

## 캡으로 연결된 마이크로파일 기초시스템의 하중분담거동에 관한 수치해석 평가

### Numerical Assessment of Load Sharing Behavior on Capped Micropile Foundation Systems

정 동 진<sup>1</sup> Jung, Dong-Jin

박 성 완<sup>2</sup> Park, Seong-Wan

조 국 환<sup>3</sup> Cho, Kook-Hwan

심 영 종<sup>4</sup> Sim, Young-Jong

#### Abstract

The concrete cap, which was established on the top of the micropile, usually considered as an important structural component in micropile supported foundation systems. However, relatively few studies have been made on the load sharing behavior of the capped micropile foundation systems. The primary objective of this study is to assess the load sharing behavior of the capped micropile foundation systems. Therefore, a full-scale test on an instrumented capped micropile is conducted for establishing the load-displacement responses. Nonlinear numerical method was used to quantify the load sharing behavior of the pile cap and micropile respectively. As a result, it was found that the pile cap shares about 50% load from final loading steps in the case of 2 by 1 micropile foundation systems. In the case of 2 by 2, the pile cap shares about 30% load from final loading steps. In addition, the load sharing behavior of the micropile cap becomes larger with an increase in spacing and the battered angle of micropile respectively.

#### 요 지

마이크로파일이 직접기초시스템으로 활용되는 경우 말뚝 캡이 설치되어 말뚝지지 전면기초의 래프트와 같은 역할을 수행하지만 마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동에 관한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 말뚝 캡이 씌워진 실물 크기의 마이크로파일 재하시험 자료를 바탕으로 3차원 비선형 유한요소해석을 실시하여 마이크로파일과 래프트의 하중분담 거동을 분석하고 각각의 변수들이 하중분담 거동에 미치는 영향을 파악하였다. 해석 결과 2 × 1 마이크로파일 기초시스템의 경우 최종하중단계에서 약 50%의 하중을, 그리고 2 × 2 마이크로파일 기초시스템의 경우 약 30%의 하중을 캡이 분담하고 있는 것으로 나타났다. 또한 마이크로파일의 간격 및 경사각이 증가할수록 캡의 하중분담이 커지는 것을 알 수 있다.

**Keywords :** Capped micropile, Foundation system, Load sharing, Numerical assessment

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 공학석사 (Member, Master of Engrg., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ.)

2 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Railway Construction, Graduate School of Railway, Seoul National Univ. of Technology)

4 정희원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Land, Housing & Urban Research Institute, Korea Land and Housing Corporation)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

마이크로파일은 현장타설말뚝의 한 종류로서 일반적인 파일공법에 비하여 비교적 작은 소음 및 낮은 진동발생의 특성과 경사진 시공이 가능하여 기존 구조물의 보강, 직접기초 등 여러 분야로 활용이 가능한 장점이 있다. 최근 도심지 내 기초공사 시 기존 말뚝기초의 시공이 어려운 경우 그 대안으로 마이크로파일의 적용 사례가 증가하고 있으며, 기존 구조물의 리모델링 등에도 사용되고 있다. 마이크로파일이 직접기초로 활용되는 경우 마이크로파일의 상부에 말뚝 캡이 시공되는데 그림 1과 같다. 이때 캡은 마이크로파일과 더불어 말뚝 지지 전면기초의 전면기초(raft)와 같은 역할을 수행하게 된다.

그러나 국내에서 무리말뚝을 설계함에 있어 무리말뚝 전면기초의 지지효과에 대해 충분히 신뢰할 수 있는 조건을 확인할 수 있는 경우에만 그 효과를 고려하고, 그렇지 않은 경우에는 전면기초의 지지효과를 무시하는 것이 일반적이다(한국지반공학회, 2003). 이는 실제 말뚝지지 전면기초의 지지력에서 전면기초가 부담하는 하중을 정량화하기 힘들고, 또한 고려되지 않은 전면기초의 지지력이 안전율의 역할을 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 말뚝캡이 씌워진 실물 크기의 마이크로파일 재하시험 자료를 바탕으로 3차원 비선형 유한요소해석을 실시하여 마이크로파일과 전면기초의 하중지지거동을 분석하고, 사례연구를 통하여 각 변수들이 하중지지 거동에 미치는 영향을 파악하며, 기존에 제안된 이론식과 비교를 하고자 한다.



그림 1. 기초시스템 형태의 경사진 마이크로파일 시공(예)

## 2. 말뚝-캡의 하중분담거동

말뚝지지 전면기초는 주로 단단한 점토층과 같은 지반조건에서 전면 기초만으로 충분한 지지력이 확보되거나 과도한 침하가 발생하여 구조물의 사용성에 문제가 발생할 경우에 사용되는 기초형식이다. 주로 전면기초는 상부 구조물의 하중을 분산시키고 지지력을 확보하는 역할을 하며, 말뚝은 전면기초의 과도한 침하나 부등침하를 억제시켜 상부 구조물을 지지하는 상호 보완적인 역할을 한다(Clancy 등, 1993).

또한 말뚝지지 전면기초는 말뚝, 전면기초 및 기초지반 세 가지의 지지요소로 구성된 복합 구조체이며, 말뚝과 지반, 말뚝과 말뚝, 지반과 전면기초, 말뚝과 전면기초의 상호작용에 의한 영향을 받는다. 말뚝지지 전면기초의 상부 구조물에 작용하는 하중은 아래의 식 (1)과 같이 raft와 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초형태로 되어 있다(Katzenbach 등, 2003).

$$R_{tot} = R_{raft} + \sum R_{pile} \quad (1)$$

여기서,  $R_{tot}$  : 상부 구조물에 작용하는 전체하중  
 $R_{raft}$  : 전면기초가 부담하는 하중  
 $\sum R_{pile}$  : 말뚝이 부담하는 하중의 총합

따라서 말뚝과 캡의 하중분담거동을 정량적으로 평가하기 위해서는 말뚝, 캡, 그리고 캡이 씌워진 말뚝에 대하여 각각 재하시험을 실시하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 본 연구에서는 현장 여건으로 인하여 캡이 씌워진 말뚝에 대한 재하시험을 분석한 후 수치해석을 통해 말뚝과 캡의 하중분담거동을 분리하여 평가하였다.

## 3. 마이크로파일 현장재하시험

그림 2는 노강구 등(2007)이 수행한 캡이 씌워진 단일 마이크로파일에 대한 재하시험 현장전경으로 재하시험에 의한 하중-침하곡선은 그림 3과 같다. 마이크로파일은 강재 케이싱과 철근, 그라우트로 구성되어 있으며 직경은 0.16m 길이는 12.7m이고 Pile cap은 2×2×0.9m이다. 대상현장의 지층조건은 모래를 포함한 조립토 지반이다.

재하시험 결과 최종 시험하중(981kN)까지 마이크로파일이나 혹은 지반에서 파괴는 일어나지 않았으나 859kN의 하중재하 시점에서 침하량이 급격히 증가하는 변곡점이 나타나는 것과 수직변위 25mm 기준을 고려하여 마이

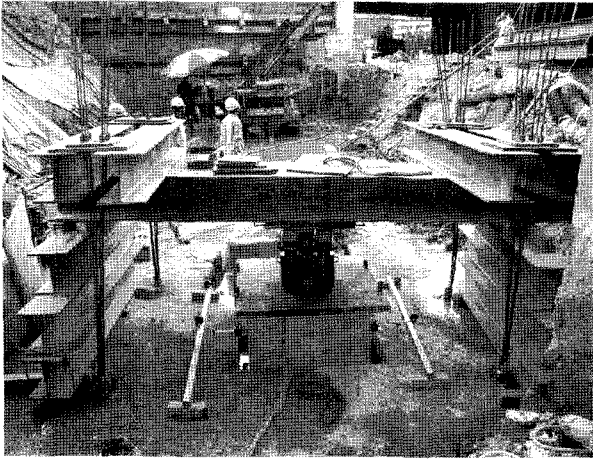


그림 2. 캡으로 연결된 단일 마이크로파일의 재하시험

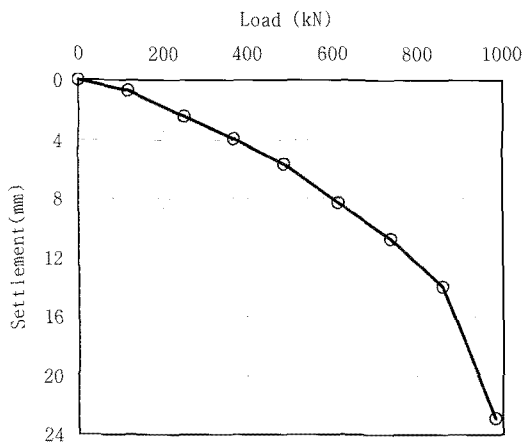


그림 3. 캡으로 연결된 마이크로파일 기초시스템 하중-침하곡선(노강 구 등 2007)

크로파일의 항복하중을 860kN으로 추정하였으며, 안전율2를 적용하여 허용하중으로 430kN을 결정하였다.

#### 4. 수치해석

캡으로 연결된 마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동을 평가하기 위해 3차원 유한요소해석 MIDAS/GTS (2007)를 활용하여 두 단계의 수치해석을 수행하였다. 첫 단계에는 말뚝 캡이 씌워진 실물크기의 마이크로파일 재하시험에 대한 수치모형을 만들어 해석결과와 실험결과가 일치하도록 반복해석을 하였으며, 두 번째 단계에서는 재하시험 결과를 통하여 검증된 모형에서 여러 경우를 고려하여 각각의 변수들이 하중분담 거동에 미치는 영향에 대하여 평가하였다.

해석 시 지반 및 말뚝 캡은 4절점 고체요소로, 그리고 마이크로파일은 Beam 요소를 적용하였다. 지반체는 Mohr-

Coulomb의 재료모델로 말뚝 캡과 마이크로파일은 탄성 조건으로 각각 적용하였다.

#### 4.1 현장재하시험 재현

마이크로파일 기초시스템의 하중 분담효과를 분석하기 위해 먼저 현장재하시험을 모형화 하였는데 이를 reference case라 정하였다. 그림 4는 reference case의 개요도이며, 요소망의 크기는 좌·우의 경우 말뚝 길이의 0.5배(6.5m), 높이는 말뚝 선단부에서부터 말뚝길이의 0.5배(6.5m)이다. 경계조건은 좌·우가 롤러, 하단은 힌지로 설정하였다. 하중은 현장재하시험을 모사하기 위하여 말뚝캡 상단 중앙에 집중하중으로 작용하는 것으로 단순 가정하였다. 그림 5는 reference case의 3차원

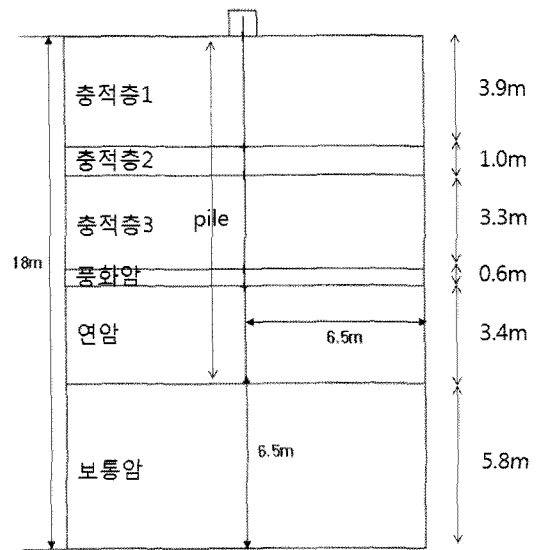


그림 4. Reference case 개요도

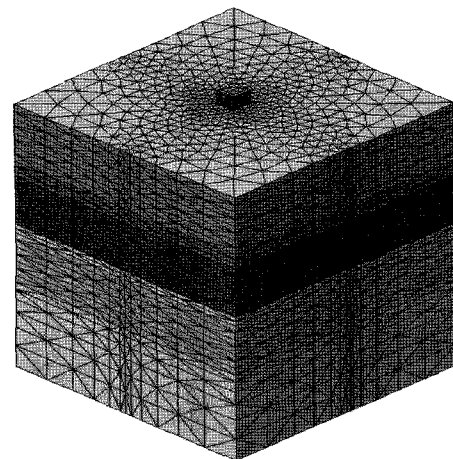


그림 5. Reference case 3차원 유한요소 망

표 1. 입력 물성치

|        | 탄성계수<br>(kPa)     | 점착력<br>(kPa) | 프와송비<br>( $\nu$ ) | 내부마찰각<br>( $^{\circ}$ ) | 단위중량<br>( $kN/m^3$ ) |
|--------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------------|----------------------|
| 층적층1   | 12500             | 30           | 0.3               | 0                       | 17                   |
| 층적층2   | 18500             | 0            | 0.35              | 31                      | 18                   |
| 층적층3   | 28000             | 0            | 0.35              | 33                      | 19                   |
| 풍화암    | 45000             | 10           | 0.3               | 35                      | 20                   |
| 연암     | 70000             | 10           | 0.26              | 38                      | 23                   |
| 보통암    | 500000            | 30           | 0.2               | 40                      | 25                   |
| 말뚝 캡   | $2 \times 10^7$   | -            | 0.15              | -                       | 25                   |
| 마이크로파일 | $8.5 \times 10^7$ | -            | 0.3               | -                       | 75                   |

유한요소망이다.

표 1은 현장의 지층조건을 나타내고 있다. 층은 6개로 나누어져 있으며, 상부 층적층을 제외한 모든 층이 사질토 지반이다. 해석 시 적용한 지반의 물성치는 기존 문헌을 참고하여 대상지층 물성치의 상한값과 하한값을 결정 한 후 범위 내에서 역해석을 수행하여 결정하였다. 그 결과 표 1의 물성에서 현장재하시험과 가장 근사한 결과를 얻었으며 이를 해석에 적용하였다. 말뚝 캡의 경우 콘크리트 물성을 적용하였으며, 마이크로파일은 강관, 보강철근, 그라우트로 구성되어 등가환산탄성계수로 활용하였다.

#### 4.2 수치해석 case 선정

본 연구의 case 해석은 말뚝의 개수, 간격 그리고 경사도를 변수로 하여 실시하였다. Case A의 경우 말뚝의 개수는 2개(2대 1)이며, Case B의 경우는 4개(2대 2)이

다. 또한 기존 박성완 등(2007)의 연구결과를 고려하여 동일한 말뚝 개수 내에서 말뚝의 간격을 직경의 3, 5, 그리고 7배로, 마이크로파일의 각도는 그림 6에서 7처럼 0°, 10°, 그리고 20°로 해석을 각각 수행하였다.

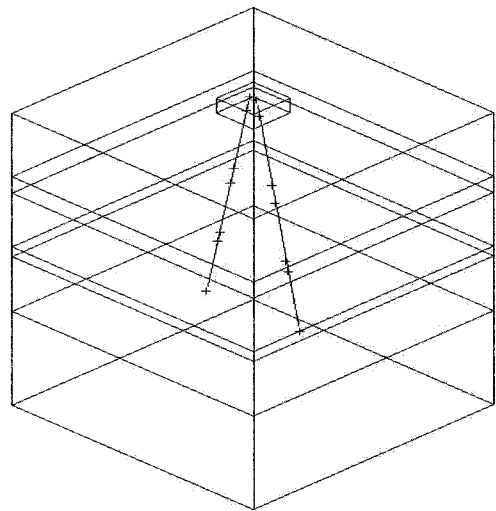


그림 7. 10° 경사진 마이크로파일 기초시스템 모형도

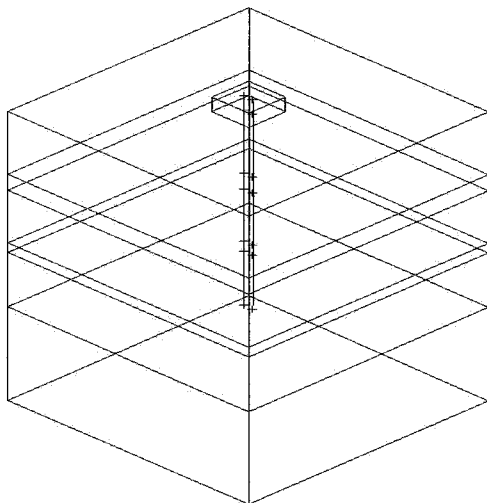


그림 6. 수직방향 마이크로파일 기초시스템 모형도

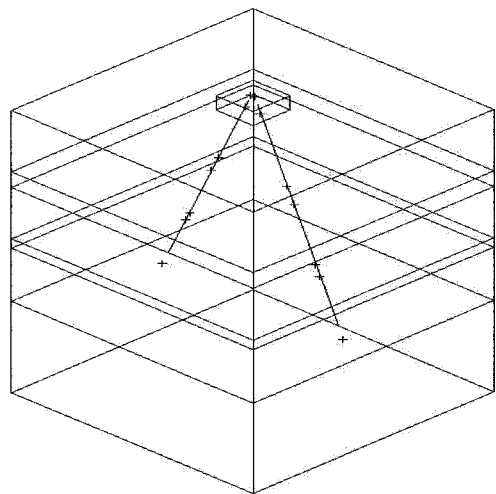


그림 8. 20° 경사진 마이크로파일 기초시스템 모형도

#### 4.2.1 Case A

수치해석 Case A는 말뚝의 개수가 2개인 경우에 대하여 간격과 경사도를 달리하여 해석을 수행하였다. 말뚝의 배열은 2대 1이며, 말뚝의 간격은 3D(0.5m)~5D(1.2m)까지 변화시키고 말뚝의 경사도를 0°, 10°, 20°로 달리하였고 cap size는 동일하다. 다음의 표 2는 Case A의 해석조건이다.

#### 4.2.2 Case B

수치해석 Case B는 말뚝의 개수가 4개인 경우에 대하여 간격과 경사도를 달리하여 해석을 수행하였다. 말뚝의 배열은 2×2이며, 말뚝의 간격은 3D~5D(0.5m~1.2m)까지 변화시키고 말뚝의 경사도를 0°, 10°, 20°로 달리하였고 cap size는 동일하다. 다음의 표 3은 Case B의 해석조건이다.

### 5. 수치해석 결과

#### 5.1 마이크로파일과 캡의 하중분담 거동의 정량화

본 논문에서는 말뚝지지 전면기초의 침하량과 말뚝

표 2. Case A 조건

| Case No. | 개수 (배열)    | 간격 | 경사도 (°) |
|----------|------------|----|---------|
| A-1      | 2<br>(2×1) | 3D | 0       |
| A-2      |            | 5D | 0       |
| A-3      |            | 7D | 0       |
| A-4      |            | 3D | 10      |
| A-5      |            | 5D | 10      |
| A-6      |            | 7D | 10      |
| A-7      |            | 3D | 20      |
| A-8      |            | 5D | 20      |
| A-9      |            | 7D | 20      |

표 3. Case B 조건

| Case No. | 개수 (배열)    | 간격 | 경사도 (°) |
|----------|------------|----|---------|
| B-1      | 4<br>(2×2) | 3D | 0       |
| B-2      |            | 5D | 0       |
| B-3      |            | 7D | 0       |
| B-4      |            | 3D | 10      |
| B-5      |            | 5D | 10      |
| B-6      |            | 7D | 10      |
| B-7      |            | 3D | 20      |
| B-8      |            | 5D | 20      |
| B-9      |            | 7D | 20      |

기초의 하중단계별 침하량의 비를 통하여 말뚝과 캡의 하중분담을 평가하였으며, 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\left(1 - \frac{\text{말뚝지지전면 기초의 침하량}}{\text{균말뚝 기초의 침하량}}\right) \times 100(\%) = \text{캡의 하중분담} \quad (2)$$

캡의 하중분담을 산정한 후 전체의 하중분담에서 캡의 하중분담을 제외한 부분을 말뚝의 하중분담으로 추정하였다. 균말뚝 기초의 침하량은 별도의 해석을 실시하였고 그 내용은 참고문헌으로 대체하였다(정동진, 2006).

#### 5.2 재하시험 결과와 해석결과의 비교

마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동을 수치해석으로 분석하기 위하여 먼저 현장하중재하시험 자료를 활용하여 reference case를 선정하였다. 해석 시 지반 물성치의 상한 값과 하한 값의 범위에서 수치해석을 수행하여 얻은 결과는 그림 9와 같다.

하중 단계 851kN까지는 재하시험에 비해 수치해석의 침하량이 크게 나타났으며, 이후 단계에서는 수치해석의 침하량이 약간 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 해석 시 말뚝-지반, 지반-말뚝-캡 사이의 상호작용과 마이크로파일 주면의 현장 그라우팅 효과가 해석에 고려되지 못한 것으로 인한 차이로 판단된다. 그림 10은 현장 재하시험 결과와 수치해석의 침하량을 비교한 것으로 수치해석의 전체적인 경향이 재하시험을 잘 모사하는 것을 알 수 있다.

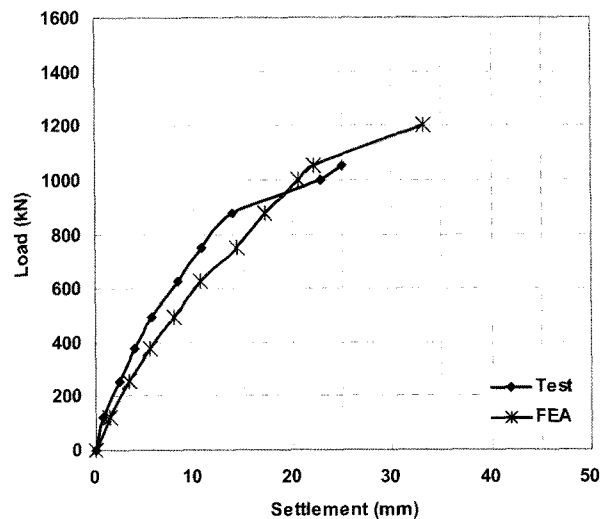


그림 9. 현장시험 및 해석 결과의 비교

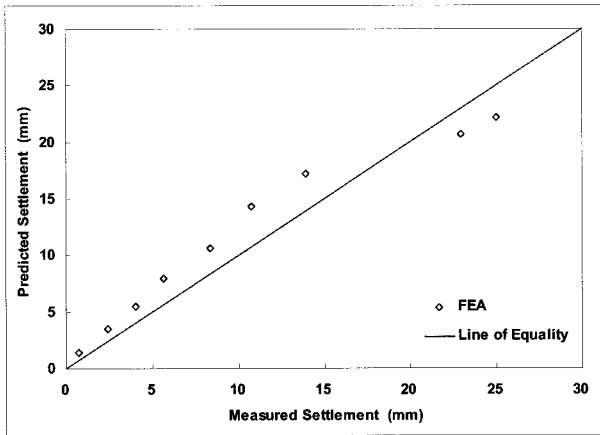


그림 10. 예측 침하량 비교

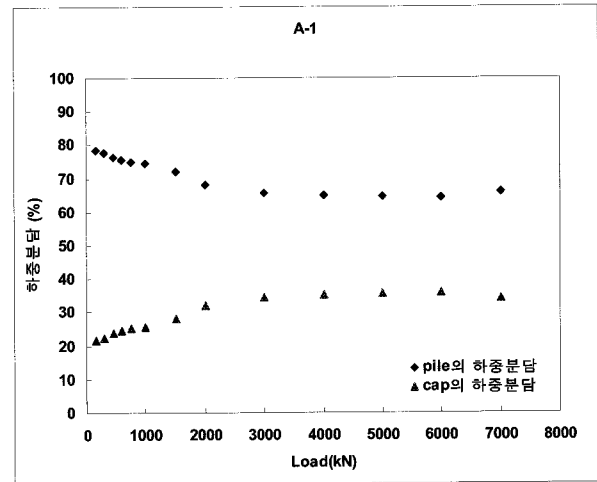
### 5.3 Case A 해석결과

그림 11은 말뚝 캡과 말뚝의 하중분담 거동을 나타내고 있다. 말뚝과 말뚝 캡의 하중분담 거동은 reference case의 결과분석과 동일하게 식 (2)를 활용하여 평가하였다.

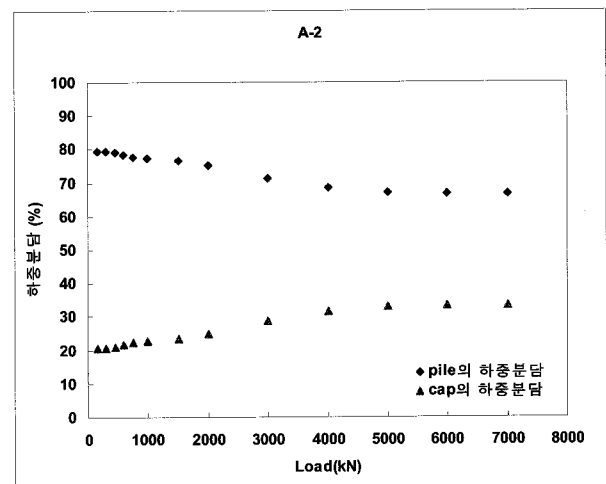
연직방향으로 설치된 2×1의 군말뚝인 A-1~A-3의 결과(그림 6-(a)~6-(c))를 살펴보면 말뚝 간격이 가장 큰 A-3에서 캡의 하중분담이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 말뚝 간격이 3D, 5D인 경우 캡의 하중분담은 약 30% 정도로 나타났으나, 7D의 경우 최종 하중단계에서 캡의 하중분담이 약 50%에 이르고 있다. 이는 말뚝 간격이 작은 경우 기초시스템의 침하는 대부분 말뚝에 의해 이루어지며 동시에 말뚝 캡의 지지력이 충분히 발휘되지 못하는 반면 말뚝 간격이 증가할수록 말뚝 캡의 지지력이 발휘되는 면적이 증가하기 때문으로 판단되는데 이수형 등(2000)의 연구에서도 언급된 바 있다.

또한 하중단계가 증가할수록 캡의 하중분담이 증가하는 경향이 나타났으며, 이를 통해 말뚝지지 전면기초에 있어 초기 하중단계에서는 말뚝이 대부분의 하중을 부담하나 하중단계가 증가하여 말뚝이 더 이상 저항하지 못하는 단계에 도달하면 말뚝 캡의 하중분담이 커지는 것으로 추정할 수 있다.

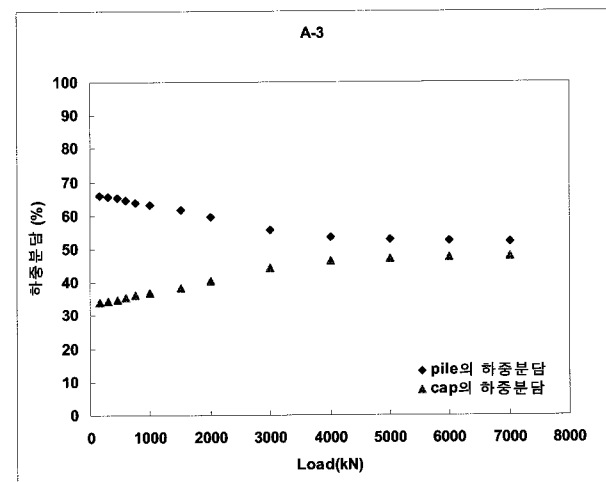
그림 12에 나타난 결과에서 10°경사지게 설치된 경우 말뚝 간격이 가장 작은 3D에서 말뚝 캡의 하중분담이 가장 크게 나타났으며, 말뚝 간격이 증가할수록 캡의 하중분담이 작아지는 것을 알 수 있었다. 말뚝 간격 3D에서 캡의 하중분담은 최종 하중단계에서 약 45%로 나타났으며, 5D와 7D인 경우 약 30%로 간격 변화에 따른 영향은 크지 않음을 알 수 있다.



(a) case A-1



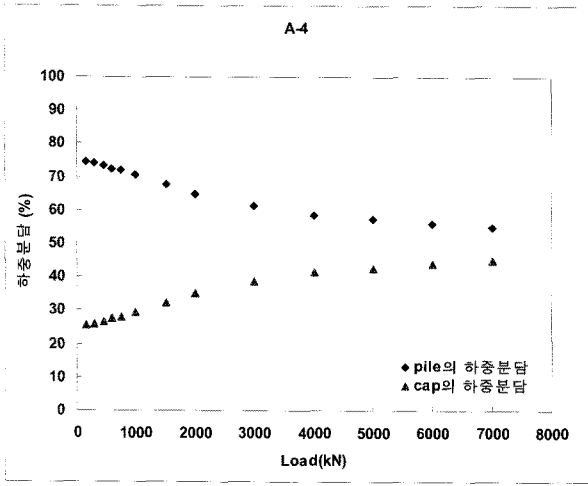
(b) case A-2



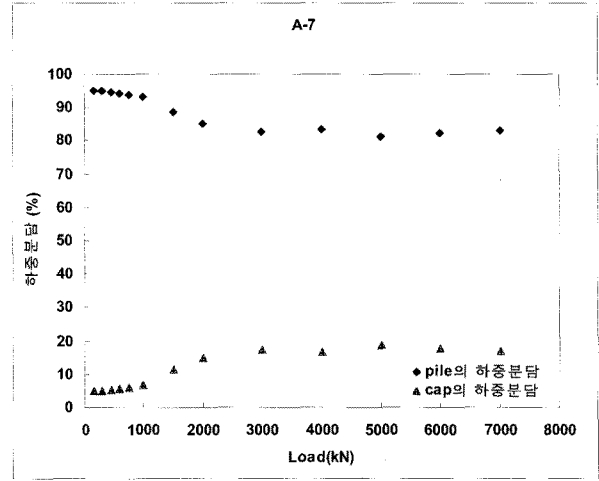
(c) case A-3

그림 11. 마이크로피일과 캡의 하중분담율(A-1, A-2, A-3)

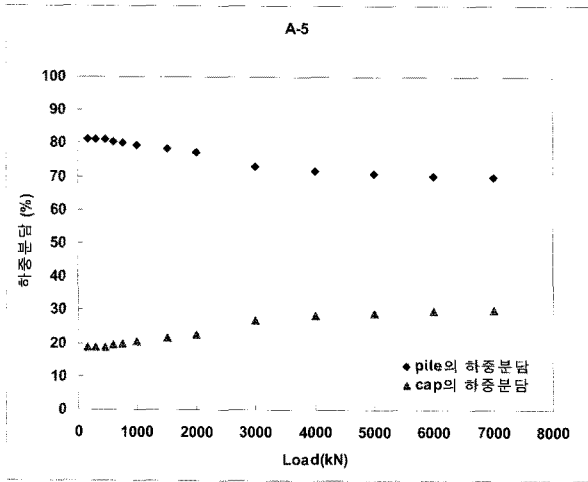
그림 13은 20°경사지게 설치된 경우 연직 및 10°경사진 경우에 비해 캡의 하중분담이 작게 나타나는 것을 알 수 있다(최대 약 30%). 캡의 하중분담은 말뚝 간격이



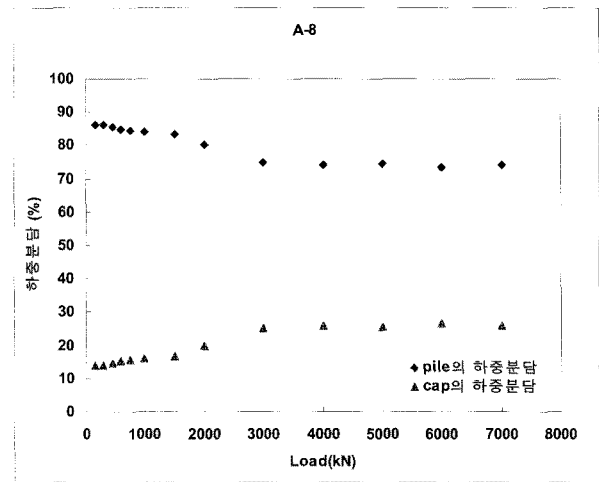
(a) case A-4



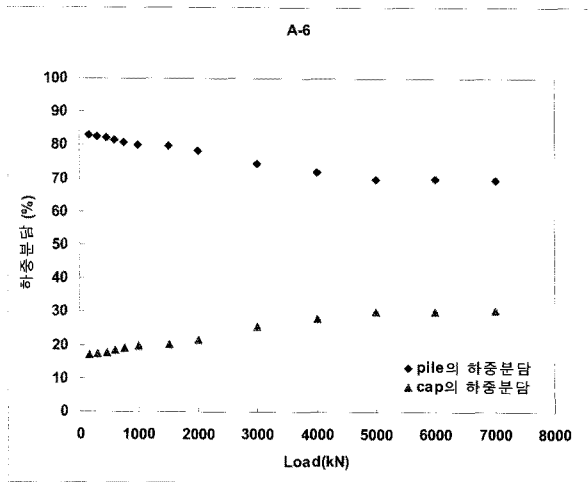
(a) case A-7



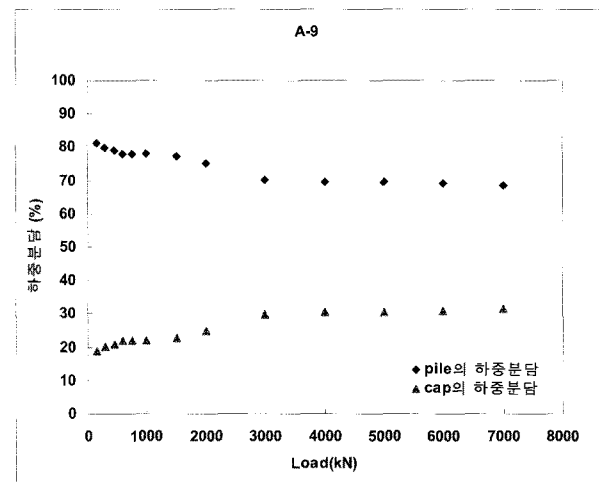
(b) case A-5



(b) case A-8



(c) case A-6



(c) case A-9

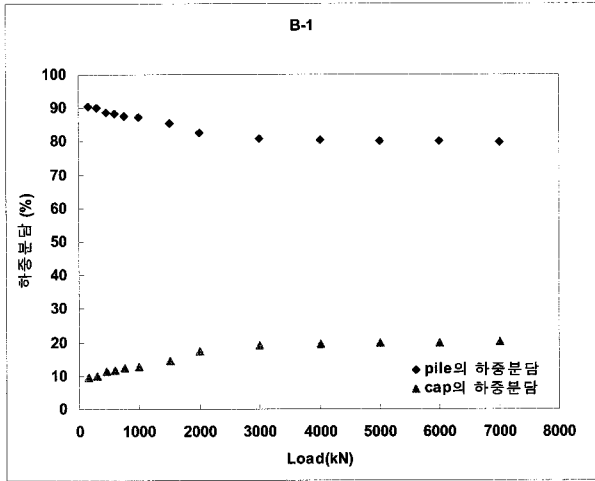
그림 12. 마이크로파일과 캡의 하중분담율(A-4, A-5, A-6)

그림 13. 마이크로파일과 캡의 하중분담율(A-7, A-8, A-9)

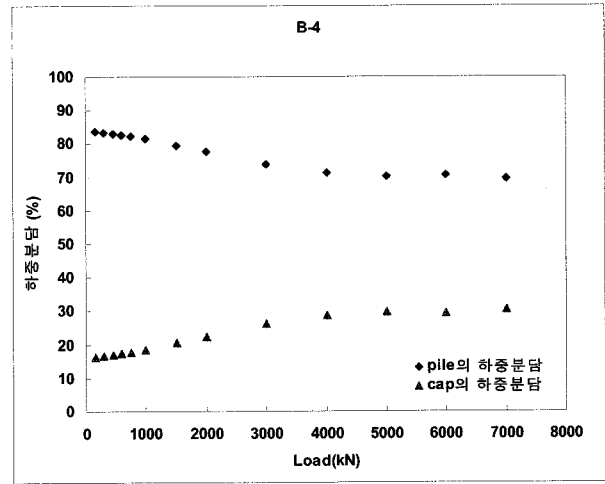
3D인 경우 가장 작게 나타났으며, 5D와 7D인 경우는 거의 동일하게 나타났다.

#### 5.4 Case B 해석결과

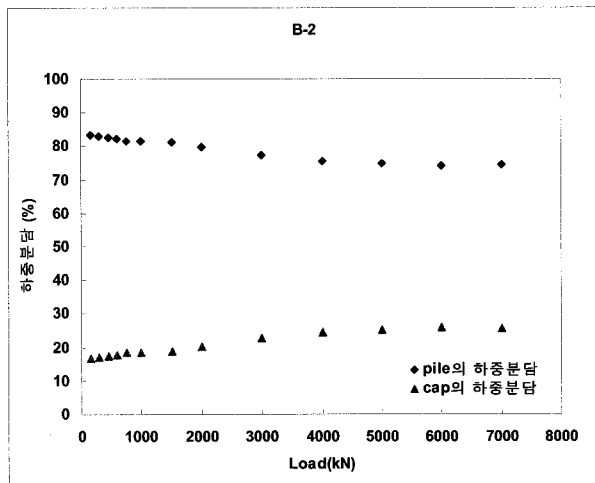
그림 14에서 16은 해석 Case B의 말뚝 캡과 말뚝의



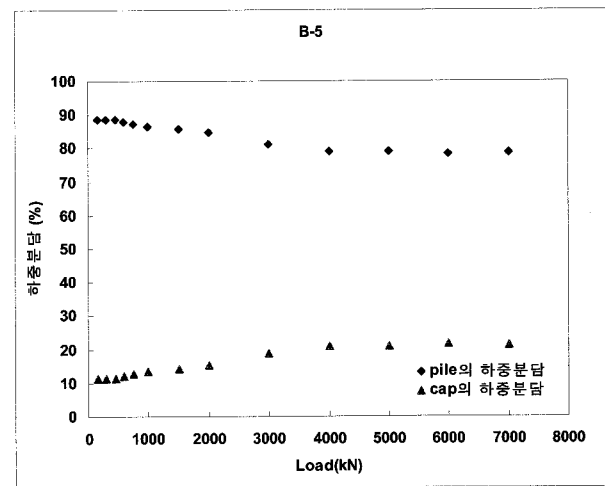
(a) case B-1



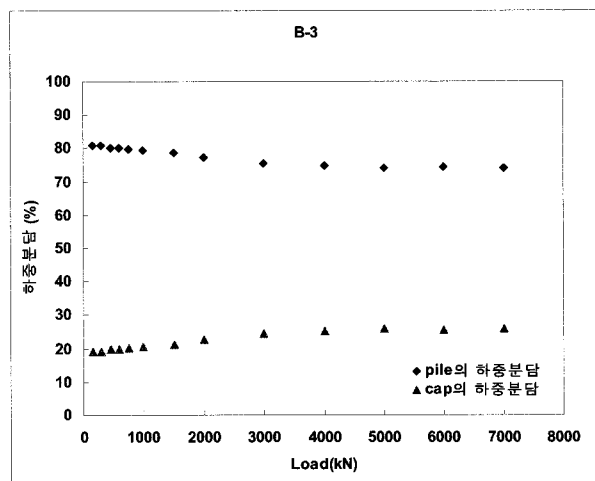
(a) case B-4



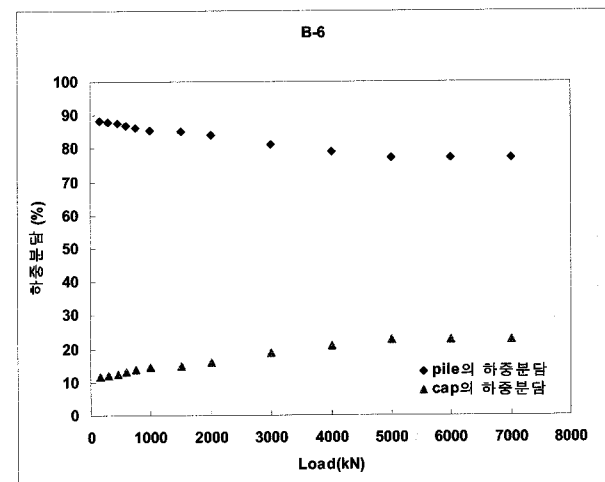
(b) case B-2



(b) case B-5



(c) case B-3



(c) case B-6

그림 14. 마이크로파일과 캡의 하중분담율(B-1, B-2, B-3)

그림 15. 마이크로파일과 캡의 하중분담율(B-4, B-5, B-6)

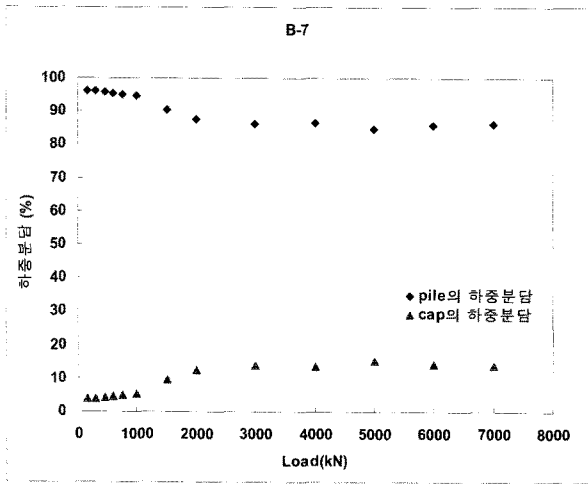
하중분담 거동을 나타내고 있다. 말뚝과 말뚝 캡의 하중분담 거동은 Case A와 동일한 방법으로 평가하였다. 연직으로 설치된 2×2의 군말뚝인 B-1~B-3의 결과

(그림 14(a)~14(c))를 살펴보면 말뚝 간격이 가장 큰 B-3에서 캡의 하중분담이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 말뚝 간격이 5D와 7D인 경우 캡의 하중분담

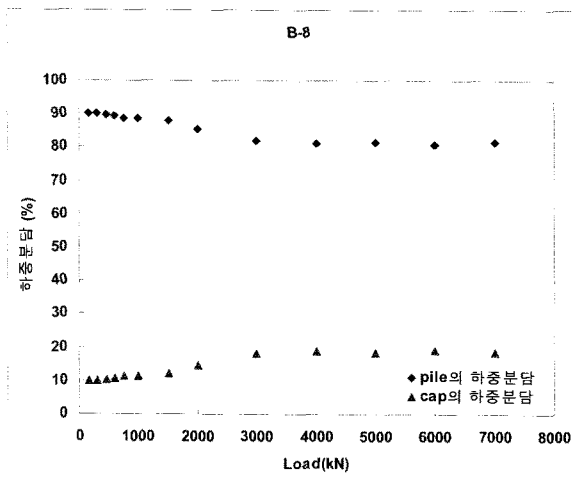


의 차이가 매우 작아 5D 이상의 간격에서는 캡의 하중분담의 증가량이 상대적으로 작음을 확인하였다.

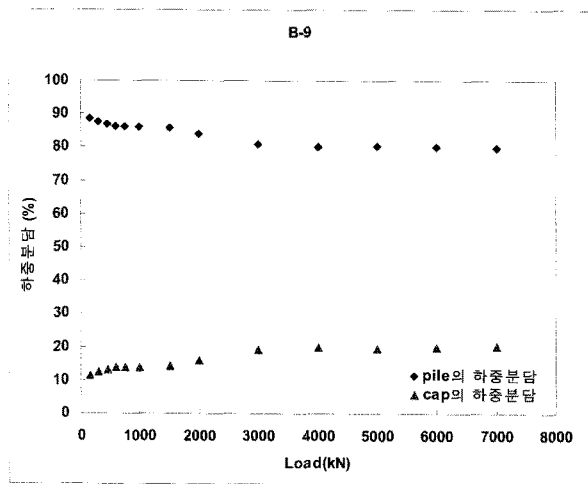
그림 15에서 10°경사지게 설치된 B-4~B-6의 경우



(a) case B-7



(b) case B-8



(c) case B-9

그림 16. 마이크로파일과 캡의 하중분담율(B-7, B-8, B-9)

말뚝 간격이 가장 작은 3D에서 말뚝 캡의 하중분담이 가장 크게 나타났으며, 말뚝 간격이 증가할수록 캡의 하중분담이 작아지는 것을 알 수 있었다. 캡의 하중분담은 최대 30%로 Case A에 비해 작게 나타났는데 이는 말뚝의 개수 증가로 인한 기초시스템의 지지력 향상과 전체 말뚝 캡에 대한 말뚝이 차지하는 비율이 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

그림 16에서 20°경사지게 설치된 B-7~B-9의 경우 Case A와 유사하게 연직 및 10°경사진 경우에 비해 최대 약 20% 캡의 하중분담이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 캡의 하중분담은 말뚝 간격이 3D인 경우 가장 작게 나타났으며, 5D와 7D인 경우는 거의 동일하게 나타났다.

## 6. 결론

본 논문에서는 말뚝 캡이 씌워진 실물 크기의 마이크로파일 재하시험 자료를 분석한 후 3차원 비선형유한요소해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2대 1 말뚝지지 전면기초의 수치해석 결과 연직으로 설치된 경우 말뚝 간격이 3D, 5D인 경우 캡의 하중분담은 약 30%정도로 나타났으나, 7D의 경우 최종 하중단계에서 캡의 하중분담이 약 50%에 이르는 것을 확인하였다. 말뚝의 경사도가 증가할수록 캡의 하중분담은 작아지며, 간격에 따른 영향은 상대적으로 크지 않은 것을 알 수 있다.
- (2) 2대 2 말뚝지지 전면기초의 수치해석 결과 연직으로 설치된 경우 말뚝 간격이 증가할수록 캡의 하중분담이 증가하였으나, 간격이 5D인 경우와 7D인 경우에는 차이가 크지 않았다. 또한 경사도의 변화에 따른 영향은 2×1의 경우와 유사하게 나타났다. 전체적인 캡의 하중효율은 2×1의 경우에 비해 작는데, 이는 말뚝 캡의 전체 면적에 대하여 말뚝이 차지하는 비율이 증가했기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 캡의 하중분담효과는 기초시스템에 작용하는 하중이 증가함에 따라 커지는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 기초시스템의 사용하중이 높은 경우 캡의 하중분담효과를 기대할 수 있을 것으로 추정된다.
- (4) 말뚝과 캡의 하중분담효과는 기초시스템의 기하학적 형상과 더불어 하중단계에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 노강구, 박성완, 조국환 (2007), “풍화지반에 근입된 마이크로파일의 하중전이곡선 추정을 위한 경험식 개발”, *한국지반공학회 논문집*, 23권 1호, pp.5-11.
2. 마이다스아이티 (2007), MIDAS-GTS Manual.
3. 박성완, 정동진, 박기석, 이주형 (2007), “마이크로파일로 보강된 교량기초이 정규화 거동 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 23권 5호, pp.5-14.
4. 이수형, 최영석, 정충기, 김명모 (2000), “사질토 지반에서 말뚝 캡이 연직하중을 받는 무리말뚝의 거동에 미치는 영향”, *대한토목학회 논문집*, 제 20권 1-C호, pp.91-97.
5. 정동진 (2006), “마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동에 관한 수치해석 평가”, 단국대학교 석사학위 논문.
6. 한국산업규격 (2002), “KSF-2445, 축하중에 의한 말뚝침하 시험 방법”.
7. 한국지반공학회 (2003), *구조물기초설계기준 해설*.
8. Clancy, P. and Randolph, M. F. (1993), “An approximate analysis procedure for piled raft foundations”, *Int'l Journal of Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 17, 849-869.
9. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), “Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 92, No.SM2, pp.1-26.
10. Federal Highway Administration (2000), *Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual*, Report No. FHWA-SA-97-070, US Department of Transportation, Washington, D.C.
11. Katzenbach R., Moormann, Ch. (2003), “Instrumentation and monitoring of combined piled rafts (CPRF): state-of-the-art report”, 6th International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Oslo, Norway, Swets & Zeitlinger, pp.161-177.

(접수일자 2009. 6. 17, 심사완료일 2009. 11. 25)