & 1/K_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_p \\ P_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, w_p : 조립토 다짐말뚝의 침하량,

w_r : raft의 침하량,

K_p : 조립토 다짐말뚝의 강성,

K_r : raft의 강성,

P_p : 말뚝에 작용하는 하중,

P_r : raft에 작용하는 하중,

α_{pr} : 조립토 다짐말뚝과 raft간의 상호작용계수

따라서, 식 (5)에서 상호작용계수가 결정되면 조립토 piled raft 시스템에 대한 침하량 예측이 가능하며, 조립토 군말뚝과 raft간의 상호작용계수(α_{pr})를 평가하기 위한 Randolph(1983)의 제안식을 정리하면 식 (6)과 같다. 또한, 본 연구에서의 조립토 piled-raft 시스템의 전체적인 해석절차를 정리·요약하면 그림 3과 같다.

$$\alpha_{pr} = \frac{n\gamma_0}{4l} \left[\left(1 - \frac{1}{2(1-\nu_s)} \right) + \left(2 + \frac{1}{1-\nu_s} \right) \cdot \sinh^{-1} (l/n\gamma_0) \right]$$

여기서, $n = B'/2\gamma_0$, B' 는 raft의 폭을 의미한다.

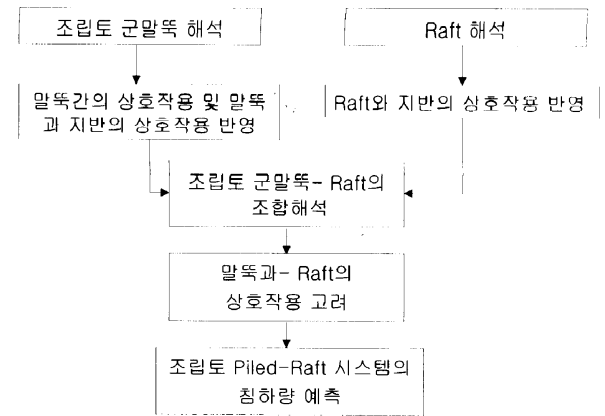


그림 3. 조립토 piled raft 시스템의 해석절차 흐름도

3. 분석 및 고찰

3.1 지점별 침하량 예측

본 절에서는 앞의 2장에서 제시한 조립토 piled raft 시스템 지점별 침하량 해석기법의 적합성 정도 등을 확인하기 위한 노력의 일환으로, 기존 연구결과(김 등, 1999)와 본 연구 예측치와의 비교·분석을 수행하였다. 본 비교·분석은 정방형(5×5)

표 1. 말뚝 및 raft의 제원과 지반조건

말뚝 제원					
길이(m)	직경(m)	설치간격(m)	탄성계수 (kN/m ²)	포아슨 비	
8.0	0.66	2.0	4.908×10 ⁴	0.3	
raft 제원					
두께(m)	포아슨 비	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (kN/m ²)	raft 상부의 등분포 하중(kN/m ²)	
0.5	0.167	24.53	2.06×10 ⁷	50.0	
지반 조건					
내부마찰각 (°)	점착력 (kN/m ²)	포아슨 비	단위중량 (kN/m ³)	체적탄성계수 (kN/m ²)	전단탄성계수 (kN/m ²)
5	19.13	0.33	16.68	4.81×10 ³	1.84×10 ³

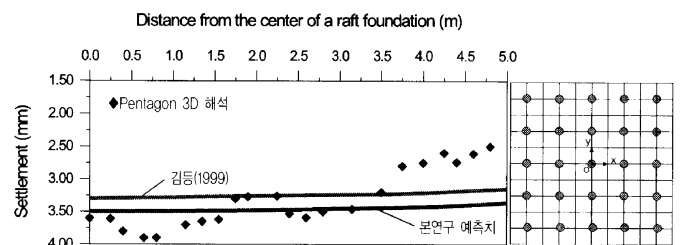


그림 4. 기존 연구결과와의 비교

조립토 piled raft 시스템(그림 4)에 대한 것이며, 각 요소 모델링에 적용된 구체적인 제한은 김 등(1998)의 연구결과에 정리되어 있으며, 이 중 말뚝제원, 지반조건 및 하중조건 등 일부를 요약하여 정리하면 표 1과 같다.

Raft와 하부 기초지반 사이 접촉면에서의 침하량을 본 연구의 예측치와 서로 비교·분석한 결과는 그림 4에 도시되어 있다. 그림 4의 결과를 살펴보면, Pentagon3D 유한요소 해석결과와 각 조립토 말뚝의 설치위치에서 인접지역과 비교하여 대략 0.04 ~ 0.97mm 정도의 부등침하량을 보이고 있으나, 본 연구 예측치는 전체적으로 침하량의 변화폭이 비교적 작은(최대 부등침하량이 0.38mm 정도) 완만한 곡선형태를 나타내고 있다. 또한 김 등(1999)의 연구결과와 비교하여 유사한 분포형태를 나타내고는 있으나, 각 요소사이의 상호작용 효과를 고려한 본 연구 해석기법의 경우 평균침하량 및 부등침하량 등이 다소 크게 평가되는 것으로 나타났다. 이러한 현상의 주된 원인은 각 요소 사이의 상호작용 효과를 고려함으로써, 조립토 piled raft 시스템의 전체적인 강성이 감소되는 데 주로 기인하는 것으로 판단된다.

3.2 배치형태별 침하량 분석

본 분석에서는 말뚝의 다양한 배치형태에 따른 각 지점별 침하량을 토대로 부등침하량을 최소화할 수 있는 최적의 말뚝 배치형태를 검토하였다. 기존의 연구결과(김 등, 1999)는 raft에 설치된 조립토 다짐말뚝이 정방형 대칭배열로 해석상의 제약이 있었으며, 각 요소 사이의 상호작용 효과 등을 충분히 반영하지 못한 미흡함이 존재했다. 본 분석에 적용된 말뚝제원 및 지반조건 등은 표 1에 명기되어 있는 내용과 동일하며(단, 말뚝의 설치간격은 제외), raft 상부에 재하시킨 등분포하중의 크기는 100kN/m^2 이다. 또한 분석을 위해 그림 5와 같이, 총 12本の 조립토 다짐말뚝을 임의의 배치형태(Case 1, Case 2 및 Case 3)로 설치한 후, 단면 A-A(그림 5 참조)에 대한 각 지점별 침하량 분포를 살펴보았다.

그림 6에는 전술한 3가지 배치형태(그림 5 참조)에 대한 각 지점별 침하량 분포가 비교·도시되어 있으며, 분석결과 각 배치형태별 평균침하량의 편차는 그다지 크지 않지만, Case 1의 경우가 가장 작은 평균침하량(8.39mm 정도) 분포를 보이고 있다. 이를 토대로, 가정된 3가지 배치형태중 raft 상부의 등분포하중을 가장 효율적으로 지지할 수 있는 말뚝의 배치형태는 Case 1임을 간접적으로 확인할 수 있으며, 이는 부등침하량 및 평균침하량 등을 최소화시키기 위한 최적설계의 필요성을 시사하는 내용으로 판단된다.

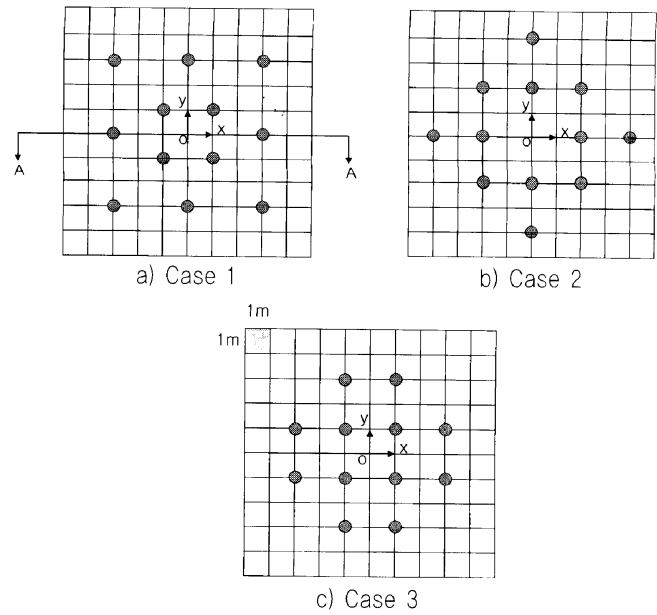


그림 5. 말뚝의 배치형태(총12本)

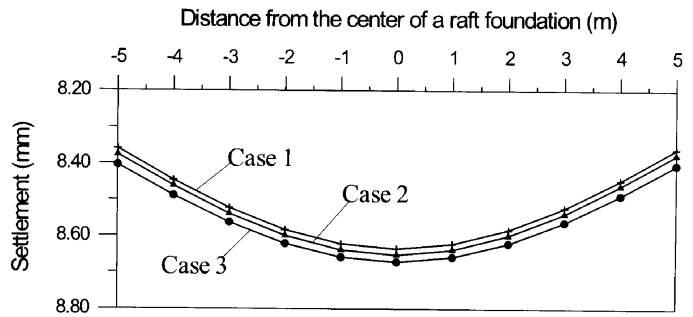


그림 6. 말뚝의 배치형태에 따른 각 지점별 침하량 비교

3.3 설계변수에 따른 영향인자 분석

조립토 piled raft 시스템에 발생하는 침하의 주된 영향인자를 분석하기 위해, 앞의 3.2절에서 분석된 내용을 토대로 Case 1의 배치형태를 택하여 말뚝의 길이 및 raft의 두께 등 설계변수의 변화에 따른 각 지점별 침하량 분석을 수행하였다. 본 해석에 적용된 말뚝제원 및 지반조건 등의 일부는 표 1에 명기되어 있는 내용과 동일하며, 말뚝의 길이 및 raft의 두께 등을 변화시켜 각 영향인자별 침하거동 특성 등을 살펴보았다. 이때, raft 상부에 재하시킨 등분포하중의 크기는 100kN/m^2 이다.

그림 7 및 그림 8에 도시되어 있는 분석내용을 종합적으로 비교·검토한 결과, 말뚝의 길이 증가에 따른 침하량 감소효과보다 raft의 두께 감소에 따른 평균침하량 감소효과가 더 뚜렷한 것으로 나타났다. 특히, 조립토 piled raft 시스템 상부에 일정한 하중이 재하되는 경우, raft의 두께를 줄이면 raft의 자중감

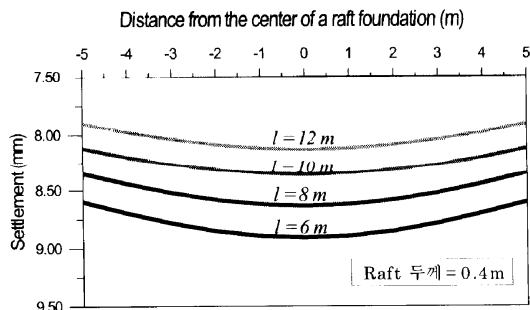


그림 7. 말뚝길이에 따른 각 지점별 침하량 분포

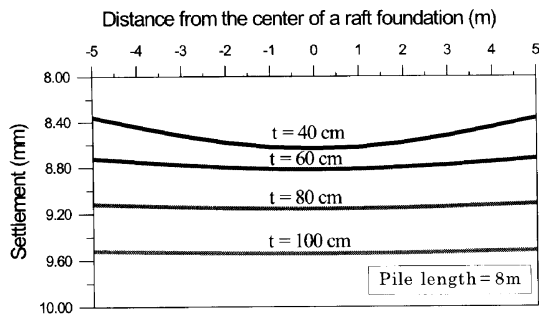


그림 8. Raft의 두께에 따른 각 지점별 침하량 분포

소로 인하여 전체적인 평균침하량의 크기는 감소하지만, raft의 강성 역시 비례적으로 감소하여 부등침하량의 크기가 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 조립토 piled raft 시스템의 평균침하량을 감소시키기 위해선 조립토 다짐말뚝의 길이를 증가시키는 방안은 다소 비효율적이며, 부등침하량의 허용범위내에서 raft의 두께를 소폭 감소시키는 방안이 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는, 말뚝 사이의 상호작용 효과 및 말뚝과 raft의

상호작용 효과 등을 고려하고 또한 판이론을 토대로, raft와 하부 기초지반 사이 접촉면에서 발생하는 지점별 불균등 침하량을 예측하기 위한 유한요소 해석기법을 제시하였다. 제시된 침하량 해석기법은 전술한 각 요소 사이의 상호작용 효과 고려를 통해 예측치의 정확성 향상을 기한 장점이 예상되고, 이외에도 정방형 배치형태를 포함하여 조립토 piled raft 시스템의 다양한 배치형태에 대해 지점별 침하량 예측이 가능한 장점을 지니고 있다. 또한 제시된 기법의 적합성을 부분적으로 확인하기 위해, 정방형 조립토 piled raft 시스템 배치형태에 대해 예측된 침하량을 기존 연구결과(김 등, 1999)와 비교·분석하였다. 비교·분석한 결과, 침하량 분포형태는 대체적으로 유사하나, 말뚝 사이의 상호작용 효과 및 말뚝과 raft의 상호작용 효과 등을 고려한 본 연구 예측 평균침하량 및 부등침하량이 기존 연구결과에 비해 다소 크게 평가되는 것으로 나타났다.

이러한 경향의 주된 원인은 각 요소 사이의 상호작용 효과를 고려함으로써, 조립토 piled raft 시스템의 전체적인 강성이 감소되는 데 있는 것으로 판단된다. 이외에도 제시된 기법을 이용하여, 부등침하량을 최소화할 수 있는 최적의 말뚝 배치형태를 분석하여 보았으며, 조립토 piled raft 시스템의 배치형태별 거동특성 분석과 침하량 감소효과를 관련 설계변수와 연계한 분석 등도 수행하였다.

본 연구결과와 적용성을 더욱 확대하기 위해서는 다양한 현장계측자료의 축적을 통한 지속적인 검증작업과 함께, 조립토 piled raft 시스템의 허용 부등침하량 등에 대한 기준마련이 필요할 것으로 사료되며, 향후 조립토 piled raft 시스템의 최적화 방안 및 신뢰도 해석 등에 관한 연구가 계속해서 진행될 예정이다. ☺

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 韓國地盤工學會論文集, 韓國地盤工學會, 제14권, 제5호, pp.143~161.
2. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), 강관스커트 보강 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 韓國地盤工學會論文集, 韓國地盤工學會, 제15권, 제1호, pp.79~98.
3. Clancy, P.(1993), Numerical Analysis of Piled Raft Foundations, PhD. dissertation, University of Western Australia, Crawley, Australia.
4. Giroud, J. P.(1968), Settlement of a Linearly Loaded Rectangular area, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.94, No.4, pp.813~831.
5. Hu, W., Wood, D. M., and Stewart, W.(1997), Ground Improvement Using Stone Column Foundation : Results of Model Test, International Conf. on Ground Improvement Techniques, Balkema, New York, pp.246~256.
6. Poulos, H. G.(1968), Analysis of the Settlements of Pile Groups, Geotechnique, Vol.18, No.3, London, pp.449~471.
7. Randolph, M. F.(1983), Design of piled raft foundations, Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems, Bangkok, pp.525~537.
8. Smith, I. M. and Griffiths, D. V.(1988), Programming the Finite Element Method, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, pp.15~46.