

# 원심모형 실험과 수치해석을 이용한 과압밀 지반에서의 말뚝지지 전면기초의 지지력 평가

## Evaluation of Bearing Capacity of Piled Raft Foundation on OC Clay Using Centrifuge and Numerical Modeling

박진오<sup>1</sup> Park, Jin-Oh  
추연욱<sup>2</sup> Choo, Yun-Wook  
김동수<sup>3</sup> Kim, Dong-Soo

### Abstract

In this study the characteristics of piled raft was investigated by using both centrifuge and numerical modeling. The ultimate bearing capacities of single pile, unpiled raft, freestanding pile group and piled raft were compared in order to investigate load sharing of each element : pile and raft. The comparison determined parameters to simply evaluate the ultimate bearing capacity of piled raft. Centrifuge test results were simulated by numerical simulation to verify the parameters.

### 요지

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 거동을 원심모형시험과 수치해석기법을 이용하여 연구하였다. 단말뚝, 기초판, 군말뚝 및 말뚝지지 전면기초의 극한지지력 비교를 통하여 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하였고, 말뚝과 기초판에 전달되는 하중 분담율을 분석하여 말뚝지지 전면기초의 극한지지력을 산정할 수 있는 경험적 상관계수를 획득하였다. 또한, 원심모형시험과 동일말뚝조건을 대상으로 수치 시뮬레이션을 수행하여 원심모형시험 결과를 검증하고 말뚝지지 전면기초의 지지력을 위한 상관계수를 평가하였다.

**Keywords** : Centrifuge test, Load sharing, Piled raft, Ultimate bearing capacity

### 1. 서론

말뚝지지 전면기초(Piled raft)는 말뚝과 전면기초(Raft)의 장점을 결합한 복합기초로서 기존의 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)보다 지지력 및 침하특성에서 장점을 가지는 기초 형태이다. 특히, 기반암의 심

도가 깊은 국내 및 동남아 일부지역에서 선단지지말뚝의 기술적, 경제적 한계를 보완할 수 있어, 말뚝지지 전면기초의 활용이 증대되고 있다.

국외에서는 유럽 일부 국가, 호주, 일본에서 말뚝지지 전면기초에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 성과들이 발표되고 있다(Burland 등, 1977; Randolph,

1 삼성건설 토목사업본부 사원 (Junior Assistant, Dept. Civil Engineering, Samsung E & C)

2 정회원, KAIST 건설·환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST, ywchoo@kaist.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, KAIST 건설·환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1994; Horikoshi 등, 1996; Poulos, 2001; Mandolini, 2003; Reul 등, 2003; Katzenbach 등, 2005). 국내에서도 수치 해석, 1g 모형 실험 등을 통해서 말뚝지지 전면기초에 대한 실험적 연구 및 해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. (김경남 등, 1999; 김홍택 등, 2002; 이승현 등, 2003; 권오균 등, 2005; 이진형 등, 2007; 박현일, 2008). 특히, 하중분담특성 및 침하와 관련된 설계인자에 대해서 영향요소 연구와 말뚝지지 전면기초의 해석방법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한, 말뚝지지 전면기초의 말뚝 배치의 최적화나 말뚝의 비선형을 고려한 연구들이 수행되고 있다. 그러나, 말뚝지지 전면기초의 거동은 말뚝-기초판-지반의 상호작용으로 인하여 복잡한 거동이 연관되어 있어, 여전히 실험 및 해석적 방법의 상호보완적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 원심모형시험과 수치해석기법을 결합하여 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석하고, 지지력을 간단히 평가할 수 있는 절차를 제안하고자 하였다. 첫째로, 원심모형시험을 수행하여 단말뚝과 전면기초의 극한 지지력을 별도로 결정하고, 말뚝지지 전면기초의 지지력과의 비교를 통하여 간접적으로 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하는 경험적인 상관계수를 획득하였다. 이 과정에서 말뚝으로 전이되는 하중을 측정하여 말뚝, 기초판이 분담하는 하중분담률을 결정하였다. 두 번째로는 수행된 원심모형실험과 같은 조건의 수치 시뮬레이션을 수행하고, 말뚝지지 전면기초의 지지력을 원심모형시험 결과와 비교·분석을 수행하고, 원심모형 실험과 수치해석의 결과를 바탕으로 말뚝지지 전면기초의 지지력 평가의 가능성을 판단하였다.

## 2. 원심모형실험

### 2.1 실험 개요

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력을 간접적으로 평가하는 절차를 고려하기 위하여, 원심모형실험을 이용하여 말뚝지지 전면기초(PR), 단말뚝(Single

pile, SP), 전면기초(Unpiled raft, UR), 군말뚝(Freestanding pile group, FPG) 각각의 극한 지지력을 평가하였다. 단말뚝과 군말뚝의 극한 지지력으로부터 식 (1)을 이용하여 군말뚝 효율( $\eta$ )을 추정하고, 단말뚝, 전면기초 및 말뚝지지 전면기초의 극한지지력으로부터 Santics 등(2006)에 의한 식 (2)를 사용하여 말뚝-전면기초 상호작용계수 ( $\xi_{PR}$ )을 추정할 수 있다. 결국 각 기초의 극한 지지력으로부터  $\eta$ ,  $\xi_{PR}$  값을 추정함으로써, 단말뚝과 전면기초의 극한 지지력만으로 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력을 평가하고자 한다.

$$Q_{FPG,ult} = \eta \cdot n \cdot Q_{SP} \quad (1)$$

$$Q_{PR,ult} = \xi_{PR} (Q_{UR,ult} + \eta \cdot n \cdot Q_{SP,ult}) \quad (2)$$

여기서,  $Q_{FPG,ult}$ ,  $Q_{PR,ult}$ ,  $Q_{UR,ult}$ ,  $Q_{SP,ult}$ 는 각각 군말뚝, 말뚝지지 전면기초, 전면기초, 단말뚝의 극한지지력이고,  $n$ 은 말뚝 수,  $\eta$ 는 군말뚝 효율,  $\xi_{PR}$ 은 말뚝-기초판 상호작용 계수이다.

기초판과 말뚝의 하중분담을 정량화하기 위해, 재하 하중( $Q_{Applied}$ )에 대한 각 말뚝이 지지하는 하중의 합( $\sum Q_{pile}$ )의 비(ratio)를 구하였으며 식 (3)으로 표현된다. 말뚝으로 전이되는 하중을 측정하여 말뚝 하중분담률을 확인하고, 그 경향성 및 기존 연구결과와 비교 검토하였다. 이를 위해 원심모형 실험을 실시하였고, 각 단계별 실험 내용은 2.3절에서 설명하였다.

$$\alpha_{PR} = \frac{\sum Q_{pile}}{Q_{Applied}} \quad (3)$$

총 4회의 원심모형 실험이 수행되었고, 시험조건은 표 1과 같다. 말뚝 개수와 말뚝의 간격을 변수로 두고 각 실험에 대한  $\eta$ ,  $\xi_{PR}$  을 구하고 그 경향성을 파악하고자 하였으며,  $\alpha_{PR}$  즉, 말뚝의 하중분담률을 획득하였다. 모형 기초에 대한 자세한 내용은 2.2절에 설명하였다.

원심모형실험은 국토 해양부 지원 KOCED 원심모형

표 1. 원심모형실험 조건

실험	기초 종류(말뚝의 수)	말뚝 간격	Raft 두께 (mm)
1	단말뚝, 말뚝캡 단말뚝, 전면기초	-	15
2	말뚝지지 전면기초(9), 군말뚝(9)	3D	15
3	말뚝지지 전면기초(9), 군말뚝(9)	6D	15
4	말뚝지지 전면기초(25), 군말뚝(25)	3D	15

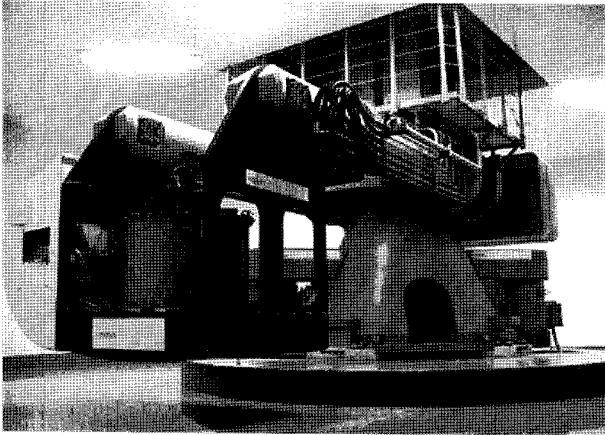


그림 1. 원심모형 실험장비(ACTIDYN C72-2)

표 2. 원심모형실험에 적용된 상사비

변수	상사비	변수	상사비
가속도	N	길이	1/N
응력	1	변형률	1
질량	1/N <sup>3</sup>	힘	1/N <sup>2</sup>
강성	1/N	시간	1/N <sup>2</sup>

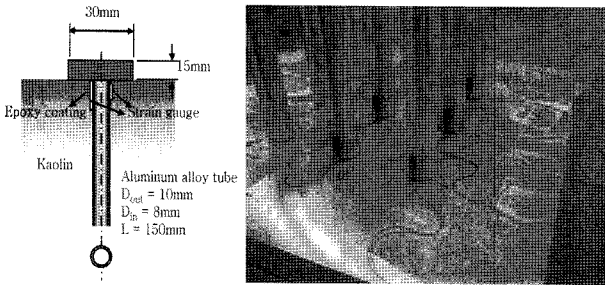


그림 2. 단말뚝 기초의 개념도 및 변형율계의 부착

실험장비(그림 1)를 사용하였으며, 표 2의 상사비에 따라 축소 모형의 기초를 제작하여 실험을 수행하였다.

## 2.2 모형 기초 및 지반의 모델링

### 2.2.1 모형 기초

본 연구에서는 60g 가속도를 기준으로 1/60 상사비에 해당하는 축소 모형 기초를 제작하였으며, 모든 기초는 알루미늄 합금(Aluminum alloy)으로 제작하였다. 말뚝 지지 전면기초의 지지력을 평가하기 위해서 사용되는 기초는 총 4가지이고, 각 기초의 제작은 다음과 같다.

말뚝 모사의 경우, 말뚝캡의 모사 여부에 따라 단말뚝(uncapped SP) 과 말뚝캡 단말뚝(Capped SP)으로 각각 나누어 제작하여 말뚝캡의 효과를 확인하였다. 그림 2와 같이 모형말뚝은 외경 10mm, 내경 8mm, 길이 170mm의 중공관으로 제작 되었으며, 이는 원형구조물의 외경

600mm, 내경 200mm, 길이 9m 치수의 콘크리트 말뚝을 모사한다. 말뚝캡 단말뚝은 동일한 치수의 모형 말뚝의 머리 부분에 30mm×30mm의 말뚝캡을 모사하였다. 모형말뚝에는 전이되는 하중을 계측하기 위해 말뚝 상단에 1쌍의 변형률계를 부착하였다.

전면기초(Unpiled raft, UR)는 폭 150mm, 길이 150mm, 두께 15mm의 판상 형태로 제작 하였으며 이는 폭과 길이가 각각 9m, 두께 1.22m의 콘크리트 기초판을 모사한다. 기초판과 지반의 상대 강성  $K_r$ 을 Brown(1975)의 제안식(식 (4))에 따라 평가해 본 결과 강성 1.2로 완전 강성에 가깝게 분류되어 본 실험의 기초판은 강체로 가정하였다.

$$K_r = \frac{4E_r t_r^3 B_r (1 - \nu_s^2)}{3\pi E_s L_r^4} \quad (4)$$

여기서,  $E_r$ ,  $E_s$ 은 기초판과 지반의 탄성계수,  $\nu_r$ ,  $\nu_s$ 은 기초판과 지반의 포아송비,  $L_r$ ,  $B_r$ ,  $t_r$ 은 기초판의 길이, 폭, 두께를 나타낸다.

군말뚝과 말뚝지지 전면기초의 경우, 모형 말뚝들과 기초판은 나사 형태로 체결함으로써 말뚝머리 고정의 현장조건을 모사하였다.

### 2.2.2 모형 지반

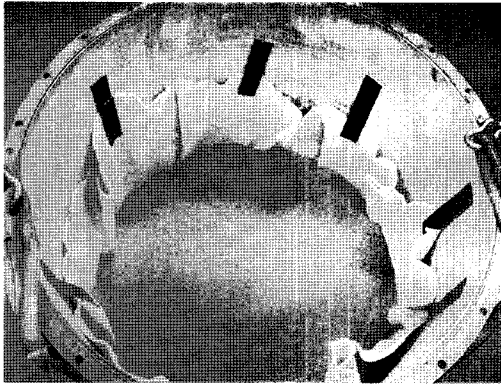
모형지반은 카올린(Kaolin) 점토를 이용하여 조성하였다. 사용한 카올린은 정제된 판상의 결정 구조를 가진 분말 형태의 제품으로 소성지수(PI)가 35로 통일 분류법 상에서 CH로 분류되었으며, 단위중량은  $16.5\text{kN/m}^3$ 으로 조성되었다. 모형지반의 제작은 다음과 같다(그림 3).

- ① 원형 토조에 50mm 두께의 모래 배수층 포설
- ② 함수비 120%의 슬러리 상태의 점토를 550~600mm 높이로 조성
- ③ 점토 높이 중앙에 간극 수압계를 설치 및 20mm 두께의 상부 모래 배수층 조성
- ④ 1축 선형압밀기를 이용하여 170kPa의 선형압밀응력에서 압밀

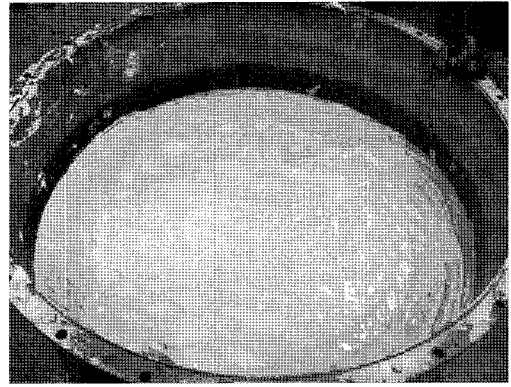
## 2.3 실험 절차

원심모형 실험은 다음과 같이 총 5단계로 구분되어 다음과 같이 수행하였다.

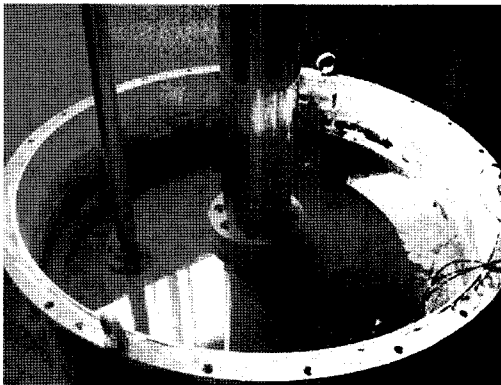
- ① 원심모형 실험을 위한 기초 및 지반의 모델링, ②



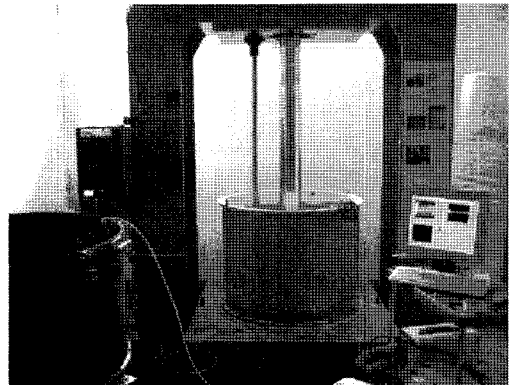
(a) 하부 배수층 포설



(b) 카올린 슬러리 조성



(c) 수직 압밀 하중 재하



(d) 1차원 선형압밀기 및 침하 계측 시스템

그림 3. 모형지반의 조성

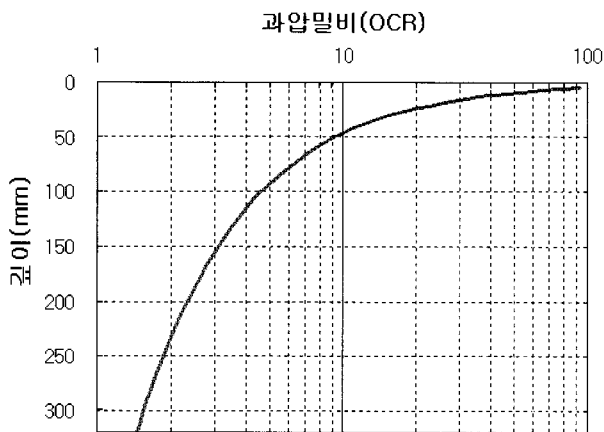


그림 4. 모형지반의 깊이별 과압밀비(OCR)

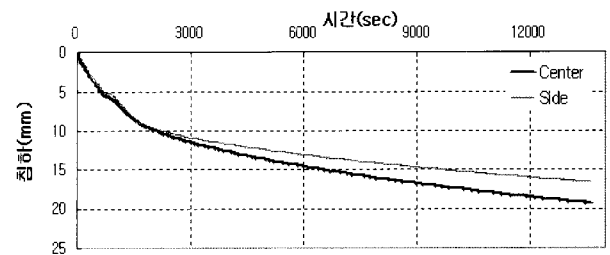


그림 5. 자중 압밀 중 시간-침하 곡선

60g에서의 자중압밀, ③ 1g에서의 모형기초의 설치, ④ 60g에서의 하중 재하 실험, ⑤ 실험 후 1g에서의 베인 실험 및 삼축실험을 수행하여 모형 지반의 물성을 평가하였다.

60g 가속도에서 약 4시간 동안 모형지반을 압밀하여 과압밀 점토를 조성하였다. 시험후 측정된 단위중량으로부터 추정되는 깊이에 따른 과압밀비는 그림 4와 같다.

LVDT를 이용하여 토조의 중앙과 벽측의 침하량을

실시간으로 계측하였다. 자중 압밀 과정동안 총 20mm의 침하가 유발되었다(그림 5). 모형지반의 중앙과 토조 벽측 지반과의 침하량의 차이는 약 3mm 발생하였다. 벽체와 지반 사이에 윤활제를 적용하였음에도, 완벽하게 벽체-지반 사이의 마찰을 제거하기는 어려웠다. 그러나, 본 연구에서는 모형기초간의 상대적인 비교를 목적으로 하였으며, 모든 실험에서 모형기초를 동일한 위치에 설치하여 영향을 최소화하고자 하였다.

그림 5에 나타낸 시간-침하량 관계로부터 압밀도를 세가지 방법을 적용하여 평가하였고, 표 3에 정리한 바와 같이 4시간 압밀 과정동안 94~103%의 압밀도가 진행되고 있음을 확인하였고, 이를 압밀이 충분히 진행되

표 3. 4시간 재압밀에 따른 압밀도 평가

	Hyperbolic	Root(s)	Asaoka
압밀도(%)	95	94	103

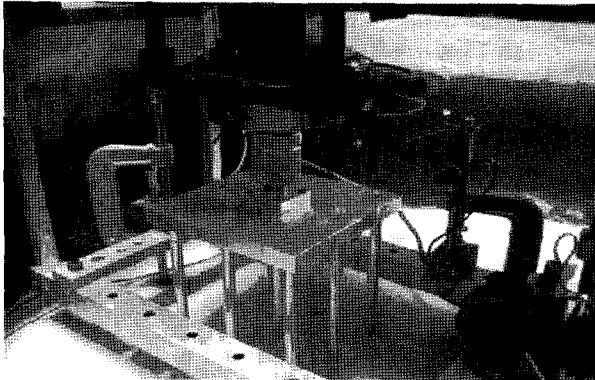


그림 6. 모형 기초의 설치(1g)

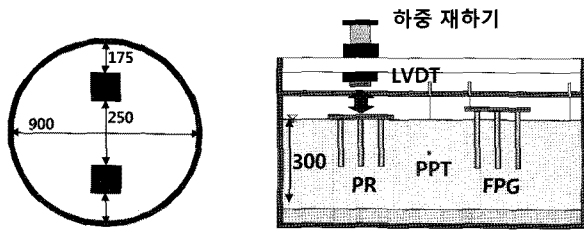


그림 7. 기초 설치 후 지반의 평면도 및 단면도

었다고 판단하고 모형기초의 설치 및 하중재하 시험을 수행하였다.

4시간의 자중압밀이 끝난 후 1g 상태에서 모형 기초를 설치하였다. 하중재하기를 이용하여 0.5mm/sec의 속도로 모형 기초를 설치하였다(그림 6). 기초는 그림 7과 같이 설치되었고, 모든 시험(전면기초, 군말뚝, 말뚝지지 전면기초)에서 동일하게 유지되었다. 모든 경우에서, 기초판이 경계인 토조 벽으로부터 175mm에 설치되어, 1.16B<sub>r</sub>의 여유를 두었다. 통상적인 평판재하시험의 조건(2.5B<sub>r</sub>)보다 여유가 작은 조건으로 시험의 결과에서 경계조건이 영향을 예측되나, 각 조건간의 상대적인 비교를 통한 거동 분석을 목표로 하여 시험의 효율성을 얻고자 하였다. 모형 기초의 설치 후 다시 1시간에 걸쳐 압밀을 재차 수행하였다. 1g에서 기초가 설치되는 동안 응력이 이완되면서 발생하는 지반팽창이 발생하였고, 기초설치 전 압밀 단계에서 기록된 측정치를 토대로 동일한 침하가 발생할 때까지 압밀을 지속하였다.

모든 기초의 하중 재하 시험은 0.1mm/sec 속도로 변위 제어 하중을 재하하였다. 군말뚝(FPG)과 말뚝지지 전면기초(PR)의 하중 재하 시험의 경우, 하나의 모형 기

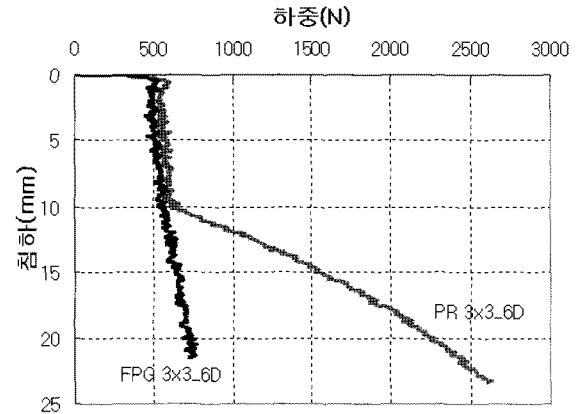


그림 8. PR과 FPG의 하중-침하 곡선의 비교

초 세트에 대하여 순차적으로 이어지는 다단계 시험을 적용하였다. 초기의 계획에서는 말뚝길이가 달라지는 영향을 고려하기 위하여 말뚝길이가 다른 모형기초를 별도로 준비하여 FPG(170mm길이 말뚝)와 PR(150mm 길이 말뚝)에 대한 하중 재하 시험을 실시하였으나, 말뚝지지 전면기초의 기초판이 지반과 접촉 직전까지의 지지거동이 군말뚝과 거의 일치하는 것을 확인하였다(그림 8). 따라서, 170mm의 말뚝을 가진 군말뚝(Free-standing pile group, FPG)를 사용하여 150mm 설치한 후 하중 재하 시험(약 20mm 변위 제어)을 실시하고, 군말뚝(Free-standing pile group, FPG)의 하중재하 시험이 끝나면 일정시간 압밀 후 말뚝지지 전면기초(PR) 기초로 사용하여 하중 재하 시험을 수행하였다.

원심모형 실험 완료 후 1g 상태에서 베인 실험을 실시하였고, 블록 시료를 채취하여 지반의 깊이를 고려하여 비배수 삼축압축시험을 수행하여 지반의 강도를 평가하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 지반의 강도

전술된 방법을 통하여 평가된 깊이별 지반의 비배수 전단강도를 기존 경험식들과 그림 9에 나타내었다.

$$C_u = 0.225 \cdot \sigma'_v (OCR)^{0.73} \quad (5)$$

$$C_u = 0.185 \cdot \sigma'_v (OCR)^{0.85} \quad (6)$$

여기서  $\sigma'_v$ 는 수직유효응력이고, OCR은 과압밀비를 나타낸다.

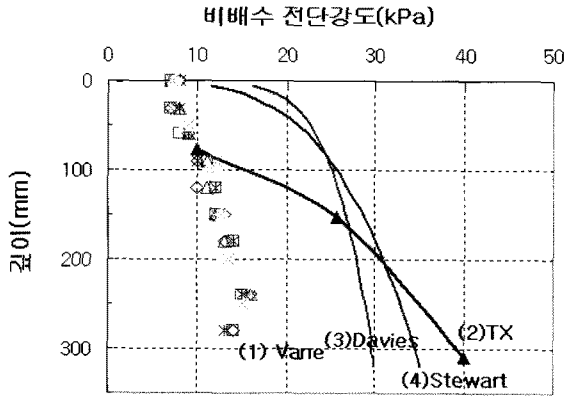


그림 9. 깊이별 지반의 비배수 전단강도 분포

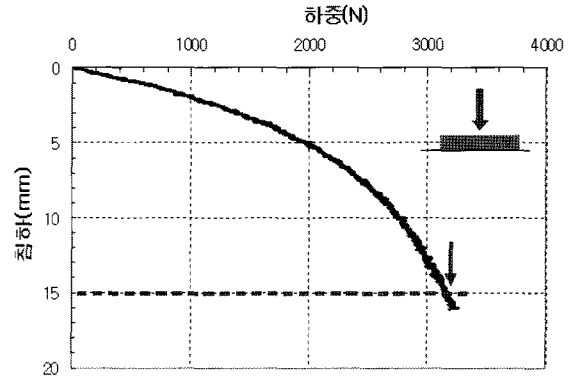


그림 11. 전면기초(UR) 기초의 하중-침하 곡선

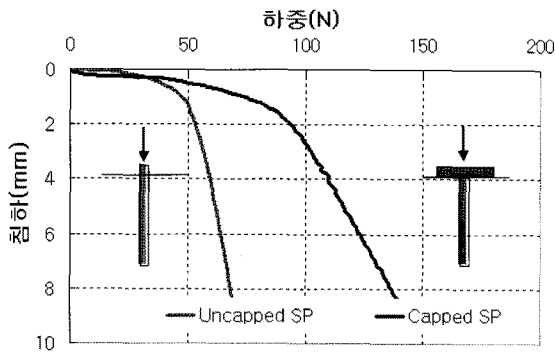


그림 10. 단말뚝(SP)의 하중-침하 곡선

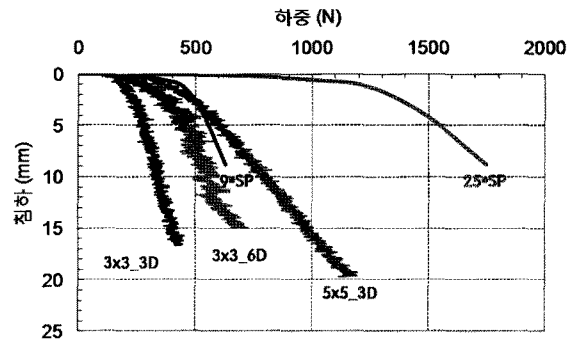


그림 12. 군말뚝의 하중-침하 곡선

그림 9의 (1), (2)는 각각 베인(Vane) 실험과 삼축실험(TX)의 결과값을 나타내며, 그림 9의 (3)은 Davies 등(1982)의 제안식(식 (5)), 그림 9의 (4)는 Stewart(1992)의 제안식(식 (6))이다. 베인 실험 결과는 두 제안식과 비교했을 때 매우 작은 강도를 보이고 있으며, 이는 베인 실험이 수행된 시점에 모형 지반에 응력 이완이 발생한 결과로 판단된다. 따라서, CPT나 T-bar 등을 이용한 원심가속 상태에서 비배수 강도를 추정할 필요가 있다. 본 실험에서는 삼축실험 결과를 수치해석의 비배수 전단강도로 사용하였다.

### 3.2 하중 재하 실험결과

#### 3.2.1 단말뚝 및 전면기초

단말뚝(uncapped SP)과 말뚝캡 단말뚝(Capped SP)의 하중 재하 결과는 그림 10과 같다. Chin(1970)과 Brinch-Hansen(1961) 방법에 의해 각각의 단말뚝의 극한 지지력은 약 70N(원형 : 0.42MN)으로 나타났다.  $\alpha$ -method(Randolph 등, 1985)를 이용하여 단말뚝의 주변 마찰력과 Canadian Foundation Engineering Manual의 추천 지지력계수  $N_f=7$ 을 적용한 선단지지력으로 사용하여 이

론적인 극한지지력을 구하였다. 깊이별 비배수 전단강도는 삼축실험 결과를 사용하여, 주변 마찰력은 약 60N, 선단 지지력은 약 18N으로 총 지지력은 78N으로 산정되었고, 두 결과를 비교했을 때 비교적 신뢰성 있는 실험이 이루어졌다고 판단된다.

말뚝캡 단말뚝의 경우 극한 지지력이 150N으로 측정되었고, 단말뚝 실험결과에 비해 두 배 이상의 지지력을 보였다. 이는 말뚝캡에 의하여 지반이 구속되는 효과 때문으로 판단된다.

그림 11은 전면기초의 하중-침하 곡선 나타낸다. 전면기초의 극한 지지력은 Cooke(1986)이 제안한  $0.1B_f$ 의 침하량에 해당하는 지지력으로, 약 3206N으로 결정되었다. Terzaghi(1943)가 제안한 점토지반, 수직하중, 비배수 조건 등에서 적용되는 얇은 기초의 지지력 산정식을 이용하여 전면기초의 극한지지력을 산정한 결과 3135N으로, 이는 실험값과 상당히 근사한 값을 나타내고 있어 실험의 신뢰성을 확인하였다.

#### 3.2.2 군말뚝 및 말뚝지지 전면기초

그림 12는 군말뚝의 하중-침하 곡선을 나타내고, 그림에서 FPG\_3x3\_3D는 말뚝 개수가 9개이고 간격이

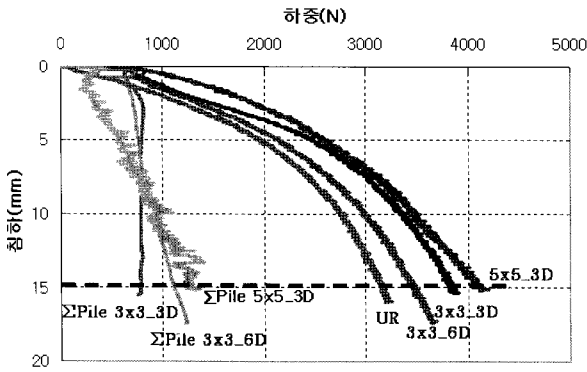


그림 13. 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 곡선

3D(D=0.6m, 말뚝 직경)을 나타내는 군말뚝 모형시험 결과를 나타내고, 9\*SP는 단말뚝(Single pile, SP)의 하중-침하 곡선에 9배한 것으로 단말뚝의 지지력이 모두 발휘되는 이상적인 경우를 나타낸다.

군말뚝의 결과에서는 말뚝수의 증가에 따라 지지력이 증가하였다. 군말뚝의 지지력이 n배수 단말뚝 지지력 보다 작게 나타났고, 이는 군말뚝 효과로 볼 수 있다. 3D의 경우, 3x3와 5x5가 비슷한 군말뚝 효율을 보이면서 0.35~0.6의 분포를 나타내었고, 6D의 경우는 군말뚝 효율이 0.8~1.0으로 크게 증가하였다. 특히, 6D의 경우에는 n배수 단말뚝 지지력에 매우 근접한 결과를 주고 있어, 6D의 말뚝 간격에서는 군말뚝의 효과가 거의 사라지는 것을 확인하였다.

말뚝지지 전면기초의 하중-침하 곡선을 전면기초(UR)의 결과와 그림 13에 비교하였다. 모든 말뚝지지 전면기초는 전면기초보다 지지력이 약 8~28% 정도 증가하였다. 말뚝지지 전면기초의 전체 하중-침하 관계와 말뚝으로 전이된 하중-침하 관계 비교하면, 침하량이 작을 때는 말뚝이 상당 부분 지지하는 것으로 나타났지만, 침하가 커짐에 따라 대부분의 하중을 기초판이 분담하였다.

### 3.3 하중 분담 특성 및 계수의 결정

기초판으로부터 전달되는 축력을 변형률계로부터 구하여 말뚝이 분담하는 하중을 산정하여 하중 분담률( $\alpha_{PR}$ )로 나타내었다. 그림 14는 하중의 증가에 따른 하중분담률을 각 말뚝지지 전면기초에 대해 도시하였다. 하중이 적을 때는 대부분의 하중은 말뚝이 분담하고( $\alpha_{PR}=84\sim98\%$ ), 하중이 점차 커짐에 따라  $\alpha_{PR}$ 이 감소하다가 일정한 값으로 수렴( $\alpha_{PR}=22\sim30\%$ )하는 형태로 나타났으며, 기존의 연구 결과와 흡사한 경향성을 나타

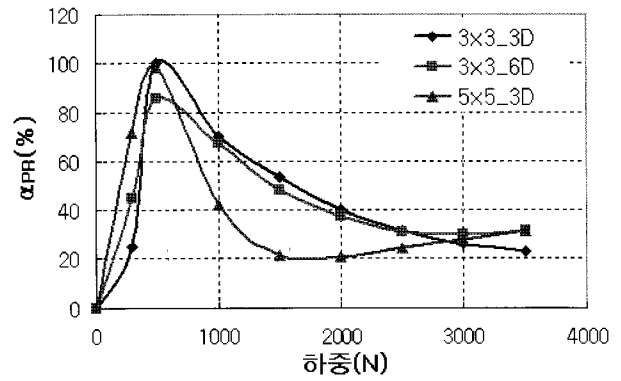


그림 14. 하중 증가에 따른 하중 분담률

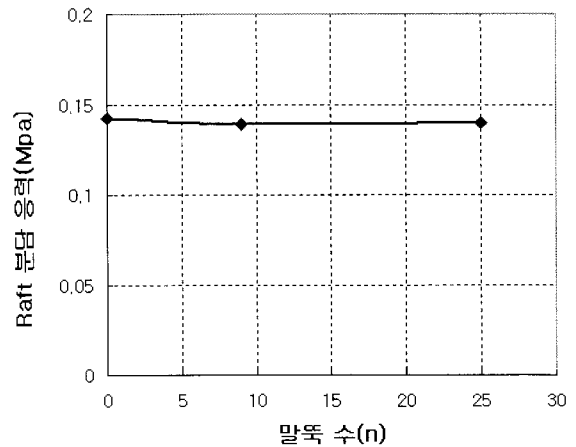
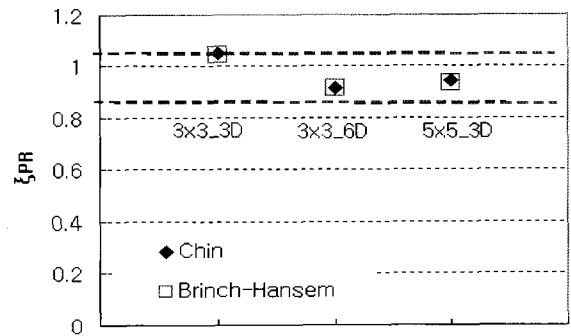
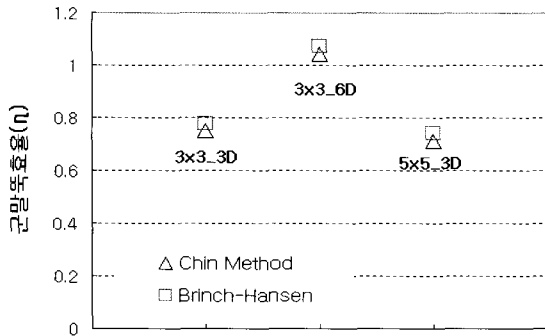


그림 15. 말뚝 수 증가에 따른 기초판(raft)이 분담하는 응력

내는 것을 볼 수 있다. Reul(2004)의 수치해석 결과에서는 최대 60~90%, 최소 30%의 하중 분담률을 나타내었다.

말뚝지지 전면기초가 극한지지력을 받고 있을 때, 기초판이 분담하는 하중을 응력으로 표현하면 그림 15와 같다. 기초판이 분담하는 응력이 말뚝수의 증가에도 일정하게 나타나는데, 이는 말뚝 수의 증가에 따라 전면기초의 단면적은 감소하기 때문으로 판단된다.

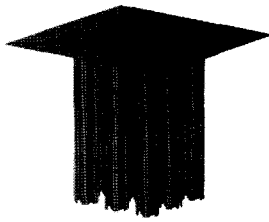
극한지지력에서의 군말뚝 효율( $\eta$ )과 말뚝-기초판 상호작용 계수( $\xi_{PR}$ )을 산정하여 그림 16에 나타내었다. 군말뚝 효율( $\eta$ )의 경우는 약 0.71~1.07의 범위 내에 존재하였다. 3D의 경우는 말뚝간 간섭에 의한 지지력 감소가 나타난 것을 알 수 있으며, 6D는 그 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단된다.  $\xi_{PR}$  계수는 약 0.91~1.04로 결정되었고, 이는 Cooke(1986)의 결과 0.83~1.04보다 좁은 범위 내에서 존재함을 확인할 수 있다. 말뚝지지 전면기초(PR) 기초의 극한 지지력은 말뚝 간격에 따라 각 요소의 합(raft+piles)의 약 90%~100%에 해당된다.



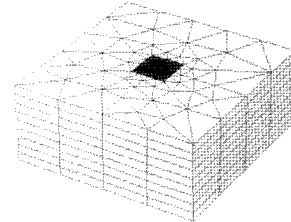
(a) 군말뚝 효율(η)

(b) 1차원 선행압밀기 및 침하 계측 시스템

그림 16. 말뚝지지 전면기초 지지력을 산정을 위한 각 계수의 결정



(a) 말뚝지지 전면기초



(b) 지반

그림 17. 말뚝지지 전면기초 지지거동 예측을 위한 3차원 유한요소망

표 4. 모델링 입력 물성

말뚝		raft		지반	
길이(m)	9	폭(m)	9	깊이(m)	20
외경(m)	0.6	너비(m)	9	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	1.65
내경(m)	0.2	두께(m)	1.22	비배수 전단강도(kN/m <sup>2</sup> )	그림 18.(a)
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	0	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	0	내부 마찰각	0
탄성계수(GPa)	29	탄성계수(GPa)	29	v	0.496
v	0.15	v	0.15	탄성계수(kN/m <sup>2</sup> )	그림 18.(b)

## 4. 수치해석 및 결과

### 4.1 모델링 및 입력 물성의 선정

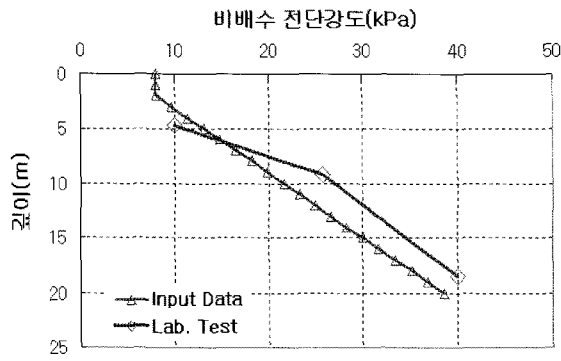
수치해석은 PLAXIS 3D Foundation을 사용하여 이루어졌으며, 원심모형실험의 조건을 원형(prototype) 조건으로 변환하여 모델링 하였다. 그림 17은 말뚝지지 전면기초(PR) 기초 및 지반을 모델링한 예이다.

수치해석을 위해 사용된 기초 크기 및 입력 물성은 표 4와 같다. 말뚝의 탄성계수는 콘크리트의 평균적인 값인 29GPa로 적용하고 축강성(EA)을 고려하여, 말뚝 외경(D<sub>out</sub>)은 0.6m, 내경(D<sub>in</sub>)은 0.2m의 콘크리트 말뚝으로 가정하였다. 말뚝과 지반 사이에는 접촉면 요소를 사용하였고, 접촉면 요소의 내부 마찰각과 점착력은 감소 계수(R<sub>intc</sub>)를 이용하여 지반의 강도를 감소한 값을 사용

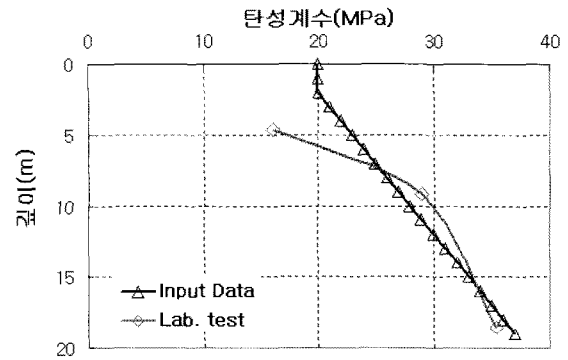
하고, 본 연구에서는 0.5를 사용하였다. 전면기초는 판(floor)요소를 이용하여 모델링 하였으며, 탄성계수는 말뚝과 동일한 29GPa를 사용하였고 폭과 너비는 9m씩이며, 두께는 휨 강성(EI)을 고려하여 1.22m로 결정하였다. 말뚝과 기초판은 선형탄성 모델이 적용 되었으며, 단위중량은 0으로 가정하였다. 원심모형실험에서는 기초를 하중재하기에 고정시킨 상태에서 하중 재하 실험을 수행하였으므로 자중을 무시할 수 있다고 판단하였다.

지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 비배수 전응력 해석(Undrained total stress analysis)을 수행하였다. 지반의 깊이는 20m, 지하수위는 0m, 단위중량은 16.5kN/m<sup>3</sup>, 정지토압계수(K<sub>0</sub>)는 0.5로 모델링하였다. 비배수 전단강도는 앞서 삼축압축실험을 통해서 획득한 값을 수치해석에 사용하였다. 탄성계수는 카울린 점토에 대한 공진주/비틀전단 실험 결과를 바탕으로 추정하였다. 예비





(a) 비배수 전단강도( $C_u$ )



(b) 탄성계수( $E$ )

그림 18. 깊이에 따른 비배수 전단강도 및 탄성계수

수치해석을 통해 예측되는 변형률 범위 0.06~0.1%에 대한 탄성계수를 사용하였다. 해석에 사용된 깊이별 비배수 전단강도와 탄성계수는 그림 18에 나타내었다. 특히, 표면이 너무 연약하여 기초 설치가 되지 않는 오류를 보완하기 위하여 지표면 근처에서는 일정한 값을 부여하였다.

#### 4.2 수치해석과 원심모형실험 결과의 비교 및 고찰

원심모형실험결과에 대한 비교를 위해 실험에 해당하는 5가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 그림 19는 원심모형실험의 하중 재하 실험으로부터 얻은 각 기초의 하중-침하곡선을 수치해석 결과와 비교한 것을 나타내었다. 각 기초에 대해 원심 실험 결과와 수치해석 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 말뚝지지 전면기초의 거동을 잘 묘사하고 있다고 판단된다.

그림 20은 말뚝지지 전면기초의 하중 분담률을 나타낸다. 원심모형실험 결과와 마찬가지로 수치해석 결과 역시 하중 증가에 따라 말뚝의 하중 분담률은 감소하고 있다. 수치해석 결과는 원심모형실험결과에 비해 더 작은 하중에서 하중분담률이 최대에 도달하지만, 하중이 커짐에 따라 하중분담률은 15%~30%로 수렴하는 경향을 나타낸다. 앞서 원심모형 결과(20~30%)와 상당히 근접하게 나타남을 알 수 있다. 하중분담률의 최대값은 다소 차이를 나타내고 있고, 그 이유는 다음으로 판단된다. 첫째는 말뚝과 지반의 접촉면을 정의하는 모델과 입력물성이 실제 거동과 차이, 둘째는 삼축실험을 바탕으로 정의한 지반의 비배수 전단강도가 실제와 차이, 셋째로 실험에서 오는 여러 오차(bending 등)의 영향 때문으로 판단된다.

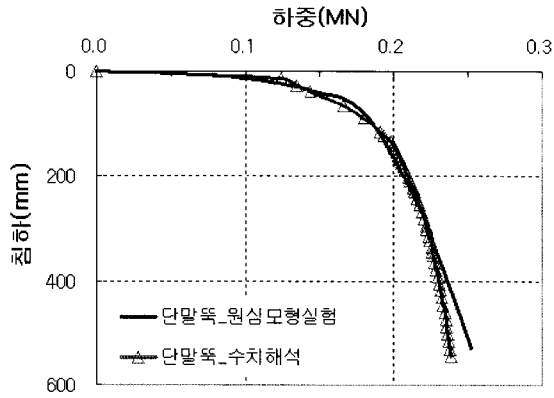
한편, 말뚝 수에 따른 기초판의 하중분담응력을 실험 결과와 비교하였을 때 매우 유사한 경향이 나타난 것을 확인하였고(그림 21), 작용하중에 대해 기초판이 분담하는 응력은 말뚝 수와 상관없이 일정함을 재차 확인하였다. 따라서 입력물성에 변화에 따른 영향요소에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

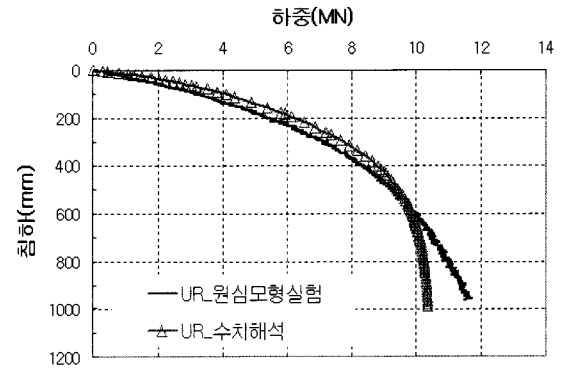
본 연구에서는 실험적 방법과 해석적 방법을 결합하여 신뢰성 있게 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하기 위하여 각 요소의 극한 지지력을 이용하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 원심모형실험과 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

첫째로, 단말뚝, 전면기초, 군말뚝, 말뚝지지 전면기초의 지지력을 구하기 위하여 원심모형실험을 수행하였다. 각 요소들의 하중-침하 곡선을 획득하였고, 이론적 방법과 비교하여 신뢰성을 확인하였다. 극한 지지력을 바탕으로 말뚝지지 전면기초의 지지력 예측에 필요한 계수( $\xi_{PR}$ ,  $\eta$ )를 획득하였다.  $\xi_{PR}$ 은 약 0.9~1.0 범위 내에 존재하였고,  $\eta$ 는 약 0.7~1.0 범위 내에 존재하였다. 각 계수  $\xi_{PR}$ 과  $\eta$ 는 극한 지지력에 대해서 일정 범위 내에 존재하였으며, 제안된 두 값을 이용하여 말뚝지지 전면기초의 지지력을 평가하고 예측 할 수 있다. 또한, 말뚝지지 전면기초의 하중분담 특성을 나타내는  $\alpha_{PR}$ 은 하중(침하)크기에 따라 약 1(100%)~0.2(20%)까지 변화하며, 하중초기에 말뚝의 분담률이 최고점에 도달하고, 하중이 커짐에 따라 대부분의 하중이 기초판에 의해 지지됨을 확인하였다.

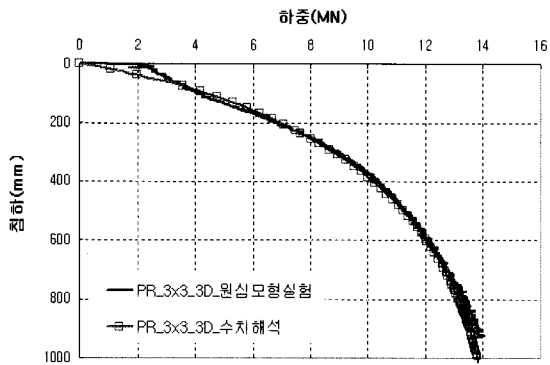
두번째로, 원심모형실험의 결과를 토대로 보정한 수



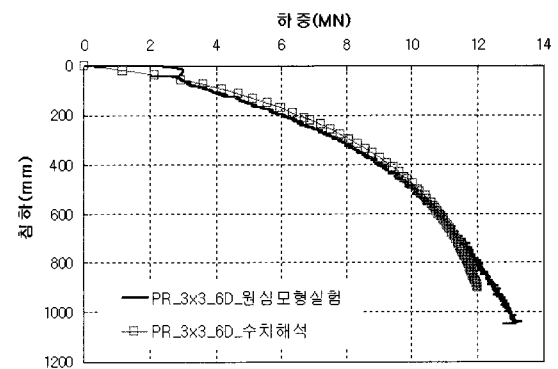
(a) 단말뚝



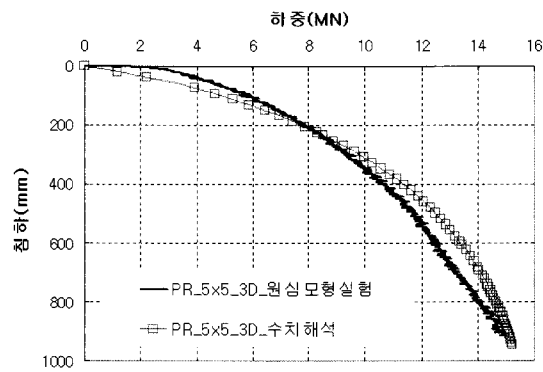
(b) 전면기초



(c) 말뚝지지 전면기초 3x3\_3D



(d) 말뚝지지 전면기초 3x3\_6D



(e) 말뚝지지 전면기초 5x5\_3D

그림 19. 각 기초의 하중-침하곡선의 비교

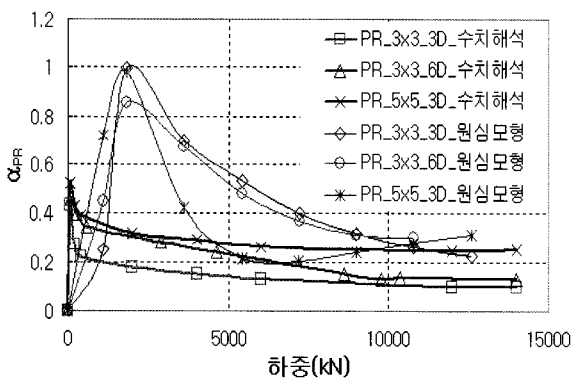


그림 20. 각 기초 별 하중분담률 비교

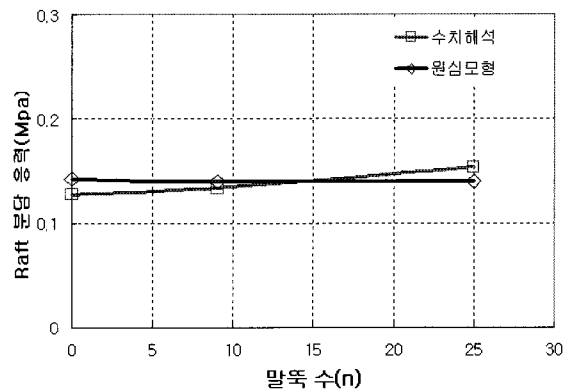


그림 21. 말뚝 수에 따른 기초판이 분담하는 응력 비교

치모델을 이용하여 말뚝지지 전면기초의 극한 지지력을 예측하는 연구를 수행하였다. 유한요소해석 결과 원심모형실험 결과와 상당히 비슷한 결과를 도출하였으며, 추후 몇 가지 보완점을 고려하여 말뚝지지 전면기초의 지지력을 신뢰성 있게 평가하고 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0080575).

## 참고 문헌

- 권오균, 오세봉, 김진복 (2005), 무리말뚝의 하중분담률에 관한 실험적 연구, *한국지반공학학회 논문집*, 제 21권 5호, pp.51-58.
- 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999), Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치, *대한토목학회 논문집*, 제 III-4권, pp.831-839.
- 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.143-150.
- 대한토목학회 (2001), *도로교 설계기준 해설 (하부구조편)*, 건설정보사.
- 박현일(2008), 말뚝의 비선형거동이 고려된 전면지지 말뚝기초 해석기법의 개발, *한국지반공학학회 논문집*, 제 24권 10호, pp.17-24.
- 이승현, 권오균, 오세봉, 김병일 (2003), 말뚝지지 기초판의 하중분담, *대한토목학회 논문집*, 제 23권 3c호, pp.143-150.
- 이승훈, 박영호, 송명준 (2007), 말뚝지지 전면기초의 설계를 위한 실용적 해석방법에 관한 연구, *한국지반공학학회 논문집*, 제 23권 12호, pp.83-94.
- 이진형, 정상섭 (2007), 연약지반에 시공된 Piled Raft 기초의 3차원 거동 분석, *한국지반공학학회 논문집*, 제 23권 5호, pp.63-75.
- 한국지반공학학회 (2007), *기초의 재하시험 기준 및 해설*, 구미서관.
- Atkinson J.H., and Salfors G. (1991), "Experimental determination of soil properties." *In Proc. 10th ECSMFE, Florence*, Vol.3, pp. 915-956.
- 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.
- Chin, F.K. (1970), "Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure." *Proc. II SouthEast Asian Conf. Soil Eng.*, Singapore, p.81.
- Brinch Hansen, J. (1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces." *Bulletin No.12*, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, pp.5-9.
- Cooke, R.W. (1986), "Piled raft foundation on stiff clays : A contribution to design philosophy," *Geotectonics*, 36(2), pp.169-203.
- Davies, M.C.R., and Parry, R.H.G. (1982), "Determining the shear strength of clay cakes in the centrifuge using a vane," *Geotechnique*, Vol.32, No.1, pp.59-62.
- Sanctis, L.D., and Mandolini, A. (2006), "Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.12, pp.1600-1610.
- Horikoshi, K., and Randolph, M.F. (1996), "Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay," *Geotechnique*, Vol.46, No.4, pp. 741-752.
- Katzenbach, R., Schmitt, A., Turek, J. (2005), "Assessing settlement of high-rise structures by 3D simulations", *Computer-aided civil infrastructure engineering*, Vol.20, pp.221-229.
- 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.
- Poulos, H.G. (2001), "Piled-raft foundation : Design and applications." *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.95-113.
- Randolph, M.F., and Murphy, B.S. (1985), "Shaft capacity of driven piles in clay", *Proceeding of offshore technology conference*, Houston, pp.371-278.
- 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.
- Reul, O., and Randolph, M.F. (2003), "Piled rafts in overconsolidated clay - Comparison of in-situ measurement and numerical analyses," *Geotechnique*, Vol.53, No.3, pp.301-315.
- Reul, O. (2004), "Numerical study of the bearing behavior of piled rafts." *International Journal of Geomechanics*, Vol.4, No.2, pp.59-68.
- Stewart, D.P. (1992), "Lateral loading of piled bridge abutments due to embankment construction," PhD thesis, the University of Western Australia, Perth.
- Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.

(접수일자 2009. 6. 9, 심사완료일 2009. 7. 28)