지반조건에 따른 마이크로파일 설치방법에 관한 연구

Installation of Micro-piles Appropriate to Soil Conditions

황 태 현¹ Hwang, Tae-Hyun

문 경 련² Mun, Kyeong-Ryeon

신 용 석³ Shin, Yong-Suk

권 오 엽⁴ Kwon, Oh-Yeob

Abstract

This study performs model test to propose the installation method of micro-pile appropriate to various soil conditions such as sand or silt soil. As a result, the crossed installation method ($\theta < 0^\circ$) of micro-pile is effective in resisting a compression displacement of soil in the case of silt exhibiting the punching shear failure. And the inclined installation method ($\theta > 0^\circ$ or $\theta < 0^\circ$) of micro-pile is effective in resisting a lateral displacement of soil in the case of sand to exhibiting the general or local shear failure.

요 지

본 연구는 지반조건에 따른 효과적인 마이크로 파일의 설치방법을 제안하기 위해 실트 또는 모래지반에서 모형시험을 수행하였다. 시험결과, 관입 전단파괴가 발생한 실트지반은 압축변위에 저항하도록 마이크로 파일을 엇갈리게 설치($\theta < 0^\circ$)하는 것이 효과적이며, 전면 또는 국부전단파괴가 발생한 모래인 경우 횡 방향 변위에 저항하도록 마이크로 파일을 경사지게 설치($\theta > 0^\circ$ 또는 $\theta < 0^\circ$)하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

Keywords : Micro-pile, Installation method, Silt and Sand, Length ratio of pile, Model test

1. 서 론

최근 구조물이 대형화됨에 따라 기존 구조물을 증축하는 경우가 증가하고 있다. 또한 기존 구조물 증축에 따른 구조물 기초 지반의 안정성을 향상시키기 위한 다양한 언더피닝 공법(Under-pinning methods)들이 강구되고 있다. 그 중 마이크로 파일 공법(Micro-pile method)은 구조물 증축에 따라 요구되는 지반의 지지력을 증대시키는 데 효과적인 공법으로 알려져 많은 건설현장에 적용되어 왔으며, 최근까지도 활용되고 있다. 또한 마이크로 파일 공법은 사면활동 억제, 옹벽의 활동억제, 교량기초의 지지파일 등과 같은 활용목적에 따라 적용

되고 있다. 이 같이 마이크로 파일의 활용 빈도가 점차 증가함에 따라 보다 효과적인 설치방법을 제안하기 위해 국내·외 몇몇 연구자들은 실내시험, 수치해석, 현장시험과 같은 다양한 연구방법을 통해 관련연구를 수행하였고, 현재까지도 수행 중에 있다. 그러나 기존 연구자들이 제안한 마이크로 파일 설치방법의 대부분은 모래 지반만을 대상으로 연구한 결과를 통해 제안된 방법들로, 황태현 등(2010, 2011)이 제안한 것과 같이 마이크로 파일은 파일의 인접지반에 많은 영향을 받으므로, 보다 다양한 지반조건을 적용한 연구가 요망될 것이다. 따라서 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 모래지반과 실트지반을 대상으로 모형시험을 수행하였고, 시험결과

1 정희원, 건국대 공과대학 토목공학과 겸임교수 (Member, Ph.D, Adjunct Professor, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

2 정희원, 삼부토건(주) 기술연구실 과장 (Member, Sambu Construction Co., Ltd.)

3 정희원, 한국시설안전공단 실장 (Member, Ph.D, Inspection Report evaluation Team, KISTEC)

4 정희원, 건국대 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Ph.D, Professor, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., oykwon@konkuk.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

를 통해 지반조건에 따른 마이크로 파일의 설치방법을 제안하였다.

2. 마이크로 파일 연구사례

국내·외 몇몇 연구자들은 기존 연구결과를 토대로 지반의 지지력 증대에 효과적인 마이크로 파일의 설치방법을 제안하고 있다. Lizzi(1982)의 경우, 현장시험 결과를 통해, 마이크로 파일의 설치간격은 파일직경의 3~4배, 설치깊이는 지반조건에 따라 약 10~30m로 마이크로 파일을 설치하는 것이 바람직하다고 제안하였다. 또한 FHWA(2005)는 마이크로 파일의 설치깊이는 천공장비의 성능에 따라 90m 이상 마이크로 파일 설치가 가능하나 마이크로 파일의 길이를 30m 이내로 하는 것이 바람직하다 제안하였다. Tsukada 등(2006) 그리고 이태형과 임종철(2006)은, 모형시험 결과를 통해, 파일의 설치각도를 +30°(그림 4)로, 설치깊이를 기초 폭의 4배(파일 길이 4B 이상인 경우, 지지력비가 일정)로 마이크로 파일을 설치하는 것이 지반 지지력 증대에 효과적이라고 제안한 바 있다. 또한 황태현 등(2010, 2011)은 유한심도 내에 암반층이 존재하는 모래지반을 대상으로 수행한 모형시험과 수치해석 결과를 통해 지반 파괴영역과 관련된 기초크기, 지반 강도특성, 파일강성과 관련된 마이크로 파일의 길이비 등을 고려하여 마이크로 파일을 설치해야 한다고 제안하였다. 그리고 마이크로 파일의 길이비(L/d ; L =파일 설치깊이, d =파일 직경)가 50 이하인 경우에는 수직으로, 파일길이비가 100 이상인 경우에는 경사지게 설치하는 것이 지반의 지지력 증대에 효과적이라고 제안하였다. 그러나 이 같은 마이크로 파일의 설치방법은 대부분이 모래지반만을 대상으로 한 연구결과를 통해 제안된 것들이며, 황태현 등(2010, 2011)이 말한 바와 같이, 파일 인접지반의 특성에 따라 파일의 설치방법이 다를 수 있으므로 보다 다양한 지반조건을 적용한 마이크로 파일 관련 연구가 요망될 것으로 판단된다.

3. 모형시험 및 시험조건

그림 1은 본 연구에서 활용한 모형시험기 와 토조 내 에 지반을 조성하는 과정을 나타낸 것이다. 모형시험기 내 설치된 토조의 크기(폭×길이×높이)는 500mm×1200mm×800mm이며, 토조 내 조성된 지반은 건조된 모래와 실트 시료를 활용하였다. 모형시험 시 지반을 균질하게 조성

하는 것이 무엇보다 중요하므로 시험기 내 설치된 강사 장치(그림 1)를 활용하여 모래 또는 실트지반을 조성하였다. 토조 내 파일이 설치된 지반(이후부터는 파일보강

(a) 모형시험장치 모식도

(b) 지반조성 과정

그림 1. 모형 시험기 및 지반조성 과정

지반으로 칭함)을 조성하는 경우, 허인구(2008)가 활용한 방법과 같이 모형 케이싱을 활용하는 것은 파일을 설치할 위치의 지반을 교란시켜 파일 인접지반과 토조 내 조성된 지반의 밀도가 다를 수 있다. 그러므로 이 같은 문제를 해결하기 위해 1차적으로 소정의 위치까지 지반을 조성하였다(그림 1(b)). 그리고 1차적으로 조성한 지반에 파일간격이 직경의 4배가 되도록 2열로 모형 파일(총 파일개수=110; 1열의 파일개수=55, 그림 5)을 설치한 후, 추가적으로 지반을 조성하고 모형 기초를 설치하였다. 지반을 조성하는 과정 중 지반변위 형상을 육안으로 관찰할 수 있도록 활용한 시료와 동일한 입경을 가진 검정 모래 또는 실트 시료를 활용하여 얇은 층을 지반에 형성시켰고(검정색 모래와 실트 층당 표시간격=50mm), 조성된 지반이 균질하게 형성되었는지 판단하기 위해 아크릴로 제작한 상대밀도 측정 장치(장치 개수=5개, 그림 1(b))를 설치하였다. 이 같은 과정을 통해 조성한 지반 모습은 그림 2와 같으며, 조성된 모래와 실트 지반의 상대밀도는 약 50%정도이다.

표 1은 입도분석, 비중시험, 직접 전단시험 등과 같은 실내시험을 통해 얻은 시료의 물성 값을 나타낸 것이며, 그림 3은 본 연구에서 활용한 모래와 실트시료의 입도 분포 곡선을 나타낸 것이다.

모형시험 시 활용한 모형 기초는 강판으로 제작하였으며, 기초 바닥면에는 고무판(두께=5mm)을 부착하여 접지 압이 고르게 발생하도록 하였다. 이 같이 제작된 모형기초 크기(폭×길이×높이, 그림 5)는 100×500×20(mm)이다.

모형 마이크로 파일은 현장에서 많이 활용 하고 있는 직경이 200mm인 원형 마이크로 파일을 대상으로 하였으며, 원형체의 구성요소중 하나인 보강용 강봉(Reinforced steel bar)과 동일한 재료인 철(Steel bar)로 제작하였다. 파일제작 시 모형파일의 직경은, 일반적으로 파일의 지지 특성은 파일강성에 많은 영향을 받으므로(Poulos와 Davis, 1981), 길이 축소율($\lambda = L_{pro.}/L_{mod.}$)을 적용하지 않고 강성 축소율($\lambda^5 = (EI)_{pro.}/(EI)_{mod.}$)을 적용하여 파일직경을 결정하였다(Iai, 1989; Iai 등, 2005). 이 때 요구되는 모형 마이크로 파일 직경은 약 2mm($\lambda=1/35$ 를 적용한 경우, 파일직경(d)=2.13mm)이다. 모형 마이크로 파일의 표면은, 기존 연구자들이 제작한 것과 같이, 지반조성 시 활용한 모래와 실트시료를 부착시켜 지반과 파일 사이에 주면 마찰력이 최대한 발휘되도록 하였다(이태형과 임종철, 2006; Tsukada 등, 2006; 황태현 등, 2010). 이 같이 제작한 모형 마이크로 파일 크기와 형태는 그림 4와 같다.

(a) 모래지반

(b) 실트지반

그림 2. 시험 전, 조성된 지반

표 1. 조성지반 물성 값

시험 종류	모래	실트
비중(G_s)	2.64	2.74
소성지수(PL)	N.P	N.P
단위중량(γ_d , kN/m^3)	14.70	15.10
상대 밀도(%)	52 ± 2	49 ± 1
전단 저항각(ϕ)	31°	11°
점착력(c , kN/m^2)	0	1.48

그림 3. 시료의 입도분포곡선

본 연구에서 활용한 재하 장치는 모형시험기 내에 설치된 장치를 활용하였고(그림 1a), 하중재하 시 조성된 지반에 변위가 균질하게 발생되도록 느린 속도로 하중

을 가하였다(분당 축 변형율=1%/min).

그림 5 그리고 표 2와 3은 본 연구에서 적용한 시험조건과 각 경우별 파일 설치방법 을 나타낸 것으로, 표와 그림에서 보는 것 같이, 우선 조성된 모래와 실트지반을 대상으로 시험을 수행하였다. 그리고 파일보강 모래 또는 실트지반을 대상으로 모형시험을 수행하는 경우에는 이태형과 임종철(2006)이 제안한 마이크로 파일의 설치 길이($L=4B$)를 적용하고, 지반조건에 따른 마이크로 파일의 적정 설치각도를 알아보기 위해, 마이크로 파일의 설치각도만을 달리하여 시험을 수행하였다. 또한 지반 조건(특히 실트지반인 경우)에 따라 마이크로 파일의 적정 파일길이가 다를 수 있으므로 본 연구에서 수행한 모형시험 결과를 통해 얻은 적정 파일 설치각도를 적용하고, 파일의 설치길이를 달리하여 추가적으로 연구를 수행하였다. 각 경우별 나타난 시험결과와는 식 (1), (2)을 적용하여 비교·분석하였다. 또한 시험 후 나타난 각 경우별 지반 파괴형상을 비교하는 경우에는 그림 6과 같이 지반파괴면 내의 영역을 활동(Active state zone) 또는 수동영역(Active state zone)으로 구분하여 비교하였다.

$$BCR_{(sand)} = q_{s(L, \theta)} / q_s \quad (1)$$

$$BCR_{(silt)} = q_{si(L, \theta)} / q_{si} \quad (2)$$

여기서, $BCR_{(sand)}$: 파일보강 모래지반 지지력 비

$BCR_{(silt)}$: 파일보강 실트지반 지지력 비

$q_s(L, \theta)$: 파일보강 모래지반 지지력

q_s : 모래지반 지지력

$q_{si}(L, \theta)$: 파일보강 실트지반 지지력

q_{si} : 실트지반 지지력

그림 6. 파일보강 모래지반 파괴면내 활동 및 구속영역(황태현과 권오엽, 2011)

4. 모형시험 결과 및 분석

4.1 모래지반인 경우, 시험결과

모형시험 시 각 경우별 지반의 파괴시점은, Han과 Ye(2006)이 적용한 것과 같이, 기초 침하량($\Delta\delta_v$)이 기초 폭(B)의 10% 이상 발생한 시점으로 간주하였다. 또한 기초의 축변형율 10% 이내에 지반 또는 파일보강 지반의 지지력이 최대인 경우에는 그 시점을 파괴시점으로 간주하였다.

그림 7은 기초의 축 변형율($\epsilon_v = \Delta\delta_v / B$)이 10% 이상 발생한 경우 나타난 모래지반 또는 수직 및 경사파일보강 모래지반의 파괴형상을 보인 것이다. 시험결과, 그림에서 보는 것과 같이 모래지반에 형성되는 지반의 파

(a) 모래지반

(b) 수직파일보강 모래지반($L=4B$, $\theta=0^\circ$)

(c) 경사파일보강 모래지반($L=4B$, $\theta=+30^\circ$)

(d) 경사파일보강 모래지반($L=4B$, $\theta=-30^\circ$)

그림 7. 모래 또는 파일보강 모래지반 파괴형상

괴영역깊이는 기초 폭의 약 1~2B정도인 것으로 나타났으며, 지반의 파괴형상은 작용하는 하중으로 인해 지반 변위가 횡 방향으로 전면 또는 국부 전단파괴형상과 같이 인접된 지반에 전이되어 지표면까지 발생하는 것으로 나타났다. 이 때 모래지반 지지력은 17.27kPa이다(표 5. 파일보강 모래지반의 파괴형상은 모래지반과 유사한 형상으로 발생하였으며, 모래지반에 비해 상대적으로 넓게 형성되는 것으로 나타났다. 또한 경사파일보강 모래지반의 파괴형상이 수직파일 보다 넓게 확장되는 것으로 나타났으며, 각 경우별 파일보강 모래지반 지지력은 24.03~36.05kPa인 것으로 나타났다. 이 같이 파일경사에 따라 파일보강 모래지반의 파괴형상과 지지력이 달라지는 요인은 다음과 같을 것으로 판단된다. 우선 수직 또는 경사파일의 설치각도가 0°, +30°인 경우, 그림 7(b), (c)에서 보는 것과 같이, 검정 모래로 표시한 파일의 위치와 인접지반 변위형상을 통해 하중으로 인해 발생된 활동영역의 지반변위는 설치된 모형파일과 파일에 인접한 구속영역 지반에 의해 저항 받는 것을 알 수 있다. 즉 이태형(2006)과 Tsukada 등(2006)이 말한 바와 같이 파일과 구속영역 지반의 구속효과로 인한 지반의 강도특성이 증가하는 효과 때문에 파일보강 모래지반의 지반 파괴면이 확장되는 것으로 판단된다. 파일의 설치각도가 -30°인 경우, 그림 7(d)에서 보는 것과 같이 그림에 표시한 경계면 A-A를 기준으로, 경계면 상부에서는 지반에 설치된 파일이 발생된 지반 압축변위를 직접적으로 구속시키고, 이로 인해 활동영역의 지반과 파일이 하나의 블록과 같이 경계면까지 작용하는 하중을 전달하게 된다. 그리고 경계면 하부에서는 파일 설치각도가 +30°인 경우와 유사하게 경계면에 작용하는 하중을

표 5. 파일길이가 4B인 경우, 모래 및 파일 설치각도에 따른 파일보강 모래지반 지지력

기 호	극한 지지력(kPa)	지지력비($BCR_{(sand)}$)
q_s	17.27	1
$q_s(1B, 0)$	17.38	1.01
$q_s(1B, +30)$	17.15	0.99
$q_s(4B, 0)$	24.03	1.39
$q_s(4B, +15)$	25.79	1.49
$q_s(4B, +30)$	31.08	1.80
$q_s(4B, +45)$	24.23	1.40
$q_s(4B, -15)$	26.92	1.56
$q_s(4B, -30)$	36.05	2.09
$q_s(4B, -45)$	26.09	1.51

지지하기 때문에 지반 내 발생하는 지반 파괴면이 확장되는 것으로 판단된다.

그림 8은 파일의 설치길이가 1,4B인 경우 파일 설치각도에 따른 모래 및 파일보강 모래지반의 지지력을 비교한 것이다. 시험결과, 그림 8(a)에서 보는 것과 같이, 파일길이가 1B인 경우에는 모래와 파일보강 모래지반의 지지력이 거의 유사한 것으로 나타났다. 파일길이가 4B인 경우에는 파일길이가 1B인 경우와 달리 모래지반인 경우보다 파일 보강 모래지반의 지지력이 큰 것으로 나타났다(그림 8b). 그리고 파일 설치각도에 따른 파일보강 모래지반의 지지력을 비교한 경우, 수직으로 설치

(a) 파일길이=1B인 경우, $q_s - \epsilon_v$

(b) 파일길이=4B인 경우, $q_s - \epsilon_v$

그림 8. 파일길이 1,4B인 경우, 설치각도에 따른 파일보강 모래지반의 극한지지력 비교

한 경우보다 경사지게 설치한 경우가 파일보강 모래지반의 지지력이 큰 것으로 나타났으며, 모래지반인 경우보다 지지력이 1.39~2.09배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 파일 설치각도가 $\pm 30^\circ$ 인 경우가 모래지반의 지지력에 비해 약 1.8~2.09배정도 증가하였고, 설치각도가 $+30^\circ$ 인 경우와 지지력 값이 그리 큰 차이를 보이지 않으나, 설치각도가 -30° 인 경우가 파일보강 모래지반의 지지력이 가장 큰 것으로 나타났다. 이 같이 파일 설치길이에 따라 시험결과가 다르게 나타난 요인은 전체 파일길이의 위치와 지반의 파괴형상이 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 우선 모래지반의 파괴형상을 보면 지반 파괴깊이는 기초 폭의 1~1.5배정도 발생하였고, 지중변위는 국부 전단파괴형상과 같이 횡 방향으로 활동영역에서 발생된 지반변위가 인접지반으로 전이되면서 발생하는 것을 알 수 있다(그림 7a). 즉 파일길이가 1B인 경우에는 파일 전체길이가 지반 파괴면 내에 존재하므로 파일이 지중변위를 원활하게 구속시키지 못하고, 활동하는 지반과 파일이 함께 거동하기 때문인 것으로 판단된다. 지반 내 존재하는 파일길이가 4B인 경우에는 지반 파괴면 외부에 존재하는 안정영역(Stable zone; 그림 6)에 파일 일부길이가 존재하여 활동영역의 지반 내 발생된 변위를 파일과 구속영역 지반이 저항하게 되므로 모래지반인 경우와 파일길이가 1B인 경우보다 지반 지지력 증대효과가 큰 것으로 판단된다. 또한 경사진 경우가 수직으로 설치한 경우보다 지반 지지력이 증가한 요인은, 황태현 등(2010)이 말한 바와 같이, 경사진 경우가 상대적으로 지반변위로 인해 발생하는

토압에 상대적으로 영향을 덜 받아 지지력이 증가하는 것으로 판단된다.

그림 9는 설치각도에 따른 파일보강 모래지반의 지지력비($BCR_{(sand)}$; 식 1)를 비교한 것이다. 시험결과, 파일 길이가 1B인 경우의 지반 지지력비는 모래지반인 경우($BCR_{(sand)}=1$)와 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 파일길이가 4B인 경우에는 파일의 설치각도에 따라 지지력비가 약 1.5~2.0인 것으로 나타났으며, 파일의 설치각도 $\pm 30^\circ$ 인 경우가 수직인 경우보다 지지력비가 큰 것으로 나타났다. 이 같은 모래지반을 대상으로 수행한 시험결과를 통해 전면 또는 국부 전단파괴형상이 발생할 것으로 예측된 지반에서는 지반의 지지력을 증대시키기 위해 마이크로 파일을 설치하는 경우 일정 설치각도로 마이크로 파일을 경사지게 설치하는 것이 지반의 지지력 증대에 효과적인 것으로 판단된다(본 연구 시 모래지반인 경우, $\theta = \pm 30^\circ$).

표 6과 그림 10은, 파일 설치각도가 -30° 인 경우, 파일 설치길이에 따른 파일보강 모래지반의 지지력과 지지력비를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이, 파일길이가 점차 증가함에 따라 파일보강 모래지반의 지지력과 지지력비는 모래지반인 경우보다 증가하는 것으로 나타났다. 파일길이가 1B, 2B인 경우 파일 보강지반의 지지력은 모래지반인 경우보다 약 1.2~1.3배 정도 크게 증가하지 않았으나, 파일길이가 3B를 초과한 경우에는 이태형과 임종철(2006) 그리고 황태현과 권오엽(2011)의 연구결과와 유사하게 파일보강 모래지반의 지지력이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다(L=3B인 경우, 지반 지지력의 증가율=56%; L=4B인 경우, 지반 지지력의 증가율=109%; 표 6과 그림 10b).

그림 9. 파일길이가 1,4B인 경우, 설치각도에 따른 파일보강 모래지반의 지지력비

4.2 실트지반인 경우, 시험결과

그림 11은 축 변형율이 10%를 초과한 경우 실트지반 파괴형상을 보인 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 실트지반에 형성된 지반 파괴영역깊이는 기초 폭의 약 1.5~2.0배 정도인 것으로 나타났다. 또한 실트지반의 파괴형상은 관입 파괴형상으로 지반 압축변위가 발생하였다. 이때 실트지반의 지지력(q_{st})은 0.77kPa이다(표 7).

그림 12는 파일길이가 4B인 경우, 파일 설치각도에 따른 파일보강 실트지반의 파괴형상을 보인 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 파일 설치각도가 0° , $+30^\circ$ 인 경우($\theta \geq 0^\circ$) 파일보강 실트지반에서 나타난 파괴형상

표 6. 설치각도(θ) = -30° 인 경우, 모래 및 파일보강 모래지반의 지지력과 지지력비 비교

기 호	극한 지지력(kPa)	지지력비($BCR_{(sand)}$)
q_s	17.27	1
$q_s(1B, -30)$	20.98	1.22
$q_s(2B, -30)$	24.23	1.37
$q_s(3B, -30)$	26.96	1.56
$q_s(4B, -30)$	36.05	2.09

(a) $q_s - \epsilon_v$

(b) $BCR_{(sand)} - L/B$

그림 10. 파일길이에 따른 파일보강 모래지반 지지력과 지지력비

그림 11. 실트지반 파괴형상

표 7. 파일길이가 4B인 경우, 실트 및 설치각도에 따른 파일보강 실트지반 지지력

기 호	극한 지지력(kPa)	지지력비($BCR_{(silt)}$)
q_{si}	0.768 kPa	1
$q_{si}(4B, 0)$	0.847 kPa	1.10
$q_{si}(4B, +15)$	0.891 kPa	1.16
$q_{si}(4B, +30)$	0.862 kPa	1.12
$q_{si}(4B, +45)$	0.882 kPa	1.15
$q_{si}(4B, -15)$	0.909 kPa	1.18
$q_{si}(4B, -30)$	1.160 kPa	1.51
$q_{si}(4B, -45)$	0.865 kPa	1.13

(a) $L=4B, \theta=0^\circ$

(b) $L=4B, \theta=+30^\circ$

(c) $L=4B, \theta=-30^\circ$

(d) $L=4B, \theta=-45^\circ$

그림 12. 파일보강 실트지반 파괴형상($\epsilon_v \geq 10\%$)

은 활동영역 내에 존재하는 지반은 수직방향으로 큰 압축변위가 발생하였으나, 구속영역의 지반에서는 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 파일이 설치

된 위치를 표시한 검정시료에서도 큰 변위가 발생하지 않았다. 파일 설치각도가 -30° , -45° 인 경우($\theta < 0^\circ$)에는 지반 파괴면 내의 활동 및 구속영역 지반에서 변위가 발생하였고, 파일 위치를 표시한 검정시료 변위는 경계면 B-B 및 C-C(그림 12c, d)를 기준으로 상부에서 크게 발생하였으며, 하부에서는 거의 변위가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

표 7과 그림 13은 파일길이가 4B인 경우 파일 설치각도에 따른 파일보강 실트지반의 지지력과 지지력비($BCR_{(silt)}$; 식 2)를 비교한 것으로, 설치각도에 따라 파일보강 실트지반의 지지력이 달라지는 것으로 나타났다.

그림 13. 파일길이 4B인 경우, 설치각도에 따른 파일보강 실트지반 지지력 비교

그림 14. 파일길이 4B인 경우, 설치각도에 따른 파일보강 실트지반 지지력비

시험결과, 각 경우별 파일보강 실트지반의 지지력은 약 0.85~1.16kPa 정도인 것으로 나타났으며, 파일 설치각도 -30° 인 경우가 실트지반의 지지력에 비해 최대 약 50% ($BCR=1.51$)정도 지반 지지력 증대효과를 보이는 것으로 나타났다.

그림 14는 파일길이가 4B인 경우 설치각도에 따른 각 경우별 파일보강 실트지반의 지지력비를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이, 파일 설치각도가 수직 또는 양의 방향($\theta \geq 0^\circ$; 그림 5)인 경우에는 파일보강 실트지반 지지력비가 실트지반인 경우에 비해 다소 증가하나($BCR_{(silt)}=1$), 파일 설치각도와 관계없이 파일보강 실트지반의 지지력비가 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 파일 설치각도를 음의 방향($\theta < 0^\circ$; 그림 5)으로 한 경우에는 설치각도에 따라 파일보강 실트지반의 지지력비가 증가하다 감소하는 것으로 나타났으며, 파일 설치각도 -30° 인 경우의 지지력비가 가장 큰 것으로 나타났다.

그림 15는 Tsukada 등(2006)과 본 연구의 연구결과를 비교한 것으로, 지반조건과 파일설치각도에 따라 파일보강 지반의 지지력이 달라지는 것으로 나타났다. 여기서 주목할 부분은, 본 연구와 상이한 시료입자의 크기(Tsukada의 경우, $D_{50}=0.18\text{mm}$; 본 연구의 경우, $D_{50}=0.55\text{mm}$, 그림 3)와 기초 형상(Tsukada 등의 경우, 원형 독립기초; 본 연구의 경우, 연속기초)등과 같은 요인 때문에 파일보강 지반의 지지력비 결과 값에 차이가 있으나, 파일 설치각도를 수직 또는 양의 방향으로 설치한 경우, 두 연구에 나타난 파일보강 지반의 지지력비 경향이 매우 유사하다는 것이다. 이와 같은 연구 결과가 나타난 요인은 지반의 파괴형상과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 우선 본 연구에서 수행한 실트지반을 대상으로 모형시험을 한 결과, 그림 11에서 보는 것과 같이, 지반 파괴면이 지표면까지 확장되지 않고 수직 방향으로 압축변위만 발생하는 관입 파괴형상으로 지반이 파괴되는 것을 알 수 있다. 또한 Tsukada 등(2006)의 연구를 보면 알 수 있듯이 느슨한 모래지반인 경우에는 실트지반인 경우와 유사하게 지반 파괴면이 지표면까지 확장되지 않았다. 그러므로 이 같이 나타난 지반 파괴형상 때문에 수직 또는 양의 방향($\theta \geq 0^\circ$)으로 설치된 파일보강 지반은 수직방향으로 발생된 지반 압축변위를 파일이 효과적으로 억제하지 못하기 때문에 지반 지지력 증대효과가 나타나지 않는 것으로 판단된다. 그러나 음의 방향으로 설치한 경우($\theta < 0^\circ$)에는 활동영역

그림 15. 지반조건과 파일설치각도에 따른 파일보강 지반의 지지력비 비교

그림 16. 설치각도 -30°인 경우, 파일길이에 따른 파일보강 실트지반 지지력과 지지력비

의 지반변위를 효과적으로 구속하고, 경계면 하부(그림 12c,d)에 존재하는 파일이 경계면에 작용하는 하중을 지지하기 때문에 파일보강 지반의 지지력이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 시험결과를 통해 관입 파괴형상과 같이 압축변위가 예상되는 연약지반의 경우에는 수직방향으로 발생된 지반의 압축변위를 효과적으로 구속할 수 있도록 마이크로 파일을 음의 방향으로 일정각도를 두어 설치하는 것이 지반 지지력 증대에 효과적일

것으로 판단된다(본 연구 시, 적정 파일 설치각도 = -30°).

표 8과 그림 16은 파일 설치각도가 -30°인 경우, 설치길이에 따른 파일보강 실트지반의 지지력과 지지력비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이, 파일길이가 길어짐에 따라 파일보강 실트지반의 지지력이 증가하는 것으로 나타났으며, 설치조건에 따라 실트지반 지지력보다 최대 50%($BCR_{(silt)} \approx 1.5$; 표 7)정도 증가하는 것으로 나타났다. 파일길이가 기초 폭의 2배인 경우 파

표 8. 설치각도(θ) = -30° 인 경우, 실트 및 파일보강 실트지반의 지지력과 지지력비 비교

기 호	극한 지지력(kPa)	지지력비($BCR_{(silt)}$)
q_{si}	0.768	1
$q_{si(1B, -30)}$	0.806	1.05
$q_{si(2B, -30)}$	0.887	1.15
$q_{si(3B, -30)}$	1.129	1.47
$q_{si(4B, -30)}$	1.160	1.51

일보강 실트지반 지지력비는 실트지반인 경우보다 약 15% 정도의 지반 지지력의 증대효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 기초 폭의 3배인 경우에는 약 50%정도 지지력이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 파일길이가 기초 폭의 4배인 경우에는 파일길이가 기초 폭의 3배인 경우와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 모형시험 결과를 통해 관입 파괴형상으로 나타난 지반의 지지력을 효과적으로 증대시키기 위해서는 파일의 설치길이를 기초 폭의 3배 이상, 서로 엇갈리게 파일각도($\theta < 0^\circ$)를 두어 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 지반 조건에 따른 마이크로 파일의 적정 설치방법을 제안하기 위해 모래와 실트지반을 대상으로 실내시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 효과적으로 마이크로 파일을 설치하기 위해서는 대상지반의 파괴형상과 밀접한 관계가 있으므로 이를 반드시 고려해야 한다.
- (2) 전면 또는 국부전단파괴가 예상되는 지반의 경우, 마이크로 파일의 설치각도는 경사지계(본 연구, $\theta = \pm 30^\circ$)로 설치해야 하며, 서로 파일을 엇갈리게 설치하는 경우($\theta < 0^\circ$)에는 파일 설치길이를 기초 폭의 4배 이상 적용하여 마이크로 파일을 설치하는 것이 지반의 지지력을 증대시키는 데 효과적이다.
- (3) 관입 파괴형상이 예상되는 지반의 경우, 원지반의 지지력을 효과적으로 증대시키기 위해서는 마이크로 파일을 반드시 서로 엇갈리게 설치해야 하며 ($\theta < 0^\circ$), 파일길이는 기초 폭의 3배 이상을 적용하여 마이크로 파일을 설치해야 효과적이다.

본 연구는 모형시험 결과를 토대로 지반조건에 따른 마이크로 파일의 설치방법을 제안한 것이므로 실제 지반에서는 다를 수 있어 현장시험을 통한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 건국대학교 학술 진흥연구비 지원에 의한 논문이며, 건국대학교 산학 협력단 연구지원팀에 감사드리는 바입니다.

참 고 문 헌

1. 이태형 (2006), “조밀한 모래지반의 마이크로 파일 보강효과에 관한 연구”, *부산대학교 박사학위논문*, 부산대학교, pp.179-188.
2. 이태형, 임종철 (2006), “조밀한 모래지반의 기초하부에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제26권 제3C호, pp.191-200.
3. 허인구 (2008), “흙막이벽체 인접구조물의 침하억제를 위한 마이크로파일의 적용”, *건국대학교 박사학위논문*, 건국대학교, pp.35-38.
4. 황태현, 김지호, 권오엽 (2010), “기초 폭 및 암반층의 영향을 고려한 마이크로 파일 설치방안에 관한 연구”, *한국지반공학학회 논문집*, 한국지반공학학회, 제26권 제6호, pp.29-38.
5. 황태현, 권오엽 (2011), “파일길이비와 암반층의 위치에 따른 마이크로 파일 설치방법”, *한국지반공학학회 논문집*, 한국지반공학학회, 제27권 제4호, pp.5-20.
6. FHWA (2005), “Micro-pile Design and Construction”, *United States Department of Transportation*, No. FHWA NHI-05-039, December, pp.5-1~5-18.
7. Han, J. and Ye, S. L. (2006), “A Field Study on the Behavior of a Foundation Underpinned by Micro-piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.1, pp.30-42.
8. Iai, S. (1989), “Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field”, *Journal of Soil and Foundation*, Vol.29, No.1, pp.105-118.
9. Iai, S., Tobita, T., Nakahara, T. (2005), “Generalised Scaling Relations for Dynamic Centrifuge Tests”, *Geotechnique*, Vol.55, No.5, pp.355-362.
10. Lizzi, F. (1982), “Static of Monuments”, *Sagep Publisher*, Genoa, Italy. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., You, G. (2006), “Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforcing with Micro-piles”, *Journal of Soil and Foundation*, Vol.46, No.3, pp.367-376.

(접수일자 2011. 10. 5, 심사완료일 2012. 4. 2)