

## 말뚝지지 전면기초의 3차원 근사해석기법 개발

### Development of Three-dimensional Approximate Analysis Method for Piled Raft Foundations

조 재 연<sup>1</sup> Cho, Jae-Yeon

정 상 섬<sup>2</sup> Jeong, Sang-Seom

#### Abstract

A three-dimensional approximate computer-based method, YSPR (Yonsei Piled Raft), was developed for analysis of behavior of piled raft foundations. The raft was modeled as a flat shell element having 6 degrees of freedom at each node and the pile was modeled as a beam-column element. The behaviors of pile head and soil were controlled by using  $6 \times 6$  stiffness matrix. To model the non-linear behavior, the soil-structure interaction between soil and pile was modeled by using nonlinear load-transfer curves (t-z, q-z and p-y curves). Comparison with previous model and FEM analysis showed that YSPR gave similar load-displacement behaviors. Comparison with field measurement also indicated that YSPR gave a reasonable result. It was concluded that YSPR could be effectively used in analysis and design of piled raft foundations.

#### 요 지

철지반의 비선형성을 고려한 말뚝지지 전면기초의 3차원 해석기법(YSPR)을 개발하였다. 전면기초는 6개의 자유도를 가진 평면셀 요소로, 말뚝은 보-기둥 요소로 모델링하여 전면기초와 결합하였다. 또한 말뚝두부 및 지반의 강성은  $6 \times 6$  강성행렬로 모델링 하였으며, 전면기초-말뚝-지반의 상호작용은 비선형 하중전이함수를 이용하여 선형/비선형 거동의 모사가 가능하도록 하였다. 기존의 단순해석기법, 유한요소해석 및 현장계측값과의 비교·분석 결과, 본 해석기법이 대단면 말뚝지지전면기초에서 말뚝의 축하중 분포와 침하량을 비교적 정확히 산정하는 것으로 판단되며, 이러한 검증은 토대로 실제 대단면 기초설계에 대한 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

Keywords : Approximate computer based method, Nonlinear load-transfer curves, Piled raft foundations, Soil-Structure Interaction

#### 1. 서 론

말뚝지지 전면기초(piled raft foundation)는 말뚝과 전면기초가 동시에 상부하중을 분담하고 상부구조물의 사용성을 저해할 수 있는 침하량(부등침하)을 감소시키

는 개념의 기초형식이다(Poulos, 2001). 말뚝지지 전면기초는 전면기초의 하중분담을 고려하여 기존의 지지력 측면의 설계(capacity-based design)보다 말뚝의 길이와 수량을 감소시킬 수 있는 설계개념으로 유럽, 호주, 일본 등지에서 연구가 활발히 진행되었다(Burland 등,

1 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1977; Randolph, 1994; Katzenbach 등, 2000; Poulos, 2001; Mandolini, 2005; Reul 등, 2003; Katzenbach, 2005).

말뚝지지 전면기초의 해석은 전면기초-지반-말뚝 사이의 복잡한 상호작용을 고려하여야 하며 크게 (1) 간편 해석법(simplified method), (2) 근사해석법(approximate computer-based method) 그리고 (3) 엄밀해석법(more rigorous computer-based method)이 개발된 바 있다. 간편 해석법(Poulos 등, 1994; Randolph, 1983)은 전면기초를 강체로 가정하는 해석방법으로서 등가 raft, 등가 pier법 그리고 raft의 하중분담율을 이용하는 방법 등이 있으며 해석이 간단하고 편리한 반면 전면기초의 휨강성을 고려할 수 없고 선형거동을 가정하는 단점이 있다. 근사해석법(Hain 등, 1978; 이승훈 등, 2007)은 말뚝과 지반을 등가스프링으로 모사하고 전면기초는 판(plate)요소로 모델링하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 말뚝-지반 사이의 상호작용이 고려되지 않기 때문에 전면기초의 강성이 매우 크게 산정되는 문제가 있으며 선형해석만 가능한 제한사항이 있다. 엄밀해석법으로는 경계요소법(BEM, Kuwabara, 1989; Poulos, 1994; Poulos, 2001), 복합해석법(Clancy, 1993), 유한요소법(Ottaviani, 1975; Zhang 등, 1991; Lee, 1993)이 있다. 특히 최근에는 Poulos(2001)에 의해 3차원 유한요소해석(FEM)이 실제조건과 유사한 기초의 거동을 나타낼 수 있는 방법으로 보고되고 있다(Wang, 1996; de Sanctis 등, 2003; Reul 등, 2003; Lee 등, 2010). 하지만 3차원 유한요소해석은 모델링 및 해석에 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 기존에 개발되었던 근사해석 프로그램의 간편함을 유지하면서 간편해석기법 이상의 정밀

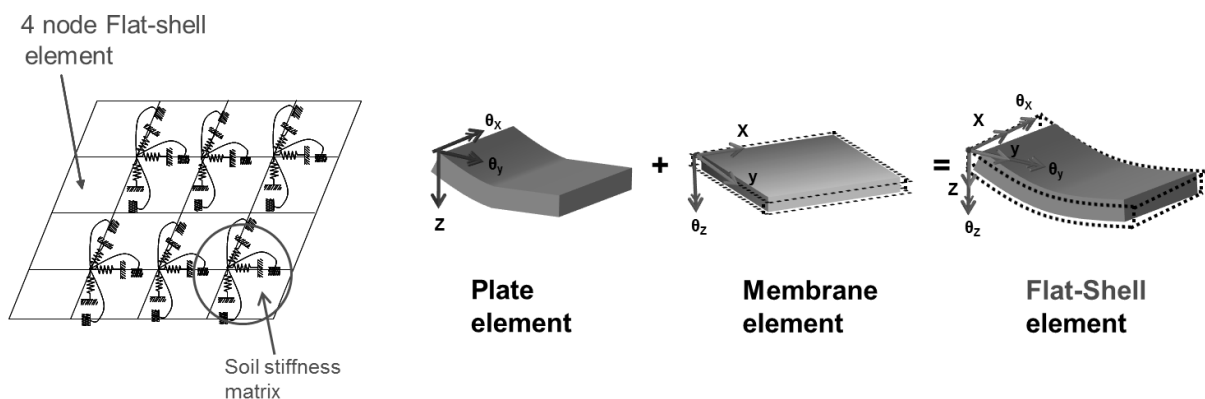
성이 확보된 말뚝지지 전면기초의 근사해석기법을 개발하고자 하였다. 해석기법은 전면기초의 거동을 고려하기 위해 평면 쉘요소를 이용하였고 말뚝-지반 및 전면기초-지반의 비선형 상호작용을 고려하기 위해 비선형 하중전이함수를 적용하였다. 제안된 해석기법의 검증을 위하여 기존의 간편해석기법, 유한요소해석법과 현장계측자료를 통한 비교·분석을 수행하였다.

## 2. 말뚝지지 전면기초의 해석기법(YSPR)

### 2.1 전면기초(raft)의 모델링

기존 연구에서 전면기초(혹은 말뚝캡)의 모델링은 띠 요소(Poulos, 1991; Brown 등, 1975;) 및 평판(plate)요소(Clancy 등, 1993; Poulos, 1994; Zhang 등, 2000; Kitiyodom 등, 2003)로 모델링 한 연구가 있었다. 띠 요소의 경우 전면기초를 강체로 간주하기 때문에 부등침하량을 예측할 수 없을 뿐 아니라 전체 침하량 예측에도 많은 한계점을 지니고 있다. 또한 평판 요소의 경우 수평방향 자유도를 고려하지 않아 수평방향의 이동을 고려할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 면내변형에 대한 자유도를 독립변수로 가지는 평면응력(Membrane) 요소와 면외변형의 자유도를 가지는 평판(Plate) 휨요소를 결합하여 절점당 6개의 자유도를 가진 3차원 평면셀(Flat-shell) 요소(이완훈, 1995; Won 등, 2006)로 전면기초를 모델링하였다. 일반적으로 널리 사용되는 평면응력요소는 면에 수직인 축방향의 회전자유도가 없기 때문에 전단에 대



$x, y, z = x, y, z$  방향의 이동(translation) 자유도

$\theta_x, \theta_y, \theta_z = x, y, z$  방향의 회전(rotation) 자유도

그림 1. 3차원 평면셀(Flat-shell) 요소

한 거동을 모사할 수 없었으나, 평판요소를 결합하여 전단강성을 보정함으로써 절점당 6개의 자유도를 가진 4절점 평면셀요소를 구성하고 전면기초의 해석에 적용하였다. 평면셀요소는 두께에 비해 단면이 넓은 대단면 전면기초의 연성거동을 쉽게 모사할 수 있으며, 절점당 6개의 자유도를 가지는 보요소와의 결합이 용이하다(원진오 등, 2005). 이때 모든 절점이 한 평면에 있으므로 평판의 자유도와 평면응력요소의 자유도가 서로 독립적이며, 강성행렬은 식 (1)과 같이 평판요소와 평면응력요소의 독립적인 결합에 의하여 구성될 수 있다(최창근 등, 1999).

$$K_{shell} = \begin{bmatrix} K_{plate} & 0 \\ 0 & K_{membrane} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서, 평판요소의 강성행렬( $K_{plate}$ )은 휨변형률과 전단변형률 성분으로부터 식 (2), (3)으로, 평면응력요소의 강성행렬( $K_{membrane}$ )은 식 (4), (5)에 의해서 산정할 수 있다.

$$K_{plate} = \int_v B_b^T D_b B_b dV + \int_v B_s^T D_s B_s dV \quad (2)$$

$$D_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$D_s = \frac{\psi Et}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \psi = \frac{5}{6} \quad (3b)$$

$$K_{membrane} = \int_v [B_m \bar{G} \bar{R}]^T \cdot C \cdot [B_m \bar{G} \bar{R}] dV + \frac{1}{\gamma V} h h^T \quad (4)$$

$$h = \int_v [b \ g \ \bar{b} \ \bar{g}]^T dV, \gamma = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

여기서,  $B_b$ 는 휨-변형률 행렬,  $B_s$ 는 전단-변형률 행렬,  $E$ ,  $\nu$ ,  $t$ 는 각각 평판요소의 탄성계수, 포아송비와 두께,  $\psi$ 는 전단보정계수,  $C$ 는 요소의 재료상수,  $B_m$ ,  $G$ ,  $b$ ,  $g$ 는 변위와 변형률 사이의 관계를 나타내는 행렬이다.

## 2.2 말뚝의 모델링

말뚝은 그림 2와 같이 보-기둥(Beam-column)요소를 적용하였으며, Winkler 기초모델에 근거하여 축방향과

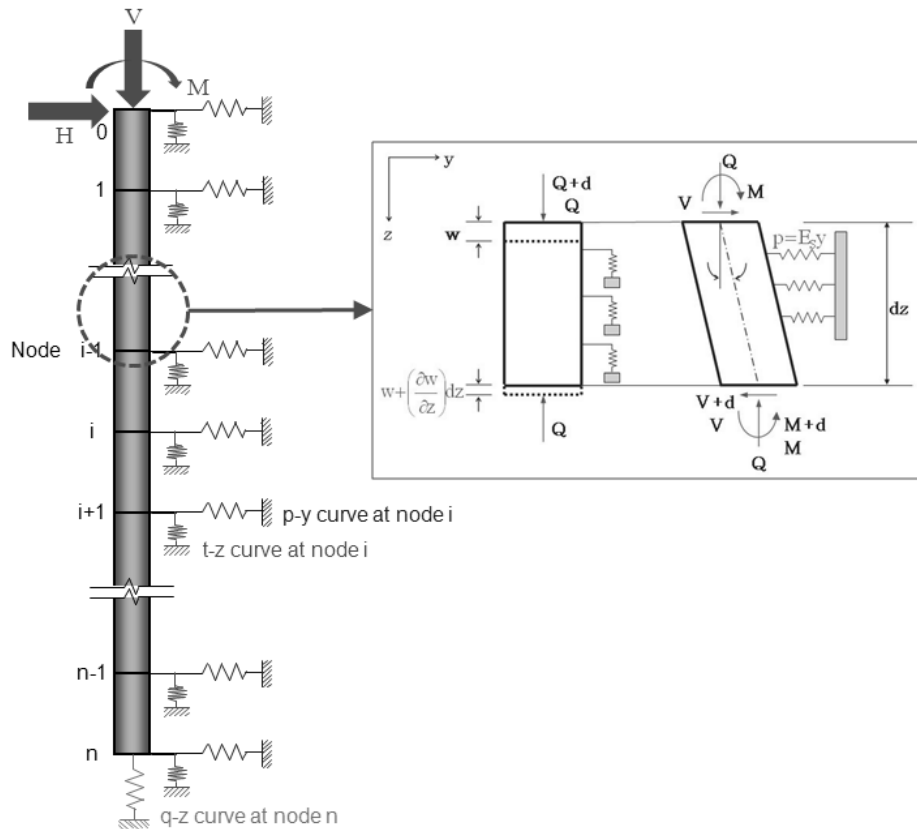


그림 2. 보-기둥(Beam-column) 요소

횡방향 하중을 받는 말뚝으로 모델링 하였다. 축방향 하중을 받는 말뚝의 구성방정식( $Q=EA dw/dz$ )을 고려하여 축방향 힘의 평형조건으로부터 구한 지배미분방정식은 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며, 횡하중을 받는 말뚝은 휨을 받는 말뚝의 구성방정식( $M=EI d^2y/dz^2$ )과 수평방향 힘의 평형조건으로부터 식 (7)과 같은 지배미분방정식으로 표현된다.

$$EA \frac{d^2 w}{dz^2} - C \beta_z w = 0 \quad (6)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Q \frac{d^2 y}{dz^2} + q - E_s y = 0 \quad (7)$$

여기서,  $E$ 는 말뚝의 탄성계수,  $A$ 는 말뚝의 단면적,  $I$ 는 말뚝의 단면2차모멘트,  $w$  및  $y$ 는 깊이  $z$ 지점에서의 말뚝의 수직 침하량과 수평변위,  $\beta_z$ 는 축방향 반력에 대한 강성/윤변의 비이며,  $C$ 는 깊이  $z$ 에서 말뚝의 윤변,  $Q$ 는 말뚝에 작용하는 축방향하중,  $q$ 는 말뚝길이에 따라 작용하는 분포하중, 그리고  $E_s$ 는 p-y곡선에서의 할선계수로 표현되는 지반반력을 나타낸다.

말뚝과 지반의 상호작용은 말뚝의 각 요소와 독립된 비선형 지반스프링을 나타내는 하중전이곡선, 즉 횡방향지지 스프링인 p-y 곡선, 말뚝의 주면마찰력을 나타내는 t-z 곡선, 선단지지력을 나타내는 q-z 곡선을 결합하여 모델링 하였다.

### 2.3 말뚝지지 전면기초의 강성행렬

교량의 하부기초 설계 시 군말뚝의 거동은 일반적인

로 캡중앙에서 6개의 자유도를 갖는 등가강성행렬(equivalent stiffness matrix)로 모사할 수 있다(Zafir, 2002). 그러나 말뚝지지전면기초의 경우 개개 말뚝두부에서의 강성뿐만 아니라 전면기초와 지반의 상호작용을 고려해야 하기 때문에 식 8과 같이 전면기초( $K_{shell}$ )-지반( $K_{soil spring}$ )-말뚝( $K_{pile}$ )의 강성행렬을 고려해야 한다. 본 연구에서는 식 9와 같이 이동, 회전, 상호 커플링(cross-coupling)이 모두 고려된 6×6의 강성행렬을 말뚝두부 및 전면기초 하부지반의 강성으로 적용하였다.

$$[K_{piled\ raft}] = [K_{shell}] + [K_{soil\ spring}] + [K_{pile}] \quad (8)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & -K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ -K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $K_{11}$ 과  $K_{22}$ 은 수평방향 강성(kN/m)을,  $K_{33}$ 은 수직방향 강성(kN/m),  $K_{44}$ 과  $K_{55}$ 는 회전강성(rocking stiffness, kN-m/rad)을,  $K_{66}$ 은 비틀림 강성(torsional stiffness, kN-m/rad)을 나타내며,  $K_{15}$ ,  $K_{51}$ 과  $K_{24}$ ,  $K_{42}$ 는 상호 커플링 강성(cross coupling stiffness, kN/rad 또는 kN-m/m)을 나타낸다. 식 (9)의 말뚝두부 강성행렬에서 말뚝지지 전면기초의 경우는 대각행렬이 거동에 지배적인 역할을 하며, 커플링강성( $K_{15}$ ,  $K_{51}$ 과  $K_{24}$ ,  $K_{42}$ )은 상대적으로 영향이 적어 때로는 고려하지 않기도 한다(Zafir, 2002).

말뚝두부강성( $K_{ij}$ )은 그림 3과 같이 수평/수직하중, 모멘트를 받는 경우에 대하여 각각 단말뚝해석을 통해

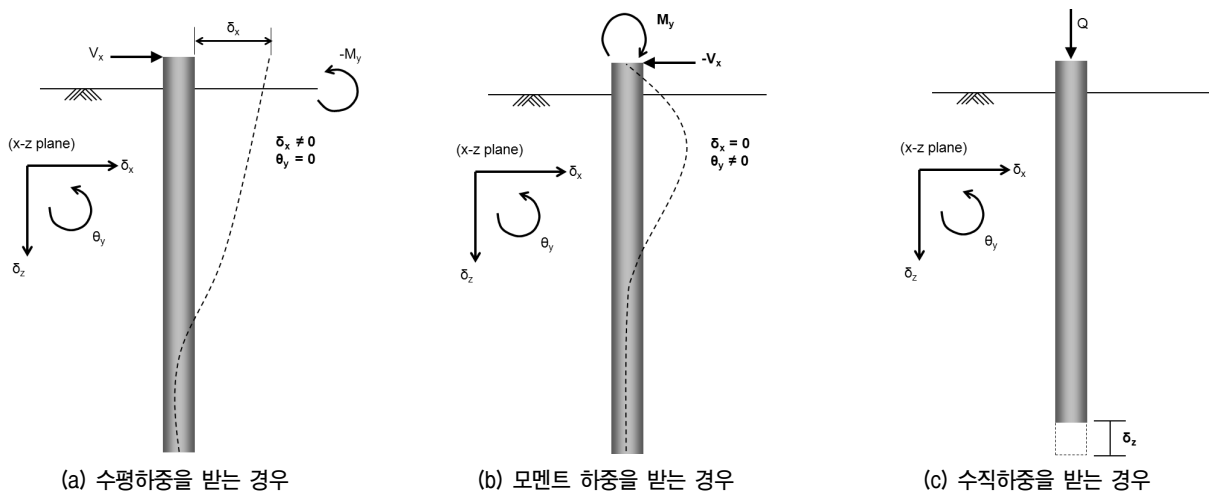


그림 3. 말뚝 두부강성 산정방법

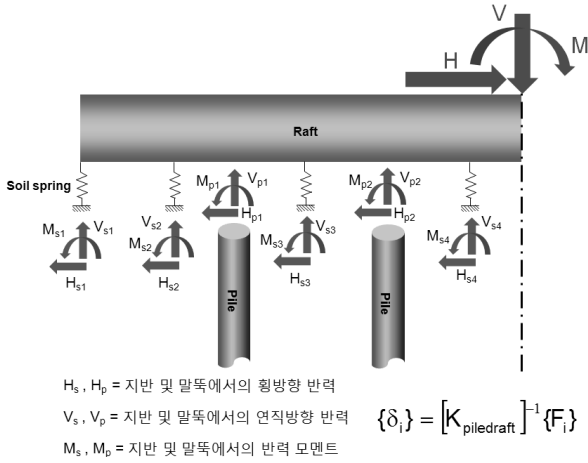


그림 4. 각 절점의 변위산정

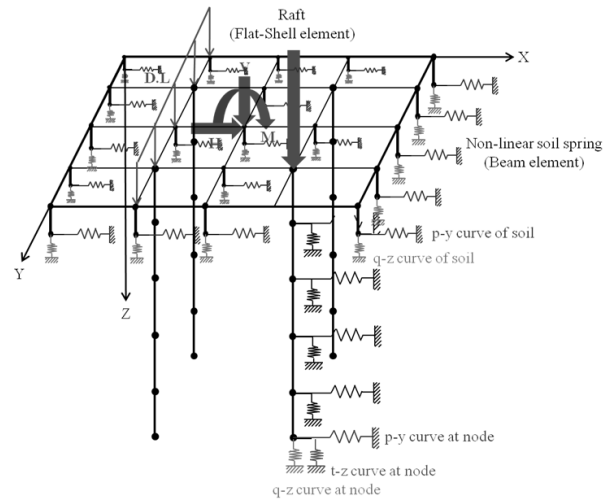


그림 5. YSPR(Yonsei Piled Raft)

식 (10)에 의해 산정된다( $K_{22}, K_{42}, K_{24}, K_{44}$ 는 y-z 평면에서 산정). 이러한 말뚝 두부에서의 3차원 거동에 대한 주요모드는 Reese 등(1970)에 의해 제안되었으며, 본 해석기법에서는 축방향의 회전에 대한 거동과 비틀림 강성( $k_{66}$ )은 고려하지 않았다. 또한 각 절점에서의 변위는 그림 4와 같이 기초 전체에 작용하는 하중으로부터 지반 및 말뚝두부에서 작용하는 반력과 말뚝지지 전면기초 강성행렬( $K_{piledraft}$ )의 역행렬과의 곱으로 산정하였다.

$$k_{11} = \frac{V_x}{\delta_x} \quad (10a)$$

$$k_{51} = \frac{-M_y}{\delta_x} \quad (10b)$$

$$k_{55} = \frac{M_y}{\theta_y} \quad (10c)$$

$$k_{15} = \frac{-V_x}{\theta_y} \quad (10d)$$

$$k_{33} = \frac{Q}{\delta_z} \quad (10e)$$

최종적으로 평면요소와 보-기둥요소를 결합하고 말뚝-지반 및 전면기초-지반의 상호작용을 고려하기 위한 비선형 하중전이함수를 이용하여 전면기초, 말뚝 두부 및 전면기초 하부지반의 각 절점에서 하중단계별 강성행렬 산정이 가능한 말뚝지지전면기초의 근사해석기법을 개발하였다(그림 5 참조).

## 2.4 비선형 해석 알고리즘

말뚝두부 및 전면기초 하부지반의 비선형 하중-변위

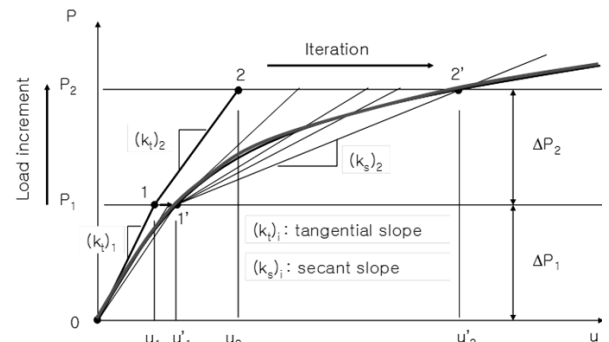


그림 6. 증분하중-할선계수법(원진오 등, 2005)

거동을 고려하기 위하여 원진오 등(2005)이 군말뚝 해석기법에 적용하였던 증분하중-할선계수법(incremental-secant modulus iteration scheme)으로 강성행렬을 산정하였다(그림 6 참조). 그림 6과 같이 각 하중단계(P)별 하중증분에 따라 첫 번째 반복계산 시 하중-변위 곡선의 접선기울기를, 두 번째 이상 반복계산부터는 할선기울기를 적용하여 식 (9)의 말뚝 및 지반에 대한 강성 10개(수직/수평, 회전, 비틀림, 커플링 강성)가 산정된다. N 번째 하중증분에서의 변위가 N-1번째 하중증분에서의 변위와 수렴할 때 까지 반복계산을 수행하며, 각 반복계산 시 강성행렬의 값이 변하는 비선형 해석기법을 적용하였다. 본 해석기법의 흐름도는 그림 7과 같다.

## 3. 해석기법의 검증 및 적용

### 3.1 기존 해석기법과의 비교

본 해석기법의 검증을 위하여 기존 해석기법인 PRAB

(Piled Raft Analysis with Batter piles) 해석 프로그램 및 유한요소해석(ABAQUS, 2010)과 비교·분석을 수행하였다. PRAB 해석 프로그램은 Kitiyodom 등(2003)이 개발한 단순해석기법으로서 전면기초를 얇은 평판(thin plate)요소, 말뚝을 보(beam) 요소 그리고 지반을 선형 스프링으로 모델링한다. 그러나 Mindlin's solution에 근

거한 탄성해석기법을 이용하며 지반의 비선형성을 고려하지 못하는 한계가 있다.

해석대상은 그림 8과 같이 단일지층에 2×2 배열의 말뚝으로 지지되는 말뚝지전면기초이며, 말뚝 직경(D)은 0.4m, 길이 10m의 마찰말뚝의 형태로 가정하였다. 전면기초의 강성은 식 (11)과 같이 전면기초-지반의 강

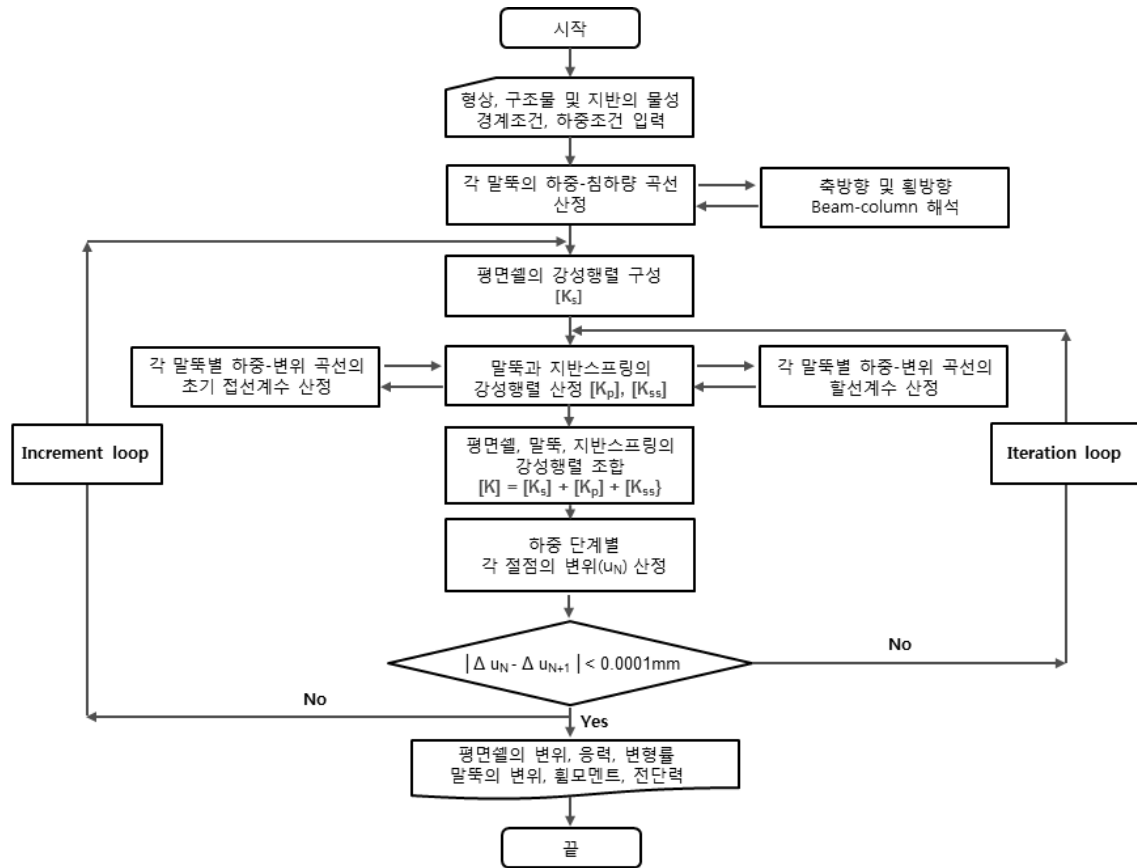


그림 7. 본 해석기법(YSPR)의 흐름도

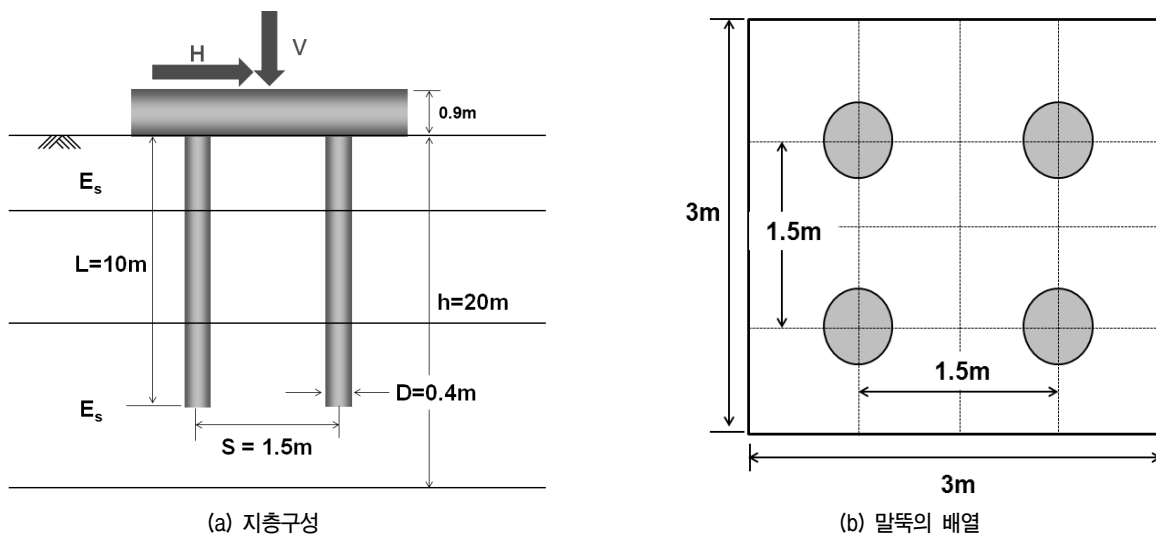


그림 8. 해석 단면(Kitiyodom, 2003)

성비( $K_{rs}$ )를 고려하여 결정하였으며 해석에서는 강성비 값을 23을 사용하였다(Hain 등, 1978). 말뚝과 지반은 선형 탄성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 말뚝, 지반 및 전면기초의 제원 및 물성은 표 1에 나타내었다.

$$k_{rs} = \frac{4E_r B_r t_r^3 (1 - \nu_s^3)}{3\pi E_s L_r^4} \quad (11)$$

하중은 그림 8(b)와 같이 전면기초의 중앙에 수직하중과 횡방향하중을 적용하였고, 말뚝의 거동은 식 (12)와 같은 무차원계수를 이용하여 침하량( $I_{wv}$ ), 횡방향 변위( $I_{uH}$ ), 전단력( $C_{sH}$ ) 그리고 휨모멘트( $C_{bH}$ ) 분포로 나타내었다.

$$I_{wv} = \frac{E_s D w}{q_z B_r L_r} \quad (12a)$$

$$I_{uH} = \frac{E_s D u}{q_x B_r L_r} \quad (12b)$$

$$C_{sH} = \frac{S}{q_x B_r L_r} \quad (12c)$$

$$C_{bH} = \frac{B}{q_x D B_r L_r} \quad (12d)$$

여기서,  $w$ 와  $u$ 는 각각 말뚝두부에서의 침하량과 횡방향 변위,  $q_z$ 와  $q_x$ 는 단위 수직/수평하중,  $S$ 와  $B$ 는 깊이에 따른 발생 전단력 및 휨모멘트이다.

그림 9(a)~9(d)는 본 해석기법으로 산정된 말뚝의 거동과 기존 해석기법(PRAB), 그리고 유한요소해석의 해석결과를 나타내었다. 그림 9(a)에 나타난 바와 같이 본

해석기법 또는 PRAB에서 산정한 말뚝 침하량이 유한요소해석과 비교하여 약 50% 정도 큰 값이 산정되었다. 유한요소해석에서는 전면기초 하부 지반의 응력증가가 말뚝에 가해지는 횡방향 구속압을 증가시키고 이에 따라 말뚝과 지반에서 발생하는 주면마찰력이 증가되기 때문에 침하량이 감소하는 것으로 보이며 이는 기존 연구에서도 확인 바 있다(Katzenbach 등, 2000).

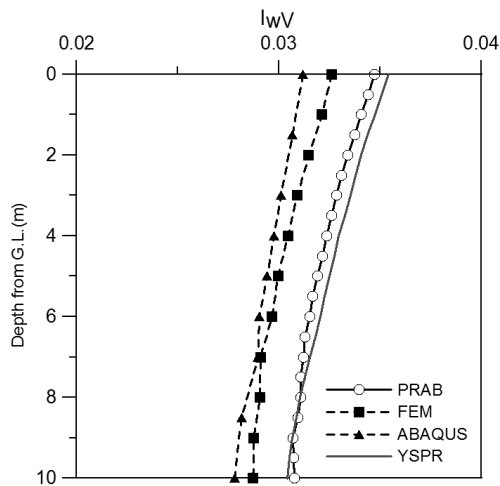
횡방향 변위(그림 9(b))는 기존해석기법 보다는 23% 크게, 유한요소해석과 비교하여 12~13% 정도의 작은 차이가 나타났으며, 전단력 분포(그림 9(c))는 Kitiyodom 등(2003)의 해석결과보다 70~80% 작게 산정되었고, 오히려 유한요소해석(ABAQUS)과 유사한 경향을 보였다. 또한 말뚝의 휨모멘트 분포(그림 9(d))는 네 가지 해석기법이 거의 동일한 값을 산정하였다. 따라서 본 해석기법이 기존해석기법 및 유한요소해석과 비교하여 말뚝의 거동을 유사하게 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 현장사례 비교

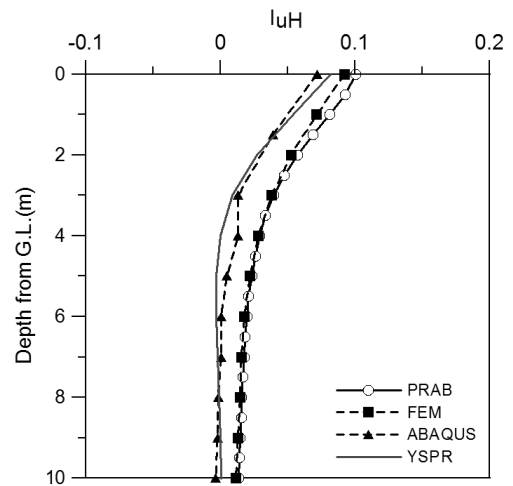
지반의 비선형성을 고려한 대단면 말뚝지지전면기초의 거동분석을 위하여 실제 시공사례를 대상으로 본 해석기법(YSPR)과 유한요소해석(ABAQUS) 그리고 현장계측값을 비교하였다. 그림 10과 같이 비선형해석에 사용된 대표단면은 1983년~1986년 독일 Frankfurt에 시공된 높이 130m의 Torhaus 타워의 하부기초로서 직경 0.9m, 길이 20m의 전체 84본의 말뚝과 두께 2.5m의 전면기초로 시공된 독일 최초의 말뚝지지 전면기초이다(Reul 등, 2003). 전면기초는 두 개의 17.5m×24.5m의 대단면기초로 구성되어 있으며, 각각의 기초에 최대 200MN의 상

표 1. 구조물 및 지반의 물성치

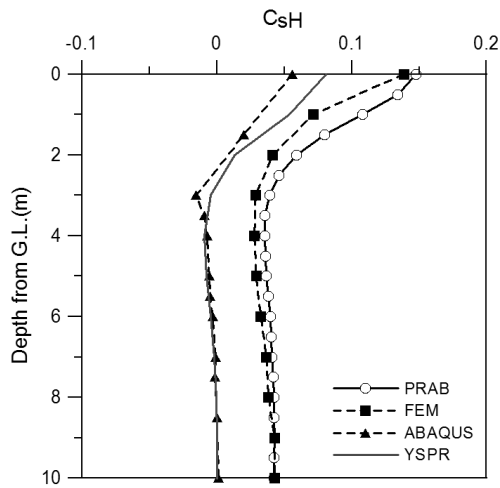
전면기초(raft)	탄성계수(E), kPa	28,000,000
	포아송 비( $\nu$ )	0.15
	단위중량( $\gamma$ ), kN/m <sup>3</sup>	24
	두께(t), m	0.9
말뚝	탄성계수(E), kPa	12,500,000
	포아송 비( $\nu$ )	0.25
	단위중량( $\gamma$ ), kN/m <sup>3</sup>	25
	단면적(A), m <sup>2</sup>	0.196
	단면2차모멘트( $I_x, I_y$ ), m <sup>4</sup>	0.00306
지반	탄성계수(E), kPa	12,500
	포아송 비( $\nu$ )	0.3
	단위중량( $\gamma$ ), kN/m <sup>3</sup>	17.8
	내부마찰각( $\Phi$ ), deg.	35



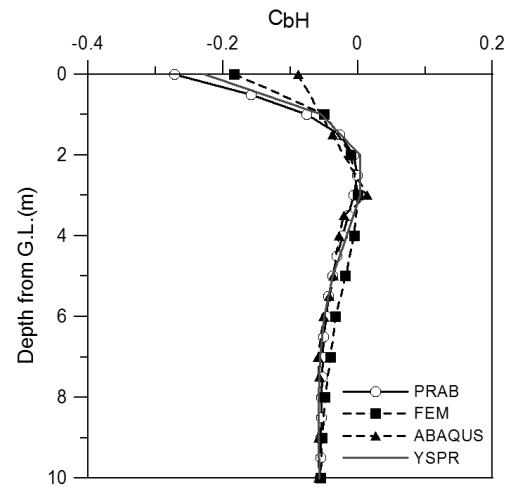
(a) 말뚝의 침하량



(b) 말뚝의 횡방향 변위

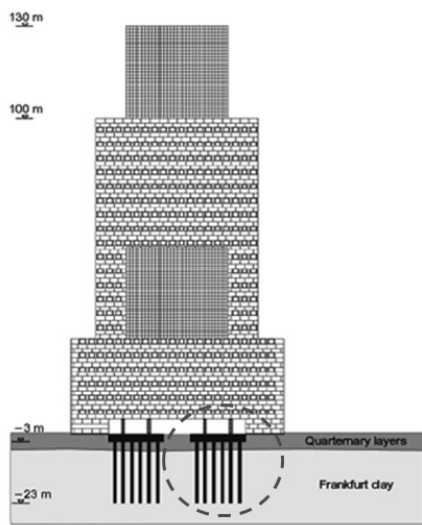


(c) 말뚝의 전단력 분포

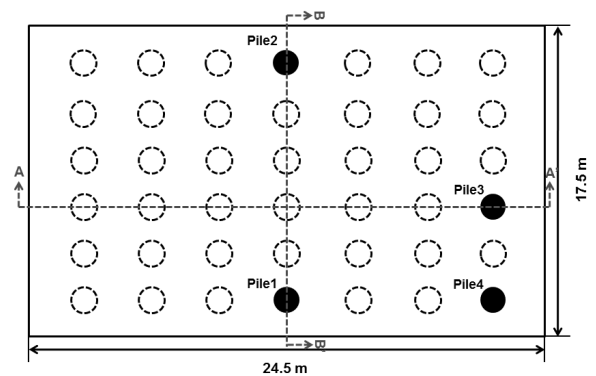


(d) 말뚝의 휨모멘트 분포

그림 9. 해석결과



(a) Torhaus



(b) 말뚝의 배열

그림 10. 해석 대표단면(Torhaus Der Messe)



부하중이 작용하는 것으로 가정하였다(Sommer, 1991).

유한요소해석 시 전면기초 및 말뚝은 탄성모델을 적용하였고, 사질토지반과 점토지반은 Mohr-Colomb 모델을 사용하였다. 지반 물성의 경우 기초의 장기 거동을 나타내기 위하여 배수상태 물성(drainable material)을 적용하여 해석을 실시하였고 적용한 물성치는 표 2에 나타난 바와 같다. 또한 말뚝과 지반의 경계면(interface)에서는 Jeong 등(2004)이 적용한 slip모델을 사용하여 말뚝과 지반 사이의 전단거동을 모사 하였으며, 점토지반의 마찰계수( $\mu$ )는 0.3을 적용하였다. 전면기초와 지반은 접촉하고 있으나 매끄러운(smooth) 상태로 모델링 하였다(이진형 등, 2007). 또한 기초의 단면 및 작용하중이 대칭이므로 전면기초의 중앙을 기준으로 1/4 단면에 대해서만 모델링 하였으며, 지반과 말뚝의 경계면에서는 강성차이에 따른 큰 상대변위가 예상되어 조밀한 mesh를 사용하였고, 경계면과의 거리가 멀어질수록 mesh의 크기를 증가시켰다(그림 11 참조).

유한요소해석에서 적용한 지반 및 구조물의 물성을 토대로 본 해석기법에서 지반의 비선형 을 고려한 해석을 수행하기 위하여 사질토의 p-y 곡선(O'Neil, 1984), t-z

곡선(Wang 등, 1993), 점성토의 p-y 곡선(API clay model), t-z 곡선, q-z 곡선(Wang 등, 1993)의 하중전이 함수를 사용하였다(그림 12). 또한 상부하중은 전면기초 전체에 균일하게 전달되는 것으로 가정하여, 466.47kPa의 등분포 하중을 적용하였다.

그림 13은 현장계측값과 본 해석기법 그리고 유한요소해석을 통해 산정된 말뚝의 축하중을 비교한 것이다. 현장계측에서는 중앙부의 말뚝(Pile 3)에서 코너(corner)부의 말뚝(Pile 1, 2, 4)으로 갈수록 축하중이 증가하는 일반적인 말뚝지지전면기초의 거동을 보이는 것으로 나타났지만, 본 해석기법과 유한요소 해석은 말뚝의 위치에 관계없이 거의 일정하게 축하중이 분포하는 것으로 산정되었다. 이는 해석 시 상부하중 조건을 기초 전체에 등분포하중으로 적용하였기 때문인 것으로 판단되며, 유한요소해석과 본 해석기법의 축하중 분포는 대체적으로 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

그림 14(a), (b)는 기초의 침하거동을 나타낸 것이다. 그림 14(a)는 기초의 중앙에서의 하중-침하 곡선으로 현장계측값은 최대 124mm, ABAQUS는 113mm, 그리고 본 해석기법은 100mm의 침하량을 산정하였다. 본 해석

표 2. 유한요소해석 입력물성

구분	Frankfurt clay	Sand	Raft	Pile
$\gamma t(kN/m^3)$	19	18	25	25
E(kPa)	—	75,000	34,000,000	23,500,000
$c'(kPa)$	20	0.1	—	—
$\phi'(deg.)$	20	32.5	—	—
$\nu$	0.15	0.25	0.2	0.2

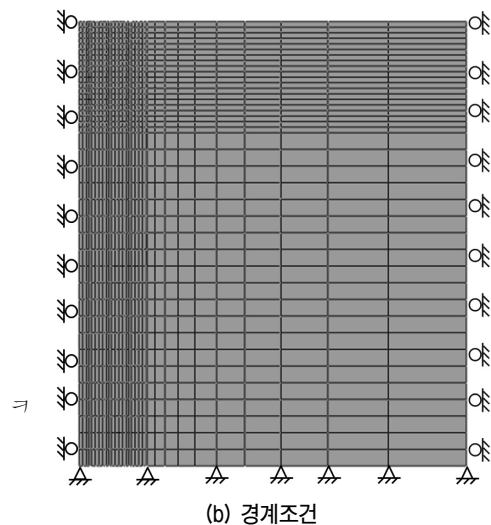
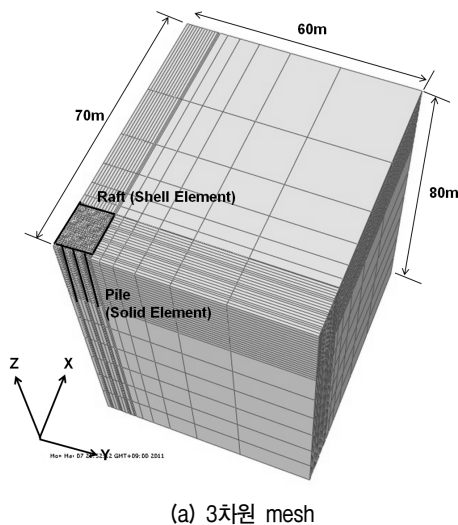
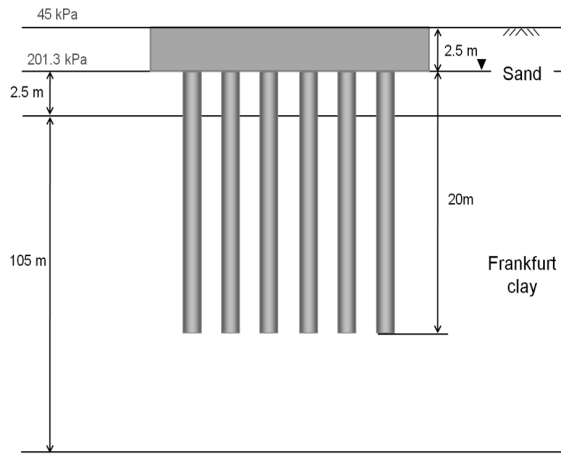
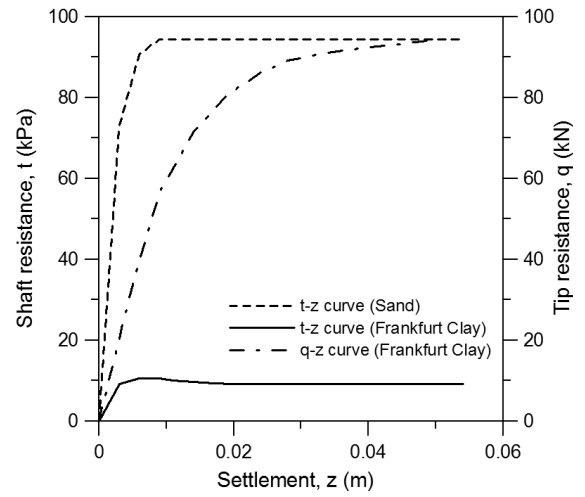


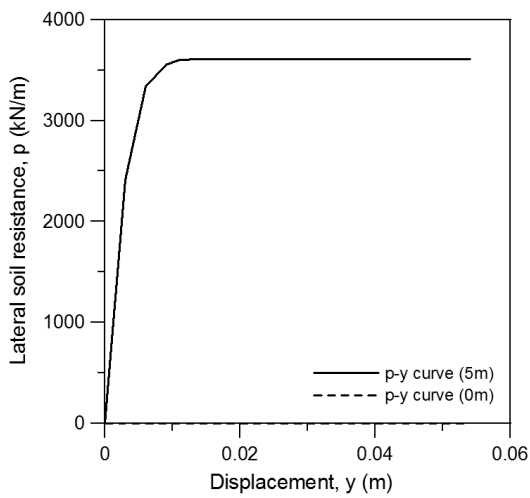
그림 11. 3차원 유한요소 모델링



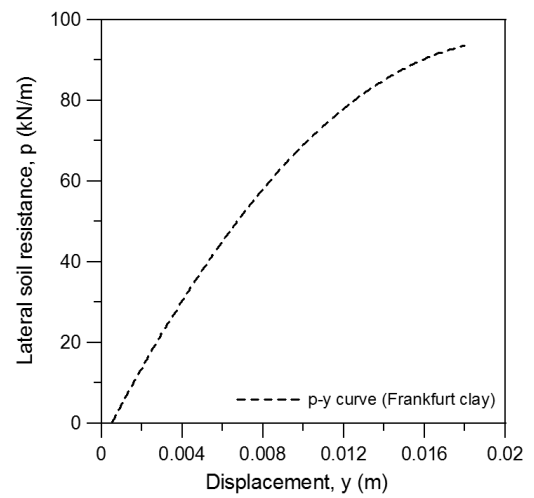
(a) 지층 구성



(b) t-z, q-z 곡선

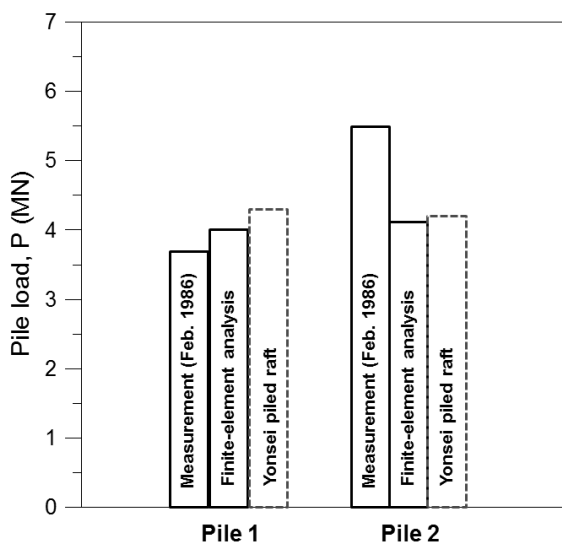


(c) 사질토의 p-y 곡선

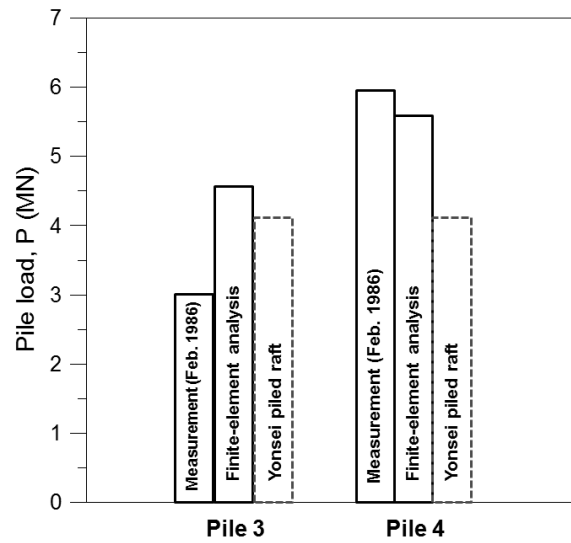


(d) Frankfurt clay의 p-y 곡선

그림 12. 지층구성 및 하중전이곡선

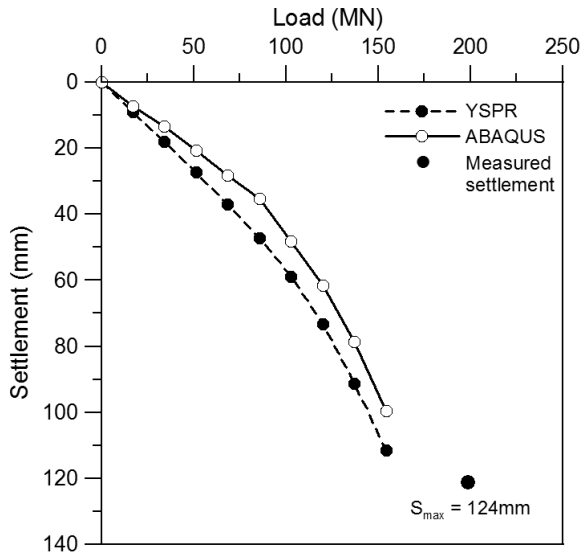


(a) 1, 2번 말뚝의 축하중분포

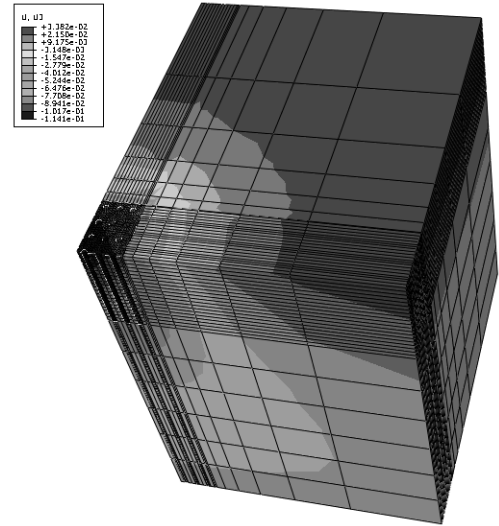


(b) 3, 4번 말뚝의 축하중분포

그림 13. 말뚝의 축하중 분포



(a) 하중-침하 곡선



(b) 침하량 분포

그림 14. 말뚝지지전면기초의 침하거동

기법이 유한요소해석 및 현장계측값과 비교하여 대단면 말뚝지지전면기초의 침하거동을 비교적 정확히 산정하는 것으로 판단되며, 이러한 검증은 토대로 YSPR의 대단면 말뚝지지전면기초 설계에 대한 적용성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 거동을 예측할 수 있는 3차원 근사해석기법(YSPR)을 개발하였으며, 유한요소해석 및 기존해석기법을 이용한 결과 그리고 현장계측자료와 비교하였다. 개발된 해석기법으로 하부 기초-지반의 강성행렬을 산정하여 상부구조-하부기초-지반의 상호작용해석에 대한 연구가 추후 진행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 말뚝-지반-전면기초 사이의 상호작용을 고려한 말뚝지지 전면기초의 3차원 근사해석기법(YSPR)을 개발하였다. 전면기초는 6자유도를 갖는 평면셸(Flat shell) 요소로 모델링하여 기존 모델에서 고려하지 못하는 다양한 연성 거동을 모사할 수 있도록 하였으며, 말뚝두부 및 지반의 강성은 6×6 강성행렬을 이용하여 모델링 하였다. 말뚝과 지반 사이의 비선형적 거동을 고려하는 모델을 적용함으로써 실제 거동을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 기존의 해석기법 및 유한요소해석과 비교·분석한 결과, 연직 및 횡방향 하중이 작용하는 말뚝지지 전면기초에서 본 해석기법이 말뚝의 침하량은 50% 정도 큰 값이 산정되는 것으로 나타났으며, 횡방향변위는 기존해석기법 보다는 23% 크게, 유한요소해석과 비교하여 12~13% 정도의 비교적 작은 차이가 나타났다. 전단력 및 휨모멘트 분포는 기존해석기법 보다 70~80% 정도 작게 산정되었고, 오히려 유한요소해석과 유사한 경향을 보였다. 따라서 본 해석기법이 기존 해석기법과 유한요소해석과 비교하여 수직하중과 횡방향하중이 작용하는 말뚝지지 전면기초의 거동을 유사하게 산정할 수 있음을 알 수 있었다.
3. 현장시공사례를 통해 대단면기초의 하중-침하 거동 및 말뚝의 축하중 분포를 비교·분석한 결과, 본 해석기법이 유한요소해석, 현장계측값보다 다소 작게 산정되는 경향이 있었으나 대단면 말뚝지지전면기초의 침하거동을 비교적 정확히 산정하는 것으로 판단되며, 이러한 검증은 토대로 실제 대단면 기초설계에 대한 적용성을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030842).

## 참 고 문 헌

- 이승훈, 박영호, 송명준 (2007), “말뚝지지 전면기초의 설계를 위한 실용적 해석방법에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제23권, 제12호, pp.83-94.
- 이완훈 (1995), *면내 회전자유도를 가진 변이 평면 셀요소의 개발과 이를 적용한 적응적 체논 세분화*, 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과.
- 이진형, 정상섭 (2007), “연약지반에 시공된 Piled Raft 기초의 3차원 거동 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 제23권, 제5호, pp. 63-75.
- 원진오, 정상섭(2005), “교량 말뚝기초의 캡강성을 고려한 비선형 3차원 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제6호, pp.19-30.
- 최창근, 이필승, 박용명 (1999), “면내회전자유도를 가지는 4절점 비적합 평면셀요소의 개발”, *대한토목학회 논문집*, 제19권 제1-5호, pp.663-673.
- ABAQUS: User's manual. version 6.10. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Pawtucket R. I, 2010.
- Burland, J. B., Broms, B. B. and De Mello, V.F.B. (1977), “Behaviour of foundations and structures”, *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp.495-549.
- Brown, P. T. and Weisner, T. J. (1975), “The behaviour of uniformly loaded piled strip footings”, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.13-21.
- Clancy, P., and Randolph, M. F. (1993), “An approximate analysis procedure for piled raft foundations”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, London, Vol.17, No.12, pp.849-869.
- de Sanctis, L. and Mandolini, A. (2003), “On the ultimate vertical load of piled rafts on the soft clay soils”, *Proceedings of 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp.379-386.
- Hain, S. J. & Lee, I. K. (1978), “The analysis of flexible raft-pile systems”, *Geotechnique*, Vol.28, No.1, pp.65-83.
- Jeong, S. S., Lee, J. H. and Lee, C. J. (2004), “Slip effect at the pile-soil interface on dragload”, *Computers & Geotechnics*, Vol.31, pp.115-126.
- Katzenbach, R. Arslan, U. and Moormann, C. (2000), “Piled raft foundations projects in Germany”, Design applications of raft foundations, Hemsley, J. A. Editor, Thomas Telford, pp.323-392.
- Katzenbach, R. Schmitt, A. and Turek, J. (2005), “Assessing settlement of high-rise structures by 3D simulations”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20, pp.221-229.
- Kitiyodom P, Matsumoto T. (2003), “A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, pp.85-109.
- Kuwabara, F. (1989), “An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil”, *Soils and Foundations*. Vol.28, No.1, pp.82-92.
- Lee, J. H., Kim, Y. H., and Jeong, S. S. (2010), “Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay”, *Computers & Geotechnics*, Vol.37, pp.103-114.
- Lee, I. K. (1993), “Analysis and performance of raft and raft-pile foundations in a homogeneous soil”, *Proceedings of 3rd International Conference on Case History in Geotechnical Engineering*, St Louis (also Research Report R133, ADFA, University of New South Wales, Australia).
- Mandolini, A., Russo, G., Viggiani, C. (2005), “Piled foundations: Experimental Investigations, analysis and design”, State-of-the-Art Rep. Proc., 16th ICSMGE, Osaka, Japan, Vol.1, pp.177-213.
- O'Neill, M. W. and Dunnavant, T. W.(1984), “A Study of Effect of Scale, Velocity, and Cyclic Degradability on Laterally Loaded Single Piles in Overconsolidated Clay.”, Rep. No. UHCE 84-7, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Houston, Houston, TX.
- Ottaviani, M. (1975), “Three-Dimensional Finite element Analysis of Vertically loaded pile groups”, *Geotechnique*, 25, pp.159-174.
- Poulos, H. G. (1991), “Analysis of piled strip foundations,” *Proceedings of Conference on computer methods and advances in geomechanics*, Rotterdam: Balkema, pp.183-191.
- Poulos, H. G. (1979), “Group factors for pile-deflection estimation”, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol.105, No.12, pp.1489-1509.
- Poulos, H. G. (2001), “Piled raft foundations: design and applications”, *Geotechnique*, 51, No.2, pp.95-113.
- Poulos, H. G. (1994), “An approximate numerical analysis of pile-raft interaction,” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, London, Vol.18, No.2, pp.73-92.
- Randolph, M. F. (1983), “Design of piled foundations,” Research Report Soils TR143. Cambridge: Cambridge University Engineering Department.
- Randolph, M. F. (1994), “Design Methods for pile groups and piled rafts”, *Proceedings of 13th ICSMFE*, New Delhi, India, Vol.5, pp.61-82.
- Reese L. C., O'Neill M. W., Smith R. E. (1970) “Generalized analysis of pile foundations”, *Journal of the Soil mechanics and foundations division*, ASCE, 96(1), pp.235-250.
- Reul, O. and Randolph, M.F. (2003), “Piled rafts in overconsolidated clay-Comparison of in-situ measurements and numerical analyses,” *Geotechnique*, Vol.53, No.3, pp.301-315.
- Sommer, H. (1991), “Entwicklung der Hochhausgründungen in Frankfurt/Main Festkoll oquium 20 Jahre Grundbauinstitut” Prof. Dr. -Ing. H. Sommer und Partner, Germany, pp.47-62.
- Wang, S. T., and Reese, L. C. (1993), “COM624P - Laterally loaded pile analysis for the microcomputer, ver. 2.0” FHWA-SA-91-048, Springfield, VA.
- Wang, A. (1996), “Three dimensional finite element analysis of pile groups and piled -raft”, Ph.D. dissertation, University of Manchester, U.K.
- Won, J. O., Jeong, S. S., Lee, J. H. and Jang, S. Y. (2006), “Nonlinear three- dimensional analysis of pile group supported columns considering pile cap flexibility”, *Computers & Geotechnics*, Vol.33, pp.355-370.
- Zafir, Z. (2002), “Seismic Foundation Stiffness For Bridges”, *Deep Foundations 2002*, pp.1421-1433.
- Zhang, G. M., Lee, I. K. & Zhao, X. H. (1991), “Interactive analysis of behaviour of raft-pile foundations”, *Proceedings of Geo-Coast' 91*, Yokohama2, pp.759-764.
- Zhang, H. H. and Small, J.C. (2000), “Analysis of axially and laterally loaded pile groups embedded in layered soils,” *Proceedings of 8th Australia NewZealand Conf. on Geomechanics*, Hobart, Vol.1, 475-483.

(접수일자 2011. 11. 30, 심사완료일 2012. 4. 18)