

말뚝보강기초의 하중-침하량 거동 및 침하감소효과에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Load-settlements Behavior and Settlement-reducing Effects of the Disconnected Piled Raft Foundation

이 영 생¹ Lee, Yeong-Saeng

홍 승 현² Hong, Seung-Hyeon

Abstract

For the interests in the economical and safe design of foundation system, the concern on the piled raft or disconnected piled raft foundation system is increasing now. In this study, the behavior and the effects of the disconnected piled raft foundation not studied actively in this country were examined using the triaxial compression tests in place of laboratory model tests. The triaxial test samples were prepared with Jumunjin standard sand and the carbon rods, which simulate the ground soil and piles respectively. After the sample in which carbon rods were arranged was laid inside the triaxial chamber, the confining pressure was applied and then loading test was conducted. To analyze the reinforcing effects of the disconnected piled raft foundation, a few number of tests were carried out by changing the number, the diameter and the length of the model piles. As a result of this study, in the disconnected piled raft foundation system, even though the number of pile is few and the diameter of pile is small, the settlement of the foundation system decreased greatly.

요 지

최근 경제적이고 안전한 기초 설계를 위하여 말뚝지지 전면기초(Piled raft) 또는 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)에 대한 설계가 관심을 모으고 있다. 본 연구는 국내에서 연구가 미진한 말뚝보강기초의 거동과 그 효과를 실내 모형 시험을 대신하는 삼축압축시험을 통하여 규명하였다. 주문진 표준사와 탄소봉을 각각 지반과 말뚝으로 사용하여 삼축압축시험기에 보강 지반을 성형한 후 구속응력 상태에서 재하 시험을 실시하였다. 말뚝 보강에 따른 거동 차이를 규명하기 위하여 말뚝 개수, 말뚝 직경 및 말뚝 길이 등의 변화를 주어 하중-침하 관계를 도출하고 그 결과를 분석하였다. 시험 결과 기초지반 면적에 대한 보강 말뚝 면적비를 보강률이라 정의할 때 말뚝 수평단면 보강률이 약 18%이고, 수직단면 보강률이 약 70%일 경우 침하량은 무보강시에 비하여 약 80%까지 감소되는 것으로 나타났다. 또한 수평단면 보강률 및 수직단면 보강률에 따른 말뚝보강기초 지반의 변형계수 변화는 각각 직선식 $E(Mpa) = 8.3p(\%) + 121.2$ 와 $E(Mpa) = 1.8p(\%) + 105.5$ 로 나타났다. 본 연구의 결과 말뚝보강기초에서 소구경, 소량의 말뚝 보강으로도 비교적 큰 기초지반 침하 억제 효과가 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Carbon rod, Disconnected piled raft, Settlements, Triaxial compression apparatus

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

안전한 기초의 성립 조건은 지지력이 확보되어야 하며 침하가 허용 침하량 이내에 있어야 한다. 국내 대표적인 지반인 화강풍화토 또는 매립 토사 지반에서 중, 소규모의 구조물 설계시 지지력에 대한 안정성은 확보되나 침하가 과다하게 예상되어 불가피하게 말뚝을 암반에 근입시켜 구조물을 지지하는 말뚝기초로 설계하는 경우가 일반적이다. 이는 대단히 비경제적이며 불합리한 설계라 할 수 있다. 이러한 이유로 해외에서는 기초판에 작용하는 하중을 말뚝에 일부 분담시켜 침하량을 감소시키는 말뚝지지 전면기초(Piled raft)와 비슷한 형태이지만 기초판과 연결되지 않은 말뚝(Disconnected pile)을 지반에 시공 후 기초판을 설치하는 시스템에 대한 연구와 설계가 활발히 진행되고 있다. Wong 등(2000)은 인도네시아 자카르타의 39층 빌딩 기초 설계시 두께가 86m인 견고한 점토층상의 44m×99m 전면기초에 직경 1m, 길이 35m, 65m인 현장타설말뚝을 말뚝지지 전면기초(Piled raft)와 기초판과 연결되지 않은 말뚝(Disconnected pile)기초에 대하여 유한요소해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 수치해석결과 무보강상태(직접 기초)의 침하량은 약 54mm인 반면 보강기초 시스템인 경우 침하량은 65m 말뚝 보강인 경우 약 33~34mm로 감소되었으며, 말뚝지지 전면기초(Piled raft)와 기초판과 연결되지 않은 말뚝(Disconnected pile)은 거의 유사한 침하량이 발생됨을 소개하고 있다.

국내외에서 주로 말뚝지지 전면기초에 대한 연구가 근래 활발히 진행되고 있으며(강인규 2001; 권오균 등 2003; 김경남 등 1999; 이영생 등 2003; 이종구 1998; Poulos 2001) 일부 현장에서 이를 적용하는 추세이다. 그러나 국내에서 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 다만 민기훈 등(2005)은 국내 ○○아파트 현장에서 소음 등의 문제로 기존 말뚝기초 시공이 어려움에 대한 대안으로서 오거천공 후 현장타설 방식의 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)를 적용하고 현장 재하시험을 통하여 그 효과를 평가한 사례를 보고하였다. 표준관입저항치(N)가 평균 25인 지반(두께 약 10m)에서 직경 400mm인 무근 현장타설 말뚝을 풍화암에 1m 근입시킨 후 말뚝머리와 기초판 사이에 잡석을 포설 다짐한 후 현장 제작한 1.0m×1.0m의 콘크리트 대형평판에 대한 재하시험과 무보강 원지반에 대한 대형평판재하시험 결과를 비교 분석하여, 무

보강시에 비하여 말뚝보강시 침하량이 25%정도 감소됨을 확인하였다. 본 재하시험의 경우 단일 말뚝에 대한 재하시험이며, 1회 시험에 그친 점이 아쉽지만 현장 실 모형시험으로서 그 가치가 있다고 할 수 있다.

본 연구는 기존 연구를 토대로 말뚝보강기초에 대한 거동을 이해하고 설계 변수인 말뚝 보강량과 그에 따른 침하 억제 정도를 규명하기 위하여 다양한 조건 하에서 실내 모형시험을 실시하여 그 거동을 분석하고자 하였다. 일반적으로 말뚝 또는 기초에 대한 실내 모형시험은 토조 내에 토사를 포설한 후 시험하는 방식이 주로 이용되나, 본 연구에서는 말뚝 설치 위치에서의 응력 상태를 모사하기 위하여 삼축압축시험기를 이용하여 일정 구속응력을 공시체에 가한 다음 재하 시험을 실시하는 방법을 제안하였다. 말뚝보강기초를 모사하기 위하여 모형말뚝을 삽입, 보강한 형태의 공시체를 만들어 삼축압축시험을 실시하였는데 모형말뚝으로는 탄소봉을 사용하였다. 말뚝 보강량의 변화에 따른 하중-침하 관계 및 보강 지반의 변형계수 등을 분석하기 위하여 말뚝의 직경, 개수, 길이 및 기초판과 모형말뚝사이의 재료를 변화시키면서 삼축압축시험을 수행하였다.

2. 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)

지지력은 확보되나 침하량이 과다하게 발생하는 기초에서 말뚝지지 전면기초(Piled raft) 또는 말뚝보강기초 시스템을 적용하여 침하량을 억제할 수 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 이 두가지 형식의 기초 시스템 차이는 말뚝의 기초판(Raft) 결합 유무에 따른 것이나 그 거동의 차이는 크다. 말뚝지지 전면기초는 기초판에 구조적으로 직접 연결되므로 말뚝에 작용하는 응력의 집중도가 매우 크며, 기초판에 국부적으로 높은 휨모멘트가 발생된다. 또한 풍하중, 지진하중 등의 횡적 하중이 작용하는 경우에는 기초판에 강결된 말뚝의 연결부에 응력이 집중될 가능성이 크다. 그러나 이와 달리 말뚝을 기초 본체와 이격하여 설치하는 말뚝보강기초는 말뚝에 작용하는 응력 집중도가 작으며, 횡하중이 작용하는 경우 기초판과 말뚝이 구조적으로 분리되어 있으므로 구조적으로 유리하게 작용한다(Wong 등, 2000).

말뚝보강기초는 일반적인 말뚝 기초와는 달리 말뚝과 상부구조물 기초판이 연결되지 않는 형식의 기초이다. 이는 연약지반에 모래다짐말뚝(SCP)으로 지반을 보강하는 형식과 비교적 유사하나 말뚝보강기초에 적용

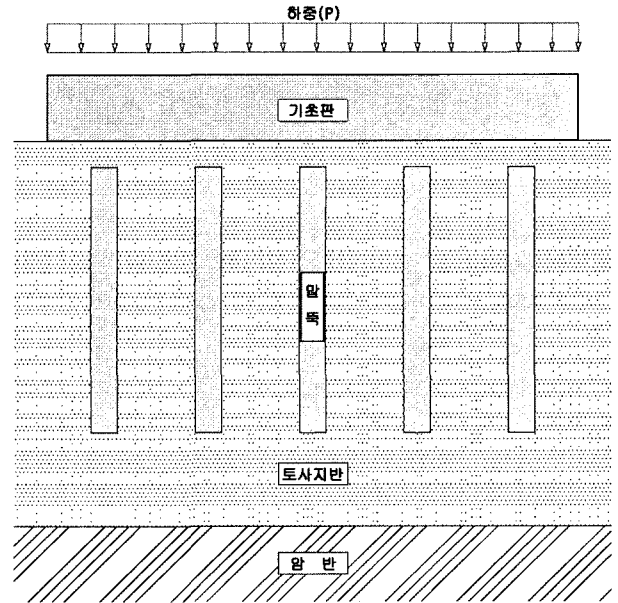
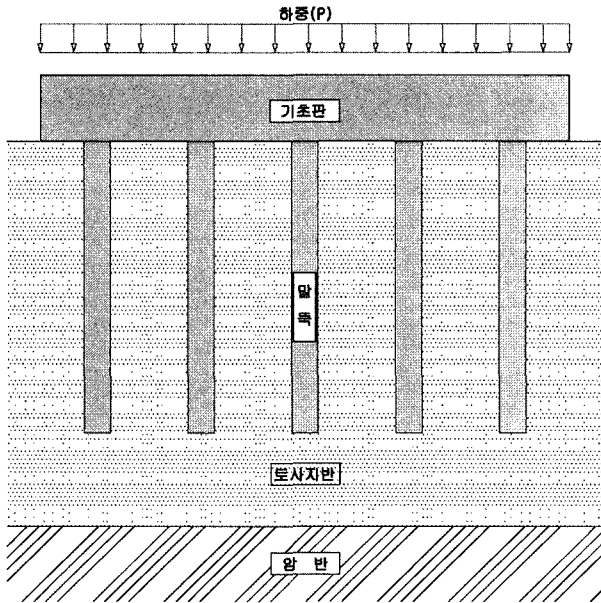


그림 1. 말뚝지지 전면기초(Piled raft) 및 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)

되는 말뚝은 상대적으로 강성이 큰 재료라 할 수 있다. 말뚝보강기초의 하중 전달 시스템은 상부하중의 일부는 기초판과 말뚝 머리 사이의 다짐층을 통하여 말뚝머리로 직접 전달되고, 일부 상부지반으로 전달된 하중은 말뚝에 부마찰력으로 전달되는 부분과 직접 지반으로 전달되는 부분으로 나뉘어 진다. 여기서 말뚝으로 전달된 하중은 말뚝 하부에서 말뚝의 주면 마찰 및 선단 지지를 통해 하부 지층으로 재분배된다. 결국 보강효과로 인하여 기초의 하중은 상당 부분 말뚝을 통하여 하부지층으로 전이되어 전반적으로 구조물의 침하량을 감소시키는 효과를 나타내는데 침하량 감소의 정도는 원지반의 강성 및 지층 구성과 밀접한 관련이 있다(민 등, 2005).

3. 시험 방법

3.1 시험 장치

말뚝재하시험은 현장 시험으로 수행하는 것이 그 거동을 정확하게 파악할 수 있으나, 하중 규모가 크며, 비용과 시간이 과다하므로 연구용으로는 현실적 어려움이 큰 실정이다. 이러한 이유로 주로 토조를 이용한 말뚝 모형시험이 일반적으로 행해지고 있다. 그러나 토조용적은 상대적으로 그 깊이가 얇기 때문에 실제 지반에 비하여 구속응력이 작게 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 본 시험에서는 현장 구속 응력 상태를 모사하기 위하여

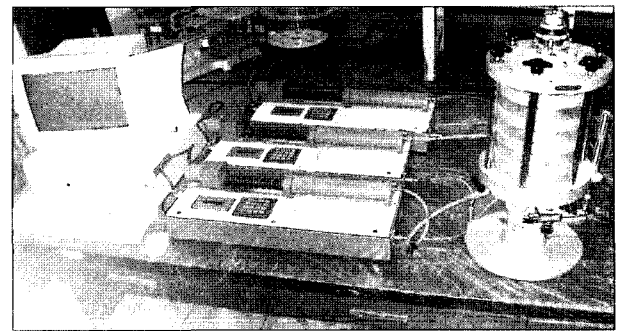


그림 2. 삼축압축시험기

그림 2와 같은 삼축압축시험기를 이용하여 구속응력 재하 상태의 모형시험을 수행하였다. 이에 대한 시험 방법을 요약하면 다음과 같다.

3.2 시험 방법

본 실험에서는 주문진 표준사를 사용하였으며 시료의 물리적 성질은 표 1과 같다.

일정한 상대밀도의 지름 50mm, 높이 100mm의 원주형 공시체를 성형하기 위하여 거푸집 역할의 시료 성형틀을 사용하고 깔대기를 이용하여 최대한 얇은 높이에서 자유 낙하하여 공시체를 성형하는 방법을 사용하였는데 조성된 지반(시료)의 평균상대밀도는 약 70%이었다. 또한 시험에 사용되는 모형말뚝으로 탄소봉을 사용하였고, 기초판은 말뚝과 연결되지 않은 채 강성 거동을 하는 것으로 가정하였는데, 본 연구의 경우 삼축압축시

협기 셀 부속인 상부 재하판을 기초판으로 가정하였다.

모형말뚝은 그림 3과 같은 직경 4mm, 6mm 및 8mm 탄소봉을 길이 48mm, 60mm, 70mm로 각각 준비하여 사용하였다. 본 시험에 사용한 탄소봉의 탄성계수는 측정 결과 평균 5MPa로 나타났다. 말뚝 설치 전후 시료의

상대밀도가 같도록 타입 방식이 아닌 말뚝을 세운 후 측면에 표준사를 포설하는 방식을 적용하였으며, 말뚝의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 구멍을 낸 위치 표시용 비닐판(그림 4)을 표준사 위에 올린 다음 착색 물감을 구멍에 소량 포설하여 말뚝 설치 위치를 표시하

표 1. 표준사 물성치

비 중 (G _s)	균등계수 (C _u)	곡률계수 (C _c)	최대건조밀도 (γ _{d max})	최소간극비 (e _{min})	최소건조밀도 (γ _{d min})	최대간극비 (e _{max})
2.6	1.38	0.97	1.68	0.55	1.38	0.88

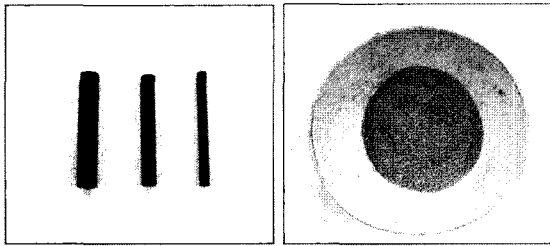


그림 3. 탄소봉 및 착색 표준사

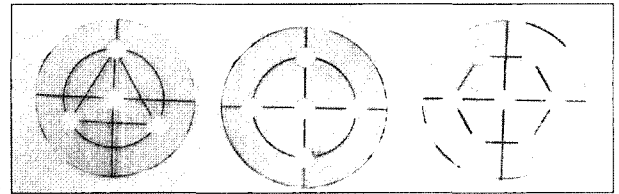


그림 4. 위치 표시 비닐판

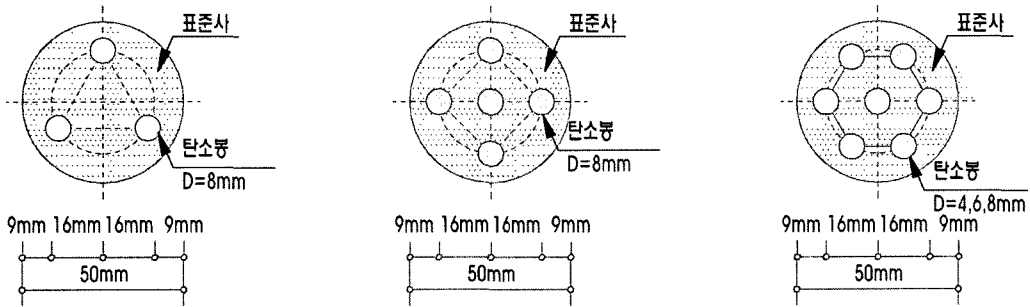


그림 5. 탄소봉(말뚝) 배치도(평면)

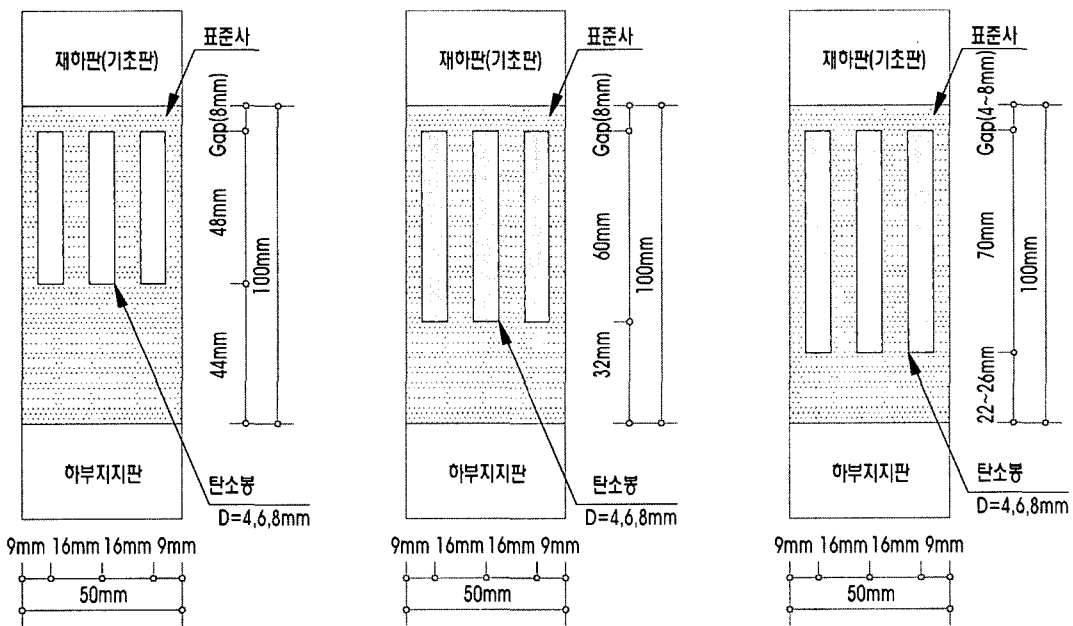


그림 6. 탄소봉(말뚝) 배치도(단면)

였다. 모형말뚝의 배치 형태를 그림 5와 그림 6에, 이러한 방식으로 조성된 모형말뚝 설치 모형지반을 그림 7에 도시하였다.

3.3 시험 조건

본 연구에서는 다양한 조건 하에서 말뚝보강기초의 거동을 비교, 분석하기 위하여 구속응력을 100kPa로 일정하게 유지한 상태에서 축방향 변형을 즉 기초판의 침하율이 15% 이상 되도록 재하하는 방식으로 총 9회의 시험을 실시하였으며, 각 시험에서 사용된 말뚝 직경, 말뚝 길이 및 말뚝 개수는 표 2와 같다.

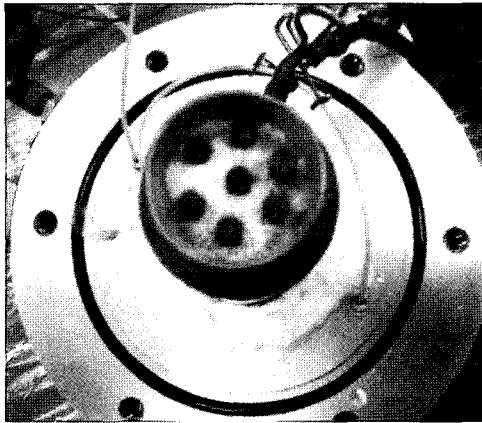


그림 7. 모형말뚝 및 모형 지반 성형

4. 결과 및 고찰

모형말뚝 보강 시료에 대한 재하 시험 결과를 요약하면 표 3과 같다. 본 절에서는 말뚝 개수 및 말뚝 직경 변화(수평 단면 보강률 변화), 말뚝 길이 변화(수직 단면 보강률 변화) 및 기초판과 말뚝 사이 갭(Gap)에 다른 시료 사용에 따른 하중-침하 거동을 분석하였다. 여기서, 보강률이란 기초지반 면적에 대한 보강된 말뚝 면적의 비로 정의하였다.

4.1 수평 단면 보강률 변화에 따른 하중-침하 관계

말뚝 보강량의 변화에 따른 거동 및 보강효과 중 수평 단면 보강률에 따른 변화를 분석하기 위하여 말뚝 직경 및 말뚝 개수의 변화를 주어 재하 시험을 실시한 결과 하중-침하 관계를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 하중-침하 관계를 살펴보면 전반적으로 보강률에 비례하여 극한하중이 증가함을 알 수 있다. 이는 말뚝 보강으로 인한 지반 강성 증가 및 말뚝의 하중 분담 증가에 따른 것으로 보인다. 또한 그림 9에서 볼 수 있듯이 말뚝 보강으로 인하여 말뚝 설치부 지반은 횡방향 변위가 상당부분 억제됨을 알 수 있고, 이러한 변위 억제 역시 극한 하중이 증가하는 데 기여하는 것으로 보인다.

4-70-7EA는 8-70-3EA에 비하여 보강률(치환율)이 작

표 2. 시험 조건

No.	시험 조건			No.	시험 조건		
	말뚝 직경(mm)	말뚝 길이(mm)	말뚝 개수(개)		말뚝 직경(mm)	말뚝 길이(mm)	말뚝 개수(개)
1	0 (무보강)	0 (무보강)	0	6	8	70	7
2	4	70	7	7	8	48	7
3	6	70	7	8	8	60	7
4	8	70	3	9*	8	70	7
5	8	70	5	비교	시험시 구속응력=100 kPa		

* 기초판과 말뚝머리 사이(Gap)에 표준사 입경의 두 배 굵은 모래 사용

표 3. 시험 결과(말뚝 보강 조건에 따른 극한 하중)

No.	시험 조건	극한하중 (kN)	No.	시험조건	극한하중 (kN)
1	무보강	0.55	6	8mm-70mm-7EA	1.13
2	4mm-70mm-7EA	0.77	7	8mm-48mm-7EA	0.64
3	6mm-70mm-7EA	0.93	8	8mm-60mm-7EA	0.79
4	8mm-70mm-3EA	0.63	9	8mm-70mm-7EA (gap에 굵은 모래 사용)	1.34
5	8mm-70mm-5EA	1.04			

음에도 불구하고 극한하중이 크게 나타남을 볼 수 있는데, 8-70-3EA의 경우 말뚝 개수가 4-70-7EA에 비해 적기 때문에 횡방향 변형 억제 효과가 상대적으로 작아 침하가 클 것으로 생각되며 따라서 말뚝 직경에 비해 말뚝 개수가 침하 억제에 큰 역할을 하는 것으로 추측된다.

이상에서와 같이 말뚝보강기초 시스템에서 수평 단면 보강률이 보강 효과에 중요한 매개변수임을 알 수 있다.

말뚝보강기초 시스템에서 수평 단면 보강률에 따른 보강 효과를 구체적으로 분석하기 위하여 보강률에 따른 극한하중, 말뚝분담하중, 침하량 및 변형계수를 표 4에 정리하였다. 여기서 침하량은 극한하중(q_u)의 $\frac{1}{2}$ 에 해당하는 하중이 작용할 때 발생하는 침하량을 의미한

다. 말뚝기초에서 말뚝의 하중 분담 정도는 말뚝에 하중계 또는 변형률계를 부착하여 실측정하는 것이 일반적이거나 본 시험에서는 용이치 않아 말뚝 보강 시 하중으로부터 말뚝 무보강시 하중을 제함으로서 말뚝의 하중 분담 정도를 추정하였다.

표 4와 그림 10 및 그림 11에서 볼 수 있듯이 말뚝 보강률이 커질수록 말뚝의 하중 분담 정도가 커지며 침하량이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 특히 그림 11에서 수평 단면 치환율이 약 18%일 경우 침하량은 무보강 시에 비하여 약 80%까지 감소됨으로써 그 효과가 크다고 할 수 있다. 표 4의 변형계수(E)는 하중-침하 관계를 응

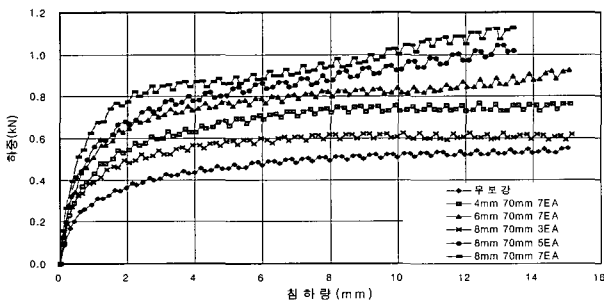
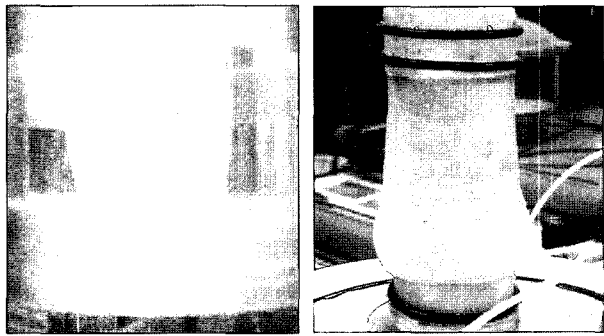


그림 8. 수평 단면 보강률 변화에 따른 하중-침하 곡선



(a) 무보강시(시료 중앙부 배부름 현상) (b) 보강시(시료 하부 배부름 현상)

그림 9. 말뚝 보강 유무에 따른 파괴 형상

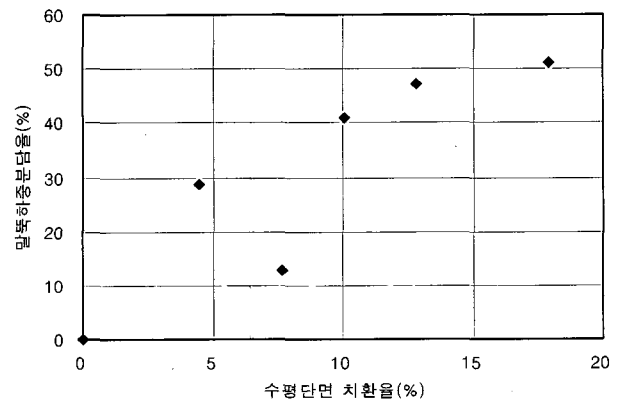


그림 10. 수평 단면 치환율 변화에 따른 말뚝 하중 분담률 변화

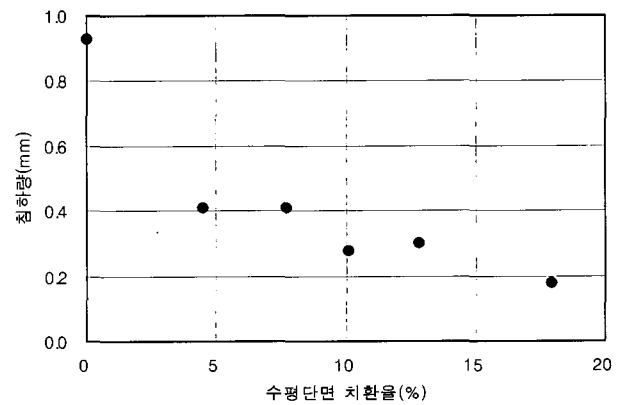


그림 11. 수평 단면 치환율 변화에 따른 침하량 변화

표 4. 수평 단면 보강률 변화에 따른 실험 결과

시험 조건	치 환 율 (%)	극한하중 (kN)	말뚝 분담하중(kN) /분담율 (%)	침하량(mm) /침하감소율 (%)	변형계수(MPa)
무 보강	0.00	0.55	0	0.93 / 0.0	121.97
4mm-70mm-7EA	4.48	0.77	0.22 / 28.6	0.41 / 55.9	170.81
6mm-70mm-7EA	10.08	0.93	0.38 / 40.9	0.28 / 69.9	220.58
8mm-70mm-3EA	7.68	0.63	0.08 / 12.7	0.41 / 55.9	151.94
8mm-70mm-5EA	12.80	1.04	0.49 / 47.1	0.30 / 67.7	235.69
8mm-70mm-7EA	17.92	1.13	0.58 / 51.3	0.18 / 80.6	267.45

력-변형률 관계로 도시하고 극한하중의 $\frac{1}{2}$ 에 해당되는 하중에 대한 변형률의 관계에서 변형계수(즉 활선계수)를 산출한 것이다. 말뚝 보강률(치환율)의 변화에 따른 보강 지반의 변형계수(E) 변화를 도시하면 그림 12와 같다. 말뚝 보강률에 따른 변형계수 변화는 선형에 가까운 증가 추세를 보이고 있으며, 따라서 말뚝 보강률(p , %)과 변형계수(E)의 관계는 직선식 $E(Mpa) = 8.3p(\%) + 121.2$ 로 나타낼 수 있다.

4.2 말뚝 길이 변화(수직 단면 보강률)에 따른 하중-침하 관계

침하 대상층 내 말뚝 보강률 변화에 따른 거동 및 보강효과를 분석하기 위하여 동일 직경, 동일 개수 말뚝

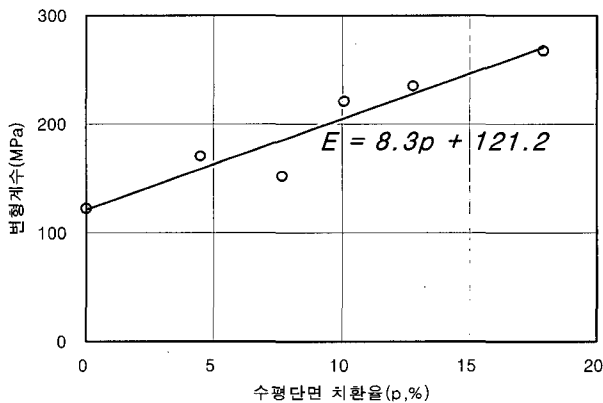


그림 12. 수평 단면 치환율 변화에 따른 변형계수 변화

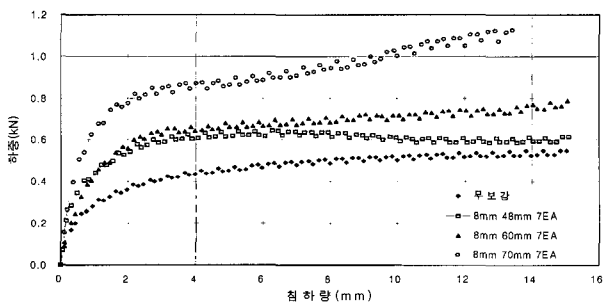


그림 13. 수직 단면 보강률 변화에 따른 하중-침하 곡선

표 5. 수직 단면 보강률 변화에 따른 실험 결과

시험 조건	치 환 율 (%)	극한하중 (kN)	말뚝 분담하중 (kN) / 분담율 (%)	침하량 (mm) / 침하감소율 (%)	변형계수 (MPa)
무 보강	0	0.55	0	0.93 / 0.0	121.97
8mm-48mm-7EA	48	0.64	0.09 / 14.1	0.29 / 68.8	139.92
8mm-60mm-7EA	60	0.79	0.24 / 30.4	0.48 / 48.4	209.57
8mm-70mm-7EA	70	1.13	0.58 / 51.3	0.18 / 80.6	267.45

조건일 때 말뚝 길이를 변화시켜 재하 시험을 실시한 결과는 그림 13과 같다.

본 시험 결과 역시 말뚝 길이에 비례하여 하중 증가가 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다. 다만 8-48-7EA와 8-60-7EA의 경우 길이의 증가에 따라 극한하중은 비례하여 증가하나 초기 탄성범위에서는 작게 나타났는데 이는 말뚝 설치시 말뚝이 다소간 기울어짐과 같은 실험적 원인에 기인한 것으로 판단된다. 또한 하중-침하 관계에서 말뚝길이가 증가할수록 하중이 수렴하지 않고 증가하는 이유는 말뚝 주변마찰력의 항복 후 침하가 진전됨에 따라 말뚝 주변 지반이 항복하는 과정에서 하중이 증가되는 것으로 보인다. 이는 전담 말뚝기초와는 달리 기초판(Raft)이 하중 지지에 큰 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다.

이상에서 말뚝보강기초 시스템에서 말뚝길이 역시 보강 효과에 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다.

말뚝 길이를 수직 단면 보강률로 환산하여 보강률에 따른 극한하중, 말뚝분담하중, 침하량 및 변형계수를 표 5에 정리하였다. 표 5와 그림 14, 그림 15에서 볼 수 있듯이 말뚝 길이가 증가할수록 말뚝의 하중 분담 정도가 커짐을 알 수 있다. 그림 15는 수직 말뚝 보강률 변화에 따른 침하량의 변화로서 보강전 원지반에 비해 말뚝 보강시 침하는 약 50% 이상 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉 전반적으로 보강률이 클수록 침하 억제 효과가 증가함을 알 수 있다.

8mm-60mm-7EA와 8mm-48mm-7EA의 경우 침하량은 보강에 따라 역비례한 것으로 나타났으나 극한 하중 및 변형계수에서는 비례하는 것으로 나타나 말뚝 기울어짐과 같은 초기 재하 시 실험적 오차 등과 같은 원인에 기인한 것으로 추정된다.

수직 보강률 변화에 따른 변형계수 변화 결과는 그림 16과 같고, 따라서 수직 보강률(p , %)과 변형계수(E)의 관계는 직선식 $E(Mpa) = 1.8p(\%) + 105.5$ 로 나타낼 수 있다.

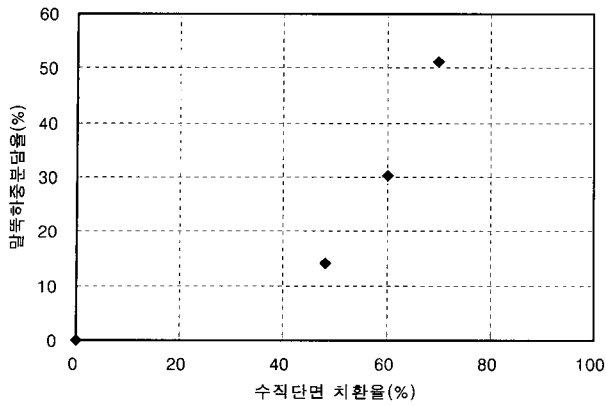


그림 14. 수직 단면 치환율 변화에 따른 말뚝 하중 분담률 변화

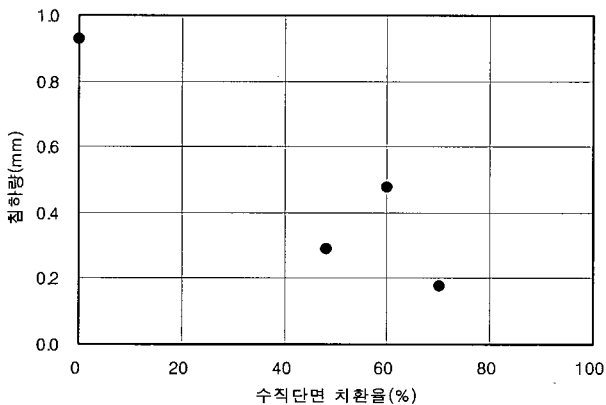


그림 15. 수직 단면 치환율 변화에 따른 침하량 변화

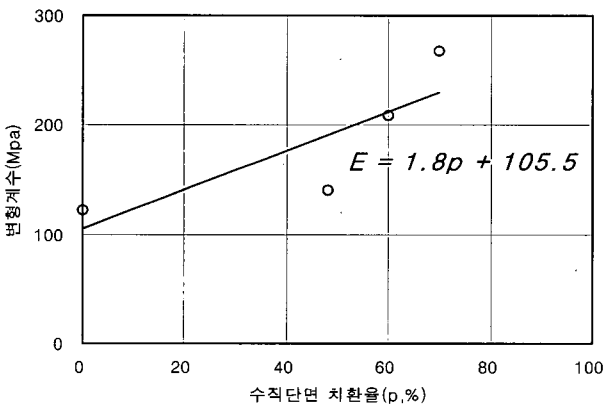


그림 16. 수직 단면 치환율 변화에 따른 변형계수 변화

4.3 말뚝과 기초판 사이 재료 변화에 따른 하중-침하 관계

말뚝보강기초는 실제 시공시 말뚝 머리 부분의 느슨한 지반을 조밀화함으로써 발생하는 아칭효과에 의하여 기초판(Raft)의 하중을 말뚝으로 효과적으로 전달하기 위하여 기초판과 말뚝머리 사이에 지반을 개량할 필요가 있다. 민기훈 등(2005)은 시공 사례에서 말뚝과 기초판 사이에 잡석을 포설, 다짐한 후 기초판을 시공하

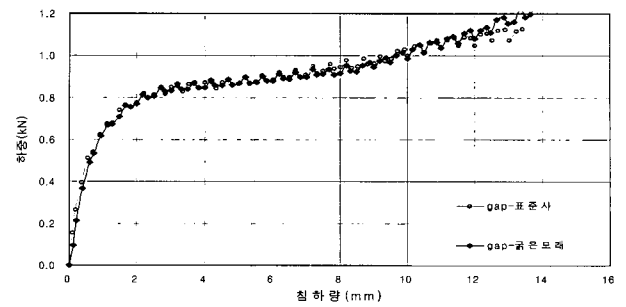


그림 17. 말뚝과 기초판간 재료 변화에 따른 하중-침하 곡선

였다.

이에 대한 효과를 규명하기 위하여 표준사 직경의 약 2배 굵기 모래를 상부 재하판과 모형 말뚝머리 사이에 포설한 후 재하시험을 실시하였다. 시험 결과 그림 17에서와 같이 말뚝 머리 지반 보강 유무에 관계없이 거의 동일한 거동을 보였는데 이는 본 삼축압축시험에서는 굵은 모래 포설 후 다짐을 시행하지 못함으로 인한 원인으로 보강 효과가 없는 것으로 나타났다. 그러나 실제 시공시 진동 및 다짐 등으로 말뚝 머리와 기초판 사이의 지반을 개량한다면 그 효과는 클 것으로 생각된다. 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 실험이 필요할 것으로 보인다.

4.4 기대 효과 및 향후 연구 과제

본 실험적 연구를 토대로 말뚝보강기초 시스템에서 침하 억제에 중요한 매개 변수는 보강량 즉 말뚝 개수와 대상 지반 내 타설 말뚝 길이로 볼 수 있는데, 실제 현장 적용시 무보강 상태 기초판의 침하량을 계산한 후 말뚝 개수 및 타설 말뚝 길이를 적절히 조절함으로써 침하량을 상당 부분 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 본 실험은 현장 지반응력 상태를 고려할 수 있도록 삼축압축시험 방법을 도입하였으나 일종의 소형 실내 모형시험 방식이기 때문에, 크기 효과, 경계면 조건, 파괴 양상 조건 등이 실제 말뚝보강기초와는 상이한 것이 사실이다. 크기 효과의 경우, 일반적으로 말뚝 사이 최소간격은 2.5D 이상이어야 하는데(Das, 1995), 본 실험의 경우 직경 4mm 모형말뚝을 사용할 때 말뚝 사이 간격은 16mm로서 4D이고, 6mm의 경우 2.66D이지만 8mm의 경우 2D로서 최소 간격 규정에서 약간 벗어나고 있다. 경계면 조건의 경우, 실제 현장 응력조건과는 약간 다르게 공시체 주변으로 등방압력이 작용

하는 차이점이 있다. 파괴 양상 조건의 경우, 무리말뚝에 작용하는 하중은 일반적으로 말뚝 전체 길이 2/3 아래에서부터 지반에 전달되는 것으로 가정하는데(Das, 1995), 본 실험에서 나타나는 시료 하부 배부름 현상(그림 9(b) 참조)은 이러한 가정을 어느 정도 반영하는 것으로 추측해 볼 수 있다. 그러나 전반적으로 본 실험에서 도출된 수치를 실제 말뚝보강기초 시스템에 정량적으로 적용하는 것은 아직은 무리가 있다고 볼 수 있다. 그렇지만 실 대형 현장시험의 경우 현실적으로 또한 경제적으로 한계가 있고, 소형 모형실험의 경우 실제 현장응력 재현에 한계가 있는 사실 등을 감안한다면, 현장 구속응력을 재현 및 제어하여 모형시험을 시도한 본 연구는 일부 한계에도 불구하고 말뚝보강기초 시스템에 대한 정성적 거동 분석에는 어느 정도 효과가 있을 것으로 판단된다. 즉 말뚝보강기초 시스템에서 말뚝과 지반, 기초판과 말뚝 및 기초판과 지반 사이의 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction) 거동이 복잡하고, 실 대형 시험의 여러 가지 한계 등을 감안할 때 실제 설계시 수치해석 등 다른 기법과 함께 기초 설치 대상 지반의 응력상태를 재현할 수 있는 삼축압축시험기를 이용한 모형시험을 병행함으로써 말뚝보강기초 거동 해석에 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구는 말뚝보강기초(Disconnected piled raft)의 침하 억제 효과를 규명하기 위하여 삼축압축시험기를 이용하여 구속응력 재하 상태에서 말뚝 보강률 변화 즉 말뚝 개수 및 말뚝 직경 변화(수평 단면 보강률 변화), 말뚝 길이 변화(수직 단면 보강률 변화) 및 기초판과 말뚝사이 갭(Gap) 포설 재료 변화에 따른 하중-침하 거동을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 말뚝 개수 및 말뚝 직경 변화(수평 단면 보강률 변화) 및 말뚝 길이 변화(수직 단면 보강률)에 따른 하중-침하 관계로부터 전반적으로 보강률이 비례하여 극한하중이 증가함을 알 수 있었으며, 특히 말뚝 개수 및 말뚝 길이 증가의 경우 보강 효과가 큰 것으로 나타났다.
- (2) 말뚝보강기초 시스템에서 침하 억제 효과는 말뚝 보강으로 인한 지반 강성 증가와 말뚝 보강 시 말뚝

설치 부근의 토사에 대한 횡방향 변위 억제로 인한 강도 증가에 따른 것으로 보인다. 따라서 보강 말뚝(Disconnected pile)은 전면기초(Raft)뿐만 아니라 푸팅기초(Footing)와 같은 국부적인 기초시스템에 설치하여도 침하 억제가 가능할 것으로 보이며, 또한 보강 말뚝을 이용하여 부등침하를 조절할 수도 있을 것으로 보인다.

- (3) 말뚝 보강률이 증가할수록 기초 침하량이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었으며, 본 시험에서는 말뚝 수평단면 보강률이 약 18%이고, 수직단면 보강률이 약 70%일 때 침하량은 무보강시에 비하여 약 80%까지 감소되는 것으로 나타나 말뚝 보강이 침하량 억제에 큰 효과가 있는 것을 확인하였다.
- (4) 본 시험에서 수평, 수직 말뚝 보강률에 따른 말뚝보강기초 지반의 변형계수 변화는 각각 직선식 $E(Mpa) = 8.3p(\%) + 121.2$ 와 $E(Mpa) = 1.8p(\%) + 105.5$ 로 나타낼 수 있다.
- (5) 말뚝보강기초 시스템에서 말뚝과 지반, 기초판과 말뚝 및 기초판과 지반사이의 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction) 거동이 복잡함을 감안할 때 실제 설계시 수치해석 등 다른 기법과 함께 기초 설치 대상 지반의 응력 상태를 재현할 수 있는 삼축압축시험기를 이용한 모형 시험으로 말뚝 보강 효과와 그 거동을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

(본 연구는 2004학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.)

참고 문헌

1. 강인규 (2001), 하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초시스템의 최적설계, 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 권오균, 이활, 이승현, 오세봉, 장학성 (2003), “느슨한 모래지반에서의 말뚝지지 전면기초에 대한 실험적 연구”, 2003년 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.439-446.
3. 김경남, 이수형, 정충기, 이혜성 (1999), “Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적 말뚝배치”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 19(III-4), pp.831-839.
4. 민기훈, 손주현, 김성호, 송해진 (2005), “기초분리 말뚝(Disconnected Pile)으로 보강된 지반상의 얇은 기초에 대한 연직 재하시험결과 분석”, 한국지반공학회 기술발표회 논문집, 한국지반공학회.
5. 이영생, 홍승현 (2003), “삼축압축시험기를 이용한 말뚝 지지 전면

- 기초의 거동 연구”, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제 19권, 제6호.
6. 이종구 (1998), 모형실험을 통한 Piled Raft의 지지거동 분석, 석사 학위논문, 서울대학교.
 7. Das, B. M. (1995), *Principles of Foundation Engineering*, PWS, DA.
 8. Wong, I. H., Chang, M. F. and Cao, X. D. (2000), “Raft Foundations with Disconnected Settlement-Reducing Piles”, *Design Applications of Raft Foundations*, Thomas Telford, pp.469-486.
 9. Poulos, H. G. (2001), “Methods of Analysis of Piled Raft Foundations”, *A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations*.

(접수일자 2006. 3. 8, 심사완료일 2006. 4. 16)