

삼축압축 시험기를 이용한 말뚝 지지 전면 기초 거동 연구

A Study on the Behavior of Piled Raft Foundation Using Triaxial Compression Apparatus

이 영 생*¹ Lee, Yeong-Saeng

홍 승 현*² Hong, Seung-Hyeun

Abstract

Model tests were conducted to study the behavior of the piled raft foundation system on sands. Especially in this study, the method using the triaxial compression apparatus was devised and used to apply the confining pressure which is considered difficult in the existing model test on the soil. Steel rods (6 mm dia.) and aluminum plates (8 mm thickness, 50 mm dia.) were used to simulate piles and rafts respectively. Jumunjin standard sands were used to ensure the homogeneity of the sample. After the sample with the piled raft model was laid inside the triaxial cell, the confining pressure was applied and then the compressive force was applied. The increase and/or decrease ratio of the bearing capacity, the load distribution ratio between raft and piles and the effect of settlements decrease depending on the confining pressure, the number of piles and the length of piles were analyzed and the bearing capacity and skin friction of the pile was calculated. By the results of these experiments, the bearing capacity increased and the settlement decreased with this piled raft foundation system. Especially the effect was larger with the increase of the number of piles than with the increase of length of piles. Hereafter, the study of the load transfer mechanism of piles under confining pressure would be made possible using these small model tester like triaxial compression apparatus.

요 지

사질토 지반에서 말뚝지지 전면기초의 거동을 연구하기 위하여 모형시험을 실시하였다. 특히 본 연구에서는 기존의 모형시험에서 구현하기 어려운 구속응력 재하를 위하여 삼축압축 시험기를 이용하는 방법을 고안, 적용함으로써 구속응력 작용 상태에서 말뚝지지 전면기초의 거동을 파악하고자 하였다. 직경 6 mm의 강봉과 두께 8 mm(직경 50 mm)의 알루미늄 판으로 말뚝과 전면기초 모형을 각각 제작하여 모형시험에 이용하였다. 시료의 균질성 확보를 위하여 주문진 표준사를 사용하였으며, 삼축압축 시험기 내에 말뚝지지 전면기초 모형을 설치한 공시체를 거치한 후 구속응력을 재하 하고 압축 하중을 가하였다. 이와 같은 시험 방법으로 구속응력의 변화, 말뚝 개수의 변화, 말뚝 길이 변화에 따라 지지력 증감 비율, 하중 분담률 및 침하 저감 효과를 중심으로 분석하였으며, 구속압에 따른 말뚝 지지력과 주면마찰 저항력을 계산하였다. 실험 결과 전면기초에 마찰 말뚝을 설치하였을 때 지지력 증가와 침하 저감 효과가 뛰어난 것으로 확인되었다. 특히 말뚝 길이 증가에 비하여 말뚝 개수 증가 시 지지력 증대 효과와 침하 억제 효과가 큰 것으로 나타났다. 앞으로 이러한 소규모 삼축압축 시험 방법을 이용하여 구속응력 하에서의 말뚝 하중 전이 현상 등에 대한 연구도 가능하리라 판단된다.

Keywords : Bearing capacity, Piled raft, Settlement, Triaxial compression apparatus

*1 정회원, 경기대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ., yslee@kyonggi.ac.kr)

*2 정회원, 경기대학교 토목공학과 대학원 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Kyonggi Univ.)

1. 서론

말뚝지지 전면기초 형식(Piled Raft System)은 전담 말뚝 기초 형식(Fully Piled Foundation)보다 경제적인 기초 형식으로서 해외 연구는 활발히 진행되어 해외 여러 국가에서 실제 적용 사례가 많으나, 국내 현장에 적용된 사례는 많지 않으며 이에 대한 연구 실적도 상대적으로 적은 편이다.

말뚝지지 전면기초는 전면기초(Raft Foundation)만으로 지지력은 확보되나 과도한 침하가 예상되거나 하중 불균형 또는 지반 비균질성으로 말미암아 부등침하가 예상될 때 말뚝으로 이를 제어 감소시키는 형식의 기초이다.

이러한 기초 특성상 말뚝지지 전면기초는 점토층에서 시공되어 상당한 하중의 구조물을 안전하게 지지하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 국내 말뚝 시공 사례를 살펴보면, 지층이 비교적 양호하고 상대적으로 작은 하중 하에서 지지력이 다소 부족한 부분을 말뚝을 이용하여 암반층에 지지하는 전담 말뚝기초로 설계, 시공하는 예가 많아 비경제적인 경우가 많다고 해도 과언이 아니다. 이는 말뚝지지 전면기초 또는 마찰말뚝에 대한 인식 부족과 국내 연구가 활발하지 못하였기 때문이라고 판단되며 따라서 앞으로 본 연구를 포함한 다양한 실험, 실측을 토대로 다양한 자료가 기초 설계 실무자에게 제공되어야 할 것으로 판단된다.

해외 연구 동향과 시공 사례를 살펴보면 주로 점성토 지반에서의 거동 연구가 대부분이었으나 본 연구에서는 사질토 지반을 대상으로 하고자 한다. 이에 대한 국내 연구 동향을 살펴보면 이종구(1998)는 상대밀도가 45~58%인 사질토 지반에서 2×2 무리 말뚝을 타입하여 설치한 후 raft가 지반에 접촉되어 있는 상태와 접촉되지 않은 상태에 대하여 모형시험을 수행하여 이격거리가 말뚝 직경의 2배, 4배의 경우, 허용하중까지 무리말뚝에 의한 하중분담량은 70~80% 이고, 극한하중 이후에는 50% 정도로 감소하여 허용하중까지는 주로 무리말뚝이 하중을 분담하고 무리말뚝이 파괴에 도달한 후에는 raft가 주로 하중을 분담한다는 사실을 확인하였다. 김경남 등(1999)은 piled raft에서 raft의 부등침하를 최소화시키는 말뚝의 최적위치를 결정하기 위한 최적말뚝배치기법을 제안하였다. 한편, 강인규(2001)는 Darwin이 주장한 자연진화 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 컴퓨터 프로그램에 응용한 탐색 알고리즘, 즉 하이브리드 유전자 알고리즘(hybrid genetic algorithm) 기법을 적용하여 piled raft 기초시스템과 같이 설계변수가 많고 해석과정이 복

잡한 구조물의 최적 설계방법을 제시하였다. 또한 연직 하중을 받는 piled raft 기초시스템에 있어서 raft 및 말뚝의 하중분담 효과를 규명하기 위한 실험적 연구와 연구에서 제시된 최적 설계기법의 적용성을 확인하기 위한 실내모형실험을 통한 검증은 시도하였다. 연구 결과로서 piled raft 기초시스템에서 raft의 하중분담률은 말뚝의 설치간격보다는 말뚝의 개수 및 raft의 강성에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석하였으며, 지반의 탄성계수가 크고 포외송비가 작을수록 시공비용이 줄어들고, 지반의 강성 및 piled raft 기초시스템의 강성이 클수록 말뚝의 최적 설치위치는 중앙에 집중되는 것으로 연구한 바 있다.

본 연구에서는 국내 연구 자료를 토대로 토조 모형시험에서 구속응력의 재하가 어려운 점을 감안하여 삼축 압축시험기를 이용하여 구속응력 재하 상태에서 말뚝지지 전면기초 모형시험을 실시하였다. 이러한 모형시험을 통하여 토조 모형시험시 거동과 구속응력 작용 상태에서 거동의 차이점을 밝히고자 한다. 본 연구결과는 토대로 우리나라 대표적 지반인 화강 풍화토 지반, 또는 모래, 모래 자갈 지반 등에서 piled raft 기초 형식의 적용에 참고 자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 말뚝지지 전면기초(piled raft) 형식

말뚝지지 전면기초는 그림 1과 같이 주로 단단한 점토층과 같은 지반 조건에서 전면 기초(Raft Foundation)만으로 충분한 지지력은 확보되나 과도한 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우에 사용하는 기초형식이다.

즉 전면기초만으로도 충분한 지지력이 확보되어 전체적인 안정성에는 문제가 없으나, 전체침하와 부등침하를 감소시키기 위한 목적으로 말뚝을 사용하는 방식이다. 그림 2에서는 말뚝개수의 증가에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하 특성이 양호해지므로 작용하중에 대해 구조물의 침하기준을 만족하는 최적의 말뚝개수를 결정하는 것이 설계에 있어서 중요한 부분이 됨을 설명하고 있다.

말뚝지지 전면기초의 하중-지지 거동은 기초지반과

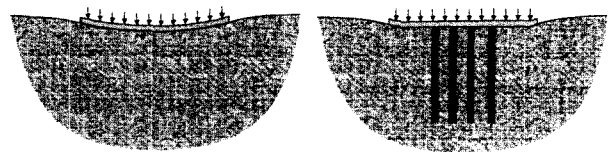


그림 1. 말뚝지지 전면기초의 개념

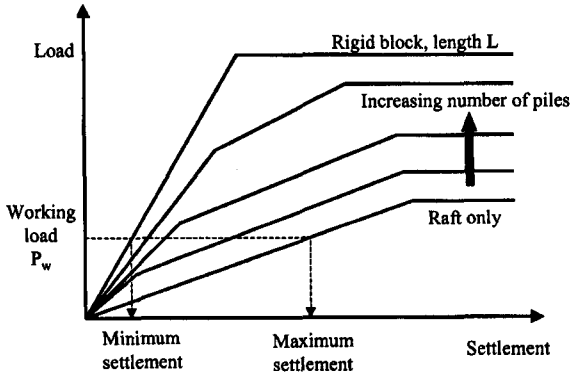
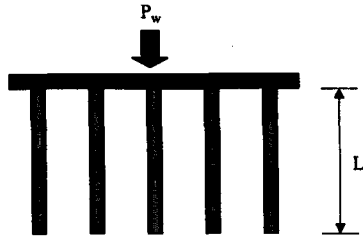


그림 2. 말뚝지지 전면기초의 기본개념(Poulos & Davis, 1980)

기초 요소 간의 복잡한 상호작용에 의해 나타나며, 말뚝 지지 전면기초에서의 지반-구조물 상호작용을 요약하면 다음 그림 3과 같다.

3. 삼축 압축 시험기를 이용한 말뚝지지 전면기초 모형 실험

3.1 말뚝지지 전면기초 모형

본 실험에 사용된 말뚝지지 전면 기초 모형은 그림 4, 5와 같이 삼축 압축 시험기 셀 안에 설치할 수 있는 모형으로 제작하였다.

모형 말뚝은 길이 20 mm ~ 60 mm, 직경 6 mm의 강봉으로 제작하였는데 모형 전면기초에 탈부착할 수 있도록 말뚝머리는 수나사 형태로 되어있다. 전면기초 모형은 두께 8 mm, 직경 50 mm의 알루미늄 강판으로 제작하였다.

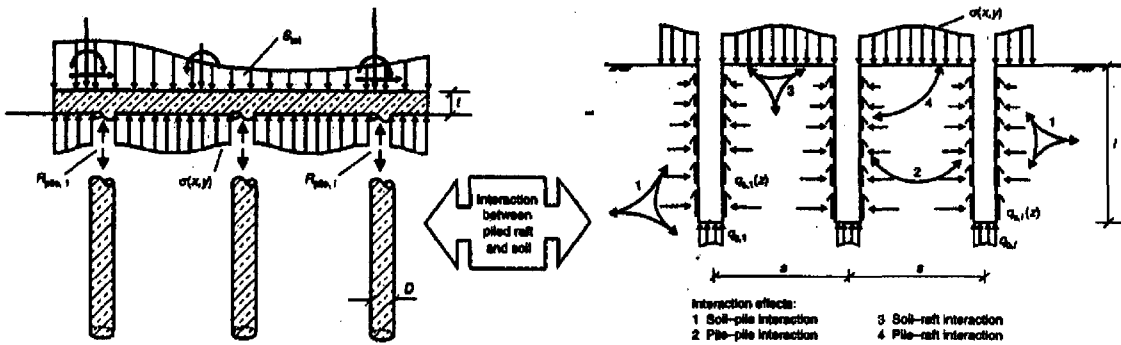


그림 3. 말뚝지지 전면기초에서 지반-구조물 상호작용(Katzenbach 등, 2000)

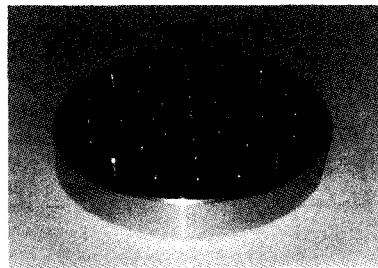
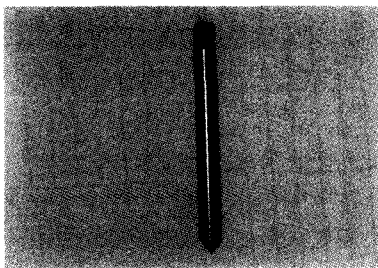


그림 4. 모형 말뚝과 모형 Raft

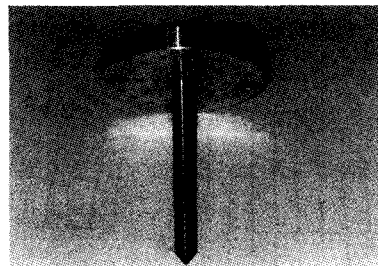
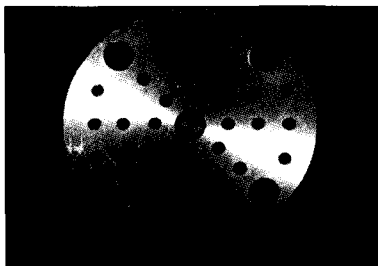


그림 5. 말뚝지지 전면기초 모형(모형 말뚝과 모형 Raft의 결합 그림)

표 1. 표준사 물성치

비 중 (Gs)	균등계수 (Cu)	곡률계수 (Cg)	최대건조중량 ($\gamma_{d \max}$)	최소간극비 (e_{\min})	최소건조중량 ($\gamma_{d \min}$)	최대간극비 (e_{\max})
2.6	1.38	0.97	1.68	0.55	1.38	0.88

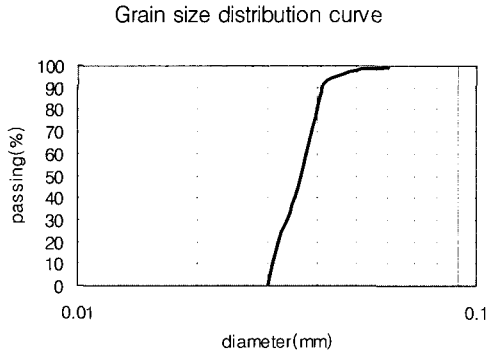


그림 6. 주문진 표준사의 입도분포곡선

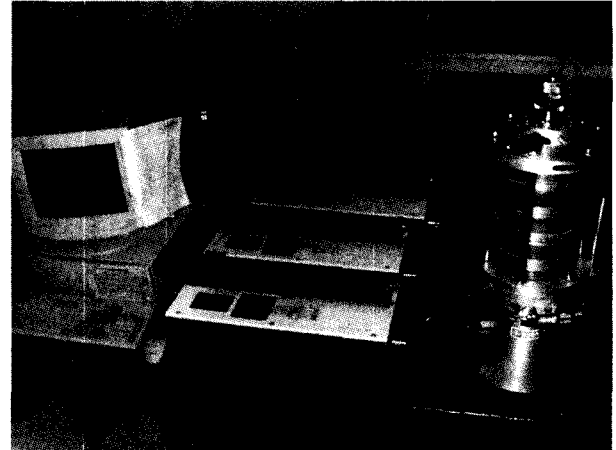


그림 7. 삼축압축 시험기

3.2 모형지반(시료)

본 실험에 사용된 시료는 주문진 표준사로서 입도 분포 곡선과 시료의 물리적 성질은 각각 그림 6, 표 1과 같다.

일정 크기 상대밀도를 갖는 직경 50 mm, 높이 90 mm의 원주형 공시체를 성형하기 위하여 거푸집 역할의 시료 성형용 Former를 사용하고 깔대기를 이용하여 최대한 얇은 높이에서 자유낙하 하여 공시체를 성형하는 방법을 선택하였으며 이렇게 조성된 지반(시료)의 평균 상대밀도는 약 70%였다.

3.3 시험장치 및 시험 절차

3.3.1 시험 장치

본 연구에 사용된 삼축압축 시험기는 영국 GDS사의 제품으로서 이 시험기의 특성은 전단시험 시에 일반적인

축변형률제어는 물론이며, 응력변형률제어를 통하여 전단시험이 가능한 전형적인 Bishop & Wesley 타입의 자동화 삼축압축 시험기이다. 이 시험기는 3개의 controller (back pressure, cell pressure, axial deformation)로 구성되어 있으며, 각각의 controller에는 Remote Feedback Module(RFM)이 장착되어 축하중, 축방향 변형량, 구속압, 배압(back pressure), 간극수압, 체적변화량이 자동으로 컴퓨터에 전달된다(그림 7).

3.3.2 시험 방법

본 연구에서는 구속응력 변화, 말뚝 개수 변화, 말뚝 길이 변화에 따른 말뚝지지 전면기초의 거동을 비교, 분석하기 위하여 삼축압축 시험기를 이용하여 침하율이 15%이상 되도록 변형률 제어 재하 방식으로 총 12회 시험을 실시하였는데 그 시험 조건을 표 2에 나타내었다.

표 2. 시험 조건

No.	시험 조건			No.	시험 조건		
	말뚝개수(개)	말뚝길이(mm)	구속압(kPa)		말뚝개수(개)	말뚝길이(mm)	구속압(kPa)
1	0 (Raft Only)	-	100	7	1	60	200
2	0 (Raft Only)	-	200	8	4	60	100
3	0 (Raft Only)	-	300	9	4	60	200
4	4	20	200	10	4	60	300
5	4	40	200	11	5	60	200
6	1	60	100	12	5	60	300

4. 결과 및 고찰

말뚝지지 전면기초 모형을 표준사 시료(시료)에 설치한 후 재하 시험한 결과를 요약하면 표 3과 같으며 하중-침하 관계 전체 결과를 도시하면 그림 8과 같다. 그림 8을 살펴 보면 침하가 진행됨에 따라 하중이 증가하다 감소하는 양상을 보이는데 조밀한 지층에서 나타나는 전형적인 하중-침하 관계를 나타내고 있다. 또한 침하가 13~15 mm 진행 되었을 때 하중이 다시 증가하는 경향을 보이는데 이는 항복점을 지나 시료에 약 15% 이상의 변위를 가하였을 때 모래 입자의 재배열과 일정 구속압 하에서 체적의 변화가 구속됨으로 인한 시료체적감소로 인하여 시료의 상대밀도가 증가되기 때문이라고 생각된다. 이러한 현상이 특히 말뚝을 4본 또는 5본 설치하였을 때 주로 나타나는 이유는 동일한 변위를 가한 상태에서 말뚝 체적으로 인해 흙 시료 체적은 상대적으로 작기 때문에 시료의 밀도 증가가 빨리 진행된다고 볼 수 있다. Poulos(1991)에 따르면 말뚝지지 전

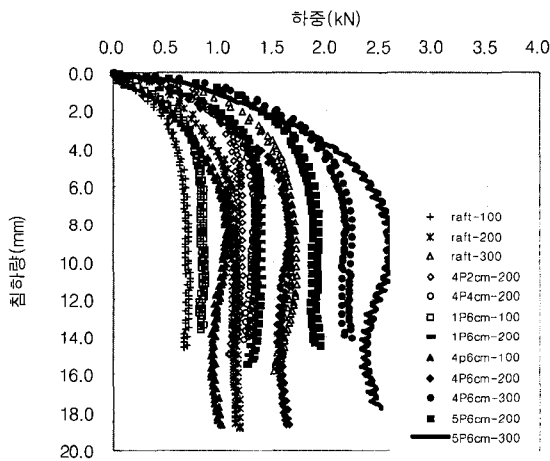


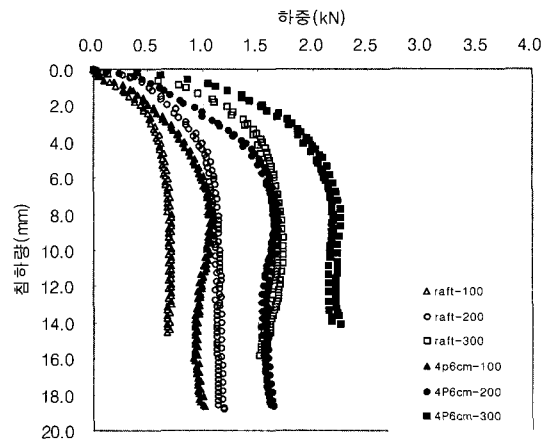
그림 8. 시험 결과(하중-침하량)

면기초를 적용하기에 이상적인 지반조건은 견고한 점토 지반 또는 조밀한 모래 지반이라 하였으므로 본 시험에서 사용한 상대밀도 약 70%는 적절한 시험 조건이라 생각된다.

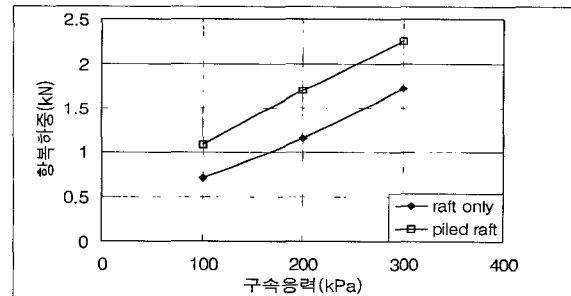
본 장에서는 구속응력, 말뚝 개수, 말뚝 길이 변화에 따른 하중-침하 거동을 분석하였다.

4.1 구속응력과 말뚝설치 여부에 따른 하중-침하 관계

말뚝을 설치하지 않은 조건의 전면기초와 길이 60



(a) 하중-침하량 관계 곡선



(b) 구속응력에 따른 항복하중 변화 관계 곡선

그림 9. 구속응력과 말뚝설치 여부에 따른 하중-침하 및 항복하중

표 3. 시험 결과(구속압과 말뚝 조건 변화에 따른 항복 하중)

No.	시험 조건	항복하중 (kN)	No.	시험조건	항복하중 (kN)
1	Raft Only (구속압=100kPa)	0.71	7	Piled Raft(60mm 1개 Piles) (구속압=200kPa)	1.38
2	Raft Only (구속압=200kPa)	1.16	8	Piled Raft(60mm 4개 Piles) (구속압=100kPa)	1.09
3	Raft Only (구속압=300kPa)	1.72	9	Piled Raft(60mm 4개 Piles) (구속압=200kPa)	1.69
4	Piled Raft(20mm 4개 Piles) (구속압=200kPa)	1.21	10	Piled Raft(60mm 4개 Piles) (구속압=300kPa)	2.25
5	Piled Raft(40mm 4개 Piles) (구속압=200kPa)	1.37	11	Piled Raft(60mm 5개 Piles) (구속압=200kPa)	1.94
6	Piled Raft(60mm 1개 Piles) (구속압=100kPa)	0.86	12	Piled Raft(60mm 5개 Piles) (구속압=300kPa)	2.64

표 4. 구속응력과 말뚝설치 여부에 따른 하중 분담률 비교

시험 조건	항복하중 (kN)	raft의 분담하중(kN) /분담률(%)	pile의 분담하중(kN) /분담률(%)	비고
Raft Only (구속압=100kPa)	0.71	-	-	
Raft Only (구속압=200kPa)	1.16	-	-	
Raft Only (구속압=300kPa)	1.72	-	-	
Piled Raft (구속압=100kPa)	1.09	0.67 ^{a)} / 61	0.42 / 39	60 mm 4개 Piles
Piled Raft (구속압=200kPa)	1.69	1.09 ^{a)} / 64	0.60 / 36	"
Piled Raft (구속압=300kPa)	2.25	1.62 ^{a)} / 72	0.63 / 28	"
분담률 평균	-	66	34	

a) Piled Raft에서 Raft의 분담하중은 Raft Only 항복하중과 같다고 보았으며, 말뚝면적을 제외한 Raft 면적만 고려하여 산정하였음.

표 5. 구속응력과 말뚝설치 여부에 따른 침하량 비교

시험 조건	침하량(mm)		침하량 감소율(%)	비고
	Raft Only	Piled Raft		
구속압=100kPa	1.67	1.43	14	Raft 항복하중의 1/2값에서의 침하량
구속압=200kPa	1.46	1.17	20	"
구속압=300kPa	1.06	0.54	49	"
평균	1.40	1.05	25	

mm 말뚝 4개를 설치한 말뚝지지 전면기초(piled raft)의 재하 시험 결과는 그림 9(a)와 같다. 구속응력이 증가함에 따라 항복하중이 증가함을 알 수 있는데, 이를 다시 그림 9(b)에 정리하여 나타내었다. 그림 9(b)에서 알 수 있듯이 말뚝지지 전면기초는 전면기초(raft only)에 비하여 항복하중이 1.3~1.5배 증가한 것으로 나타났다. 기존의 토조 지반에서는 이러한 구속응력 재하 상태에서의 지지력 거동을 제대로 평가할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 건축 기초에 적용되는 말뚝의 경우 지하실 등 지하 건축 부분의 굴토 후 말뚝을 설치하는 경우가 많은데 이러한 조건에서는 굴착 후 지반에 상당량의 잔류응력이 존재하게 된다. 이와 같은 경우에 잔류응력을 구속응력으로 가해줄 수 있는 삼축압축 시험기를 말뚝 재하 모형시험으로 적극 활용한다면 그 효용성은 크다고 할 수 있겠다. 말뚝지지 전면기초와 전면기초에서 하중 분담률을 계산하여 표 4에 나타내었는데, 전면기초(mat)와 말뚝(pile)의 하중 분담률은 각각 66%, 34%로 평가되었다. 즉 상대밀도가 약 70%인 모래지반에서 말뚝이 주변마찰 저항에 의해 전체 하중의 약 34%를 분담하는 것으로 나타나, 말뚝 구체를 따라 발생하는 주변마찰력은 지지력 증가에 상당히 크게

기여하는 것을 알 수 있다. 말뚝지지 전면기초와 전면기초에서 발생하는 침하량을 분석하여 표 5에 나타내었는데 말뚝지지 전면기초는 전면기초에 비하여 침하량 감소 비율이 14~49%로 평균 25% 감소 효과를 발휘하는 것으로 나타나 말뚝지지 전면기초의 큰 특징인 침하 감소 효과가 큰 것을 확인할 수 있다. 본 침하 감소 효과 평가에서는 전체 시험 결과를 비교할 수 있도록 전면기초(Raft Only)의 하중-침하량 관계에서 탄성거동을 보이는 항복하중의 1/2 지점의 하중을 기준으로 비교하였다.

4.2 말뚝 개수 증가에 따른 하중-침하 관계

말뚝을 설치하지 않는 조건의 전면기초와 길이 60 mm 말뚝을 1, 4, 5개 설치한 말뚝지지 전면기초의 재하 시험 결과를 그림 10에 나타내었는데 말뚝 개수의 증가에 따라 항복하중이 증가함을 알 수 있다. 말뚝지지 전면기초에서 말뚝 개수가 1, 4, 5개로 증가함에 따라 전면기초와 말뚝이 각각 부담하게 될 하중의 크기를 분석하여 표 6에 나타내었는데 말뚝의 하중 분담률은 말뚝 개수 증가에 따라 각각 17%, 34%, 43% 증가하는 것으로 나타났

표 6. 말뚝 개수 증가에 따른 하중 분담률 비교

시험 조건	항복하중(kN)	raft의 분담하중(kN) /분담률(%)	pile의 분담하중(kN) /분담률(%)	비고
Raft Only (구속압=200kPa)	1.16	-	-	
Piled Raft (1개 Pile, 구속압=200kPa)	1.38	1.15 ^{ab} / 83	0.23 / 17	60mm Piles
Piled Raft (4개 Pile, 구속압=200kPa)	1.69	1.11 ^{ab} / 66	0.58 / 34	"
Piled Raft (5개 Pile, 구속압=200kPa)	1.94	1.10 ^{ab} / 57	0.84 / 43	"

a) Piled Raft에서 Raft의 분담하중은 Raft Only 항복하중과 같다고 보았으며, 말뚝면적을 제외한 Raft 면적만 고려하여 산정하였음.

표 7. 말뚝 개수 증가에 따른 침하량 비교

시험 조건	침하량(mm)		침하량 감소율(%)	비고
	Raft Only	Piled Raft		
Piled Raft (1개 Pile, 구속압=200kPa)	1.46	1.20	18	Raft 항복하중의 1/2값에서의 침하량
Piled Raft (4개 Pile, 구속압=200kPa)	1.46	1.17	20	"
Piled Raft (5개 Pile, 구속압=200kPa)	1.46	0.57	61	"

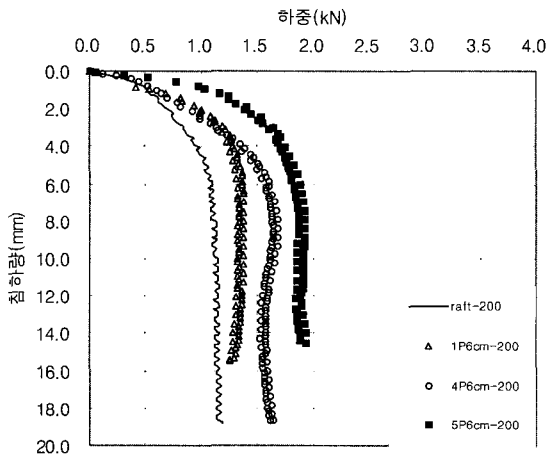


그림 10. 말뚝 개수 증가에 따른 하중-침하 및 항복하중

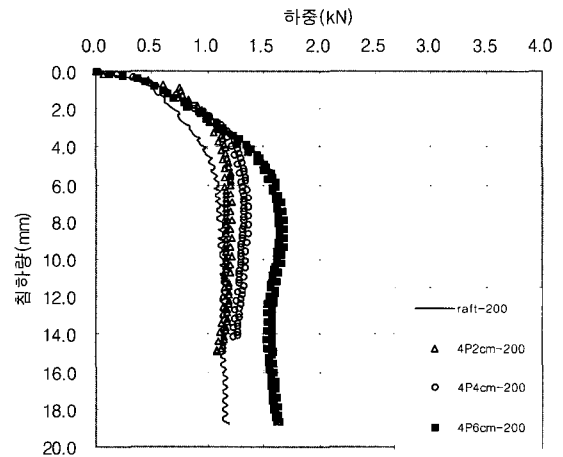


그림 11. 말뚝 길이 증가에 따른 하중-침하 및 항복하중

다. 또한 침하량의 크기는 표 7에 나타난 바와 같이 말뚝 개수 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났고 이 때 침하 감소 비율은 각각 18%, 20%, 61%로 계산되었다.

항복하중과 침하 감소 비율의 증감 관계로 볼 때 말뚝개수는 말뚝지지 전면기초의 지지력에 중요한 설계 변수임을 알 수 있다.

4.3 말뚝 길이 증가에 따른 하중-침하량 관계

말뚝을 설치하지 않는 조건의 전면기초와 길이 20

mm, 40 mm, 60 mm 말뚝을 각 4개씩 설치한 말뚝지지 전면기초의 재하 시험 결과는 그림 11과 같은데 말뚝길이 증가함에 따라 항복하중이 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝지지 전면기초에서 말뚝 길이가 20 mm, 40 mm, 60 mm로 증가함에 따라 전면기초와 말뚝이 각각 부담하게 될 하중의 크기를 분석하여 표 8에 나타내었는데 말뚝 길이가 증가함에 따라 말뚝의 하중 분담률은 각각 5%, 18%, 34%로 증가하였다. 침하량의 경우를 표 9에 나타내었는데 말뚝설치 전면기초의 침하량은 전면기초의 침하량 보다는 작게 발생하지만 말뚝 길이 증가

표 8. 말뚝 길이 증가에 따른 하중 분담률 비교

시험 조건	항복하중(kN)	raft의 분담하중(kN) /분담률(%)	pile의 분담하중(kN) /분담률(%)	비고
Raft Only	1.16	-	-	
Piled Raft (20mm 4개 piles)	1.21	1.15 ^{a)} / 95	0.06 / 5	구속압=200kPa, 4개 Piles
Piled Raft (40mm 4개 piles)	1.37	1.15 ^{a)} / 82	0.58 / 18	"
Piled Raft (60mm 4개 piles)	1.69	1.15 ^{a)} / 66	0.58 / 34	"

a) Piled Raft에서 Raft의 분담하중은 Raft Only 항복하중과 같다고 보았으며, 말뚝면적을 제외한 Raft 면적만 고려하여 산정하였음.

표 9. 말뚝 길이 증가에 따른 침하량 비교

시험 조건	침하량(mm)		침하량 감소율(%)	비고
	Raft Only	Piled Raft		
Piled Raft (20mm 4개 piles)	1.46	0.68	53	Raft 항복하중의 1/2값에서의 침하량
Piled Raft (40mm 4개 piles)	1.46	1.03	29	"
Piled Raft (60mm 4개 piles)	1.46	1.17	20	"

에 따라 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이에 대해서는 그림 11에서도 볼 수 있는 바와 같이 하중-침하량 곡선 초기 부분에 대한 정확한 계측 및 실험량 증가에 따른 좀 더 심도있는 검증이 필요할 것으로 판단된다.

항복하중과 침하량 감소율의 증감 관계로 볼 때 말뚝 길이도 말뚝 지지 전면기초의 지지력에 영향을 미치는 중요한 설계 변수이나 말뚝 개수보다 그 영향은 다소 작은 것으로 나타나고 있다.

4.4 말뚝 지지력 산정

모형시험에서 말뚝의 지지력은 말뚝 본체에 게이지

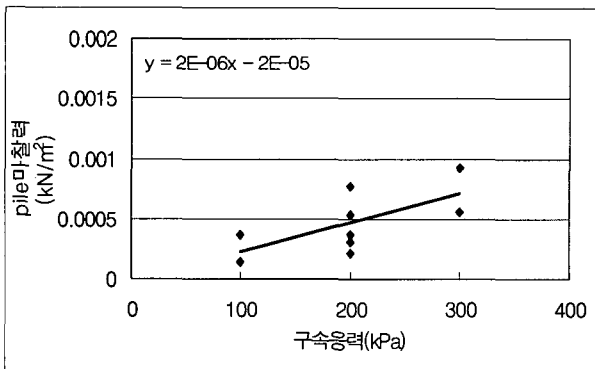


그림 12. 구속응력에 따른 말뚝 지지력

를 부착하여 변형률을 측정 후 이를 환산하여 지지력을 평가하게 되는데, 본 삼축압축 시험기를 이용한 모형 시험에서는 말뚝 본체에 게이지 설치가 불가능하여 말뚝 지지 전면기초의 저항력에서 전면기초의 저항력을 감하여 산정하였다. 말뚝 선단 형상이 원추형이므로 말뚝의 선단지지력은 무시하고 발휘된 지지력은 전부 말뚝 주면마찰력에 기인한다고 가정하고 그 값을 평가하였다.

본 모형 시험에서 평가된 말뚝 지지력은 그림 12와 같고 구속응력에 따른 말뚝 주면마찰 저항력은 $f = 0.000002 \sigma_c + 0.00002 (\text{kN/m}^2)$ 로 평가되었다. 여기서, f 는 주면마찰 저항력, σ_c 는 구속응력이다.

본 시험 결과를 분석하여 볼 때 실험량이 상대적으로 부족하여 결과 값의 편차가 다소 크게 나타나 구속응력과 말뚝 주면마찰 저항력과의 관계를 명확히 규명하는데 무리가 있으나, 차후 연구에서 상대 밀도를 달리하며 실험량을 증가시켜 실험한다면 그 관계를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 말뚝 지지 전면기초 설계에서 여러 가지 매개변수에 따른 거동을 분석하기 위하여 삼축압축 시험기라는 일종의 모형시험을 이용하는 방법을 고안,

제시하였으며, 모형 말뚝지지 전면기초를 표준사 시료 (모형 지층)에 설치한 후 구속응력, 말뚝 개수, 말뚝 길이를 변화시켜 이에 따른 결과를 비교, 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝을 설치하지 않는 조건의 전면기초와 길이 60 mm 4개 말뚝을 설치한 말뚝지지 전면기초의 재하 시험 결과 말뚝지지 전면기초(piled raft)는 전면기초(raft only)에 비하여 항복하중이 1.3~1.5배 증가하였고, 전면기초(mat)와 말뚝의 하중 분담률은 각각 66%, 34%로 마찰 말뚝이 상당한 지지력을 발휘함을 알 수 있었으며 말뚝지지 전면기초 설치 시 침하 감소 비율은 14~49%로 평균 25% 감소 효과를 나타냈다.
- (2) 길이 60 mm 말뚝을 각각 1, 4, 5개 설치한 말뚝지지 전면기초의 재하 시험 결과 말뚝 개수의 증가에 따라 항복하중이 증가함을 알 수 있고 이 때 말뚝의 하중 분담률은 각각 17%, 34%, 43%로 나타났으며, 침하 감소 비율은 각각 18%, 20%, 61%로 나타났다.
- (3) 길이 20 mm, 40 mm, 60 mm 말뚝을 각 4개씩 설치한 말뚝지지 전면기초의 재하 시험 결과 말뚝 길이의 증가에 따라 항복하중이 증가하며 말뚝의 하중 분담률은 각각 5%, 18%, 34%로 증가하였고, 침하량은 증가하는 것으로 나타났으나 이에 대해서는 앞으로 실험량 증가를 통한 심도 있는 검증이 요망된다.
- (4) 본 실험에서와 같이 상대밀도가 약 70%인 지반에서 구속응력에 따른 말뚝 주면마찰 저항력은 $f = 0.000003 \sigma_c + 0.00002(\text{kN/m}^2)$ 로 평가되었다. 이와 같은 방법으로 상대 밀도를 달리하며 실험량을 증가하여 결과 도출을 시도한다면 구속응력과 말뚝 주면마찰 저항력과의 관계를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

위와 같은 결론으로부터 다양한 조건에 대하여 말뚝 지지 전면기초의 지지력과 침하량을 삼축압축 시험기를 이용하여 소규모로 비교적 경제적으로 평가할 수 있었으며 특히 기존의 토조 시험에서 모사할 수 없었던

구속응력을 재하하여 다양한 실험을 할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 이러한 실험이 실제 현장 조건을 최대한 모사하기에는 여러 가지로 부족한 것이 사실이며 현장 계측 결과 및 수치해석 결과와의 비교, 검증 연구 등 앞으로 추가 보완 연구가 필요하며 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 강인규(2001), 하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초시스템의 최적설계, 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성(1999), "Piled Raft 기초의 부동침하 최소화를 위한 최적 말뚝배치", 대한토목학회논문집, 19(III-4), pp.831-839.
3. 권오균, 이활, 이승현, 오세봉, 장학성(2003), "느슨한 모래지반에서의 말뚝지지 전면기초에 대한 실험적 연구", 2003년 봄학술 발표회 논문집, (사)한국지반공학회, pp.439-446.
4. 이수형, 최영석, 정충기, 김명모(2000), "사질토 지반에서 말뚝캡이 연직하중을 받는 무리말뚝의 거동에 미치는 영향", 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 1-C호 II, pp.89-97.
5. 이종구(1998), 모형실험을 통한 Piled Raft의 지지거동 분석, 석사학위논문, 서울대학교.
6. Clancy, P. and Randolph, M. F.(1993), "An approximate analysis procedure for Piled Raft Foundations", *International J. Num. & Anal. Methods in Geomech(UK)*, Vol.17, No.12, pp.849-869.
7. Cooke, R. W.(1986), "Piled Raft Foundations on stiff clay- A contribution to design philosophy", *Geotechnique(UK)*, Vol.36, No.2, pp.169-203.
8. Hemsley, J. A.(2000), "Design applications of raft foundations", Thomas Telford.
9. Hooper, J.(1973), "An Observation on the Behaviour of a Piled Raft Foundation on London Clay", *Proceedings, Instit. Civil Engr., part 2 (UK)*, Vol.55, pp.855-877.
10. Poulos, H. G.(1991), "Analysis of Piled Strip Foundations", *Comp. Methods & Advances in Geomechs.*, ed. Beer et. al., Balkema, Rotterdam, 1: pp.183-191.
11. Poulos, H. G.(2001), "Methods of Analysis of Piled Raft Foundations", A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations.

(접수일자 2003. 11. 14, 심사완료일 2003. 12. 16)