

# 연약지반에 시공된 Piled Raft 기초의 3차원 거동 분석

## Three Dimensional Numerical Analysis of Piled Raft on Soft Clay

이진형<sup>1</sup> Lee, Jin-Hyung

정상섬<sup>2</sup> Jeong, Sangseom

### Abstract

Piled raft is known to be an unfavorable foundation type in soft clay because foundation is associated with both excessive settlement and bearing capacity failure problems. Despite these reasons, in recent decades, an increasing number of structures have been constructed over soft clay area, piled raft concepts arouse interest as the foundation of structures on soft clay area becomes popular. This study described 3 dimensional behavior of piled raft on soft clay based on a numerical study using 3D finite element method. A series of numerical analyses were performed for a various pile lengths and the pile configurations on the raft were subjected to vertical uniform or point loading. Based on the results of the parametric study, comparisons were made among the effect of loading type, various pile length and configurations, and the load-settlement behavior and load sharing characteristics of piled raft were also evaluated. From the results, the characteristic of piled raft on soft clay was examined.

### 요 지

Piled raft 기초는 연약지반상에서 과도한 침하와 raft 및 말뚝의 지지력 산정 문제 등으로 적합한 기초는 아닌 것으로 알려져 왔으나 최근 국내외에서 연약지반내 구조물 시공이 증대되면서 연약지반상 piled raft 기초에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 본 연구에서는 연약지반에 시공된 piled raft 기초의 거동을 분석하였으며 이를 위해 ABAQUS를 이용한 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 해석 시 하중은 등분포하중과 집중하중을 각각 적용하였으며 동일한 조건의 균말뚝과 piled raft 기초 및 다양한 말뚝 배치를 갖는 piled raft 기초를 대상으로 수행하였다. 본 연구결과, 하중형태, 다양한 말뚝 배치 및 근입 깊이에 대한 각각의 침하 및 하중 분담 특성을 비교, 분석하였으며 이를 통해 연약지반상의 piled raft 기초의 특성을 파악하였다.

**Keywords** : Configurations, Load sharing, Pile lengths, Piled raft, Settlement, Soft clay

### 1. 서 론

Piled raft 기초는 일반적인 균말뚝 기초(conventional pile group)와 달리 전면기초(raft)와 말뚝이 하중을 분담

하며 raft 만으로는 지지력은 만족하나 상부 구조물의 사용성을 저해할 수 있는 침하(부등침하) 감소를 목적으로 소수의 말뚝을 설치하는 경제적 개념의 기초 형식으로 최근 수십년동안 그에 대한 활용이 유럽지역을 중심으로

1 연세대학교 사회환경시스템 공학부 박사과정 (Graduate student, School of Civil & Environ. Eng., Yonsei Univ., icdij@yonsei.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil & Environ. Eng., Yonsei Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

증대되고 있다(Burland et al, 1977; Randolph, 1994; Katzenbach et al., 2000; Poulos, 2001; Mandolini, 2003).

Piled raft 기초에 대한 연구는 크게 해석적, 실험적 연구로 나눌 수 있다. 해석적 방법으로 첫째는 간편 해석법으로 근사적 하중-침하 곡선 산정법, 등가 raft 및 등가 pier 법, raft의 하중 분담율을 이용한 방법 등이 있다. 두 번째는 근사 해석법으로 지반 및 말뚝을 스프링으로 묘사하고 raft는 strip 혹은 plate로 적용하는 방법이다. 이 방법들은 각 기초요소간의 상호작용을 명확히 나타내지 못한다는 단점이 있다. 이에 따라 세 번째로 좀더 엄밀한 해석이 수행되었으며 이 방법으로는 탄성해석을 근간으로 경계요소법(BEM)을 이용하거나, 경계요소법(BEM)과 유한요소법(FEM)을 조합하는 방법, 2차원 유한요소법(FEM)을 이용한 방법이 수행되었다. 그러나 이 방법 역시 2차원 단면으로 비교적 단순화시켜 해석하므로 각 기초요소간의 상호작용을 명확히 고려하기 어렵다는 단점이 나타나 최근에는 Poulos(2001)에 의해 3차원 유한요소법(FEM)이 기초의 거동을 비교적 명확히 나타낼 수 있는 방법으로 보고되었으며 최근 각광받고 있다(Wang, 1996; de Sanctis & Mandolini, 2003; Reul & Randolph, 2003, 2004). 국내의 경우 김정남 등(1999)은 raft에는 판이론을 적용하고 말뚝 및 지반은 스프링으로 묘사한 해석기법을, 김홍택 등(2000)은 유전자 알고리즘을 이용한 해석기법과 같이 근사적 해석기법이 주로 개발되었다.

사질토 지반에 대하여 국외의 경우 모형 토조를 이용한 다양한 연구가 수행되었으며 국내의 경우도 주로 모형 토조를 이용한 사질토 지반에 대한 연구가 수행되었다(김홍택 등, 2002; 이승현 등, 2003; 권오균 등, 2005). 점성토 지반의 경우 사질토 지반에 비해 연구 사례가 적으나 국외의 경우 모형 토조를 이용한 실험(Cooke, 1986) 및 최근에는 원심모형시험을 통해 점성토 지반에 설치된 piled raft 기초에 대한 연구가 수행되었다(Horikoshi & Randolph, 1996; Conte et al., 2003).

이와 같이 Piled raft에 대한 많은 연구가 수행되었으나 주로 raft 관으로도 지지력이 충분히 확보되는 양호한 지반에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며 반면에 연약지반상에서의 Piled raft 기초는 과도한 침하, raft의 지지력 산정 문제, 하중의 대부분이 말뚝을 통해 전이되는 점 및 압밀 등에 의한 추가적인 지반 침하 등의 문제로 기초 시공에 적합하지 않은 조건(Poulos, 2001)으로 알려져 이로 인해 연구도 매우 미비한 상황이다.

그러나 최근 국내외에서 연약지반내 구조물 시공

이 증대되면서 연약지반상 Piled raft 기초에 대한 해석적인 연구가 제한적이거나 일부 수행되기도 하였으며 (de Sanctis & Mandolini, 2003, Seo & Jeong, 2004), 최근 Poulos(2005)는 연약지반에 시공된 마찰말뚝으로 지지된 Piled raft 기초의 성공사례를 보고하기도 하였다.

이러한 Piled raft 기초는 침하량을 허용 침하 기준 이내로 제한하면서 말뚝의 개수, 길이, 크기(직경), 간격 및 raft의 두께 등을 최적화하고 말뚝과 raft의 지지 능력이 최대한 발휘되도록 설계가 이루어져야 하므로 각각의 말뚝-말뚝, 말뚝-지반, 말뚝-raft 등 기초요소간의 상호작용을 명확히 고려할 수 있어야 하며 연약지반의 경우 특히 지반의 비선형성을 반영할 수 있어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이 그동안 다양한 해석적 방법들이 제안되었으나 복잡한 기초 형상, 하중 형태 및 지반의 비선형성 등을 반영하여 각 기초요소간의 상호작용을 고려할 수 있는 방법으로는 엄밀한 해석적 방법인 3차원 유한요소법이 가장 적합한 방법으로 각광받고 있다.

이에 본 연구에서는 연약지반에 시공된 수직하중을 받는 Piled raft 기초의 거동 분석을 위하여 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 해석 시 말뚝-지반 경계면 효과를 적용하였으며 동일한 조건의 균말뚝과 Piled raft 기초와의 거동을 비교하고 이에 대한 영향을 분석하였다. 또한 상부 구조물의 형태에 따른 하중 형태를 고려하기 위하여 작용하중을 대표적으로 집중하중 및 등분포하중의 형태로 적용하였으며 다양한 말뚝 길이와 말뚝 배치에 대한 해석을 통해 기초의 침하거동과 말뚝의 하중 분담 특성을 분석하고 연약지반상 Piled raft 기초의 거동 특성을 파악하였다.

## 2. 3차원 유한요소 해석

본 논문에서는 3차원 유한요소 해석을 통하여 연약지반에 시공된 등분포 하중이 작용하는 동일한 크기의 raft 내에서 그림 1과 같은 다양한 말뚝 배치 및 근입 깊이에 따른 piled raft 기초의 거동 분석을 수행하였다. 이때 raft가 지반과 접촉되지 않은 형태인 균말뚝(그림 2 참조)과의 비교 검토를 위하여 균말뚝 해석도 실시하였다. 유한요소 해석은 ABAQUS(ver 6.5)을 이용하였다(ABAQUS, 2004).

### 2.1 해석 대상 단면 및 해석 mesh

해석 대상 지반은 그림 2에 나타낸 바와 같이 20m

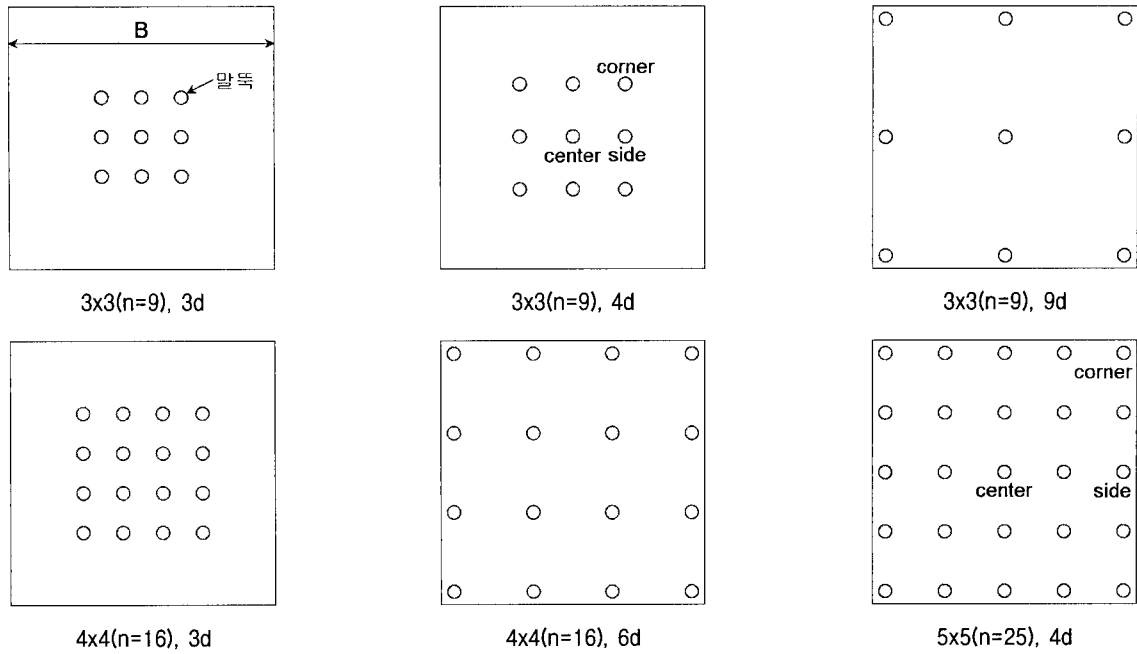
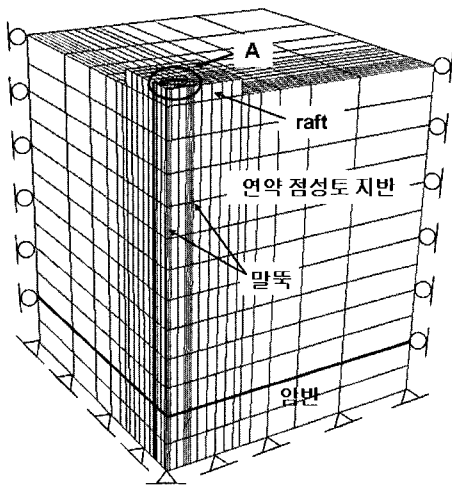
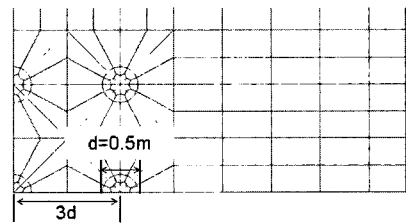


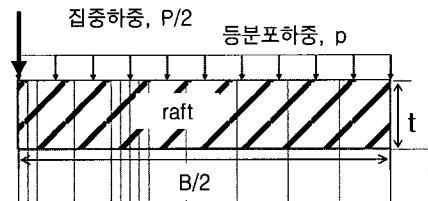
그림 1. 해석 종류별 말뚝 배치도



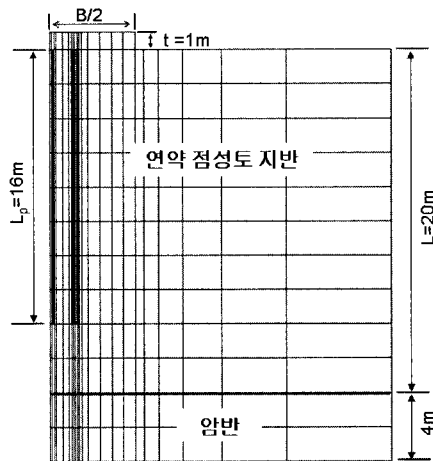
(a) 3D mesh 예(3x3, s=3d)



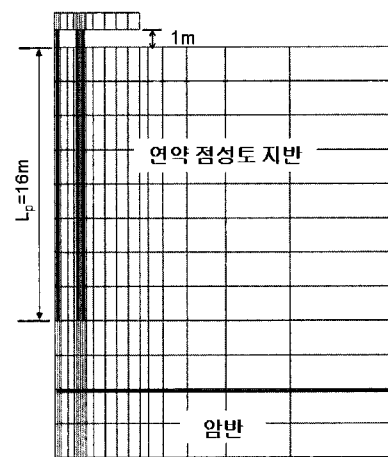
(b) A 단면 말뚝 세부



(c) 작용 하중 형태



(d) 3x3(n=9) s=3d  $L_p=16m$  PR



(e) 3x3(n=9) s=3d  $L_p=16m$  FPG

그림 2. 대표적인 3차원 유한요소 mesh

깊이의 연약 점성토 지반과 그 하부 4m 두께의 선단 암반층으로 구성하였으며 말뚝은 연약지반에 근입되어 있으며 말뚝 길이에 따라 마찰지지말뚝과 선단지지말뚝으로 각각 모델링하였다. 말뚝 직경  $d$ 는 0.5m로 가정하였고, 말뚝의 근입 깊이( $L_p$ )는 주면마찰지지말뚝 형태인 8, 12, 16m와 선단지지말뚝인 20m를 각각 적용하였다. raft의 경우, 크기 및 두께도 piled raft 기초의 거동에 영향을 주는 인자이나 본 연구에서는 다양한 말뚝배치에 따른 영향을 분석하기 위해 raft 기초의 크기 및 두께는 정사각형 형태로 폭(B) 10m, 두께(t) 1m 로 고정하였으며 점토지반 위에 접촉(contact)하도록 위치하였다. 본 연구에서는 (1) Piled raft 기초(PR)와의 거동 비교를 위해 (2) 말뚝으로 지지되지 않은 raft 기초(Unpiled raft, UR)와 (3) Piled raft 기초와 동일한 단면이나 raft가 지반과 접촉하지 않은 형태의 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)에 대하여도 해석을 실시하였으며 각 기초에 작용하는 하중은 raft 상부에 등분포하중과 집중하중의 형태를 각각 단계별로 적용하였다. 표 1은 본 연구에서 수행한 해석 종류이다. 또한 말뚝주면-지반 경계면에서는 Jeong et al.(2004)이 적용한 접촉요소(contact element)인 slip 모델을 사용하여 지반과 말뚝 사이의 항복(slip)을 모델링하였으며 raft와 지반은 접촉은 하고 있으나 매끄러운(smooth) 상태로 모델링하였다. 지하수위는 지표면에 위치하고 있는 것으로 가정하였으며 지반과 말뚝 부근에서는 두 재료 간의 큰 강성 차이로 인해 큰

전단변형이 예상되어 조밀한 mesh를 사용하였고, 말뚝으로부터 거리가 멀어질수록 mesh의 크기를 증가시켰다. 해석 시 본 연구에서 적용한 기초의 단면 및 작용하중이 대칭 형태이므로 raft 기초 원점을 기준으로 1/4 단면에 대해서 모델링하였으며 이때 사용된 대표적인 유한요소 mesh는 그림 2와 같으며 각 요소(element)는 3차원 육면체 27 절점 요소(3D hexahedra 27-node element)를 적용하였다.

## 2.2 지반 물성 및 구성 모델

본 해석 시 raft 및 말뚝은 탄성모델을 적용하였고, 점토지반과 선단지반은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 지반 물성의 경우 piled raft 기초의 장기 거동을 나타내기 위하여 배수상태 물성(drainable material)을 적용하여 해석을 실시하였다. 본 연구의 유한요소 해석에서 적용된 물성치는 표 2에 나타난 바와 같다. 연약 점성토 지반은 Jeong et al.(2004)이 적용한 배수조건 물성을 이용하였으며 선단부는 비교적 단단한 암반층 물성을 적용하였다. 말뚝은 강관말뚝으로 가정하였으며 이때 탄성계수  $E_p$ 는 임의의 두께를 갖는 강관말뚝을 채워진 solid 말뚝으로 모델링하여 강관말뚝의 직경에 대한 환산탄성계수 값인 12.5GPa(Jeong et al., 2004)를, raft는 콘크리트 재질로 국내외에서 해석 시 사용된 25-34GPa의 평균값인 30GPa을 적용하였다.

표 1. Unpiled raft, 군말뚝 및 Piled raft 해석 종류

형식	raft 폭 B (m)	raft 두께 t (m)	말뚝직경 d (m)	말뚝 근입깊이 $L_p$ (m)	말뚝배열 (개수)	말뚝간격 s	작용하중 p (kPa)
unpiled raft (UR)	10	1	-	-	-	-	50, 100, 150
piled raft (PR) 및 군말뚝 (FPG)	10	1	0.5	8 <sup>sf</sup> 12 <sup>sf</sup> 16 <sup>sf,*</sup> 20 <sup>eb</sup>	3x3* (9)	3d*	50 100 150
						4d	
						9d*	
					4x4 (16)	3d	
					5x5* (25)	6d	
						4d	

\*: 군말뚝 (FPG) 해석 수행, sf: 마찰지지말뚝, eb: 선단지지말뚝

표 2. 입력 물성

	모델	탄성계수 E (MPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$K_0$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )
말뚝	elastic	12,500	-	-	0.01	25
raft		30,000	-	-	0.01	25
점성토	Mohr-Coulomb	5	3	20	0.65	18
암반		500	0.1	45	0.5	20

raft-지반 강성도( $K_{rs}$ )는 Horikoshi & Randolph(1997)이 사각형 raft에 대해 제안한 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 일반적으로 강성도가 0.001이면 완전 연성(fully flexible)이고 1000 이면 완전 강성(essentially rigid)이다. 이에 본 연구에서 적용한 raft-지반의 강성도는 31.7로 비교적 강성으로 평가할 수 있었다.

$$K_{rs} = 5.57 \frac{E_r 1 - \nu_s^2}{E_s 1 - \nu_r^2} \left( \frac{B}{L} \right)^{0.5} \left( \frac{t_r}{L} \right)^3 \quad (1)$$

여기서,  $E_r$  및  $E_s$ 는 raft 및 지반의 탄성계수,  $\nu_r$  및  $\nu_s$ 는 raft 및 지반의 포아송비,  $B$  및  $L$ 은 raft의 폭 및 길이,  $t_r$ 은 raft의 두께이다.

말뚝-지반 경계면의 거동은 ABAQUS 내부 모델 중 slip 요소를 이용하여 모사하였다. 경계면은 그림 3(a)와 같이 2D quadratic 18-node 요소로 구성되어 있는데, 각 요소는 두개의 동일한 좌표를 가지는 9개의 node를 가진 면에 의해 구성되었다. 경계면은 0의 두께를 가지고 있으며 상대변위 발생 시 전단응력( $\tau$ )이 발생하게 된다. 경계면에서의 거동은 그림 3(b)와 같으며 최대 마찰력이 발생하기 위한 한계 상대변위( $\gamma_{crit}$ ) 값으로 Lee et al.(2002)이 제안한 상대변위 5mm 를 적용하였다. 또한 경계면에서의 거동은 최대 상대변위 뿐만 아니라 마찰계수(interface friction coefficient),  $\mu$ 의 영향을 받는다, 여기서,  $\mu$ 는 식 (2)로부터 산정할 수 있으며  $\delta$ 는 말뚝과 지반 사이의 마찰각이다. 최대 상대변위가 발생하는 경우,  $\mu \times \sigma'$ 로 정의되는 최대마찰 응력이 발생한다. 여기서,  $\sigma'$ 은 말뚝에 작용하는 유효 수평응력이다. 일반적으로 연약 점성토 지반의 마찰계수( $\mu$ )는 Jeong et al.(2004)에 의해 0.2-0.4 정도의 값을 갖는 것으로 알려졌으며 이에 본 연구에서는 위 값의 평균값인 0.3을 적용하였

다. 말뚝-지반 slip 요소 유무에 따른 영향은 이진형 등 (2006)이 수행한 해석 결과, slip 요소 고려 시 평균 침하의 경우 일반적으로 다소 크게 발생하였고 부등침하의 경우 말뚝 간격이 좁은 경우는 크게, 말뚝 간격이 넓은 경우는 비교적 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한 말뚝의 하중 분담율은 다소 작게 산정되는 것으로 나타났다.

$$\mu = \tan(\delta) = \frac{\beta}{K_0} \quad (2)$$

여기서,  $K_0$ 는 정지토압계수이다.

이외에 지반 압밀의 경우 본 연구에서는 배수물성을 적용한 유효응력해석을 수행하여 적용하지 않았으며 기존 연구결과(Reul, 2002)도 이 경우 영향이 거의 없는 것으로 보고되었다. 또한 말뚝의 근입 효과 등도 해석에 많은 시간이 필요하므로 본 해석에서는 고려하지 않았다.

### 3. Piled raft와 균말뚝(FPG) 모델과 해석 결과비교

본 연구에서는 raft가 지반과 접촉하지 않는 균말뚝(FPG)과 Piled raft(PR)에 대한 비교를 통하여 Piled raft(PR)의 하중-침하 및 하중 분담 특성을 파악하였다. 그림 4는 Unpiled raft(UR), 균말뚝(FPG) 및 Piled raft(PR)의 하중-침하곡선을 나타낸 것으로 Piled raft(PR)와 균말뚝(FPG)은 그림 1에 나타난 단면 중 말뚝 배치 3x3( $n=9$ ), 중심간격( $s$ )은 3d, 9d 및 5x5( $n=25$ ), 중심간격( $s$ )은 4d이며 각각의 경우 말뚝의 근입 깊이( $L_p$ )는 16m 이다. 또한 작용하중은 등분포형태 하중을 적용하였다. 하중은 raft에 작용하는 등분포 하중( $p$ )에 raft의 면적

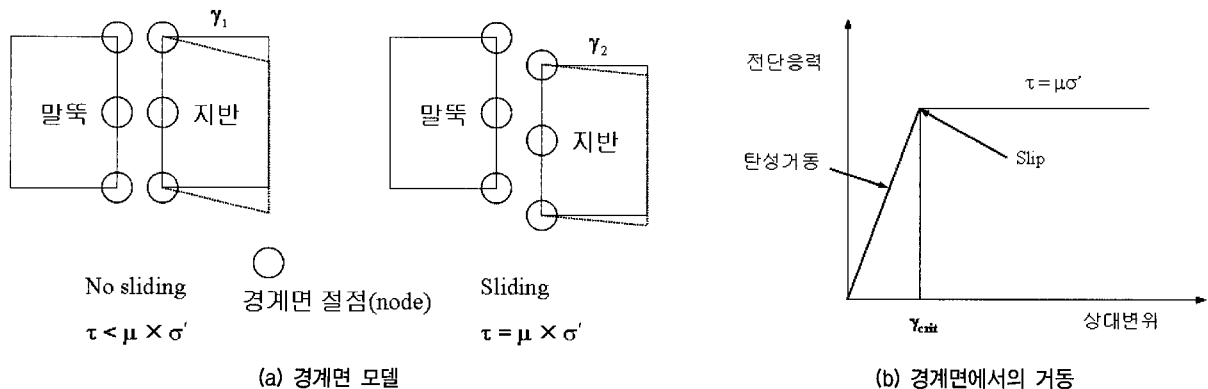


그림 3. 말뚝-지반 경계면 slip 모델

( $A_r$ )을 곱하여 표현하였으며 평균 침하량은 Reul et al. (2004)이 적용한 다음의 식 (3)과 같이 raft 중앙(center), 모서리(corner)부의 침하량에 대한 평균값으로 나타냈다. raft가 지반과 접촉하지 않는 균말뚝(FPG)은 Piled raft 기초와 동일한 단면이며 그림 2(e)와 같이 raft가 지반에서 1m 떨어진 부분에 위치하고 있다.

$$s_{avg} \approx 1/3 \times (2s_{center} + s_{corner}) \quad (3)$$

그림 4에서 알 수 있듯이 Piled raft(PR)는 Unpiled raft(UR)에 비해 동일한 하중에 대하여 침하가 작게 발생하며 동일한 단면의 균말뚝(FPG)에 비해서도 작게 나타났다. 3x3 균말뚝(FPG)의 경우 말뚝 간격 3d 인 경우 침하량 약 40mm 이내에서는 동일한 단면의 Piled raft에 비해 침하는 다소 크나 유사한 거동을 보이다 그 후 급격히 극한 상태로 진행되었으며 말뚝 간격 9d인 경우에는 침하량 약 20mm 이내에서는 Piled raft와 같은 거동을 나타내다 그 후 급격히 침하가 발생하며 극한 상태 거동이 나타났다. 그러나 동일한 단면의 Piled raft는 해석에서 적용한 하중 범위에서는 하중이 증가되어도 균말뚝(FPG)과 같은 급격한 극한 상태가 나타나지 않았으며 이는 raft의 영향으로 판단된다. 또한 3x3 배치에서 말뚝 간격이 3d인 경우 균말뚝(FPG)이나 Piled raft의 초기 침하가 9d에 비해 큰 것은 균말뚝 효과에 의해 말뚝 지지력이 감소하기 때문인 것으로 판단되며 균말뚝(FPG)의 경우 약 40mm 이후 말뚝 간격 3d인 경우의 침하가 말뚝 간격 9d인 경우보다 다소 작아지는데 이는 말뚝 간격이 좁은 경우 발생하는 블록 파괴(Block failure)의 영향으로 총 지지력이 다소 커지기 때문으로 판단된

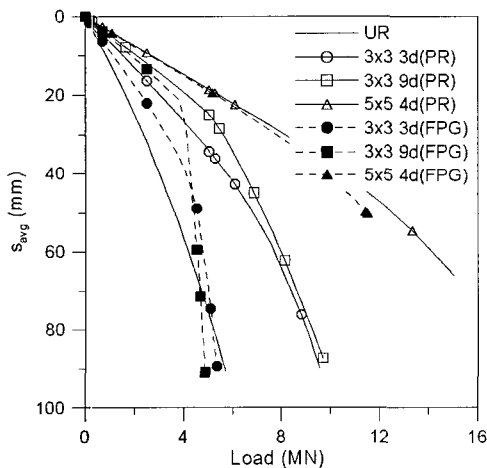
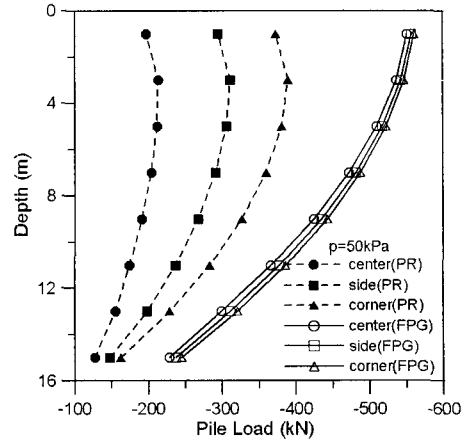
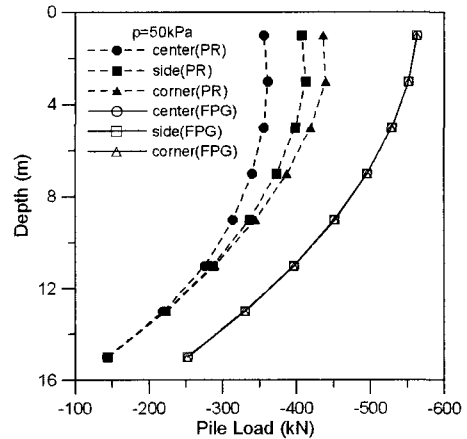


그림 4. Unpiled raft(UR), 균말뚝(FPG), Piled raft(PR), 하중-침하 곡선 비교

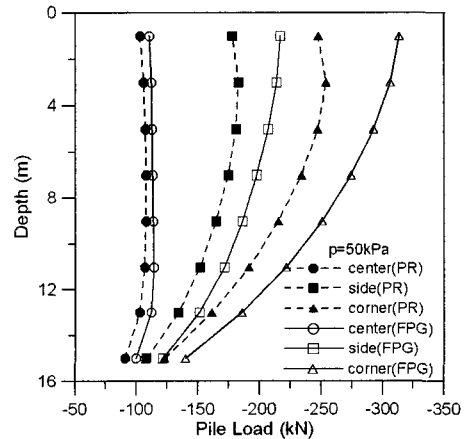
다. 5x5 배치의 경우 균말뚝(FPG)의 침하가 다소 작으나 Piled raft와 매우 유사하게 나타나고 있으며 이는 말뚝 개수 증가에 따른 총 말뚝 지지력 증가로 본 해석에서 적용한 하중 내에서는 5x5 균말뚝(FPG)이나 Piled raft 내 말뚝이 충분한 지지력을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 이에 Piled raft의 초기 하중-침하 거동은 말뚝의



(a) 3x3(n=9), s=3d,  $L_p=16m$



(b) 3x3(n=9), s=9d,  $L_p=16m$



(c) 5x5(n=25), s=4d,  $L_p=16m$

그림 5. 균말뚝(FPG)과 Piled raft(PR) 내 말뚝의 위치별 축하중 분포

하중-침하 거동이 주된 요소가 되는 것으로 판단된다.

그림 5는 작용하중 50kPa일 때 말뚝 길이 16m인 경우 말뚝의 위치별 축하중 분포로 각 말뚝의 위치는 그림 1에 나타낸 바와 같다. 3x3, 3d 및 9d 균말뚝(FPG)은 약 50kPa(5MN)의 하중에서 앞의 그림 4에서 보듯이 거의 극한 상태에 도달하였으며 이로 인해 그림 5(a), (b)와 같이 말뚝의 하중 분포는 위치에 상관없이 거의 같음을 알 수 있다. 이에 비해 극한 상태에 도달하지 않은 Piled raft 및 5x5 균말뚝(FPG)의 경우 말뚝 하중 분포는 중앙(center), 측면(side), 모서리(corner) 말뚝 순으로 하중 크기가 증가하였으며 raft의 하중 분담 효과에 의해 Piled raft 기초 내 말뚝 하중 분포는 균말뚝(FPG) 내 말뚝보다 작게 나타났다. 3x3 Piled raft에서는 말뚝 간격이 9d 인 경우 개개말뚝의 지지 성능이 균말뚝 효과를 받는 말뚝 간격 3d 보다 크게 발현되었다. 또한 말뚝 간격 3d의 경우 그림 5(a)와 같이 지표 근처에서 부마찰력이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 말뚝 개수가 동일한 경우, 말뚝의 평균 선단 지지력은 거의 같은 것을 알 수 있다.

표 3은 Piled raft 와 균말뚝(FPG)의 Piled raft 계수 (Piled raft coefficient)를 산정한 결과이다. Piled raft 계수,  $\alpha_{pr}$ 은 다음의 식 (4)를 통해 산정할 수 있다.

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum R_{pile}}{R_{tot}} \quad (4)$$

여기서,  $\sum R_{pile}$ 은 모든 말뚝의 지지력 합,  $R_{tot}$ 는 기초의 총 지지력(총 작용하중)이다.  $\alpha_{pr}$ 이 “0” 이면 Unpiled raft, “1” 이면 완전한 균말뚝 기초이다.

표 3에서 알 수 있듯이 균말뚝(FPG)은 말뚝이 모든 하중을 분담하며 Piled raft 기초는 말뚝 개수가 같은 경우(3x3, n=9) 말뚝 간격이 넓은 9d가 그림 5에서도 알 수 있듯이 말뚝의 하중 분담이 더 크며 말뚝 개수가 25개인 경우 거의 모든 하중을 분담하는 것으로 평가되었다.

#### 4. 말뚝 배치에 따른 침하량 감소 효과 및 하중 분담을 비교

본 연구에서는 그림 1 및 표 1에서 언급한 바와 같은 다양한 말뚝 배치 및 근입 깊이에 대해 등분포 하중(uniform loading) 및 집중 하중(point loading)이 작용하는 Piled raft의 하중-침하 거동 및 하중 분담 특성을 비교, 분석하였다.

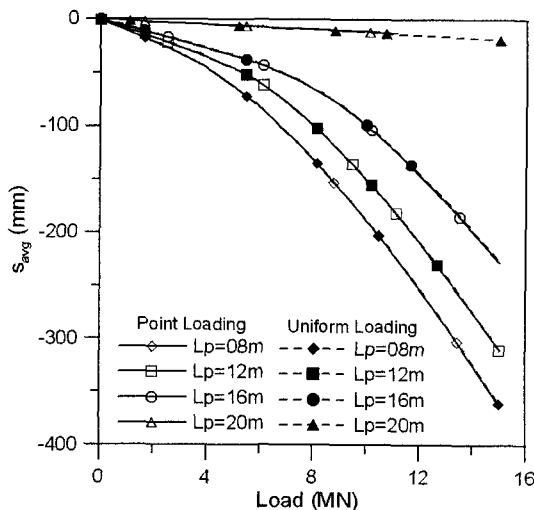
##### 4.1 하중-침하 관계

그림 6은 등분포 및 집중 하중 작용 시 말뚝 근입 깊이별 하중-침하 거동에 대한 예로 근입 깊이가 8-16m는 마찰지지말뚝, 20m는 선단지지말뚝이며 말뚝 배치는 3x3 단면에서 말뚝 간격 3d 및 9d인 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 말뚝배치에서의 하중-침하거동은

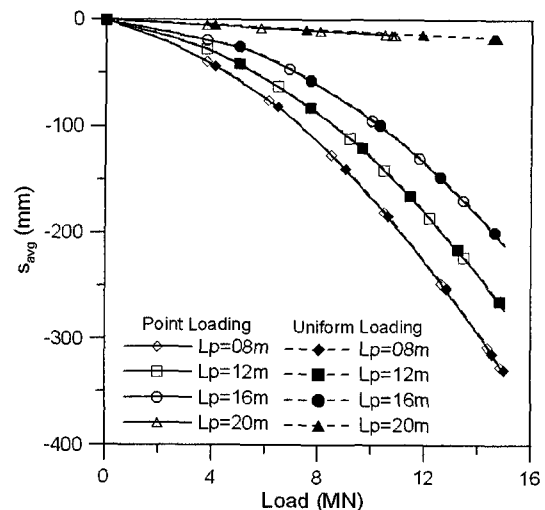
표 3. Piled raft와 FPG의 Piled raft 계수

	3x3, 3d	3x3, 9d	5x5, 4d
Piled raft (PR)	0.6	0.75	0.94
FPG	1	1	1

주) 작용하중, p=50kPa; 말뚝 근입 깊이, Lp=16m



(a) 3x3, 중심간격 3d



(b) 3x3, 중심간격 9d

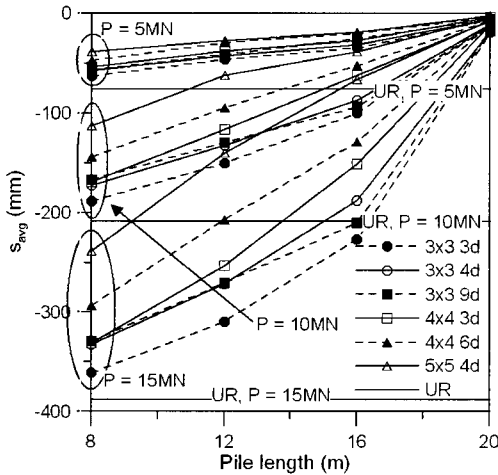
그림 6. 하중형태에 따른 하중-침하 관계 예(3x3, 중심간격 3d 및 9d 경우)

하중 형태에 따라 차이가 없는 것으로 나타났으며 말뚝의 근입 깊이가 깊어짐에 따라 침하량이 감소하였고 이는 다른 형식의 배치에서도 동일하게 나타났다.

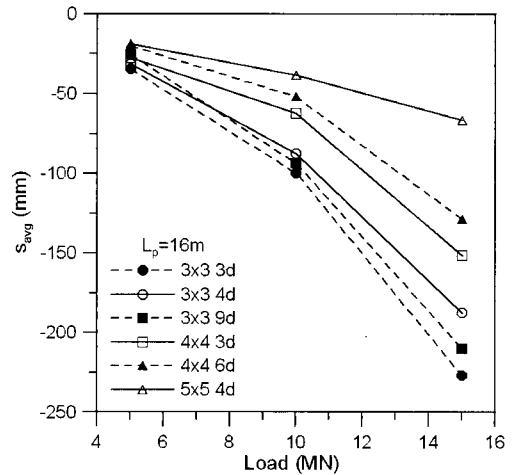
그림 7은 그림 1 및 표 1에서 언급한 단면에 대한 해석 결과를 하중 단계별로 Piled raft(PR)의 최대 침하량을 말뚝 근입 깊이( $L_p$ )에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 말뚝 근입 깊이가 깊어짐에 따라 말뚝 개수가 9개(3x3)에서 16개(4x4), 25개(5x5)로 증가함에 따라 침하량은 감소하였다. 침하량 감소 정도는 동일한 말뚝 근입 깊이에서는 말뚝 개수가 많을수록 가장 크게 나타났다. 그림 7(b)를 보면 말뚝 근입 깊이,  $L_p$ 가 16m인 경우, 동일한 말뚝 개수(3x3( $n=9$ ), 4x4( $n=16$ ))에서는 말뚝 간격이 넓어짐에 따라 일반적으로 침하량이 감소하나 3x3에서는 하중이 증가할수록 말뚝 간격 4d인 경우가

9d보다 침하량 감소가 다소 크게 나타나기도 하였다.

본 해석은 연약 점성토 지반을 대상으로 하여 해석된 침하량이 하중에 따라 Unpiled raft는 약 70-400mm, Piled raft는 말뚝 배치 및 하중에 따라 다르지만 약 10-350mm 정도로 넓게 분포하며 다소 과도한 침하량이 산정되었다. 해석 결과에 의하면 선단지지말뚝일 때 침하가 거의 없는 것으로 볼 수 있으나 모든 단면에서의 일괄적인 선단지지말뚝 사용은 일반적인 군말뚝 설계 개념으로써 Piled raft 기초의 개념인 상부 구조물에 위해하지 않은 범위 내에서 최소의 말뚝 사용을 통한 침하 감소의 목적에 부합하지 않는 결과라 할 수 있다. 본 해석에서 적용한 단면을 기준으로 볼 때 상부 구조물의 하중 5MN 정도를 만족할 수 있는 침하 범위가 최대 2.5‰B(25mm) 라면 4x4(6d)나 5x5(4d)에 근입 깊이 16m 정도인 마찰

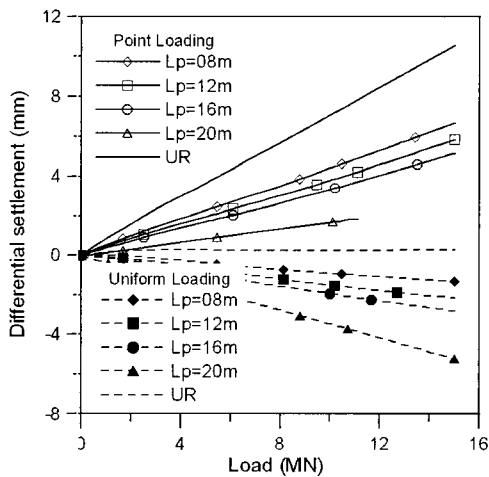


(a) 하중 단계별 침하량

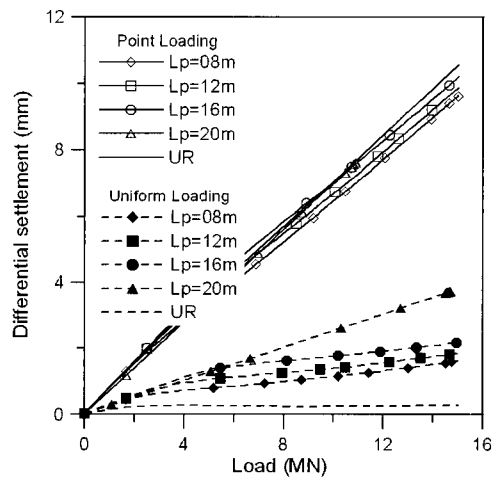


(b) 말뚝 근입 깊이 16m인 경우

그림 7. 말뚝 근입 깊이에 따른 침하량



(a) 3x3, 중심간격 3d



(b) 3x3, 중심간격 9d

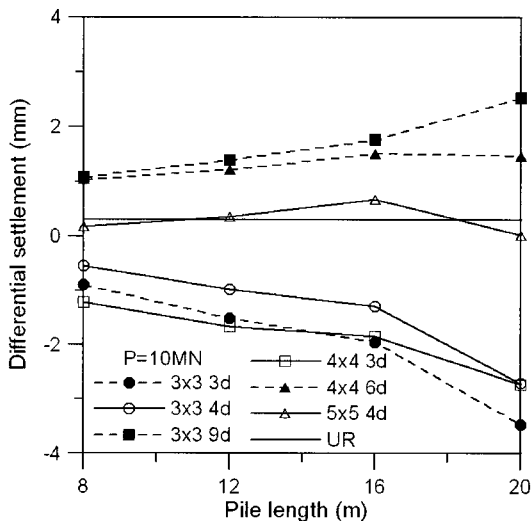
그림 8. 하중 형태에 따른 하중-부등침하 관계 예(3x3, 중심간격 3d 및 9d 경우)



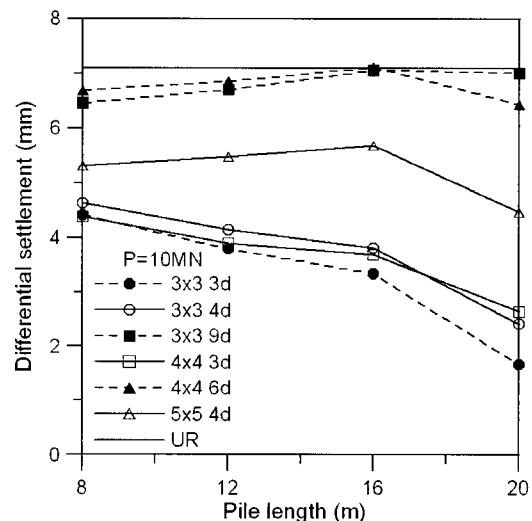
지지말뚝을 적용할 수도 있을 것이다.

그림 8은 하중 형태 및 크기에 따른 하중-부등침하 거동에 대한 예이다. 부등침하는 raft의 중앙부(center)와 모서리(corner) 지점의 침하량 차로 산정하였으며 그림 8에서 양(+)의 값은 raft 중앙부 침하가 큰 오목한 형태이며 음(-)의 값은 raft 외곽부가 침하가 큰 볼록한 형태의 부등침하이다. 부등침하의 경우 평균 침하와 달리 하중 형태 및 말뚝 배치에 따라 다르게 나타났다. Unpiled raft의 경우, 등분포 하중에서는 하중크기에 상관없이 부등침하가 거의 발생하지 않으며 발생량 또한 일정하나 집중하중 하에서 하중크기에 따라 증가하며 등분포 하중보다 큰 부등침하가 발생하였으며 발생 형태는 하중 형태에 상관없이 침하량은 다르지만 오목한 형태로 나타났다. Piled raft의 경우 하중크기에 따라 부등침하가 증가하였으며 등분포하중 작용 시 Unpiled raft 보다 큰 침하량이 산정되었다. 또한 대부분 raft 침하 형태가 오목한 형태로 나타났으나 말뚝 간격이 좁은 경우( $s=3d$ ), 등분포 하중 작용 시 raft의 침하가 볼록한 형태로 나타났다. 또한 말뚝 간격이 좁은 경우( $s=3d$ ), 집중하중에서는 말뚝 길이가 길어질수록 부등침하량이 감소하였으나 등분포하중에서는 말뚝 길이가 길어질수록 부등침하량이 증가하였다. 말뚝 간격이 넓은 경우( $s=9d$ ), 집중하중의 경우 말뚝 길이가 길어질수록 약간 감소하였으나 Unpiled raft와 거의 같은 침하량이 산정되었으며 등분포하중의 경우 오목한 형태의 침하이기는 하지만 말뚝 간격이 좁은 경우와 마찬가지로 말뚝 길이가 길어질수록 증가하였다. 그림 9는 위의 결과를 바탕으로 동일

한 하중 하에서 말뚝 근입 깊이에 따른 부등침하량을 비교, 검토한 결과이다. 부등침하는 위에서 언급했듯이 등분포하중 하에서는 Unpiled raft의 부등침하량보다 더 크게 발생하였으며 말뚝 배치(그림 1 참조)에 따라 raft 중앙부에 말뚝이 집중된 경우에는 볼록한 형태를, raft 전면에 비교적 넓게 분포될 때는 오목한 형태로 나타났다. 또한 평균 침하와 달리 말뚝 근입 깊이에 따라 감소하지는 않으며 볼록한 경우의 근입 깊이가 깊어질수록 부등침하가 증가하고 오목한 형태인 경우에는 길이에 따라 볼록한 경우에 비해 작지만 다소 증가하거나 증가하다 감소하기도 한다. 그러나 말뚝 개수가 많고 말뚝이 raft 전면에 비교적 균일하게 배치된 5x5 단면에서 말뚝 근입 깊이에 크게 영향을 받지 않으며 가장 적합한 배치인 것으로 나타났다. 집중하중 하에서는 말뚝 간격이 좁고 raft 중앙부에 배치된 경우 말뚝 길이가 증가할수록 부등침하량은 감소하였으나 말뚝이 raft 전면에 넓게 배치된 경우 말뚝 근입 깊이에 따라 오히려 증가하다 감소한다. 따라서 부등침하의 경우 등분포하중 하에서는 말뚝을 raft 전면에 비교적 넓게 배치된 경우가 유리하며 집중하중 하에서는 말뚝을 raft 중앙부에 집중하여 배치하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 단면에서 실제 계산된 최대 부등침하량은 집중하중 작용 시 Unpiled raft에서 최대 약 10mm로 폭 10m인 raft 기준 1/700 정도로 균열을 허용할 수 없는 빌딩에 대한 안정한계인 1/500(구조물 기초 설계기준, 1997) 보다 작은 정도이며 적절한 말뚝 배치를 통해 감소시킬 수 있다. 등분포하중 하에서는 최대 4mm 정도로 침하에 예



(a) 등분포 하중 작용 시



(b) 집중 하중 작용 시

그림 9. 말뚝 근입 깊이에 따른 부등침하량(하중 10MN 작용 시)

민한 기계기초의 작업공란한계인 1/1000(구조물 기초 설계기준, 1997)에도 못 미치는 정도의 부등침하량이라 할 수 있다. 이는 앞서 2장에서 언급했듯이 raft-지반 상대강성이 비교적 강성으로 판단되어 부등침하가 어느 정도 발생할 수 있으나 비교적 작은 값이 산정된 것으로 보이며 또한 등분포하중 경우와 같이 부적절한 말뚝 배치가 될 경우 오히려 더 큰 부등침하를 유발할 수 있고 발생 형태 또한 바뀔 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4.2 말뚝의 하중 분포 및 하중 분담율

그림 10은 등분포하중 작용 시 하중 단계별 말뚝 하중 분포에 대한 예로 3x3 말뚝 배치에 말뚝 간격 3d 및 9d인 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 등분포하중의 경우 말뚝 간격 및 길이에 상관없이 본 해석에서 적용한 5MN 하중에서는 중앙(center)-측면(side)-모서리(corner) 말뚝 순으로 하중이 분포되거나 작용 하중이 증가하게 되

면 중앙 말뚝의 하중 분포가 가장 크게 나타났다. 이는 Katzenbach et al.(1998)이 언급했듯이 작용하중이 커짐에 따라 침하가 증가되고 이로 인한 말뚝 주변 지반의 수평방향 응력 증가가 중앙 말뚝에 가장 크게 작용하는 점에 기인한 것이다. 또한 작용 하중이 작은 경우(5MN) 말뚝 간격 3d가 말뚝 간격 9d에 비해 말뚝 하중이 작게 나타나는 점은 말뚝 간격 3d와 9d에서 평균 침하량은 거의 동일한 상태에서(그림 7 참조) 3장에서 언급한 바와 같이 균말뚝 효과에 의한 것이나 작용하중이 증가할수록(침하가 증가할수록) 말뚝 간격 3d인 경우가 말뚝 하중이 더 크게 나타나는 점은 앞의 그림 7에 알 수 있듯이 말뚝 간격 3d인 경우 침하량이 9d인 경우보다 더 크기 때문에 그림 10에서 보듯이 주면마찰력은 비슷하나 선단에서 더 큰 하중을 분담하기 때문인 판단된다. 그림 11은 집중하중 작용 시 하중 단계별 말뚝 하중 분포로 측면과 모서리에 배치된 말뚝의 경우 등분포하중 작용 시와 유사한 거동을 보이거나 중앙말뚝의 경우 작용

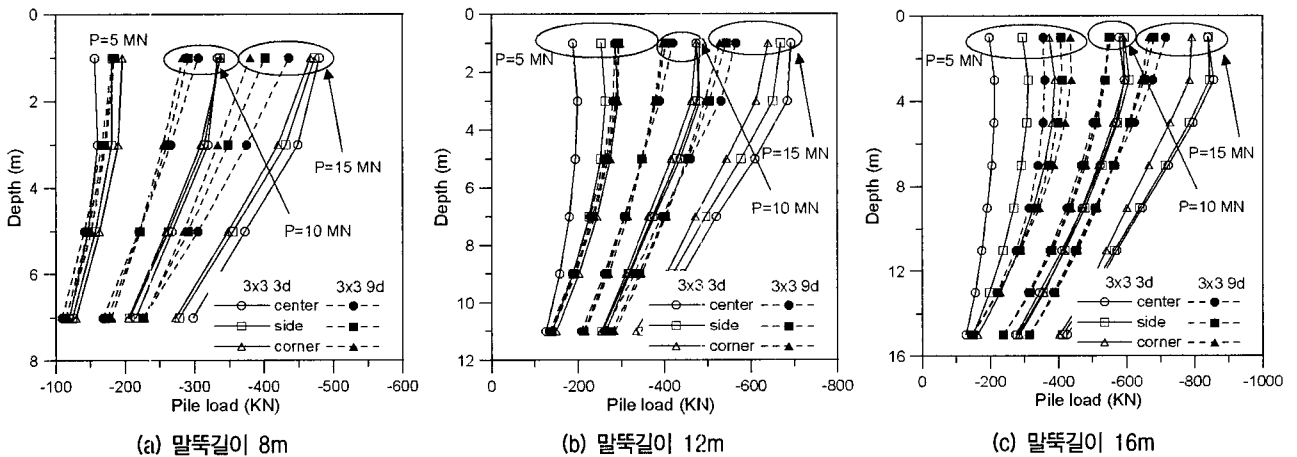


그림 10. 등분포 하중 작용 시 단계별 말뚝 하중 분포 예(3x3 말뚝 간격 3d 및 9d)

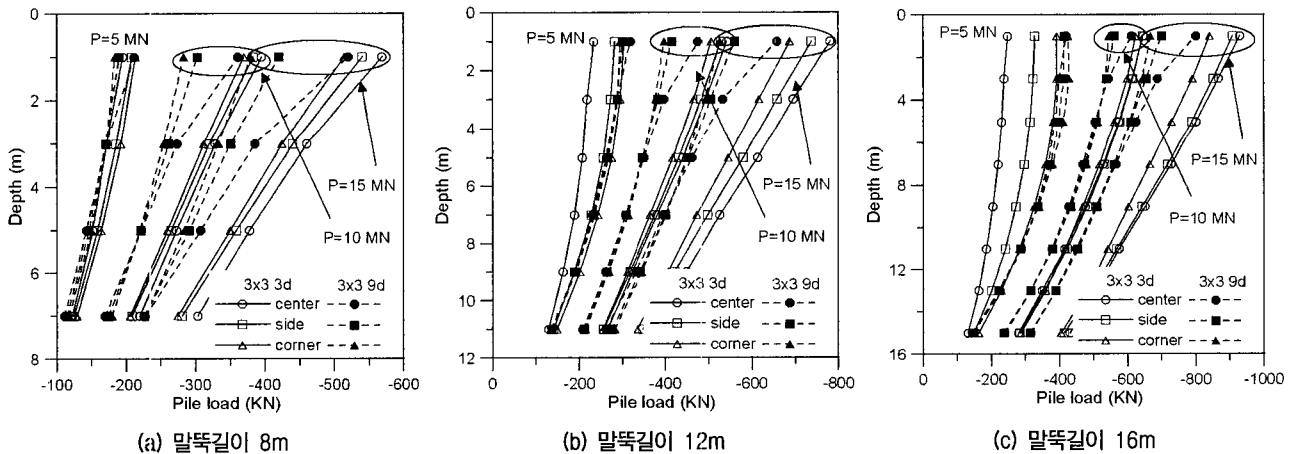
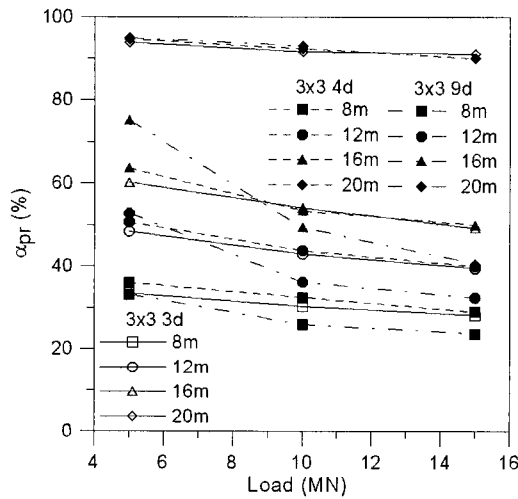


그림 11. 집중 하중 작용 시 단계별 말뚝 하중 분포 예(3x3 말뚝 간격 3d 및 9d)

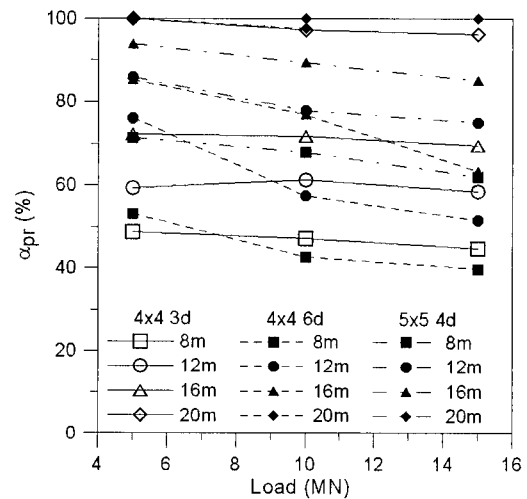
하중에 상관없이 가장 큰 하중이 분포되며 특히 말뚝 간격이 넓은 경우( $s=9d$ ) 중앙말뚝이 다른 위치의 말뚝에 비해 비교적 큰 하중을 받는다. 또한 말뚝 간격이 좁은 경우( $s=3d$ ) 말뚝 상단부의 하중 분포가 등분포하중에 비해 전체적으로 크게 나타났다. 이는 집중하중이 작용하는 근처에 위치한 말뚝이 작용하중의 영향을 가장 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

그림 12 및 13은 본 연구에서 적용한 단면에 대하여 산정한 말뚝의 하중 분담율로 하중 형태에 상관없이 말뚝의 근입 깊이가 깊어질수록 말뚝 개수가 많아질수록 하중 분담율은 증가하였다. 또한 작용 하중이 증가할수록(침하가 증가할수록) 말뚝의 하중 분담율을 감소하였는데 이는 말뚝의 비선형 하중-침하 거동에 기인한

것으로 하중이 증가할수록 말뚝이 극한 상태에 근접하기 때문이며 이와 유사한 결과를 Horikoshi & Randolph (1996)이 원심모형실험을 통해 보고하였다. 동일한 개수(3x3, 4x4) 내에서는 말뚝 간격이 3d일 때 작용하중 증가에 따라 말뚝의 하중 분담율 감소가 비교적 크게 발생하지 않으나 말뚝 간격이 넓은 경우(3x3, 9d 및 4x4, 6d)는 작용하중이 작을 때는 말뚝의 하중 분담율이 3d인 경우보다 크지만 작용하중이 증가함에 따라 더 작은 값으로 나타났다. 또한 동일한 개수 내에서 하중 형태의 영향을 비교해 보면 말뚝 간격이 넓은 경우 하중 형태에 상관없이 거의 유사한 값이 산정되었으나 말뚝 간격이 좁은 경우 집중하중 작용 시 다소 크게 산정되었다. 그리고 3x3이나 4x4 배치의 경우 작용 하중 재하 초기 하중

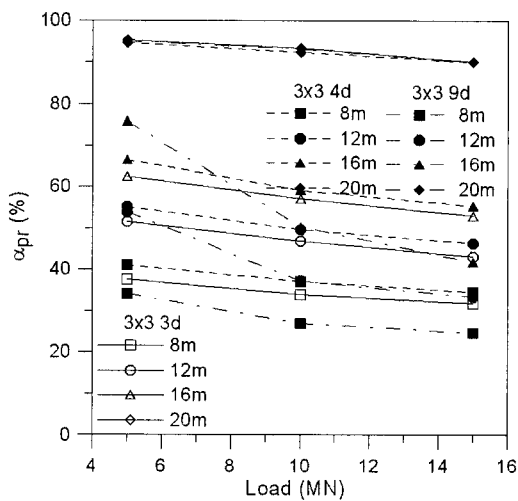


(a) 3x3, 3d, 4d, 9d 배열

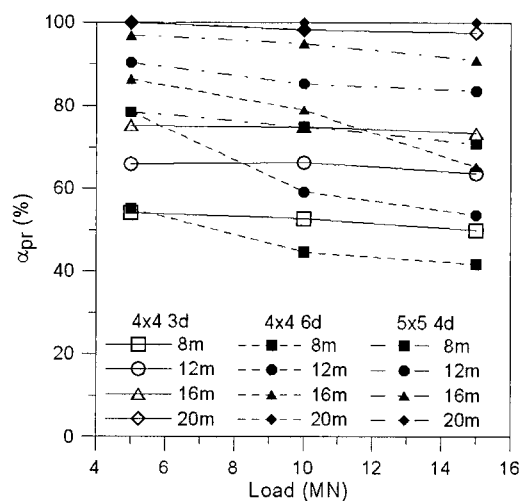


(b) 4x4, 3d, 6d 및 5x5 4d 배열

그림 12. 등분포하중 작용 시 말뚝 배치별 말뚝 근입 깊이(Lp)에 따른 말뚝 하중 분담율



(a) 3x3, 3d, 4d, 9d 배열



(b) 4x4, 3d, 6d 및 5x5 4d 배열

그림 13. 집중하중 작용 시 말뚝 배치별 말뚝 근입 깊이(Lp)에 따른 말뚝 하중 분담율

분담율은 근입 깊이 16m인 경우 최대 80% 정도의 발생 하였으나 5x5 배치의 경우 3x3이나 4x4의 선단지지말뚝과 상응하는 95% 정도의 하중 분담율이 나타났으며 말뚝 근입 깊이 8m-12m 에서도 다른 배치의 동일한 길이 말뚝에 비해 크게 발현되었다. 이를 통해 Piled raft 내 말뚝의 지지력이 말뚝 하중 분담율 결정에 가장 큰 요소임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 연약 점성토 지반을 대상으로 하여 Piled raft의 침하량은 말뚝 배치 및 하중에 따라 다르지만 다소 과도한 침하량이 산정되었다. 압축성이 큰 연약지반 특성상 선단지지말뚝일 때 침하가 거의 없는 것으로 나타났으나 일괄적인 선단지지말뚝 사용은 일반적인 균 말뚝 설계 개념으로써 Piled raft 기초의 개념인 상부 구조물에 위해하지 않은 범위 내에서 최소의 말뚝 사용을 통한 침하 감소의 목적에 부합하지 않는 결과라 할 수 있다. 본 연구 결과 마찰지지말뚝으로 지지된 Piled raft 기초를 사용하더라도 상부 구조물에 위해하지 않은 침하 범위를 만족할 수도 있으므로 말뚝 사용량을 최소화 할 수 있을 것이다. 이를 토대로 다음과 같은 세부적인 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 3x3 배치에서 말뚝 간격이 3d인 경우 균말뚝(FPG) 이나 Piled raft의 하중-침하 강성이 9d에 비해 작은 것은 균말뚝 효과에 의해 말뚝 지지력이 감소하기 때문인 것으로 판단되며 5x5 배치의 경우 균말뚝(FPG) 과 Piled raft의 하중-침하 거동이 매우 유사하며 이는 말뚝 개수 증가에 따른 총 말뚝 지지력 증가로 본 해석에서 적용한 하중 내에서는 균말뚝(FPG)이나 Piled raft 내 말뚝이 충분한 지지력을 발휘하고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 Piled raft의 하중-침하 거동은 말뚝의 하중-침하 거동이 주된 요소가 되는 것으로 판단된다.
- (2) 평균 침하는 작용하중 15MN인 경우 3x3 배치(말뚝 개수, 9개)는 말뚝 근입 깊이( $L_p$ )에 따라 Unpiled raft(UR) 침하량 대비 평균 약 90%(8m) → 55%(16m), 4x4 배치(말뚝개수, 16개)는 약 80%(8m) → 40%(16m), 5x5 배치(말뚝개수, 25개)는 약 60%(8m) → 15%(16m)로 감소하였다. 동일한 말뚝 개수에서는 말뚝 간격이 넓어짐에 따라 일반적으로 침하량이 감소하였다.

으며 일반적으로 최대 침하량은 말뚝 개수 및 말뚝 길이가 증가할수록 감소하나 말뚝 개수 및 말뚝 길이를 조절하여 침하 기준내로 침하량을 만족시킬 수도 있는 것으로 나타났다. 부등침하의 경우는 하중 형태 및 말뚝 배치 형태에 따라 부등침하 형태 및 크기에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

- (3) raft 내 말뚝 하중 분포는 하중형태에 상관없이 작용 하중의 증가(5MN → 15MN)에 따라 말뚝의 하중 분포가 모서리(corner)-측면(side)-중앙(center)에서 중앙(center)-측면(side)-모서리(corner)로 중앙 말뚝의 하중이 가장 크게 나타났으며 다른 말뚝 배치에서도 작용 하중이 증가에 의해 침하량이 증가되면 이와 같이 하중 분포가 중앙 말뚝에서 가장 크게 나타났다. 집중하중의 경우 등분포하중과 유사한 거동을 보이나 말뚝 간격이 넓은 경우 중앙 말뚝의 하중이 상대적으로 크며 말뚝 간격이 좁은 경우 전체적으로 말뚝 상단의 하중 분포가 증가하였다.
- (4) 말뚝의 하중 분담율은 말뚝 근입 깊이가 깊어질수록, 말뚝 개수가 많아질수록 증가하였으며 이를 통해 Piled raft 내 말뚝의 지지력이 말뚝 하중 분담율 결정에 가장 큰 요소임을 알 수 있다. 또한 작용 하중 크기에 따라 하중 분담율이 감소하는데 이는 말뚝의 비선형 하중-침하 거동에 기인한 것으로 하중이 증가할수록 말뚝이 극한 상태에 근접하기 때문이다.

## 참고 문헌

1. 권오균, 오세봉, 김진복 (2005), “무리말뚝의 하중분담률에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 특별논문집 제2호, 제21권 5호, pp.51-58.
2. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999), “Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치”, *대한토목학회 논문집*, 제 III-4권, pp.831-839.
3. 김홍택, 강인규, 전용진, 박사원 (2000), “유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계”, *한국지반공학회 논문집*, 제 16권 3호, pp.47-55.
4. 김홍택, 강인규, 박정주, 박순규 (2002), “사질토 지반에서 연직 하중을 받는 Piled raft 기초시스템의 하중분담특성에 관한 실내 모형실험 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제 22권 2-c호, pp.111-120.
5. 이승현, 권오균, 오세봉, 김병일 (2003), “말뚝지지 기초판의 하중분담”, *대한토목학회 논문집*, 제 23권 3c호, pp.143-150.
6. 이진형, 정상섭, 송성욱 (2006), “수치해석을 통한 연약지반상 Piled raft 기초의 거동 분석”, *'06 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회.
7. 한국지반공학회 (1997), “구조물 기초 설계기준”, pp. 477-478.
8. ABAQUS version 6.5 (2004), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Pawtucket R.I.

9. Burland, J.B., Broms, B.B. and De Mello, V.F.B. (1977), "Behaviour of foundations and structures", *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp. 495-549.
10. Conte, G., Mandolini, A. and Randolph, M.F. (2003), "Centrifuge modelling to investigate the performance of piled rafts", *Proc. 4th Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp.359-366.
11. Cooke, R.W. (1986), "Piled raft foundations on stiff clays: a contribution to design philosophy", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp. 169-203.
12. de Sanctis, L. and Mandolini, A. (2003), "On the ultimate vertical load of piled rafts on the soft clay soils", *Proc. 4th Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp.379-386.
13. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. (1996), "Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay", *Geotechnique*, Vol.46, No.4, pp.741-752.
14. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. (1996), "On the definition of raft-soil stiffness ratio", *Geotechnique*, Vol.47, No.5, pp.1055-1061.
15. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. (1998), "A contribution to the optimum design of piled rafts", *Geotechnique*, Vol.48, No.2, pp. 301-317.
16. 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.
17. Katzenbach, R., Arslan, U. and Moormann, C. (1998), "Design and safety concept for piled raft foundations", *Proc. 3th Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Balkema, Rotterdam, pp.439-448.
18. 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.
19. Lee, C.J., Bolton, M.D. and Al-Tabbaa, A. (2002), "Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.325-335.
20. Mandolini, A. (2003), "Design of piled raft foundations: Practice and development", *Proc. 4th Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp.59-80.
21. Prakoso, W.A. (1999), "Numerical analysis of vertically-loaded and laterally-loaded raft foundations enhanced by deep foundation elements", MS thesis, Cornell University, Ithaca, NY, US.
22. Poulos, H.G. (2001), "Piled-raft foundation; design and applications", *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
23. Poulos, H.G. (2005), "Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites", *Advances on Design and Testing Deep Foundations*, Geotechnical special publications No. 129, ASCE, pp.214-235.
24. Randolph, M.F. (1994), "Design Methods for pile groups and piled rafts", *Proc. 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol.5, pp.61-82.
25. Reul, O. (2002), "Study of the influence of the consolidation process on the calculated bearing behaviour of a piled raft", *5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Paris, France, pp.383-388.
26. 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.
27. Reul, O. and Randolph, M.F. (2004), "Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 130(1), pp.1-13
28. Seo, Y-K and Jeong, S-G (2004), "Parametric Study of Piled Raft Foundation on Soft Clay", *J. of Ocean Science and Technology*, Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.1(2), pp. 147-152.
29. Wang, A. (1996), "Three dimensional finite element analysis of pile groups and piled-raft", PhD dissertation, University of Manchester, U.K.

(접수일자 2006. 9. 7, 심사완료일 2007. 5. 23)