

말뚝캡이 선단지지 무리말뚝의 지지거동에 미치는 영향

Influence of Pile Cap On The Behaviors of End Bearing Pile Groups

최영석¹⁾, Young-Seok Choi, 이수형²⁾, Su-Hyung Lee, 정충기³⁾, Choong-Ki Chung, 김명모⁴⁾,
Myoung-Mo Kim

1) 서울대 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul Nat'l Univ.

2) 서울대 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul Nat'l Univ.

3) 서울대 지구환경시스템공학부 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul Nat'l Univ.

4) 서울대 지구환경시스템공학부 교수, Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : Model tests on free standing pile groups and piled footings with varying a pile spacing in two layered soils are carried out. The influence of pile cap on the behaviors of end bearing pile groups is analyzed by comparing the bearing behavior in piled footings with those in a single pile, a shallow footing(cap alone) and free standing pile groups. From the test results, it is found that the bearing characteristics of cap-soil-pile system are related with load levels and pile spacings. Before yield, the bearing resistance by cap is not fully mobilized, however, as the applied load increases, the bearing resistance of cap approaches to that of cap alone and settlement hardening occurs after yield due to the compaction caused by the contact pressure between cap and soil. By the cap-soil-pile interaction, shaft friction and point resistance of piles considerably increase with dependency of pile spacings. In two layered soil, the increasing effect of dilatancy in dense sandy soil adjacent to pile tips, increases the point resistance of pile.

Key words : model tests, free standing, piled footing, pile spacing, pile cap, interaction, end-bearing pile

1. 서 론

일반적으로 무리말뚝에서는 말뚝캡과 지반이 접촉하여 상부구조물로부터의 하중을 말뚝과 캡이 분담하여 지지하게 된다. 그러나 현재까지의 무리말뚝 설계는 모든 하중이 단지 말뚝들만을 통하여 지지된다는 개념에 의존하여 캡에 의한 하중분담효과를 무시하고 있다. 캡과 지반의 접촉에 의한 지지효과는 전면기초로서 캡의 지지력을 무리말뚝의 지지력에 단순히 더하여 고려할 수는 없다. 캡과 지반의 접촉은 무리말뚝 내의 각 개별말뚝의 지지거동에 영향을 주게 되며, 반대로 말뚝들도 캡의 지지거동에 영향을 주기 때문이다. 따라서, 캡에 의한 지지효과를 고려한 보다 합리적인 무리말뚝설계를 위해서는 캡-지

반-말뚝 사이의 상호작용에 대한 정확한 이해가 필요하다.

최근 수치해석 등을 통하여 캡-지반-말뚝 상호작용에 대한 이론적인 연구가 많이 이루어지고 있으나 실제 현장의 계측, 또는 실험결과가 드물기 때문에 이러한 연구결과의 실제적인 적용성은 입증되지 않은 상태이다. 또한, 현재까지 수행된 실험연구는 대부분 균질한 지반을 대상으로 하고 있으며, 국내의 대표적 지층 및 말뚝 설치 조건, 즉, 상부 연약 토사층과 선단부에 단단한 풍화대층이 존재하는 지반 조건에서의 무리말뚝에 관한 연구는 전무하다.

따라서, 본 연구에서는 모형실험을 통해 상부에 모래층, 하부에 단단한 화강풍화토 층으로 구성된 2층 지반조건에서 캡과 지반의 접촉이 무리말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 규명하였다. 이를 위해 다양한 말뚝간격에 대하여, 캡과 지반이 접촉한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 3×3 무리말뚝 재하시험을 수행하였다. 또한 비교분석을 위하여 동일한 조건에서 단독 말뚝과 전면기초(캡)에 대한 재하시험도 수행하였다.

2. 시험 방법

본 실험의 주된 목적은 말뚝캡이 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위한 것이기 때문에, 동일한 지반조건에서, 동일한 크기의 무리말뚝에 대하여 캡과 지반이 접촉한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 각각 재하시험을 수행하였다. 또한 비교분석을 위해 단말뚝과 전면기초(캡)에 대한 시험을 수행하였다.

모형 말뚝으로는 직경 3.2 cm, 두께 1.2 mm인 알루미늄 재질의 파이프가 이용되었으며, 말뚝의 선단은 첨각이 60°인 원뿔형으로 제작되었다. 모든 말뚝은 길이가 60 cm이고, 근입 깊이는 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우에 58 cm, 접촉한 경우 60 cm가 되도록 하였다. 각 말뚝의 머리와 선단에 각각 변형률 게이지를 부착하여 각 말뚝에 전달되는 전체하중과 선단하중을 분리하여 측정할 수 있도록 하였다.

말뚝캡으로는 크기 36.5 cm×36.5 cm, 두께 2 cm인 강재 철판을 이용하였다. 캡은 강체로 거동하도록 가정하고 계획하였고, 시험 시 상부의 네 지점에서 계측을 통해 부등침하가 발생하지 않는 것을 확인하였다.

선단지반 말뚝을 모사하기 위해서 모형지반은 2층으로 구성하였다. 각 층은 대략 60 cm의 두께로, 상부층은 건조한 모래로, 하부층은 화강풍화토로 구성하였다. 상부층의 구성에 이용된 모래의 비중은 2.66, 유효입경은 0.31 mm, 직접전단시험으로 구한 내부마찰각은 35°로 나타났다. 하부층을 이루는 화강풍화토는 비중 2.63, 유효입경 0.22 mm, 삼축시험으로 구한 점착력과 내부마찰력이 각각 0.18 kg/cm², 45°, 다짐시험을 통해 구한 최대건조밀도와 최적함수비는 각각 1.98 g/cm³, 11.4 %로 나타났다. 각 시험에 대하여 크기 1 m×1.4 m×2.5 m인 토조에 일정한 높이에서 화강풍화토를 4번체를 통하여 일정한 높이에서 낙하시키고 진동다짐기를 이용하여 단단하게 다져 하부 화강풍화토층을 조성한 후에, 그 위에 모래를 같은 높이에서 낙하시키고 다짐판을 이용하여 다짐으로써 상부 모래층을 조성하였다. 조성된 모래층은 평균상대밀도 70 %인 조밀한 사질토로 분류되었으며, 화강풍화토층은 건조단위중량이 1.5~1.55 g/cm³, 함수비는 9~10 % 이다.

9개의 말뚝이 정방형 배열이 되도록 설치되었으며, 말뚝 사이의 중심간격은 말뚝 직경의 2배에서 5배까지 되도록 하였다(그림 1). 수행된 시험은 캡과 지반의 접촉 여부에 따라 두 종류의 시험으로 나눌 수 있으며(그림 2), 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우 F, 접촉한 경우를 P라 각각 명명하고, 시험 종류를 나타내는 문자 뒤에 숫자로 말뚝사이의 중심간격을 말뚝 직경에 대한 배수로 나타내었다. 비교분석을 위해 단말뚝(S)과 캡(C)에 대한 시험도 수행하였으며, 표 1에 수행된 시험의 종류를 요약하여 나타내었다.

말뚝은 해머를 이용하여 타입하였다. 나무 재질의 형판을 이용하여 말뚝이 정확한 위치에 설치될 수 있도록 하였으며, 타입 시 레벨을 사용하여 말뚝이 지표와 수직으로 설치된 것을 확인하였다. 중심 말뚝을 가장 먼저 설치하였으며, 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우에는 말뚝머리가 지표에서 2 cm정도 위에 위치하도록 타입하였고, 접촉한 경우에는 지표까지 타입하였다. 캡과 지반의 접촉여부에 관계없이 모든 말뚝의 선단은 화강풍화토층에 2 cm정도 관입되도록 설치하였다. 모든 말뚝을 타입한 후, 캡과 말뚝머

리에 뚫린 구멍을 통해 볼트를 이용하여 캡과 말뚝을 연결하였다.

재하는 유압잭을 이용하여 분당 1 mm정도의 일정한 침하량이 발생하도록 하였다. 전체 무리말뚝 시스템에 가해지는 하중은 로드셀을 이용하여, 각 말뚝의 머리 및 선단에 전달되는 하중은 변형율게이지를 이용하여 각각 측정하였다. 타입 시 발생한 잔류응력을 최소화하기 위하여 말뚝 설치 후 하루 동안 방치한 후 본 시험을 수행하였다. 침하량은 캡 윗면의 네 지점에서 LVDT를 이용하여 측정하였다. 모든 측정값은 Data Logger와 DAS(Data Acquisition System) 보드를 통해 PC에 동시에 저장되었다.

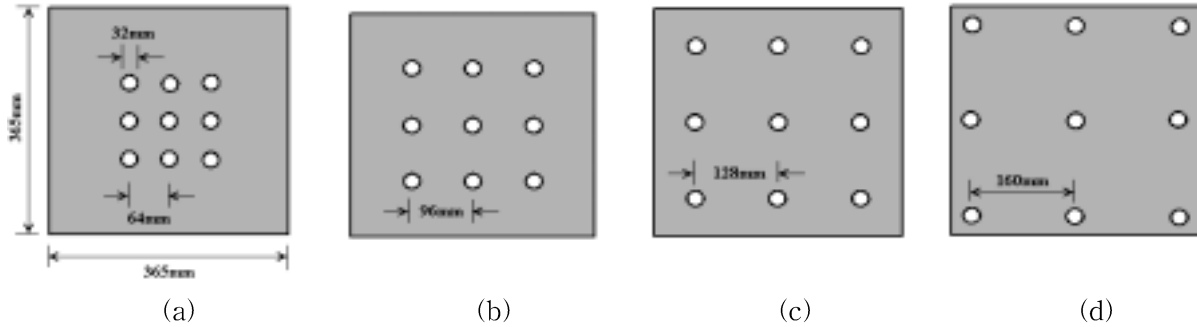
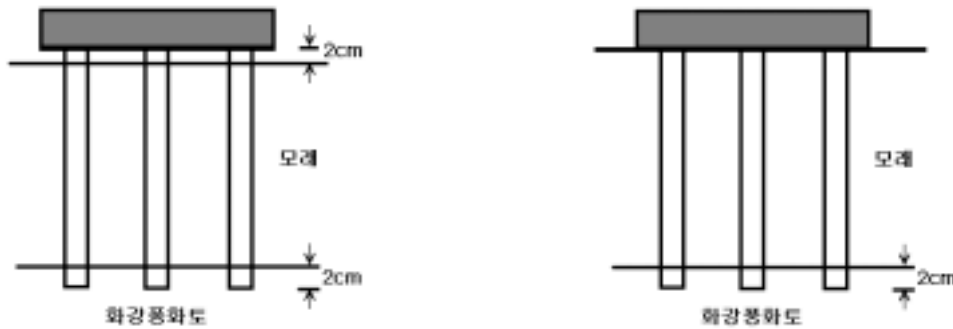


그림 1. 말뚝배치 (a) F2, P2; (b) F3, P3; (c) F4, P4; (d) F5, P5



(a) 캡과 지반이 미접촉(F2, F3, F4, F5) (b) 캡과 지반이 접촉(P2, P3, P4, P5)

그림 2. 캡과 지반의 접촉여부에 따른 시험 방법

표 1. 시험 종류

| 단말뚝 | 캡 | 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우 | | | | 캡과 지반이 접촉한 경우 | | | |
|-----|---|-------------------|----|----|----|---------------|----|----|----|
| S | C | F2 | F3 | F4 | F5 | P2 | P3 | P4 | P5 |

3. 시험 결과

그림 3(a)와 그림 3(b)는 각각 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우와 접촉한 경우의 무리말뚝 전체의 하중-침하 곡선을 각각 나타낸 것이다. 그림 3(a)에는 단말뚝 시험 결과에 대하여 말뚝 하중에 말뚝개수(9개)를 곱하여 구한 하중-침하 곡선을 나타내고, 그림 3(b)에는 단말뚝의 하중에 말뚝개수를 곱하고, 다시 동일 침하량의 캡의 하중을 더하여 구한 하중-침하 곡선을 나타내어, 각각 말뚝 사이의 상호작용과 캡-지반-말뚝 사이의 상호작용에 의한 하중-침하 관계의 변화를 검토할 수 있도록 하였다. 항복 이전에는 말뚝 간격에 상관없이 모든 하중-침하 곡선이 거의 유사한 거동을 보이나, 항복 이후에는 상호작용에 의하여 지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 말뚝 간격에 따른 거동의 차이로 상호작용이 말뚝 간격에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 캡과 지반이 접촉한 경우는 항복 이후에도 침하량 증

가에 따라 하중이 증가하는 점진적인 거동(Settlement hardening behavior)이 나타났으며, 이러한 현상은 재하 하중이 증가함에 캡의 지지력이 발휘됨과 더불어, 캡과 접촉된 지반의 밀도가 증가하여 지반의 지지력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝의 점진적인 파괴 특성도 캡이 무리말뚝에 미치는 영향이라고 할 수 있다.

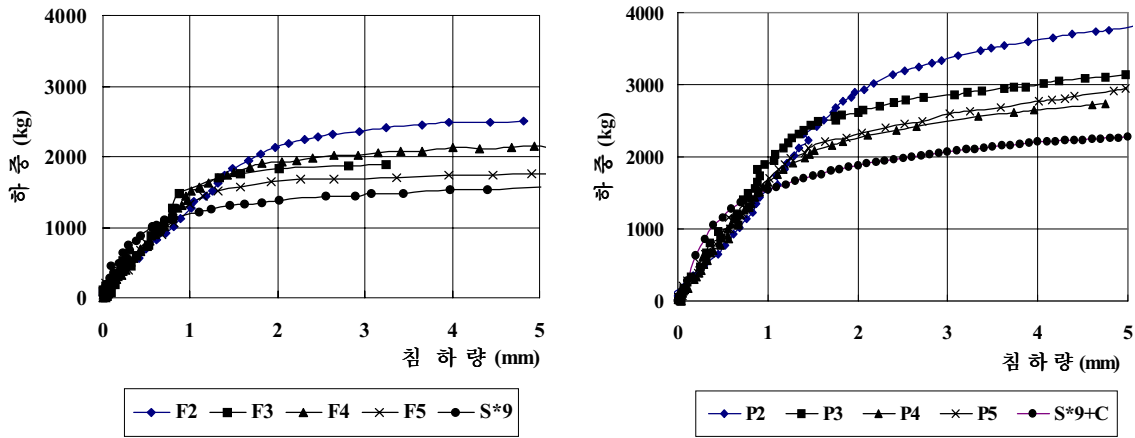


그림 3. 하중-침하 곡선 (a) 캡과 지반 미접촉 (b) 캡과 지반 접촉

3.1 캡과 말뚝 선단 및 주면의 지지 분담율

단말뚝에 대한 시험 결과, 항복하중에서 전체하중에 대한 선단하중의 지지 분담율은 90%로 전형적인 선단지지거동을 보이는 것으로 나타났으며, 이수형 등(2000)의 균질한 사질토 지반에 대한 동일한 실험으로부터의 결과인 80%에 비해 증가하였다. 표 2는 캡과 지반이 접촉한 경우 2층 지반에서의 캡과 말뚝 선단 및 말뚝주면의 항복하중에서의 지지분담율을 균질한 사질토 지반에서의 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 2층 지반에서는 균질한 사질토 지반에 비해 말뚝 주면과 캡의 지지분담율이 상당히 감소하는 반면 말뚝 선단의 지지분담율이 크게 증가한 것을 알 수 있다.

표 2 캡과 말뚝(말뚝선단과 말뚝주면)의 지지 분담율(%)

| 말뚝간격 | 2층 지반 | | | 균질한 사질토 지반* | | |
|------|-------|------|----|-------------|------|----|
| | 말뚝선단 | 말뚝주면 | 캡 | 말뚝선단 | 말뚝주면 | 캡 |
| 2d | 66 | 15 | 19 | 40 | 22 | 38 |
| 3d | 73 | 11 | 16 | 40 | 23 | 37 |
| 4d | 78 | 5 | 17 | 43 | 20 | 37 |
| 5d | 72 | 10 | 18 | 39 | 14 | 47 |
| 평균 | 72 | 10 | 18 | 40 | 20 | 40 |

* 이수형 등(2000)

3.2 말뚝의 지지거동

캡과 지반이 접촉한 경우, 타입말뚝으로 이루어진 무리말뚝의 거동에 미칠 수 있는 요소들은 다음과 같다.

- 1) 말뚝 타입에 의한 지반의 다짐 : 무리말뚝의 경우 다짐의 영향 범위가 증첩되므로 단말뚝의 경우에 비해 지지력이 크게 나타난다.
- 2) 변위장의 증첩 : 말뚝과 말뚝 사이 그리고 캡과 말뚝 사이의 상호작용으로 인해 특정 말뚝 또는

캡의 침하가 주변에 있는 말뚝들과 캡의 침하를 유발한다.

- 3) 캡과 지반의 접촉으로 인한 말뚝주면에 작용하는 수평토압의 증가 : 말뚝의 주변 마찰력이 증가하게 되며, 말뚝 상부에서 지배적이다.

캡과 지반이 접촉한 무리말뚝을 구성하는 말뚝의 지지거동에 영향을 주는 이러한 요소들에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 아직 실용적으로 그 성과를 활용하기에는 미흡한 상태이며, 특히 말뚝 간격에 따른 영향은 정성적이나 정량적으로 모두 정립되지 못한 상태이다. 또한, 국내의 대표적 지층 및 말뚝 설치 조건, 즉, 상부의 연약 토사층과 선단부의 단단한 풍화층으로 구성된 지반 조건에서의 연구는 전무하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 시험 결과의 분석을 통해 선단지지 무리말뚝의 지지 거동에 캡이 미치는 영향을 다양한 말뚝 간격에 대하여 연구하였다.

일반적으로 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우의 무리말뚝의 해석에는 단말뚝과 무리말뚝의 극한하중을 비교하는 무리효율 개념이 주로 적용되어 왔다. 그러나, 무리효율 개념은 특정한 시험의 결과에 대하여 어떤 파괴기준을 적용하느냐에 따라 서로 다른 지지력이 산정되고 이로 인해 무리효율도 다르게 되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 두 시험의 결과에 대하여 동일 침하량에서 하중을 비교하여 그 비율을 구하는 하중효율 개념(Phung, 1993)을 적용하였다. 하중효율은 구조물의 허용 침하량을 토대로 하는 침하량 기준 개념이라 할 수 있으며, 본 연구에서는 항복 이전과 항복 이후의 캡의 하중 분담과 캡-지반-말뚝 상호작용을 분리하여 검토하기 위하여 항복 이전의 침하량인 1mm와 항복 이후의 침하량인 3 mm에서 각각 하중효율을 산정하여 시험결과를 분석하였다.

3.2.1 주면마찰력

그림 4는 항복이전과 항복이후에 대해서 무리말뚝들을 구성하는 말뚝들의 평균 주면마찰력과 단말뚝의 주면마찰력의 비를 계산하여 구한 하중효율을 말뚝 간격에 따라 나타낸 것이다. 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우는, 말뚝 간격이 2d인 경우를 제외하면, 하중효율이 모두 1에 가까우며, 따라서 말뚝 타입에 의한 지반 다짐의 증첩효과나 말뚝 사이의 상호작용이 항복 여부에 상관없이 말뚝 간격이 3d 이상이면 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 균질한 사질토지반에서 말뚝 간격에 상관없이 평균 주면마찰력의 하중효율이 1보다 크게 나타난 결과(Vesic, 1969; 이수형, 2000)와 차이를 보이며, 선단지지 무리말뚝에서는 말뚝 간격이 넓어지면(3d 이상) 말뚝 타입에 의한 다짐효과 또는 말뚝 사이의 상호작용이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

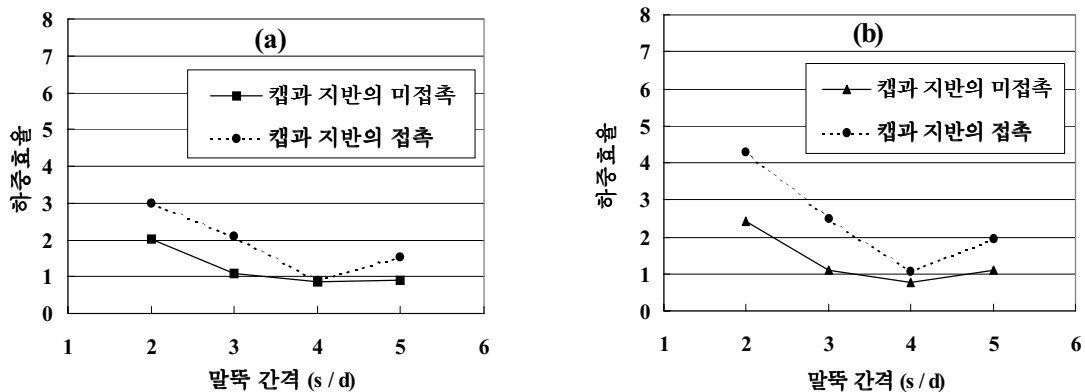


그림 4. 평균 주면마찰력의 하중효율 (a) 침하량 1mm 기준 (b) 침하량 3mm 기준

캡과 지반의 접촉이 말뚝의 주면마찰력에 미치는 효과는 말뚝간격에 따라 다르게 나타났다. 말뚝간격이 좁은 경우(2d, 3d)에는 캡과 지반의 접촉효과로 주면마찰력이 크게 증가하였으나, 말뚝간격이 넓은 경우(4d, 5d)에는 주면마찰력의 증가가 다소 작게 나타났다. 하지만, 캡과 지반의 접촉으로 인해 모든 말

뚝 간격에 대해서 주변지지력이 증가하는 현상이 나타났으며, 이는 캡과 하부지반의 접촉압으로 인해 말뚝 주변에 작용하는 수평응력이 증가하여 말뚝의 주변마찰력이 증가되었기 때문이다.(Phung 1969; Randolph, 1994)

3.2.2 선단지지력

그림 5는 항복이전과 항복이후에 대해서 무리말뚝들을 구성하는 말뚝들의 평균 선단지지력과 단말뚝의 선단지지력의 비를 계산하여 구한 하중효율을 말뚝간격에 따라 나타낸 것이다. 캡과 지반의 접촉 여부에 관계없이 평균 선단지지력의 하중효율은 대부분 1보다 크게 나타났다. 캡과 지반의 접촉으로 인해서 말뚝의 선단지지력은 증가되는 것으로 나타났으며, 이러한 효과는 말뚝 간격이 좁은 경우(2d, 3d)가 말뚝간격이 넓은 경우(4d, 5d)에 비해 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이수형(2000) 등은 균질한 사질토 지반에서 선단지지력의 하중효율은 말뚝간격에 상관없이 1에 가깝고, 캡이 선단지지력에 미치는 영향은 미소하다고 제시하고 있다. 그러나, 2층 지반에서는 균질한 지반과 달리 말뚝-말뚝 또는 말뚝-캡 사이의 상호작용이 선단부에도 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다. Phung(1993)은 무리말뚝에서 선단지지력 증가 원인을 무리말뚝의 파괴 시 발생하는 모래 지반의 dilatancy로 인해 말뚝 선단부 지반에서 구속압 증가 효과가 발생하기 때문인 것으로 보고 있다. 선단부에 단단한 층이 존재하는 본 실험의 경우 이러한 효과가 크게 나타나며, 특히 캡과 지반이 접촉한 경우 상부 지반이 캡에 의해 구속되어 효과가 더 증대되는 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 효과는 캡의 폭에 대한 말뚝 길이가 상대적으로 큰 경우에는 나타나지 않을 것으로 예측된다.

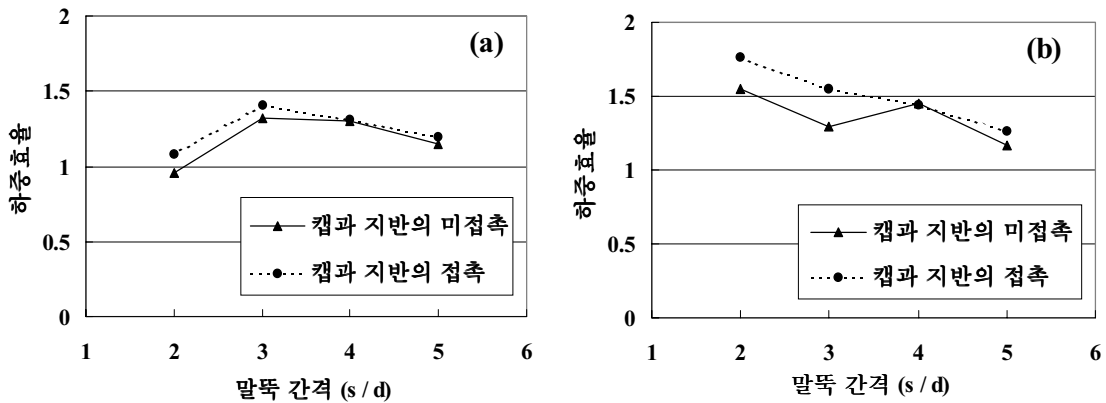


그림 5. 평균 선단지지력의 하중효율 (a) 침하량 1mm 기준 (b) 침하량 3mm 기준

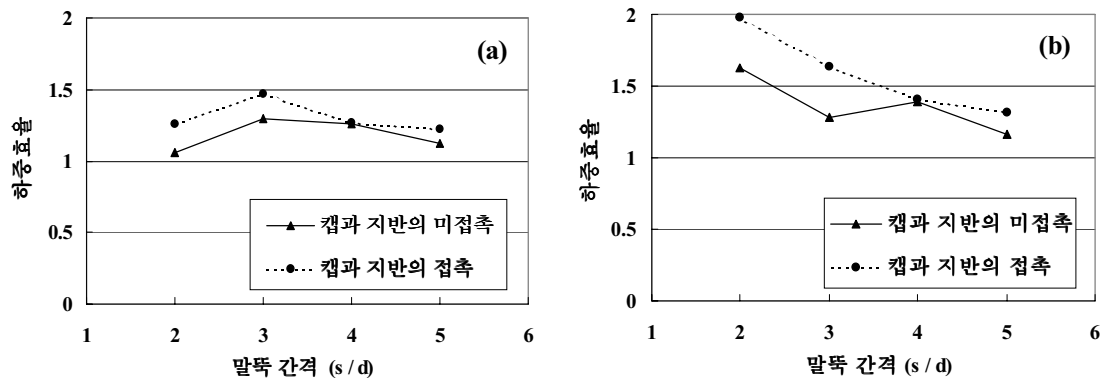


그림 6. 말뚝의 하중효율 (a) 침하량 1mm 기준 (b) 침하량 3mm 기준

3.2.3 전체 말뚝 지지력

그림 6은 항복이전과 항복이후에 대해서 무리말뚝들을 구성하는 말뚝들이 받는 평균 하중과 단말뚝의 하중의 비를 계산하여 구한 하중효율을 말뚝간격에 따라 나타낸 것이다. 모든 말뚝간격에서 캡과 지반의 접촉의 여부에 관계없이 평균 하중의 하중효율은 1보다 크게 나타나고, 캡과 지반의 접촉은 말뚝 지지력을 증가시키며, 그 효과는 말뚝간격에 따라 다르게 나타났다. 이러한 경향성은 선단지지력에서 나타난 결과와 거의 일치하고 있으며, 이는 2층 지반의 경우 전체 말뚝 하중에 대한 선단 지지력의 분담율이 90%로서 전체적인 말뚝 거동이 주로 선단지지에 의해 좌우되기 때문이다.

3.3 캡의 지지거동

그림 7은 항복이전과 항복이후에 대해서 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝에서 캡이 받는 하중과 말뚝이 없는 동일한 크기의 전면기초(캡)의 하중의 비를 계산하여 구한 하중효율을 말뚝간격에 따라 나타낸 것이다. 항복 이전에는 하중효율이 1보다 매우 작은 것으로 나타났다. 이것은 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝에서 캡이 받는 하중이 동일 침하량에서 전면 기초로서의 캡이 받는 하중에 비해 매우 작다는 것을 의미하며, 항복 이전의 초기 하중 단계에서는 말뚝에 대한 하중 분담이 크며, 이에 따라 말뚝 침하가 유발한 인접 지반의 침하가 캡의 침하를 잇달아 유발하여(즉, 캡에 작용하는 상부 하중에 따른 침하와는 별도로) 동일 침하량에서의 캡과 지반 사이의 접촉압이 상대적으로 감소하는 캡과 말뚝 사이의 상호작용으로부터 비롯된 것으로 판단된다. 그러나, 항복 이후에는 하중효율이 상당히 증가하여 1에 가까워지는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 하중 단계 초기에는 상부하중이 주로 말뚝들을 통해 하부지반에 전달되지만, 항복 이후에는 말뚝들은 더 이상 추가하중을 지지하지 못하고 이를 캡이 지지하게 되면서 전면 기초로서의 캡의 지지 효과가 대부분 발휘되기 때문인 것으로 판단된다.

그림 8은 캡과 지반이 접촉한 경우 전체 하중에 대해 캡이 받는 하중의 비율을 하중단계에 따라 나타낸 것으로, 위에서 예측한 바와 같이 캡의 하중분담은 전체하중이 증가함에 따라 증가하며 항복하중에서 전체하중의 약 18% 정도가 되는 것으로 나타났다. 이는 이수형(2000), Phung(1993) 등이 균질한 사질토에서 수행한 모형시험의 결과 항복상태에서 캡의 하중분담율이 40% 정도 되는 것에 비해 상당히 작은 값이며, 특히, 사용하중 단계에서는 말뚝들이 하중분담효과가 더욱 크기 때문에, 실제 현장에서 선단지지 무리말뚝 설계 시 캡의 지지력을 고려하는데 신중한 판단이 요구된다. 또한, 캡의 하중분담은 항복여부와 말뚝간격에 관계없이 하중단계에 따라 유사한 증가 경향을 나타내고 있다.

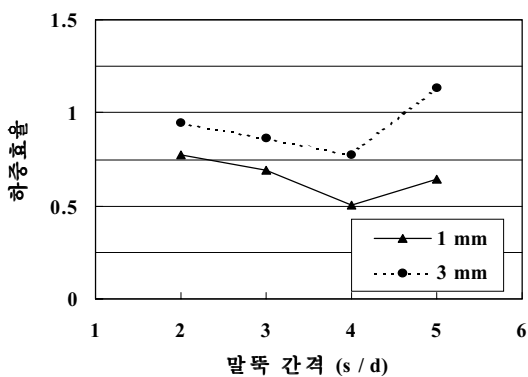


그림 7. 캡의 하중효율

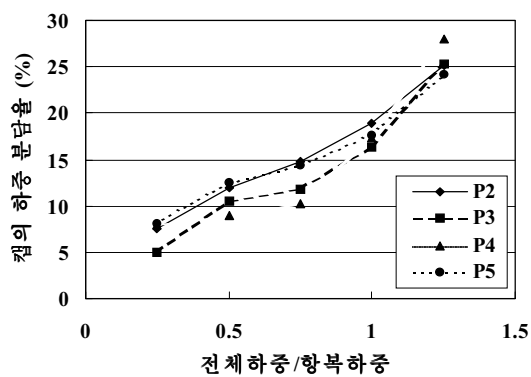


그림 8. 캡의 하중분담율

3.4 말뚝-지반-캡 사이의 상호작용

캡과 지반이 접촉한 무리말뚝을 구성하는 개별 요소들에 대한 지지 거동을 분석한 결과를 종합하면 2층 지반에서의 말뚝-지반-캡 사이의 상호작용 전체적인 특성을 파악할 수 있다. 항복 이전에는 전체 하

중에 대한 말뚝들의 하중 분담이 크고, 캡과 지반의 접촉효과로 인해 말뚝의 지지 하중이 단말뚝에 비해 증가하는 것으로 나타난(그림 6) 반면에 캡의 지지는 전면기초로서의 캡에 비해 감소하는(그림 7) 것으로 나타났다. 이러한 두 가지 효과가 동시에 발생함에 따라, 그림 3(b)에서는 항복 이전에 무리 말뚝의 하중-침하 곡선이 단말뚝과 전면 기초로서의 캡의 하중-침하 곡선으로부터 얻은 곡선과 거의 유사하여, 캡-지반-말뚝 사이의 상호작용이 작은 것처럼 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 항복 이후에는 말뚝의 하중 분담율이 감소함에 따라 캡의 전면기초로서의 지지효과가 대부분 발휘됨과 동시에 캡과 지반의 접촉에 의한 지반 구속압 증가로 말뚝 지지력이 증가하는 상호작용이 발생하여 전반적으로 지지력이 증가하는 효과가 나타났다.

4. 결론

하부에 단단한 풍화토 층이 존재하는 2층 지반에서 캡과 지반이 접촉하지 않은 경우와 접촉한 경우의 무리말뚝, 단말뚝, 전면기초(캡)에 대한 모형실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2층 지반에 설치된 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝의 경우, 주변지지력의 하중효율은 말뚝 간격이 2d인 경우에는 1보다 크고, 3d 이상인 경우 1에 가깝게 나타났으며, 균질한 사질토 지반에서의 하중효율에 비해 작게 나타났다. 선단지지력의 하중효율은 균질한 사질토 지반에서는 말뚝 간격에 상관없이 거의 1에 가깝게 나타났지만, 2층 지반에서는 조밀한 모래 지반의 dilatancy의 영향으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 캡과 지반의 접촉 효과로 균질한 지반에서는 주변마찰력만 증가한 것과 달리 2층 지반에서는 선단지지력도 증가하였으며, 이러한 효과는 말뚝 간격이 작을수록 더 크게 나타났다. 전체 하중효율은 모든 경우 선단지지력과 거의 유사한 경향을 나타냈으며, 이는 2층 지반의 경우 전체 하중이 대부분 말뚝 선단이 분담하여, 전체적인 말뚝 거동이 선단지지에 의해 좌우되기 때문이다.
- 3) 캡과 지반이 접촉한 경우, 캡이 분담하는 하중은 하중 단계에 따라 증가하여 항복 시 전체하중의 18% 정도 되는 것으로 나타났다. 캡의 하중효율은 말뚝에 의한 상호작용으로 항복 이전에는 1보다 작은 것으로 나타났으나, 하중이 증가하면서 캡의 전면 기초로서의 지지력이 대부분 발휘되어 1에 가깝게 나타났다. 또한, 캡에 의한 지지효과와 더불어 캡에 의한 하중으로 하부 지반의 밀도가 커지면서 항복 이후에 침하에 따라 무리말뚝의 지지 하중이 증가하는 점진적인 거동이 나타났다.
- 4) 캡-지반-말뚝 사이의 상호작용으로, 항복 이전에는 말뚝의 지지 하중이 증가하는 반면, 캡의 지지하중은 전면기초로서의 캡에 비해 감소하여, 전체적인 지지 거동의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 항복 이후에는 상호작용으로 인한 말뚝 지지하중의 증가와 더불어, 침하의 증가에 따라 캡의 전면 기초로서의 지지효과가 대부분 발휘됨으로써 전체적인 지지력이 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1999년~2000년 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. 이수형(2000), 대한토목학회논문집, 제 20권 제1-C호 pp 91~97
2. 진봉근(1998), 무리말뚝의 거동에 대한 상부기초의 지지효과 연구, 서울대, 석사학위논문
3. Phung, D. Long(1993) "Footing with settlement-reducing piles in non-cohesive soil." Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology, Ph. D Dissertation.
4. Vesic, A. S.(1969) "Experiments with instrumented pile groups in sands." Performance on Deep Foundation, ASTM STP 444, pp 177~222.
5. Randolph, M. F. (1994) "Optimum design of piled raft foundations." Proceeding International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp 1073~1076