한국지반공학회논문집 제23권 12호 2007년 12월 pp. 83 ~ 94

# 말뚝지지 전면기초의 설계를 위한 실용적 해석방법에 관한 연구

# A Practical Analysis Method for the Design of Piled Raft Foundations

이 승 훈[1] Lee, Seung-Hoon
박 영 호[2] Park, Young-Ho
송 명 준[3] Song, Myung-Jun

## Abstract

Piled raft foundations have been highlighted as an economical design concept of pile foundations in recent years. However, piled raft foundations have not been widely used in Korea due to the difficulty in estimating the complex interaction effects among rafts, piles and soils. The authors developed an effective numerical program to analyze the behavior of piled raft foundations for practical design purposes and presented it briefly in this paper. The developed numerical program simulates the raft as a flexible plate consisting of finite elements with eight nodes and the raft is supported by a series of elastic springs representing subsoils and piles. This study imported another model to simulate pile groups considering non-linear behavior and interaction effects. The apparent stiffnesses of the soils and piles were estimated by iterative calculations to satisfy the compatibility between those two components and the behavior of piled raft foundations can be predicted using these stiffnesses. For the verification of the program, the analysis results about some example problems were compared with those of rigorous three dimensional finite element analysis and other approximate analysis methods. It was found that the program can analyze non-linear behaviors and interaction effects efficiently in multi-layered soils and has sufficient capabilities for application to practical analysis and design of piled raft foundations.

## 요 지

말뚝지지 전면기초는 말뚝기초를 경제적으로 설계할 수 있는 개념으로 주목을 받고 있으나,전면기초, 말뚝, 지반간의 상호작용이 복잡하여 아직 국내에서 쉽게 실용화가 되고 있지 않은 실정이다. 저자들은 말뚝지지 전면기초의 실용화를 위해 필수적이라고 할 수 있는 효율적인 근사해석 프로그램을 개발하였으며, 본 논문에 그 내용을 간략하게 소개하였다. 개발된 프로그램에 적용된 해석모델은 크게 두 부분으로 구성되는데, 하나는 스프링 위에 놓인 유한요소의 기초판 해석모델이고, 다른 하나는 다층지반에 대하여 말뚝의 비선형성 및 상호작용의 영향을 고려할 수 있는 군말뚝 해석모델이다. 두 모델간의 적합조건을 만족시키기 위한 반복계산과정을 통해 지반과 말뚝의 강성을 구하여 말뚝지지 전면기초의 설계에 필요한 거동 예측결과를 얻을 수 있다. 해석기법의 검증을 위하여 정밀한 3차원 유한요소해석 및 기존에 개발된 근사해석방법들과의 비교분석을 수행하였으며, 이를 통해 개발된 프로그램이 기초요소간의 상호작용을 합리적으로 고려하면서도 비선형 해석이 가능하고 다층지반에 대한 적용성이 좋아 말뚝지지 전면기초의 해석 및 설계를 위한 실용적 목적에 잘 부합하는 성능을 갖는 것을 알 수 있었다.

**Keywords** : Approximate analysis, Interaction, Load share, Non-linear analysis, Piled raft, Stiffness reduction

1 정회원, 현대건설 기술연구소 과장 (Members, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology, lsh2002@hotmail.com, 교신저자)
2 정회원, 현대건설 기술연구소 부장 (Members, Principal Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)
3 정회원, 현대건설 기술연구소 과장 (Members, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서 론

일반적인 기초 설계에서는 먼저 기초판만을 이용한 직접기초로 지지력과 침하를 검토하고, 계산된 지지력과 침하량이 허용치 이내에 들어오지 않을 경우, 보다 깊은 안정된 지지층에 상부 구조물의 하중을 전달하기 위하여 말뚝기초로 다시 검토하게 된다. 이 때, 전통적인 말뚝기초 설계방법은 기초판 하부지반이 어느 정도의 강성을 갖고 있더라도 기초판의 하중분담 능력을 완전히 무시하기 때문에 비경제적인 설계가 된다. 말뚝지지 전면기초는 기초판의 하중분담 능력을 고려하여 전통적인 설계방법보다 말뚝의 길이와 수량을 줄일 수 있는 경제적인 설계개념으로 일부 유럽국가와 호주, 일본 등에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 적용 실적 또한 계속해서 증가하고 있다(El-Mossallamy and Reininger, 2005). 최근 들어 국내에서도 일부 기초적인 연구가 수행되고 있기는 하지만, 적용실적은 거의 없는 실정이다.

말뚝지지 전면기초를 효과적으로 적용하기 위해서는 기초판 하부지반이 어느 정도의 강성을 지녀야 하며, 이럴 경우 대부분 지지력 보다는 침하가 설계의 주요 검토사항이 된다. 따라서, 말뚝지지 전면기초 설계를 실용화하기 위해서는 침하와 부등 침하를 정밀하게 예측할 수 있는 해석기법이 필수적이다. 그동안 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바와 같이 말뚝지지 전면기초 내 기초요소의 거동은 서로간의 상호작용 효과로 인하여 단독으로 사용되었을 경우와 큰 차이를 보이게 되는데, 말뚝지지 전면기초의 거동을 정밀하게 예측하기 위해서는 이러한 상호작용 효과를 합리적으로 고려할 수 있어야 한다.

지금까지 제안된 말뚝지지 전면기초의 해석방법은 크게 단순계산법, 근사해석법, 엄밀해석법으로 분류할 수 있다. 단순계산법은 기초판 하부지반과 말뚝의 합성강성을 이용하는 방법으로 Poulos와 Davis(1980)가 제안한 방법과 Randolph(1983, 1994)가 개발한 방법을 대표적으로 들 수 있으며, 이 외에도 등가 래프트 방법과 등가 피어 방법이 이 범주에 속한다. 근사해석법은 스프링 위에 놓인 띠 모델을 이용한 방법과 스프링 위에 놓인 판 모델을 이용한 방법으로 크게 대별된다. 전자는 기초판의 단면을 띠로 대체하고 말뚝과 지반을 각각 스프링으로 모델링하는 방법으로 Poulos(1991), Brown과 Weisner(1975), Weisner와 Brown(1976)등에 의해 제안되었고, 후자는 기초판을 띠 대신 판으로 모델링하는 방법으로 Poulos(1994), Clancy와 Randolph(1993), Franke 등(1994), Yamashita 등(1993)에 의해 개발되었다. 엄밀해석법은 경계요소법을 이용한 방법과 유한요소법에 의한 방법 및 이 두가지를 조합한 방법으로 구분할 수 있다. 경계요소법을 이용한 방법으로는 Butterfield와 Banerjee (1971), Kuwabara(1989), Poulos(1993)등에 의해 연구되었는데 이 방법은 기초판을 강체로 간주한다는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 개선하기 위하여 기초판을 일련의 판요소로 대체한 것이 경계요소법과 유한요소법을 조합한 방법으로 이에 대해서는 Hain과 Lee (1978), Sinha (1996)등의 연구를 대표적으로 들 수 있다. 지금까지 제안된 방법 중 말뚝지지 전면기초를 가장 정밀하게 모델링할 수 있는 방법은 3차원 유한요소해석을 이용한 방법이다. 이 방법은 Ottaviani(1975)에 의해 시도된 이후에 Zhuang 등(1991), Lee(1993), Ta와 Small(1996), Wang (1995)등에 의해 다루어져 왔다.

단순계산법은 손쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나, 부등 침하량을 예측할 수 없을 뿐 아니라, 전체 침하량 예측에도 많은 한계점을 지니고 있다. 3차원 유한요소해석을 이용한 엄밀해석법은 말뚝지지 전면기초의 거동을 가장 정밀하게 해석할 수 있는 방법이지만, 상당한 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 실무에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서, 말뚝지지 전면기초를 실용화하기 위해서는 어느 정도의 정밀도를 확보하면서도 다양한 조건에 대한 검토를 신속하게 수행할 수 있는 효율적인 근사해석법이 필요하다. 지금까지 근사해석법을 적용한 프로그램들이 다수 개발되었지만, 선형탄성 해석만 가능하거나, 다층지반에 대한 적용성이 떨어지는 등의 문제점을 갖고 있다. 본 연구에서는 기존에 개발되었던 근사해석 프로그램들의 단점을 보완하여 정밀도와 실용성이 개선된 말뚝지지 전면기초 해석 프로그램을 개발하였다.

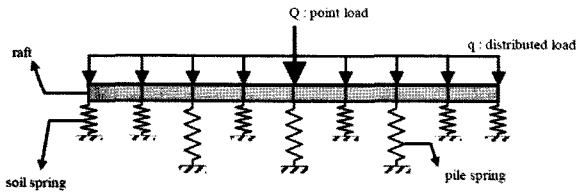
## 2. 실용적 근사해석 프로그램의 개발

### 2.1 모델링 개요

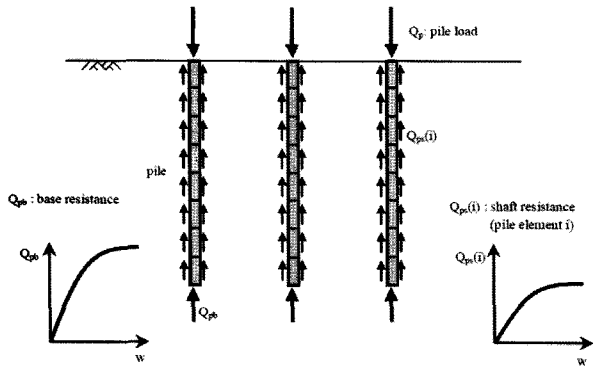
말뚝지지 전면기초의 근사해석을 위하여 그림 1(a)와 같은 모델을 사용하였다. 기초판은 8개의 절점을 갖는 다수의 직사각형 판요소들로 구성되며, 지반과 말뚝은 스프링으로 대체된다. 기존에 개발되었던 많은 근사해석 프로그램들이 지반 스프링과 말뚝 스프링의 강성을

모두 고정된 상수로 가정하였으나, 실제로 이들 강성은 상호작용의 영향에 의해 변하게 된다. 또한, 말뚝의 극한 반력을 최대한 이용하려는 최근의 설계개념에 의하면 말뚝의 비선형성을 고려하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 말뚝의 비선형성을 고려함과 동시에 기초요소간의 상호작용을 보다 합리적으로 고려할 수 있도록 그림 1(b)와 같이 여러 개의 분절된 요소로 이루어진 말뚝을 이용한 군말뚝 거동해석 모델을 도입하였다. 이럴 경우 지반 스프링과 말뚝 스프링의 강성이 고정된 상수가 아니므로, 임의의 설계하중에 대한 말뚝지지 전면기초의 거동을 직접 계산할 수 없으며, 두 가지 모델의 적합조건을 만족시키기 위하여 다음과 같은 반복계산 과정을 수행하여야 한다.

① 지반 스프링과 말뚝 스프링의 강성 가정
② 그림 1(a)의 해석모델을 이용해 침하량 및 말뚝의 반력 계산
③ 계산된 침하량으로부터 그림 1(b)의 해석모델을 이용해 상호작용의 영향 및 말뚝반력 계산
④ 계산된 상호작용의 영향과 말뚝 반력을 이용하여 지반 스프링과 말뚝 스프링의 강성 계산
⑤ 가정한 강성과 계산된 강성이 같아질 때까지 반복계산




(a) 스프링 위에 놓인 기초판 해석모델




(b) 군말뚝 해석모델

그림 1. 말뚝지지 전면기초 해석모델의 개요

## 2.2 기초판-지반간 상호작용의 해석

기초판과 지반간의 상호작용을 해석하기 위하여 지반 스프링을 도입하였다. 이 지반 스프링의 강성은 기초판의 침하와 지반반력간의 관계를 규정하는 것으로, 본 연구에서는 이 관계를 선형으로 가정하였다. 지반 스프링의 강성은 식 1과 같이 정의되는 지반반력계수로 부터 구할 수 있으며, 지반반력계수의 산정방법은 선행 연구결과를 참조하였다. 본 연구에서는 Vesic(1961)이 제안한 방법과 더불어 다층지반에 대한 적용성을 높이기 위하여 Schmertmann과 Hartmann(1978)에 의해 제안된 변형율 영향계수를 이용한 방법을 적용하였다.

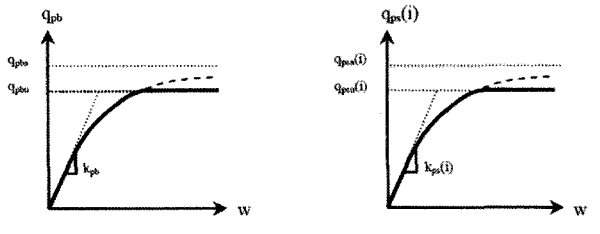
$$k_s = \frac{q_s}{w_s} \tag{1}$$

## 2.3 말뚝-지반간 상호작용의 해석

말뚝과 지반간의 상호작용을 모사하기 위하여 말뚝을 다수의 분절된 요소로 구분하고, 각 요소의 단위 주면 마찰력과 침하의 관계 및 단위 선단 하중과 침하의 관계를 모델링하였다. 이 때, 해석의 편이를 위하여 말뚝은 강체와 같은 거동을 하는 것으로 가정하였다. 즉, 말뚝 자체의 압축량이 없어 말뚝의 머리에서부터 선단까지의 침하량이 모두 동일한 것으로 가정하였다. 본 연구에서 적용한 각 말뚝 요소에서의 단위 하중과 침하의 관계는, 그림 2에 나타낸 바와 같이 Kondner(1963)가 제안한 말뚝의 하중-침하 곡선과 유사한 형태로 식 2와 식 3으로 정의할 수 있다.

$$q_{pb} = \frac{w_p}{\frac{1}{k_{pb}} + \frac{w_p}{q_{pba}}} \tag{2}$$

$$q_{ps}(i) = \frac{w_p}{\frac{1}{k_{ps}(i)} + \frac{w_p}{q_{psa}(i)}} \tag{3}$$




(a) 선단 (b) 주면

그림 2. 단위 하중과 침하의 관계 곡선

여기서,

$w_p$ = 말뚝의 침하량

$q_{pb}$ = 단위 선단 하중

$k_{pb}$ = 말뚝선단의 초기강성

$q_{pba}$ = $q_{pbu}$ /$R_f$ = $q_{pb}$의 점근선

$q_{pbu}$ = 극한 단위 선단 지지력

$R_f$ = 감소계수

$q_{ps}(i)$ = 요소 i에서의 단위 주면 마찰력

$k_{ps}(i)$ = 요소 i에서 주면의 초기강성

$q_{psa}(i)$ = $q_{psu}(i)/R_f$ = $q_{ps}(i)$의 점근선

$q_{psu}(i)$ = 요소 i에서의 극한 단위 주면 지지력

초기강성은 Randolph와 Wroth(1978)가 제시한 방법에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$k_{ps}(i) = \frac{G_s(i)}{r_p \ln(r_m / r_p)} \tag{5}$$

여기서,

$G_b$ = 선단의 전단탄성계수

$G_s(i)$ = 요소 i에서의 주면 전단탄성계수

$r_p$ = 말뚝의 반지름

$\nu_b$ = 말뚝 선단 주변지반의 포아송비

$r_m$ = 영향반경 = $2.5L_p(1-\nu_s)\rho$

$L_p$ = 말뚝의 길이

$\nu_s$ = 말뚝 주면 지반의 포아송비

$\rho$ = $G_{s(Lp/2)}/G_b$

현장재하시험 결과가 있을 경우에는 극한 단위 지지력과 $R_f$의 값을 역산하여 적용할 수 있다. 그렇지 않을 경우 극한 단위 지지력은 정역학적 지지력 공식을 이용하여 추정할 수 있으나, $R_f$의 값은 기술자의 판단에 의존해야 한다. $R_f$의 값은 1.0을 넘을 수 없으며, 큰 값을 적용할수록 안전측 해석을 유도한다. 만약 $R_f$의 값이 0에 가까운 값이 되면, 하중-침하 곡선은 선형탄성-완전소성의 탄소성 하중-침하 곡선과 유사한 형태가 된다.

### 2.4 말뚝-지반-말뚝간 상호작용의 해석

지반이 완전 탄성체이고 말뚝과 지반 사이의 접촉면에서 미끄러짐이 없다고 가정할 경우, 말뚝 두부에 가해진 하중에 대한 말뚝 주변 지반의 침하는 방사방향으로 그림 3과 같은 분포를 갖게 된다. Randolph와 Wroth(1978)는 말뚝 중심으로부터 반경 r에서의 침하량 $w_s(r)$을 다음과 같은 식으로 제안하였다.

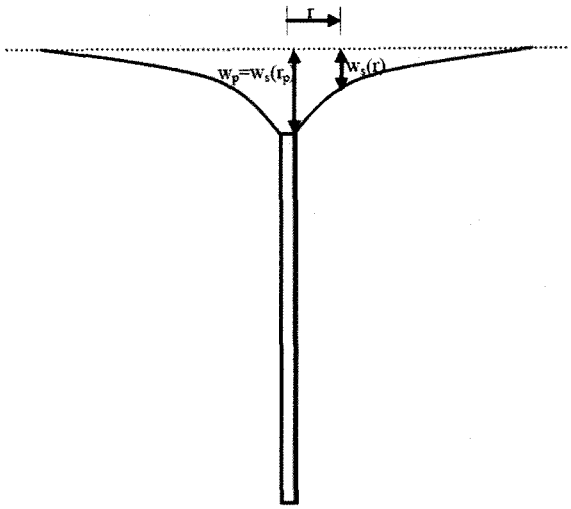



그림 3. 말뚝 주변지반의 변위장

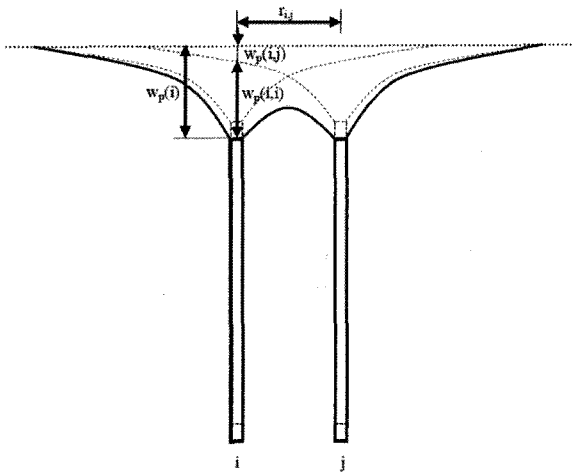



그림 4. 말뚝이 2개일 경우 변위장의 중첩

$$w_s(r) = \frac{\tau_s r_p}{G_s} \ln\left(\frac{r_m}{r}\right), \quad r_p < r < r_m \tag{6}$$

$$w_s(r) = 0, \quad r > r_m \tag{7}$$

여기서, $\tau_s$는 말뚝 주면에서의 전단응력, $r_p$는 말뚝의 반경, 그리고 $r_m$은 말뚝 영향의 제한 반경이다.

2개의 말뚝이 서로 인접해 있을 경우에는, 그림 4와 같이 각각의 변위장이 서로 중첩된다. 즉, 말뚝 i의 침하량 $w_p(i)$는 자체의 침하량 $w_p(i,i)$와 말뚝 j의 변위장 영향에 의한 침하량 $w_p(i,j)$의 합이 되며, 이로 인해 마치 말뚝의 강성이 감소되는 것과 같은 작용을 하게 된다(식 8, 식 9, 식 10). 본 연구에서는 이와 같은 현상을 말뚝-지반-

말뚝간 상호작용에 의한 겉보기 강성 저하로 정의하였다.

$$w_p(i,i) = w_s(r_p(i)) = \frac{\tau_s(i) r_p(i)}{G_s} \ln\left(\frac{r_m(i)}{r_p(i)}\right) \tag{8}$$

$$w_p(i,j) = w_s(r_{i,j}) = \frac{\tau_s(j) r_p(j)}{G_s} \ln\left(\frac{r_m(j)}{r_{i,j}}\right) \tag{9}$$

$$w_p(i) = w_p(i,i) + w_p(i,j) \tag{10}$$

여기서, $r_{i,j}$는 말뚝 i와 말뚝 j 사이의 거리이다.

식 11과 같이 Γ(i)변수를 도입하고, n개의 말뚝에 대한 침하량을 일반화하면 식 12와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma(i) = \frac{\tau_s(i)}{G_s} \tag{11}$$

$$\begin{Bmatrix} w_p(1) \\ w_p(2) \\ \vdots \\ w_p(n) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p(1)\ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{1,1}}\right) & r_p(2)\ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{1,2}}\right) & \cdots & r_p(n)\ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{1,n}}\right) \\ r_p(1)\ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{2,1}}\right) & r_p(2)\ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{2,2}}\right) & \cdots & r_p(n)\ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{2,n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_p(1)\ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{n,1}}\right) & r_p(2)\ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{n,2}}\right) & \cdots & r_p(n)\ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{n,n}}\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Gamma(1) \\ \Gamma(2) \\ \vdots \\ \Gamma(n) \end{Bmatrix} \tag{12}$$

식 12를 간단히 표현하면 식 13과 같다.

$$\{w_p\} = [R]\{\Gamma\} \tag{13}$$

2.1절에서 전술한 바와 같이 말뚝의 총침하량 $\{w_p\}$는 반복계산 과정 내에서 가정된 강성에 의해 계산되므로 알고 있는 값이라고 할 수 있다. 따라서, [R]의 역행렬을 이용해 다음과 같이 {Γ}를 구할 수 있다.

$$\{\Gamma\} = [R]^{-1}\{w_p\} \tag{14}$$

{Γ}가 구해지면 식 15를 이용하여 인접 말뚝들의 영향을 제외한 말뚝 자체의 영향만에 의한 침하량 $w_p(i,i)$를 구할 수 있다.

$$w_p(i,i) = \Gamma(i) r_p(i) \ln\left(\frac{r_m(i)}{r_p(i)}\right) \tag{15}$$

$w_p(i)$가 아닌 $w_p(i,i)$를 이용하여 식 2나 식 3으로부터 말뚝의 반력을 구하면, 자연스럽게 말뚝-지반-말뚝간 상호작용에 의한 겉보기 강성저하를 고려할 수 있게 된다.

지금까지는 말뚝과 지반 사이의 미끄러짐이 없을 경우에 대하여 말뚝-지반-말뚝간의 상호작용을 고려하는 해석방법에 대하여 기술하였다. 그러나, 실제로는 말뚝

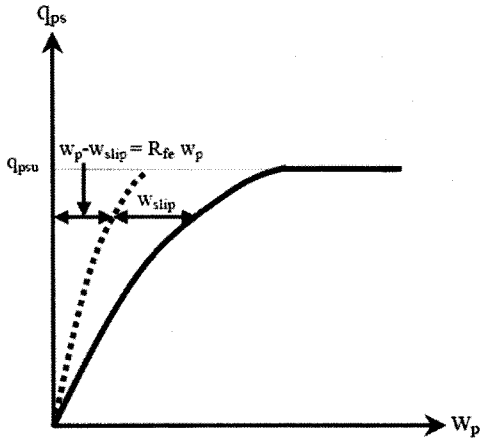



그림 5. 말뚝 침하량 구성의 가정

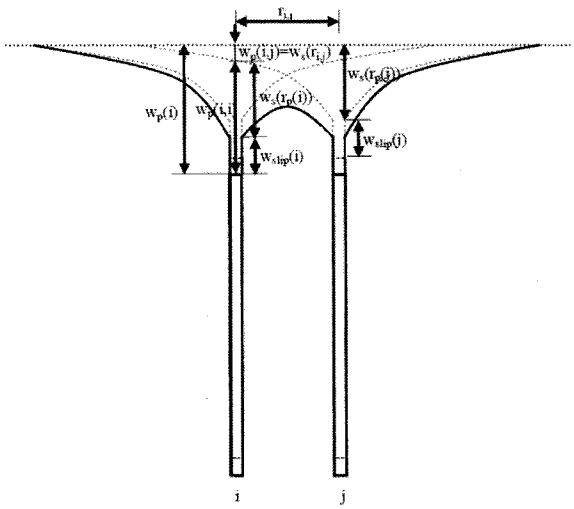



그림 6. 미끄러짐이 발생할 경우 변위장의 중첩

과 지반 사이의 접촉면에서 미끄러짐이 발생하게 되고, 이로 인해 말뚝의 침하량과 바로 인접한 주변지반의 침하량은 서로 같지 않으며, 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$w_p = w_s(r_p) + w_{slip} \tag{16}$$

여기서, $w_s(r_p)$는 말뚝과 바로 인접한 위치 $r_p$에서의 지반 침하량이고, $w_{slip}$은 미끄러짐의 양이다. 본 연구에서는 Plaxis 3D를 이용한 3차원 유한요소해석 결과를 토대로 그림 5와 같이 말뚝 침하량의 구성을 단순한 형태로 가정하였으며, 식 17과 같이 미끄러짐의 양을 정의할 수 있는 계수 $R_{fe}$를 도입하였다(현대건설 기술연구소, 2008 발행예정).

$$R_{fe} = \frac{w_p - w_{slip}}{w_p} = \frac{w_s(r_p)}{w_p} \tag{17}$$

미끄러짐이 발생하는 말뚝의 해석시 도입한 또 한가지

중요한 가정은 주변지반의 변위장에 영향을 주는 말뚝의 침하는 말뚝의 총침하량이 아니고 여기서 미끄러짐의 양을 제외한 인접지반의 침하량 $w_s(r_p)$라는 것이다 (그림 6). 따라서, 미끄러짐이 발생할 경우 식 10은 식 18로, 식 12는 식 19로 각각 대체할 수 있으며, 말뚝의 반력을 구하는 방법은 앞에서와 동일하다.

$$w_p(i) = w_p(i,i) + w_p(i,j) = \frac{w_s(r_p(i))}{R_{fe}} + w_s(r_{i,j}) \tag{18}$$

$$\begin{Bmatrix} w_p(1) \\ w_p(2) \\ \vdots \\ w_p(n) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_p(1)}{R_{fe}} \ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{1,1}}\right) & r_p(2)\ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{1,2}}\right) & \cdots & r_p(n)\ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{1,n}}\right) \\ r_p(1)\ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{2,1}}\right) & \frac{r_p(2)}{R_{fe}} \ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{2,2}}\right) & \cdots & r_p(n)\ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{2,n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_p(1)\ln\left(\frac{r_m(1)}{r_{n,1}}\right) & r_p(2)\ln\left(\frac{r_m(2)}{r_{n,2}}\right) & \cdots & \frac{r_p(n)}{R_{fe}} \ln\left(\frac{r_m(n)}{r_{n,n}}\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Gamma(1) \\ \Gamma(2) \\ \vdots \\ \Gamma(n) \end{Bmatrix} \tag{19}$$

$R_{fe}$의 값은 반드시 1.0보다 작아야 하며, $R_{fe}$의 값이 클수록 안전측 해석으로 유도되고, 반대로 작을수록 불안전측 해석으로 유도된다. $R_{fe}$의 값에 대해서는 아직까지 명확한 산정방법을 제시할 수 없으나, 관련 문헌이나 유한요소해석을 통해 간접적으로 구할 수 있을 것으로 생각된다. 말뚝-지반-말뚝간의 상호작용을 합리적으로 해석하기 위해서는 추후 이 값을 정의하는 방법에 대한 연구나 미끄러짐의 양을 정의하는 보다 개선된 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 2.5 기초판-지반-말뚝간 상호작용의 해석

### 2.5.1 기초판에 의한 말뚝의 겉보기 강성 저하

말뚝의 반력은 말뚝과 주변지반의 상대변위에 의해 발현된다고 할 수 있으며, 상부 기초판이 없고 다른 외적 요인에 의해 주변지반이 침하하거나 융기하지 않는다면 말뚝의 침하량이 곧 말뚝과 주변지반의 상대변위가 된다. 기초판이 있을 경우에는 기초판의 침하와 함께 주변지반도 침하하기 때문에 말뚝과 주변지반의 상대변위는 기초판이 없는 경우보다 작아지게 된다. 이로 인해 말뚝의 반력이 상대적으로 감소되어 마치 말뚝의 강성이 감소되는 것과 같은 효과를 발휘하게 된다. 이와 같은 현상을 본 연구에서는 기초판에 의한 말뚝의 겉보기 강성저하로 정의하였다.

말뚝의 침하량이 $w_p$이고, 임의의 지층 i(또는 말뚝 요소 i)에서의 주변지반 침하량이 $w_s(i)$라면 지층 i에서의 말뚝과 주변지반의 상대변위 $w_{net}(i)$는 식 20과 같이 정의할 수 있으며, 말뚝 요소 i에서의 반력 계산시 적용하는 침하량으로 $w_p$대신 $w_{net}(i)$를 이용하면 자연스럽게 기초판에 의한 말뚝의 겉보기 강성저하를 고려할 수 있게 된다.

$$w_{net}(i) = w_p - w_s(i) \tag{20}$$

각 지층의 지반 침하량 $w_s(i)$는 단순화한 변형율 영향계수를 이용한 방법(현대건설 기술연구소, 2008 발행예정)으로 구할 수 있으며, 다소 오차가 있으나 실용적 목적으로 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 2.5.2 말뚝에 의한 기초판의 겉보기 강성 저하

그림 7에서와 같이 말뚝이 없을 경우에 기초판 임의의 절점 i에서 $w_{s,raft}(i)$만큼 침하가 발생한다고 가정한다면, 말뚝이 있을 경우에는 말뚝의 주면에서 발생하는 전단응력에 의해 절점 i에서 $w_{s,pile}(i)$만큼의 침하가 더 발생하게 된다. 따라서, 말뚝이 없는 기초판에서 지반 스프링의 강성이 식 (21)과 같다면, 말뚝지지 전면기초에서는 지반 스프링의 겉보기 강성이 식 (22)와 같이 저하되며, 식 (22)는 식 (23)로 다시 표현할 수 있다.

$$k_{s,raft}(i) = \frac{Q(i)}{w_{s,raft}(i)} \tag{21}$$

$$k_{s,piled\ raft}(i) = \frac{Q(i)}{w_{s,piled\ raft}(i)} = \frac{Q(i)}{w_{s,raft}(i) + w_{s,pile}(i)} \tag{22}$$

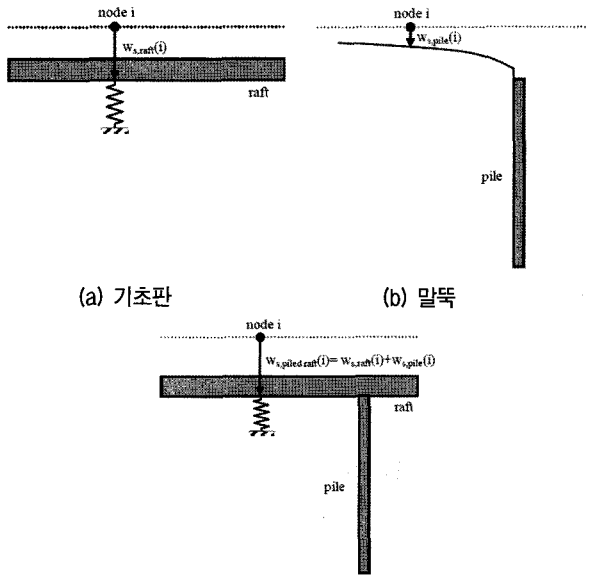



그림 7. 말뚝의 영향에 의한 지반 스프링의 겉보기 강성 저하 개념도

$$k_{s,piled\,raft}(i)=\frac{w_{s,raft}(i)}{w_{s,raft}(i)+w_{s,pile}(i)}k_{s,raft}(i) \quad (23)$$

여기서, $k_{s,raft}(i)$와 $w_{s,raft}(i)$는 알고 있는 값이므로, $w_{s,pile}(i)$를 알면 $k_{s,piled\ raft}(i)$를 구할 수 있으며, 말뚝의 갯수가 n개일 경우 $w_{s,pile}(i)$는 다음 식을 이용해 구할 수 있다.

$$w_{s,pile}(i)=\sum_{j=1}^{n}\left\{\Gamma(j)r_p(j)\ln\left(\frac{r_m(j)}{r_{i,j}}\right)\right\} \quad (24)$$

여기서, $r_{ij}$는 기초판의 절점 i와 말뚝 j 사이의 거리이다.

### 2.5.3 기초판에 의한 말뚝 주변지반의 경화

지표면에 가해지는 하중은 지중의 응력을 증가시키므로, 말뚝지지 전면기초에서는 그림 8에 나타낸 바와 같이 기초판에 가해지는 하중에 의해 말뚝 주면에서의 유효응력이 증가하게 된다. 말뚝 i의 주면 임의의 깊이 z에서의 초기 유효 수직응력을 $\sigma_{vi}'(i,z)$라 하고, 응력증가량을 $\Delta\sigma_v'(i,z)$라 하면, 기초판에 하중이 가해졌을 경우 유효 수직응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_v'(i,z)=\sigma_{vi}'(i,z)+\Delta\sigma_v'(i,z) \quad (25)$$

본 연구에서는 응력증가량 $\Delta\sigma_v'(i,z)$를 근사적으로 구하기 위하여 Newmark (1935)의 방법을 적용하였으며, 이 값을 이용해 극한 단위 주면저항력을 재산정하면 그림 9와 같이 단위 주면 저항력과 침하의 관계를 반복계산 과정마다 수정하여 적용할 수 있게 된다. 이와 같은 방법을 통해 기초판의 침하에 의한 말뚝 주변지반의 경화 현상을 근사적으로 고려할 수 있도록 하였다.

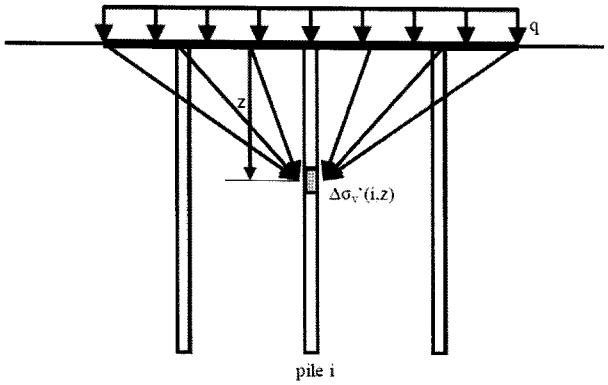



그림 8. 기초판에 가해지는 하중에 의한 말뚝 주면에서의 유효응력 증가

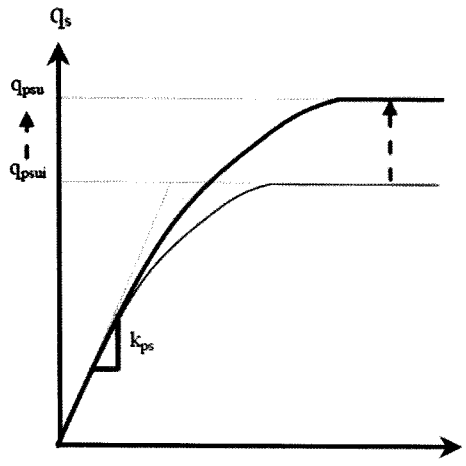



그림 9. 말뚝 주변지반의 경화에 의한 단위하중-침하 관계곡선의 변화

## 3. 해석 프로그램의 검증

### 3.1 3차원 유한요소해석과의 비교분석

개발된 해석 프로그램의 검증을 위하여 지금까지 알려진 방법 중 말뚝지지 전면기초의 해석을 가장 정밀하게 할 수 있는 3차원 유한요소해석과의 비교분석을 수행하였으며, 검증을 위해 적용된 예제와 입력정수들은 그림 10에 나타낸 바와 같다. 3차원 유한요소해석을 위해 사용된 프로그램은 Plaxis 3D Foundation Version 1.5 (Brinkgreve and Broere, 2006)로, 현대건설 기술연구소 (2008 발행예정)는 말뚝재하시험 결과들과의 비교분석 및 예제해석을 통해 이 프로그램을 이용한 말뚝지지 전면기초의 해석방법을 제안한 바 있다. 그림 11은 본 예제 해석을 위해 적용된 3차원 유한요소망의 일례이다. 유한요소해석시 지반요소에는 Hardening-soil 모델이 적

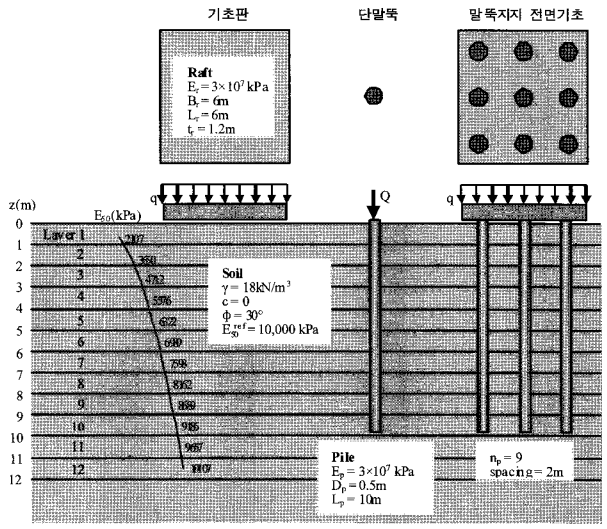
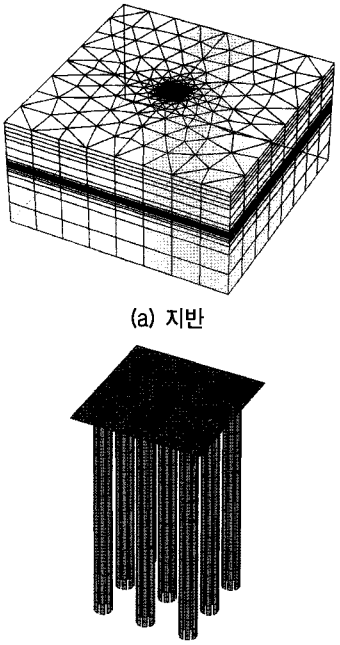



그림 10. 개발된 해석프로그램의 검증을 위해 적용된 예제



(a) 지반

(b) 기초판과 말뚝

그림 11. 말뚝지지 전면기초 예제해석을 위한3차원 유한요소망

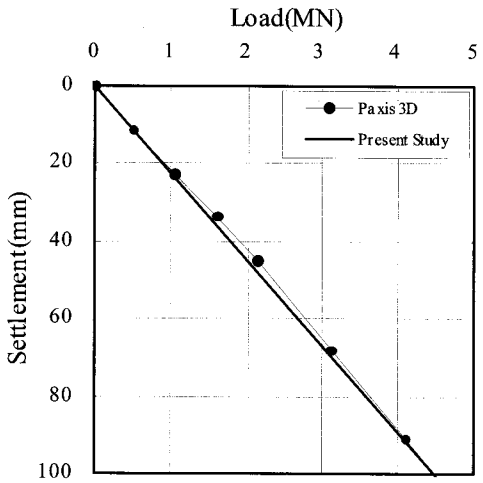
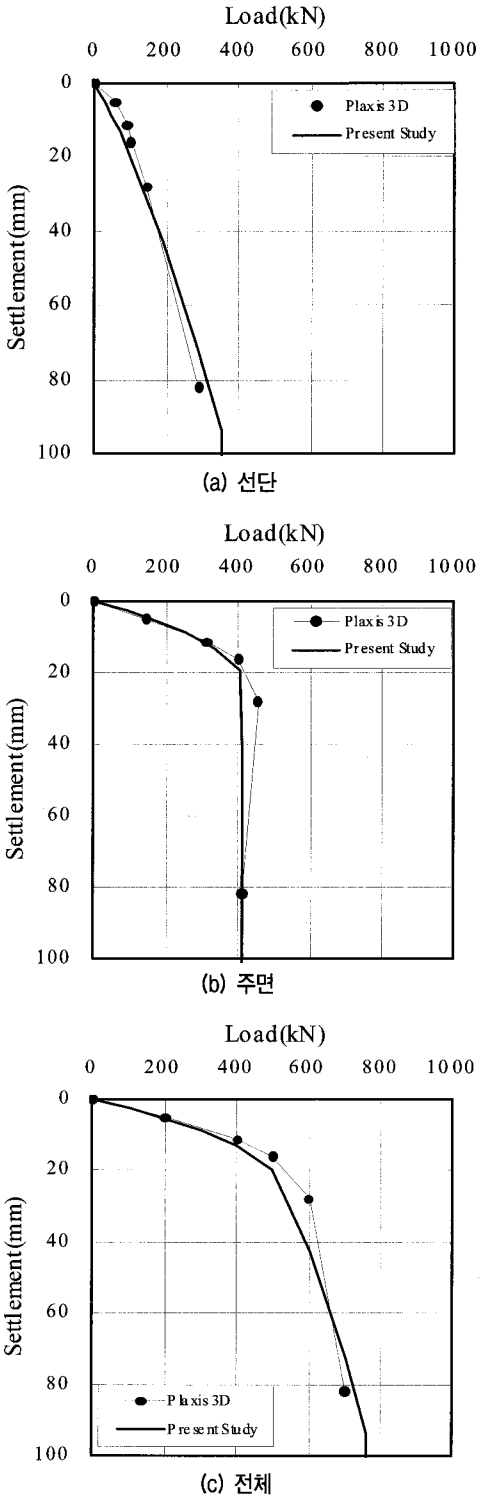



그림 12. 단독으로 사용된 기초판에 대한 해석결과

용되었고, 말뚝과 기초판 요소에는 선형탄성 모델이 적용되었다. Plaxis 3D에서는 말뚝과 지반 사이의 접촉면 거동을 모사하기 위해 가상의 두께를 갖는 접촉면 요소가 사용되는데, 여기에는 Coulomb의 파괴기준을 갖는 탄소성 모델이 적용된다. 접촉면 요소의 내부마찰각과 점착력은 $R_{inter}$라는 감소계수를 이용하여 지반의 강도정수보다 감소된 값을 적용하는데, 본 연구에서는 $R_{inter}$의 값으로 1.0을 사용하였다.

먼저 각 기초요소가 단독으로 사용되었을 경우에 대한 해석 정밀도를 알아보기 위하여 말뚝이 없는 기초판과 기초판이 없는 단말뚝에 대한 해석을 각각 수행하여



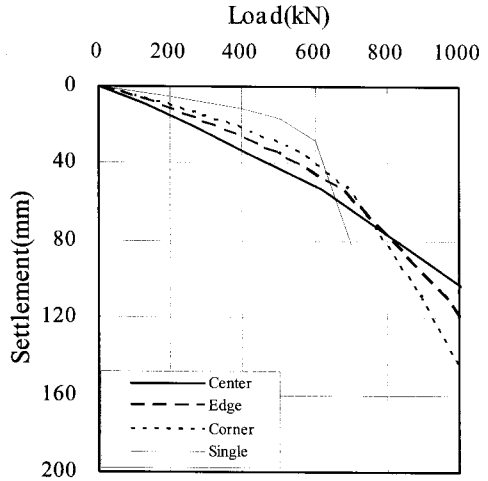

(a) 선단

(b) 주면

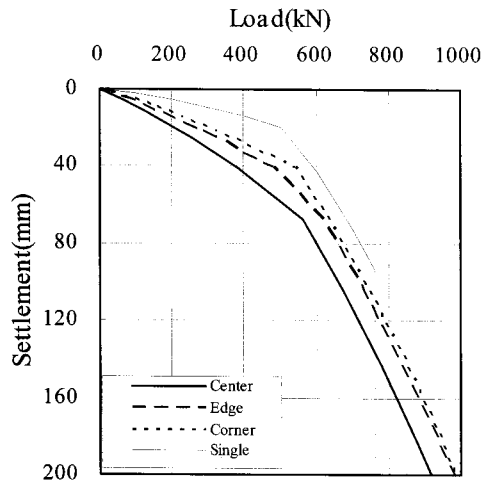
(c) 전체

그림 13. 단말뚝에 대한 해석결과

그림 12와 그림 13에 나타내었다. 지반의 탄성계수가 깊이에 따라 변화하므로 지반반력계수 산정에는 Schmertmann과 Hartmann(1978)의 침하량 산정식을 응용한 방법을 적용하였고, 단말뚝의 해석시 $R_f$의 값으로는 0.3을 적용하였다. 해석결과로부터 본 연구를 통해 개발된 근사해석 프로그램이 정밀한 3차원 유한요소해석과 비교




(a) Plaxis 3D




(b) 본 연구

그림 14. 말뚝지지 전면기초에 대한 해석결과 중 말뚝의 거동

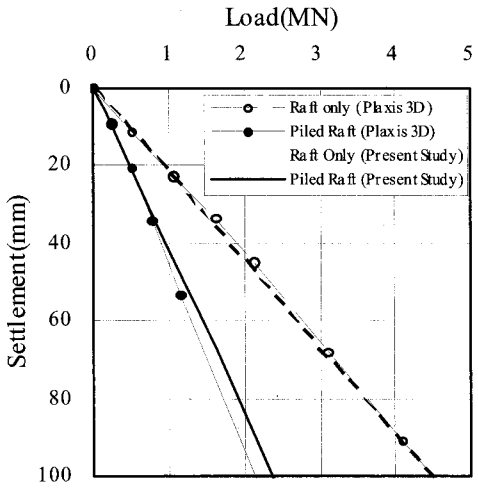



그림 15. 말뚝지지 전면기초에 대한 해석결과 중 기초판의 거동

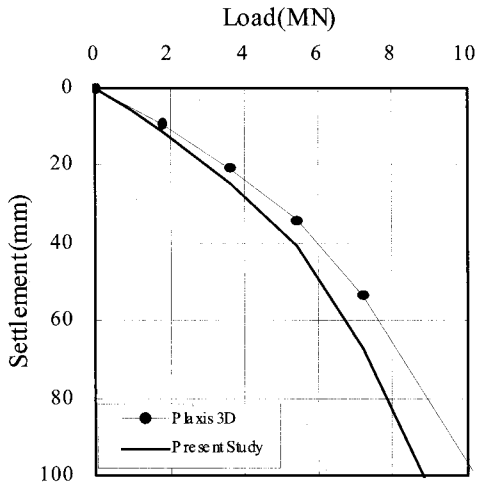



그림 16. 말뚝지지 전면기초 전체의 거동

하여 큰 오차 없이 기초요소의 거동을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

각 기초요소와 지반 사이에서 발생하는 다양한 상호작용을 근사적으로 잘 모사할 수 있는지의 여부는 각 기초요소가 단독으로 사용되었을 경우와 복합적으로 사용되었을 경우를 비교해보면 알 수 있다. 그림 14는 단말뚝의 거동과 말뚝지지 전면기초에서의 말뚝 중 중간과 외곽부 및 모서리에 위치한 말뚝의 거동을 비교한 것이다. 해석시 $R_{fe}$의 값으로는 0.35를 적용하였는데, 이 값은 단말뚝에 대한 3차원 유한요소해석으로부터 얻어진 미끄러짐 양에 대한 분석을 통해 선정하였다.

그림 14(a)에 나타낸 바와 같이 Plaxis 3D 프로그램을 이용한 3차원 유한요소해석은 말뚝-지반-말뚝간 상호작용과 기초판-지반-말뚝간의 상호작용에 의한 말뚝의 겉보기 강성저하를 모사할 수 있을 뿐 아니라, 기초판 및 인접 말뚝과의 상호작용에 의한 말뚝 주변지반의 경화현상을 고려할 수 있다. 본 연구의 방법 또한 이러한 상호작용들을 고려할 수 있으며, 겉보기 강성 저하량에 대한 예측은 3차원 유한요소해석 결과와 유사한 것을 확인할 수 있으나, 경화에 대한 예측은 3차원 유한요소해석보다 과소하게 하는 것을 알 수 있다. 그림 15는 기초판만 단독으로 사용하였을 경우와 말뚝지지 전면기초 내 기초판의 거동에 대한 해석결과를 비교한 것으로, 본 연구에서 개발한 해석 프로그램이 말뚝과의 상호작용에 의한 기초판의 겉보기 강성 저하량을 3차원 유한요소해석과 유사하게 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 16은 말뚝지지 전면기초 전체의 거동에 대한 해석결과이고, 그림 17은 말뚝의 하중분담율의 변화를 나타낸 것이다. 두 해석결과간 오차의 주 원인은 위에서 설명한 것과 같이 기초판에 의한 말뚝 주변지반의 경화현상을 본 연구의 방법이 과소하게 평가하는 데 따르는 것으로,

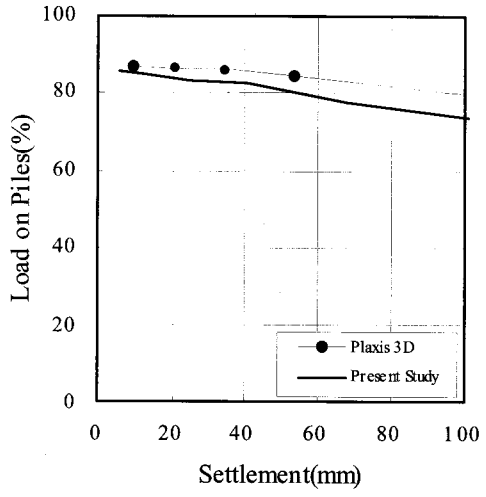



그림 17. 말뚝의 하중분담율 변화

추후 이에 대한 보완이 필요하겠지만 이러한 경향은 안전측 설계로 유도할 수 있기 때문에 실용적 목적으로 사용하는 데 있어서는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3.2 기존에 개발된 해석방법들과의 비교분석

Poulos 등(1997)은 그림 18과 같은 해석예제에 대하여 다양한 방법들의 해석결과를 비교하여 발표한 바 있다. 이 예제에서 기초판 위에 가해진 전체 하중은 12MN이며, 말뚝이 설치된 위치에 가해진 하중 $V_1$, $V_2$는 각각 1MN, 2MN이다. 본 연구에서는 이 때 적용되었던 해석방법들 이외에 몇가지 해석방법 들을 추가하여 본 연구결과와 비교하였으며, 해석방법들을 열거하면 다음과 같다.

① Poulos and Davis(1980)의 단순 비선형 해석방법
② Randolph(1983)의 단순 선형 해석방법
③ GASP 프로그램을 이용한 스프링 위에 놓인 띠기초 해석방법(Poulos, 1991)
④ GARP 프로그램을 이용한 스프링 위에 놓인 판기초 해석방법(Poulos, 1994)
⑤ Ta와 Small(1996)의 유한요소법
⑥ Sinha(1996)의 유한요소법과 경계요소법을 이용한 복합해석방법
⑦ Plaxis 3D를 이용한 정밀 3차원 유한요소법
⑧ Pile+R 프로그램을 이용한 스프링 위에 놓인 판기초 해석방법(현대건설 기술연구소, 1999)
⑨ 본 연구의 방법

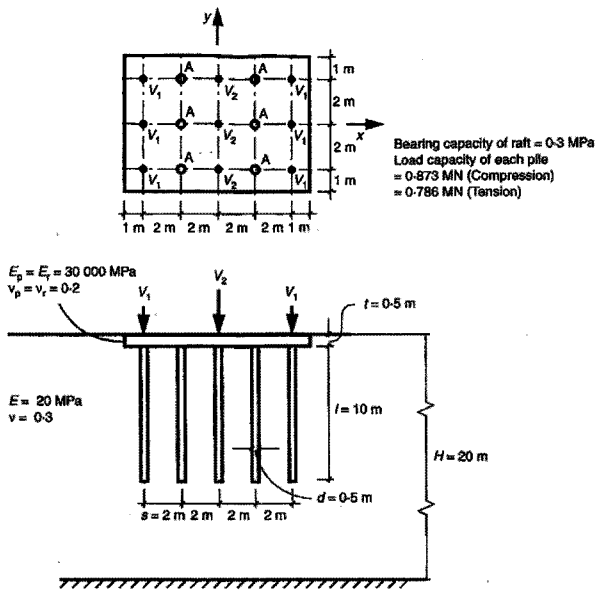
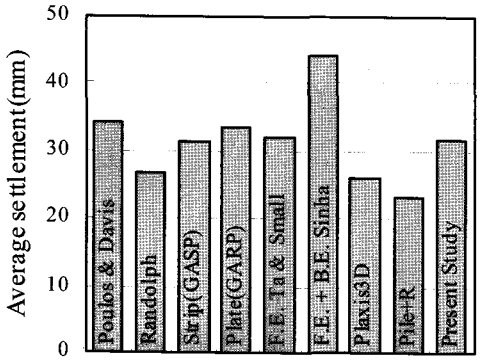


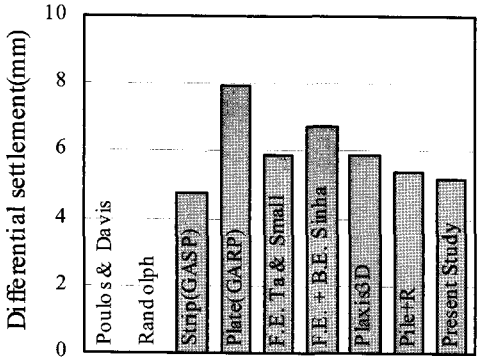

그림 18. 기존 해석방법들과의 비교를 위해 적용된 예제(Poulos 등, 1997)

지반조건이 균질하고 탄성계수가 지반의 응력수준에 관계 없이 일정하다고 가정되었기 때문에 Plaxis 3D를 이용한 3차원 유한요소 해석시의 지반모델은 Hardening-soil 모델 대신 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 그림 19는 위에 열거한 방법들을 이용해 해석한 결과들을 비교하여 도시한 것이다. 다른 연구자들에 의해서 개발된 해석방법과 비교해 볼 때, 본 연구에서 개발된 해석 프로그램에 의한 결과치는 대체적으로 평균 수준의 값임을 알 수 있으며, 간접적인 방법이긴 하지만 이를 통해 본 연구의 신뢰성을 다시 확인할 수 있었다.

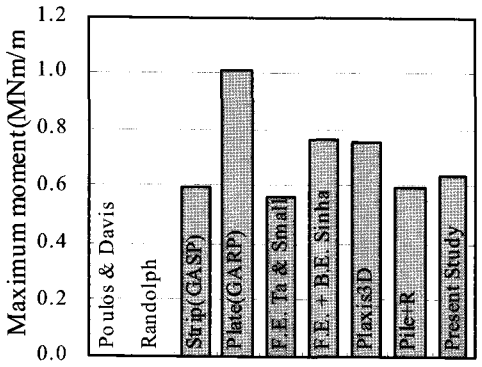
본 프로그램은 다층지반에 적용할 수 있으며 말뚝의 비선형 특성을 고려하면서도, 기초요소간의 상호작용을 합리적으로 해석하여 말뚝의 항복 이후에 대한 거동까지도 비교적 정확히 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 20은 그림 10의 말뚝지지 전면기초 예제에 대하여 Ta와 Small(1996)의 연구결과를 발전시켜 만들어진 상용 프로그램인 FEAR(Finite Element Analysis of Rafts with Piles; Chow and Small 2005) 프로그램과 현대건설 기술연구소에서 기개발되었던 선형탄성 해석프로그램인 Pile+R로 해석한 결과와 본 연구에서 개발한 프로그램으로 해석한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 하중수준이 낮을 경우에는 프로그램별 해석결과의 차이가 적지만, 하중수준이 높아질수록 선형해석과 비선형해석과의 차이가 상당히 커지는 것을 알 수 있다. 최근 말뚝지지 전면기초 설계개념은 말뚝을 침하저감용으



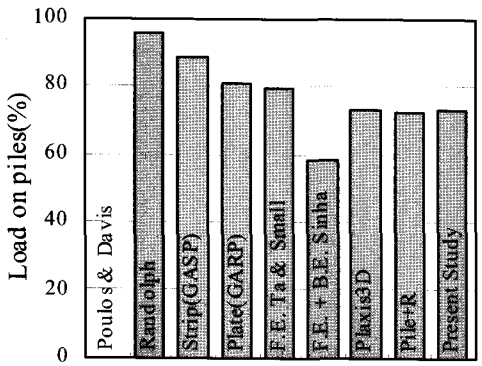

(a) 평균 침하량




(b) 부등 침하량




(c) 기초판의 최대 모멘트




(d) 말뚝의 하중분담율

그림 19. 기존 해석방법들과의 비교결과

로 사용할 경우, 경제적인 설계를 위해 말뚝의 극한지지력을 최대한 사용하려는 경향으로 가고 있으며, 그림

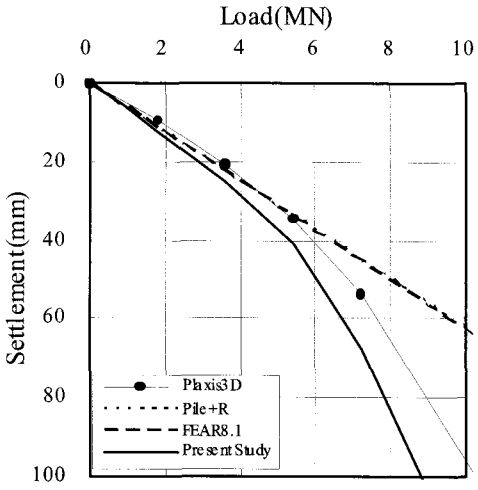



그림 20. 선형탄성해석 프로그램들과의 비교

20은 이럴 경우에 대한 본 연구 결과의 장점을 잘 보여주고 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 말뚝지지 전면기초의 실용화를 위한 근사해석 프로그램을 소개하였으며, 3차원 유한요소해석 및 기존에 개발된 해석방법들과의 비교를 통해 신뢰성 및 적용성을 검증하였다. 개발된 프로그램은 기초요소간의 상호작용을 합리적으로 고려하면서도 비선형 해석이 가능하고 다층지반에 대한 적용성이 좋아 말뚝지지 전면기초의 해석 및 설계를 위한 실용적 목적에 잘 부합하는 성능을 갖는 것을 알 수 있었다. 상호작용의 영향중에서 말뚝 주변지반의 경화를 과소하게 예측하는 단점이 있었으나, 인접한 말뚝이나 기초판에 의한 말뚝의 겉보기 강성저하와 말뚝에 의한 기초판의 겉보기 강성저하는 정밀한 3차원 유한요소 해석과 거의 유사하게 예측할 수 있었다. 기존에 개발된 프로그램들과의 비교분석을 수행한 예제를 통해서는 본 연구 방법을 이용해 해석한 기초판의 침하량과 모멘트 및 하중분담율 등 설계 인자들이 신뢰성 있는 값이라는 것을 간접적으로 알 수 있었고, 비선형 해석의 장점을 확인할 수 있었다.

다만, 해석의 효율성을 위해 도입된 근사적인 방법들은 추후 보다 많은 연구를 통해 개선되어야 할 것이고, 앞으로 실물크기 현장시험이나 실제 현장적용에 의한 경험을 하루 빨리 축적시켜 말뚝지지 전면기초의 실용화를 통해 경제적인 기초설계가 수행될 수 있도록 더욱 노력하여야 할 것으로 생각된다.

# 참 고 문 헌


1. 현대건설 기술연구소 (1999), *무리말뚝 및 상부기초 통합 해석 시스템 개발*, 연구보고서-97GEO03, 현대건설 기술연구소.
2. 현대건설 기술연구소 (2008 발행예정), *말뚝지지 전면기초의 실용화에 관한 연구*, 연구보고서-06GEOS03, 현대건설 기술연구소.
3. Brinkgreve, R.B.J. and Broere, W. (2006), "*Plaxis 3d foundation version 1.5*", Plaxis B.V., Delft, Netherlands.
4. Brown, P.T. and Weisner, T.J. (1975), "The behaviour of uniformly loaded piled strip footings", *Soils and Foundations*, 15, pp. 13-21.
5. Butterfield, R. and Banerjee, P.K. (1971), "The elastic analysis of compressible piles and pile groups", *Geotechnique*, 21(1), pp.43-60.
6. Chow, H. and Small, J.C. (2005), "Finite layer analysis of combined pile-raft foundations with piles of different lengths", *Proc. 11th Int. Conf. IACMAG*, Turin, Italy, 2, pp.429-436.
7. Clancy, P. and Randolph, M.F. (1993), "An approximate analysis procedure for piled raft foundations", *Int. Jnl. Num. Methods in Geomechs.*, 17. pp.849-869.
8. El-Mossallamy, Y. and Reininger, M. (2005), "Innovative application of piled raft foundation to optimize the design of high-rise buildings and bridge foundations", *11th Int. Conf. IACMAG*, Turin, Italy, pp.451-458.
9. Franke, E., Lutz, B. and El-Mossallamy, Y. (1994), "Measurements and numerical modelling of high-rise building foundations on Frankfurt clay", *Vert. and Horizl. Deformns. of Foundns. and Embanks., ASCE Geot. Spec.* Pub., No.20, 2, pp.1325-1336.
10. Hain, S.J. and Lee, I.K. (1978), "The analysis of flexible pile-raft systems", *Geotechnique*, 28(1), pp.65-83.
11. Kondner, R.L. (1963), "Hyperbolic stress-strain response:cohesive soil", *Jnl. Soil Mech. Found. Div.*, 89(SM11), pp.115-143.
12. Kuwabara, F. (1989), "An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil", *Soils and Foundations*, 28(1), pp. 82-92.
13. Lee, I.K. (1993), "Analysis and performance of raft and raft-pile systems", *Keynote Lect., 3rd Int. Conf. Case Hist. in Geot. Eng.*, St. Louis (also Res. Rep. No. 133, Aust. Def. Force Academy, Univ. NSW, Australia).
14. Newmark, N.M. (1935), *Simplified computation of vertical pressure in elastic foundation*, Circular 24, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, IL.
15. Ottavianni, M. (1975), "Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups", *Geotechnique*, 25(2), pp.159-174.
16. Poulos, H.G. (1991), "Analysis of piled raft foundations", *Comp. Methods and Advances in Geomechs.*, Ed. G. Beer, J.R. Booker and J.P. Carter, A.A. Balkema, Rotterdam, 1, pp.193-191.
17. Poulos, H.G. (1993), "Piled rafts in swelling or consolidating soils", Jnl. Geot. Eng., ASCE, 119(2), pp.374-380.
18. Poulos, H.G. (1994), "An approximate numerical analysis of pile-raft interaction", *Int. Jnl. NAM Geomech.*, 18, pp.73-92.
19. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980), *Pile foundation analysis and design*, New York, John Wiley and Sons.
20. Poulos, H.G., Small, J.C., Ta, L.D., Sinha, J. and Chen, L. (1997), "Comparison of some methods for analysis of piled rafts", *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg, Vol.2, pp.1119-1124.
21. Randolph, M.F. (1983), "Design of piled raft foundations", *CUED /D, Soils TR 143*, Cambridge University.
22. Randolph, M.F. (1994), "Design methods for pile groups and piled rafts", *Proc. 12th Int. Conf. Soil Mechs. and Foundn. Eng.*, New Delhi, 5, pp.61-82.
23. Randolph, M.F. and Wroth, C.P. (1978), "Analysis of deformation of vertically loaded piles", *Jnl. Geot. Eng.*, ASCE, 104(12), pp. 1465-1488.
24. Schmertmann, J.H. and Hartman, J.P. (1978), "Improved strain influence factor diagrams", *Jnl. Geot. Eng. Divn.*, ASCE, 104 (GT8), pp.1131-1135.
25. Sinha, J. (1996), *Analysis of piles and piled rafts in swelling and shrinking soils*. PhD Thesis, University of Sydney, Australia.
26. Ta, L.D. and Small, J.C. (1996), "Analysis of piled raft systems in layered soils", *Int. Jnl. Num. Anal. Meths. in Geomechs.*, 20, pp.57-72.
27. Vesic, A.S. (1961), "Bending of beams resting on isotropic solid", *Jnl. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 87(EM2), pp.35-53.
28. Wang, A. (1995), Private communication, *From PhD thesis*, University of Manchester, U.K.
29. Weisner, T.J. and Brown, P.T. (1976), "Behaviour of piled strip footings subjected to concentrated loads", *Aust. Geomechs. Jnl.*, G6, pp.1-5.
30. Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T. and Kuwabara, F. (1993), "Settlement behaviour of a five-storey building on a piled raft foundation", *Proc. 2nd Int. Geot. Sem. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 351-356.
31. Zhuang, G.M., Lee, I.K. and Zhao, X.H. (1991), "Interactive analysis of behaviour of raft-pile foundations", *Proc. Geo-Coast '91*, Yokohama, 2, pp.759-764.


(접수일자 2007. 10. 17, 심사완료일 2007. 11. 28)