

## 기초 분리 말뚝을 이용한 지반 보강 공법에 관한 연구

## Development of Soil Reinforcement Method using Disconnected Piles

박준우<sup>1)</sup> · 최정인<sup>2)</sup> · 민기훈<sup>3)</sup> · 김명모<sup>4)</sup>

Park, Joon Woo · Choi, Jung In · Min, Ki Hoon · Kim, Myung Mo

## 1. 서 론

얕은기초는 설계시 지지력 조건은 만족하지만 침하량 기준을 만족하지 못하는 경우에, 말뚝을 기초 하부에 설치하여 전반적인 침하를 저감시키는 말뚝 기초 형식으로 바뀌는 경우가 종종 있다. 이 때 말뚝이 기초판에 구조적으로 연결되므로 말뚝에 작용하는 응력의 집중도가 매우 크고, 기초판에 국부적으로 높은 휨모멘트가 발생하며, 상부의 하중을 말뚝이 전부 지지하고 있다고 가정하고 설계하므로 과다설계가 될 수 있다. 이와 달리 말뚝을 기초와 이격하여 설치하는 기초 분리 말뚝 형식에서는, 말뚝을 지반의 강성을 증진시키는 지반 보강 요소로 취급한다.

본 연구의 목적은, 하중전이 계측을 수반한 현장 재하 시험을 실시하여 말뚝 길이와 보강 면적비에 따른 기초 분리 말뚝의 지반 보강 효과를 파악하는 데 있다. 기초 분리 말뚝을 이용하여 침하를 효과적으로 줄이는 방식이 최근 국내외에서 연구되고 있는데(X. D. Cao et al., 2004; F.M. Abdrabbo et al., 2004; 민기훈 등, 2004; 이영생 등, 2006), 이 방식은 여러 가지 면에서 기존 말뚝지지 전면기초에 비하여 장점이 존재한다. 먼저 현장 타설 말뚝 방식으로 시공한 뒤 잡석을 설치하므로 소음으로 인한 민원이 많은 도심지에서의 공사에도 적합하다. 말뚝을 이용한 지반 보강의 원리이므로 말뚝을 암반까지 관입할 필요가 없어서 길이를 줄일 수 있으므로 말뚝 재료비를 감소시키고, 기초와 접합시키는 작업이 없어지므로 시공이 보다 용이해진다. 그러나 아직 현장·실내시험이 거의 실시되지 않았으며 시공사례 역시 많지 않기 때문에 지반 보강 원리와 상부 구조물 지지 메커니즘이 확실히 규명되어 있지 않아 설계에도 어려움이 따른다. 본 연구의 목적은, 하중 전이 메커니즘을 이용하여 말뚝 길이, 보강 면적비에 따른 기초 분리 말뚝의 지반 보강 효과를 파악하는 데 있다.

## 2. 실험 조건

동탄 신도시 건설현장에서 현장 재하 시험을 수행하였다. SPT로 지반조사를 실시한 결과, 대상 지반은 N치가 13~23인 실트질이 섞인 모래지반이고 지하수위는 18m 이하에 존재하며, 지반이 매우 불균질 한 것으로 나타났다. N치로부터 설계하중을  $30t/m^2$ 로 추정하고 'ASTM-D1143 Cyclic loading codes'를 기반으로 하여 원지반에 대해 설계하중의 300%, 기초 분리 말뚝으로 보강한 지반에 대하여 450%까지 콘크리트 기초를 이용한 평판 재하 시험을 실시하였다. 기초폭을 0.65m, 0.9m, 1.5m의 세가지 경우로 나누어서 보강 면적비의 영향을 측정하였고, 2m와 3m의 두가지 말뚝을 사용하여 관입 깊이에 따른 보강 효과를 분석하였다. 폭 1.5m 기초를 보강한 3m 길이 말뚝에 변형율계 세 개를 설치하였으며, 잡석층 밑에 토압계를 설치하였다. 말뚝과 기초의 사이에는 10cm 두께의 잡석층을 설치하였고, 네 개의 LVDT를 이용하여 기초의 네 변에서의 침하를 측정하였다.

민기훈 등(2004)이 제시한 기초 분리 말뚝의 개념도는 그림 1과 같다. 상부하중은 다짐층을 통하여 말뚝머리로 직접 전달되는 부분, 상부지반에 전달된 하중이 부마찰력으로서 말뚝에 전달되는 부분과 직접 지반으로

1) 비회원 · 서울대학교 건설환경공학부 토목공학과 석사과정 · E-mail:miriald@hanmail.net

2) 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 토목공학과 박사과정 · E-mail: 9luck2u@naver.com

- 발표자

3) 비회원 · 포스코건설 건축사업본부 건축기술그룹 토목조경파트 차장 · 공학학사 · E-mail:khmin@poscoenc.com

4) 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: geotech@snu.ac.kr

전달되는 부분으로 나누어지며 말뚝으로 전달된 하중은 하부에서 말뚝의 주변마찰 및 선단지지를 통해 하부 지층으로 다시 재분배된다. 그림 2는 현장 재하 시험 준비가 완료된 상태의 사진이다.

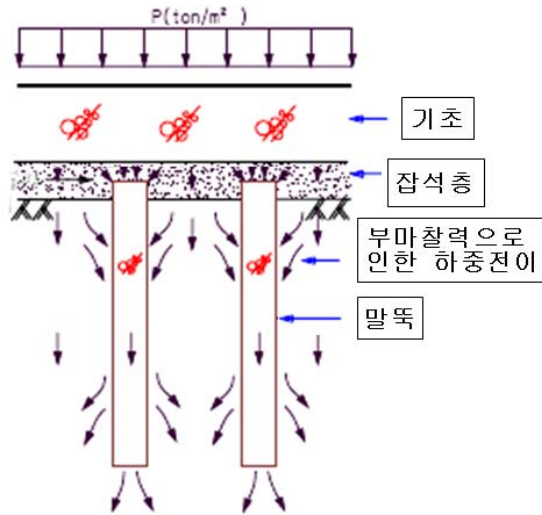


그림 2. 기초 분리 말뚝의 개념도



그림 3. 재하 실험 준비 완료 후 전경

### 3. 재하시험 결과 및 분석

반복 재하를 하면서 실시간으로 침하량을 모니터링하였다. 시험 결과, 그림 3과 같이 모든 기초에서 기초 분리 말뚝을 관입한 지반이 원지반보다 침하량이 설계하중의 300%에서 16%~50%까지 감소함으로서, 지반 보강 효과가 있다는 사실을 확인하였다. 하중-침하 곡선(P-S curve)으로 항복 응력을 산정한 후 안전율 2을 적용하여 허용지지력을 구하였다. 하중-침하 곡선 이외에, LogP-LogS curve, P- $\Delta S/\Delta(\text{Log } t)$  curve, S-Log t curve를 이용하여 표 1과 같이 허용지지력을 구하였다.

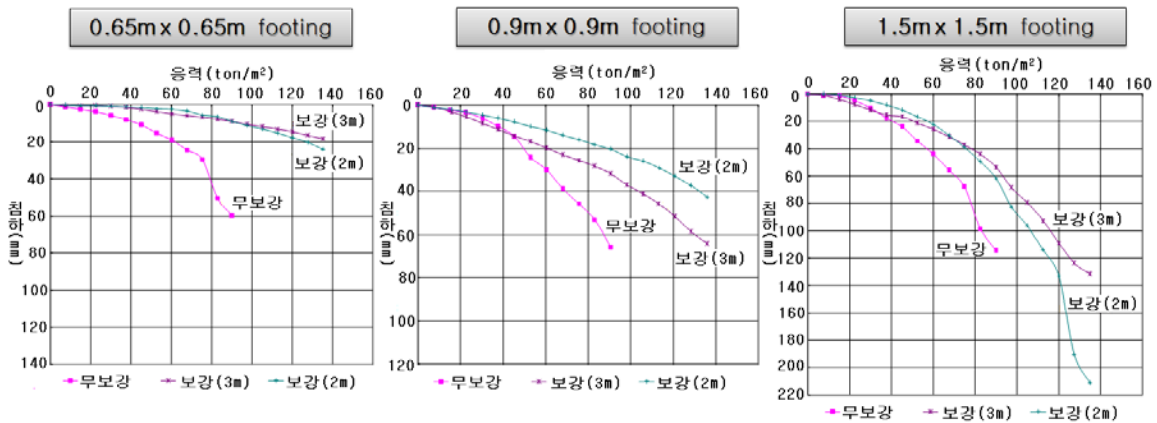


그림 4. 기초 크기별 보강 말뚝 길이에 따른 침하량 비교

보강된 지반은 원지반에 비하여 허용지지력이 27%~120% 정도 증가하였으며, 2m와 3m의 말뚝 길이 차이에 따른 지지력의 증감은 나타나지 않았다. 이는 기초폭에 따른 지반내 응력의 영향 범위가 지반으로부터 2m 이내에 대부분 분포하므로, 말뚝 길이와는 관계없이 지반 조건에 따른 문제라는 결론을 얻었다.

표 3. 허용 지지력

(단위 : ton/m<sup>2</sup>)

기초 폭	말뚝 길이	$P-S$	$\log P - \log S$	$S - \log t$	$\frac{ds}{d(\log t)} - P$	AVE.
0.65 m	무보강	19.31	15.63	18.63	14.84	17.10
	2m	29.17	20.77	24.42	21.06	23.86
0.65 m	3m	30.06	18.84	21.76	16.64	21.83
0.9 m	무보강	16.20	9.57	14.97	9.70	12.61
	2m	31.01	17.28	30.88	31.61	27.70
0.9 m	3m	29.82	25.90	28.67	24.83	27.31
1.5 m	무보강	18.49	12.65	19.22	12.13	15.62
	2m	29.42	24.52	31.72	22.12	26.95
1.5 m	3m	25.83	24.54	29.69	22.99	25.76

말뚝의 지반 보강 매커니즘을 규명하기 위하여 말뚝의 깊이별 변형률 측정값과 변위 측정값을 이용하여 말뚝의 축하중 분포곡선(그림 4)과 주변 하중전이곡선(f-w curve)(그림 5)을 도출하였다.

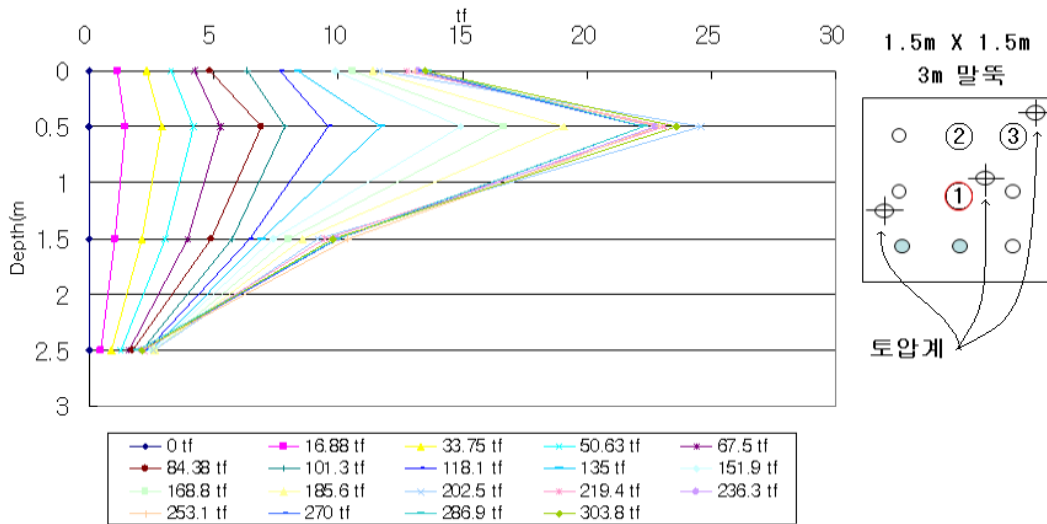


그림 5. 3m 길이 말뚝으로 보강된 폭 1.5m 기초 1번 말뚝의 축하중 분포 곡선

그림 4는 3m 길이 말뚝으로 보강된 폭 1.5m 기초의 정 중앙(1번) 말뚝에서의 축하중 분포 곡선을 보여준다. 깊이 0.5m까지는 부마찰력으로 인해 하중이 증가하고, 0.5m 이하로는 하중이 감소하는 것으로 나타났다. 말뚝 상부에 부마찰력이 발생하는 것은 풍화토보다 상대적으로 강성이 큰 말뚝에 변형이 덜 발생하여 말뚝과 지반 사이에 상대변위가 발생하기 때문이다. 부마찰력은 말뚝에 작용하는 하중을 증가시키지만, 기초 분리 보강 말뚝의 경우 말뚝 인접 지반이 받는 하중이 감소하는만큼 말뚝 상부에 부마찰력이 발생하는 것이므로 전체 시스템의 침하를 감소시키고 지지력을 증가시키는 역할을 하게 된다.

그림 5는 3m 길이 말뚝으로 보강된 폭 1.5m 기초 1번 말뚝의 각각 1m, 2m 깊이에서의 주변이 항복점에 도달하는 것을 보여준다. 말뚝 상부에 발생한 부마찰력으로 인해 증가된 하중은 대부분 말뚝의 0.5m 깊이 이하 주변 마찰력으로 지지되는 것을 볼 수 있으며 선단근입형 말뚝이 아니므로 말뚝 선단에서의 저항력은 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

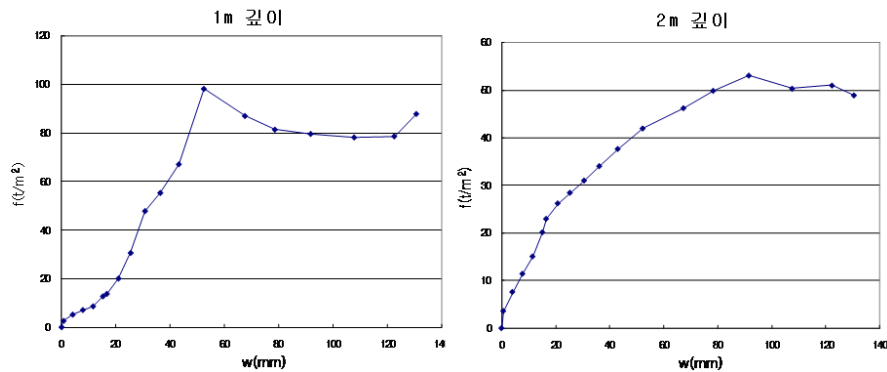


그림 6. 3m 길이 말뚝으로 보강된 폭 1.5m 기초 1번 말뚝의 f-w curve

#### 4. 결론

본 연구에서는 풍화토 지반에서 현장타설로 시공된 기초 분리 보강 말뚝에 대해 현장 재하 시험을 실시하였다. 보강면적비와 기초 크기, 그리고 말뚝 길이에 차이를 두어 이에 따른 침하 감소효과, 지지력 증대 효과, 그리고 하중전이 메커니즘 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기초 분리 말뚝으로 보강된 지반은 원지반에 비하여 침하량이 16%~50%까지 감소함으로써, 기초 분리 말뚝이 기초의 침하 감소에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 보강 말뚝 길이에 따른 침하 감소효과의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.
- (2) 기초 분리 말뚝으로 보강된 지반은 원지반에 비하여 허용지지력이 27%~120% 증가함으로써, 얕은기초의 지지력 증가에 효과적인 것으로 나타났다. 보강 말뚝 길이에 비례한 지지력 증감효과는 나타나지 않았는데, 이는 기초폭에 따른 지반 내 응력의 영향 범위가 깊이 2m에 못 미치기 때문인 것으로 보인다. 원지반의 지지력은 보강 후의 지지력에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 하중전이 분석 결과, 말뚝과 지반의 강성차이로 인해 말뚝 상부에 부마찰력이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 지반에 작용하는 하중을 감소시키는 역할을 하며, 부마찰력으로 인해 증가된 하중은 중립축 이하 말뚝의 정 주면마찰력으로 지지되는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주)포스코 건설 및 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 진영 ENC 김성호 사장님의 지도·편달에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 민기훈, 김성호, 손주혁, 송해진 (2004), “기초분리 말뚝으로 보강된 지반상의 얕은 기초에 대한 연직 재하 시험결과 분석”, 2004 한국지반공학회 봄학술발표회
2. 이영생, 홍승현 (2006), “말뚝보강기초의 하중-침하량 거동 및 침하감소효과에 대한 실험적 연구”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 4호, pp. 95~104
3. Cao, D.C., Wong, I.H., and Chang, M.F. (2004) Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v 130, n 2, p 129-138
4. Abdrabbo, F.M., Abouseeda, H.M., and Gaaver, K.E. (2004) Performance of raft with pile-settlement reducers, *International Conference:Future Vision and Challenges for Urban Development*