

말뚝지지 전면기초의 실용적 근사해석법 개발

송영훈* · 송명준** · 정민형*** · 박영호****

Song, Young Hun*, Song, Myung Jun**, Jung, Min Hyung***, Park, Yung Ho****

A Practical Analysis Method for the Design of Piled Raft Foundations

ABSTRACT

In case of estimation of settlement for the piled-raft foundation, it is necessary to consider interaction among raft, piles and soil. But, simple analytic methods usually are not applicable to considering this complicated interaction. In this study, a computer-based approximate analytic method, HDPR, was developed in consideration of above mentioned interaction in order to analysis of settlement for the piled-raft foundation. The finite element method was applied to raft analysis by means of the Mindlin plate theory, and soil and piles were modeled as springs which were connected with their raft. The linear spring which can consider multi layered soil and the non-linear spring were applied to soil springs and pile springs, respectively. The raft-piles-soil interaction was reflected to each spring. In order to verify the developed analytic method, it was compared and analyzed with 3D FEM analysis, existing approximate analytic method and site monitoring data. As a result, the developed analytic method showed reasonable results of settlement estimations of raft and piles for each case. From a practical point of view, it is confirmed that this analytic method is able to apply for analysis and design of the piled-raft foundation.

Key words : Approximate analytic method, Piled-raft foundation, Settlement, Raft-pile-soil interaction

초록

말뚝지지 전면기초에서 침하량을 산정할 경우 기초판-말뚝-지반간 상호작용을 고려해야 하며, 단순 해석법으로는 이러한 복잡한 상호작용을 고려하여 해석하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 침하량 해석을 위해 기초판-말뚝-지반간 상호작용을 고려한 근사해석법(HDPR)을 개발하였다. 기초판은 Mindlin 판이론을 이용하여 유한요소로 모델링 하였고, 지반 및 말뚝은 기초판에 연결된 스프링으로 모델링되었다. 지반 스프링의 경우 다층지반을 고려한 선형 스프링을 적용하였고, 말뚝은 비선형 스프링을 적용하였으며, 각각의 스프링은 기초판-말뚝-지반간 상호작용이 반영되었다. 본 연구에서의 해석기법 검증에 위해 3차원 유한요소해석, 기존에 개발된 근사해석방법 및 실제 현장 계측결과와 비교분석을 수행하였다. 그 결과, 개발된 기법이 말뚝 및 기초판의 침하량을 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 이를 통해 실제 말뚝지지 전면기초 해석 및 설계 시 실용적인 측면에서 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

검색어 : 근사해석법, 말뚝지지 전면기초, 침하량, 기초판-말뚝-지반 상호작용

1. 서론

지금까지 대부분의 기초들은 지지력 관점의 설계만이 주요 관심의 대상이 되어왔으며, 침하의 경우 기초판-말뚝-지반간 상호작용이 복잡하여 정확한 침하량 산정이 어렵기 때문에, 설계 시 대부분 지지력 관점으로 설계가 진행되는 실정이다. 이 경우 기초판의 하중분담

* 현대건설 연구개발본부 과장 (HDEC Co., Ltd. · songyounghun@hdec.co.kr)

** 교신저자·현대건설 연구개발본부 부장 (Corresponding Author · HDEC Co., Ltd. · mjsong@hdec.co.kr)

*** 중신회원·한국시설안전공단 시설성능연구소 과장 (KISTEC · mhjung@kistec.or.kr)

**** 중신회원·현대건설 연구개발본부 상무 (HDEC Co., Ltd. · yhpark@hdec.co.kr)

Received October 15, 2015/ revised February 12, 2016/ accepted October 17, 2016

능력을 고려할 수 없기 때문에 말뚝이 모든 상부 구조물의 하중을 지지하는 것으로 설계를 수행할 수밖에 없다. 반면, 말뚝지지 전면기초는 기초판이 하중을 분담하는 것을 고려한 경제적인 설계 개념이지만, 복잡한 지반-말뚝-기초판의 상호작용을 고려하여 정확한 침하량을 산정할 수 있어야 적용이 가능하다.

말뚝지지 전면기초 해석기법은 크게 단순계산법, 엄밀해석법, 근사해석법이 있다. 단순계산법은 기초판을 강체로 가정한 해석방법으로 Poulos and Davis (1980) 및 Randolph (1983) 등이 제안하였다. 이 방법은 간편하고 빠르게 계산할 수 있으나 기초판을 강체로 가정하기 때문에 휨강성 및 부등침하량을 예측할 수 없다는 단점이 있다.

엄밀해석법은 경계요소법(Kuwabara, 1989; Poulos, 1994)과 유한요소법(Ottaviani, 1975; Zhang et al., 1991; Ta and Small, 1996)이 있다. 이 중 3차원 유한요소해석이 실제 조건과 가장 유사한 거동을 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다(Poulos, 2001). 하지만 3차원 유한요소해석의 경우 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에, 시간이 한정된 실제 실무에서 적용하기에는 많은 한계점이 있다. 따라서 말뚝지지전면기초를 실무에 적용하기 위해서는 단순계산법 이상의 정밀도를 가지면서, 3차원 유한요소해석기법 보다 빠르고 간편한 해석기법의 개발이 필요하다.

이러한 배경에 의해서 개발된 근사해석법은 기초판을 판(plate)으로 모델링하고 말뚝과 지반을 스프링 또는 보-기둥(beam-column) 요소로 모사한 방법으로, 해외에서는 Clancy and Randolph (1993), Poulos (1994)에 의해 해석기법이 제안되었으며, 국내에서는 Lee et al. (2007), Park (2008), Cho and Jeong (2012)이 해석기법을 제안하였다.

본 연구에서는 기존에 개발된 근사해석법과 마찬가지로, 단순계산법과 같이 간편하고 빠를 뿐 아니라, 그 이상의 정밀도를 가지는 실용적인 측면에 초점을 맞춘 근사해석 프로그램(HDPR)을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 해석기법에서, 기초판은 Mindlin (1936)이 제안한 판이론을 이용하여 유한요소로 모델링 하였고, 지반 및 말뚝은 기초판에 연결된 스프링으로 모델링 되었다. 각각의 스프링 모델은 다층지반인 경우에도 적용이 가능하며, 지반-말뚝간 interface 및 비선형 거동, 기초판-말뚝-지반간 상호작용을 고려하였다. 또한 사용성 측면에서 서로 종류가 다른 말뚝(직경, 길이 등)도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 개발된 해석기법을 기존의 근사해석법, 유한요소해석법 및 실제 현장에서 측정한 데이터와 상호 비교분석을 통해 그 신뢰성을 검증하였다.

2. 말뚝지지전면기초 근사해석법(HDPR)

2.1 프로그램 개요

말뚝지지전면기초 해석의 목적은 침하량과 부등침하량을 규정

된 값으로 제한하기 위해 필요한 말뚝의 개수, 상부기초의 두께, 그리고 말뚝의 크기 및 배열을 결정하는데 있다. 이를 위해서는 다음에 열거하는 사항들을 수용할 수 있고, 결과로 얻을 수 있는 해석방법이 필요하다.

- ① 말뚝-상부기초-지반 사이의 상호작용에 대한 적절한 고려
- ② 말뚝의 개수, 배치, 특성의 변화
- ③ 다양한 지반조건
- ④ 상부기초의 두께 및 강성변화
- ⑤ 다양한 하중조건
- ⑥ 상부기초의 침하량 및 부등침하량 산정
- ⑦ 상부기초의 구조적 설계를 위한 휨 모멘트와 전단력 산정

본 연구에서는 실제 문제에 적용이 가능한 실용성에 주안점을 두고 무리말뚝 및 기초판 통합해석이 가능한 해석기법을 위해 말뚝, 기초판, 지반에 대하여 Fig. 1과 같이 각각 다음과 같은 해석방법이 적용되었다.

- ① 말뚝 : Randolph and Wroth (1978)의 근사적 탄성해법, Kondner (1963)의 비선형 말뚝해석 모델 및 말뚝-지반-기초판 사이의 상호작용이 고려된 스프링으로 모델링
- ② 기초판 : Mindlin (1936)이 제안한 판 이론을 이용한 유한요소로 모델링
- ③ 지반 : Schmertmann and Hartmann (1978)이 제안한 변형률 영향계수를 이용하여 말뚝-지반-기초판 사이의 상호작용을 고려한 스프링으로 모델링

Fig. 1의 유한요소 해석모델에서는 말뚝-지반-기초판 상호작용을 직접 고려할 수 없기 때문에, 말뚝 및 지반 스프링 적용 시에

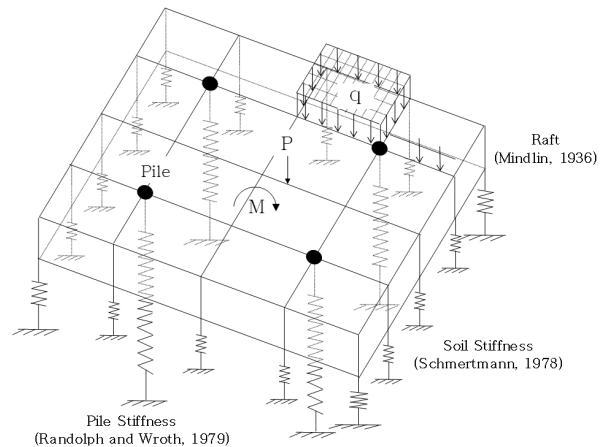


Fig. 1. Plate Modeling by Finite Element Analysis

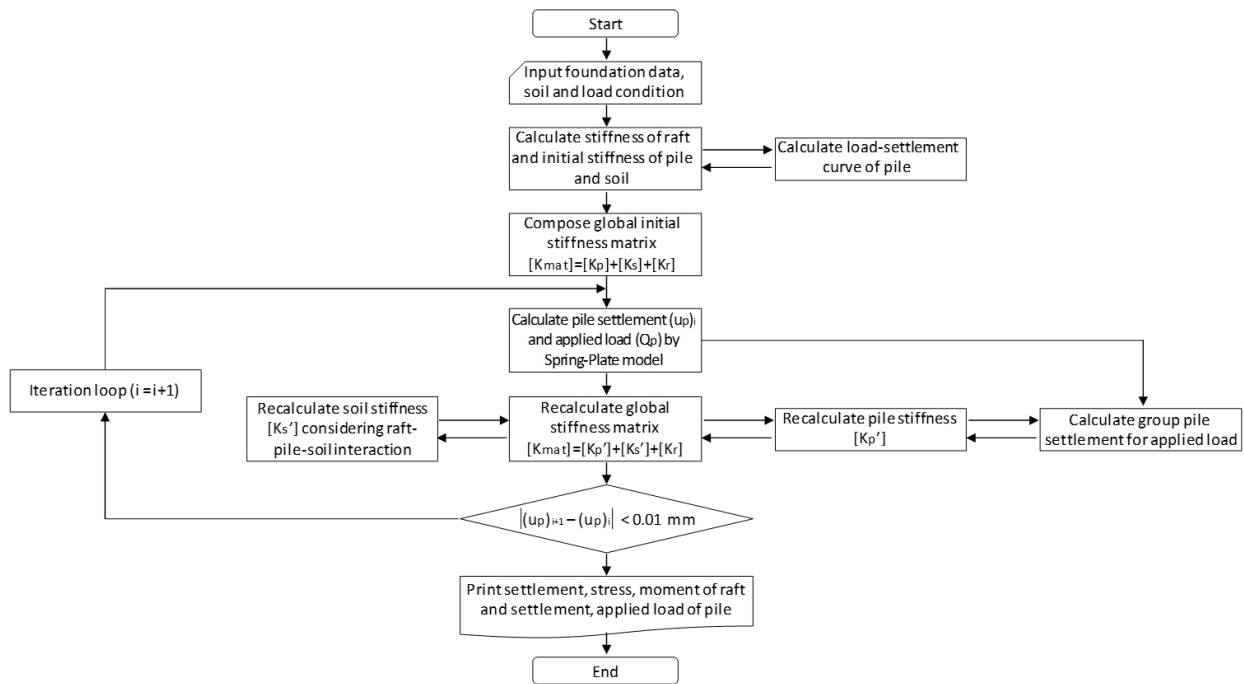


Fig. 2. Flowchart of HDPR

이를 고려한 스프링 값을 입력해야 한다. 지반의 경우 선형 스프링으로 가정하지만, 말뚝-지반-기초판 사이의 상호작용을 고려할 경우 고정된 상수 값이 아니고, 말뚝의 경우에는 비선형 스프링으로 가정할 뿐 아니라, 말뚝-지반-기초판 사이의 상호작용을 고려하기 때문에 고정된 상수 값이 아니며, 하중 크기에 따라 강성이 변하기 때문에 직접 계산이 불가능하다. 따라서 정해를 구하기 위해서는 초기에 Randolph and Wroth (1978)의 근사적 탄성해법, Schmertmann and Hartmann (1978)이 제안한 변형률 영향계수를 이용하여 산정된 초기 스프링 값을 Fig. 1의 유한요소 해석에 적용하여 말뚝 반력 및 침하량을 산정하고, 이 값으로부터 말뚝-지반-기초판 상호작용을 고려한 말뚝 및 지반 스프링 값을 계산하여 다시 유한요소 해석을 수행한다. 이러한 과정을 i번째 말뚝침하량과 i+1번째 말뚝 침하량 차이가 허용오차 값 이내로 수렴할 때까지 반복하게 된다. Fig. 2는 HDPR의 해석과정에 대한 flowchart를 나타낸 것이다.

2.2 지반 모델링

Fig. 1의 유한요소 해석을 위해 기초판 하부의 지반은 스프링으로 묘사하였다. 본 연구에서는 다층지반에 적용이 가능한 Schmertmann and Hartmann (1978)에 의해 제안된 변형률 영향계수를 이용하여 Eq. (1)과 같이 지반 스프링을 산정하였다. 일반적으로 말뚝지지면면기초를 적용하는 기초판의 경우 일반 말뚝기초 구조물과 비교하여 상대적으로 기초판의 크기가 크기 때문에 지지력도 크다. 따라서, 실용적인 측면에서 지반스프링을 선형으로 가정하였다.

$$k_s = q_s / \left\{ C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} \Delta Z \right\} \quad (1)$$

여기서, I_z 는 변형률 영향계수, q_s 는 기초판에 작용하는 등분포 하중, C_1 은 기초의 근입깊이에 대한 보정계수, C_2 는 흙의 크리프에 대한 보정계수, $q = \gamma D_f$, \bar{q} 기초 저면에서의 응력이다.

2.3 말뚝 모델링

말뚝의 초기 강성을 산정하기 위해 Eqs. (2) and (3)과 같이 Randolph (1978)의 탄성해법을 적용하였다. 여기서, 말뚝은 단일 지층으로 나누어 있다고 가정하였다.

$$\frac{P}{G r_p w} = \frac{4}{1 - \nu} + \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_m}{r_p}\right)} \frac{L}{r_p} \quad (2)$$

$$r_m = 2.5L\rho(1 - \nu) \quad (3)$$

여기서, r_m 은 말뚝의 영향반경으로 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있고, P 는 말뚝에 적용된 하중, w 는 말뚝의 변위, r_p 는 말뚝의 반경이므로 말뚝의 강성을 계산할 수 있다. 여기서, ν 는 지반의 Poisson's ratio, L 은 말뚝의 길이, G 는 말뚝의 전단탄성계수, ρ 는 말뚝 선단의 1/2심도와 말뚝 선단 심도에서의 전단탄성계수의

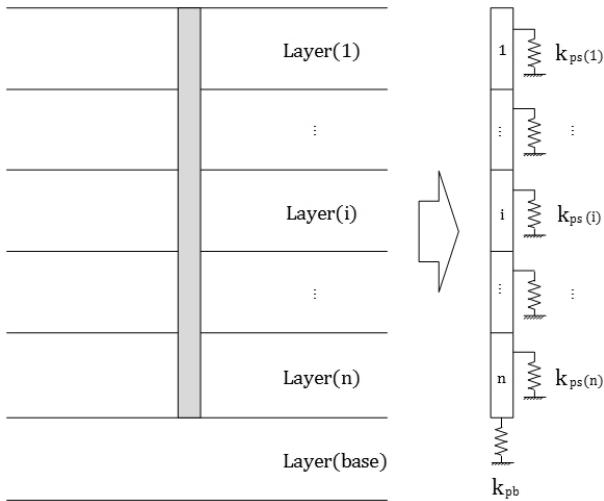


Fig. 3. Axially Loaded Pile Modeling Embedded on Multi-Layer Condition

비율이다.

하지만 본 연구에서는 다층지반을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 말뚝을 다수의 분절된 요소로 구분하였고, 그에 따라 말뚝 강성을 주변과 선단으로 분리하여 Eqs. (4) and (5)와 같이 산정하였다(Lee et al., 2007).

$$k_{ps}(i) = \frac{G_s(i)}{r_p \ln(r_m/r_p)} \quad (4)$$

$$k_{pb} = \frac{4G_b}{\pi r_p (1 - \nu_b)} \quad (5)$$

여기서, G_b 는 선단의 전단탄성계수, $G_s(i)$ 는 요소 i 에서의 주변 전단탄성계수이다. Eq. (3)의 r_p , Eq. (4)의 $k_{ps}(i)$, Eq. (5)의 k_{pb} 등 각 계수는 각 말뚝에서 개별적으로 구해지기 때문에, 개별말뚝의 길이 및 직경이 같지 않아도 적용이 가능하도록 개발하였다.

2.4 말뚝지반 거동 모델

말뚝과 지반간의 상호작용을 모사하기 위하여 말뚝을 다수의 분절된 요소로 구분하고, 각 요소의 단위 주변 저항력과 침하의 관계 및 선단에서의 단위 선단저항력과 침하의 관계를 모델링 하였다. 본 연구에서는 단위저항력과 침하의 관계를 Fig. 4와 같이 Kondner (1963)가 제안한 형태를 갖는 비선형 곡선으로 가정하여 Eqs. (6) and (7)과 같이 나타내었다.

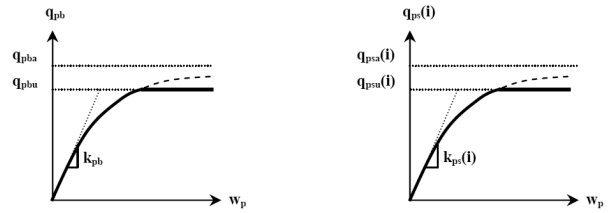


Fig. 4. Unit Bearing Capacity-Displacement using Kondner (1963) Model

$$q_{ps}(i) = \frac{w_p}{\frac{1}{k_{ps}(i)} + \frac{w_p}{q_{psa}(i)}} \quad (6)$$

$$q_{pb} = \frac{w_p}{\frac{1}{k_{pb}} + \frac{w_p}{q_{pba}}} \quad (7)$$

$$q_{psa}(i) = q_{psu}(i)/R_f \quad (8)$$

$$q_{pba} = q_{pbu}/R_f \quad (9)$$

여기서, $q_{ps}(i)$ 는 요소 i 에서의 단위 주변 마찰력, q_{pb} 는 단위 선단 하중, $q_{psa}(i)$, q_{pba} 는 각 그래프의 점근선, $q_{bsu}(i)$ 은 i 번째 지층에서의 극한 단위주면마찰력, q_{pbu} 는 극한 단위선단지지력을 의미하며, R_f 는 파괴계수로서 PLAXIS 3D 2012에서는 0.9를 추천하며, 본 프로그램과 PLAXIS 3D 2012 해석결과를 비교 검증하기 위해 같은 값을 적용하였다.

본 연구에서는 유한요소 해석프로그램에 적용되는 말뚝-지반 사이의 interface를 모사하기 위해 3D 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 3D의 reference manual (2012)에서 제안된 Eqs. (10) and (11)과 같이 감소계수인 R_{inter} 를 도입하였다. R_{inter} 는 이론적인 값이 없으나, PLAXIS 3D 2012에서는 2/3값을 추천하고 있다.

$$c_i = R_{inter} C_{soil} \quad (10)$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \tan \phi_{soil} \quad (11)$$

2.5 기초판-말뚝지반 상호작용

말뚝, 기초판 등 각각의 요소는 서로 영향을 받으며, Randolph (1994)가 Eq. (12)와 같이 말뚝-지반-기초판 상호작용을 고려한 침하량을 제안하였다.

$$\begin{Bmatrix} w_p \\ w_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_p & \alpha_{ps}/k_s \\ \alpha_{sp}/k_p & 1/k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_p \\ P_s \end{Bmatrix} \quad (12)$$

여기서, w_p 는 말뚝의 침하량, w_s 는 기초판의 침하량이고, α_{ps} 및 α_{sp} 는 기초판-말뚝간 interaction factor이며, $\alpha_{ps} = \alpha_{sp}(k_s/k_p)$, $\alpha_{sp} = 1 - \ln(r_p/r_j)/(r_m/r_j)$ 이다. k_s 는 지반 스프링 강성계수이고, k_p 는 군말뚝의 강성스프링계수이다. 유한요소 해석 시 군말뚝 효과를 반영하여 계산이 안되기 때문에, 유한요소의 말뚝 스프링강성 산정 시 군말뚝 효과를 고려하였다. Randolph and Wroth (1978)은 말뚝인접 지반이 말뚝을 중심으로 Eq. (13)과 같이 침하한다고 제안하였다.

$$w_{s(i,j)} = \frac{\tau_s r_p}{G_s} \ln \left(\frac{r_m}{r_j} \right) \quad (13)$$

여기서, $w_{s(i,j)}$ 는 pile j 위치에서 pile i 에 의해 발생하는 흙의 침하량, r_j 는 pile i 와 pile j 가 떨어진 거리, r_m 은 말뚝의 영향반경, τ_s 는 pile j 위치에서 pile i 에 의한 전단응력이다. 여기서 말뚝이 인접말뚝에 의해 침하된 흙의 침하량만큼 추가로 침하하지 않고, Lee et al. (2007)이 제안한 것과 같이 말뚝과 지반 사이에 미끄러짐이 발생한다고 가정하였다. 이 때 Fig. 5(a)와 같이 미끄러진 침하량을 w_{slip} 으로 표현하였다. 이러한 미끄러짐 현상은 말뚝이 Fig. 5(b)와 같이 탄소성 거동을 할 경우, 탄성 영역에서는 말뚝과 흙이 일체로 거동하고, 소성 영역에서 말뚝-지반간 미끄러짐이 발생하도

록 모사하였다. 이때 군말뚝을 고려한 i 번째 말뚝의 침하량 $w_{p(i)group}$ 는 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $w_{p(i)}$ 는 군말뚝 효과를 고려하지 않은 pile i 의 침하량이고, $R_{fe(j)}$ 는 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있다. $w_{p(i)}$ 에서 군말뚝 효과를 고려한 침하량인 $w_{p(i)group}$ 을 말뚝의 스프링 계수 산정 시 반영하였다.

$$w_{p(i)group} = w_{p(i)} + \sum_{j=1}^n R_{fe(j)} w_{s(i,j)} \quad (14)$$

$$R_{fe(j)} = (w_{p(j)} - w_{slip(j)})/w_{p(i)} \quad (15)$$

3. 기존의 해석방법과의 비교분석

개발된 해석기법의 검증을 위해 3차원 유한요소기법을 포함한 다양한 기존의 해석기법과 비교하였다. 비교를 위해 해석에 사용된 예제는 Fig. 5와 같이 Poulos et al. (1997)이 해석기법 검증을 위해 발표한 해석예제 및 실제 시공된 독일의 Torhaus Der Messe 빌딩을 대상으로 비교하였다.

Fig. 6(a)는 기초판과 말뚝으로 된 말뚝지지 전면기초 구조물이고, 직경 0.5 m, 길이 10 m의 말뚝이 2 m 간격으로 15개 배치되었으며, 해당 예제의 구조물에 적용된 총 하중은 12 MN이다. 비교분석에 사용된 기존의 해석기법은 Randolph (1983)의 단순 선형 해석법, Poulos (1994)의 근사해석법(GARP), Ta and Small (1996)의 유한요소법, Lee et al. (2007)의 근사해석법(Pile+R)과 PLAXIS 3D를 이용한 3차원 유한요소 해석법이다.

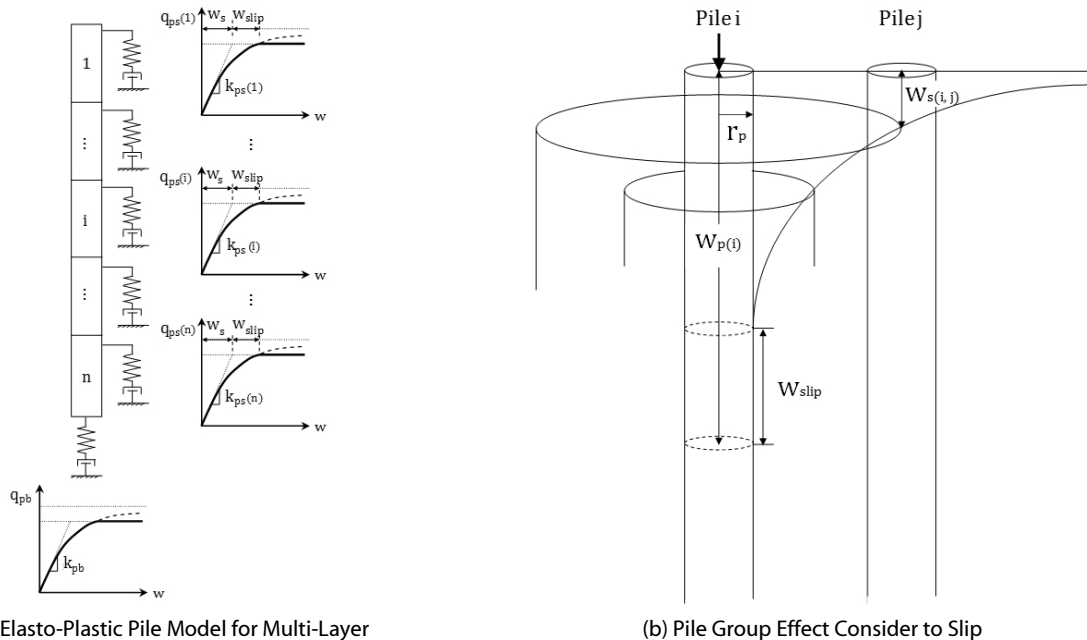


Fig. 5. Group Effect of Elasto-Plastic Pile Model

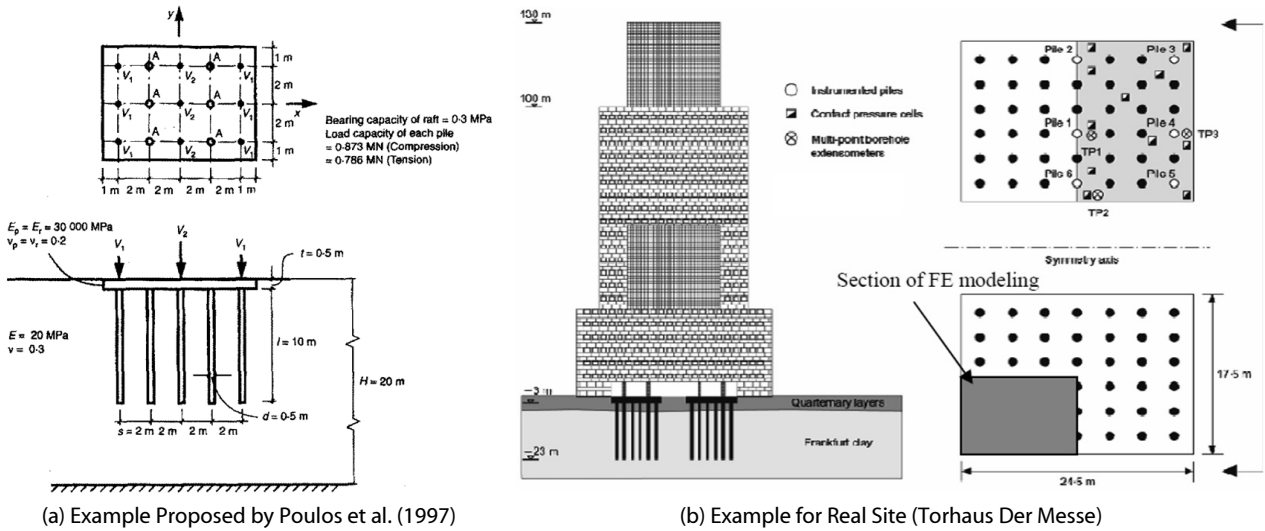


Fig. 6. Examples for Comparison with Existing Research Results

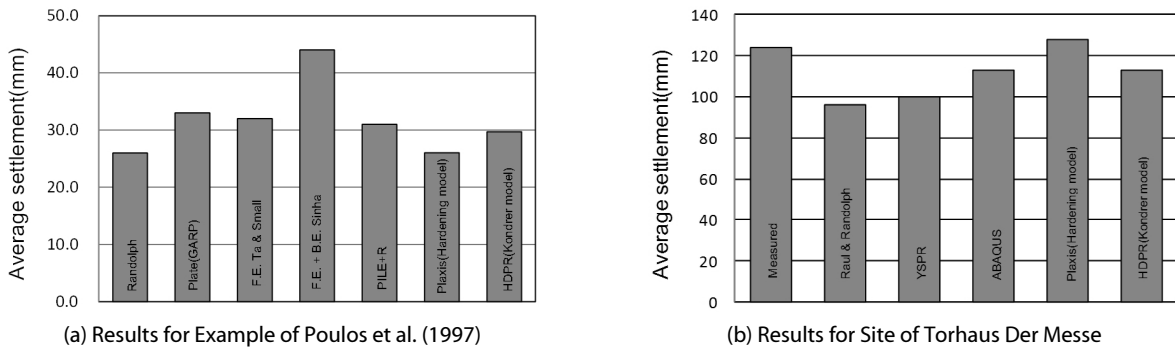


Fig. 7. Settlement Comparison between Developed Method and Existing Methods

또한 Fig. 6(b)는 실제 계측된 침하량을 포함하여 Reul and Randolph (2003)의 유한요소해석법 및 Cho and Jeong (2012)의 근사해석법, ABAQUS 해석결과(Cho and Jeong, 2012), PLAXIS 3D 해석결과와 비교하였다.

본 논문의 해석기법에 의한 해석 결과와 기존의 해석기법과 비교·분석한 결과를 Fig. 7과 같이 나타내었다. Fig. 6(a) 예제의 경우, 본 연구의 해석결과는 Randolph (1983)의 단순 선형해석법보다 결과 값이 Fig. 7(a)와 같이 크며, 그의 간편해석법 및 유한요소해석법의 평균적인 값을 나타내므로, 합리적인 결과 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. Fig. 6(b) 예제의 경우에도 마찬가지로, 본 연구의 해석결과가 Fig. 7(b)와 같이 실제 계측 결과 및 다른 해석결과와 유사하므로, 합리적인 결과 값을 나타내는 것을 알 수 있었다.

4. 현장 침하량 계측 데이터 및 3D FEM과 비교분석

개발된 해석 프로그램의 말뚝-기초판-지반 상호작용 해석에 대

한 검증용 보다 상세히 실시하기 위하여, Fig. 8과 같이 말뚝과 기초판이 적용된 2개 현장에 대해 모니터링을 실시 하였고, 모니터링 결과와 프로그램 해석에 의한 결과를 비교·분석 하였다. 또한, 각 현장에 대해 FEM 해석을 실시하여 보다 상세한 비교·분석이 될 수 있도록 하였다.

첫 번째 기초 모니터링 대상 현장은 OO대교 주탑기초이다. 주탑기초의 평면도는 Fig. 8(a)와 같으며, 총 18개의 직경 3.0 m 현장타설말뚝이 기반암 심도에 따라 22.7~31.2 m의 길이로 시공되었다. 기초판은 51×21×7 m로 대규모였으며 근입심도는 9 m로 설계되었다. 각 말뚝의 중앙에 코어를 뚫어 변형률계를 매립하여 말뚝에 작용하는 하중을 측정하였고, 일부 말뚝에 대해 철근망 제작 시 4방향으로 변형률계를 매설하였다. 기초의 침하 현장 여건상 초기 침하 측정이 이루어지지 못하였고, 주탑 기둥부에 침하 타겟을 설치하여 기초판 시공 이후의 침하량을 측정하였다.

두 번째 현장은 복선전철 현장의 OO고가 교각기초로 Fig. 8(b)와 같이 말뚝은 직경 1.8 m의 8개 현장타설말뚝으로 구성되었으며

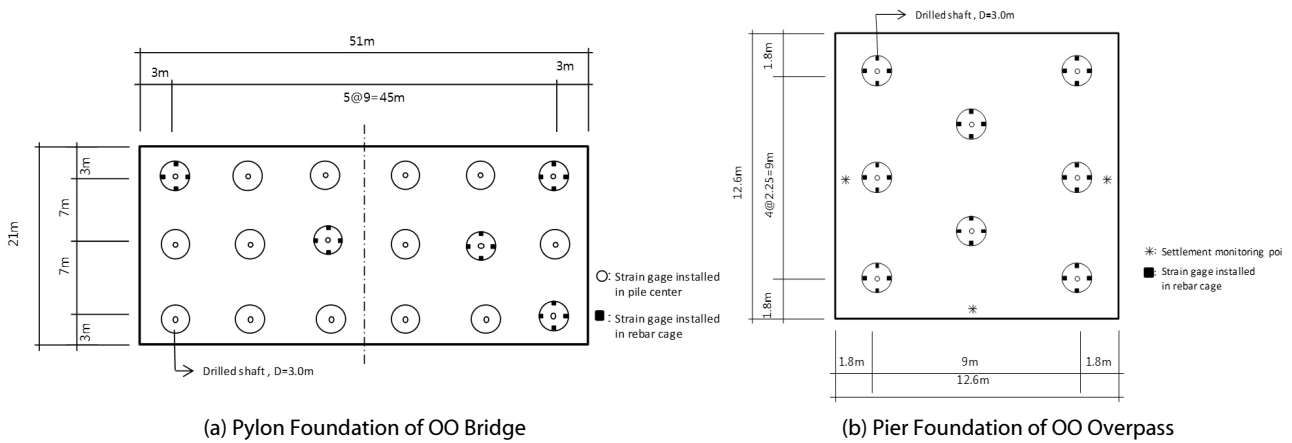


Fig. 8. Plan Drawings and Analyzed Measuring Equipment for Each Monitoring Site

Table 1. Soil Conditions and Input Data of Analyses for Each Monitoring Site

Site	Layer	Depth	N-Value				
Pylon Foundation of OO Bridge	Fill	0 ~ 5	< 10	18.0	10	3	50,000
	Weathered Soil	5 ~ 11	13~50	19.0	20	29	50,000
	Weathered Rock	11 ~ 33.5	> 50	21.0	30	32	200,000
	Soft Rock	33.5 ~	-	21.0	200	33	1,101,000
Pier Foundation of OO Overpass	Silty Sand	0.0 ~ 5.7	4 ~ 7	17.0	0	28	4,377
	Clay 1	5.7 ~ 8.3	4 ~ 5	18.0	20	0	5,000
	Clayey Sand	8.3 ~ 10.3	11 ~ 19	18.5	0	31	12,160
	Clay 2	10.3 ~ 16.3	9 ~ 13	19.0	70	0	17,500
	Silty Gravel	16.3 ~ 26.5	36 ~ 50	20.0	0	35	60,800
	Clayey Gravel	26.5 ~ 53.5	33 ~ 50	20.0	20	35	55,100
	Gravel	53.5 ~	> 50	21.0	0	38	86,700

길이는 35.1 m였다. 12.6×12.6×3 m 형태의 기초관은 지반면 아래 약 10 m 하부에 위치하였다. OO고가 현장에서는 말뚝에 작용되는 하중 측정을 위한 변형률계를 두 단면에 각각 4개씩 철근망 제작 시 부착을 하여 각 말뚝 당 8개씩 설치 되었다. 기초관 측면 하부에 H-beam을 설치하고, 기초관 외곽으로 돌출된 H-beam 상부에 백관과 텔테일봉을 지반면 상부까지 설치하는 방법으로 기초관의 침하량을 기초관 시공부터 측정할 수 있도록 하였다.

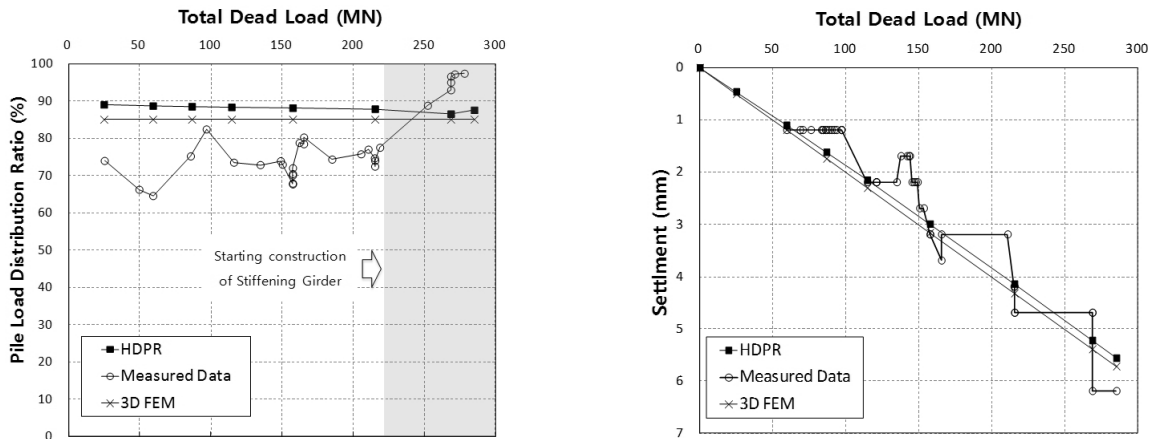
말뚝에 작용하는 하중과 전체 기초 시스템에 작용하는 하중을 비교하기 위해, 각 현장의 시공단계별 고정하중을 산정하였다. 시공중의 풍 하중이나 활 하중은 측정이 매우 어려우며, 시공 중에는 그 크기가 소규모일 것으로 가정하여 전체 기초의 하중에서 제외하였다.

모니터링 결과와 본 연구에서 개발된 근사해석법에 의한 해석 결과와의 비교를 위하여, 현장의 지반조건과 입력 물성 값을 Table 1에 표기하였다. 지반 물성 값은 가능한 현장의 지반조사보고서

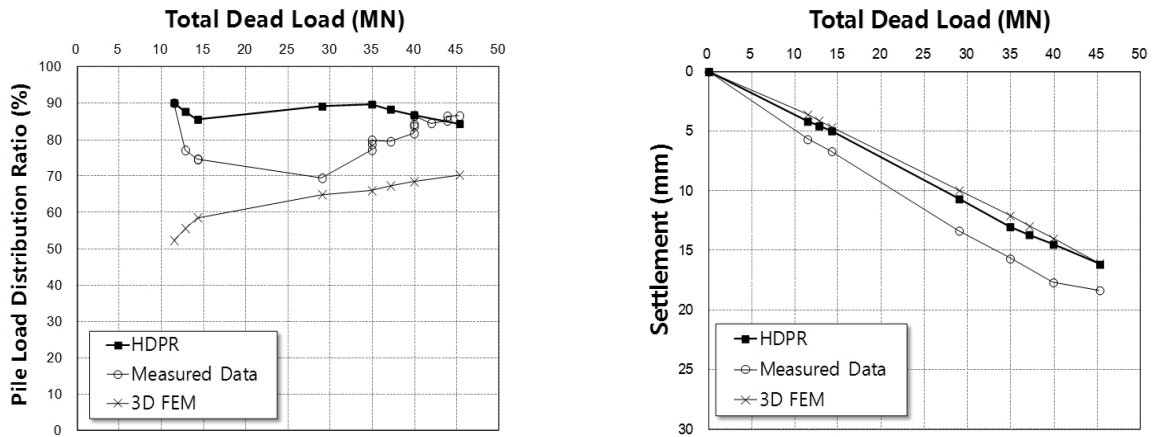
및 설계에 적용된 값을 따랐다. 교차 검증에 위한 3D FEM 해석에서도 같은 조건의 지반 물성 값을 적용하였다.

각 현장마다 개발 프로그램과 현장 모니터링에 대해 말뚝하중분담률과 기초관 하중-침하 거동을 Fig. 9와 같이 분석하였다. 말뚝하중분담률은 기초에 작용하는 전체 사하중과 대비하여 전체 말뚝에 작용되는 하중 비율을 나타내는 것으로, 만약 말뚝하중 분담률이 작다면 기초관이 분담하는 하중이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 9(a)는 OO대교 주탑기초에서의 시공단계에 따른 말뚝하중 분담률 및 하중-침하곡선이다. OO대교 주탑기초의 모니터링은 초기 계측기 안정화 시간이 오래 걸려, 주탑 기둥 하단부에 대한 하중단계부터 분석이 가능하였다. 이 시점을 기준으로 말뚝하중분담률을 분석한 결과, Fig. 9(a) 왼쪽과 같이 모니터링 결과는 약 80% 내외의 말뚝하중분담률을 나타내다가 보강거더 가설 시점부터는 각종 활하중 및 풍하중 등의 영향으로 말뚝하중분담률이 크게 나타났다. 본 논문에서는 상부하중으로 분석이 가능한 고정하



(a) Pile Load Distribution and Load-Settlement Behavior for Pylon Foundation of OO Bridge



(b) Pile Load Distribution and Load-Settlement Behavior for Pier Foundation of OO Overpass

Fig. 9. Comparison of Results for HDPR, 3D FEM Analysis and Site Monitoring Data

중만 고려하였고, 보강거더 가설부터는 활하중 및 풍하중의 영향을 받기 때문에 말뚝하중분담률을 보강거더 가설 시점 전의 값인 80% 내외의 값으로 판단하였다. 개발 프로그램과 3D FEM 해석의 하중 분담률은 유사하게 산정되었으나, 모니터링에 비해 약간 말뚝 하중분담률이 크게 나타났다. 침하 측정의 경우 Fig. 9(a) 오른쪽과 같이 최종 하중단계에서 개발된 프로그램은 5.5 mm, 3D FEM은 5.7 mm, 계측 결과는 6.2 mm로 서로 유사한 결과를 보였다. 여기서, 침하 계측 결과는 앞서 언급한 바와 같이 초기 설치된 침하 타겟 망실로 타겟 재 설치에 따라 하중 분석 시점 이후에서 침하 측정이 가능하였다.

이를 위해 모니터링에 의한 하중-침하 곡선을 프로그램 결과에 맞춰 이동시켰다. 모니터링에 의한 침하 값이 측정방법의 분해능으로 인해 매끄럽지는 못하지만 전체적인 경향이 개발 프로그램과 매우 유사하게 나타났으며, 3D FEM 결과와도 매우 유사하게 나타났다.

Fig. 9(b)는 OO 고가 교각기초의 시공단계에 따른 말뚝하중분담률 및 하중-침하곡선이다. Fig. 9(b) 왼쪽과 같이 복선전철 OO고가 교각기초의 모니터링에 의한 말뚝하중분담률은 초기 70~80% 값을 보이다가 85% 내외의 결과로 수렴되는 양상을 나타내었다. 본 개발프로그램의 경우도 최종단계에서 약 85%의 말뚝하중 분담률을 나타냄으로써 비교적 현장의 결과를 잘 예측하였다. 3D FEM 해석 결과에서 다소 차이가 발생한 이유는, 기초 판의 근입 깊이가 비교적 깊었기 때문에 3D FEM 해석에서 기초판 주변부에서 상부 하중을 크게 부담하였으나, 실제 시공에서는 가시설의 존재에 따라 이러한 영향이 적었던 것으로 판단된다. 기초 하중-침하 곡선의 경우, Fig. 9(b) 오른쪽과 같이 최종 하중단계에서 개발된 프로그램은 16.0 mm, 3D FEM은 16.1 mm, 계측 결과는 18.3 mm로 유사한 결과 값을 보이며, 전체적인 거동양상도 HDPR과 3D FEM이 매우 유사하게 거의 탄성적인 거동을 나타내고 있고, 모니터링과도 상당히 합리적인 결과를 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 말뚝-지반-기초관 상호작용을 고려하여 말뚝지지 전면기초의 거동을 예측할 수 있는 해석기법인 HDPR을 개발하였으며, 본 연구결과와 기존의 해석기법을 비교·분석하여 검증하였고, 실제 현장에서 계측한 침하량 및 말뚝에 적용된 하중 데이터를 통해 검증을 수행하였다. 본 연구를 다음과 같이 정리하였다.

말뚝-지반-기초관 상호작용을 고려한 말뚝지지 전면기초 근사해석기법인 HDPR을 개발하였다. 기초관의 경우 일반적으로 어느 정도 두께가 필요하기 때문에 이를 고려할 수 있는 Mindlin 판 이론을 적용하였고, 지반은 실용적인 측면에서 경험식인 Schmertmann and Hartmann (1978)을 이용하여 선형 스프링으로 가정하였다. 말뚝은 탄성 스프링으로 가정하였고, 말뚝과 지반의 비선형 거동 및 interface를 고려하여 모델링 하였다. 그리고 말뚝-지반-기초관의 상호작용을 고려하여 3차원 유한요소해석과 비슷하게 거동할 수 있도록 개발하였다.

본 연구결과와 기존의 해석기법을 비교·분석하여 검증한 결과 선형탄성해석법인 Randolph (1983) 방법과 비교하여 침하량이 컸으며, 그 외 간편해석법 및 유한요소해석법 결과와 비슷하기 때문에 합리적인 것으로 판단되었다. 또한 실제 현장의 계측데이터 및 3차원 유한요소 해석 결과와 비교한 결과 모두 유사한 거동을 보인 것으로 나타나므로 본 연구의 해석기법은 말뚝지지 전면기초 해석 시 합리적인 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

기존에는 일반적으로 말뚝이 모든 상부하중을 받는 것으로 설계가 진행되고 있으나, 본 연구결과 실제로는 기초판도 일부 하중을 지지할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 아직 말뚝기초 판의 하중분담률에 대한 명확한 근거자료가 없기 때문에, 말뚝지지 전면기초의 실용화를 위해서는 기존에 개발된 말뚝지지 전면기초의 근사해법의 개선이 필요하고, 말뚝하중분담률에 대한 연구 및 계측 데이터가 필요할 것으로 판단된다.

References

Cho, J. Y. and Jeong, S. S. (2012). "Development of three-dimensional approximate analysis method for piled raft foundations." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 67-78 (in Korean).

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.

Kondner, R. L. (1963). "Hyperbolic stress-strain response: Cohesive Soil." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 89, No. 1, pp. 115-144.

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, S. H., Park, Y. H. and Song, M. J. (2007). "A practical analysis method for the design of piled raft foundations." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 12, pp. 83-94 (in Korean).

Mindlin, R. D. (1936). "Force at a point in the interior of semi-infinite solid." *Physics*, Vol. 7, No. 5, pp. 195-202.

Ottaviani, M. (1975). "Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups." *Geotechnique*, Vol. 25, pp. 159-174.

Park, H. I. (2008). "Development of analytical method of piled-raft foundation considering nonlinear behavior of pile." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 10, pp. 17-24 (in Korean).

PLAXIS (2012). *PLAXIS 3D Reference manual*, PLAXIS.

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.

Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J. and Chen, L. (1997). "Comparison of some methods for analysis of piled rafts." *Proceedings of The International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering-International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 1119-1124.

Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*, New York, John Wiley and Sons.

Randolph, M. F. (1983). *Design of piled foundations*, Research Report Soils TR143. Cambridge: Cambridge University Engineering Department.

Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1978). "An analysis of the deformation of vertically loaded piles." *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. 12, pp. 1465-1488.

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.

Schmertmann, J. H. and Hartman, J. P. (1978). "Improved strain influence factor diagrams." *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. 8, pp. 1131-1135.

Ta, L. D. and Small, J. C. (1996). "Analysis of piled raft systems in layered soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 20, No. 1, pp. 57-72.

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, pp. 475-483.