

사질토 지반에 설치된 마이크로파일의 설치간격 및 설치각도에 따른 압축거동특성

Compressive Behavior of Micropile According to Pile Spacing and Embedded Pile Angle in Sand

경 두 현¹ Kyung, Doo-Hyun 김 가 램² Kim, Ga-Ram
김 대 홍³ Kim, Dae-Hong 신 주 호⁴ Shin, Ju-ho
이 준 환⁵ Lee, Jun-Hwan

Abstract

Micropile technology has evolved continuously since its instruction by Fernando Lizzi in the 1950s. The effects of group micropile have been researched by many researchers. The effects of group micropile differ and change with pile length, pile spacing (S), pile angle (θ) and pile embedded conditions. In the present study, the effects of resistance increase and settlement reduction from micropiles were investigated through a series of axial load tests. For the study, axial load tests were performed using mat, group micropiles and micropiled-raft (MPR) in various pile spacing and pile angle conditions. As the result, the effects of resistance of micropiled-raft were 80% (3D) to 110% (7D) of the total resistance of mat and group micropile. The effects of settlement restraint of micropiled-raft were 20% (S=3D, $\theta=45^\circ$) to 70% (7D, $\theta=15^\circ$) of settlement of mat foundation.

요 지

마이크로파일 기초는 1950년대 Lizzi에 의해 개발된 이후 널리 이용되고 있다. 무리 마이크로파일의 효과에 대한 연구는 많은 연구자들로부터 수행되어 왔다. 무리 형태로 설치된 마이크로파일의 지지성능 발휘 효과는 지반조건 및 말뚝의 길이, 말뚝의 설치 간격(S), 말뚝의 설치각도(θ), 말뚝의 배치조건 등 다양한 변수에 의해 변화된다. 본 연구에서는 다양한 조건에서의 연직재하시험을 통하여 무리 마이크로파일의 저항력증가효과와 침하억제효과를 규명하도록 하였다. 본 연구를 위하여, 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일 기초(GP), 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)에 대한 연직재하시험을 다양한 설치간격과 설치각도 조건에서 수행하였다. 실험결과 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 저항력이 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일(GP)의 저항력의 80%(S=3D)-110%(S=7D)로 측정 되는 것으로 나타났으며, 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 침하억제효과가 전면기초(Mat)의 20%(S=3D, $\theta=45^\circ$)에서 70%(S=7D, $\theta=15^\circ$) 수준까지 측정 되는 것으로 나타났다.

Keywords : Micropile, Axial load test, Sand, Mat, Group micropile, Micropiled-raft

1 정회원, 연세대학교토목환경공학과박사과정 (Member, Ph.D Candidate, School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

2 학생회원, 연세대학교토목환경공학과석사과정 (Graduate Student, School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 한국전력공사전력연구원책임연구원 (Member, Principal Researcher, KEPRI/KEPCO)

4 비회원, 한국전력공사전력연구원연구원 (Researcher, KEPRI/KEPCO)

5 정회원, 연세대학교토목환경공학과정교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-5796, Fax: +82-2-364-5300, junlee@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2013 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

마이크로파일은 1950년대 Lizzi에 의해 처음 소개된 이후 널리 사용되고 있는 소규모의 말뚝 기초형식으로 보통 소규모의 천공장비를 이용하여 천공하고 파일 및 강봉을 조립, 설치한 후 그라우팅을 실시하여 지름 300mm 이하의 말뚝을 형성하는 소구경 현장타설공법이다. FHWA(2005)에 의하면 마이크로파일은 구조물의 하중이 파일에 의하여 직접적으로 지지되는 여부를 기준으로 Case 1과 Case 2의 마이크로파일로 구분되며, 그라우팅 방식 및 압력, 2차 그라우팅의 조건에 따라 Type 1~Type 4로 구분된다.

마이크로파일의 설계는 일반적인 말뚝의 설계와 크게 다르지 않다(Kim et al., 2003). 마이크로파일의 설계는 말뚝의 직경이 소구경이기 때문에 지지력의 대부분이 주변 마찰력에 기인하는 것으로 간주하여 선단지지력을 고려하지 않고 설계되며, 무리 마이크로파일을 설계하는 경우, 무리 마이크로파일의 설치조건에 기인하는 무리효율계수를 고려하여 마이크로파일을 설계하게 된다. 선단지지력의 경우, 소구경이라는 제원적 특징에 기인해 무시하고 있으나, 이에 대한 구체적인 분석은 이루어지지 않아 불필요한 과다설계의 가능성이 존재하고 있다.

무리 마이크로파일의 효과는 지반조건 및 말뚝의 길이, 말뚝의 설치 간격, 말뚝의 각도, 말뚝의 배치조건 등의 다양한 변수에 의해 변화 될 수 있으며, 많은 연구자들에 의하여 연구가 수행되어왔다(Lizzi et al., 1979; Lee, 1991; Tsukata, 2006). 그러나, 이러한 무리 마이크로파일의 효과는 다양한 변수에 복합적으로 영향을 받으며, 다양한 변수를 동시에 고려하였을 경우의 명확한 거동특성을 확인할 수 없어 보다 많은 연구가 필요할 실정이다.

본 연구에서는 마이크로파일 기초의 설치조건에 따른 지지력 증가효과와 침하 억제효과를 규명하기 위하여 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일 기초(GP), 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 하중재하시험을 수행하고 이를 분석하였다. 본 시험에서는 말뚝의 설치간격과 설치각도가 주요한 변수로 고려되었으며, 전면기초(Mat)를 기준으로 침하수준을 선정하여 각각의 동일한 침하수준 상태에서의 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일 기초(GP), 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 거동특성을 상호 비교하도록 하였다.

2. 마이크로파일

2.1 마이크로파일의 정의 및 종류

마이크로파일은 소규모 천공장비를 이용하여 지반을 소정의 깊이까지 천공하고 파일 및 강봉을 조립, 설치한 후 그라우팅을 실시하여 말뚝을 형성하는 소구경 현장타설공법으로, 기존 구조물의 지지력증가 또는 침하억제를 목적으로 주로 사용되어 왔다. 마이크로파일은 기계의 소형화, 저진동, 저소음 등의 장점으로 인하여 환경문제를 야기하는 기존 항타장비나 대형 굴착장비로 시공할 수 없는 도심지의 협소한 공간에서 사용되었으며, 최근에는 지반보강, 사면굴착의 안정화, 흙막이 옹벽의 안정화, 근접시공시 부동침하억제, 도심지 터널 굴착시 주변지반의 변형억제, 구조물 신축이나 증축시 지반의 지지력강화, 지반 및 교량기초 내진성능 향상 등의 목적으로 그 적용범위가 점차 확대되고 있다(Lee et al., 2006).

마이크로파일은 말뚝의 거동적 측면과 그라우팅 방법에 따라 분류될 수 있다(FHWA, 2005). 말뚝의 거동에 따른 마이크로파일의 분류는 마이크로파일이 구조물에 연결되어 직접적으로 하중을 견디는 경우(Case 1)와 지반을 그물식으로 에워싸듯이 보강하여 지반/말뚝 복합체를 형성하는 경우(Case 2)로 구분될 수 있으며, Case 1의 말뚝의 경우에는 말뚝이 개별적으로 하중을 지지하는 것으로 간주하여 설계하는 반면, Case 2의 경우에는 말뚝 개개가 아닌 보강된 지반 전체에 하중이 작용하는 것으로 간주하여 설계한다(FHWA, 2005; Kim et al., 2002).

마이크로파일의 그라우트 방법에 따르는 분류는 중력에 의한 그라우팅(Type A), 가압에 의한 그라우팅(Type B), 포스트그라우팅(Type C, D)로 구분된다. 중력에 의한 그라우트는 마이크로파일을 이루는 그라우트제를 중력에 의하여 선단부터 공의 입구까지 채우는 것으로, 그라우트는 중량에 의한 물-시멘트비(W/C) 0.45-0.5를 사용하게 된다. 가압에 의한 그라우팅의 경우, 일시적으로 설치하였던 강재 케이싱을 추출하면서 시멘트 그라우트에 압력을 가하여 주입하는 방법으로, 주입압은 보통 0.5-1.0MPa의 범위에서 가하도록 한다. 포스트 그라우팅의 경우, 지반의 수압파쇄나 주입시 그라우트가 케이싱을 따라 흐를 가능성이 있는 경우에 사용하는 방법으로, 공내에 먼저 그라우트를 채운 후 특수한 그라우트

튜브를 통해 추가적으로 그라우트를 주입하는 방법으로, 추가적인 그라우트를 주입하는 시기와 압력에 따라 Type C와 Type D로 구분된다(FHWA, 2005; Kim et al., 2002).

2.2 마이크로파일의 설계

일반적인 마이크로파일의 직경은 300mm 미만으로 말뚝의 길이에 비하여 직경이 매우 작으므로 지지력의 대부분을 주면마찰력에 기인하는 것으로 간주한다(Kim et al., 2003; FHWA, 2005). 단일 마이크로파일의 설계는 그라우트의 방법과 지반조건에 따라 구분된다. 예를 들어, 사질토지반에 중력식 그라우팅으로 시공된 마이크로파일(Type A)의 경우 깊이에 따른 상수(β)와 유효수직응력(σ_{vz})을 통하여 주면마찰응력(f_s)이 계산되며, 깊이에 따른 상수(β)는 정지토압계수(K_0), 지반의 마찰각(ϕ)의 함수를 통하여 산정된다(O'Neill and Hassan, 1994).

$$f_s = \beta \sigma_{vz} \quad (1)$$

$$\beta = K_0 \tan \phi \quad (2)$$

마찰상수 β 는 SPT N값을 기준으로도 산정될 수 있으며, 다음의 식이 적용되어 얻어진다.

$$\beta = 1.5 - 0.42z^{0.34} \quad (N \geq 15, 0.25 \leq \beta \leq 1.2) \quad (3)$$

$$\beta = (1.5 - 0.42z^{0.34}) \frac{N}{15} \quad (N < 15) \quad (4)$$

여기서, N=표준관입시험에서 보정하지 않은 해머의 타격횟수(회/300mm), z=지표면으로부터 SPT가 수행된 깊이(m)이다.

반면, Turner(1995)에 의하면, 압력식 그라우트를 이용하여 시공된 마이크로파일(Type B)의 설계는 수동상태를 가정하여 보정된 토압계수(K')와 이에 상응한 상수(β)의 보정을 통하여 고려할 수 있으며, 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$\beta = K' \tan \phi \quad (5)$$

여기서, K' =보정된 토압계수이며, 사질토 및 자갈의 유효

마찰각이 $30^\circ \sim 40^\circ$, 주입압이 0.2~0.35MPa일 경우 K' 의 값의 크기는 4~7이다.

2.3 무리 마이크로파일의 설계

압축하중을 받는 무리 마이크로파일의 지지력은 일반적인 무리 말뚝과 같이 무리효율계수를 고려하여 지지력을 산정할 수 있다. 무리 마이크로파일의 극한지지력은 단일 말뚝의 극한지지력을 산정하고 총 말뚝의 개수와 무리효율계수를 곱하여 산정할 수 있으며, 무리효율계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_v = \frac{Q_{gu}}{\sum_{i=1}^n Q_{iu}} \quad (6)$$

여기서, η_v = 무리효율계수, Q_{gu} = 무리말뚝의 축방향 극한지지력, Q_{iu} = 단일말뚝의 축방향 극한지지력이다.

마이크로파일의 무리효율은 마이크로파일의 길이, 설치간격, 설치각도 등 다양한 요소에 따라 변화하게 된다. Lizzi et al.(1979)은 기초 길이의 변화와 말뚝 설치간격의 변화에 따른 마이크로파일의 무리효율을 산정하였으며, 연직으로 설치된 무리 마이크로파일은 설치간격이 말뚝직경의 2~7배일 때, 무리효율이 1.0이상이 되어 양의 무리효과가 발생하는 것으로 판단하였다. 또한, Lee(1991)는 사질토에서 그물식 뿌리말뚝에 의해 기초를 보강할 경우의 마이크로파일의 무리 효과에 대하여 연구하였으며, 그 결과 말뚝 길이가 기초폭의 5배 이상일 때 지지력의 증가효과에 대한 길이의 영향이 없으며, 말뚝간격이 말뚝 직경의 약 8배일 때 최적의 말뚝효율이 나타나는 것으로 판단하였다. 반면, Tsukata et al.(2006)은 기초의 지반조건 및 마이크로파일의 종류, 설치각도를 변화시켜, 모형실험을 수행하였으며, 파일의 구속효과와 휨강성을 종합하여 판단하였을 때, 파일이 약 30도의 각도로 시공되었을 때, 가장 효과적인 결과가 나타나는 것으로 판단하였다. 그러나, 이러한 무리 마이크로파일의 효과는 다양한 변수에 복합적으로 영향을 받으며, 다양한 변수를 동시에 고려하였을 경우의 명확한 거동 특성을 확인할 수 없어 보다 많은 연구가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 마이크로파일의 설치각도와 설치간격을 주요한 변수로 동시에 고려하여 실험을 수행하였으며, 이를 분석하도록 하였다.

3. 실내모형시험

3.1 시험 개요

무리 마이크로파일에 대한 압축재하시험은 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며, 무리 마이크로파일의 설치조건에 따라 그 지지특성이 다양하게 변화되는 것을 확인 할 수 있다(Lizzi, 1979; Lee, 1991; Tsukata et al., 2006). 본 연구에서는 3×3으로 배치된 무리 마이크로파일(GP)과 마이크로파일지지 전면기초(MPR), 전면기초(Mat)의 압축재하시험을 수행하여 마이크로파일의 설치간격과 설치각도를 함께 고려한 지지력변화 특성 및 침하억제효과를 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 가로 및 세로 폭이 각각 1000mm, 높이가 700mm인 사각형의 토조가 사용되었다. 토조는 하중의 재하에 따라 충분한 강성을 갖도록 두께 10mm의 강판으로 구성되었으며, 지반의 조성상태를 확인하기 위

하여 전면에 아크릴판을 설치하여 지반의 조성상태를 확인하도록 하였다. 재하시험에 사용된 모형 마이크로파일은 직경 5mm, 길이 340mm의 강봉이 사용되었으며, 사용된 강봉의 상단부 10mm가 전면기초(Mat)에 체결되어 전면기초(Mat)의 하단으로부터 최대 330mm의 근입깊이를 갖도록 하였다. 마이크로파일 표면에는 0.5mm의 규사토를 부착하여 말뚝의 표면을 거칠게 하였다. 본 연구에서 수행된 실험조건은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 전면기초(Mat)의 압축재하시험: 토조의 표면까지 지반을 조성한 후 전면기초(Mat)에 하중을 재하하여 전면기초의 압축재하시험 수행하였다. 수행된 전면기초의 크기는 100×100(mm)의 사각기초로 무리 마이크로파일과 마이크로파일지지 전면기초에 사용된 전면기초의 크기와 동일하게 선정하였다.
- 2) 무리 마이크로파일(GP, Group pile)의 압축재하시험: 토조의 표면까지 지반을 조성한 후 일정한 간격과

Table 1. Test conditions and test names for load tests

Test conditions	Embedded depth (L, mm)	Pile spacing (S, mm)	Angle of pile (Deg)	Test name
Mat	-	100×100	-	Mat (100×100)
Group pile	310 L=62D	15 S = 3D	0	GP-3D0
			15	GP-3D15
			30	GP-3D30
			45	GP-3D45
		25 S=5D	0	GP-5D0
			15	GP-5D15
			30	GP-5D30
			45	GP-5D45
		35 S=7D	0	GP-7D0
			15	GP-7D15
			30	GP-7D30
			45	GP-7D45
Micropiled-raft	330 L=66D	15 S = 3D	0	MPR-3D0
			15	MPR-3D15
			30	MPR-3D30
			45	MPR-3D45
		25 S=5D	0	MPR-5D0
			15	MPR-5D15
			30	MPR-5D30
			45	MPR-5D45
		35 S=7D	0	MPR-7D0
			15	MPR-7D15
			30	MPR-7D30
			45	MPR-7D45

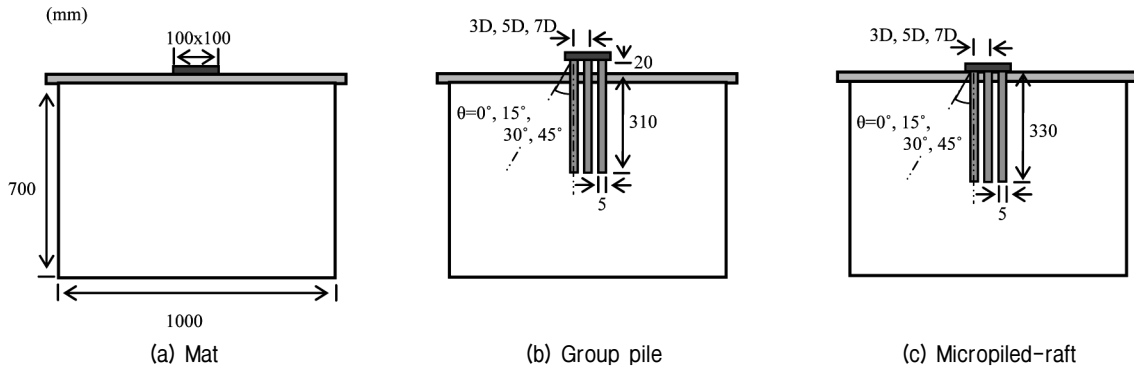


Fig. 1. Test conditions for axial load tests

일정한 각도로 말뚝을 설치하여 무리 마이크로파일을 구성하였다. 설치된 무리 마이크로파일은 지반의 표면으로부터 2cm 떨어지도록 설치하여 순수한 무리 마이크로파일의 지지력을 측정하도록 하였으며, 설치된 마이크로파일의 간격은 파일 직경의 3배, 5배, 7배가 되도록 하였으며, 설치된 마이크로파일의 각도는 0도, 15도, 30도, 45도로 구분하여 설치하였다.

- 3) 마이크로파일지지 전면기초(MPR, Micropiled-raft)의 압축재하시험: 토조의 표면까지 지반을 조성한 후 일정한 간격과 일정한 각도로 말뚝을 설치하여 마이크로파일이 설치된 마이크로파일지지 전면기초를 조성하였다. 설치된 마이크로파일의 간격은 파일 직경의 3배, 5배, 7배가 되도록 하였으며, 설치된 마이크로파일의 각도는 0도, 15도, 30도, 45도로 구분하여 설치하여 무리 마이크로파일의 조건과 동일한 상태에서 비교할 수 있도록 구성하였다.

3.2 지반 조건

재하시험 실시를 위해 토조내 지반조성을 위한 모래는 주문진 표준사가 이용되었다. 본 연구에서 사용된 모래의 역학적 특성을 파악하기 위하여 기본물성시험과 삼축 압축시험을 수행하였다. 주문진 표준사의 기본물성시험으로는 체가름시험과 비중시험, 진동대를 이용한 최대단위중량 측정시험 ASTM D4253-00(2006), 최소단위중량 측정시험 ASTM D4254-00(2006)이 수행되었으며, 이에 대한 결과는 Table 1과 같다. 또한, 상대밀도에 따른 지반의 마찰각을 측정하기 위하여 구속압(σ_3) 100, 150, 200kPa, 상대밀도(D_r) 57.7, 89.94%에 대한 삼축압축시험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 식 (7)과 같다.

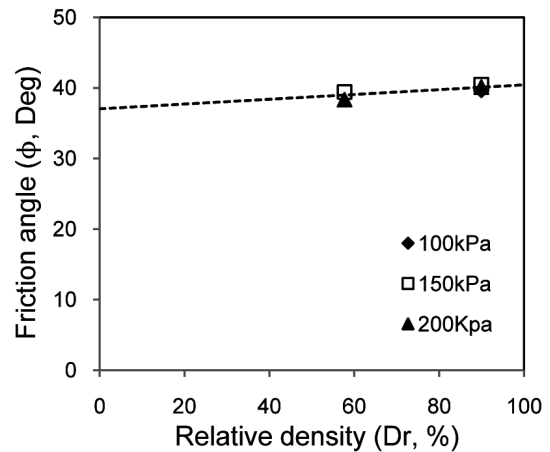


Fig. 2. Friction angle for soil specimen by triaxial compression test

Table 2. Physical properties of soil

Physical properties		Values
Max. void ratio	e_{max}	0.927
Min. void ration	e_{min}	0.591
Specific gravity	G_s	2.65
Max. Dia. (mm)	D_{max}	0.850
Min. Dia (mm)	D_{min}	0.075
Uniformity coefficient	C_u	1.73
Curvature coefficient	C_c	0.97
Max. dryunit weight (kN/m^3)	γ_{max}	16.34
Min. dry unit weight (kN/m^3)	γ_{min}	13.49
Unified system (ASTM D2487)		SP

$$\phi_{TC} = 0.034D_r + 37.03 \quad (7)$$

여기서 ϕ_{TC} = 삼축압축시험을 이용한 측정마찰각($^\circ$), D_r = 상대밀도이다.

본 연구를 위한 지반조성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 가로 및 세로폭이 각각 1000mm이고, 높이 700mm인 모형지반이 조성되는 토조와 가상장치를 통하여 조

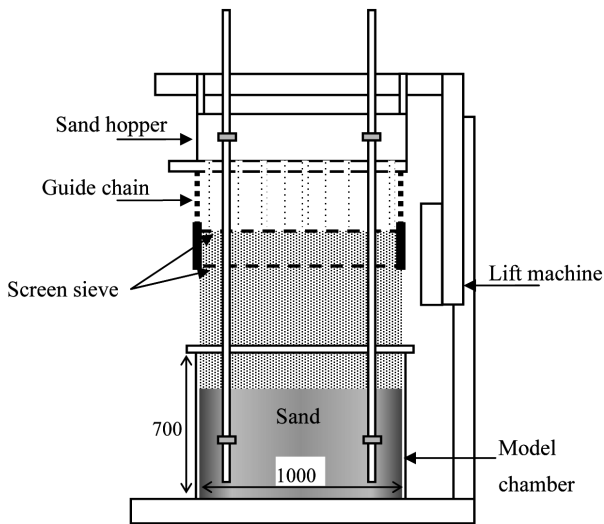


Fig. 3. Description for setting the soil specimen

성되었다. 일정한 상대밀도를 구현하기 위하여 강사장치의 모래 호퍼의 구멍을 통하여 모래의 유출량을 조절하여 강사속도를 조절하고, 모래 호퍼와 강사장치의 거

리를 조절하여 지반과 강사장치 사이의 낙하고를 조절하는 강사법을 이용하였으며, 여러 번의 시행착오를 통하여 상대밀도 $90\pm 2\%$ 를 갖는 지반을 구현하였다. 지반은 100mm씩 7층으로 나누어 조성되었다.

3.3 재하시험 수행

Fig. 4에 나타난 바와 같이 전면기초(Mat) 및 무리 마이크로파일(GP)과 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 모형 재하시험은 1+2의 과정을 통하여 수행되었다. 전면기초(Mat)의 하중재하시험은 지반이 조성된 이후, 전면기초(Mat)를 설치하고 유압실린더를 통하여 하중을 재하하였다. 재하된 하중은 유압실린더와 전면기초(Mat) 사이에 위치한 로드셀을 통하여 측정되었으며, 전면기초(Mat)의 양 끝단에는 LVDT를 설치하여 발생하는 침하량을 측정하였다. 하중은 0.2kN의 단위로 증가시켰으며, 각 하중단계에서 변위가 더 이상 발생하지 않을 때

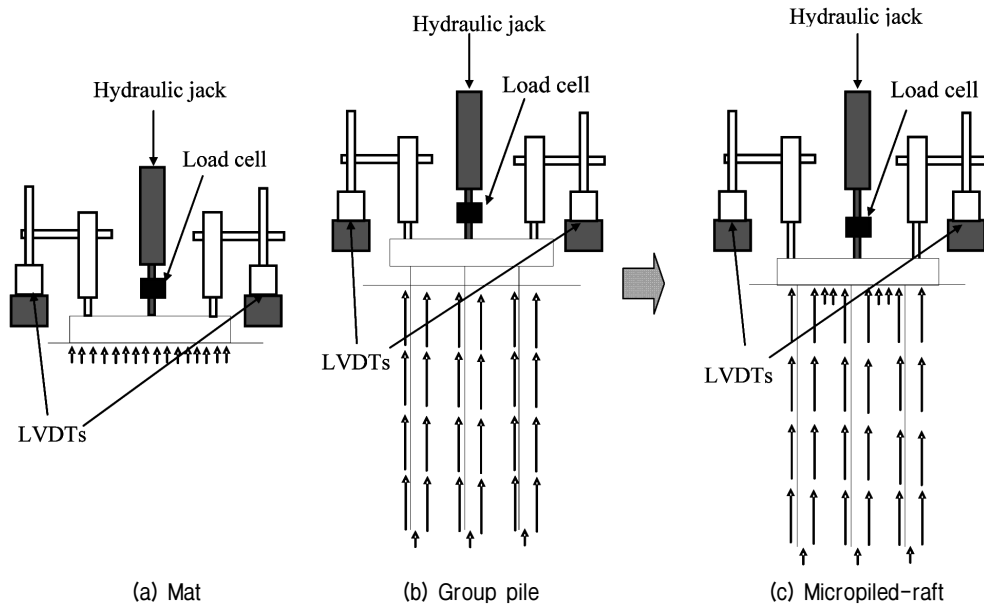


Fig. 4. Description of axial load tests

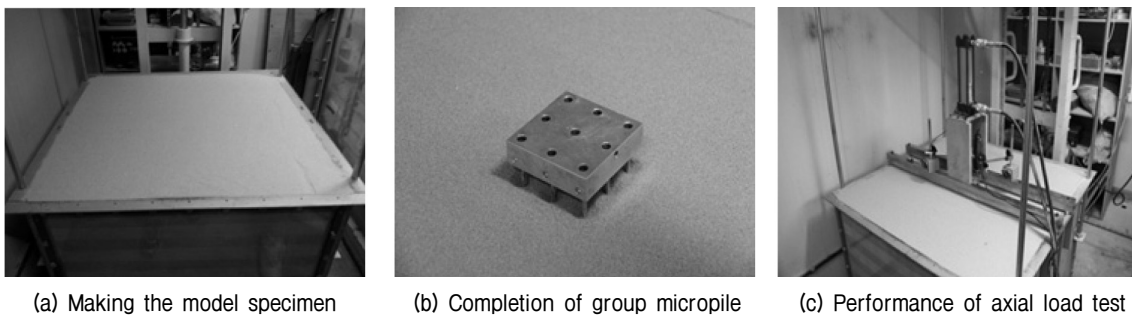


Fig. 5. Procedure for setting the group micropile

의 하중 및 변위를 측정하도록 하였다.

무리 마이크로파일(GP)과 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 하중재하시험은 지반이 조성된 후, 무리 마이크로파일을 설치하고 유압실린더를 통하여 하중을 재하였다. 무리 마이크로파일의 설치는 Fig. 5와 같이 진행되었다. 무리 마이크로파일의 설치는 지반이 조성된 이후, 보조프레임을 설치하여 전면기초의 위치를 고정하고 각각의 위치에 마이크로파일을 설치하여 마이크로파일 설치시 발생할 수 있는 주변지반의 교란을 최소화 하도록 하였다. 무리 마이크로파일이 설치된 이후에는 보조프레임을 제거하고 재하장치를 설치하여 하중재하를 준비하도록 하였다. 하중의 재하는 전면기초(Mat)와 동일한 방법으로 하중을 재하하였으며, 동일한 위치에 설치된 로드셀(Load cell)과 LVDT를 통하여 재하되는 하중과 발생하는 변위가 측정되었다. 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 재하시험은 무리 마이크로파일(GP)의 하중재하시험이 끝난 이후 하중을 제거하고 일정시간이 지난 후에 하중을 재하하는 방법을 통하여 시험이 진행되었다. 각각의 시험의 하중은 0.2kN의

단위로 증가시키도록 하였으며, 각 하중단계에서 변위가 더 이상 발생하지 않을 때의 하중 및 변위를 측정하도록 하였다.

4. 시험결과분석

4.1 하중-변위곡선

Fig. 6은 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일(GP)의 하중-변위곡선을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이, 전면기초(Mat)의 하중-변위곡선은 일정한 기울기로 증가하다가 최대하중이 발생한 이후에 하중이 일정부분 감소되어 유지되는 것으로 나타났으며, 최대하중은 기초의 폭의 10%의 침하수준에서 발생하여 이때의 하중을 전면기초(Mat)의 극한지지력으로 간주할 수 있는 것으로 확인되었다. 반면, 무리 마이크로파일(GP)의 하중-변위곡선은 Fig. 6(b), (c), (d)에 나타난 바와 같이, 파일이 연직으로 설치되었을 때 특정한 하중에서 항복이 발생하나, 경사로 설치되었을 경우에는 설

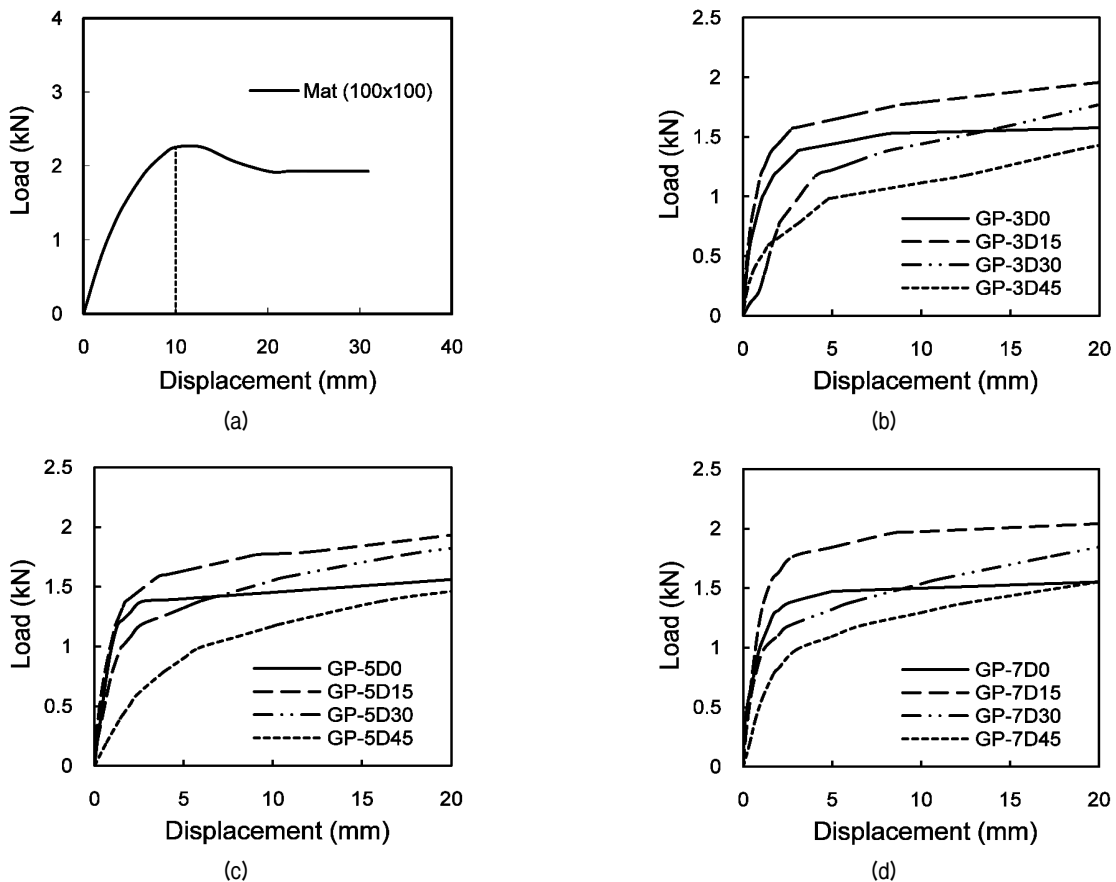


Fig. 6. Load-displacement curves for mat foundation and group micropile

치각도가 클수록 하중에 따른 발생변위가 증가하며, 특정한 하중에서 기울기가 변화되어 일정하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 마이크로파일의 설치간격이 커짐에 따라 무리 마이크로파일의 하중지지능력은 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 무리 마이크로파일지지 전면기초(Micropiled raft : MPR)의 하중-변위곡선을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 연직설치조건과 경사설치조건

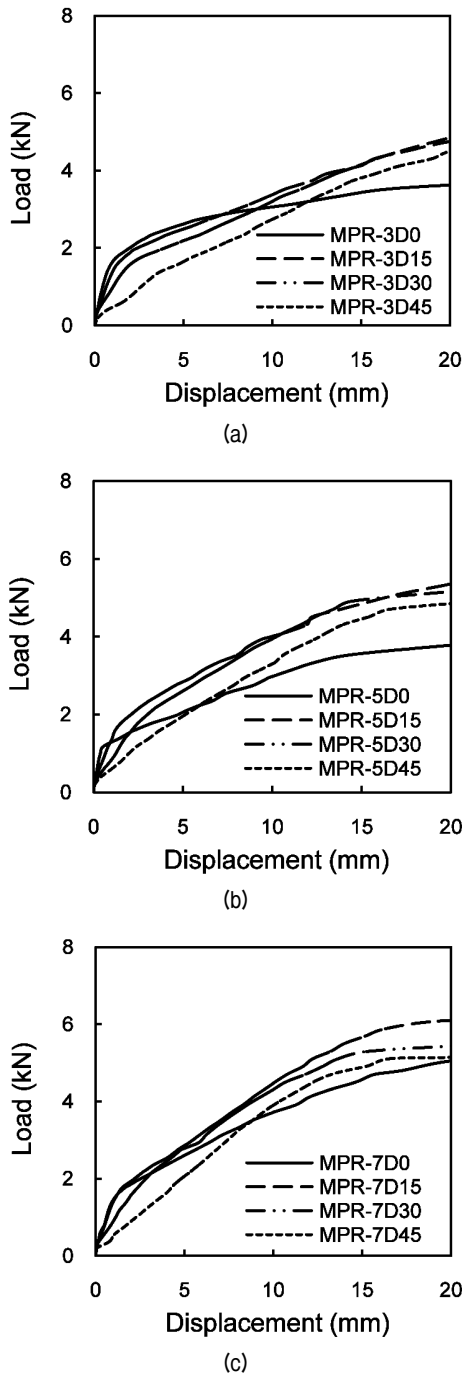


Fig. 7. Load-displacement curves for micropiled-raft

모두 일정한 하중에서 항복이 발생하는 뚜렷한 변화는 없는 것으로 나타났다. 그러나 침하에 따른 지지력의 변화가 마이크로파일이 연직으로 설치되었을 때, 경사로 설치된 경우에 비하여 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 침하에 따라 지지력의 특성이 달라지게 되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일(GP), 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지특성 규명하기 위하여, 동일한 침하수준에서 측정되는 지지력을 비교하도록 하였다. 침하수준의 선정은 하중변위 곡선의 초기, 중간, 후반부의 지지력의 변화를 확인하기 위하여, 기초의 침하량이 전면기초(Mat) 폭의 2%, 5%, 10%에 도달하였을 경우의 지지력을 기준으로 비교하도록 하였으며, 전면기초(Mat)의 극한지지력이 기초 폭의 10%수준에서 명확히 나타남에 따라, 이때의 침하량을 기준으로 각각의 기초의 극한지지력을 산정하여 비교하도록 하였다.

4.2 설치조건 및 침하수준에 따른 지지특성 분석

Fig. 8은 무리 마이크로파일(GP) 및 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 설치조건 및 침하수준에 따른 지지력변화를 나타낸 그림으로 Fig. 8(a)와 (b)는 무리 마이크로파일(GP)의 지지력변화를 나타내고, Fig. 8(c)와 (d)는 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지력변화를 나타낸 그림이다.

무리 마이크로파일(GP)의 지지력은 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이, 침하수준 2%에서 5%까지 모든 설치조건에서 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 침하수준 5% 이후에서는 연직으로 설치된 무리 마이크로파일이 극한상태에 도달하여 지지력의 증가가 발생되지 못하였고, 이에 따라 10%의 침하수준에 도달하였을 때에는 연직설치시 발생하는 지지력과 30도 조건에서 발생하는 지지력이 유사하게 측정되는 것으로 나타났다. 반면, 설치각도에 따른 지지력의 변화는 침하수준에 상관없이 설치각도 15도에서 최대가 되는 것으로 나타났으며, 마이크로파일의 설치간격이 커짐에 따라 무리 마이크로파일의 하중지지능력은 소폭 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8(b)).

무리 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지력은 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이,

침하가 증가함에 따라 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 침하에 따른 지지력의 변화는 경사로 설치된 마이크로파일에 비해서 연직으로 설치된 마이크로파일이 상대적으로 작은 것으로 나타났으며, 전면기초(Mat) 폭의 10%의 침하수준에 도달하였을 때의 연직설치시 발생하는 지지력과 45도 조건에서 발생하는 지지력이 유사한 것으로 나타났다. 또한, 15도와 30도의 경사조건으로 설치된 마이크로파일 지지 전면기초(MPR)가 다른 조건의 기초에 비하여 큰 지지력이 발생하는 것으로 나타났으며, 설치각도에 따른 지지력의 변화특성이 무리 마이크로파일(GP)에 비하여 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

이러한 지지력의 변화특성은 마이크로파일 기초의 구성요소 중 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일(GP) 그리고 인접한 마이크로파일 사이에 발생하는 상호작용과 그에 따른 저항력 발휘 특성에 기인한 것으로 판단된다. 무리 마이크로파일 지지 전면기초(MPR)은 침하가 발생됨에 따라, 상부 전면기초(Mat)의 상재압 작용에 의한 하부지반의 구속압 증가효과가 발생되며, 이는 무리 마이크로파일의 주면마찰력 증가와 그에 따른 전반적인 지지력 증가효과로 나타나게 된다. 이러한 지지력 증

가효과는 전면기초(Mat)와 마이크로파일로 인하여 구속되는 지반의 범위에 따라 변화되며, 지반구속 효과의 범위는 마이크로파일의 설치간격과 설치각도에 따라 다양하게 변화될 수 있다. 반면, 인접한 마이크로파일 사이에서는 파일의 저항력을 결정하는 영향범위 중첩 효과로 인하여 무리 마이크로파일 설치시 저항력이 감소하는 감소효과가 발생된다. 실험결과에 따르면, 마이크로파일 지지 전면기초의 지반구속에 따른 지지력의 증가는 마이크로파일의 설치각도 15도와 30도 근방에서 최대가 되는 것으로 판단되며, 파일의 영향범위 중첩으로 인한 감소효과는 파일사이의 간격과 파일의 각도가 증가함에 따라 감소되는 것으로 판단된다.

반면, 파일의 설치간격에 따른 기초의 지지력 변화특성이 마이크로파일 지지 전면기초(MPR)에서 큰 변화가 있는 것으로 나타났으며, 기초의 지지력은 파일의 간격이 클수록 증가되는 것으로 나타났다. 이는 인접한 마이크로파일 사이에 영향범위의 중첩으로 발생하는 지지력의 감소효과의 영향이 상부의 전면기초(Mat)와 하부의 무리마이크로파일 사이의 지반구속에 의한 효과와 함께 작용하며, 마이크로파일 지지 전면기초(MPR)의 지지력변화에 비교적 크게 작용하기 때문인 것으로 판단

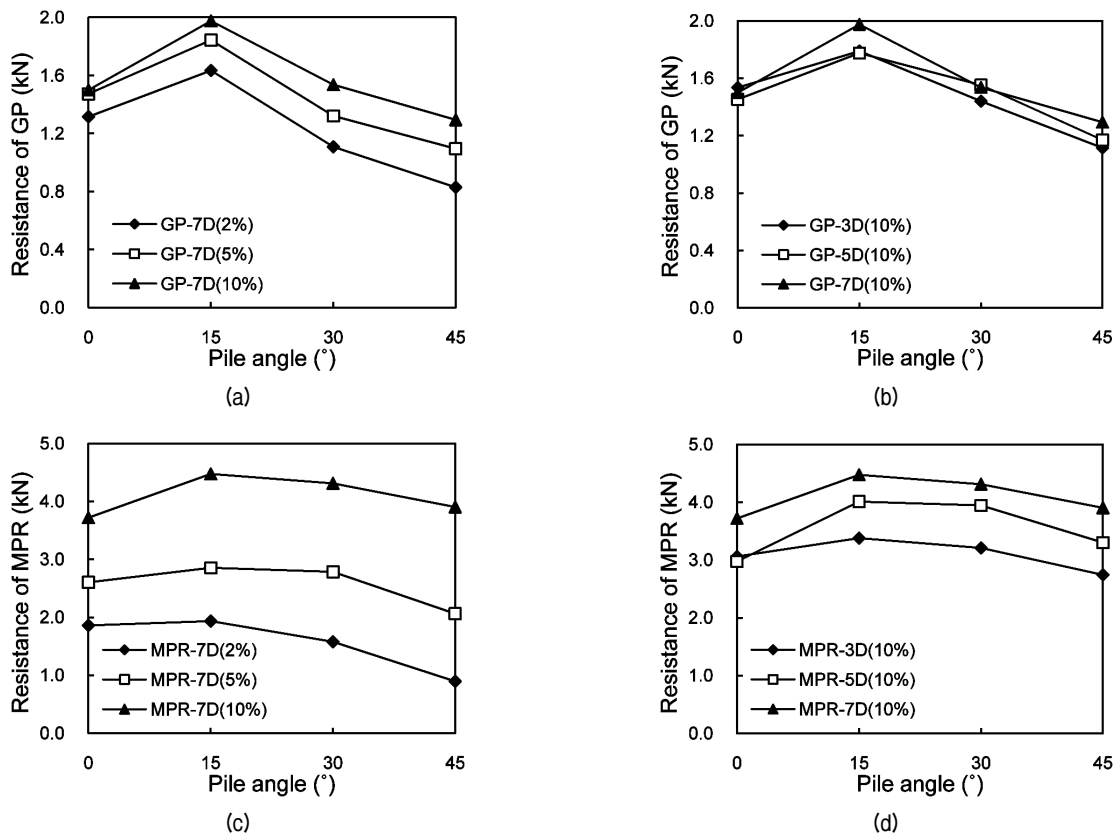


Fig. 8. Resistances of Group micro-piles and Micropiled-raft

된다(Fig. 8(d)).

4.3 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과 및 침하억제효과

Fig. 9는 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과 및 침하억제효과를 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)는 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과를 나타낸 그림으로, 마이크로파일지지 전면기초의 지지력(Q_{MPR})을 전면기초의 지지력(Q_{Mat})과 무리 마이크로파일의 지지력(Q_{GP})의 합으로 나누어준 결과를 통하여 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과를 나타내었으며, 각각의 지지력은 전면기초(Mat) 폭의 10% 침하수준에서 측정되었다. Fig. 9(a)에서 나타난 바와 같이, 말뚝간격 3D에서의 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과는 전면기초의 지지력(Q_{Mat})과 무리 마이크로파일의 지지력(Q_{GP})의 합으로 나타났으며, 5D 이상에서는 100%이상의 지지효과가 발생되고, 7D 이상에서는 약 110%내외의 지지효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 9(b)는 마이크로파일지지 전면기초(MPR) 설치시 발생하는 침하억제효과를 나타낸 그림이다. 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 침하량(S_{MPR})은 전면기초(S_{Mat})의 극한하중을 재하하였을 때 발생하는 침하량을 기준으로 산정되었으며, 산정된 침하량을 전면기초(Mat)의 극한하중발생시 측정된 침하량(S_{Mat})으로 나누어 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 침하억제효과를 나타내도록 하였다. 그림에서나 나타난 바와 같이 마이

로파일지지 전면기초(MPR) 설치시 발생하는 침하억제효과는 말뚝간의 간격이 증가할수록 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, 전면기초(Mat)의 침하량 대비 20% (말뚝간격 3D, 45도)~70% (말뚝간격 7D, 15도)의 침하억제효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로파일 기초의 설치조건에 따른 지지력 증가효과와 침하 억제효과를 파악하기 위하여 전면기초(Mat)와 무리 마이크로파일 기초(GP), 마이크로파일을 이용한 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 하중재하시험을 수행하였으며, 그 수행결과를 다음과 같다.

- (1) 전면기초(Mat)의 하중-변위곡선은 일정한 기울기로 증가하다가 최대하중이 발생한 이후에 하중이 일정 부분 감소되어 유지되며, 최대하중은 기초 크기의 10%의 침하수준에서 발생한다.
- (2) 무리 마이크로파일(GP)의 하중-변위곡선은 침하수준에 따라 지지력의 특성이 변화하며, 이는 연직으로 설치된 파일이 특정한 하중에서 항복이 발생하는 것에서 기인한다. 또한, 무리 마이크로파일(GP)의 저항하중의 크기는 설치각도에 따른 변화가 설치간격에 따른 변화보다 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 하중-변위곡선은 침하수준에 따라 지지력의 특성이 변화하며, 이는 연직으로 설치된 경우의 침하에 따른 변화가 경사설치된 경우에 비하여 크기 때문이다. 또한, 마이

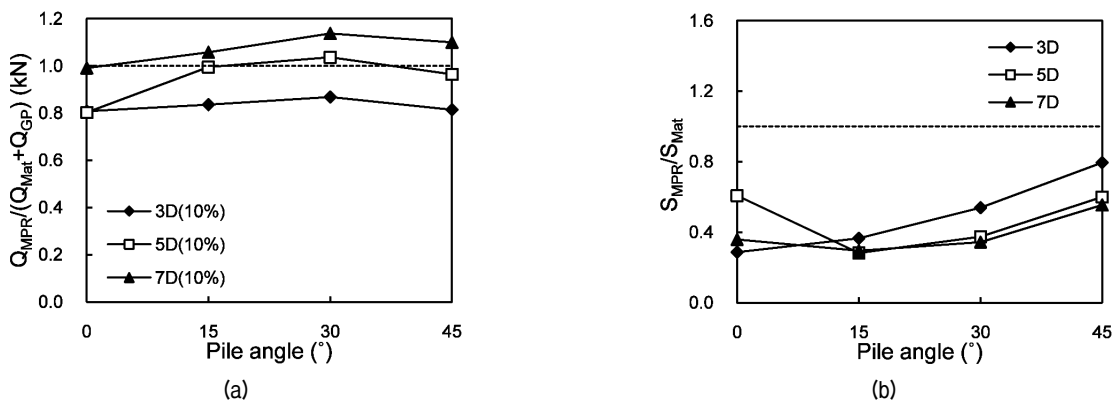


Fig. 9. The effect of micropiled-raft foundation

크로파일지지 전면기초(MPR)의 저항하중의 크기는 설치간격에 따른 변화와 설치각도에 따른 변화에 따라 크게 발생하는 것으로 나타났다.

- (4) 무리 마이크로파일(GP)의 지지력은 침하가 증가됨에 따라 모든 설치조건에서 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 연직으로 설치된 경우, 침하수준 5% 이후에서는 지지력의 증가가 발생하지 않았고, 이에 따라 10%의 침하수준에 도달하였을 때에는 연직 설치시 발생하는 지지력과 30도 조건에서 발생하는 지지력은 유사하게 측정되는 것으로 나타났다. 반면, 설치각도에 따른 지지력의 변화는 침하수준에 상관없이 설치각도 15도에서 최대가 되는 것으로 나타났으며, 설치간격에 따라서는 파일의 간격이 증가함에 따라 지지력이 소폭 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지력은 침하가 증가함에 따라 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 침하에 따른 지지력의 변화는 경사로 설치된 마이크로파일에 비해서 연직으로 설치된 마이크로파일이 상대적으로 작은 것으로 나타났으며, 전면기초(Mat)의 10%의 침하수준에 도달하였을 때의 연직설치시 발생하는 지지력과 45도 조건에서 발생하는 지지력은 유사한 것으로 나타났다. 또한, 15도와 30도의 경사조건으로 설치된 마이크로파일지지 전면기초가 다른 조건의 기초에 비하여 큰 지지력이 발생하는 것으로 나타났으며, 설치각도에 따른 지지력의 변화특성이 무리 마이크로파일(GP)에 비하여 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 반면, 기초의 지지력은 파일의 간격이 클수록 증가하는 것으로 나타났다.
- (6) 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과는 말뚝간격 3D에서 전면기초의 지지력(Q_{Mat})과 무리 마이크로파일의 지지력(Q_{GP})의 합이 80%정도로 나타난 것으로 나타났다. 그러나, 말뚝의 간격이 증가함에 따라 마이크로파일지지 전면기초(MPR)의 지지효과가 증가하는 것으로 나타났으며, 5D 이상에서는 100%이상의 지지효과가 발생하며, 7D 이상에서는 약 110%내외의 지지효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.
- (7) 마이크로파일지지 전면기초(MPR) 설치시 발생하는 침하억제효과는 말뚝간의 간격이 증가할수록 크게

나타났으며, 전면기초(Mat)의 침하량 대비 20%(말뚝간격 3D, 45도)~70%(말뚝간격 7D, 15도)의 침하억제효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 “마이크로파일을 이용한 송전철탑 기초형식개발”의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM (2006), “Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table”, American Society for Testing and Materials, ASTM D4253-00(2006).
2. ASTM (2006), “Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density”, American Society for Testing and Materials, ASTM D4254-00(2006).
3. FHWA (2005), “Micropile Design and Construction Reference Manual”, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA NHI-05-039.
4. Kim, W.C., Cho, C. H., and Lee, J.H. (2002), “Micropile - Concept and classification of micropile”, Korean Geo-Environmental Society, Technical article : Geo-environmental, Vol.3, No.4, pp.24-79.
5. Kim, W.C, Cho, C. H., and Lee, J. H. (2003), “Design of micropile”, Korean Geo-Environmental Society, Technical article : Geo-environmental, Vol.3, No.4, pp.72-79.
6. Lee, T. H. and Im, J. C. (2006), “An Experimental Study on the Reinforcement Effect of Installed Micropiles in the Surround of Footing on Dense Sand”, J. of the Korean Geotechnical Society, Vol.22, No.5, pp.69-81.
7. Lee, W. T. (1991), “A Study on reinforcing effect of reticulated root piles on shallow footing”, a doctor's thesis, Seoul National Univ.
8. Lizzi, F. and Carnevale, G. (1979), “Les Reseaux de Pieux Racines Pour la Consolidation des sols, Aspects Theoretique et Essais sur Mondile”, Proc. Int. Conf., Soil Reinforcement, Paris, Vol.2, pp. 317-324.
9. O'Neill, M.W. and Hassan, K.M. (1994), “Drilled Shafts: Effects of Construction on Performance and Design Criteria”, Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, December 1994, Vol.1, pp.137-187.
10. Turner (1995), “Mike Turner Design Guides for Micropiles”, personal communication.
11. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., and You, G.L. (2006), “Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles”, Soils and Foundations, Vol.46, No.3, pp.367-376.

Received : August 30th, 2013

Revised : October 25th, 2013

Accepted : December 20th, 2013