

기초분리말뚝 공법의 설계기법 개발

Development of Design Method of Disconnected Piled Raft Foundation System

최정인¹⁾, Jung In Choi, 민기훈²⁾, Ki Hoon Min, 김성호³⁾, Sung Ho Kim, 권오성⁴⁾, Oh Sung Kwon, 김명모⁵⁾, Myoung Mo Kim

1) 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University

2) (주)포스코 건설 차장, Deputy General Manager, POSCO Engineering & Construction, Co., Ltd.

3) (주)진영 이엔씨 대표, President, JIN YOUNG Engineering & Consultants Co., Ltd.

4) (주)대림산업 과장, Manager, Daelim Industrial Co., Ltd.

5) 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : In the design of a foundation, settlement of the foundation may exceed allowable design criteria even with a competent bearing stratum. In such a case, a piled-raft foundation system may be adopted using piles as settlement reducing component. In this paper, Disconnected Piled Raft Foundation (DPRF) system, which installs disconnected piles underneath the raft and uses the piles as ground reinforcements, is studied as a cost effective design method against the classical piled-raft foundation system. To this end, large size loading tests were carried out on weathered ground changing area replacement ratio and length of piles. The results indicated that the settlement of the reinforced ground was reduced by 34~87% and the allowable bearing pressure increased by 70% on average from those of the unreinforced original ground, respectively. The correlating formula between the area replacement ratio and the load bearing ratio of piles were derived from the test results and numerical analysis. From the correlation, a design method determining the size and the quantity of the disconnected piles to enhance the bearing capacity of original ground to the desired value was proposed based on one inch settlement criteria.

Key words : Disconnected Pile, Piled-Raft Foundation, Area replacement ratio, Load bearing ratio of piles.

1. 서 론

안전한 기초가 되기 위해서는 허용 지지력과 예상 침하량이 일정 범위 내에 있어야 한다. 적절한 지지층이 존재할 경우 얇은 기초는 기초 설계에 있어서 경제적이고 적합한 설계가 될 수 있지만 지지력 조건이나 침하량 조건을 만족하지 못하는 경우 말뚝을 침하 저감용으로 사용하여 말뚝기초나 말뚝지지 전면기초로 설계를 할 수 있다 (Burland et al. 1997). 지반의 허용지지력과 설계지지력이 큰 차이가 나지 않을 경우 기존의 말뚝기초 설계는 지반의 지지력을 무시하고 말뚝이 상부 하중을 전부 지지하고 있다는 가정 하에 설계하므로 상당히 비경제적인 설계가 될 수 있다. 말뚝 지지 전면기초 역시 말뚝에 작용하는 응력의 집중도가 매우 크고, 기초판에 국부적으로 높은 휨모멘트가 발생하므로 과다설계가 될 수 있다.

이와 달리 말뚝을 기초와 이격하여 설치하는 Disconnected Piled Raft Foundation (DPRF) system 은 말뚝을 구조재로서가 아니라 지반의 강성을 증진시키는 보강재로서 사용하는 새로운 개념의 기초 형

식이다 (Wong et al. 2000). 말뚝이 보강재로서 사용되므로 구조재로 간주되는 말뚝기초나 말뚝지지 전면기초에 비해서 더 낮은 안전율을 적용할 수 있다. 또한 기초와 이격하여 시공되므로 말뚝에 작용하는 응력의 집중도를 낮추고 지반의 지지력을 충분히 활용함으로써 구조적으로 말뚝 부재의 허용응력을 만족시키기 위한 말뚝의 개수를 줄일 수 있고 말뚝과 기초판과의 연결 작업이 불필요하기 때문에 상당히 경제적이다.

Wong et al. (2000)은 단단한 점토 위에 놓여진 말뚝지지 전면기초에 대한 수치해석을 수행하였다. 말뚝이 전면판에 구조적으로 연결된 경우와 분리된 경우에 대한 수치해석 결과 말뚝을 설치하지 않은 경우에 비해 전면판에 발생하는 침하와 휨모멘트 감소 효과에 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 또한 Cao et al. (2004)는 실내 모형시험을 통하여 DPRF system의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 침하 감소용 분리 말뚝이 설치된 경우 부등침하와 휨모멘트가 감소함을 확인하였고 말뚝 길이의 증가가 전체 시스템의 강성을 증가시키는데 효과적임을 확인하였다. ABDREBBO et al. (2004)는 수치해석을 통하여 DPRF system이 기초의 침하 저감에 효과적임을 확인하였고 말뚝과 전면판 사이에 있는 sand cushion의 영향에 관한 연구를 수행하였다. Lee et al. (2007)는 삼축시험을 통해 DPRF system이 기초의 침하저감에 효과적임을 확인하였고 말뚝 치환율에 따른 보강 효과에 대한 연구를 수행하였다.

여러 연구자들에 의해서 전면기초의 침하감소와 지지력 증가에 있어서 DPRF system의 효율성이 확인되었지만 이 공법을 실무에 적용하기 위한 설계기법에 관한 연구는 전혀 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 N값이 15~20 정도 되는 풍화토 지반에 보강면적비와 말뚝의 길이를 변화시켜가며 총 9가지의 대형 평판재하시험을 수행하여 DPRF system의 거동을 분석하였다. 또한 수치해석을 통하여 현장 재하시험 결과를 모사하고 변수연구를 수행하여 DPRF system의 설계기법을 제안하였다.

2. 실험조건

실험 대상 지반은 풍화토 지반으로써 통일분류법 상으로 SP에 해당되며 비중은 2.66, 건조단위중량은 18kN/m^3 이다. 지하수위는 18m 이하에 존재하는 것으로 조사되었다. 철근 콘크리트로 만들어진 폭 (0.65m, 0.9m, 1.5m), 높이(0.6m)의 3가지 크기의 정사각형 기초에 대하여 총 9가지의 대형 평판재하시험이 수행되었다. 재하시험은 평판의 크기별로 무보강인 경우, 2m 말뚝으로 보강된 경우, 3m 말뚝으로 보강된 경우에 대하여 수행되었으며 보강말뚝의 직경은 100mm로서 총 9분의 무근 콘크리트 말뚝이 현장 타설로 시공되었다. 말뚝과 기초 사이에는 10cm의 잡석 다짐층을 설치하여 상부하중이 말뚝과 지반에 전달되도록 하였다. 지반조사는 총 5개소에 대하여 수행하였으며 SPT 실험을 수행한 결과 N값이 15~

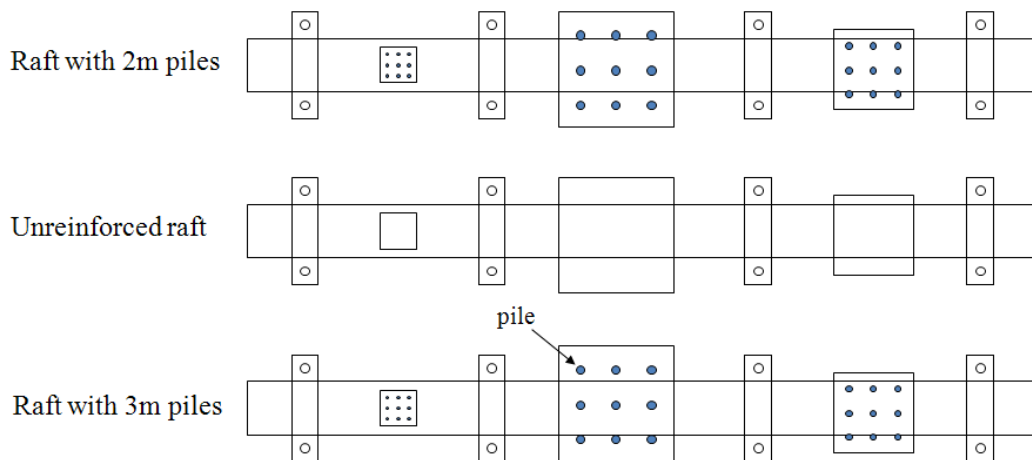


그림 1. 재하시험 평면도

20 정도로 재하시험 위치에 따라 약간의 차이를 보였다. 그림 1은 재하시험 현장의 평면도를 보여준다. N값으로부터 무보강 지반의 허용지지력을 30t/m²로 추정하였고 하중 재하는 유압잭을 사용하여 'ASTM D1143-82'를 기반으로 무보강 지반에 대해서는 허용지지력의 300%, 보강 지반에 대해서는 허용지지력의 450%까지 재하하였다. 실험조건은 표 1에 요약되어 있다.

표 1. 실험조건

| 실험번호 | 기초 크기(m) | 보강 말뚝 개수 | 말뚝 길이(m) | 보강면적비 ¹⁾ , A _r (%) |
|------|-------------|----------|----------|--|
| 1 | 0.65 x 0.65 | 무보강 | - | - |
| 2 | 0.9 x 0.9 | 무보강 | - | - |
| 3 | 1.5 x 1.5 | 무보강 | - | - |
| 4 | 0.65 x 0.65 | 9 | 2 | 3.1 |
| 5 | 0.9 x 0.9 | 9 | 2 | 8.7 |
| 6 | 1.5 x 1.5 | 9 | 2 | 16.7 |
| 7 | 0.65 x 0.65 | 9 | 3 | 3.1 |
| 8 | 0.9 x 0.9 | 9 | 3 | 8.7 |
| 9 | 1.5 x 1.5 | 9 | 3 | 16.7 |

¹⁾보강면적비 = 말뚝 총 단면적 / 기초 면적

3. 실험 결과 및 분석

3.1 침하량

그림 2는 재하시험 결과를 재하응력-침하량 곡선으로 나타낸 것이고 표 2는 설계 허용지지력을 원지반 허용지지력의 2배인 60tf/m²으로 가정했을 때 보강에 따른 침하 감소율을 보여준다.

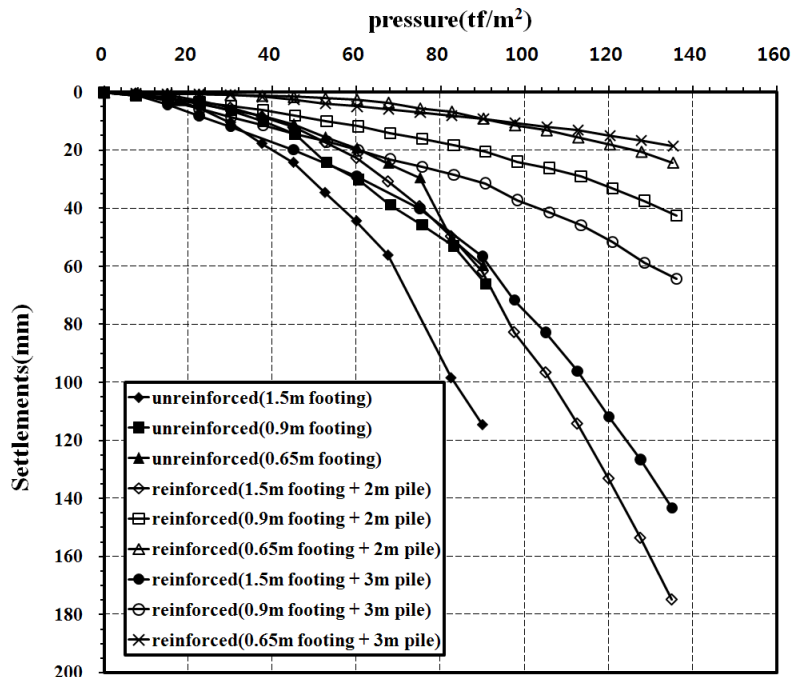


그림 2. 재하시험 결과

표 2. 말뚝 보강에 의한 침하 감소 효과

| 기초 크기(m) | 말뚝길이(m) | 60tf/m ² 하중단계에서 침하량(mm) | 침하감소율 ¹⁾ (%) |
|----------|---------|------------------------------------|-------------------------|
| 0.65 | 무보강 | 19.18 | - |
| | 2 | 2.45 | 87 |
| | 3 | 4.84 | 75 |
| 0.9 | 무보강 | 30.15 | - |
| | 2 | 11.69 | 61 |
| | 3 | 20 | 34 |
| 1.5 | 무보강 | 44.32 | - |
| | 2 | 22.5 | 49 |
| | 3 | 28.93 | 35 |

¹⁾침하감소율 = 100 - (보강 지반 침하량 / 무보강 지반 침하량) x 100

실험 결과 보강지반은 원지반에 비해 침하량이 33~87%까지 감소함으로써 지반 보강에 효과적임을 알 수 있다.

3.2 허용 지지력

보강 지반의 허용지지력 증가 효과를 분석하기 위하여 도해법을 통해 각 재하시험 결과에 대한 항복 응력을 구한 후 안전율 2를 적용하여 허용지지력을 구하였다. 하중-침하 곡선 이외에, LogP-LogS curve, P-ΔS/Δ(Log t) curve, S-log t curve를 이용하여 표 3과 같이 허용지지력을 구하였다. 그 결과 허용지지력이 평균 70% 이상 증가함으로써 지반보강에 효과적임을 알 수 있다.

표 3. 말뚝 보강에 의한 허용 지지력 증가 효과

| 기초크기 (m) | 말뚝길이 (m) | P-S | LgP-LogS | S-log t | P-ΔS/Δ(logt) | 평균값 | 지지력 증가율 ¹⁾ (%) |
|----------|----------|-------|----------|---------|--------------|-------|---------------------------|
| 0.65 | 무보강 | 19.31 | 15.63 | 18.63 | 14.84 | 17.10 | - |
| | 2 | 29.17 | 20.77 | 24.42 | 21.06 | 23.86 | 40 |
| | 3 | 30.06 | 18.84 | 21.76 | 16.64 | 21.83 | 28 |
| 0.9 | 무보강 | 16.20 | 9.57 | 14.97 | 9.70 | 12.61 | - |
| | 2 | 31.01 | 17.28 | 30.88 | 31.61 | 27.70 | 120 |
| | 3 | 29.82 | 25.90 | 28.67 | 24.83 | 27.31 | 117 |
| 1.5 | 무보강 | 18.49 | 12.65 | 19.22 | 12.13 | 15.62 | - |
| | 2 | 29.42 | 24.52 | 31.72 | 22.12 | 26.95 | 73 |
| | 3 | 25.83 | 24.54 | 29.69 | 22.99 | 25.76 | 65 |

¹⁾지지력 증가율 = (보강 지반 지지력 - 무보강 지반 지지력) / 무보강 지반 지지력 × 100

4. 수치해석

현장 재하시험의 경우 시험 횟수와 계측기 수량의 제한으로 인하여 다양한 변수들에 대한 고려가 어렵다. 본 절에서는 설계기법 개발을 위한 변수연구를 수행하기 위하여 먼저 수치해석을 통해 재하시험

을 모델링하고 해석결과와 실험결과의 하중-침하 곡선을 비교하여 해석 모델의 유효성을 검증하였다. 변수연구는 모델을 단순화하여 단말뚝 보강 조건에서 해석을 수행하였으며 다양한 지반조건에 대하여 보강면적비와 말뚝하중분담비의 관계를 제안하였다.

4.1 수치해석 개요

상용 유한차분 해석 프로그램인 FLAC3D(Ver. 3.10)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 모델링 영역은 기초 폭의 5배 이상 말뚝 길이의 2배로 설정하였으며 하중조건은 기초 상부에 등분포 하중으로 재하하여 강성기초 조건을 모사하였다. 표 4는 해석에 사용된 적용 모델과 입력 물성치를 보여준다. 변수연구는 지반조건과 보강면적비를 변수로 설정하여 수행하였으며 표 5는 해석조건을 보여준다. 이 때 입력 물성치는 N값에 따라 탄성계수를 변화시켰으며 강도정수는 기존에 사용하던 값을 그대로 적용하였다.

표 4. 수치해석 입력 물성치

| 재료 종류 | 적용모델 | 탄성계수 ¹⁾ (Pa) | 마찰각(°) | 점착력(t/m ²) | 단위중량(t/m ³) |
|--------------|-------------------|-------------------------|--------|------------------------|-------------------------|
| 상부 풍화토층 | M-C ²⁾ | 1.4e7 | 38 | 3 | 1.8 |
| 중간 풍화토층 | M-C | 1.8e7 | 38 | 3 | 1.8 |
| 하부 풍화토층 | M-C | 2.1e7 | 38 | 3 | 1.8 |
| 잡석 다짐층 | M-C | 2.5e7 | 40 | 0 | 2.0 |
| 콘크리트(말뚝, 기초) | Elastic | 2e10 | - | - | 2.5 |

¹⁾ $E=7.5+0.8N(\text{Mpa}) - \text{Anagnosopoulos}(1990)$

²⁾Mohr-Coulomb

표 5. 변수연구 수행조건

| 지반 조건 | N값 ¹⁾ | 말뚝 직경(mm) | 보강면적비(%) |
|--------|------------------|-----------|----------|
| Dense | >30 | 100 | 3 |
| | | 200 | 12 |
| | | 300 | 28 |
| Medium | 10~30 | 100 | 3 |
| | | 200 | 12 |
| | | 300 | 28 |
| Loose | <10 | 100 | 3 |
| | | 200 | 12 |
| | | 300 | 28 |

¹⁾Peck(1974)

4.2 수치해석 결과

1.5m 정사각형 기초에 대한 해석 결과 그림 2에서와 같이 무보강 지반과 3m 말뚝으로 보강된 지반

인 경우 모두 해석결과와 실측결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 변수연구 수행 결과 그림 3과 같이 보강면적비가 증가함에 따라 침하량이 감소하나 침하 감소폭은 점점 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 Loose 한 경우가 Dense 한 경우보다 동일 보강면적비에 대하여 침하 감소율이 더 큰 것을 알 수 있다.

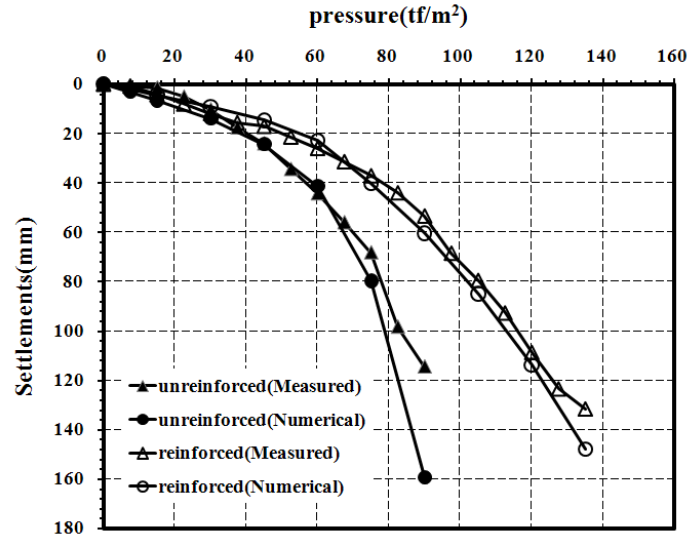


그림 2. 수치해석을 통한 무보강 및 보강 지반의 재하응력-침하량 곡선 예측

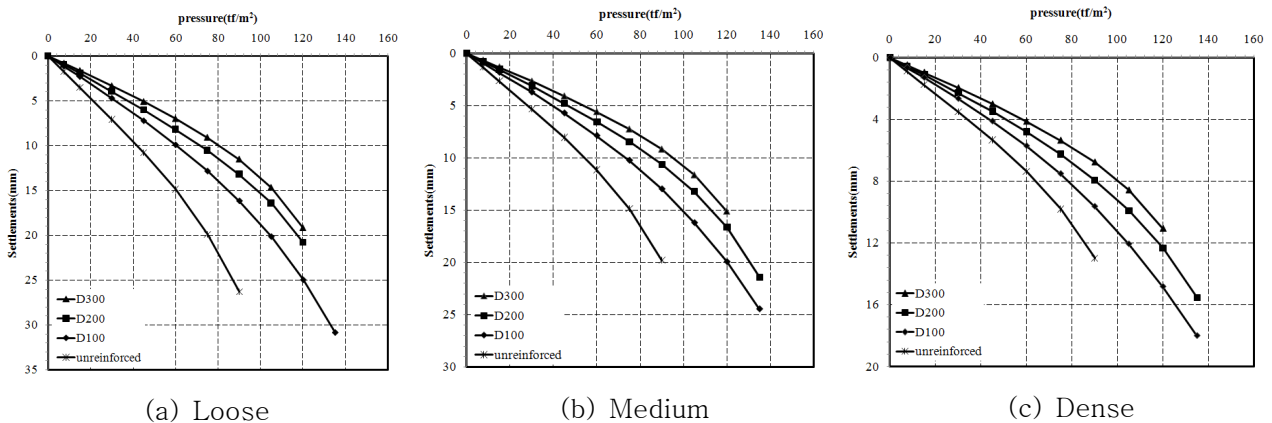


그림 3. 지반조건과 보강면적비에 따른 재하응력-침하량 곡선

전체하중에 대하여 말뚝이 분담하는 하중의 비로 표현이 되는 말뚝하중분담비는 그림 4에서와 같이 보강면적비가 증가함에 따라 증가하며 하중이 증가함에 따라 증가하다가 일정한 값에 수렴하는 경향을 보여준다. Cao et al.(2004)은 실내모형 실험 결과 말뚝하중분담비가 초기 하중단계에서 급격히 증가하며 하중증가에 따라 점차적으로 감소하여 약 30% 정도 값에 수렴한다고 보고하였다. 이는 본 연구에서 수치해석을 통해 얻은 결과와 유사한 것으로 판단된다.

앞서 설정한 3가지 지반조건에 대하여 보강면적비 변화에 따른 평균 말뚝하중분담비 관계를 도시하면 그림 5와 같다. 말뚝하중분담비는 말뚝과 지반의 상대적인 강성 차이에 의해 결정이 되므로 지반의 강성이 커질수록 말뚝하중분담비는 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 보강면적비가 증가함에 따라 말뚝하중분담비는 증가하나 그 증가율은 감소하는 경향을 보인다. 표 6에는 회귀분석을 통해 보강면적비(A_s)과 말뚝하중분담비(R)의 관계를 지수함수의 형태로 나타내었으며 매우 높은 상관도를 보이는 것으로 나타났다.

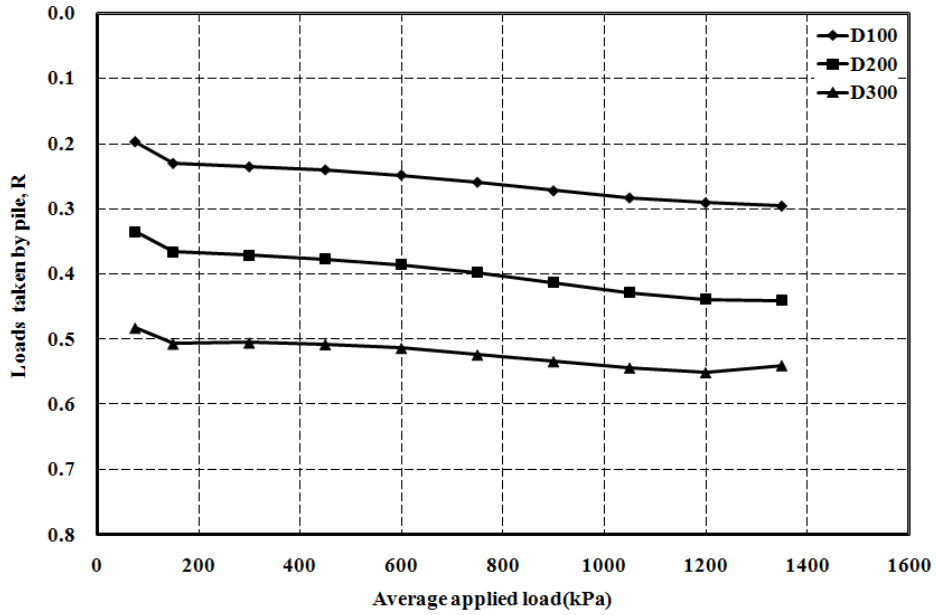


그림 4. 보강면적비와 재하응력에 따른 말뚝하중분담비 변화(Medium soil)

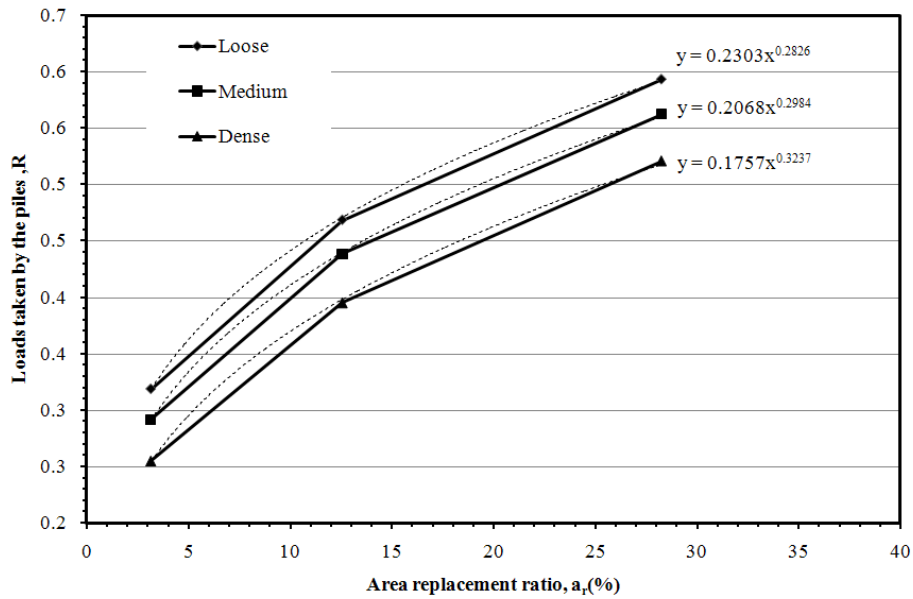


그림 5. 보강면적비와 말뚝하중분담비 관계

표 6. 보강면적비와 말뚝하중분담비 관계

| 지반 조건 | N 값 | 보강면적비(a_r)와 말뚝하중분담비 ¹⁾ (R)의 경험적인 상관관계 |
|--------|-------|--|
| Dense | >30 | $A_r = \text{Exp}(3.086 \ln R + 5.36)$ |
| Medium | 10~30 | $A_r = \text{Exp}(3.356 \ln R + 5.29)$ |
| Loose | <10 | $A_r = \text{Exp}(3.534 \ln R + 5.19)$ |

¹⁾R = 말뚝분담하중(P_{pile}) / 전체재하하중($P_{soil} + P_{pile}$)

5. DPRF system 설계기법 개발

5.1 보강면적비 결정법

DPRF system을 현장에 적용하기 위해서는 대상 지반에 대하여 설계 허용지지력을 만족시킬 수 있는 말뚝 보강면적비를 설계할 수 있어야 한다. 본 절에서는 구조물의 허용 침하량 기준을 이용하여 목표 허용지지력에 도달하기 위한 말뚝 보강면적비 결정 방법을 제안하고자 한다. 보강면적비 산정 과정은 다음과 같다.

1. 식 (1)을 이용하여 구조물의 허용 침하량에 대하여 대상 지반의 대표 N값에 대한 원지반의 허용지지력(q_{soil})을 산정한다(Bowels, 1977).

$$q_{net(all)}(kN/m^2) = 11.98(N_1)_{60} \left(\frac{3.28B+1}{3.28B} \right)^2 F_d \left(\frac{S_e}{25} \right) \quad (B > 1.22m) \quad (1)$$

여기서, $(N_1)_{60}$ 은 보정된 표준관입시험값, B 는 기초 폭(m), $F_d = 1 + 0.33(D_f/B) \leq 1.33$, S_e 는 허용침하량(mm)이다.

2. 식 (2)를 이용하여 말뚝하중분담비(R)를 결정한다(POSCO E&C, 2008).

$$R = \frac{q_{target} - q_{soil}}{q_{target}} \quad (2)$$

여기서, q_{target} 은 목표 허용지지력, q_{soil} 은 원지반 허용지지력이다.

3. 표 6에 제안된 관계식을 이용하여 주어진 말뚝하중분담비에 대한 보강면적비를 산정한다.

5.2 DPRF system 설계 예시

표 7은 다양한 지반조건에 대하여 여러 가지 목표허용지지력에 도달하기 위한 보강면적비를 보여준다. 이 때, 상부구조물의 허용 침하량은 1 inch로 가정하였다.

표 7. DPRF system 설계 예시

| 지반조건 | 대표 N값 | 원지반 허용지지력 (tf/m ²) | 목표허용지지력(tf/m ²)에 도달하기 위해 필요한 보강면적비(%) | | | |
|--------|-------|-----------------------------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | 20 tf/m ² | 30 tf/m ² | 40 tf/m ² | 50 tf/m ² |
| Dense | 32 | 38 | - | - | 0.02 % | 3 % |
| Medium | 20 | 24 | - | 1 % | 10 % | 22 % |
| Loose | 8 | 10 | 16 % | 43 % | 65 % | 82 % |

6. 결론

본 논문에서는 현장 재하시험 결과와 수치해석을 통해 기초분리말뚝 공법의 설계기법 확립을 위한 연구를 수행하였다. N값이 15~20정도 되는 풍화토 지반에 보강하지 않은 경우와 무근 콘크리트 말뚝으로 보강한 경우에 대하여 총 9가지의 대형 평판재하시험을 수행하였으며 3차원 유한차분 해석 프로그램을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

1. 재하시험 결과 원지반 허용지지력의 2배인 60tf/m² 하중 단계에서 분리말뚝으로 보강된 지반의 침하량이 원지반의 침하량에 비하여 34~87%까지 감소하고 허용지지력이 70% 이상 증가하여 본 공법이 기초의 침하 감소와 지지력 증가에 효과적임을 확인하였다.
2. 수치해석 방법을 이용하여 무보강 지반과 보강 지반의 하중-침하 거동을 효과적으로 예측하였으며 변수연구를 통해 다양한 지반조건에 대하여 보강면적비(말뚝 총 단면적 / 기초 면적)와 말뚝하중분담비(말뚝분담하중 / 전체재하하중) 관계를 제안하였다.
3. 위의 결과들을 이용하여 본 공법의 설계기법으로서 원지반 허용지지력 대비 목표 허용지지력에 도달하기 위해 필요한 기초분리말뚝의 보강면적비 결정법을 제안하였다.

DPRF system은 얇은 기초로 설계시 원지반의 허용지지력이 목표 허용지지력에 약간 부족하거나 허용 침하량을 약간 초과하는 많은 현장에 말뚝기초나 말뚝지지 전면기초 공법에 비해 경제성을 갖춘 공법으로서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)포스코 건설 및 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다

참고문헌

1. (주)포스코 건설. (2008), "무근 CIP 기초분리말뚝 공법개발 연구과제 - 최종보고서"
2. 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*, pp.1~18.
3. Anagnostopoulos, A. G.(1990), "The compressibility of cohesionless soils.", *Geotechnik, No.3*
4. Bowles, J.E.(1977), *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw-Hill, NewYork., pp.239~241.
5. Burland, J. B., Broms, B. B., and de Mello, V. F. B.(1977), "Behavior of foundations and structures", *Proceeding of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 2, pp.495~546.
6. Cao, X. D., Wong, I. H., and Chang, .M. F.(2004), "Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand.", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, 130(2), pp.129~138.
7. Lee, Y. S., Hong, S. H.(2007), "Settlement-reducing effects of disconnected piled raft foundation system.", *Proceeding of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.273~288.
8. FLAC3D.(2006), *User's manual.*, Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group Inc
9. Peck, R. D., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H.(1974), *Foundation Engineering*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
10. Wong, I. H., Chang, M. F., and Cao, X. D.(2000), "Raft foundations with disconnected settlement reducing piles.", *Design application of raft foundations and ground slabs*, Chap.17, Thomas Telford, London, pp.469~486.