

조밀한 사질토지반에서 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 인발지지력 평가방법

Evaluation Method for Uplift Load-carrying Capacity of Inclined Group Micropiles in Dense Sand

경 두 현¹ Kyung, Doohyun 김 가 램² Kim, Garam
김 인 철³ Kim, Incheol 이 준 환⁴ Lee, Junhwan

Abstract

In the present study, uplift load carrying behavior of micropiles with installation angle and pile spacing was investigated based on uplift load tests using single and group micropiles. In addition, evaluation methods of uplift load carrying capacity of group micropiles were proposed based on FHWA (2005) and Madhav (1987) and they were compared with test results to confirm the validity of proposed methods. From the test results, uplift load carrying capacities of single and group micropiles increased with the increase of the installation angle up to 30°, whose values also increased slightly with increasing pile spacing. For the proposed method based on FHWA (2005), the estimated values were similar to measured values up to 15° of installation angle and 5D of pile spacing. For the proposed method based on Madhav (1987), on the other hand, it was observed that the estimated values were in good agreement with measured values in all installation conditions.

요 지

본 연구에서는 단일 마이크로파일의 인발재하시험과 그룹 마이크로파일 인발재하시험 결과를 토대로 마이크로파일의 설치각도와 설치간격에 따른 인발지지특성을 확인하였다. 또한 FHWA(2005)의 방법과 Madhav(1987)의 방법을 토대로 지지력평가방법을 제안하고, 시험결과와 비교하여 그 적정성을 검토하였다. 시험결과, 단일 및 그룹마이크로파일의 인발지지력이 설치각도 30도까지 증가하는 것으로 나타났으며, 설치간격이 증가함에 따라 그 값이 다소 증가되는 것으로 나타났다. 제안된 FHWA(2005)의 방법의 경우, 수정된 방법을 통한 예측 값이 설치각도 15도의 5D조건까지 유사한 것으로 나타났다. 반면, 제안된 Madhav(1987)의 방법의 경우에는 모든 설치조건에서의 측정값과 수정된 방법을 통한 예측 값이 비교적 유사한 것으로 나타났다.

Keywords : Single micropile, Group micropiles, Uplift load test, Uplift load carrying capacity, Dense sand

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사후연구원 (Member, Post-doc Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

2 비회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph.D Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Yonsei Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. 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 2017년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

마이크로파일은 직경 150mm에서 300mm사이의 소구경 현장타설말뚝으로, 구조물의 하중을 지지하는 형식과 그라우팅 방식에 따라 구분된다(FHWA, 2005). 마이크로파일은 대규모 장비의 접근이 어려운 연약지반이나, 삭도의 설치가 어려운 산악지역의 송전철탑의 기초구조물로 종종 사용되고 있다(Tompson et al., 2009; Salisbury and Davidow, 2014). 송전철탑 기초에는 연직하중과 수평하중이 복합적으로 작용하며, 대부분의 경우 인발하중이 전반적인 송전철탑의 거동을 좌우하는 것으로 알려져 있다(Hanna and Afram, 1986; Shelke and Patra, 2008).

마이크로파일은 소구경의 특징으로 인하여 지지력의 대부분이 주면 마찰력에서 발생하는 것으로 간주된다. 따라서 단일 마이크로파일의 연직지지력은 마이크로파일의 정착장의 길이와 정착지반에서의 점착력을 통하여 산정될 수 있으며, 그라우팅 방법과 지반 조건에 따라 상이한 범위 값의 점착력을 활용할 수 있다(FHWA, 2005). 그러나 그룹 마이크로파일의 경우에는 압축지지력과 인발지지력을 상이한 방법으로 산정하여 활용하고 있다. 압축지지력의 경우에는 기존 말뚝기초와 같이, 기초와 기초사이의 영향범위 중첩에 따른 그룹효과를 고려하여 지지력을 산정한다. 반면 인발지지력의 경우에는 파일과 파일사이에 발생하는 지반블록의 중량에 의한 지지력을 산정하도록 제안하고 있다(FHWA, 2005).

마이크로파일은 경사시공이 용이하며, 경사 마이크로파일은 수평저항력을 증가시키는 목적으로 종종 활용된다(Fukui, 2006; Sharma et al., 2014; Salisbury and Davidow, 2014; Ischebeck and Ischebeck, 2014; Oh et al., 2015). 마이크로파일의 설치각도의 변화는 마이크로파일의 수평지지력 뿐만 아니라, 마이크로파일의 압축 및 인발지지력에 영향을 미치는 주요한 요소로 작용한다. 국외에서는 Tsukada et al.(2006)과 Sharma et al.(2014)이 마이크로파일의 설치각도에 따라 연직방향 압축지지력의 증가가 발생되며, 설치각도 15~30도에서 최대의 연직방향 압축지지력이 발생하는 결과를 도출한 바 있다. 국내에서는 Lee and Im(2006)이 전면기초의 하부지반을 마이크로파일을 통하여 보강할 경우, 연직마이크로파일 대비 25도 경사로 설치되었을 때 보강 효과가 가장 우수한 결과를 발표한 바 있으며, Hwang et al.(2010)은 암반에 마이크로파일이 설치되었을 경우,

마이크로파일 직경(D)대비 길이(L)의 비(L/D)가 50이하일 때 암반층의 위치에 상관없이 연직일 때 가장 지지력이 우수하며, 암반층의 위치가 지반파괴깊이보다 깊은 경우 30도의 경사로 마이크로파일을 설치할 때 우수한 지지력이 발생된다는 결과를 도출한 바 있다. 또한 Hwang et al.(2012)은 마이크로파일을 이용하여 전면기초의 하부를 보강할 경우, 전면 또는 국부전단파괴가 예상되는 지반에서 30도의 경사파일로 설치하는 것이 효과적이며, 파일의 길이는 전면기초 폭의 4배 이상의 길이를 이용하는 것이 효과적인 것을 규명한 바 있다.

반면, 인발지지력의 경우에는 국외에서 경사로 설치된 파일의 축방향의 인발하중에 대한 연구가 주를 이루어 왔으며, 연구자에 따라 상이한 결과를 도출하고 있다(Meyerhof, 1973; Awad and Ayoub, 1976; Nazir and Nasr, 2013). Meyerhof(1973)의 경우에는 파일의 축방향 인발지지력이 설치각도 30도까지 증가하는 결과를 도출한바 있으나, Awad and Ayoub(1976)과 Hanna and Afram(1986)은 설치각도가 증가함에 따라 파일의 축방향 인발지지력이 감소되는 결과를 도출한바 있다. 이후 Nazir and Nasr(2013)는 조밀한 사질토 지반에서는 파일의 축방향 인발지지력이 설치각도에 따라 증가하는 반면, 느슨한 사질토 지반에서는 축방향 인발지지력이 설치각도에 따라 감소하는 결과를 도출한 바 있다. 그러나, 국내의 경우 인발하중을 받는 경사 마이크로파일에 대한 연구가 매우 부족한 실정이며, 이에 따라 연구의 필요성이 증대되고 있다.

Kyung et al.(2015)과 Kyung and Lee(2017)는 단일 및 그룹 마이크로파일의 인발재하시험을 통하여 3가지 설치간격(S = 3D, 5D, 7D)과 4가지 설치각도($\theta = 0$ 도, 15도, 30도, 45도)에서의 단일 및 그룹 마이크로파일의 인발지지특성을 도출하였다. 본 논문에서는 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 현장적용성 향상을 도모하기 위해서, Kyung et al.(2015)과 Kyung and Lee(2017)로부터 얻어진 선행연구결과를 토대로, 마이크로파일의 설치조건을 고려할 수 있는 평가방법을 제안하고 그 적용성을 검토하고자 한다. 이를 위하여, 마이크로파일 설계에 적용되고 있는 지반의 저항블록을 고려한 FHWA(2005)의 방법과 인접한 개별기초의 지지력 저감계수를 활용하는 Madhav(1987)의 방법을 토대로 평가방법을 제안하였으며, 그 적용성을 검토하였다.

2. 마이크로파일

2.1 마이크로파일의 정의 및 종류

마이크로파일은 1950년대 Italy에서 개발된 이후 널리 활용되고 있는 소규모 현장타설말뚝으로서, 소규모 천공장비를 이용하여 지반을 천공하고 케이싱 및 보강재를 설치 한 후 그라우팅을 실시하여 직경 150mm 이상 300mm 이하의 말뚝을 형성하는 기초형식이다. 마이크로파일은 지지형식에 따라서 Case 1과 Case 2로 구분된다. Case 1은 마이크로파일이 구조물과 연결되어 직접적으로 하중을 견디는 형식으로, 일반적인 말뚝기초와 같이 상부에 작용하는 하중을 보다 깊고 안정적인 지반층으로 전달하여, 압축, 인발, 수평력에 말뚝이 직접적으로 저항하도록 설계한다. 반면 Case 2의 경우에는, 마이크로파일을 이용하여 지반을 그물식으로 보강하여 지반과 말뚝의 복합체를 형성하는 방법으로, 말뚝의 개체가 아닌 보강된 지반전체에 하중이 전달되는 것으로 간주하여 설계한다(FHWA, 2005). 또한 마이크로파일은 그라우팅의 방법에 따라 Type A~Type D로 구분된다. Type A는 마이크로파일을 중력식 그라우팅 방법을 통해 형성하는 방법으로, 지반을 천공하고 보강재를 설치하며 이후 그라우트를 중력식으로 주입하는 경우를 말한다. 반면, Type B의 경우에는 그라우트 주입을 가압식으로 수행하는 방법으로, 통상적으로 0.5MPa에서 1MPa의 압력으로 그라우팅을 주입한다. Type C와 Type D는 1차 그라우팅 이후에 2차 가압 그라우팅을 수행하는 방법으로, 2차 그라우팅을 실시하는 시점과 횟수, 그라우팅 압력에 따라 Type C와 Type D로 구분된다(FHWA, 2005).

2.2 마이크로파일의 인발지지력 산정

마이크로파일의 인발지지력은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 지지층에 근입된 정착장의 길이(L_b)와 정착지반에서의 마이크로파일 점착력(α_{bond})에 의해 산정된다. 특히 마이크로파일은 직경이 소구경인 특성으로 인하여 지지력의 대부분을 주변마찰력으로 저항하는 것으로 간주하므로, 압축지지력과 인발지지력을 동일하게 산정하고 있다(Bruce et al., 1995; FHWA, 2005). 단일 마이크로파일의 인발지지력은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$P_{up,SMP} = \alpha_{bond} \pi D L_b \quad (1)$$

여기서, $P_{up,SMP}$ = 단일 마이크로파일의 인발지지력, α_{bond} = 정착지반에서의 마이크로파일 점착력, D = 마이크로파일의 천공직경, L_b = 정착장의 길이이다.

파일이 그룹으로 설치되는 경우, 파일의 저항범위의 중첩으로 인하여 각각의 개별 파일의 지지력이 감소된다. 일반적인 그룹 파일의 인발지지력은 개별 파일의 지지력의 합과 그룹효과계수(η_{GMP})를 통하여 산정되며, 식 (2)와 같다.

$$P_{up,GMP} = \eta_{GMP} \sum P_{up,SMP} \quad (2)$$

여기서 $P_{up,GMP}$ = 그룹 마이크로파일의 인발지지력, η_{GMP} = 그룹 효과 계수이다. Madhav(1987)는 인발하중을 받는 파일의 인접한 파일에 의한 감소효과를 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$P_{up,GMP} = \sum P_{up,SMP} - \frac{1}{N} \sum (P_{up,SMP} R N_{ad}) \quad (3)$$

여기서 N = 그룹 파일에 사용된 파일의 총 개수, R = 지지력 저감계수, N_{ad} = 각각의 파일에 인접한 파일의

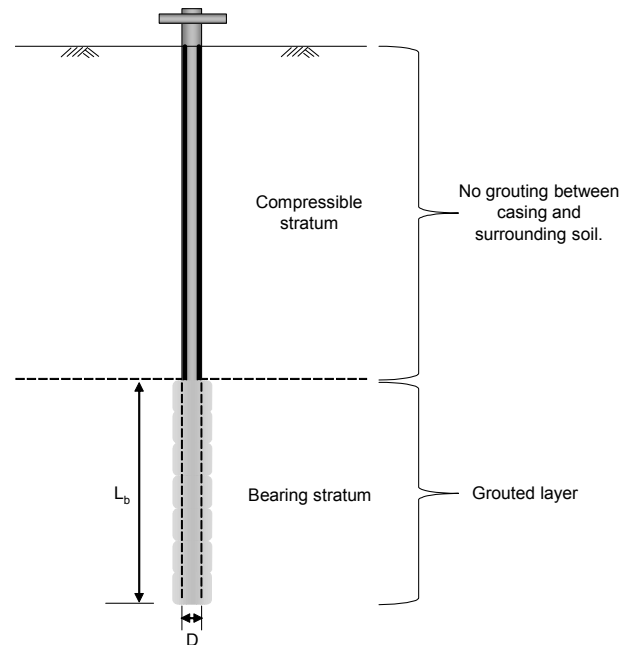


Fig. 1. Detailed description of single micropile (SMP)

개수이다. 또한, Madhav(1987)는 지지력 저감계수(R)를 파일의 직경(D) 대비 길이(L)와 파일과 파일 사이의 거리(S)에 따라 Fig. 2와 같이 제안하였다.

반면 FHWA(2005)에서는 그룹 마이크로파일의 인발 지지력을 마이크로파일과 마이크로파일사이에서 형성되는 지반블록의 크기와 유효중량에 따라 산정하도록 제안하고 있다. Fig. 3은 FHWA(2005)에서 제안하는 사질토 지반에서의 지반블록의 형상을 나타낸 그림이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 그룹 마이크로파일에 의하여 형성되는 지반블록의 가로와 수직 비율은 1:4이며, 이를 통한 그룹 마이크로파일의 인발지지력은 다음과 같다.

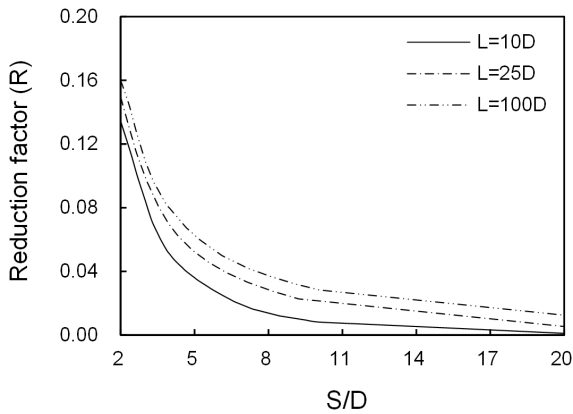


Fig. 2. Reduction factor (R) (Madhav, 1987)

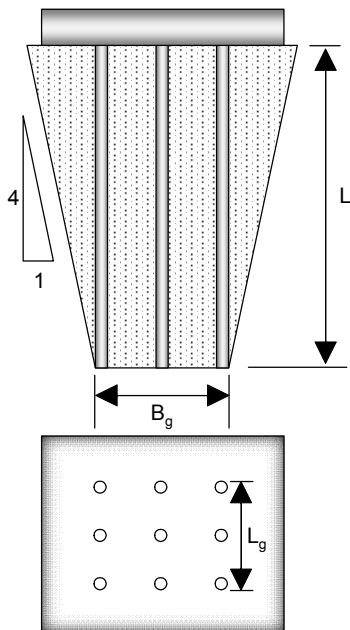


Fig. 3. Model for uplift load carrying capacity of group micropiles (FHWA, 2005)

$$P_{up, GMP} = \left[\frac{1}{3} (A_b + A_t + \sqrt{A_b A_t}) L \right] \gamma \quad (3)$$

$$A_b = B_g L_g \quad (4)$$

$$A_t = \left(B_g + \frac{L}{2} \right) \left(L_g + \frac{L}{2} \right) \quad (5)$$

여기서 A_b = 하단의 지반블록의 넓이, A_t = 상단의 지반블록의 넓이, L = 마이크로파일의 길이, γ = 마이크로파일이 설치된 지반의 유효단위중량이다. 그러나 식 (3)~식 (5)는 연직으로 설치된 조건에 대한 지지력 산정식으로, 경사로 설치된 마이크로파일의 지지력을 예측하는데 그대로 적용될 수 없다. 특히 Madhav(1987)의 방법은 지지력 저감계수(R)의 변화를 그림으로 제안하여, 직접적인 적용이 용이하지 못한 문제점이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Madhav(1987)의 방법을 토대로, 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 저감계수(R) 산정식을 제안하고자 한다. FHWA(2005)의 경우에는 경사로 설치된 그룹 마이크로파일과 그룹 마이크로파일 사이의 평균거리를 활용하여 지지력을 예측하고, 비교를 수행하였으며, Madhav(1987)의 경우에는 그룹 마이크로파일의 최소 설치간격인 파일과 파일사이의 간격 3D를 기준으로 수식화하여 제안식을 도출하고 그 결과를 비교하였다.

3. 마이크로파일의 인발재하시험

3.1 단일 마이크로파일의 인발재하시험

본 연구에서는 단일 마이크로파일(SMP)의 인발재하시험을 수행하여 마이크로파일의 설치각도에 따른 지지력특성을 도출하였다. 이와 관련된 상세한 시험과정 및 절차는 Kyung and Lee(2017)에서 확인할 수 있다. 단일 마이크로파일의 인발재하시험은 가로 및 세로 폭이 1000mm, 높이 700mm의 사각형 토조에서 수행되었다. 본 시험에서 사용된 토조는 작용하는 하중에 대하여 충분한 강성을 갖도록 두께 10mm의 강판으로 구성되었으며, 지반의 조성상태를 확인하기 위하여 전면에는 강화아크릴판을 설치하여 지반의 조성상태를 확인하였다.

본 연구에서는 지반조성을 위해 Fig. 4(a)에 나타난 강사장치를 이용하였다. 본 강사장치는 모래의 호퍼 구멍을 통해 유출되는 모래가 2단으로 구성된 강사망을

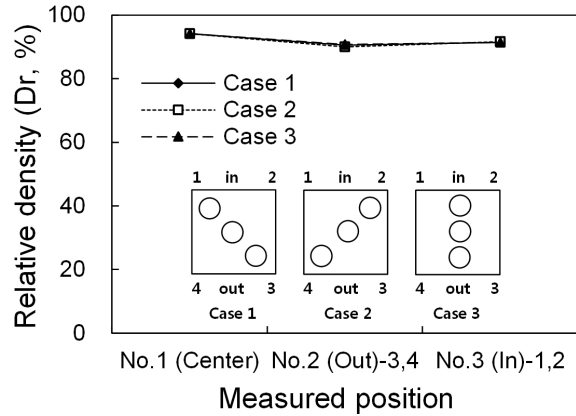
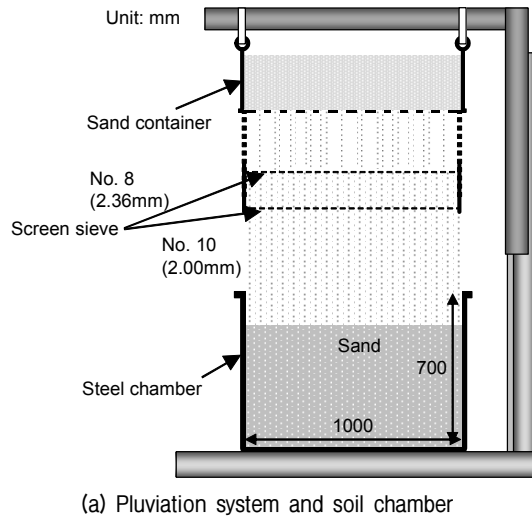


Fig. 4. Detailed description of soil specimen

통과하여 지반을 조성하는 장치로, Lee et al.(2011)이 활용한 강사장치를 참고하여 제작되었다. 본 장치의 호퍼구멍을 작게 조절하고, 2단의 강사망에서 지반표면사이의 거리를 길게 조절할수록 지반이 곱게 강사되어 조밀한 상대밀도의 지반이 조성되며, Lee et al.(2011)은 본 강사법을 이용하여 52%와 92%의 상대밀도를 갖는 다층지반을 조성한바 있다. 시험지반은 동일한 호퍼구멍과 동일한 거리를 유지하여 100mm씩 7층으로 나누어 조성되었으며, 여러 번의 시행착오를 통하여 92±2%의 상대밀도를 갖는 지반을 구현하였다. 모형토조의 각각의 위치에서 조성된 지반의 상대밀도는 Fig. 4(b)와 같다.

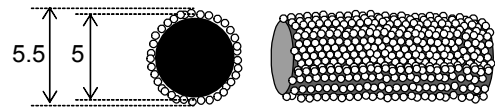
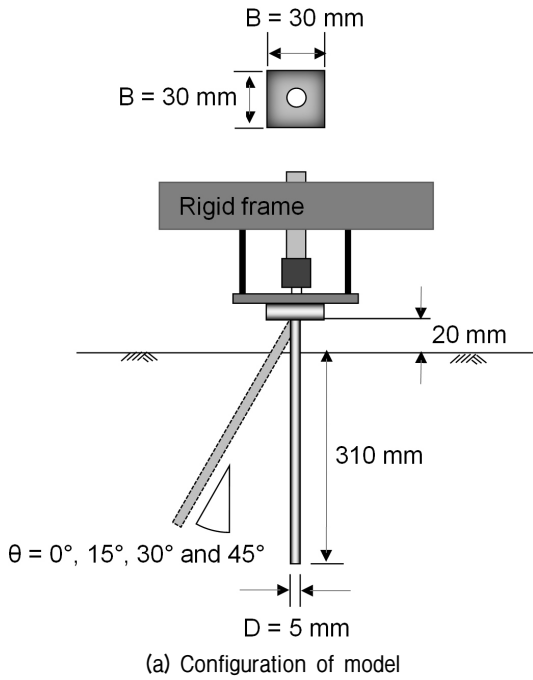
본 연구에서는 시험모래로 주문진 표준사가 활용되었다. 활용된 주문진 표준사의 주요물성은 Table 1과 같다. 본 지반의 마찰각을 측정하기 위하여 상대밀도 40%와 80%, 구속압 50kPa, 100kPa, 150kPa 조건에서 삼축압축시험이 수행되었다. 수행결과 본 지반의 최대마찰각(ϕ_p)은 상대밀도 40%와 80%에서 각각 31.1°, 38.0°로 측정되었으며, 임계상태의 내부마찰각(ϕ_c)은 30.8°로 측정되었다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 마이크로파일 및 하중재하장치를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 직경(D) 5mm의 강봉에 규사 세립토를 피복한 마이크로파일을 사용하였다(Tsukada et al., 2006; Alnuaim et al., 2015). 규사 세립토의 피복두께는 Tsukada et al.(2006)에서 활용된 바와 같이, 말뚝직경의 10%를 피복하여 활용하였다. 마이크로파일의 근입깊이는 310mm

Table 1. Physical properties of test soil

Physical properties		
Peak friction angle (°)	ϕ_p ($D_r=40\%$)	31.1
	ϕ_p ($D_r=80\%$)	38.0
Critical friction angle (°)	ϕ_c	30.8
Max. void ratio	e_{max}	0.924
Min. void ratio	e_{min}	0.597
Specific gravity	G_s	2.61
Max. Dia (mm)	D_{max}	0.850
Min. Dia (mm)	D_{min}	0.075
Mean Dia (mm)	D_{50}	0.54
Coefficient of uniformity	C_u	1.76
Coefficient of curvature	C_c	0.97
Max. dry unit weight (kN/m^3)	γ_{max}	16.28
Min. dry unit weight (kN/m^3)	γ_{min}	13.31
USCS		SP

로 말뚝직경대비 길이(L/D)가 62가 되도록 하였으며, 마이크로파일의 설치각도(θ) 0도, 15도, 30도, 45도 조건에서 단일마이크로파일 인발재하시험이 수행되었다. 하중의 재하는 양방향 유압피스톤(Hydraulic cylinder)과 연결된 유압 잭(Jack)을 이용하여 마이크로파일의 머리부에서 수행되었다. 유압피스톤과 기초사이에 설치된 로드셀을 통하여 재하된 인발하중을 측정하였으며, 마이크로파일 캡의 양 끝단에 위치한 변위측정장치(LVDT)를 이용하여 인발변위를 측정하였다. 본 연구에서의 인발하중은 0.05kN단위로 증가시켰으며, 각 하중단계에서 목표하중에 도달한 상태에서 하중을 유지하고 더 이상의 변위가 발생되지 않을 때 다음 단계의 하중을 재하하였다.



(a) Configuration of model

(b) Model micropile

Fig. 5. Detailed description of uplift load tests

3.2 단일 마이크로파일의 인발지지특성

Fig. 6은 인발재하시험을 통하여 측정된 단일 마이크로파일의 인발지지특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 단일 마이크로파일의 인발하중(Q_{up})-변위(s_{up}) 곡선은 모든 설치각도에서 일정한 하중에 수렴하는 거동이 발생되는 것으로 나타났다. 인발하중-변위 곡선의 초기기울기는 연직의 경우 가장 큰 기울기가 발생하는 반면, 설치각도가 증가함에 따라 그 기울기가 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 설치각도가 증가할수록 연성(Ductility) 거동이 발생되는 것으로 판단된다. 반면 마이크로파일의 최종지지력은 설치각도에 따라 상이하게 측정되었다.

본 연구에서는 모든 인발하중-변위 곡선이 일정하중에 도달되는 10mm지점을 기준으로 단일 마이크로파일의 극한인발지지력($P_{up,SMP}$)을 측정하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 단일 마이크로파일의 극한인발지지력은 경사 마이크로파일 때 연직 마이크로파일에 비하여 큰 지지력이 발생하는 것으로 나타났으며, 설치각도 30도에서 최대의 지지력이 발생하는 것으로 나타났다. 경사 마이크로파일의 경사각도의 변화에 따른 지지력변화는 15도, 30도, 45도에서 연직 마이크로파일의 지지력에 비하여 15%, 20%, 4%의 지지력 증가효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 지지특성은 마이크

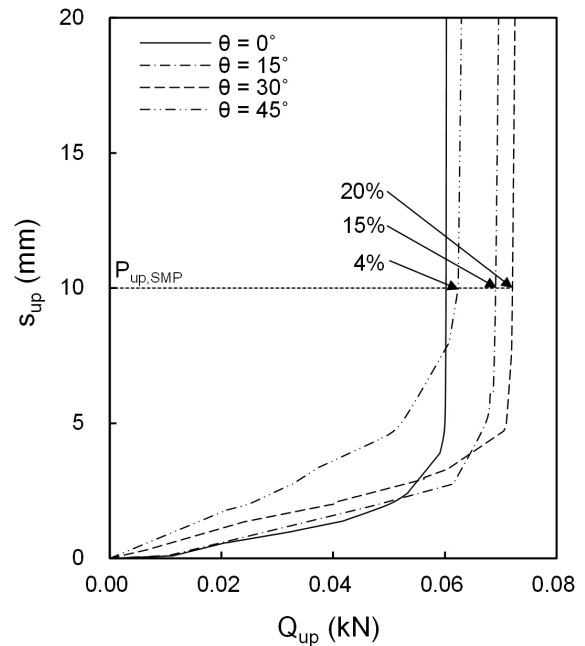


Fig. 6. Uplift response for single micropile (SMP)

로파일의 축방향 주면마찰력과 마이크로파일의 상부에 위치한 지반의 무게의 영향 때문인 것으로 판단된다. 설치각도가 증가함에 따라 마이크로파일의 상부에 위치한 지반의 무게는 증가하며, 더 큰 저항요소로 작용한다. 반면, 마이크로파일의 주면마찰력은 조밀한 지반에서 설치각도 30도까지 지지력이 증가되며, 45도에서는 급격하게 감소되는 것으로 알려져 있다(Meyerhof, 1973;

Nazir and Nasr, 2013). 따라서 이러한 두 가지 저항요소에 따른 지지효과로 설치각도 30도일 때 최대의 지지력이 발생되나 45도일 때 지지력의 감소가 발생된 것으로 판단된다. 그러나 이러한 연구결과를 일반화하기 위해서는 보다 다양한 지반조건에 대한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.3 그룹 마이크로파일의 인발지지특성

본 연구에서는 Kyung et al.(2015)과 Kyung and Lee (2017)에서 얻어진 선행연구결과를 토대로 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력($P_{up,GMP}$)과 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수(η_{GMP})를 측정하여, 그룹 마이크로파일의 인발지지특성을 규명하였다. Fig. 7(a)는 측정된 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력($P_{up,GMP}$)를 나타낸 그림이다. 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력은 단일 마이크로파일과 동일한 10mm의 인발변위가 발생된 지점을 기준으로 측정되었으며, 해당 변위가 발생될 경우 모든 그룹 마이크로파일이 일정한 하중에 수렴된 상태인 것을 확인하였다.

측정결과를 보다 명확히 비교하기 위하여, 측정된 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력($P_{up,GMP}$)을 Table 2에 나타내었다. 그룹 마이크로파일의 인발지지력은 설

치각도와 설치간격에 따라 지지력의 변화가 발생되며, 특히 설치각도의 변화에 따른 지지력의 변화가 주요하게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 그룹으로 설치된 마이크로파일의 사이의 평균적인 거리가 설치각도에 따라 크게 변화되기 때문인 것으로 판단된다. 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력은 경사조건일 때 연직조건보다 큰 지지력이 발생되었으며, Fig. 6의 단일 마이크로파일과 같이 설치각도 30도에서 가장 우수한 지지력이 도출되었다. 또한 설치간격이 증가할수록 우수한 지지력이 발생하는 것으로 나타났으나, 그 차이는 설치각도에 의한 효과에 비하여 매우 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 설치각도에 의한 지지력변화효과가 경사로 설치된 그룹마이크로파일의 지지력을 결정하는데 주요한 요소로 작용하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 단일 마이크로파일의 극한인발지지력을 측정하여, 식 (2)의 관계를 통해 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수(η_{GMP})를 측정하였다. Fig. 7(b)는 본 연구를 통해 측정된 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수는 0.55에서 0.83의 범위에서 측정되는 것으로 나타났다. 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수는 설치각도 30도까지 증가되었으며, 설치각도 45도에서는 0도와 유사한 수준의 그룹 효

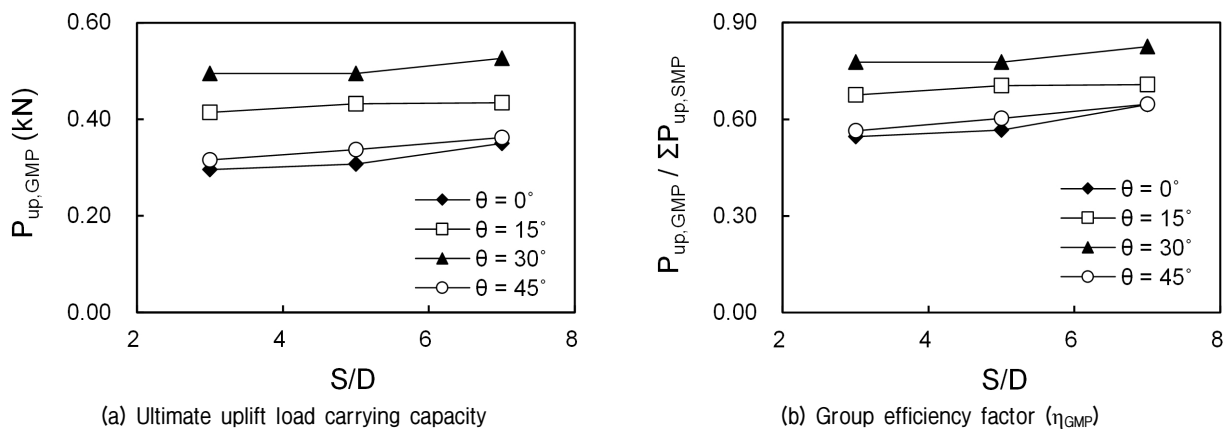


Fig. 7. Uplift response for group micropiles (GMP)

Table 2. Ultimate uplift load carrying capacity of group micropiles (GMP)

	Pile spacing, S	Installation angle, θ			
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
$P_{u,GMP}$ (kN)	3D	0.296	0.414	0.495	0.316
	5D	0.307	0.432	0.495	0.337
	7D	0.350	0.434	0.526	0.362

과 계수가 측정되는 것으로 나타났다. 또한, 설치간격이 증가함에 따라 그룹 효과계수가 다소 증가되는 것으로 나타났으나, 그 차이는 설치각도에 의한 효과에 비하여 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 마이크로파일과 마이크로파일 사이의 영향범위의 중첩에 따른 지지력 감소효과가 설치각도와 설치간격이 증가함에 따라 감소하는 동시에, Fig. 3에 나타난 바와 같은 지반블록의 저항 효과를 설치각도 45도에서는 기대하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 제한된 연구조건으로 인해 설치간격 7D까지의 범위에 대해 연구결과를 분석하였다. 그러나, 설치간격에 의한 효과를 보다 명확히 분석하기 위해서는 인발하중을 받는 그룹 마이크로파일에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 그룹 마이크로파일의 인발지지력 평가

4.1 그룹 마이크로파일 인발지지력 평가방법 제안

본 연구에서는 그룹 마이크로파일의 인발지지력을 평가하기 위하여, 기존의 FHWA(2005)의 방법과 Madhav (1987)의 방법을 토대로 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 인발지지력의 평가방법을 제안하고 이에 대한

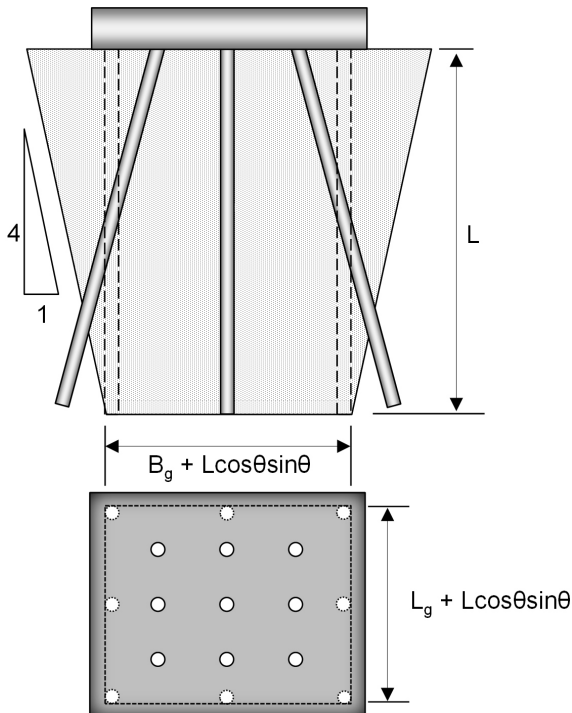


Fig. 8. Proposed model for uplift load carrying capacity of GMP based on FHWA (2005)

검토를 수행하였다. 우선 FHWA(2005)의 방법의 경우 파일과 파일사이의 평균적인 거리를 활용하여 지지력을 예측하고 이를 비교하도록 하였다. Fig. 8은 그룹으로 설치된 경사 마이크로파일의 파일과 파일 사이의 평균거리를 활용하여 제안된 FHWA(2005)의 방법을 나타낸 그림이다. 이를 기반으로 그룹 경사 마이크로파일의 지지력평가는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{up, GMP} = \left[\frac{1}{3} (A_{b,ave} + A_{t,ave} + \sqrt{A_{b,ave} A_{t,ave}}) \right] L \gamma \quad (6)$$

$$A_{b,ave} = (B_g + L \cos \theta \sin \theta) (L_g + L \cos \theta \sin \theta) \quad (7)$$

$$A_{t,ave} = \left(B_g + L \cos \theta \sin \theta + \frac{L}{2} \right) \left(L_g + L \cos \theta \sin \theta + \frac{L}{2} \right) \quad (8)$$

여기서 $A_{b,ave}$ = 평균거리를 이용한 하단의 지반블록의 넓이, $A_{t,ave}$ = 평균거리를 이용한 상단의 지반블록의 넓이이다.

그룹 마이크로파일의 시공시 마이크로파일의 최소 설치간격은 3D를 기준으로 하고 있다(FHWA, 2005; AASHTO, 2012). 따라서 본 연구에서는 Madhav(1987)방법을 이용하여 설치간격 3D이상의 조건에서 파일과 파일사이의 상대적인 거리(S/D)와 파일의 상대적인 길이(L/D)에 따른 지지력 저감계수(R) 평가방법을 제안하고자 하였다. Fig. 9(a)와 같이 지지력 저감계수(R)는 그룹 마이크로파일의 상대적인 거리(S/D)에 따라 다음과 같은 관계가 있는 것으로 나타났다.

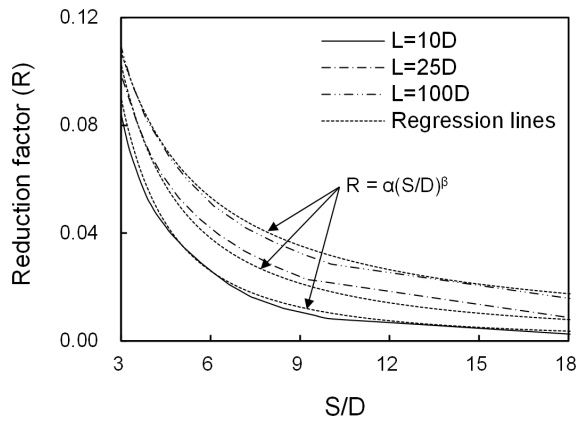
$$R = \alpha (S/D)^\beta \quad (9)$$

여기서 R = 지지력 저감계수, S = 파일과 파일사이의 거리, D = 마이크로파일의 직경, α , β = 상관계수이다. 본 식의 상관계수 (α , β)는 Fig. 9(b)와 같이 파일의 상대적인 길이(L/D)에 따라 변화되며 그 값은 다음과 같다.

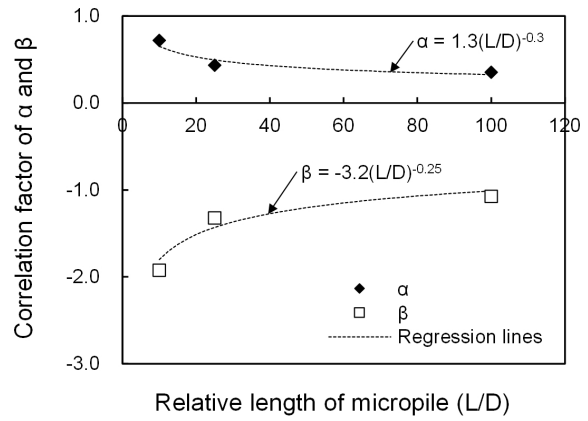
$$\alpha = 1.3 (L/D)^{-0.3} \quad (10)$$

$$\beta = -3.2 (L/D)^{-0.25} \quad (11)$$

여기서 L = 마이크로파일의 길이이다.



(a) Reduction factor (R)



(b) Correlation factor of α and β

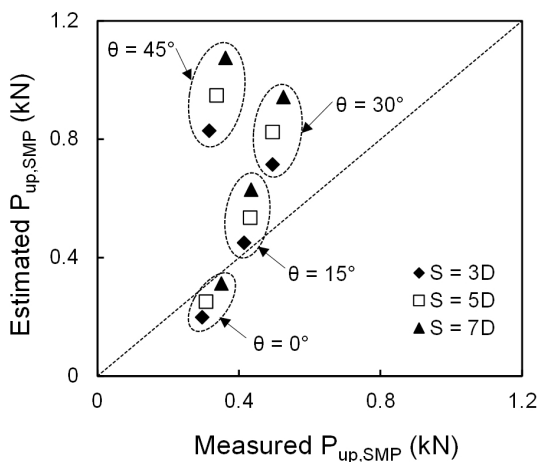
Fig. 9. Proposed model for uplift load carrying capacity of GMP based on Madhav (1987)

4.2 그룹 마이크로파일의 인발지지력 평가방법 검토

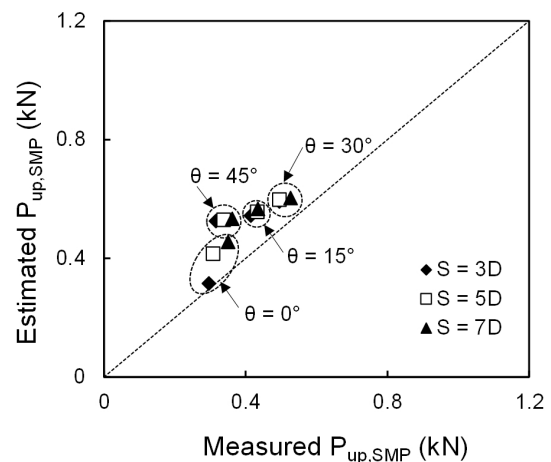
본 연구에서 제안된 방법들을 이용하여 그룹 마이크로파일의 인발지지력을 예측하고, 그 값을 측정값과 비교하였다. FHWA(2005)의 방법을 토대로 제안된 방법을 적용하기 위해, 조성된 지반의 단위중량(γ) 16kN/m^3 와 식 (6), (7), (8)을 활용하였으며, 그 결과는 Fig. 10(a)와 같다. 예측 결과 연직으로 설치된 그룹 마이크로파일의 경우 측정값과 예측값이 매우 유사한 값이 산정되는 것으로 나타났다. 그러나, 경사 마이크로파일의 경우에는 설치각도 15도에서 설치간격 5D까지는 비교적 유사한 값을 예측하는 것으로 나타났으나, 설치각도 15도의 7D와 설치각도 30도와 45도의 경우에 있어서는 매우 큰 지지력 값을 예측하게 되는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 FHWA(2005)의 방법을 토대로 제안

된 방법의 최대 적용범위는 설치각도 15도까지인 것으로 판단되며, 설치간격이 7D 이상이 되는 경우에는 연직으로 설치된 경우를 제외하고는 적용이 적절하지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서 Madhav(1987)의 방법을 토대로 제안된 방법의 적정성을 검토하기 위하여, 측정된 단일 마이크로파일의 지지력($P_{up,SMP}$)과 그룹 마이크로파일의 파일과 파일사이의 평균거리(S), 마이크로파일의 직경(D) 및 길이(L)를 활용하여, 그 값을 식 (3), (9), (10), (11)에 적용하였다. 그 결과는 Fig. 10(b)와 같다. Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이, 제안된 방법을 적용할 경우, 연직으로 설치된 마이크로파일과 경사로 설치된 마이크로파일 모두에서 비교적 적절한 값을 예측하는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 Madhav(1987)의 방법을 토대로 제안된 방법은 향후 연직 및 경사로 설치된 그룹 마이크



(a) Proposed method based on FHWA (2005)



(b) Proposed method based on Madhav (1987)

Fig. 10. Comparison and validation for proposed evaluation methods

로파일의 지지력을 예측하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 인발하중을 받는 단일 및 그룹 마이크로파일의 설치조건에 따른 인발지지력 특성을 확인하고 그룹 마이크로파일의 인발지지력을 예측할 수 있는 평가방법을 제안하여 그 적용성의 검토를 수행하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 단일 마이크로파일의 인발재하시험결과, 단일 마이크로파일의 인발하중-변위곡선은 모든 설치각도에서 일정한 하중에 수렴하는 거동이 발생하는 것으로 나타났으며, 설치경사에 따라 초기기울기가 감소하는 연성(Ductility)거동이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 단일 마이크로파일의 극한인발지지력은 경사설치시 연직설치에 비하여 큰 지지력이 발생되며, 설치각도 15도, 30도, 45도일 때 연직하중에 비하여 15%, 20%, 4% 각각 증가하는 특성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 조밀한 사질토지반에서의 단일 마이크로파일의 최적의 설치각도는 30도인 것으로 판단된다.
- (2) 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력($P_{up,GMP}$) 측정결과, 그룹 마이크로파일의 인발지지력은 설치각도와 설치간격에 따라 지지력의 변화가 발생되며, 설치각도의 변화에 따른 지지력의 변화가 주요하게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 그룹으로 설치된 마이크로파일의 사이의 평균적인 거리가 설치각도에 따라 크게 변화되기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 그룹 마이크로파일의 설치각도에 따른 지지력변화는 단일 마이크로파일과 같이 설치각도 30도에서 최대의 극한인발지지력이 측정되는 것으로 나타났다. 또한 설치간격이 증가할 때 다소 우수한 지지력이 발생하는 것으로 나타났으나, 그 차이는 설치각도에 의한 효과에 비하여 매우 미미한 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서는 단일 마이크로파일의 극한인발지지력을 측정하여 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수(η_{GMP})를 측정하였다. 측정결과, 그룹 마이크로파일의 그룹 효과 계수는 0.55에서 0.83의 범위에서 측정되는 것으로 나타났다. 그룹 마이크로파일의 그

룹 효과 계수는 설치간격이 증가함에 따라 큰 값이 측정되는 것으로 나타났으며, 설치각도 0도와 45도에서 유사한 수준의 그룹 효과 계수가 측정되는 반면, 설치각도 30도일 때 최대의 그룹 효과계수가 측정되는 것으로 나타났다. 이는 마이크로파일과 마이크로파일 사이의 영향범위의 중첩효과가 설치각도와 설치간격이 증가함에 따라 감소하는 동시에, 지반블록의 저항 효과는 설치각도 45도에서는 기대하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

- (5) 본 연구에서는 FHWA(2005)방법과 Madhav(1987)의 방법을 토대로 제안된 방법들을 이용하여, 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 극한인발지지력을 예측하고 측정결과와 비교하였다. 비교결과, FHWA(2005)의 방법을 토대로 제안된 방법은 설치각도 15도까지 적용이 가능한 것으로 판단되며, 설치간격이 7D 이상이 되는 경우에는 연직으로 설치된 경우를 제외하고는 적용이 적절하지 않은 것으로 나타났다. 반면, Madhav(1987)의 방법을 토대로 제안된 방법의 경우에는 연직으로 설치된 그룹 마이크로파일과 경사로 설치된 그룹 마이크로파일 모두에서 비교적 적절한 값을 예측하는 것으로 나타나, 향후 연직 및 경사로 설치된 그룹 마이크로파일의 지지력을 예측하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 연구과제(No. 2011-0030040, 2016R1D1A1A09919098)의 지원으로 수행된 연구결과와 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. AASHTO (2012), *AASHTO LRFD bridge design specifications*, LRFDUS-6, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
2. Alnuaim, A. M., El Naggar, H., and El Naggar, M. H. (2015), "Performance of Micropiled Raft in Sand Subjected to Vertical Concentrated Load: Centrifuge Modelling", *Can. Geotech. J.*, Vol. 52, pp.33-45.
3. Awad, A. and Ayoub, A. (1976), "Ultimate Uplift Capacity of Vertical and Inclined Piles in Cohesionless Soils", *Proc. of 5th International Conference on Soil Mech. and Found. Eng.*, Budapest, pp.221-226.

4. Bruce, D. A., Di Millio, A. F., and Juran, I. (1995), "Introduction to Micropiles: An International Perspective", *Foundation upgrading and repair for infrastructure improvement*, GSP50, pp.1-26.
5. FHWA (2005), *Micropile Design and Construction Reference Manual, FHWA NHI-05-039*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA).
6. Fukui, J. (2006), "Performance of Seismic Retrofits with High Capacity Micropile", *Proc. of 7th international workshop on micropile*, Lizzi lecture 2006, Schrobhausen, pp.1-14.
7. Hanna, A. M. and Afram, A. (1986), "Pullout Capacity of Single Batter Piles in Sand", *Can. Geotech. J.*, Vol.23, No.3, pp.387-392.
8. Hwang, T. H., Kim, J. H., and Kwon, O. Y. (2010), "The Effects of the Breadth of Foundation and Rock Layer on the Installation Method of Micro-piles", *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol.26, No.6, pp.29-38.
9. Hwang, T. H., Moon, K. R., Shin, Y. S., and Kwon, O. Y. (2012), "Installation of Micro-piles Appropriate to Soil Conditions", *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol.28, No.4, pp.55-65.
10. Kyung, D. H., Kim, G. R., Park, D. S., Kim, D. H., and Lee, J. H. (2015), "Uplift behavior of Group Micropile According to Embedded Pile Condition in Sand", *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol.31, No.2, pp.27-37.
11. Kyung, D. and Lee, J. (2017), "Uplift Load Carrying Capacity of Single and Group Micropiles Installed with Inclined Conditions", *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, Accepted.
12. Ischebeck, E. F. and Ischebeck, B. (2014), "Micropile Foundation for Vertical and Horizontal Loads-design Examples and Load Test Results", *Proc. of 12th International Workshop on Micropile*, Krokow, pp.1-20.
13. Lee, J. H., Kyung, D. H., Hong, J. M., and Kim, D. W. (2011), "Experimental Investigation of Laterally Loaded Piles in Sand under Multilayered Conditions", *Soils and Foundations*, Vol.51, No.5, pp.915-927.
14. Lee, T. H. and Im, J. C. (2006), "Experimental Study on the Reinforcement Effect of Installed Micropiles in the Surround of Footing on Dense Sand", *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol.22, No.5, pp.69-81.
15. Madhav, M. R. (1987), "Efficiency of Pile Groups in Tension", *Can. Geotech. J.*, Vol.24, pp.149-153.
16. Meyerhof, G. G. (1973), "Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles", *Proc. of 8th International Conference on Soil Mech. and Found. Eng.*, Moscow, Vol.2, pp.167-172.
17. Nazir, A. and Nasr, A. (2013), "Pullout Capacity of Batter Pile in Sand", *J. of Advanced Reserch*, Cairo University, Vol.4, pp. 147-154.
18. Oh, J. B., Hwang, T. H., Huh, I. G., Shin, J. H., and Kwon, O. Y. (2015), "Horizontal Bearing Characteristics of Micropiles with the Length Ratio and Installation Angle of Pile." *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol.31, No.6, pp.5-13.
19. Sailsbury, N. G. and Davidow, S. A. (2014), "Current Design and Construction Practices for Micropile Supported Foundations of Electrical Transmission Structures in North America", *The 12th International Workshop on Micropile*, Krokow, pp.1-7.
20. Sharma B., Zaheer, S., and Hussain, Z. (2014), "An Experimental Model for Studying the Performance of Vertical and Batter Micropiles", *Geo-Congress 2014*, GSP 234, Atlanta, pp.4252-4264.
21. Shelke, A. and Patra, N. R. (2008), "Effect of Arching on Uplift Capacity of Pile Groups in Sand", *J. of Geomech.*, ASCE, Vol.8, No.6, pp.347-354.
22. Tompson, F., Salisbury, N., Khattak, A., Hastings, A., and Foster, M. (2009), "Integration of Optimum High Voltage Transmission Line Foundation", *Electrical Transmission and Substation Structure Conference*, ASCE, Fort Worth, pp.94-105.
23. 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 : December 14th, 2016

Revised : January 11th, 2017

Accepted : January 16th, 2017