

사질토지반에서 그룹 마이크로파일의 설치조건에 따른 인발거동특성

Uplift Behavior of Group Micropile according to Embedded Pile Condition in Sand

경 두 현¹ Kyung, Doo-Hyun

김 가 램² Kim, Ga-Ram

박 대 성² Park, Dae-Sung

김 대 홍³ Kim, Dae-Hong

이 준 환⁴ Lee, Jun-Hwan

Abstract

The micropile is small diameter pile foundation of which diameter is below 300 mm. This system has been applied to reinforce the foundation structure. In the present study, the effects of embedded conditions of group micropiles were investigated from a series of uplift load tests. For the study, uplift load tests were performed using group micropiles in various pile spacing and installation angle. The increase of uplift resistance and the reduction of uplift displacement were investigated in the tests. As the result, the resistances were principally changed by embedded pile angle, the resistance increase were 33%, 59% and 5% for 15°, 30° and 45° of embedded pile angle. The uplift displacement reduction increases with lower pile spacing condition and the reduction ratios of uplift displacements in the same spacing condition were 50%, 53%, -45% for 15°, 30° and 45° of embedded pile angle.

요 지

마이크로파일은 직경 300mm 이하의 소규모 말뚝기초형식으로, 기초구조물의 보강을 위해 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 일련의 인발재하시험을 통하여 그룹 마이크로파일의 설치조건에 대한 영향을 조사하였다. 본 연구를 위하여, 다양한 설치간격과 설치각도로 설치된 그룹 마이크로파일을 이용한 인발재하시험을 수행하였으며, 실험결과를 통해 인발지지력 증가특성과 인발변위 감소특성을 조사하였다. 인발저항력은 주로 마이크로파일의 설치각도에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 인발저항력의 증가는 설치각도 15도, 30도, 45도에서 각각 33%, 59%, 5%가 증가되는 것으로 나타났다. 설치간격에 따른 인발변위의 감소량은 더 좁은 설치간격조건에서 크게 나타났으며, 동일한 설치간격조건에서의 설치각도에 따른 인발변위 저감율은 설치각도 15도, 30도, 45도에서 각각 50%, 53%, -45%가 되는 것으로 나타났다.

Keywords : Micropile, Group micropile, Uplift load, Laboratory test, Sand

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

2 비회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, KEPRI/KEPCO)

4 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 정교수 (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 2015년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 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 이탈리아에서 개발된 이후 널리 사용되고 있는 직경 300mm 이하의 소규모의 말뚝 기초형식으로 소규모의 천공장비를 통하여 말뚝을 형성하여 협소한 시공공간을 갖는 도심지나 산악지형에서 효과적으로 시공할 수 있는 공법이다. 마이크로파일 기초는 설계적 측면에 따라 Case 1과 Case 2로 구분되며, 시공적 측면에 따라 Type A~Type D로 구분된다. 개별 마이크로파일의 설계는 마이크로파일의 정착장의 길이와 지반의 종류 및 시공방법에 따른 지반의 부착강도에 의하여 설계된다. 반면, 그룹으로 작용하는 마이크로파일의 설계는 파일과 지반이 형성하는 폐합된 블록의 형상과 설치된 마이크로파일의 조건에 따라 설계되며, 시공되는 지반의 종류에 따라 폐합된 지반의 블록 형상이 다르게 적용되고 있다(FHWA, 2005).

일반적으로 마이크로파일의 연직 및 수평거동특성은 지반의 종류 및 강도와 같은 지반조건과 보강재의 형상과 설치각도, 그라우트재의 강도와 주입압력, 케이싱의 사용유무와 같은 시공조건에 따라 달라지는 것으로 알려져있다(Sabatini et al., 1999). 특히, 그룹으로 시공되는 마이크로파일의 경우 말뚝의 길이, 설치 간격, 설치 각도, 말뚝의 배치조건 등의 다양한 조건에 따라 지지력이 상이하게 발휘될 수 있으며, 이러한 설치조건에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다(Lizzi and Carnevale, 1979; Lee, 1991; Tsukata et al., 2006). 그러나 대부분의 마이크로파일의 연구는 마이크로파일이 기존의 기초의 보강기초로 사용되어, 기초의 지지력을 증대시키는 언더파닝 공법으로 사용되는 시공적 특성으로 인하여, 기초의 압축특성을 규명하는 연구가 주로 수행되어 왔으며, 인발력이 작용되는 마이크로파일에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 이에 따라, 최근 인발력이 주요하중으로 작용하는 송전철탐 기초로 마이크로파일을 이용하기위한 연구 및 압축 및 인발력의 거동적 특성을 규명하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있는 실정이다(KEPCO, 2014; Han and Ye, 2006).

일반적인 마이크로파일의 설계에서는 직경이 작은 마이크로파일의 형상적 특징으로 인하여, 파일의 선단 지지력이 무시되어 설계되며, 마이크로파일의 압축지지력과 인발지지력을 유사하게 취급하고 있다(FHWA, 2005; Kim et al., 2003). 그러나, 이러한 조건은 마이크로파일이 단독으로 연직 설치되었을 때 성립되며, 마이크로파

일이 그룹으로 설치되어 설치각도 및 설치간격과 같은 설치조건이 상이할 경우에는 마이크로파일과 마이크로파일, 그리고 파일캡사이에 발생하는 그룹효과가 하중의 방향에 따라 상이하게 작용되므로 성립되기 어렵다. 본 연구에서는 인발력이 작용하는 마이크로파일 기초의 설치조건에 따른 지지력 변화와 변위량의 변화를 규명하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 다양한 설치각도와 설치간격을 갖는 그룹 마이크로파일을 조성하고 인발재하시험을 수행하였다. 본 연구를 위한 마이크로파일 기초의 설치조건은 기존의 문헌과 설계사례를 고려하여 설치간격을 3D, 5D, 7D(D=마이크로파일의 직경)로 선정하였고, 설치각도를 연직방향으로부터 0도, 15도, 30도, 45도가 되도록 고려하였으며, 그 마이크로파일의 설치각도 및 설치간격에 따른 지지력증가 특성과 변위량 감소특성을 분석하여 인발력이 작용하는 마이크로파일기초의 최적의 설치조건을 제안하였다.

2. 마이크로파일

2.1 마이크로파일의 정의 및 종류

마이크로파일은 1950년대 Lizzi에 의하여 개발된 소규모 말뚝기초형식으로, 소규모 장비를 이용하여 300mm 이하의 직경의 말뚝을 형성하는 기초공법이다. 마이크로파일의 시공은 지반의 천공, 강봉 조립 및 설치, 그라우팅의 일련의 과정으로 수행되며, 기존 구조물의 지지력 증가 또는 침하억제를 목적으로 주로 사용되어왔다. 또한, 마이크로파일은 기계의 소형화, 저진동, 저소음 시공이 가능한 장점이 있어 환경문제를 야기하는 기존 항타장비나 대형 굴착장비로 시공할 수 없는 도심지의 협소한 공간에서 사용이 용이하다. 이러한 장점으로 인하여 최근에는 지반보강, 사면굴착의 안정화, 흙막이 옹벽의 안정화, 근접시공시 부등침하억제, 도심지 터널 굴착시 주변지반의 변형억제, 구조물 신축이나 증축시 지반의 지지력강화, 지반 및 교량기초 내진성능 향상 등의 목적으로 그 적용범위가 점차 확대되고 있다(Lee and Im, 2006).

마이크로파일은 설계적인 측면과 시공적인 측면에 따라 구분될 수 있다(FHWA, 2005). Fig. 1은 설계적인 측면에 따라 구분되는 마이크로파일을 나타내는 그림이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 마이크로파일은 설계적인 측면에 따라 Case 1과 Case 2로 구분된다. Case 1

은 마이크로파일이 구조물과 연결되어 직접적으로 하중을 견디는 경우로서, 말뚝기초와 같이 상부에 작용하는 하중을 보다 깊고 안정적인 지반층으로 전달하여 압축 및 인발, 수평력에 말뚝이 직접적으로 저항하는 경우를 나타낸다. 반면, Case 2는 마이크로파일을 이용하여 지반을 보강하여 지반과 말뚝의 복합체를 형성하는 경우로서, 지반을 그물식으로 에워싸듯이 보강하여 말뚝 개개가 아닌 보강된 지반전체에 하중이 전달되는 것으로 간주하여 설계하는 방법이다(FHWA, 2005; Kim et al., 2002).

마이크로파일의 시공적인 측면에 따른 분류는 마이크로파일을 형성하는 그라우팅 방법에 따라 Type A~D로 구분된다. Type A는 마이크로파일의 그라우팅을 중력식으로 시공하는 경우를 나타내며, Type B는 마이크로파일의 그라우팅을 가압식으로 하는 경우를 나타낸다. 반면, Type C와 Type D는 1차로 그라우팅을 실시한 이후에 더 큰 가압을 통하여 2차 그라우팅을 실시하는 방법으로, 2차 그라우팅을 실시하는 시점과 그라우팅의 압력범위에 따라 Type C와 Type D로 구분된다(FHWA, 2005).

2.2 그룹 마이크로파일의 인발설계

송전철탑 기초구조물은 압축력과 수평력과 함께 인발력이 주요한 하중으로 작용한다(Kyung et al., 2011; Kyung et al., 2012a; Kyung et al., 2012b; Choi et al., 2013; Kyung et al., 2013). 또한, 마이크로파일이 지하수위가 높은 해안가에 인접하여 설치될 경우, 해수 지하수에 의한 높은 양압력에 저항할 수 있도록 인발말뚝으로 설계 및 시공되어야 하며, 팽창성 지반에 설치된 구조물의 용기에 저항하기 위한 인발말뚝으로 마이크로파일을 설치하기도 한다(Hong et al., 2012).

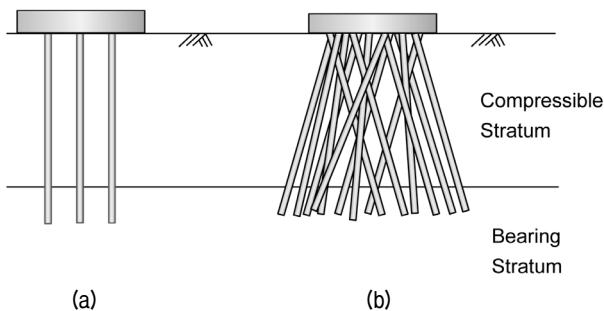


Fig. 1. Design application classification: (a) case 1 and (b) case 2

인발력을 받는 마이크로파일의 지지력을 산정하는 방법으로는 개별 마이크로파일의 지지력을 산정하는 방법과 말뚝사이의 블록효과를 고려하여 그룹 마이크로파일의 지지력을 산정하는 방법으로 나눌 수 있다. 개별 마이크로파일의 지지력은 하중에 저항하는 정착장의 길이와 그라우트와 지반사이에 발생하는 부착강도에 의해 결정된다(FHWA, 2005). 그라우트와 지반사이의 부착강도(α_{bond})는 마이크로파일이 설치되는 지반의 종류와 마이크로파일의 시공방법(Type A~D)에 따라 다른 값을 제안하고 있으며, 작용하는 하중에 따라 정착장의 길이(L_b)를 산정하여 지지력을 결정한다.

$$Q_{up} = \alpha_{bond} \cdot \pi \cdot D_b \cdot L_b \quad (1)$$

여기서, Q_{up} = 마이크로파일의 극한지지력, α_{bond} = 그라우트와 지반사이의 극한부착강도, D_b = 천공홀의 직경, L_b = 정착장의 길이이다.

반면, 블록효과를 고려하여 그룹 마이크로파일의 인발력을 산정하는 방법은 점토지반에서의 설계와 사질토지반의 설계로 구분되어 제안된다(FHWA, 2005). 점토지반에서의 그룹 마이크로파일의 인발지지력은 비배수 전단강도(s_u)와 기초와 그룹마이크로파일에 의해 생성되는 블록의 크기, 그리고 파일구조체의 유효중량에 의해 결정되며 그 식은 다음과 같다.

$$Q_{upg} = 2 \cdot L_{MP} \cdot (B_g + L_g) \cdot \bar{s}_u + W_g \quad (1)$$

여기서, Q_{upg} = 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력, \bar{s}_u = 마이크로파일이 근입된 점토지반의 평균 비배수 전단강도, L_{MP} = 마이크로파일의 근입깊이, B_g = 그룹 마이크로파일의 말뚝끝단에서 끝단까지의 너비, L_g = 그룹 마이크로파일의 말뚝 끝단에서 끝단까지의 길이, W_g = 그룹마이크로파일을 포함한 파일 및 지반이 이루는 블록의 유효무게이다(Fig. 2(a)). 또한, 점토지반에 설치된 그룹 마이크로파일의 허용인발지지력은 안전율 2.0을 적용하여 산정할 수 있다.

사질토 지반에서의 그룹 마이크로파일의 인발지지력은 가로와 수직 1:4의 비율로 형성되는 지반블록의 유효무게에 의해 결정되며, 그 식은 다음과 같다.

$$Q_{upg} = \left[\frac{1}{3} \cdot (A_{base} + A_{top} + \sqrt{A_{base} \cdot A_{top}}) \cdot L_{MP} \right] \cdot \gamma \quad (2)$$

여기서, $A_{base} = B_g \cdot L_g$ 이고, $A_{top} = (B_g + L_{MP}/2) \cdot (L_g + L_{MP}/2)$ 이며, γ = 마이크로파일의 설치된 지반의 유효단위중량이다[Fig. 2(b)]. 또한, 사질토지반에 설치된 그룹 마이크로파일의 허용인발지지력은 안전율 1.0을 적용하여 산정할 수 있다.

그러나 마이크로파일의 인발지지력을 산정하는 식에서는 마이크로파일의 설치각도 및 설치간격과 같은 설치조건에 따른 지지력의 변화를 고려할 수 없다. 이에 따라, 본 연구에서는 사질토 지반에 설치된 그룹 마이크로파일의 인발지지력을 모형실험을 통해 실험적으로 규명하고자 하였으며, 이를 위해 다양한 조건의 설치간격 및 설치각도에 대한 인발재하시험을 수행하고 결과를 분석하였다.

3. 그룹 마이크로파일의 인발재하시험

3.1 시험 개요

본 연구에서는 3×3으로 배치된 그룹 마이크로파일(GP)의 인발재하시험을 수행하여 마이크로파일의 설치간격과 설치각도를 함께 고려한 지지력변화 특성 및 변위저감특성을 도출하고자 한다. 그룹 마이크로파일의 인발재하시험은 가로 및 세로 폭이 각각 1000mm, 높이가 700mm인 사각형의 토조에서 수행되었다. 본 실험에서 사용된 토조는 작용하는 하중에 대하여 충분한 강성을 갖도록 두께 10mm의 강판으로 구성되었으며, 지반

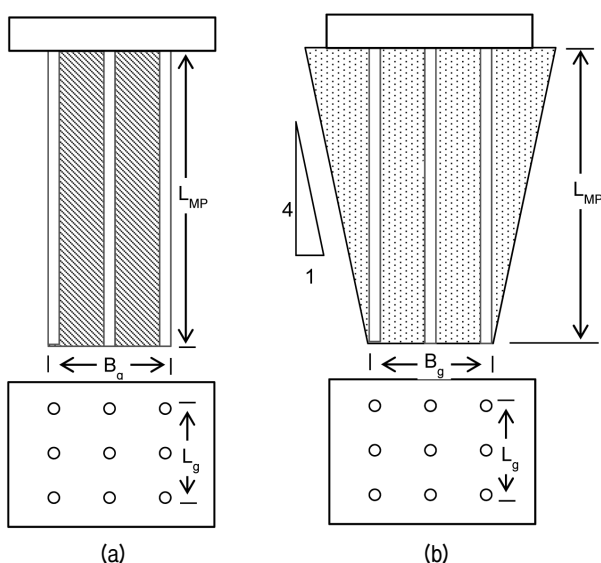


Fig. 2. Model to calculate micropile group uplift capacity: (a) clay and (b) sand

의 조성상태를 확인하기 위하여 전면에 아크릴판을 설치하여 지반의 조성상태를 확인하도록 하였다.

Fig. 3은 본 시험에서 사용된 재하시험의 상세모형을 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 그룹 마이크로파일의 인발재하시험은 사각형의 말뚝캡(Cap)에 9본의 모형말뚝을 3×3으로 배치시켜 수행되었다. 재하시험에 사용된 모형 마이크로파일은 직경(D) 5mm로 일반적인 마이크로파일의 직경 200mm의 1/40에 해당되며, 모형 마이크로파일의 길이는 340mm로, 사용된 강봉의 상단부 10mm가 말뚝캡(Cap)에 체결되고, 지표면으로부터 20mm 위에 설치된다. 따라서, 본 연구에서 설치된 마이크로파일의 최대근입길이는 310mm로, 마이크로파일의 직경의 62배이며, 이는 선행된 연구에서 주로 사용된 마이크로파일의 직경 및 길이비의 범위 50D~80D에 해당된다(Lizzi and Carnevele, 1979; You et al., 2003; Tsukada et al., 2006; Roh et al., 2007; Lee and Im, 2006; Gholamreza and Reza, 2011).

그룹 마이크로파일의 설치하는 마이크로파일의 간격(S)과 마이크로파일의 설치각도(θ)를 변화시켜 수행되었다. 그룹 마이크로파일의 설치간격(S)은 마이크로파일의 최소간격 3D와 기존의 압축하중을 받는 마이크로파일에 대한 설치간격조건 1D~8D를 고려하여, 파일 직경의 3배(3D), 5배(5D), 7배(7D)로 구분하여 설치되었다(FHWA, 2005; Lizzi and Carnevele, 1979; You et al., 2003; Han and Ye, 2006; Tsukada et al. 2006). 반면, 마이크로파일의 설치각도는 수평하중을 받는 마이크로파일 설계시 고려하는 설치각도 변화의 범위 70도와 60도까지 설치각도를 변화시킨 기존의 연구결과를 참고하여, 지표면에 수직으로 설치된 경우로부터 0도, 15도, 30도, 45도로 구분하여 설치되었다(FHWA, 2005; Bassett and Last, 1978; You et al., 2003; Tsukada et al., 2006). 또한 본 실험에서 사용된 마이크로파일의 표면은 구사토를 피복하여 파일의 거칠기를 증가시켜 일반적인 강관파일에 비하여 부착력이 높은 마이크로파일을 모사하고자 하였다(Lee and Im, 2006; Tsukada et al., 2006). 본 연구에서 수행된 재하시험의 종류 및 명칭은 Table 1과 같다.

Fig. 3(c)와 (d)는 본 실험에서 사용된 마이크로파일의 설치방법을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 그룹 마이크로파일을 설치하기 위하여 고정프레임을 설치하였다. 고정프레임은 토조의 양 끝단에 연결되어 설치되었으며, 고정프레임 사이에 말

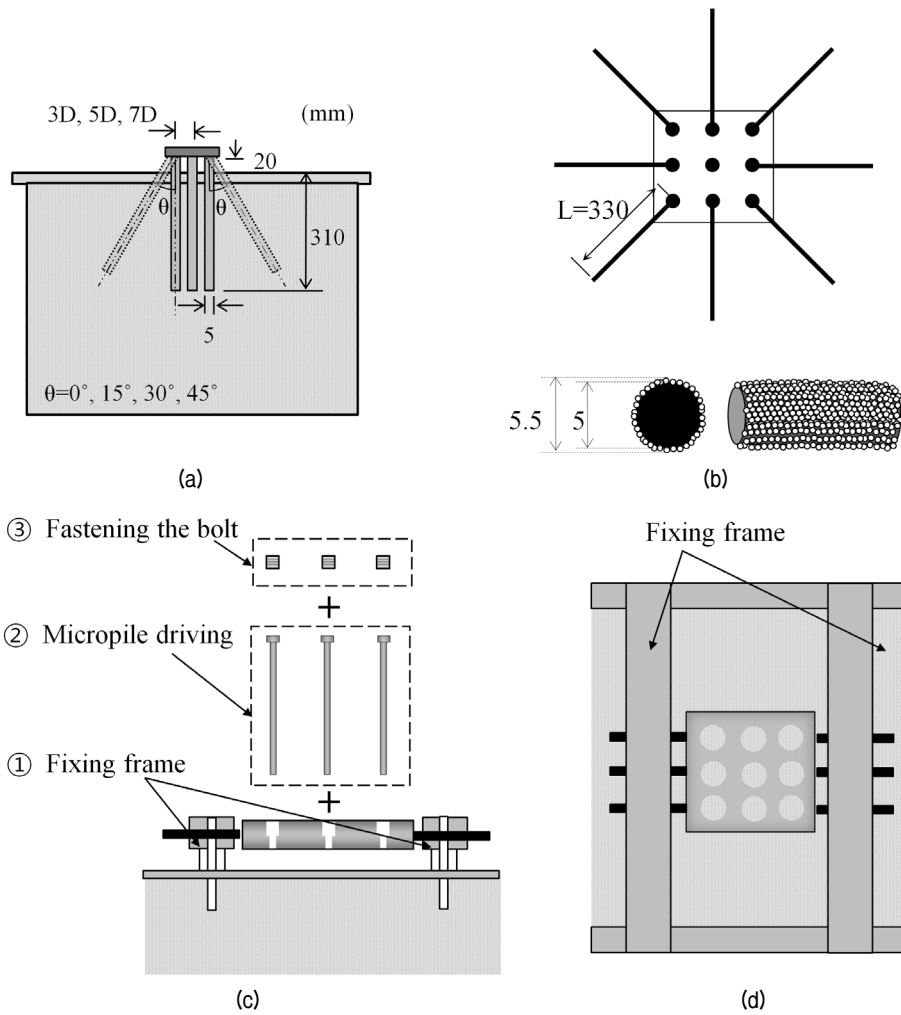


Fig. 3. Detailed description of group micropile models: (a) installation conditions for group micropiles, (b) top views of inclined group micropiles, (c) procedure of group micropile installation and (d) top view of the fixed the pile cap by the fixing frame

Table 1. Test conditions and test names for uplift load tests

Test conditions	Embedded depth (L, mm)	Pile spacing (S, mm)	Embedded angle (Deg)	Test name
Group micropile	310 L = 62D	15 S = 3D	0	U3D0
			15	U3D15
			30	U3D30
			45	U3D45
		25 S = 5D	0	U5D0
			15	U5D15
			30	U5D30
			45	U5D45
		35 S = 7D	0	U7D0
			15	U7D15
			30	U7D30
			45	U7D45

뚝캡(Cap)을 위치시키고 볼트를 이용하여 말뚝캡(Cap)을 고정시키도록 하였다. 이때의 말뚝캡(Cap)의 위치는 말뚝캡(Cap)의 하단이 지표면으로부터 20mm 위에 고

정되었으며, 이에 따라 설치된 그룹 마이크로파일의 근 입깊이는 최대 310mm(L=62D)가 되도록 하였다. 이후 마이크로파일은 각각의 설치위치에 천공된 말뚝캡(Cap)

의 경사구멍에 위치시키고 구멍의 경사를 따라 압입시켜 설치하였다. 말뚝캡(Cap)에 천공된 구멍은 설치간격과 설치각도에 따라 사전에 설계되어 천공되었으며, 말뚝이 모두 압입된 이후, 나사볼트를 체결하여 모든 마이크로파일의 두부가 말뚝캡(Cap)에 완전히 고정되도록 하였다. 마이크로파일이 모두 설치된 이후에는 하중재하장치 및 변위측정장치를 설치하고 고정프레임을 제거하였으며, 재하시험을 수행하도록 하였다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용된 하중재하장치와 실험전경을 나타낸 그림이다. 하중의 재하는 양방향 유압피스톤(Hydraulic cylinder)과 연결된 유압 잭(Jack)을 이용하여 인발하중을 재하하였으며, 유압피스톤과 기초 사이에 설치된 로드셀(Load cell)과 기초의 양 끝단에 설치된 LVDT를 통하여 재하되는 하중과 발생하는 변위가 측정되었다. 각각의 시험에서 하중의 재하는 0.2kN의 단위로 증가시키도록 하였다. 각 하중단계에서는 목표하중에 도달한 변위 발생에 따른 하중감소를 감안하여 목표하중이 유지되도록 조절하였다. 하중재하가 이루어지는 동안에는 모니터링을 통하여 시간에 따라 변화되는 하중 및 변위의 변화를 확인하였으며, 더 이상의 변위가 발생되지 않아 추가적인 하중을 가해줄 필요가 없을 경우의 하중 및 변위를 기록하도록 하였다.

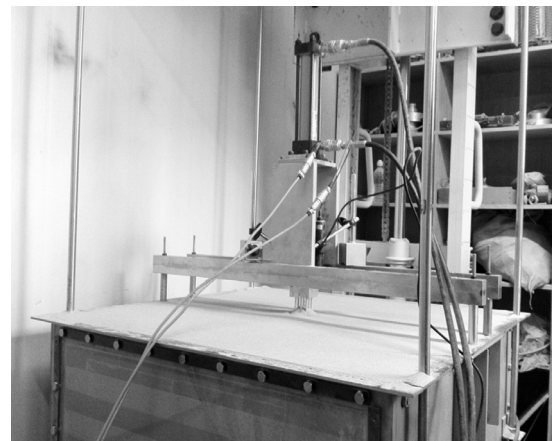
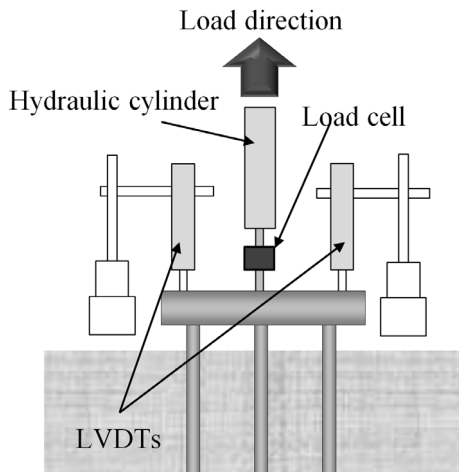


Fig. 4. Detailed description of uplift load test: (a) Load cell and LVDTs and (b) the whole view of uplift load test

Table 2. Physical properties of soil

e_{max}	e_{min}	G_s	D_{max}	D_{min}	C_u	C_c	γ_{max}	γ_{min}	USCS
0.924	0.597	2.61	0.850	0.075	1.73	0.97	16.28	13.31	SP

e_{max} = Max. void ratio, e_{min} = Min. void ration, G_s = Specific gravity, D_{max} = Max. Dia. (mm), D_{min} = Min. Dia (mm), C_u = Uniformity coefficient, C_c = Curvature coefficient, γ_{max} = Max. dry unit weight (kN/m^3), γ_{min} = Min. dry unit weight (kN/m^3), USCS = Unified Soil Classification System (ASTM D2487)

3.2 모형지반 조성

본 실험의 지반조성을 위한 모래는 주문진 표준사가 사용되었다. 본 연구에서는 사용된 모래의 역학적 특성을 파악하기 위하여 기본물성시험과 삼축압축시험을 수행하였다. 주문진 표준사의 기본물성시험으로는 체가름 시험과 비중시험, 진동대를 이용한 최대단위중량 측정 시험과 최소단위중량 측정시험이 수행되었으며(ASTM, 2006(a); ASTM, 2006(b)), 이에 대한 결과는 Table 2와 같다. 또한, 상대밀도에 따른 지반의 마찰각을 측정하기 위하여 구속압(σ_3) 100, 150, 200kPa, 상대밀도(D_R) 40, 80%에 대하여 구속압 50, 100, 150kPa의 조건에서의 삼축압축시험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 식 (3)과 같다.

$$\phi' = 0.174 \cdot D_R + 24.1 \quad (3)$$

여기서 ϕ' = 삼축압축시험을 이용한 측정마찰각($^\circ$), D_R = 상대밀도(%)이다.

본 연구를 위한 지반조성은 지반이 조성되는 토조와 강사장치를 통하여 조성되었다. 지반은 100mm씩 7층으로 나누어 조성되었으며, 일정한 상대밀도를 구현하기 위하여 강사장치의 모래 호퍼의 구멍을 통하여 모래의 유출량을 조절하여 강사속도를 조절하고, 모래 호퍼와

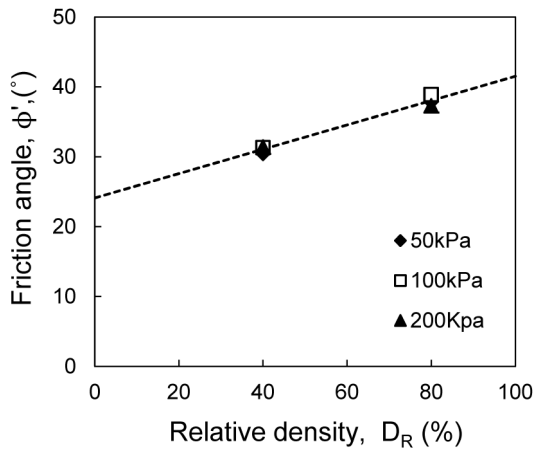


Fig. 5. Friction angle for test sand by triaxial compression test

강사장치의 거리를 조절하여 지반과 강사장치 사이의 낙하고를 조절하는 강사법을 이용하였으며, 여러 번의 시행착오를 통하여 상대밀도 $92 \pm 2\%$ 를 갖는 지반을 구현하였다.

4. 시험결과분석

4.1 그룹 마이크로파일의 인발하중-변위곡선

Fig. 6은 그룹 마이크로파일(GP)의 인발하중(Q_{up})-변위곡선(s_{vt})을 나타낸 그림이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 그룹 마이크로파일의 인발하중-변위곡선은 본 연구의 실험에 적용된 모든 조건에서 항복이 발생되었으며, 설치간격에 상관없이 설치각도 30도 조건에서 최대의 인발지지력이 발생하는 것으로 나타났다. 하중변위곡선의 기울기는 경사조건일 때 설치각도가 증가함에 따라 완만해지는 것으로 나타났으며, 45도 조건의 기울기는 연직조건인 기울기보다 작은 기울기가 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 최종하중단계에서의 인발지지력은 30도, 15도, 45도, 연직설치의 순서로 지지력이 큰 것으로 나타나, 침하에 따라 지지력의 특성이 달라지게 되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 그룹 마이크로파일(GP)의 설치조건에 따른 인발지지특성 및 변위저감특성을 규명하기 위하여, 동일한 인발변위수준에서 측정되는 인발지지력을 비교하도록 하였다. 인발변위수준의 선정은 도출된 그룹 마이크로파일의 인발하중-변위 곡선의 초기, 중간, 후반부의 지지력의 변화를 확인하기 위하여, 사용된 단일 마이크로파일 직경(D)의 20%(0.2D), 50%(0.5D), 100%(1.0D)에 도달하였을 경우의 지지력을 기준으로 비교하였으

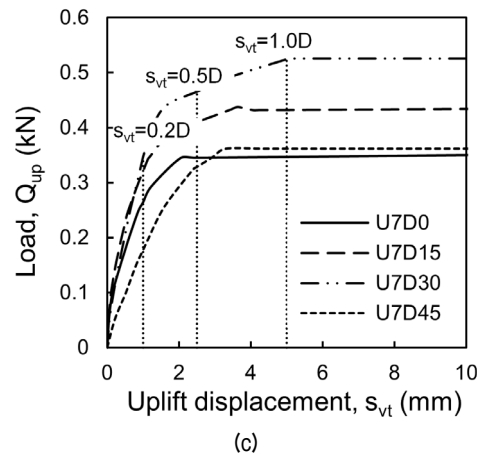
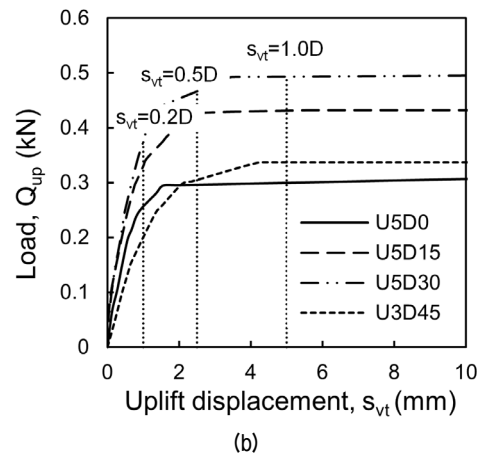
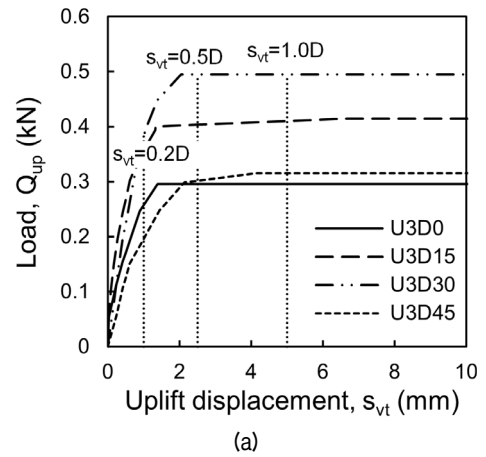


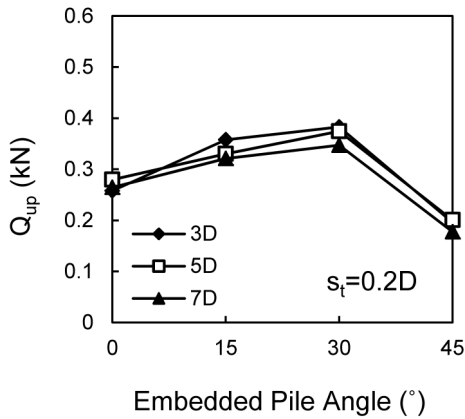
Fig. 6. Uplift load(Q_{up})-displacement(s_{vt}) curves for group micropile: (a) Pile spacing = 3D; (b) Pile spacing = 5D; (c) Pile spacing = 7D

며, 그 결과는 Fig. 6에서 점선으로 표기하였다.

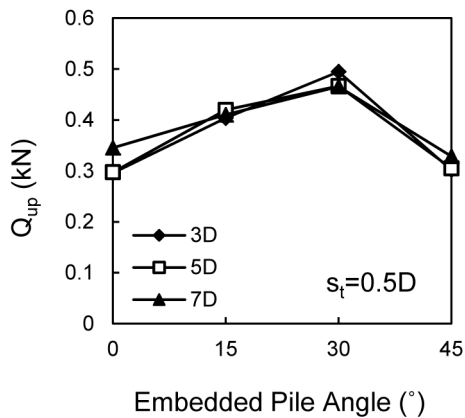
4.2 설치조건 및 인발변위 발생수준에 따른 그룹 마이크로파일의 인발지지특성 분석

Fig. 7은 그룹 마이크로파일(GP) 하중재하수준에 따른 인발지지력변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)에 나타

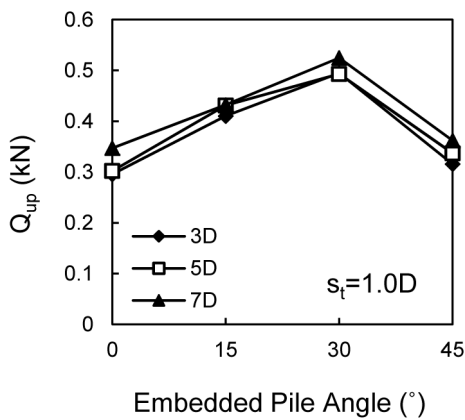
난 바와 같이 침하수준 0.2D에서의 인발지지력은 연직 설치조건에 비하여 설치각도 15와 설치각도 30도 조건에서 더 큰 지지력이 발생되며, 45도 조건일때는 더 낮은 지지력이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이, 침하수준 1.0D의 인발지지력은 연직설치조건에 비하여 경사설치 조건일 때 더 우수한 지지력이 발생하는 것으로 나타났으며, 그 크기는 설



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Uplift resistance of group micropile: (a) $s_{vt} = 0.2D$; (b) $s_{vt} = 0.5D$; (c) $s_{vt} = 1.0D$

치각도 30도 조건일 때 가장 크고 설치각도 15도, 45도의 순서인 것으로 나타났다. 또한 설치각도에 따른 지지력특성은 인발변위 발생수준이 증가함에 따라 더욱 명확하게 나타나는 것으로 나타났다. 반면, 설치간격에 따른 지지력특성은 인발변위의 발생수준에 따른 경향의 변화가 크지 않으며, 변화의 차이 또한 설치각도에 따른 지지력의 변화특성에 비교하여 매우 작은 것으로 나타났다. 이에 따라, 인발력을 받는 마이크로파일의 설치조건 중에서는 마이크로파일의 설치각도가 지지력을 변화시키는 주요한 요소로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 극한상태에 도달하였을때의 설치각도 및 설치간격에 따른 그룹 마이크로파일의 극한 인발지지력의 증가율을 나타낸 그림이다. 그룹 마이크로파일의 극한 인발지지력의 증가율은 각 설치조건에서의 극한인발지지력(Q_{upg})을 연직조건일때의 평균 극한인발지지력($Q_{upg,0}$)으로 나누어 산정하였으며, 설치각도 15도일 때 33%의 인발지지력 증가효과를 기대할 수 있으며, 30도일 때 59%, 45도일 때 5%의 인발지지력 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

인발력이 작용하는 그룹 마이크로파일의 저항특성은 개별 마이크로파일의 인발지지력을 결정하는 영향범위의 중첩으로 인하여 지지력이 감소되는 영향범위 중첩효과(Overlapped influence range effect)와 마이크로파일과 마이크로파일 사이의 지반이 구속되어 지지력을 증가시키는 구속효과(Confining effect)가 복합적으로 나타난다. 일반적으로 연직으로 설치된 파일의 영향범위는 3D~8D로 제안되어 있으나, 이러한 지지효과는 마이크로파일의 설치간격과 설치각도에 따라 변화할 수 있다(Robinsky and Morrison, 1964). Fig. 9는 인발력을

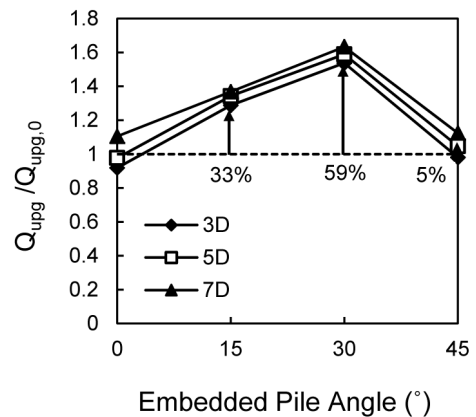


Fig. 8. Increment ratio of ultimate uplift load capacity for group micropile

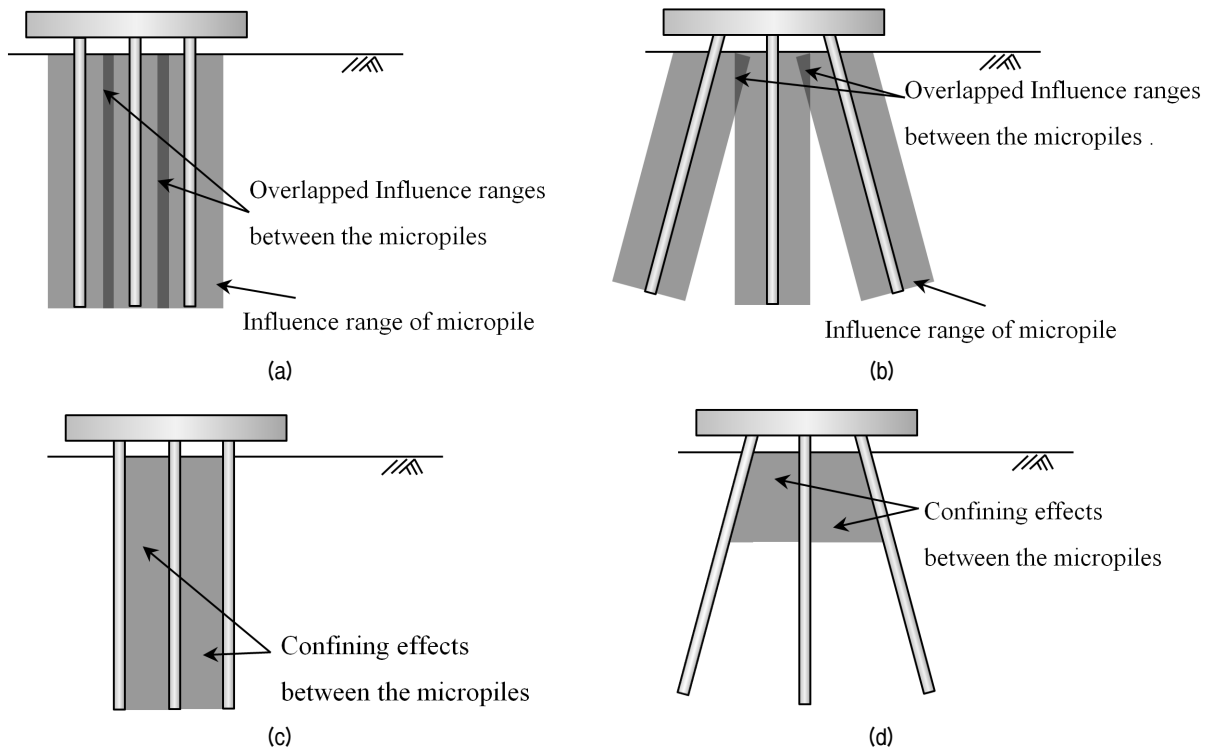


Fig. 9. Resisting characteristics of group micropile: (a) and (b) Influence ranges of group micropiles and inclined group micropiles; (c) and (d) confining effects of group micropiles and inclined micropiles

받는 마이크로파일의 영향범위중첩효과와 마이크로파일의 구속효과를 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 마이크로파일의 설치간격이 넓어지고, 설치각도가 증가함에 따라 마이크로파일과 마이크로파일 사이에서 지지력을 감소시키는 영향범위의 중첩효과가 감소하여 보다 큰 지지력을 기대할 수 있다. 반면, Fig. 9(c)와 (d)에 나타난 바와 같이, 마이크로파일의 설치간격이 넓어지고, 설치각도가 증가함에 따라, 마이크로파일과 마이크로파일 사이에서 지지력을 증가시키는 구속효과가 감소하여 보다 작은 지지력이 발생된다. 따라서, 인발력을 받는 마이크로파일의 최적의 설치간격 및 설치각도는 마이크로파일과 마이크로파일사이의 구속효과가 발생되면서, 영향범위의 중첩에 의한 지지력 감소효과가 가장 적게 나타나는 경우로 결정될 수 있으며, 본 시험에서는 마이크로파일 설치간격이 7D이고 설치각도가 30도일 때를 최적의 설치조건이 되는 것으로 나타났다.

4.3 그룹 마이크로파일의 설치조건에 따른 인발변위 저감특성

Fig. 10은 그룹 마이크로파일의 설치조건에 따른 인발변위 저감특성을 나타낸 그림이다. 각 시험조건에서

의 인발변위는 연직으로 설치된 그룹 마이크로파일의 극한지지력($Q_{upg,0}$)과 동일한 하중단계에서의 변위값을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 10(a)와 같다. Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이, 연직설치 조건에서의 극한지지력이 작용하였을 때의 인발변위량은 그룹 마이크로파일의 설치간격이 좁을수록 작게 측정되어 보다 효과적으로 인발변위에 저항하는 것으로 나타났다. 이는 설치간격에 따른 마이크로파일의 영향범위의 중첩의 효과와 마이크로파일 사이의 구속효과가 발휘되는 시점의 차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 개별 마이크로파일의 영향범위는 작은 하중단계에서는 그 범위가 크지 않으나, 하중단계가 증가함에 따라 점진적으로 증가하여 최대의 영향범위에 도달하는 특성을 보이는 반면, 마이크로파일 마이크로파일 사이에 발생하는 구속효과는 마이크로파일이 시공되는 시공시점에 결정되어 일정하게 작용하게 된다. 이에 따라서, 본 측정 시점에서의 영향 범위의 중첩에 의한 감소효과는 최대로 작용하지 않으나, 마이크로파일 사이의 구속효과에 의한 영향은 최대로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

반면, Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이, 설치각도에 따른 인발변위 저감특성은 설치각도 30도일 때 53%, 15도일 때 50% 감소되어 설치각도를 30도까지 증가시켰을

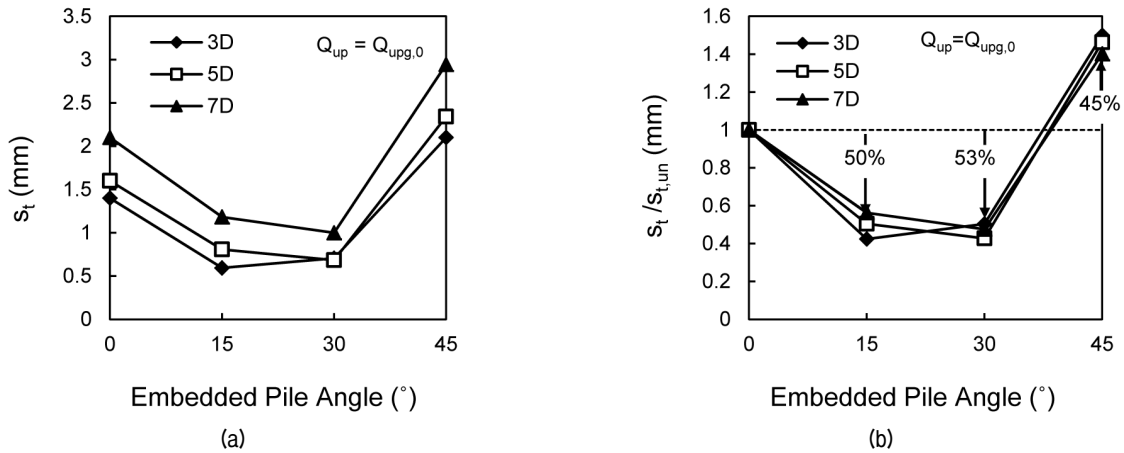


Fig. 10. Reduction of uplift displacement of group micropile: (a) uplift displacement for $Q_u = Q_{upg,0}$ and (b) the reduction ratio of uplift displacement with embedded pile angle

때 최대의 저감효과가 발휘되는 것으로 나타났으며, 설치각도를 45도로 시공하였을 경우에는 45% 더 큰 변위량이 발생 되는 것으로 나타나 마이크로파일의 설치각도를 30도로 시공하였을 때 최대의 변위저감효과를 기대할 수 있는 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로파일 기초의 설치조건에 따른 인발지지력 증가효과와 인발변위량 감소효과를 파악하기 위하여 그룹 마이크로파일 기초(GP)를 인발재하시험을 수행하였으며, 그 수행결과는 다음과 같다.

- (1) 그룹 마이크로파일의 인발하중-변위 곡선은 모든 조건에서 항복이 발생하며, 경사조건으로 설치된 인발하중-변위곡선의 초기 기울기는 설치각도가 증가함에 따라 완만해져 45도 조건일 때 연직조건일때의 기울기보다 작은 기울기가 발생되었고, 최종하중단계에서의 인발지지력은 30도, 15도, 45도, 연직설치의 순서로 지지력이 큰 것으로 나타났다.
- (2) 하중재하 초기와 하중재하 후기의 설치각도의 변화에 따른 인발지지력은 인발변위 발생수준에 따라 경향의 차이가 있으나, 설치각도 30도 조건일 때 가장 큰 지지력이 발생되며, 인발변위 발생수준이 증가함에 따라 지지력의 차이가 더욱 명확하게 나타나는 것으로 나타났다. 반면, 설치간격에 따른 인발지지력 변화는 인발변위 발생수준에 따라 그 경향이 크게 변화되지 않으며, 그 변화의 크기 또한 설치각도에 비하여 크지 않아 설치각도에 따른 지지특

성이 설치간격에 의한 지지특성보다 주요한 특성으로 작용하는 것으로 나타났다.

- (3) 그룹 마이크로파일의 극한 인발지지력의 증가율 산정결과 설치각도 15도, 30도, 45도 일 때 33%, 59%, 5%의 인발지지력 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 인발력이 작용하는 그룹 마이크로파일의 저항특성 때문으로, 그룹 마이크로파일의 저항은 마이크로파일과 마이크로파일 사이의 지반이 구속되어 지지력을 증가시키는 구속효과와 개별 마이크로파일의 인발지지력을 결정하는 영향변위의 중첩으로 인하여 지지력이 감소되는 영향범위 중첩 효과에 의해 복합적으로 나타나며, 본 연구에서는 설치간격 7D, 설치각도 30도일때 인발력에 저항하는 최적의 설치조건이 구현되는 것으로 나타났다.
- (4) 그룹 마이크로파일의 설치조건에 따른 인발변위량은 그룹 마이크로파일의 설치간격이 좁을수록 작게 측정되어 보다 효과적으로 인발변위에 저항하는 것으로 나타났다. 이는 설치간격에 따른 영향범위의 중첩의 효과와 구속효과가 발휘되는 시점의 차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 개별 마이크로파일의 영향범위는 작은 하중단계에서 그 범위가 크지 않으나, 하중단계가 증가함에 따라 점진적으로 증가하여 최대의 영향범위에 도달하는 특성을 보이는 반면, 마이크로파일과 마이크로파일 사이에 발생하는 구속효과는 마이크로파일이 시공시점에 결정되어 일정하게 작용하게 된다. 이에 따라서, 측정된 그룹 마이크로파일의 인발변위량은 영향 범위의 중첩에 의한 저항감소효과가 최대로 작용하지 않으며, 마이크로파일 사이의 구속효과에 의한 저

항증가효과가 최대로 작용하는 시점이 되고, 이로 인하여 설치간격이 좁을수록 더 작은 변위량이 발생되는 것으로 판단된다.

- (5) 설치각도에 따른 인발변위 저감특성은 설치각도 30도일 때 53%, 15도일 때 50% 감소되어 설치각도를 30도까지 증가시켰을 때 최대의 저감효과가 발휘되는 것으로 나타났으며, 설치각도를 45도로 시공하였을 경우에는 45% 더 큰 변위량이 발생 되는 것으로 나타나 마이크로파일의 설치각도를 30도로 시공하였을 때 최대의 변위저감효과를 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)

- ASTM (2006a), “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).
- ASTM (2006b), “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).
- Bassett, R. H. and Last, N. C. (1978), “Reinforcing Earth below Footings and Embankments”, *Proc., ASCE, Symp., Earth reinforcement*, Pittsburgh, pp.202-231.
- Choi, Y. H., Kyung, D. H., and Lee, J. H. (2013), “Finite Element Analysis for Transmission Tower Behavior Characteristic by Connection Beam Stiffness”, *J. of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.33, No.1, pp.219-227.
- FHWA (2005), “Micropile Design and Construction Reference Manual”, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA NHI-05-039.
- Gholamreza, S. and Reza, N. (2011), “Effects of Slenderness Ratio on Seismic behavior of Vertical Micropiles”, *Proc. ASCE, Geotechnical risk assessment and management (GeoRisk 2011)*, Atlanta, pp.352-360.
- Han, J. and Ye, S. (2006), “A Field Study on the behavior of Micropiles in Clay Under Compression or Tension”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, pp.19-29.
- Hong, W. P., Cho, S. D., Choi, C. H., and Lee, C. M. (2012), “Skin Friction Mobilized on Pack Micropiles Subjected to Uplift Force”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.19-29.
- KEPCO (2014), “Development of Foundation Type of the Transmission of Electricity Tower Using Micro-pile”, Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), R13TG01.
- 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.
- 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.
- Kyung, D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., and Kim, D. H. (2011), “The Failure Standard to Estimate the Behavior and Bearing Capacity for Connected-type Foundation of Transmission Tower in Clay”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.3, pp.27-40.
- Kyung, D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., Kim, D. H., and Kim, D. H. (2012a), “The Behavior and Resistance of Connected-pile Foundation for Transmission Tower from In-situ Lateral Load Tests”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.2, pp.57-70.
- Kyung, D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., and Kim, D. H. (2012b), “Resistance Increasing Factor of Connected-pile Foundation for Transmission Tower in Clay”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.8, pp.31-41.
- Kyung, D. H., Lee, J. H., Paik, K. H., Kim, Y. J., and Kim, D. H. (2013), “Analysis of Characteristics of Connected-pile Foundations for Transmission Tower according to Changes of Load and Connection Beam Conditions in Clay”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.10, pp.5-18.
- 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.
- Lee, W. T. (1991), “A Study on Reinforcing Effect of Reticulated Root Piles on Shallow Footing”, a doctor’s thesis, Seoul National Univ.
- Lizzi, F. and Carnevale, G. (1979), “Les Reseaux de Pieux Racines Pour la Consolidation des sols, Aspects Theoretique et Essais sur Mondiale”, *Proc. Int. Conf., Soil Reinforcement*, Paris, Vol.2, pp. 317-324.
- Robinsky, E. I. and Morrison, C. F. (1964), “Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1, No.2, pp.81-93.
- Roh, K. K., Park, S. H., and Cho, K. H. (2007), “Development of an Empirical Equation for Estimating Load Transfer Curves for Micropile in Weathered Sand”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.1, pp.5-11.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., and Bachus, R. C. (1999), “Geotechnical Engineering Circular No.4 Ground Anchors and Anchored System”, Office of Bridge Technology Federal Highway Administration, FHWA-SA-99-015.
- 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.
- You, G. L., Miura, K., and Ishito, M. (2003), “Behavior of Micropile Foundations under Inclined Loads in Laboratory Tests”, Lowland Technology International, International Association of Lowland Technology (IALT), Vol.5, No.2, pp.16-26.

Received : September 5th, 2014

Revised : December 5th, 2014

Accepted : February 13th, 2015