

연직하중을 받는 무리말뚝의 새로운 설계 방법

New Design Method for Pile Group under Vertical Load

1. 서론
2. 무리말뚝의 지지 거동에 영향을 미치는 요소
3. 무리말뚝 설계 방법 개선을 위한 기존의 시도
4. 새로운 무리말뚝 설계 방법의 제안
5. 제안된 설계 방법의 적용
6. 결론

이수형

Su-Hyung Lee

대우건설 기술연구소 주임연구원

Researcher, Daewoo Engineering & Construction Company

정충기

Choong-Ki Chung

서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

Associate Professor, The School of Civil, Urban & Geo-Systems Engineering, Seoul Nat'l Univ.

연직하중을 받는 무리말뚝의 새로운 설계 방법

New Design Method for Pile Group under Vertical Load

이수형¹⁾, Su-Hyung Lee, 정충기²⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 대우건설 기술연구소 주임연구원, Researcher, Daewoo Engineering & Construction Company

²⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, The School of Civil, Urban & Geo-Systems Engineering, Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : Current design of pile group is based on the estimation of the overall bearing capacity of a pile group from that of a single pile using a group efficiency. However, the behaviors of a pile group are influenced by various factors such as method of pile installation, pile-soil-pile interaction, cap-soil-pile interaction, etc. Thus it is practically impossible to take into account these factors reasonably with the only group efficiency. In this paper, a new method for the design of pile groups is proposed, where the significant factors affecting the behavior of a pile group are considered separately by adopting several efficiencies. Furthermore, in the proposed method, the load transfer characteristics of piles and the difference of pile behaviors with respect to the pile locations in group can be taken into account. The efficiencies for the method are determined using the settlement failure criterion, which is consistent with the concept of allowable settlement for structures. The efficiencies calculated from the results of existing model tests are presented, and the bearing capacity of a pile group in the other model test is calculated and compared with that from the test result, to verify the validity of the proposed method.

Key Words : design of pile group, pile installation, interaction, pile locations, allowable settlement

1. 서론

현재의 무리말뚝 설계는 단말뚝의 지지력으로부터 전체 무리말뚝의 지지력을 대략적으로 예측하는데 초점을 두고 있다. 따라서, 단말뚝의 지지력에 대한 무리말뚝 내 개별말뚝 지지력 비인 무리효율(group efficiency)이 중요한 설계 인자로 채택되어 있다. 그러나, 무리말뚝의 지지 거동은 말뚝 시공 방법, 말뚝들 사이의 상호작용, 캡과 말뚝 사이의 상호작용 등과 같은 여러 가지 요소들의 복합적인 영향을 받기 때문에, 하나의 효율을 이용하여 이러한 영향들을 한꺼번에 고려하는 것은 적절하지 않다. 합리적인 무

리말뚝 설계를 위해서는 무리말뚝의 지지 거동에 영향을 주는 복잡한 요소들을 개별적으로 평가, 고려해야 하며, 이를 위해서는 설계 인자로서 더 많은 수의 세분화된 효율을 채택하여야 한다.

더불어, 현재의 무리말뚝 설계에서는, 일반적인 무리말뚝에서 캡과 지반이 접촉하고 있음에도 불구하고, 캡의 전면기초로서의 지지 효과를 완전히 무시하고 있다. 통상적으로는 상부 구조물로부터의 하중을 말뚝들이 모두 분담한다고 가정하고, 파괴에 대한 적절한 안전율을 적용한 말뚝에 대한 설계만이 이루어지고 있을 뿐이다. 또한, 캡과 지반의 접촉은 캡 자체의 지지 효과뿐만 아니라 무리말뚝 내 말뚝의 지지 거동의 변화를 유발할 수 있으며, 경제적이고 정확한 무리말뚝 설계를 위해서는 이러한 캡의 영향에 대한 합리적인 고려가 요구된다.

그러나, 현재 합리적인 무리말뚝의 설계를 위한 연구는 미흡한 실정이며, 이는 현장 재하 시험이나 계측 결과를 통한 무리말뚝의 실제 지지 거동에 대한 규명이 제대로 이루어 지지 않고 있기 때문이다. Liu 등(1985)과 Phung(1993)은 현장 재하 시험 결과를 토대로 무리말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소들을 분리하여 고려할 수 있는 설계 방법을 제안하였다. 하지만, 이들이 제안한 방법에서는 말뚝들 사이의 상호작용과 캡과 말뚝 사이의 상호작용을 분리하여 고려할 수 있지만, 무리말뚝 내 말뚝의 위치에 상관없이 무리말뚝을 이루는 모든 말뚝들에 대하여 동일한 효율을 적용하여 설계가 이루어 진다는 문제점을 갖고 있다. 말뚝 설치 효과나 지지 요소들 사이의 상호작용은 무리말뚝에서 말뚝의 위치에 따라 그 특성 및 크기가 변화하기 때문에(이수형 등, 2001; 이수형, 2002), 합리적인 설계를 위해서는 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따른 말뚝의 지지 거동의 차이를 반드시 고려해야 한다.

이 논문에서는 기존의 연구 결과에서 파악된 무리말뚝 지지 거동 특성을 토대로 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따라서, 말뚝 설치 중첩 효과, 말뚝들 사이의 상호작용, 캡과 지반의 상호작용 등을 분리하여 고려할 수 있는 무리말뚝 설계방법을 제안하였다.

2. 무리말뚝의 지지 거동에 영향을 미치는 요소

무리말뚝은 여러 개의 말뚝 및 캡으로 이루어진 복합 구조체이기 때문에 지지 거동 예측이 매우 어렵다. 근접하여 설치된 지지 요소들 사이의 간섭으로 인해 무리말뚝 내의 말뚝 및 캡의 지지 거동은 독립되어 설치된 말뚝이나 전면 기초의 거동과 다르게 된다. 무리말뚝의 지지 거동에 미치는 중요한 영향 요소는 크게 다음의 세 종류로 분류할 수 있다.

- 1) 말뚝 설치 효과의 중첩
- 2) 말뚝들 사이의 상호작용
- 3) 캡과 말뚝 사이의 상호작용

실제 무리말뚝에서 이러한 요소들의 영향은 동시에 복합적으로 나타나기 때문에 명확하게 구분하여 평가되기 매우 어렵다. 이에 관한 지금까지의 연구 결과는 다음과 같다.

2.1 말뚝 설치 효과의 중첩

말뚝 설치하는 주변에 존재하는 다른 말뚝이나 전면기초의 거동을 변화시킨다. 일반적으로 말뚝 설치 효과의 특성은 말뚝 설치 방법, 지반조건, 말뚝 주변의 거칠기 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 사질토 지반에 타입되거나 압입되어 말뚝이 설치되는 경우는 다짐 또는 진동으로 인해 주변지반의 상대 밀도가 증가한다. 말뚝 타입효과에 의한 주변지반의 상대밀도 변화 양상은 Philcox(1962), Robinsky and Morrison(1964), Kishida(1967), Davison 등(1981), Ekstrom(1989) 등에 의해 연구되었으며, 대체로 원지반의 상대밀도가 작을수록 타입효과가 더 크고 더 넓은 범위까지 전파되는 일반적인 결과가 발견되었지만, 그 현상이 정량적으로 명확하게 확립되어 있지는 않은 상태이다. 점성토에 설치된 타입말뚝과 천공 말뚝의 경우는 각각 과잉간극수압의 발생과 말뚝 주변 지반의 교란으로 인해 인접한 말뚝의 지지력이 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 타입으로 인한 과잉 간극수압이나 천공으로 인한 교란의 정도 및 범위 예측은 매우 어려운 문제이며, 아직까지는 이 부분에 대해서는 많은 연구가 필요하다.

2.2 지지요소들 사이의 상호작용

무리말뚝에서 지지 요소들 사이의 상호작용은 크게 말뚝들 사이의 상호작용과 말뚝과 캡 사이의 상호 작용으로 분류할 수 있다. 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝에서는 말뚝 주변에 발생한 응력장이나 변위장의 중첩에 의한 말뚝들 사이의 상호작용만 발생한다. 반면에, 캡과 지반이 접촉한 경우는 말뚝들 사이의 상호작용과 더불어 캡과 말뚝 사이에도 같은 원인에 의한 상호작용이 발생하게 된다. 이러한 상호작용은 무리말뚝을 이루는 말뚝과 캡의 지지 거동을 단말뚝이나 전면기초와 다르게 변화시키며, 무리 말뚝 전체의 지지력 측면에서 상반된 두 가지 효과를 유발한다.

첫번째 효과는 말뚝이나 캡에 가해진 하중에 의하여 주변에 위치한 다른 말뚝이나 캡에 작용하는 수직 방향의 응력이나 변위가 증가하는 것으로, 이로 인해 주변의 캡 또는 말뚝의 추가적인 침하 또는 부마찰력이 발생한다(그림 1). 이러한 상호작용 효과는 비교적 잘 인식되어 왔으며, 변위장의 중첩이라고 표현되기도 한다. 현재까지 대부분의 무리말뚝 해석 방법은 이 형태의 효과만을 상호작용효과로써 고려하고 있으며, 따라서 보수적인 결과가 산출될 가능성이 크다. Cooke 등(1980)은 점성토 지반에 압입된 말뚝에 대한 재하 시험 결과와의 비교 분석을 통해 변위장 중첩을 상호작용효과로 고려한 무리말뚝 해석 방법의 유효성을 제시하였다.

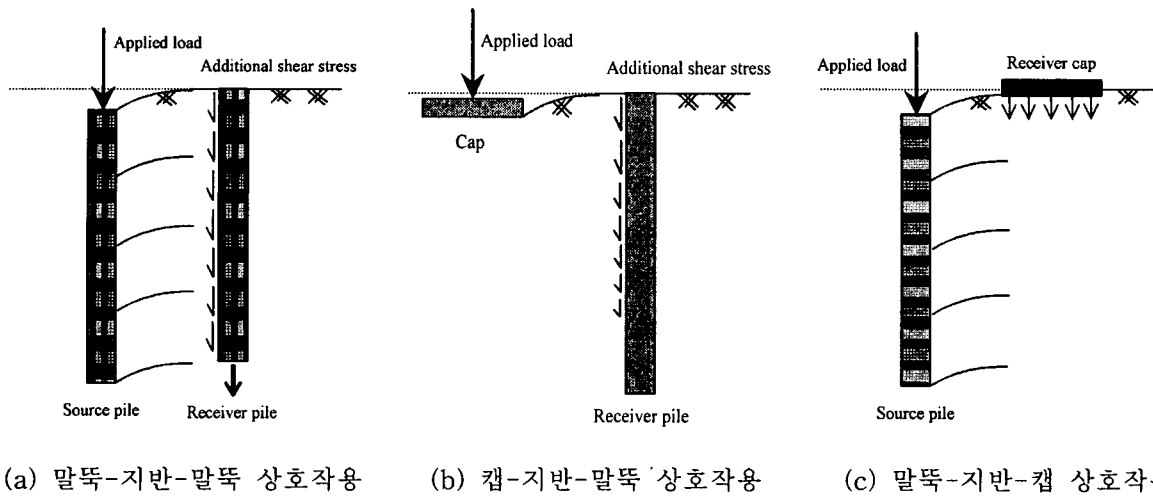


그림 1. 무리말뚝의 지지력을 감소시키는 상호작용

반면에, 상호작용은 무리말뚝의 거동에 유리한 효과를 유발할 수도 있다. 말뚝이나 캡에 작용하는 하중은 지중 응력을 증가시키고, 이로 인해 주변의 말뚝 주변에 작용하는 수평방향의 법선 응력이 증가하여 말뚝 지지력이 증가하게 된다(그림 2). Akinmusuru(1980)와 Phung(1993)은 사질토 지반에서의 모형 시험에서 말뚝-말뚝 또는 캡-말뚝 사이의 상호작용에 의하여 말뚝 주변에 작용하는 수평하중이 상당히 증가하는 것을 발견하였다. 또한 O'Neill 등(1982)은 점성토 지반에서의 실제 크기 무리말뚝에 대한 재하시험에서 말뚝-말뚝 상호작용에 의하여 크기는 작지만 수평방향 유효응력이 증가하는 것을 발견하였으며, Horikoshi와 Randolph(1996)는 점성토 지반에 설치된 무리말뚝의 원심모형시험에서 캡-말뚝 상호작용에 의한 말뚝 지지력 증가 효과를 발견하였다. 이러한 형태의 상호작용효과는 특히 비점성 지반에 설치된 무리말뚝에서 크게 발휘될 것으로 판단되며, 반드시 무리말뚝 해석이나 설계에 고려되어야 한다.

그러나, 실제 상황에서는 이러한 상호작용의 효과들이 동시에 복합적으로 발생하게 되며, 더불어 말뚝 설치 효과까지 함께 나타나기 때문에 무리말뚝의 거동 예측은 매우 어렵다. 또한, 무리말뚝 내 말뚝 위치, 즉 무리 말뚝 내 말뚝의 상대 위치에 따라 말뚝 설치 효과나, 지지요소들 사이의 상호작용 효과의 크기는 다르게 된다. 따라서, 합리적인 무리말뚝 설계에서는 이러한 효과들을 반드시 명확하게 분리하여 고려할 수 있어야 한다.

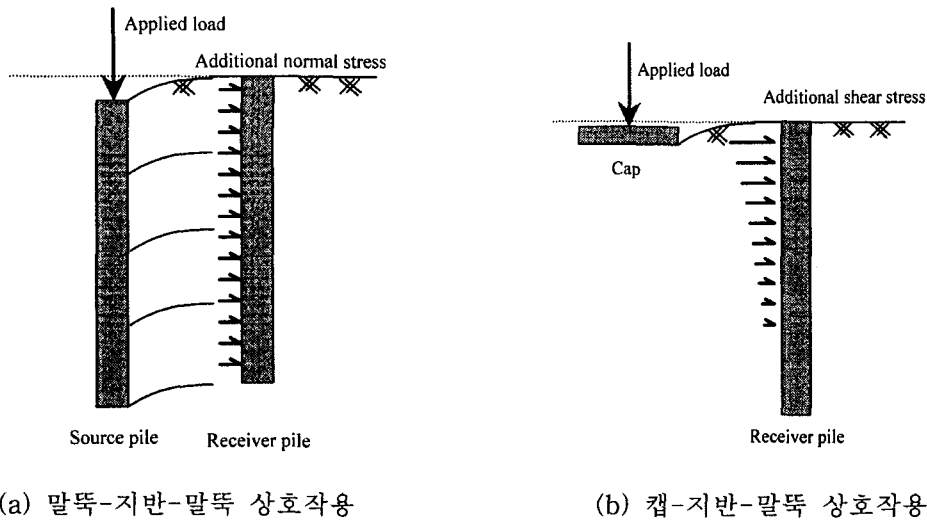


그림 2. 무리말뚝의 지지력을 증가시키는 상호작용

3. 무리말뚝 설계 방법 개선을 위한 기존의 시도

현재의 무리말뚝 설계방법은 2장에서 소개한 복잡한 무리말뚝 거동특성을 적절하게 수용할 수 없다. 무리효율이라는 단 하나의 설계 인자로서 무리말뚝의 거동에 미치는 다양한 영향 요소를 모두 고려하는 것은 불가능하기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 무리말뚝 설계 방법의 개선에 관한 연구가 몇몇 학자에 의해 시도되었으며, 두 종류의 대표적인 연구 결과를 다음에 소개한다.

3.1 Liu 등(1985)

Liu 등(1985)은 비점성 지반으로 이루어진 현장 천공 말뚝으로 이루어진 무리말뚝에 대한 광범위한 재하 시험 결과를 토대로, 말뚝-지반-말뚝 및 캡-지반-말뚝 상호작용이 말뚝의 주면마찰력 및 선단지지력에 미치는 영향을 분리하여 고려할 수 있는 설계방법을 제안하였다. 무리말뚝의 극한지지력(P_u)을 산정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$P_u = P_{su} + P_{pu} + P_c = \eta_s n Q_{sul} + \eta_p n Q_{pul} + P_c \quad (1)$$

여기서, P_{su} , P_{pu} , P_c 는 각각 전체 무리말뚝의 주면마찰력, 선단지지력, 캡의 지지력을 나타내고, Q_{sul} 과 Q_{pul} 은 단말뚝의 주면마찰력과 선단지지력을 나타낸다. n 은 무리말뚝을 이루고 있는 말뚝의 개수이다. 주면 효율 η_s 와 선단 효율 η_p 는 말뚝-지반-말뚝 상호작용과 캡-지반-말뚝 상호작용을 따로따로 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_s = G_s \cdot C_s \quad (2)$$

$$\eta_p = G_p \cdot C_p \quad (3)$$

여기서, G_s 와 G_p 는 말뚝-지반-말뚝 상호작용이 각각 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 미치는 효과를 고려하기 위한 계수이고, C_s 와 C_p 는 캡-지반-말뚝 상호작용이 각각 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 미치는 효과를 고려하기 위한 계수이며, 33개의 무리말뚝에 대한 재하시험 결과를 이용하여, 이들 계수를 구하기 위한 경험식이 제안되었다. 경험식에서 계수 G_s , G_p , C_s , C_p 의 값은 무리말뚝내 말뚝의 개수, 말뚝 간격, 캡 너비의 말뚝 길이에 대한 비 등의 함수로 표현된다.

Liu 등(1985)에 의해 제안된 방법은 말뚝-지반-말뚝 상호작용과 캡-지반-말뚝 상호작용을 분리하여 고려함으로써 무리말뚝 설계방법을 개선하기 위한 첫번째 시도라고 할 수 있다. 그러나, 이 방법은 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따른 상호작용의 특성차이, 말뚝 설치 효과, 말뚝 및 캡의 하중-침하 거동의 차이 등과 같은 효과를 고려할 수 없다는 한계점을 갖고 있다.

3.2 Phung(1993)

Phung(1993)은 캡-지반-말뚝 사이의 상호작용이 캡의 지지 거동에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 Liu 등(1985)이 제안한 식을 수정하여, 다음과 같은 무리말뚝 지지력 예측식을 제안하였다.

$$P_{ft} = n(\beta_s \delta_s P_{ss} + \beta_b \delta_b + P_{sb}) + \beta_c P_c \quad (4)$$

여기서, δ_s , δ_b : 말뚝-지반-말뚝 상호작용이 각각 말뚝의 주변마찰력 및 선단지지력에 미치는 효과에 대한 영향계수

β_s , β_b , β_c : 캡-지반-말뚝 상호작용이 각각 말뚝의 주변마찰력, 선단지지력, 캡의 지지력에 미치는 효과에 대한 영향계수

P_{ss} , P_{sb} : 무리말뚝과 동일한 지반 조건에 설치된 단말뚝의 주변마찰력 및 선단지지력

P_c : 캡과 동일한 크기의 전면기초 지지력

더불어, 캡과 말뚝의 하중-침하 거동의 특성 차이와 상호작용에 의한 말뚝이나 캡의 하중-침하 거동의 변화를 고려하기 위하여, 식 (4)의 영향계수로서 극한지지력을 비교하여 산정한 무리효율을 적용하는 대신에, 동일 침하량에서 단말뚝, 전면기초, 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝, 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝의 지지력을 비교하여 구한 하중효율(Load efficiency)을 적용할 것을 제안하였다. 하중효율은 침하량 파괴기준을 적용하여 구한 일종의 무리효율이라 할 수 있다. 하지만, Phung(1993)이 제안한 무리

말뚝 설계 방법 역시 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따른 상호작용의 특성 차이나 말뚝 설치 효과를 고려할 수 없다는 문제점을 갖고 있다.

4. 새로운 무리말뚝 설계 방법의 제안

합리적이고 정확한 무리말뚝 설계를 위해서는 말뚝 설치 효과, 말뚝-지반-말뚝 상호작용, 캡-지반-말뚝 상호작용, 전면기초로서의 캡의 지지 효과 등이 고려되어야 하며, 무리 효과로 인한 지지 요소들의 침하 특성 변화도 반드시 고려되어야 한다. 새로운 무리말뚝 설계 방법에서는 위에서 열거한 고려 사항 뿐만 아니라, 지금까지 간과되었던 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따른 말뚝 지지 거동의 변화도 고려할 수 있도록 개발되었다.

4.1 지지력 산정식

말뚝 설치 효과, 말뚝-지반-말뚝 상호작용, 캡-말뚝-지반 상호작용 등 무리말뚝 지지 거동에 영향을 미치는 요소들은 무리말뚝 내 말뚝의 다른 말뚝들에 대한 상대적인 위치에 따라 그 특성 및 크기를 달리한다. 그림 3은 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝의 분류를 나타낸다. 이수형 등(2001)과 이수형(2002)은 모형시험을 통해, 이러한 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝 거동의 차이가 특히 8개의 말뚝으로 완전히 둘러싸인 무리말뚝 중앙부의 말뚝과 무리말뚝 외곽부의 말뚝(모서리말뚝+측변말뚝) 사이에서 크게 나타나며, 반면에 각각 3개의 말뚝과 5개의 말뚝으로 둘러싸인 모서리말뚝과 측변말뚝의 지지 거동은 매우 유사한 것을 발견하였다. 따라서, 무리말뚝에서 위치에 따른 말뚝 지지 거동의 차이는, 크게 중앙부 말뚝들과 외곽부 말뚝들로 구분함으로써 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

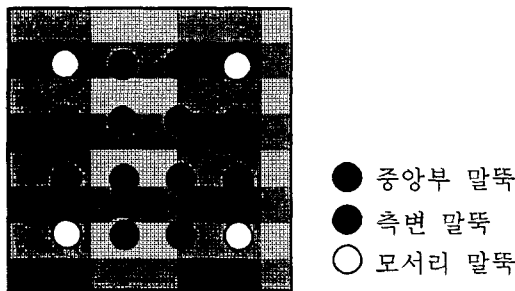


그림 3. 무리말뚝 내 말뚝 위치에 따른 말뚝의 분류

이러한 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝의 지지 거동 특성 차이와 더불어, 말뚝 설치 중첩 효과를 고려하기 위한 영향계수를 도입하면, 무리말뚝 지지력(P_g)은 다음의 식 (5)를 이용하여 산정될 수 있다.

$$P_g = n_c (\eta_{1sc} \eta_{2sc} \eta_{3sc} P_{ss} + \eta_{1pc} \eta_{2pc} \eta_{3pc} P_{sp}) + n_e (\eta_{1se} \eta_{2se} \eta_{3se} P_{ss} + \eta_{1pe} \eta_{2pe} \eta_{3pe} P_{sp}) + \eta_4 P_c \quad (5)$$

여기서, n_c, n_e : 각각 중앙부 말뚝과 외곽부 말뚝의 개수

η_{1sc}, η_{1pc} : 중앙부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 말뚝 설치 효과의 영향계수

η_{1se}, η_{1pe} : 외곽부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 말뚝 설치 효과의 영향계수

η_{2sc}, η_{2pc} : 중앙부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 말뚝-지반-말뚝 상호작용의 영향계수

η_{2se}, η_{2pe} : 외곽부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 말뚝-지반-말뚝 상호작용의 영향계수

η_{3sc}, η_{3pc} : 중앙부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 캡-지반-말뚝 상호작용의 영향계수

η_{3se}, η_{3pe} : 외곽부 말뚝의 주변마찰력과 선단지지력에 대한 캡-지반-말뚝 상호작용의 영향계수

η_4 : 캡의 지지력에 대한 캡-지반-말뚝 상호작용의 영향계수

P_{ss}, P_{sp} : 무리말뚝과 동일한 지반조건에 설치된 단말뚝의 설계 침하량에서의 주변마찰력과 선단지지력

P_c : 캡과 동일한 크기의 전면기초의 설계 침하량에서의 지지력

제안된 무리말뚝 지지력 예측식은 Phung(1993)이 제안한 식 (4)를 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝 거동의 차이를 고려할 수 있도록 보완한 것이다. 더불어, 제안된 식에서는 말뚝 설치 효과에 대한 영향계수를 추가함으로써, 말뚝 설치 효과를 말뚝-지반-말뚝 상호작용과 분리하여 고려할 수 있도록 하였다. 제안된 식에서는 모두 네 종류의 영향계수가 적용되었으며, η_1, η_2, η_3 은 각각 말뚝 설치 효과, 말뚝-지반-말뚝 상호작용, 캡-지반-말뚝 상호작용이 무리말뚝 내 말뚝들의 거동에 미치는 효과를 고려하기 위한 것이고, η_4 는 캡-지반-말뚝 상호작용과 말뚝 설치 효과가 캡의 거동에 미치는 영향을 고려하기 위한 것이다. 각 영향계수 뒤에 붙는 아래첨자 s 와 p 는 각각 주변마찰력과 선단지지력을 나타내며, c 와 e 는 중앙부 말뚝과 외곽부 말뚝을 나타낸다.

4.2 영향계수의 결정

무리말뚝 내 개별 말뚝 및 캡의 극한지지력과 독립된 말뚝 및 전면기초의 극한지지력을 비교하여 산정되는 무리효율(즉, 극한지지력 기준의 무리효율)은 제안된 예측식에 적용하기 부적절하다. 이는 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다.

- 1) 파괴 기준에 따라 극한지지력이 다르게 산정된다.
- 2) 말뚝과 캡의 하중-침하 거동의 차이가 고려되지 않는다. (말뚝의 파괴가 발생하는 침하량은 캡의 파괴가 발행하는 침하량과 상당한 차이가 있다.)
- 3) 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝 하중-침하 거동의 차이를 고려할 수 없다.

4) 말뚝 설치 효과, 말뚝-지반-말뚝 및 캡-지반-말뚝 상호작용에 의한 말뚝 또는 캡의 하중-침하 거동의 변화를 고려할 수 없다.

Phung(1993)이 제안한 하중효율은 무리효율의 이러한 문제점을 해결할 수 있는 무리말뚝 지지력 예측식에 가장 적합한 영향계수라 할 수 있다. 하중효율은 상부 구조물의 허용침하량과 같은 특정 기준 침하량에서, 무리말뚝을 이루는 개별말뚝 또는 캡의 지지력을 서로 다른 조건에서 비교함으로써 산정된다. 그림 4는 지반 조건은 동일하지만, 주변말뚝의 유무로 인한 말뚝 설치 중첩 효과 또는 캡과 지반의 접촉 여부 등 조건이 다른 두 종류의 재하 시험에서 얻어진 무리말뚝 지지 요소에 대한 하중-침하 곡선을 나타내며, 이 때 하중효율은 다음의 식으로 산정된다.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \tag{6}$$

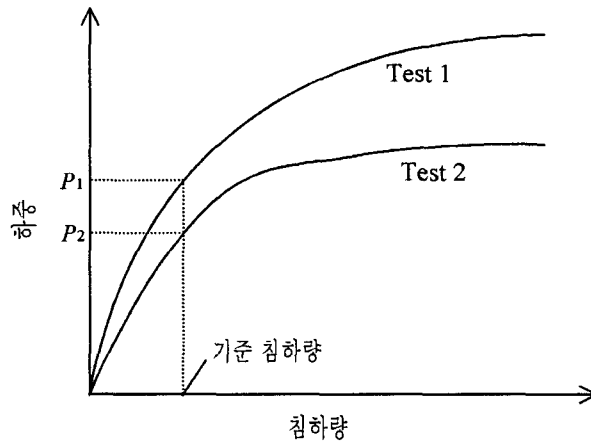


그림 4. 하중효율의 산정

제안된 지지력 예측식의 영향계수들을 이용하여 고려하고자 하는 효과를 평가하기 위해서는, 독립된 단말뚝 및 캡과 동일한 크기의 전면기초, 무리말뚝 내의 단말뚝, 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝, 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝에 대한 하중-침하 관계가 필요하다. 말뚝 설치 중첩 효과를 평가하기 위해서는 주변에 말뚝이 존재하지 않는 독립된 단말뚝과 무리말뚝을 이루는 말뚝들 중에 하나의 말뚝만을 재하한 경우, 즉 주변 말뚝 설치의 영향을 받는 무리말뚝 내 단말뚝의 거동을 비교하여야 한다. 말뚝-지반-말뚝 상호작용을 평가하기 위해서는 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝 전체를 재하한 경우의 말뚝 거동을, 무리말뚝에서 하나의 말뚝만을 재하한 단말뚝의 거동과 비교하여야 한다. 캡-지반-말뚝 상호작용을 평가하기 위해서는, 말뚝에 대해서는 캡과 지반이 접촉한 경우와 접촉하지 않은 경우, 무리말뚝 내 말뚝 거동을 비교하고, 캡에 대해서는 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝 내 캡의 거동과 독립되어 설치된 캡과 동일한 크기의 전면 기초의 거동을 비교하여야 한다. 표 1은 제안된 지지력 예측식에 사용하기 위한 하중효율의 산정방법 및 고려된 효과를 정리하여 나타낸 것이다.

표 1. 하중효율의 정의

기 호	정 의	고려되는 효과
η_1	P_{fp}/P_{sg}	말뚝 설치 효과의 증첩
η_2	P_{sg}/P_s	말뚝-지반-말뚝 상호작용
η_3	P_{pp}/P_{fp}	캡-지반-말뚝 상호작용
η_4	P_{pc}/P_c	말뚝 설치 효과와 캡-지반-말뚝 상호작용

여기서, P_s : 기준 침하량에서 독립된 단말뚝에 작용하는 하중

P_{sg} : 기준 침하량에서 무리말뚝 내 단말뚝에 작용하는 하중

P_{fp} : 기준 침하량에서 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝 내 말뚝에 작용하는 하중

P_{pp} : 기준 침하량에서 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝 내 말뚝에 작용하는 하중

P_c : 기준 침하량에서 독립된 전면기초에 작용하는 하중

P_{pc} : 기준 침하량에서 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝의 캡이 부담하는 하중

5. 제안된 설계 방법의 적용

5.1 하중효율의 선정

제안된 방법을 실제 무리말뚝 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건에서의 하중효율이 평가되어야 한다. 지반 조건, 말뚝 설치 방법, 말뚝간격, 말뚝길이, 캡과 지반의 상대강성 등 하중효율에 영향을 줄 수 있는 요소들은 매우 많으나, 현행 무리말뚝 설계에서 무리효율이 주로 지반조건과 말뚝간격에 따라 결정되는 것과 마찬가지로, 하중효율도 지반조건과 말뚝간격에 가장 큰 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서, 다양한 지반 조건에서 말뚝 간격에 따른 하중효율의 변화에 관한 자료가 수집된다면, 실용적이면서도 합리적인 무리말뚝 설계가 이루어질 수 있을 것이다. 그러나, 지금까지는 무리말뚝에 대한 재하시험이나 계측이 주로 무리말뚝의 전체 지지력 산정에 관점을 두고 있기 때문에, 제안된 설계방법에 적용하기 위한 세분화된 하중효율을 산정할 수 있는 시험 또는 계측 결과는 매우 적은 상황이다.

이수형 등(2000, 2001)은 두 종류의 지반조건에서 각각 단말뚝, 캡과 동일한 크기의 전면기초, 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝, 캡과 지반이 접촉한 무리말뚝에 대한 모형 재하시험을 수행하였다. 지반은 균질한 사질토로 이루어진 조건(이수형 등, 2000)과 하부 지반은 단단한 화강풍화토, 상부지반은 균질한 지반으로 이루어진 이층지반 조건(이수형 등, 2001)으로 조성되었다. 표 2와 3은 모형시험 결과로부터 산정한 하중효율을 정리하여 나타낸 것이다. 하중효율을 구하기 위한 기준 침하량은 말뚝의 파괴가 발생하는 침하량의 절반 정도의 침하량으로 결정하였으며, 따라서 표 2와 3에 제시된 값들은 사용하

중 영역에서의 하중효율을 대표한다고 할 수 있다. 무리말뚝 내 단말뚝에 대한 재하시험은 균질한 사질토 지반에서 중앙말뚝에 대해서만 수행되었기 때문에, 균질한 사질토 지반의 외곽부 말뚝과 이층지반의 말뚝에 대해서는 말뚝 설치 중첩 효과에 대한 하중효율(η_1)과 말뚝-지반-말뚝 상호작용에 대한 하중효율(η_2)을 분리하여 평가할 수 없었으며, 대신에 독립된 단말뚝과 캡과 지반이 접촉하지 않은 무리말뚝 내 개별말뚝의 지지력을 비교함으로써, 말뚝 설치 중첩 효과와 말뚝-지반-말뚝 사이의 상호작용이 모두 반영된 하중효율($\eta_1 \times \eta_2$)을 제시하였다.

표 2. 균질한 사질토 지반에서의 무리말뚝 하중효율(이수형 등, 2000)

말뚝 간격	2d	3d	4d	5d
η_{1sc}	2.5	3.5	2.1	1.7
η_{1pc}	1.0	0.9	0.9	1.0
η_{2sc}	1.5	0.4	2.3	1.6
η_{2pc}	0.8	1.0	1.0	1.1
$\eta_{1se} \times \eta_{2se}$	2.0	2.3	1.7	1.4
$\eta_{1pe} \times \eta_{2pe}$	0.8	0.9	1.0	1.1
η_{3sc}	1.8	2.7	0.3	0.8
η_{3pc}	1.5	1.0	1.2	0.8
η_{3se}	1.4	1.3	1.7	1.3
η_{3pe}	1.1	0.9	0.8	0.6
η_4	1.1	0.9	1.0	1.3

표 3. 단단한 풍화토층과 사질토층으로 구성된 이층지반조건에서의 무리말뚝 하중효율(이수형 등, 2001)

말뚝 간격	2d	3d	4d	5d
$\eta_{1sc} \times \eta_{2sc}$	0.2	0.3	0.8	0.9
$\eta_{1pc} \times \eta_{2pc}$	0.7	0.8	0.5	0.7
$\eta_{1se} \times \eta_{2se}$	2.4	1.3	1.4	0.9
$\eta_{1pe} \times \eta_{2pe}$	0.6	0.7	0.8	0.8
η_{3sc}	3.6	7.5	0.7	1.1
η_{3pc}	2.8	0.8	1.6	1.1
η_{3se}	0.8	0.8	0.6	1.6
η_{3pe}	1.0	1.3	1.2	1.0
η_4	0.5	0.5	0.3	0.5

표 2와 표 3에 제시된 하중효율에서는 같은 말뚝 간격인 경우에도 말뚝 위치에 따라 하중효율의 차이가 상당히 큰 것을 알 수 있으며, 말뚝 설치 효과나 지지 요소들 사이의 상호작용 효과가 더 크게 작용

하는 중앙부 말뚝이 외곽부 말뚝에 비해 말뚝 위치나 말뚝 간격에 따른 하중효율의 변화가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 지반 조건에 따른 하중효율의 차이도 상당히 큰 것으로 나타났다. 예를 들면 캡에 대한 하중효율(η_4)의 경우 균질한 사질토 지반에서는 말뚝 간격에 따라 1에 가깝거나 조금 크게 산정된 것에 반해 이층지반에서는 0.3~0.5의 작은 값으로 산정되었다. 이는 균질한 사질토 지반에서는 캡의 전면기초로서의 지지 효과가 대부분 발휘되는 반면에 이층지반에서는 일부만 발휘되는 것을 의미하며, 지반 조건에 따라 캡-지반-말뚝 상호작용의 특성 차이가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

크기 효과로 인해 표 2와 3에 제시한, 모형말뚝으로 산정된 하중효율들을 실제 무리말뚝에 직접적으로 적용하기는 어렵지만, 제시된 하중효율들의 지반 조건이나 말뚝 간격에 따른 변화 특성을 고려하면, 본 논문에서 제안한 설계 방법의 타당성 및 필요성을 충분히 유추할 수 있다. 따라서, 앞으로 실제 크기의 무리말뚝이나 현장 계측 결과가 축적된다면 제안된 방법을 이용한 실제 무리말뚝에 대한 합리적인 설계가 가능할 것으로 기대된다.

5.2 적용 예제

기존의 무리말뚝에 대한 적용을 통해 제안된 무리말뚝 설계 방법의 적용성을 검토하였다. 대상 무리말뚝은 Phung(1993)이 수행한 현장 모형시험의 무리말뚝으로, 지반 조건이나 말뚝 설치 방법 등이 유사한 이수형 등(2000)의 시험 결과로부터 산정한 균질한 사질토 지반에 대한 하중효율(표 2)을 제안된 방법에 적용하여 그 지지력을 계산하였다. 계산된 지지력을 시험 결과와 비교 분석함으로써 제안된 방법의 유효성을 평가하였다.

5.2.1 대상 무리말뚝 개요

Phung(1993)은 비점착성 지반에 설치된 대규모 무리말뚝에 대한 현장 모형시험을 수행하였다. 본 예제에서는 5개의 말뚝(중앙부 말뚝 1개, 외곽부 말뚝 4개)으로 이루어진 무리말뚝의 전체 지지력을 제안된 방법을 이용하여 예측하였다. 재하시험의 개요 및 무리말뚝의 제원은 표 4에 정리하여 나타내었다. 그림 5는 말뚝 배치를 나타낸다.

표 4. Phung(1993)의 현장 모형 시험 개요

지반	말뚝	캡
사질토 평균상대밀도 : 38%	정사각형 단면 : 60 mm×60 mm 근입깊이 : 210 cm 타입하여 말뚝 설치 말뚝 간격 : 4b (b : 말뚝 폭)	콘크리트 캡 46 cm×46 cm×25 cm

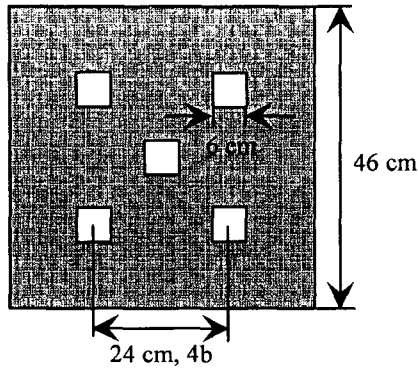


그림 5. Phung(1993)의 현장모형시험에서의 말뚝 배치

5.2.2 설계 침하량의 결정

그림 6은 시험 결과로 얻은 독립된 단말뚝의 하중-침하 곡선을 나타낸다. 지지력을 계산하기 위한 기준침하량은 파괴 시 침하량의 절반 정도인 0.3 cm로 결정하였다.

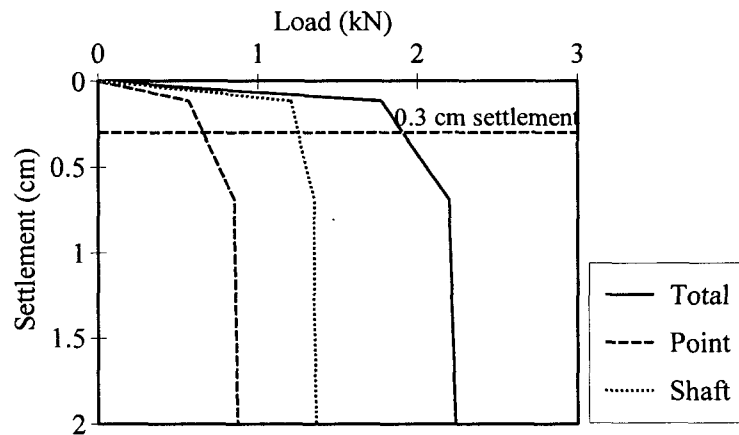


그림 6. 독립된 단말뚝의 하중-침하 곡선 및 기준 침하량(Phung, 1993)

5.2.3 독립된 단말뚝의 지지력 결정

설계 기준침하량 0.3 cm에서의 독립된 단말뚝 지지력은 그림 6에 나타낸 바와 같이, 각각 선단지지력 (P_{sp})은 0.66 kN, 주변마찰력(P_{ss})은 1.25 kN,으로 나타났으며, 이 때 전체지지력은 1.91 kN이다.

5.2.4 전면기초의 지지력 결정

그림 7은 시험 결과로부터 얻은 말뚝이 설치되지 않은 캡과 동일한 크기의 전면기초의 하중-침하 곡선을 나타낸다. 전면기초의 기준 침하량 0.3 cm에서의 지지력(P_c)은 11.3 kN으로 나타났다.

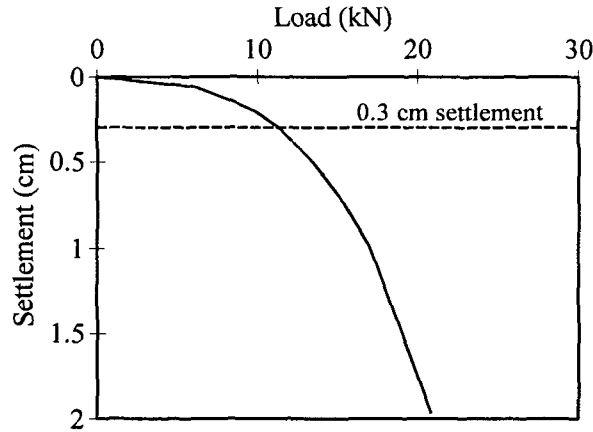


그림 7. 전면기초의 하중-침하 곡선(Phung, 1993)

5.2.5 무리말뚝의 전체 지지력 계산

식 (5)와 표 2에 제시된 하중효율을 이용하여 무리말뚝의 전체 지지력을 계산하였다. 무리말뚝의 전체 지지력은 38.2 kN으로 계산되었으며, 이 때 말뚝들이 분담하는 하중은 27.0 kN (71%), 캡이 분담하는 하중은 11.2 kN (29%)으로 각각 계산되었다. 계산된 결과는 그림 8에 무리말뚝 재하시험 결과와 함께 나타내었다.

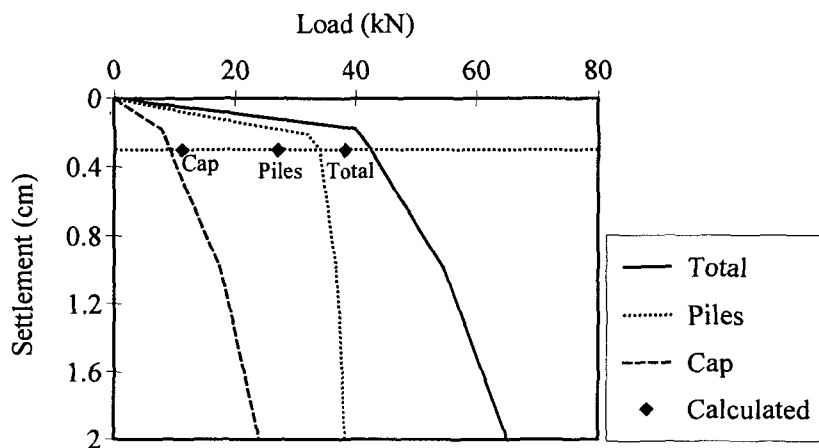


그림 8. 무리말뚝의 하중-침하 곡선(Phung, 1993) 및 지지력 계산 결과

5.2.6 시험결과와의 비교

그림 8은 재하시험 결과로부터 얻은 무리말뚝 전체의 하중-침하 곡선이다. 그림 8에는 변형률 게이지를 이용하여 계측한 말뚝하중을 토대로, 캡과 말뚝이 분담하는 하중을 분리하여 함께 나타내었다.

그림 8에서 계산된 무리말뚝의 지지력은 시험 결과에 비해 약간 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 계산된 캡의 지지력은 비교적 시험결과와 잘 일치한다. 그러나, 계산된 말뚝의 지지력은 시험결과에 비해 작게 예측된다. 2장에서 설명한 바와 같이 일반적으로 원지반의 상대밀도가 작을수록 말뚝 타입에 의한 주변지반의 상대밀도 증가 효과가 크다. Phung(1993)이 수행한 시험에서 무리말뚝이 설치된 원지반의 평균 상대밀도는 38%로 이수형 등(2000)의 시험에서의 70%에 비해 더 작다. 즉, 이수형 등(2000)의 시험으로부터 산정된 말뚝 설치 효과를 고려하기 위한 하중효율, η_1 이 Phung(1993)의 시험에 적용하기에 다소 과소 평가되었기 때문에 말뚝 지지력이 작게 예측된 것으로 판단된다. 이러한 지반조건의 차이를 고려한다면, 제안된 방법을 이용하여 무리말뚝의 지지력을 대체로 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가된다.

6. 결론

본 논문에서는 무리말뚝 설계방법의 문제점을 보완한 새로운 무리말뚝 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법의 특징은 다음과 같다.

- 1) 지금까지 하나의 무리효율만을 이용하여 한꺼번에 대략적으로 고려해왔던, 말뚝 설치 중첩 효과, 말뚝-지반-말뚝 상호작용, 캡-지반-말뚝 상호작용 등의 무리말뚝 거동에 영향을 미치는 주요한 요소에 대하여 각각 독립적인 효율을 도입함으로써 이러한 요소들의 효과를 명확하게 분리하여 고려할 수 있다.
- 2) 말뚝의 주면마찰력과 선단지지력을 분리하여 서로 다른 효율을 적용함으로써 보다 정확한 설계가 가능하다.
- 3) 무리말뚝 내 말뚝의 상대적인 위치에 따라 말뚝을 중앙부 말뚝과 외곽부 말뚝으로 구분하여 서로 다른 효율을 적용함으로써, 무리말뚝 내 위치에 따른 말뚝 거동의 차이를 고려할 수 있다.
- 4) 말뚝을 이루는 개별 요소들의 극한하중이 아닌 관심 있는 특정 기준 침하량에서의 지지력을 이용하여 설계가 이루어지므로, 상부 구조물의 허용침하량을 관점으로 한 합리적인 설계가 이루어질 수 있다.
- 5) 침하량 관점의 설계를 통해 캡과 말뚝의 하중-침하 거동 특성 차이(캡의 파괴는 점진적으로 발생하는데 비해 말뚝의 파괴는 상대적으로 관입 형태로 발생함)로 발생하는 캡과 말뚝의 극한하중에서의 침하량 차이 문제를 해결 할 수 있는 동시에, 캡에 대해서도 효율을 적용함으로써, 캡의 전면기초로서의 지지 효과를 무리말뚝 설계에 합리적으로 고려할 수 있다.

기존의 모형 무리말뚝 재하시험 대하여 제안된 방법을 적용하고 계산 결과를 시험결과와 비교함으로써, 그 적용성을 확인하였다. 또한, 다양한 지반 조건 및 말뚝 설치 방법에 따른 실물 크기 무리말뚝에 대한 재하시험이나 현장계측 결과가 축적된다면, 제안된 무리말뚝 설계방법의 실제적인 활용이 가능할 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

1. 이수형, 최영석, 정충기, 김명모 (2000). "사질토 지반에서 말뚝캡이 연직하중을 받는 무리말뚝의 거동에 미치는 영향", *대한토목학회 논문집*, 20권, 제1-C호, pp. 91~98.
2. 이수형, 최영석, 정충기, 김명모 (2001). "모형 실험을 통한 이층 지반에 설치된 연직하중을 받는 무리말뚝의 거동 연구", *대한토목학회 논문집*, 21권, 제5-C호, pp. 555~566
3. 이수형 (2002). "사질토 지반에서 연직하중을 받는 무리말뚝의 지지 거동모형", 박사학위논문, 서울대학교
4. Akinsumuru, J. O. (1980), "Interaction of piles and cap in piled footing", *ASCE : Journal of the soil mechanics and foundations division*, Vol. 106, GT 11, pp. 1263~1268.
5. Cooke, R. W., Price, G. and Tarr, K. (1980), "Jacked piles in London clay: interaction and group behaviour under working conditions", *Geotechnique* 30, No. 3, pp. 97~136.
6. Davidson, J. L., Mortensen, R. A., and Barreiro, D. (1981), "Deformations in sand around a cone penetrometer tip", *Proceedings 10th ICSMFE*, Stockholm, Vol. 2, pp. 467~470.
6. Ekstrom, J. (1989), "A field study of model pile group behaviour in non-cohesive soils Influence of compaction due to pile driving", Ph. D Dissertation, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology.
8. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), "Centrifuge modeling of piled raft foundations on clay", *Geotechnique* 46, No. 4, pp. 741~752.
9. Kishida, H. (1967), "Ultimate bearing capacity of piles driven into loose sand", *Soils and Foundations*, Vol. VII, No. 3, pp. 20~27.
10. Liu, J. L., Yuan, Z. L., and Shang, K. P. (1985), "Cap-pile-soil interaction of bored pile groups", *Proceeding of 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol.3, pp. 1433~1436.
11. O'Neill, M. W., Hawkins, R. A. and Mahar, L. J. (1982), "Load transfer mechanism in piles and pile groups", *ASCE : Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 108. No. GT12, pp. 1605~1623.
12. Philcox, K. T. (1962), "Some recent developments in the design of high buildings in Hong

Kong", *Structural Engineering*, Vol. 40, pp. 303~323.

13. Phung, D. Long (1993), "Footing with settlement-reducing piles in non-cohesive soil", Ph. D Dissertation, Department of geotechnical engineering, Chalmers University of Technology
14. Robinsky, E. I. and Morison, C. E. (1964), "Sand displacement and compaction around model friction piles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1, No. 4. pp. 81~93.