

원심모형 실험과 수치해석을 이용한 과압밀 지반에서의 piled raft 기초의 지지력 평가

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

박진오¹⁾, Jin-Oh Park, 추연옥²⁾, Yun-Wook Choo, 김동수³⁾, Dong-Soo Kim

¹⁾ KAIST 건설·환경공학과 석사, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²⁾ KAIST 건설·환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

³⁾ KAIST 건설·환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

SYNOPSIS : Piled raft foundation is a geotechnical composite construction to support the superstructure by pile-soil-raft interaction. General conventional design for piled raft doesn't consider the contribution of a raft. This is very conservative and requires more piles to satisfy the factor of safety. It is important to evaluate the load sharing features of piled raft. In this research, this characteristics of piled raft evaluated using both centrifuge and numerical modelings. The ultimate bearing capacity of piled raft foundation was also evaluated and predicted through comparisons of ultimate bearing capacity of single pile (SP), unpiled raft (UR), freestanding pile group (FPG) and piled raft (PR). ξ_{pr} and η were determined by centrifuge model tests to simply evaluate the ultimate bearing capacity of piled raft and bearing capacity of piled raft was predicted using the calibrated numerical model based on the centrifuge tests and laboratory tests data.

Keywords : piled raft, ultimate bearing capacity, centrifuge test, load sharing

1. 서론

기초의 말뚝 기초 설계는 지반 조건에 따라 raft의 지지력 반영 유무가 달라진다. 국내는 지반 특성상 기반암의 깊이가 10~30m내에 존재하므로 주로 선단지말뚝 기초를 사용하여 상부구조물을 지탱하였다. 하지만, 국내 일부 지역에서는 60m이상에서 기반암이 존재함으로 비경제적인 설계가 이루어질 수밖에 없다. 이럴 경우에는 raft의 지지력을 고려한 설계가 이루어져야하고 여기서 piled raft(PR) 기초의 개념이 등장하였다. 기존 많은 연구자들에 의해 유럽일부국가와 호주, 일본등지에서 raft의 하중분담 특성과 침하감소효과에 관한 연구들이 이루어져왔다. 하지만 본 연구에서는 실험적 방법과 해석적 방법을 결합하여 piled raft(PR) 기초의 지지력을 보다 간단히 평가하고 예측하는데 있다. 첫째, 간접적인 방법으로 piled raft(PR) 기초의 극한 지지력을 평가하고자 한다. 단말뚝(Single Pile, SP)과 전면기초(Unpiled Raft, UR)의 극한 지지력으로부터 간접적으로 piled raft(PR) 기초의 지지력을 평가하기 위해 필요한 계수들(η, ξ_{PR})을 결정하게 된다. 이 계수들을 결정함으로써 복잡한 말뚝-raft-지반의 복잡한 상호작용을 평가하기보다는 실험적인 결과에 기인하여 간편하게 예측할 수 있게 하는 것이다. 또한, 말뚝으로 전이되는 하중을 측정하여 말뚝이 분담하는 하중 분담률을 획득하여 그 경향성을 파악하고 기존 결과와 비교를 통해 실험의 검증 및 추후 연구를 위한 자료로 사용하고자 한다.. 둘째, 원심모형 실험과 실내실험의 결과를 바탕으로 calibration한 수치모델을 사용하여 원심모형실험의 한계를 보완하면서 piled raft 기초의 지지력을 예측하는 것이다. 궁극적으로 원심모형실험과 수치해석(유한요소해석)의 결

과를 바탕으로 piled raft(PR) 기초의 지지력을 신뢰성 있게 평가하고 예측하는 것이다.

2. 원심모형실험

2.1 실험 목적 및 개요

본 연구서는 국토 해양부 지원 KOCED 프로그램에 의해 KAIST에 설치된 원심모형실험장비(그림 1.)를 사용하였으며, 상사비(표 1)에 맞는 축소 모형의 기초를 제작하여 실험을 수행하였다.



그림 1. KAIST 원심모형기

표 1. 원심모형실험에 적용된 상사비

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

본 실험의 목적은 piled raft(PR) 기초의 극한 지지력을 간접적으로 평가하는 것에 있다. 이를 위해 piled raft(PR), 단말뚝(Single pile, SP), 전면기초(Unpiled raft, UR), 군말뚝(Freestanding pile group, FPG) 각각의 극한 지지력을 평가한다. 단말뚝과 군말뚝의 극한 지지력으로부터 식 (1)을 이용하여 군말뚝 효율(η)을 추정하고, 단말뚝, 전면기초 및 piled raft기초의 극한지지력으로부터 de Santics et al.(2006)에 의한 식 (2)를 사용하여 말뚝-raft 상호작용계수(ξ_{PR})을 추정할 수 있다. 결국 각 기초의 극한 지지력으로부터 η , ξ_{PR} 값을 추정함으로써, 단말뚝(Single pile, SP)과 전면기초(Unpiled raft, UR)의 극한 지지력만으로 piled raft(PR) 기초의 극한 지지력을 평가할 수 있게 된다.

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

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

여기서, $Q_{FPG,ult}$, $Q_{PR,ult}$, $Q_{UR,ult}$, $Q_{SP,ult}$ 는 각각 군말뚝, piled raft, 전면기초, 단말뚝의 극한지지력이고, n 은 말뚝 수, η 는 군말뚝 효율, ξ_{PR} 은 말뚝-raft 상호작용 계수이다.

또한, raft 또는 말뚝의 하중분담을 정량화하기 위해 piled raft 계수(coefficient)가 사용된다. 이는 재하 하중($Q_{Applied}$)에 대한 각 말뚝이 지지하는 지지력 합($\sum Q_{pile}$)의 비(ratio)로 나타나며 식 (3)으로 표현된다. 말뚝으로 전이되는 하중을 추정하여 말뚝 하중분담률을 확인하고, 그 경향성 및 기존 연구결과와 비교 검토하고자 한다. 이러한 목적 달성을 위해 원심모형 실험을 실시하였고, 각 단계별 실험 내용은 2.3절에서 설명하였다.

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

표 2. 원심모형실험 계획

실험	기초 종류(말뚝의 수)	말뚝 간격	Raft 두께
1	(Un)Capped Single pile, Unpiled raft	-	15
2	Piled raft(9), Freestanding pile group(9)	3D	15
3	Piled raft(9), Freestanding pile group(9)	6D	15
4	Piled raft(25), Freestanding pile group(25)	3D	15

각 단계별 절차를 통해 한 실험이 마무리 되며, 반복되는 실험의 조건은 항상 일정하게 유지하였다. 총 4회의 원심모형 실험이 실시되었으며, 그 내용은 표 2.에 나타내었다. 실험 계획에서 말뚝 개수와 말뚝의 간격을 변수로 두고 각 실험에 대한 η , ξ_{PR} 을 구하고 그 경향성을 파악하고자 하였으며, α_{PR} 즉, 말뚝의 하중분담률을 얻고자 하였다. 각 모형 기초에 대한 자세한 내용은 2.2절에 설명하였다.

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 제작되었다. Piled raft(PR) 기초의 지지력을 평가하기 위해서 사용되는 기초는 총 4가지 형태이며 각각의 기초의 제작 대해 설명하고자 한다.

단말뚝(Single pile, SP)은 Cap(raft)의 존재 유무에 따라 Uncapped 단말뚝과 Capped 단말뚝으로 각각 나누어 제작하여 cap(raft)의 효과를 확인하고자 하였다. 모형말뚝은 외경 10mm, 내경 8mm, 길이 170mm의 튜브형태로 제작 되었으며, 이는 원형(prototype) 구조물의 외경 600mm, 내경 200mm 길이 9m 치수를 가진 콘크리트 말뚝이다. 또한, 전면기초(Unpiled raft, UR)은 폭 150mm, 길이 150mm, 두께 15mm의 판상 형태로 제작 하였으며 이는 폭과 길이가 각각 9m, 두께 1.22m에 해당하는 콘크리트 raft 이다. Raft와 지반의 상대 강성 K_r 을 P.T. Brown(1975)의 제안식(식 (4))에 따라 평가해 본 결과 강성 1.2로 그가 제안한 0.001(완전 연성)~10(완전 강성)의 범위로 볼 때 충분히 강성이 크다고 판단되고, 따라서 본 실험에서 raft가 강체로 거동한다고 가정할 수 있다.

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

여기서, E_r , E_s 은 raft와 지반의 탄성계수, ν_r , ν_s 은 raft와 지반의 프아송비, L_r , B_r , t_r 은 raft의 길이, 폭, 두께를 나타낸다.

군말뚝(Freestanding pile group, FPG)과 piled raft(PR) 기초는 말뚝과 raft를 체결하여 모사하였으며, 각각의 말뚝을 나사식 형태로 raft와 강결 체결함으로써 말뚝머리 고정에 해당하는 현장조건을 모사하였다.

2.2.2 지반

모형지반은 kaolin 점토를 이용하여 조성하였다. 사용한 kaolin은 정제된 판상의 결정 구조를 가진 분말 형태의 제품으로 소성지수(PI)가 35로 통일 분류법상에서 CH로 분류되었으며, 단위중량은 16.5kN/m³으로 측정되었다. 모형지반은 다음과 같은 순서로 조성되었다.

- ① 원형 토조에 모래 배수층을 약 50mm 두께로 조성.
- ② 함수비 120%의 슬러리(slurry)상태의 점토를 550~600mm 높이로 조성.
- ③ 점토 높이 중앙에 간극 수압계를 설치 및 20mm 두께의 상부 모래 배수층 조성.
- ④ 1축 압밀기(1D consolidometer)를 이용하여 선행 압밀(최대 선행압밀 응력 170kPa)

2.3 실험 절차

원심모형 실험은 다음과 같이 총 5단계로 구분되어 진행되었다. ① 원심모형 실험 전 기초 및 지반의 모델링, ② 60g에서의 재압밀, ③ 1g에서의 모형기초의 설치, ④ 60g에서의 하중 재하 실험, ⑤ 실험 후 1g에서의 배인 실험 및 삼축실험.

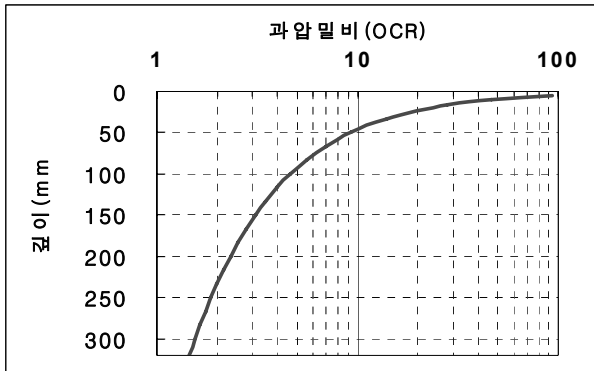


그림 2. 실험 중 깊이별 지반의 과압밀비(OCR)

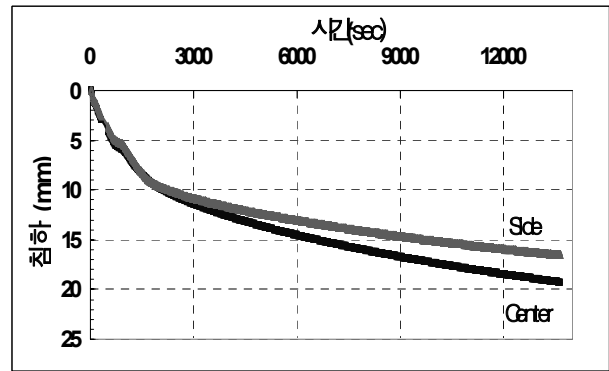


그림 3. 재압밀 중 시간-침하 곡선

원심모형 실험 준비가 끝나면, 1g에서 단계별로 가속도를 증가시켜 목표 가속도인 60g까지 약 2.5g/min 속도로 천천히 증가시킨다. 이는 갑작스런 가속도 증가로 인한 연약한 점토 지반의 교란 및 변형을 억제하기 위함이다. 60g 가속도에서 약 4시간 동안 지반은 자중에 의해 압밀이 진행되고, 이로 인해 지반은 과압밀 점토가 된다. 지반의 깊이에 따른 과압밀 분포를 측정된 단위중량으로 추정하면 그림 2와 같다. LVDT를 이용하여 모형 지반 표면의 중앙과 바깥에 각각 측정하였다. 자중 압밀동안 지반은 약 20mm에 침하하였고 그림 3.은 재압밀 과정 동안 시간(t)-침하(mm) 곡선을 나타내고 있다. 위 그림 3.에서와 같이 4시간의 재압밀 이후에도 침하는 계속 발생하고 있어, 침하량을 이용한 압밀도 평가법을 사용하여 압밀도를 평가하여 압밀 종료시점을 판단하였다. 표 3.에 정리된 바와 같이 세 가지 다른 평가법에 의한 압밀도는 94~103%를 보였고, 충분히 압밀이 진행되었다고 판단된다.

표 3. 4시간 재압밀에 따른 압밀도 평가

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

4시간의 재압밀이 끝나면 1g 상태에서 모형 기초를 설치한다. 하중재하기(Penetrometer)를 이용하여 모형 기초를 설치하였고, 0.5mm/sec 속도로 관입 시켰다.(그림 4.) 기초 설치 후 지반의 개략적 단면은 그림 5.과 같다. 모형 기초의 설치 후 다시 1시간가량 재압밀하는 과정을 거친다. 1g에서 기초를 설치하는 시간 동안 지반의 응력 해방(Stress release)에 따라 부풀어 오르게(Rebound) 된다. 부풀어 오른(Rebound)양은 약 7~8mm로 전체 침하량의 40% 이상 될 만큼 상당한 양이므로 기초 설치 전 압밀 단계의 침하량과 비슷한 수준으로 압밀 시킨다. 약 1시간의 압밀을 통해서 지반의 높이가 4시간 재압밀 단계와 비슷한 수준에 이르면 하중 재하 실험을 준비한다.

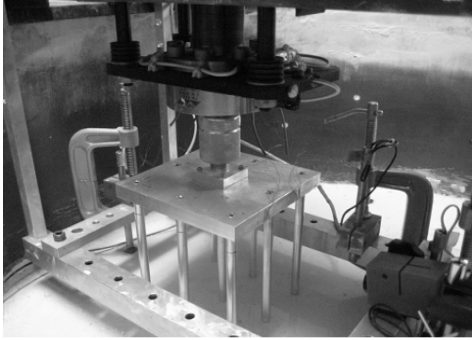


그림 4. 1g에서 기초의 설치 장면

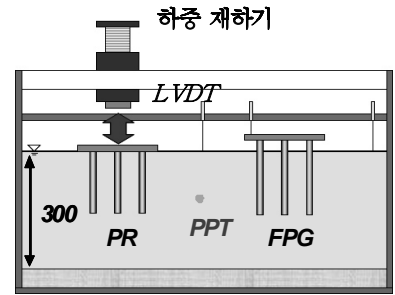
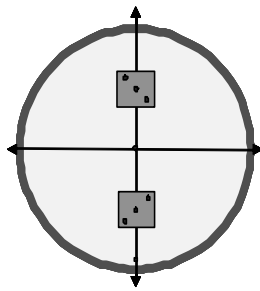


그림 5. 기초 설치 후 지반의 평면도 및 단면도

각 기초의 하중 재하 실험은 하중 재하기를 이용하여 0.1mm/sec 속도로 실시하였다. 단말뚝(Single pile, SP) 및 전면기초(Unpiled raft, UP)의 경우에는 한 번씩 각각 하중 재하 실험이 수행되었다. 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)과 piled raft(PR) 기초의 하중 재하 실험을 위해서는 한 기초 시스템으로 연속적으로 하중을 재하하는 방식을 택하였다. 최초 계획 시에는 각각의 기초(FPG, PR)를 별도로 준비하여 하중 재하 실험을 실시하였지만, piled raft(PR)의 raft가 지반과 접촉 직전까지의 지지거동이 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)과 거의 일치하는 것을 그림 6.와 같이 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 170mm의 말뚝을 가진 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)를 사용하여 150mm 설치한 후 하중 재하 실험(약 20mm 변위 제어)을 실시하고, 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)의 하중 재하 실험이 끝나면 일정시간 압밀 후 piled raft(PR) 기초로 사용하여 하중 재하 실험을 수행하였다.

하중 재하 실험이 끝나면 원심모형실험기기를 멈추고 1g상태에서 Torvane을 이용하여 vane 실험을 실시하였고, 블록 시료를 채취하여 지반의 구속압 및 과압밀비를 고려하여 CU실험을 실시하였다.

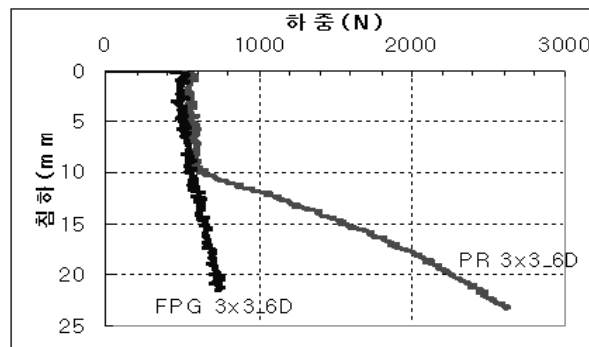


그림 6. PR과 FPG의 하중-침하 곡선의 비교

3. 실험결과

3.1 지반의 강도 평가

앞서 기술한 방법을 이용하여 지반의 비배수 전단강도를 추정하였다. 깊이별 지반의 비배수 전단강도를 기존 경험식들과 비교하여 그림 7.에 나타내었다.

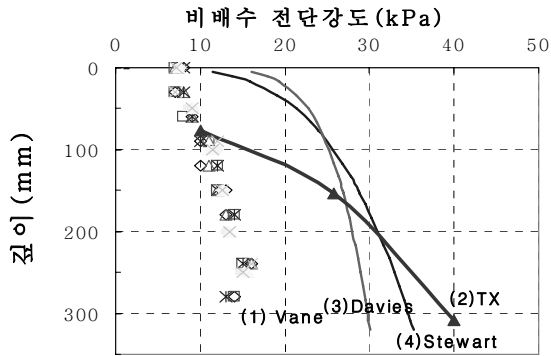


그림 7. 깊이별 지반의 비배수 전단강도 분포

그림 7의 (1),(2)는 각각 베인(Vane) 실험과 삼축실험의 결과값을 나타내며, 그림 7의 (3),(4)는 그 결과와 기존 실험식과 비교해보기 위해 두 가지 식을 사용하였다. 식 (5)와 식 (6)은 각각 Davies et al.,(1982), Stewart(1992)의해 제안된 식이다. 베인 실험 결과는 두 제안식과 비교했을 때 상대적으로 작은 강도를 띄고 있으며 따라서, 응력 해방에 따른 지반의 비배수 강도가 감소된 것으로 판단된다. 따라서, CPT나 T-bar등을 이용한 in-flight 상태의 비배수 강도를 추정할 필요가 있다. 본 실험에서는 삼축 실험 결과를 바탕으로 수치해석의 비배수 전단강도로 사용하였다.

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

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

여기서 σ_v' 는 수직유효응력이고, OCR은 과압밀비를 나타낸다.

3.2 하중 재하 실험결과

3.2.1 단말뚝 및 전면기초

2.2.1절에 설명했듯 단말뚝(Single pile, SP)의 하중 재하 실험은 크게 Uncapped SP와 Capped SP 두 가지로 분류하여 수행하였다. 각각의 단말뚝 하중 재하 실험결과를 그림 8.에 나타내었다.

Chin(1970)과 Brinch-Hansen(1961) 방법에 의해 각각의 단말뚝(Single pile, SP)의 극한 지지력을 구하였다. Uncapped SP의 극한 지지력은 약 70N(원형 : 0.42MN)으로 나왔으며, 본 실험의 신뢰성을 확인하기 위해 이론적 방법으로 말뚝의 지지력을 산정해 보았다. α -method(Randolph et al., 1985)를 이용하여 단말뚝(Single pile, SP)의 주변 마찰력을 산정하고, 말뚝의 선단 지지력은 Canadian Foundation Engineering Manual에서 추천하는 지지력계수 $N_t=7$ 을 사용하여 구하였다. 깊이별 비배수 전단강도는 삼축실험 결과를 사용하였다.

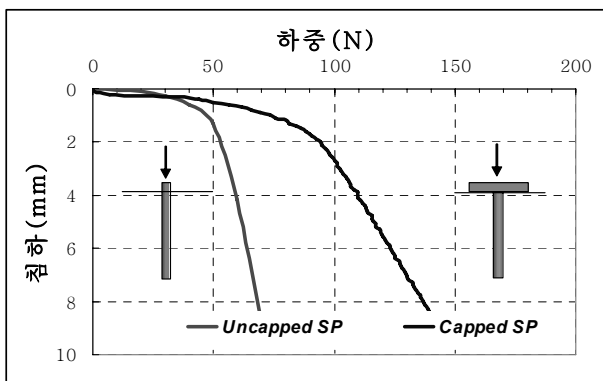


그림 8. 단말뚝(SP)의 하중-침하 곡선

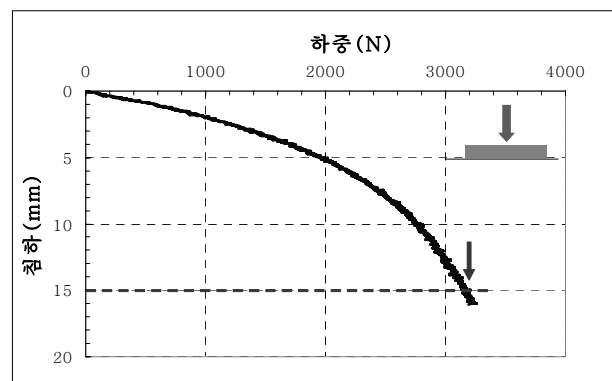


그림 9. 전면기초(UR) 기초의 하중-침하 곡선

그 결과 주변 마찰력은 약 60N, 선단 지지력은 약 18N으로 총 지지력은 78N으로 산정되었고, 두 결과를 비교했을 때 비교적 신뢰성 있는 실험이 이루어졌다고 판단된다. Capped SP의 경우 극한 지지력

이 150N으로 결정되었다. Uncapped SP에 비해 두 배 이상의 지지력을 가지는 것을 알 수 있다. 이것으로 cap(raft)의 하중 분담 할 수 있는 효과를 확인 할 수 있었다.

전면기초(Unpiled raft, UR)의 하중-침하 곡선을 그림 9.에 나타내었다. 전면기초(Unpiled raft, UR)의 극한 지지력은 Cooke(1986)이 제안한 $0.1B_r$ 의 침하량에 해당하는 지지력으로, 약 3206N으로 결정되었다. 역시, Terzaghi(1943)가 제안한 점토지반, 수직하중, 비배수 조건 등에서 적용되는 얇은 기초의 지지력 산정식을 이용하여 전면기초의 극한지지력을 산정한 결과 3135N이 나왔으며 이는 실험값과 상당히 근사한 값을 나타내고 있다.

3.2.2 군말뚝 및 piled raft 기초

각 실험에 해당하는 기호는 다음과 같은 방법으로 나타내었다. FPG_3x3_3D는 말뚝 개수가 9개이고 간격이 3D(D=0.6m, 말뚝 직경)을 나타내는 군말뚝 기초이다. 또한 9*SP는 단말뚝(Single pile, SP)의 하중-침하 곡선에 9배한 것을 나타낸다.

군말뚝(Freestanding pile group, FPG)의 하중-침하 곡선은 그림 10.과 같이 나타났다. 말뚝수의 증가에 따라 지지력이 증가하는 경향을 보이며, 5x5_3D가 가장 큰 지지력을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 단말뚝(Single pile, SP)과 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)을 비교하기 위해 단말뚝(Single pile, SP)의 하중-침하 곡선에 말뚝 수를 고려하여 n배한 하중-침하 곡선과 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)의 하중-침하 곡선과 비교하여 보았다. 그 결과 말뚝간 간격이 3D인 군말뚝(Freestanding pile group, FPG)을 각각 9*SP와 25*SP와 비교 했을 때 지지력이 상당히 감소하였다. 이는 말뚝과 말뚝, 말뚝과 지반과의 상호작용에 의해 나타난 현상이라고 판단된다. 6D의 경우에도 약간의 지지력 감소가 나타나지만, 극한 지지력을 평가하였을 경우는 거의 동일한 값을 가졌다. 즉, 군말뚝 효율(Group efficiency)이 1에 가까움을 나타내는 것이다.

Piled raft(PR) 기초의 하중-침하 곡선을 전면기초(Unpiled raft, UR)와 비교하여 그림 11.에 나타내었다. 그림 12.를 살펴보면 모든 piled raft(PR) 기초는 전면기초(Unpiled raft, UR)보다 지지력이 약 8~28% 정도의 증가량을 보이고 있다. 각 말뚝에 진이된 하중을 합하여 그림 11.에 함께 나타내었다. Σ Pile 5x5_3D의 경우는 변형율계 신호가 좋지 못하여 다른 두 경우와 비교할 때 신뢰성이 다소 떨어진 다.

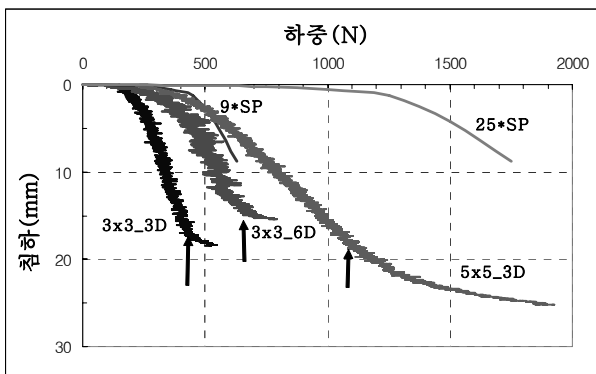


그림 10. 군말뚝(FPG)의 하중-침하 곡선

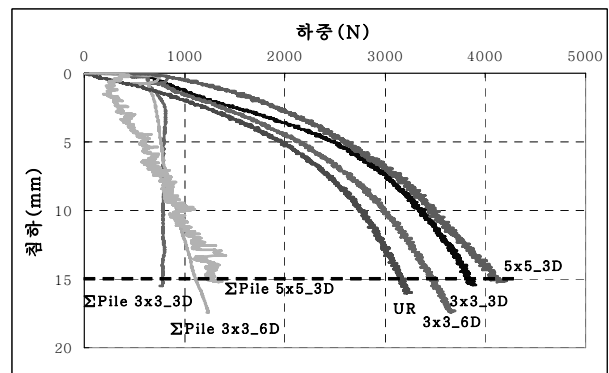


그림 11. Piled raft 기초의 하중-침하 곡선

침하량이 작을 때는 말뚝이 상당 부분 지지하는 것으로 나타났지만, 침하가 커짐에 따라 대부분의 하중을 raft가 분담하여 지지함을 알 수 있다. 다음 절에서 하중분담에 관한 내용을 자세히 설명하도록 하겠다. 한편, 각 군말뚝의 극한 지지력은 Chin(1970), Brinch-Hansen(1961) 두 가지 방법에 의해 결정되었으며, piled raft(PR) 기초의 극한 지지력은 Cooke(1986)이 제안한 $0.1B_r$ 의 침하량(점선)에 해당하는 지지력으로 판단하였다.

3.3 하중 분담 특성 및 계수의 결정

앞 절에서는 piled raft(PR) 기초의 하중-침하 곡선으로부터 극한 지지력을 산정하였다. 본 절에서는 말뚝으로부터 전이되는 축력을 변형률로부터 계산하여 말뚝이 분담하는 하중을 산정하여 보았다. 이들 결과로부터 말뚝이 분담하는 하중을 하중 분담률(α_{PR})로 나타내었다. 그림 12.은 하중의 증가에 따른 하중분담률을 각 piled raft(PR) 기초에 대해 도시하였다.

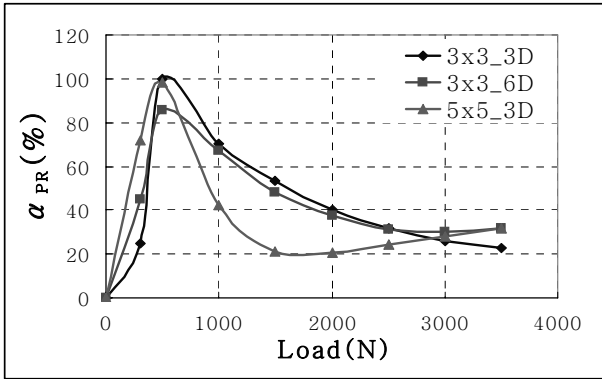


그림 12. 하중 증가에 따른 하중 분담률

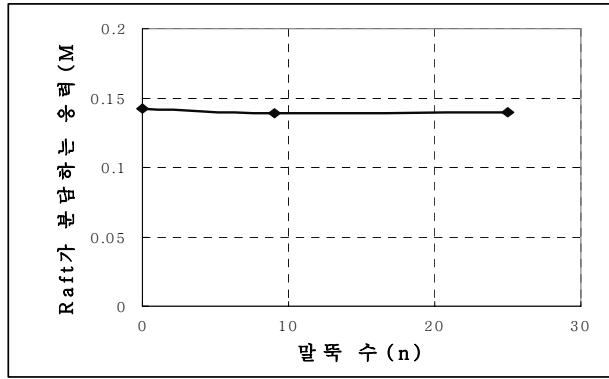
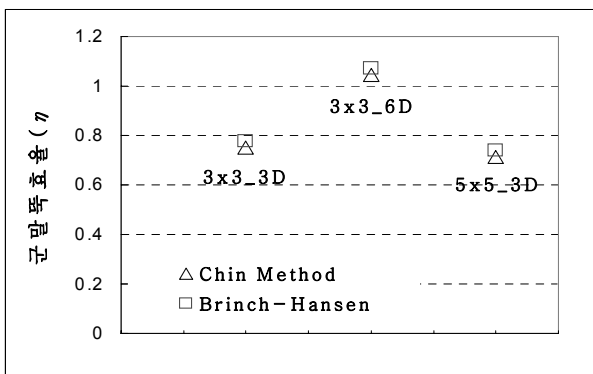


그림 13. 말뚝 수 증가에 따른 raft가 분담하는 응력

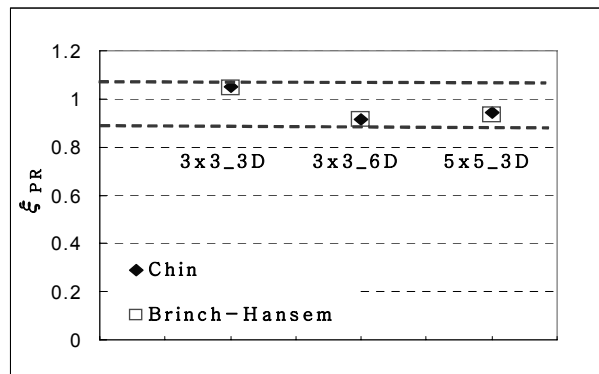
하중에 따른 하중분담률은 하중이 적을 때는 대부분의 하중은 말뚝이 분담하고($\alpha_{PR}=84\sim 98\%$), 하중이 점차 커짐에 따라 분담량이 감소하다가 일정한 값으로 수렴($\alpha_{PR}=22\sim 30\%$)하는 형태로 나타났다. 기존의 연구 결과와 흡사한 경향성을 나타내는 것을 볼 수 있다. O. Reul(2004)의 수치해석 결과에서는 최대 60~90% 최소 30%의 하중 분담률을 나타내었다. 실험 결과에서 초기 하중 분담률이 다소 크게 발생한 것은 변형율계의 실험상 오차라고 판단된다.

Piled raft(PR) 기초의 말뚝이 분담하는 하중 분담률을 극한 지지력에 해당하는 값으로 산정했을 때 말뚝 수의 증가에 따라 말뚝이 분담하는 하중 분담률이 증가하는 경향을 보였다. 즉, raft의 하중 분담률이 감소한다는 것을 의미한다. 그러나 말뚝 수의 증가에 따라 전면기초의 단면적은 감소하게 되므로, raft가 분담하는 응력은 일정한 것을 그림 13.을 통해 확인할 수 있다. 즉, 말뚝의 증가에 따라 raft에 작용하는 응력은 일정하며 결국 각 piled raft(PR) 기초 지지력의 증가는 말뚝의 증가, raft 면적의 증가에 따라 증가한다고 판단된다.

한편, piled raft(PR) 기초의 지지력을 식 (2)를 이용하여 간단히 추정하기 위해서 필요한 계수인 균 말뚝 효율(η)과 말뚝-raft 상호작용 계수(ξ_{PR})을 산정하였다. 그림 14.는 극한 지지력에 대해 기초별 각 계수의 평가 결과이다.



(a) ξ_{PR} 계수



(b) 균말뚝 효율(η)

그림 14. Piled raft 기초 지지력을 산정을 위한 각 계수의 결정

ξ_{PR} 계수는 약 0.91~1.04로 결정되었으며 이는 기존 연구 결과인 0.83~1.04 (After Cooke,1986)보다, 좁은 범위 내에서 존재함을 확인할 수 있으며 piled raft(PR) 기초의 극한 지지력은 말뚝 간격에 따라 각 요소의 합에 약 90%~100%에 해당된다. 군말뚝 효율(η)의 경우는 약 0.71~1.07의 값을 가졌으며, 3D의 경우는 말뚝 상호작용에 의한 지지력 감소가 나타난 것을 알 수 있으며, 6D는 그 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 수치해석 및 결과

4.1 모델링 및 입력 물성의 선정

수치해석은 PLAXIS 3D Foundation을 사용하여 이루어졌으며, 모형실험의 조건을 원형(prototype) 조건으로 변환하여 모델링 하였다. 그림 15.는 piled raft(PR) 기초 및 지반을 모델링한 예이다.



그림 15. Piled raft 기초 지지거동 예측을 위한 3차원 유한요소망

수치해석을 위해 사용된 기초 크기 및 입력 물성은 표 4.와 같다. 말뚝의 탄성계수는 국내외 해석 시 사용하는 일반적 값의 평균인 29GPa로 적용하고 축강성(EA)을 고려하여, 말뚝 외경(D_{out})은 0.6m, 내경(D_{in})은 0.2m의 콘크리트 말뚝으로 가정하였다. 말뚝과 지반 사이의 접촉면 거동을 모사하기 위해 가상의 두께를 갖는 접촉면 요소가 사용되고, 접촉면 요소의 내부 마찰각과 점착력은 R_{inter} 라는 감소계수를 이용하여 지반의 강도정수보다 감소된 값을 사용한다. 본 연구에서는 연약한 점토에 대해 매뉴얼 추천하는 0.5를 사용하였다. 전면기초(Unpiled raft, UR)는 판(floor)요소를 이용하여 모델링 하였으며, 탄성계수는 말뚝과 동일한 29GPa를 사용하였고 폭과 너비는 9m씩이며, 두께는 휨 강성(EI)을 고려하여 1.22m로 결정하였다. 말뚝과 raft 요소는 선형탄성 모델이 적용 되었으며, 단위중량은 0으로 가정하였다. 이는 원심모형실험 시 기초를 하중재하기에 고정시킨 상태에서 하중 재하 실험을 수행하였으므로 자중이 무시되었다. 비록, 실제의 거동과는 차이가 있으나, 원심모형실험과의 비교를 위해 자중은 무시하였다. 푸아송 비(Poisson's ratio, ν)는 각각 0.15로 가정하였다.

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 ³)	1.65
내경(m)	0.2	두께(m)	1.22	비배수 전단강도(kN/m ²)	그림 16.(a)
단위중량(kN/m ³)	0	단위중량(kN/m ³)	0	내부 마찰각	0
탄성계수(GPa)	29	탄성계수(GPa)	29	ν	0.496
ν	0.15	ν	0.15	탄성계수(kN/m ²)	그림 16.(b)

지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 비배수 전응력 해석(Undrained total stress analysis)을 수행

하였다. 해석을 위해 필요한 지반 물성치는 크게 깊이별 비배수 전단강도와 탄성계수이다. 지반의 깊이는 20m, 지하수위는 0m, 단위중량은 16.5kN/m^3 , 정지토압계수(K_0)는 0.5로 모델링하였다. 기초의 지지거동을 예측하기 위해 지반의 입력물성을 신뢰성 있는 값을 정의하는 것이 중요하다. 비배수 전단강도는 앞서 CU실험을 통해서 획득한 결과 값을 바탕으로 수치해석에 사용하였다. 탄성계수는 공진주/비틀전단(RC/TS)실험 결과를 바탕으로 추정하였다. Atkinson et al,(1991)이 제안한 기초의 축변형률 범위(0.01%~0.5%) 내에서, 예비 수치해석을 통해 0.06~0.1% 축변형률에 대한 탄성계수를 사용하였다. 해석에 사용된 깊이별 비배수 전단강도와 탄성계수는 그림 16.에 나타내었다. 특히 지표면근처에서 일정한 값을 준 것은 표면이 너무 연약하여 기초 설치가 되지 않는 오류를 보완하기 위해서 이다.

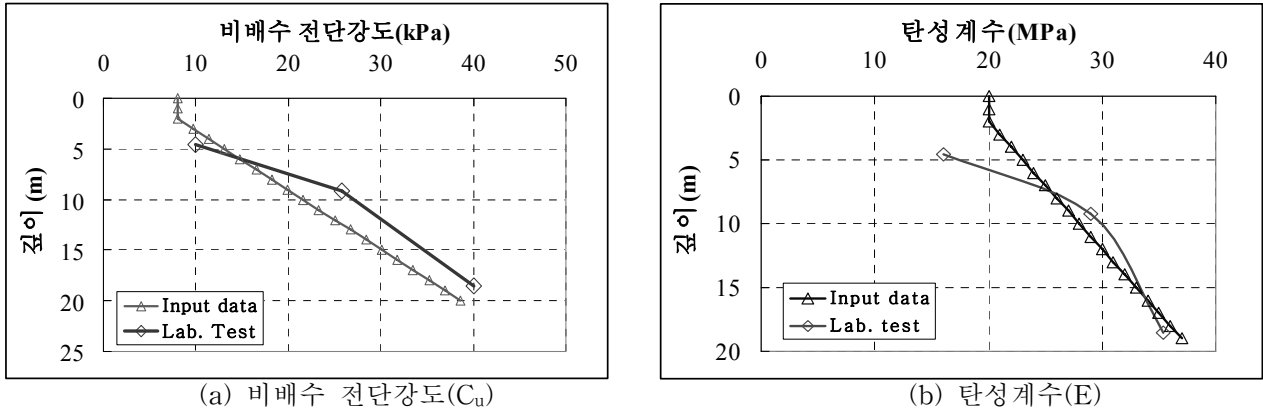


그림 16. 깊이에 따른 비배수 전단강도 및 탄성계수

4.2 수치해석과 원심모형실험 결과의 비교 및 고찰

원심모형실험결과에 대한 비교를 위해 실험에 해당하는 5가지 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 그림 17.(a~e)는 원심모형실험의 하중 재하 실험으로부터 얻은 각 기초의 하중-침하곡선을 수치해석 결과와 비교한 것을 나타내었다.

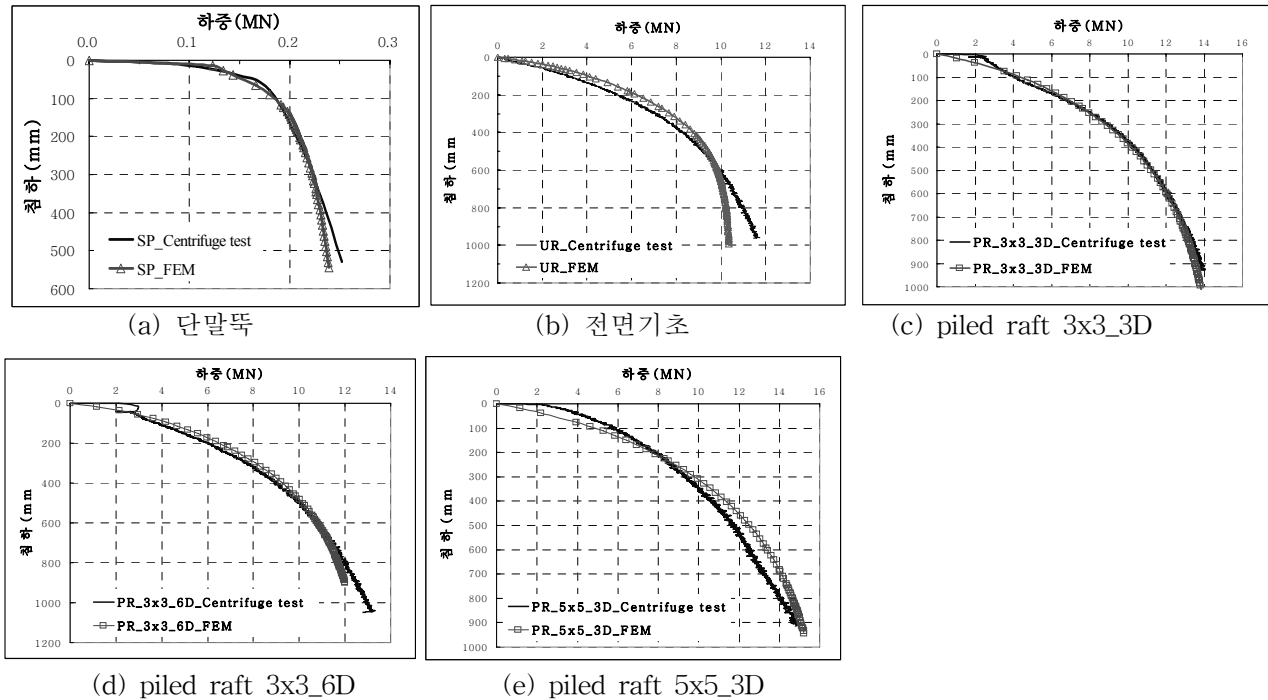


그림 17. 각 기초의 하중-침하곡선의 비교

각 기초에 대해 원심 실험 결과와 수치해석 결과는 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 추후 piled raft(PR) 기초 지지력 예측을 위한 가능성을 확인 할 수 있었다.

하지만, 하중 분담 특성에서는 다소 차이가 나타났다. 그림 18.은 각 piled raft(PR) 기초의 하중 분담률을 나타낸 것이다. 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. 하지만, 하중분담률의 최대값에서는 다소 차이를 나타내고 있다. 이유는 세 가지 정도로 생각된다. 첫째는 말뚝과 지반의 접촉면을 정의하는 모델 또는 값이 실제 거동을 반영하지 못하는 것이다. 둘째는 삼축실험을 바탕으로 정의한 지반의 비배수 전단강도가 실제 값과 차이로 인해 발생한 것으로 판단되며, 셋째로 실험에서 오는 여러 오차(bending 등)의 영향으로 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

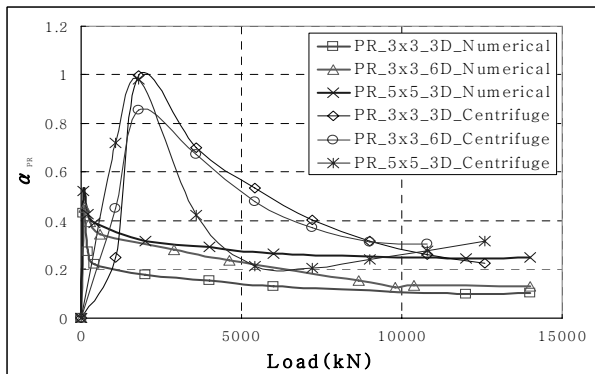


그림 18. 각 기초 별 하중분담률 비교

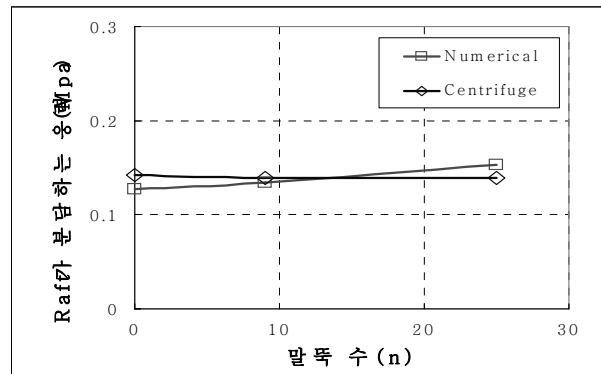


그림 19. 말뚝 수에 따른 Raft가 분담하는 응력 비교

한편, 말뚝 수에 따른 raft의 하중분담응력을 실험결과와 비교하였을 때 매우 유사한 경향이 나타난 것을 확인하였고(그림 19.), 작용하중에 대해 raft가 분담하는 응력은 말뚝 수와 상관없이 일정함을 재차 확인하였다. 추후 연구를 통해 입력물성에 변화에 따른 영향요소 연구를 통한 다양한 경우에 대해 piled raft(PR) 기초의 지지력을 예측하고, 원심모형 실험으로 검증을 통해서 현장에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실험적 방법과 해석적 방법을 결합하여 신뢰성 있게 piled raft(PR) 기초의 지지력을 평가하기 위하여 piled raft(PR) 기초의 각 요소를 이용하여 극한 지지력을 예측하는 방법에 대해 고려하였다. Piled raft(PR) 기초의 지지력을 보다 간단한 방법으로 구하기 위해 piled raft(PR) 기초 각 요소들의 하중-침하 곡선을 획득하였다. 각 하중-침하 곡선은 이론적 방법과 비교하였을 때 그 신뢰성을 확인 할 수 있었고, 각각의 극한 지지력을 바탕으로 piled raft(PR) 기초의 지지력 예측에 필요한 계수를 획득하였다. ξ_{PR} 은 약 0.9~1.0 범위 내에 존재하였고, η_n 는 약 0.7~1.0 범위 내에 존재하였다. 각 계수 ξ_{PR} 과 η_n 는 극한 지지력에 대해서 일정 범위 내에 존재하였으며, 제안된 두 값을 이용하여 piled raft(PR) 기초의 지지력을 평가하고 예측 할 수 있다고 판단된다. 또한, piled raft(PR) 기초의 하중분담 특성을 나타내는 α_{PR} 은 하중(침하)크기에 따라 약 1(100%)~0.2(20%)까지 변화하며, Raft가 분담하는 응력은 말뚝 수와 무관하였다. 수치해석과 비교 결과 정량적인 차이는 발생하였으나, 그 경향성은 비슷하였다.

원심모형실험의 결과를 토대로 calibration한 수치모델을 이용하여 piled raft(PR) 기초의 극한 지지력을 예측하는 연구를 수행하였다. 유한요소해석 결과 원심모형실험 결과와 상당히 비슷한 결과를 도출하였으며, 추후 몇 가지 보완점을 고려하여 piled raft(PR) 기초의 지지력을 평가하고 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

1. 이승훈, 박영호, 송명준 (2007), "말뚝지지 전면기초의 설계를 위한 실용적 해석방법에 관한 연구", **한국지반공학회 논문집**, 제23권 12호, pp.83-94
2. 이진형, 정상섭 (2007), "연약지반에 시공된 Piled Raft 기초의 3차원 거동 분석", **한국지반공학회 논문집**, 제23권 5호, pp.63-75.
3. Atkinson J.H., and Salfors G. (1991), "Experimental determination of soil properties." *In Proc. 10th ECSMFE, Florence, Vol 3, pp,915-956, 1991.*
4. 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, 81*
5. Conte, G., Mandolini, A., and Randolph, M. F. (2003), "Centrifuge modeling to investigate the performance of piled rafts." *Proc., Geotech Int. Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Van Impe and Haegeman, eds., pp.379-386.*
6. Cooke, R. W.(1986). "Piled raft foundation on stiff clays : A contribution to design philosophy." *Geotectonics, 36(2), pp.169-203.*
7. Davies, M. C. R., and Parry, R. H. G. (1982), "Determining the shear strength of clay cakes in the centrifuge using a vane." *Geotechnique 32(1) pp.59-62*
8. de Sanctis, L., and Mandolini, A. (2006), "Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(12), pp.1600-1610.*
9. Horikoshi, K., and Randolph, M. F. (1996), "Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay." *Geotechnique, 46(4), pp.741-752.*
10. Randolph, M. F., and Murphy, B. S. (1985), "*Shaft capacity of driven piles in clay*", *Proceeding of offshore technology conference, Houston, 371-278.*
11. Reul, O., and Randolph, M. F. (2003), "Piled rafts in overconsolidated clay - Comparison of in-situ measurement and numerical analyses." *Geotechnique, 53(3), pp.301-315.*
12. Reul, O. (2004). " Numerical study of the bearing behavior of piled rafts." *International Journal of Geomechanics, 4(2), pp.59-68*
13. Stewart, D.P. (1992), "Lateral loading of piled bridge abutments due to embankment construction.", PhD thesis, The University of Western Australia, Perth
14. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1948), *Soil mechanics in engineering practice*, Wiley, New York.