파일의 단면변화에 따른 마이크로파일의 보강효과

Reinforcement Effect of Micropile According to the Pile Section Change

황의필* · 양우열** · 이강일***

Hwang, Eui-Pil*, Yang, Woo-Yeol**, and Lee, Kang-Il***

Abstract

Micropiles composed of steel bars and grout are used to improve the bearing capacity of existing foundations, and their use is gradually increasing. As the utilization of micropiles increases, various studies have been conducted. However, there are insufficient studies on the reinforcement effect of micropiles due to changes in the pile diameter, which affects the stiffness of the pile. In this study, the reinforcement effect of micropiles according to the pile section changes was evaluated through numerical analysis, and the reinforcement effect of the pile on the foundation was at least doubled.

Key words : Micropile, Pile Diameter, Stiffness of Pile, Reinforcement Effect, Numerical Analysis

요 지

강봉과 그라우트로 구성된 마이크로파일은 기존 구조물의 지지력 향상을 위해 활용되고 있으며, 마이크로파일의 활용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 마이크로파일의 활용이 증가함에 따라 다양한 연구가 진행되었으나, 대부분 파일강성에 영향을 끼치는 파일직경 변화에 따른 마이크로파일의 보강효과에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수치해석을 통해 파일 단면변화에 따른 마이크로파일의 보강효과를 평가하였고, 전면기초에 대한 파일의 보강효과는 2배 이상인 것으로 조사 되었다.

핵심용어 : 마이크로파일, 파일강성, 파일직경, 보강효과, 수치해석

1. 서 론

기존 구조물의 지지력 보강, 침하억제를 목적으로 주로 활용된 마이크로파일은 파일재료의 발달과 연구결과를 바탕으로, 최근에는 신설구조물 지지, 사면활동 억제, 구조물의 내진보강 등 지반공학적인 문제를 해결하기 위해 많이 활용되고 있다. 파일직경이 300 mm 이하인 소구경 현장타설 콘크리트 말뚝인 마이크로파일은 강봉, 강봉을 둘러싸고 있는 그라우트와 케이싱으로 구성되는 합성말뚝이라 할 수 있다. 이에 마이크로파일의 지지력은 강봉, 그라우트, 케이싱의 강성, 파일내 단면적 등 특성에 따라 크게 달라진다.

트, 케이싱의 강성, 파일내 단면적 등 특성에 따라 크게 달라진다.

즉 마이크로파일을 구성하는 강봉과 그라우트의 강성과 단면적에 따라 마이크로파일-레프트의 지지력도 달라지므로, 구조물의 지지력 보강을 위해 마이크로파일을 활용할 경우, 파일구성 재료의 특성에 따라 마이크로파일의 보강효과 역시 달라진다. 또한 마이크로파일은 파일의 단면적이 길이에 비해 매우 작으므로 그라우트와 지반의 경계에 발휘되는 마찰특성에 지지력이 크게 좌우된다. 즉 이 파일은 마찰말뚝 중 하나라 할 수 있다(FHWA, 2005). 특히 파일과

*정회원, 대전대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail: ephwang@i-sh.co.kr)

Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Daejin University

**정회원, 대전대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail: ywy4252@naver.com)

Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Daejin University

***교신저자, 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-31-539-2024, Fax: +82-31-539-2020, E-mail: kilee@daejin.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

지반의 경계부에 발휘되는 마찰특성 중 점착력에 따라 지지력이 달라질 수 있다.

마이크로파일-레프트의 지지력에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다(Han and Ye, 2006; Tsukada et al., 2006; Hwang and Kwon, 2011; Hong et al., 2012; Han et al., 2013). 그러나 기존 연구들의 대부분은 파일길이, 파일직경 등 설치조건에 관한 것으로, 마이크로파일체(Micropile structure)의 강성과 지반/파일의 경계부의 마찰특성의 변화가 고려되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 파일의 강성과 경계부의 마찰특성의 변화에 따른 전면기초에 대한 마이크로파일의 보강효과를 평가하기 위해 강봉과 그라우트의 단면적, 마찰특성과 관계되는 지반 점착력을 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과, 파일의 강성변화에 따른 마이크로파일의 보강효과는 2.0~4.5배정도인 것으로 조사되었다.

2. 문헌연구

마이크로파일은 통상 지반천공, 강봉 삽입, 그라우팅, 두부정리 순으로 설치된다(지반조건에 따라 케이싱 설치여부 결정). 이 같은 마이크로파일의 설치방법을 고려해 FHWA (2005)는 마이크로파일체의 압축지지력(Allowable compression load of micropile structure, $P_{c(min)}$)을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$P_{c(min)} = 0.4f_{c(g)} \times A_g + 0.47f_{y(s)} \times (A_s + A_c) \quad (1)$$

여기서, $f_{c(g)}$ 와 $f_{y(s)}$ 는 그라우트와 강봉의 일축압축강도와 항복강도를 말한다. A_g , A_s , A_c 는 그라우트, 강봉, 케이싱의 단면적이다.

또한 마이크로파일체의 축강성(Axial rigidity of micropile structure, $E_p A_p$)은 다음과 같이 제안하였다.

$$E_p A_p = E_s A_s + E_g A_g \quad (2)$$

여기서, E_s 와 E_g 는 강봉과 그라우트의 탄성계수를 말한다($E_s = 2.10 \times 10^8$ kPa; $E_g = \sqrt[3]{(4732 \sigma_{(g)ck})}$).

또한 지반과 그라우트의 마찰특성을 고려해 마이크로파일의 외적지지력(External bearing capacity, $P_{e(mic)}$)은 다음과 같이 제안하였다.

$$P_{e(mic)} = \frac{\alpha}{F_s \times \pi \times D \times L_b} \quad (3)$$

여기서, α 는 지반/파일의 부착력, D 는 마이크로파일의 전체직경, L_b 는 마이크로파일의 정착 길이(Bonded length of micropile), F_s 는 안전율(통상 2.5 적용)을 의미한다.

Eqs. (1) and (2)는 마이크로파일이 기존 파일과 다른

합성재료의 파일임을 말해주며, 마이크로파일의 지지력과 강성은 파일재료의 특성과 단면적에 따라 좌우됨을 보여준다. 또한 마이크로파일의 지지력은 Eq. (3)에 보인 바와 같이 파일과 지반의 부착력에 관계됨을 알 수 있다. 즉 지반의 점착력에 따라 파일의 지지력이 좌우됨을 알 수 있다.

마이크로파일이 강성변화에 따라 지지력이 크게 좌우됨은 기존 연구들을 통해서도 알 수 있다. Poulos and Davis (1980)는 파일강성과 관계된 파일길이 비(Pile length ratio, L/D ; where L =Pile length, D = Pile diameter)에 따라 파일조건과 지반/파일의 상호거동이 달라지고, 파일조건에 따라 강제 또는 연성파일거동을 보인다고 제안한 바 있다.

또한 Lee and Im (2006)과 Tsukada et al. (2006)은 마이크로파일-레프트의 지지특성을 연구하기 위해 모형시험을 수행하였다. 이들 연구결과를 보면 마이크로파일-레프트의 기초 파괴형상은 얇은 기초의 파괴형상과 유사함을 알 수 있다. Hwang and Kwon (2011)과 Hwang et al. (2012)는 파일길이 비에 따라 파일거동이 상이해짐을 고려해 파일길이 비를 달리한 마이크로파일-레프트의 지지특성을 조사하였다. 그리고 파일조건에 따라 마이크로파일 역시 파일거동특성과 마이크로파일-레프트의 지지력 역시 달라짐을 보인 바 있다.

이 처럼 마이크로파일의 강성조건은 파일의 지지특성을 연구하는 데 매우 중요한 고려인자라 할 수 있다. 또한 지반점착력에 따라 마이크로파일-레프트의 지지특성 역시 달라질 수 있다.

그러나 기존 연구들을 검토한 바, 대부분 연구가 파일길이와 직경에 국한되는 문제가 있다. 이는 마이크로파일의 외적 지지특성에 관한 것으로, 마이크로파일의 지지특성과 이에 따른 파일의 보강효과를 평가하기 위해서는 좀 더 다양한 조건을 고려한 연구가 요구된다.

3. 현장시험

연구목적에 부합되는 결과도출을 위해서는 원형 마이크로파일에 대한 지지거동에 대한 조사가 요구된다. 이에 본 연구에서는 ∞ 역사의 정거장 증축공사 현장에서 현장재하 시험을 수행하였다.

현장지반은 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 매립토, 풍화토층 그리고 풍화암층으로 구성된 것으로 조사되었다. 매립토층 $N = 5/30 \sim 10/30$ 인 느슨 또는 중간정도 밀도인 모래지반이었고, 지층두께는 약 4 m인 것이었다. 풍화토층은 $N = 13/30 \sim 48/50$ 정도의 중간 ~ 조밀한 모래지반이었으며, 지층두께는 12 m 정도였다. 또한 매립, 풍화토층의 하부에 존재하는 $N = 50/10$ 이하의 풍화암층은 암반층의 파쇄가 매우 심한 것으로 조사되었다.

마이크로파일은 지반조건과 파일상부의 작용하중(Working load, $P_w = 400$ kN)을 고려해 설계 되었다. 파일의 구조검토를 통해 적용된 마이크로파일의 단면은 전체직경 $D = 200$

mm이고, 강봉의 직경 $d_{br} = 75$ mm이다. 그리고 파일길이는 총 21 m (풍화토층의 파일길이 = 16 m; 풍화암층의 파일길이 = 5 m)이다(Fig. 1a).

(a) pile and soil condition

(b) photography of field compression test

Fig. 1. Field Compression Test of Micropile

현장 압축시험은 FHWA (2005)에서 제안한 시험과정을 준수하여 진행하였다. 파일두부 하중제하는 단계별 하중에 따른 탄, 소성 파일변위 관측이 가능토록 재하, 제하과정을 반복해 가하였다. 시험 최종단계에서의 시험하중은 설계 시 지지력의 2.0배 이상이다(최대 압축하중 $P_{T(max)} = 940$ kN > 800 kN). 하중제하과정은 재하, 제하과정(Load and unloading)을 순차적으로 적용하였고, 4단계로 시험하중을 구분해 하중을 증가시켰다(Step load $P_T = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 P_w$).

단계별로 하중을 증가시키는 경우 파일두부의 변위가 시간경과에 따라 상이할 수 있다. 이에 하중단계별로 하중지속시간을 두었으며, 파일변위가 수렴되면 다음 단계의 하중을 가하였다. 이 같은 과정을 반복적으로 수행해 마이크로파

일의 두부변위를 측정하였다.

Fig. 2는 현장시험을 통해 조사된 마이크로파일의 하중-변위관계를 보인 것이다. Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 시험하중 $P_T = 940$ kN(최종 단계) 인 경우, 파일두부에 발생한 파일의 총 변위(Total displacement)는 9.482 mm이었다.

Fig. 2(b)는 시험결과 하중증가에 따른 파일의 탄, 소성변위(Elastic and plastic displacement, δ_e and δ_p)를 보인 것이다. 하중 단계별로 발생된 탄성변위는 하중이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 이 때 발생된 최대 탄성변위 $\delta_{e(max)}$ 는 7.052 mm이었다. 파일의 소성변위는 하중 초기단계에서 소성변위가 발생되지 않으나, 시험하중이 작용하중의 1.0배 이상이면($P_T \geq 1.0P_w$), 소성변위는 비선형적으로 증가하는 것으로 조사되었다. 파일의 최대 소성변위 $\delta_{p(max)}$ 는 2.430 mm이었고, 소성변위가 탄성변위보다 작게 발생 되었다.

(a) load-settlement

(b) elastic and plastic displacement

Fig. 2. Field Test Results

4. 수치해석

파일강성의 변화에 따른 전면기초에 대한 마이크로파일의 보강효과를 조사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 활용

한 프로그램은 지반설계 시 주로 활용하는 유한요소해석 프로그램인 MIDAS NX이다. 수치해석을 통해 마이크로파일의 보강효과를 평가하기 위해 무엇보다 중요한 것이 마이크로파일의 지지특성에 대한 모사 가능성 여부라 할 수 있다.

이에 Fig. 1과 같이 수행한 현장시험과정을 동일하게 모사하여 해석을 수행하였고(Condition 1: Micropile only), 현장 시험과 수치해석의 비교결과를 통해 수치해석으로 파일 지지거동의 모사가 가능함을 확인하였다. 또한 전면기초(Condition 2: Raft only)와 각 조건별 마이크로파일-레프트(Condition 3: Micropiled raft)를 모델링하여 해석을 수행하였고, 이를 종합적으로 비교, 분석하였다.

4.1 모델링(Modelling)

Fig. 3은 수행한 현장시험을 모델링한 해석단면을 보인 것이다. 모델링 시 지반은 조사결과를 고려해 매립토(Loosed sand), 풍화토(Medium sand, 풍화암(Dense sand)층으로 구분하였다. 지반의 해석단면 크기(가로×세로)는 60 × 25 m이고, 모델요소는 2차원 면 요소(2D-Plane element)이며, 요소크기(Mesh size)는 파일에 인접한 요소의 경우 촘촘하게(Mesh size = 0.5 m), 파일과 이격된 요소의 경우 느슨하게(Mesh size = 2.0 m) 형성시켰다. 지반의 경계조건은 해석단면의 측면부 경우 수평변위 구속을, 해석단면의 바닥부 경우 수직, 수평 회전변위 구속을 적용하였다.

모델링한 마이크로파일은 Fig. 1(a)에 보인 원형파일의 구조와 길이와 동일하다($D = 200 \text{ mm}$; $d_{\text{bar}} = 75 \text{ mm}$; $L = 21 \text{ m}$). 마이크로파일의 중심에 위치하는 강봉은 1차원 빔요소(1D-Beam element)로, 그라우트는 2차원 면 요소로 모델링하였다.

파일과 지반의 인터페이스는 MIDAS (2010)에서 제시한 바와 같이 파일과 지반의 거동특성을 모사하고자 Eqs. (4),

(5)와 같이 수직, 전단탄성계수(K_n and K_t)를 적용해 모사하였다.

$$K_n = E_s / t_v \quad (4)$$

$$K_t = R \cdot G_s / t_v \quad (5)$$

E_s 와 G_s 는 흙의 탄성, 전단탄성계수이다. R 과 $t_v(=0)$ 는 강도감소계수와 가상두께를 의미한다. 파일두부의 작용하중은 정하중 조건(Static load)으로, 현장시험에서 적용한 단계별 하중을 동일하게 가하였다.

Fig. 4는 파일강성의 변화에 따른 마이크로파일의 보강효과를 평가하기 위한 전면기초와 마이크로파일-레프트의 해석단면을 보인 것이다. Eq. (3)에 보인 바와 같이 마이크로파일의 지지력 부착력에 영향을 받는다. 그러나 현장지반과 같이 하부지반조건이 암반층인 경우 상이한 지반특성 때문에 지반점착력이 마이크로파일-레프트의 지지특성에 끼치는 영향을 명확히 규명하기란 쉽지 않다.

이에 본 연구에서는 연구목적에 부합되도록 지반을 Fig. 4에 보인 바와 같이 단일지반으로 모델링하였고, 모델링 시 지반점착력을 달리 적용하였다. 해석단면, 모델요소의 크기는 Fig. 3과 동일한 크기이고, 적용된 경계조건 역시 동일하다. Fig. 4에 보인 지표면에 위치한 전면기초는 2D 면요소로 모델링하였고, 파일 간의 간격(적정 파일간격 3.0D 이상)을 고려한 기초 크기(가로×세로)는 $3 \times 0.5 \text{ m}$ 이다.

기초상부의 하중은 등분포 하중으로 모델링하였으며, 단계 별 하중크기는 13.0 kN/m이다. Fig. 4(b)에 보인 바와 같이 모델링한 마이크로파일의 구조는 Fig. 3의 파일구조와 동일하다. 그러나 Eq. (2)에 보인 바와 같이 재료특성과 단면적에 좌우되고 재료특성이 상수 값을 감안하여 파일의 강성이 변하도록 마이크로파일과 강봉의 직경을 달리하였다.

Fig. 3. Analysis Modelling to Depict the Field Compression Test of Micropile (Micropile only)

Fig. 4. Analysis Modelling on the Micropile and Micropiled Raft

4.2 재료물성 및 해석조건

해석결과에 대한 신뢰성은 적용된 재료 물성값에 따라 달라진다. 특히 지반의 탄성계수는 해석결과에 지대한 영향을 끼치므로, 이에 본 연구에서는 수행한 현장시험을 바탕으로 역해석(Back analysis)을 수행하여 지반의 탄성계수를 결정하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 모델링시 지반 탄성계수를 반복적으로 변화시켜 해석을 수행하였고, 해석결과와 현장시험 결과를 비교해 가장 유사한 결과가 도출된 지반 탄성계수 값을 모델링시 입력데이터로 결정하였다.

또한 지반탄성계수를 제외한 각각의 재료물성 값은 실무에서 설계시 적용되는 값을 고려해 선정하였으며(Bowles,

1997; Shin, 2015; Sim et al., 2015), Table 1과 같다. 재료의 해석모델은 Tab. 1과 같이 지반인 경우 Mohr-Coulomb model, 구조물은 Elasto-plastic model을 적용하였다.

Table 2는 파일의 강성과 지반점착력 변화에 따른 마이크로파일의 지지특성 및 보강효과를 평가하기 위해 고려한 해석조건을 보인 것이다. Table 2에 보인 바와 같이 마이크로파일과 강봉의 직경은 실제 현장에서 많이 적용되는 직경을 적용하였으며, 이 때 적용된 마이크로파일의 전체직경은 100 ~ 300 mm, 강봉의 직경 d_s 는 10~ 70 mm이다. 또한 지반점착력은 0 ~ 30 kPa 까지 변화시켜 해석을 수행하였다. 이와 같이 수행한 해석과정은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5. Analysis Steps

Table 1. Material Properties

Material	E(kPa)	ν	γ' (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	Analysis model
Loosed sand	20,000	0.25	15.00	0	25 $^{\circ}$	Mohr-Coulomb
Medium sand	50,000	0.30	17.50	0 ~ 30	30 $^{\circ}$	"
Dense sand	150,000	0.35	19.62	10	35 $^{\circ}$	"
Raft(Con*c)	24,500,000 ¹⁾ (24,518,242.7)	0.17	23.5	-	-	Elasto-plastic
Steel bar	210,000,000	0.35	78.5	-	-	"
Grout ²⁾	23,400,000 ²⁾ (23,450,855.5)	0.17	23.5	-	-	"

¹⁾ $E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{(\sigma_{ck} + 8)}$ (MPa), where σ_{ck} = compressive strength of concrete (KR, 2012)

²⁾ $E_g = \sqrt{4732\sigma_{(g)ck}}$ (MPa), where $\sigma_{(g)ck}$ = compressive strength of grout

Table 2. Conditions of Raft Only and Micropiled Raft in Numerical Analyses

Model type	c (kPa)	Micropile conditions			
		Length, L (m)	Space, s (m)	Dia. of pile, D (mm)	Dia. of bar, d _{bar} (mm)
Raft only	0, 10, 20, 30	-	-	-	-
Micropiled raft	0	20	3(s≥4D)	100	10, 30, 50, 70
				200	10, 30, 50, 70
				300	10, 30, 50, 70
	10	20	3(s≥4D)	100	10, 30, 50, 70
				200	10, 30, 50, 70
				300	10, 30, 50, 70
	20	20	3(s≥4D)	100	10, 30, 50, 70
				200	10, 30, 50, 70
				300	10, 30, 50, 70
	30	20	3(s≥4D)	100	10, 30, 50, 70
				200	10, 30, 50, 70
				300	10, 30, 50, 70

5. 해석결과 및 분석

해석결과로부터 전면기초(Raft only) 와 마이크로파일-레프트의 지지력은 Han and Ye (2006), Hwang et al. (2012) 등이 적용한 기초 폭에 대한 침하량 10% 또는 침하량 25 mm에 해당하는 하중으로 결정하였다. 또한 각 조건별 마이크로파일의 보강효과를 평가하기 위해 다음과 같이 전면기초에 대한 마이크로파일-레프트의 지지력비(Bearing capacity ratio, BCR)를 적용하였다.

$$BCR = \frac{Q_{MR}}{Q_R} \quad (6)$$

여기서, Q_{MR} 은 마이크로파일-레프트의 지지력, Q_R 은 전면기초의 지지력을 말한다.

5.1 마이크로파일의 지지거동

마이크로파일, 마이크로파일-레프트의 지지특성 관련 연구 성과들은 수치해석, 모형시험을 통해 몇몇 연구자들에 의해 제안되었다. 특히 모형시험과 수치해석결과를 비교한 Lee and Im (2006)과 Hwang and Kwon (2011), Hwang et al. (2012)의 연구들은 수치해석방법도 마이크로파일-레프트의 지지특성을 연구하는 데 문제가 없음을 보였다. 그러나 이들 연구들은 대부분 모형파일을 대상으로 한 것으로, 원형 마이크로일을 대상으로 수치해석의 모사가능 여부도 조사되어야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 현장시험을 동일하게 모델링하였고, 현장시험과 해석결과를 비교하였고, 비교결과는 Figs. 6, 7과 같다.

마이크로파일의 변위형상은 Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 파일상부에 변위가 집중되고, 파일하단부 변위가 상부보다 작게 발생하였다. 또한 마이크로파일의 인접한 지반에 전이되는 변위 역시 파일상부에 집중되었다.

해석결과와 변위벡터를 검토한 바, Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 수직하중 증가로 파일두부의 인접지반에서 용기가 발생되고, 지중 내 파일과 지반변위는 하향으로 발생되고 있음을 알 수 있다. 이 같은 결과는 수직하중에 대한 마이크로파일의 저항력이 파일의 주변마찰특성에 의함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

(a) displacement contour

(b) vector of displacement

Fig. 6. Results of Numerical Analysis on Micropile Only

Fig. 7은 현장시험과 해석결과로부터 조사된 마이크로파일의 하중-변위관계를 비교한 것이다. FHWA (2005)에서 제안한 침하기준(파일직경에 대한 파일두부변위 10%)을 적용한 경우, 해석결과로부터 조사된 마이크로파일의 지지력은 약 1250 kN 이었다(현장시험 = 1475 kN). 그리고 현장시험과 수치해석결과는 Fig. 7에 보인 바와 같이 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7. Comparison of Field Test and Numerical Analysis

또한 Fig. 10(a)에 보인 조사된 파일강성이 작은 마이크로파일-레프트의 거동특성은 Lee and Im (2006)와 Hwang and Kwon (2011), Hwang et al. (2012)의 연구에서 조사된 거동특성과 유사하고, 파일강성이 큰 경우 Fig. 10(b)과 같은 파일내 지반에 큰 변위가 발생되는 기초시스템의 거동은 Han and Ye (2006)의 연구시 조사된 거동특성과 유사하다.

이 같은 비교결과는 해석모델링이 문제가 없으며, 수치해석을 통해 추가 연구가 가능함을 보여주는 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 비교결과를 바탕으로 연구목적에 부합되도록 수치해석을 통해 마이크로파일-레프트의 지지특성에 대해 조사하였다.

5.2 기초시스템의 지지거동

5.2.1 전면기초(Raft only)

Fig. 8은 지반점착력 $c = 0$ kPa인 경우의 해석결과를 보인 것이다. 해석결과로부터 조사된 지반점착력의 변화에 따른 전면기초의 거동에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다. 전면기초의 하부지반은 하중증가로 인해 지중으로 변위가 전이되고 인접지반에도 지반응기가 발생하는 것으로 조사되었다.

Fig. 9는 점착력 변화에 따른 전면기초의 지지특성을 보인 것이다. 점착력의 변화에 따른 하중-변위관계는 Fig. 9(a)에 보인 바와 같이 지반점착력이 증가함에 따라 하중증가로 인해 발생된 기초의 침하량이 감소하였다. 이 관계로부터

조사된 전면기초의 폭에 대한 침하량 10%인 경우의 하중은 약 293~626 kN인 것으로 조사되었다.

Fig. 8. Result of Numerical Analysis on Raft Only for $c = 0$ kPa

(a) load-settlement relationship

(b) bearing capacity by soil cohesion

Fig. 9. Bearing Characteristic of Raft Only

Fig 9(b)에 보인 바와 같이 점착력이 증가함에 따라 기초의 지지력도 증가하였다. 각 조건별 비교결과, 점착력 $c = 30$ kPa인 경우 전면기초의 지지력은 $c = 0$ kPa인 경우의 지지력보다 2.13배 증가 하였다.

5.2.2 마이크로파일-레프트(Micropiled-raft)

Fig. 10은 $c = 0$ kPa이고 파일직경 100 mm (강봉직경 10 mm)과 직경 200 mm (강봉직경 50 mm)인 경우 수치해석을 통해 조사된 마이크로파일-레프트의 변위형상을 보인 것이다. Fig. 10에 보인 바와 같이 파일강성에 따라 기초시스템의 변위형상이 상이함을 알 수 있다.

(a) $D=100\text{mm}(d_s=10\text{mm})$ and $c=0\text{kPa}$

(b) $D=200\text{mm}(d_s=50\text{mm})$ and $c=0\text{kPa}$

Fig. 10. Displacement Contour of Micropiled Raft

Fig. 11은 대표되는 마이크로파일-레프트의 하부지반 변위형상을 보인 것이다. 해석결과를 통해 조사된 각 조건별 파괴형상은 지반점착력에 큰 영향을 받지 않으나, 파일단면 변화에 크게 좌우되는 것으로 조사되었다. 파일단면이 작은 경우는 Fig. 11(a)에 보인 바와 같이 파일상부 인접지반의 변위형상이 파일상부에 집중되고

얕은 기초의 파괴형상(Fig. 8a)과 유사한 지반변위가 발생 되는 반면, 파일과 강봉의 단면이 상대적으로 큰 경우 Fig. 11(b)에 파일 내 지반변위가 집중되고 파일전체에서 변위가 발생됨을 알 수 있다.

이 같은 기초시스템의 파괴형상은 파일단면이 작은 경우 마이크로파일은 국부적으로 휨 변형이 발생하는 연성파일 조건과 같이 파일 휨 강성에 의해 지반은 구속하고 있음을 말해준다. 또한 파일단면이 큰 경우는 파일강성이 크므로 기존 파일과 같이 파일전체에 변위가 수반되는 강체파일조건과 같이 거동하고 있음을 말해준다. 즉 파일단면에 따라 지반/파일상호거동이 상이함을 보여준다.

(a) flexible pile condition

(b) rigid pile condition

Fig. 11. Comparison of Displacement Contour for $\delta/B = 10\%$

6. 마이크로파일 보강효과

6.1 지반점착력에 따른 보강효과

Fig 12는 강봉직경 10 mm인 경우($d_s = 10$ mm) 전면기초와 마이크로파일-레프트의 지지력을 Eq. (4)와 같이 지지력비 BCR로 환산해 조건별로 비교한 것이다. Fig. 12(a)에 보인 바와 같이 지반점착력이 증가함에 따른 마이크로파일의 레프트 지지력비는 약 2.0 ~ 4.0 정도였다. 또한 강봉직경이 30 ~ 75 mm인 경우, 지반점착력에 따른 마이크로파일-레프트의 지지력비는 Figs. 12(b) ~ 12(d)에 보인 바와 같이 2.1 ~ 4.5 정도 인 것으로 조사되었다.

점착력에 따른 마이크로파일-레프트의 지지력비의 변화는 지반점착력이 작은 경우 Fig 13에 보인 바와 같이 파일의 전체직경과 강봉의 직경변화에 따라 지지력비가 차이를 보였다. 그러나 지반점착력이 큰 경우는 파일 직경의 변화에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었다. 이 같은 조사된 연구결과의 요인은 마이크로파일의 구조와 하중전이특성에서 찾을 수 있다.

Fig. 12. BCR of Micropiled Raft by Cohesion of Soil

마이크로파일은 우선 강성이 다른 강봉과 그라우트로 구성되며, 이 때문에 파일의 하중전이특성은 강봉, 그라우트, 지반 순으로 전이된다. 그러므로 파일 인접지반보다 파일체의 재료특성에 크게 좌우되는 특성을 보인다. 즉 이 같은 마이크로파일-레프트의 지지력비에 대한 결과는 인접지반의 특성보다 파일체를 구성하는 재료 특성에 기초시스템의 지지특성이 좀 더 좌우됨을 보여준다.

6.2 파일직경에 따른 보강효과

Fig. 13은 파일직경과 강봉직경에 따른 마이크로파일-레프트의 지지력비를 비교한 것이다. 지반점착력이 0 kPa 인 경우 Fig. 13(a)에 보인 바와 같이 마이크로파일-레프트의 지지력비는 약 3.9 ~ 4.5이었으며, 파일직경과 강봉직경이 증가함에 따라 기초시스템의 지지력비 역시 증가하였다. 또한 파일직경이 가장 큰 300 mm인 경우 마이크로파일-레프트의 지지력비 증가는 크지 않은 반면, 파일직경이 상대적으로 작은 100 mm인 경우 강봉직경이 증가함에 따라 지지력비의 증가도 큰 것으로 조사되었다. 파일직경 300 mm이고 강봉의 직경 75 mm인 마이크로파일-레프트의 지지력비가

최대인 것으로 조사되었다.

지반점착력이 10kPa인 경우 마이크로파일-레프트의 지지력비는 Fig. 13에 보인 바와 같이 약 3.5 ~ 4.0 정도였고, 점착력이 20 kPa인 경우 지지력비는 약 2.5 ~ 2.8이었다. 또한 지반점착력 30 kPa인 경우의 지지력비는 1.8 ~ 2.3 정도인 것으로 조사되었다. 이 같은 연구결과에서 특이한 것은 파일직경 작은 증가한 경우 강봉의 직경증가에 따른 기초시스템 지지력비의 증가가상대적으로 파일직경이 큰 경우보다 크다는 점이다. 이 같은 요인은 마이크로파일의 지반 파일의 상호거동에 따라 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

이는 Fig. 11에 보인 바 같이 마이크로파일의 강성에 따라 기초시스템의 거동은 강성이 작은 경우 (파일과 강봉의 직경이 작은 경우)연성파일 거동을 보인 반면, 강성이 큰 경우(파일과 강봉의 직경이 큰 경우)는 파일전체에서 하중을 부담하는 강체파일거동을 보이기 때문이라 판단된다. 즉 파일직경이 작은 경우 인접지반에 대한 마이크로파일의 구속효과(Tsukada et al., 2006)에 의해 마이크로파일 보강효과가 좌우되는 반면, 파일직경이 큰 경우 파일체의 강성에 따라 기초에 대한 마이크로파일의 보강효과가 좌우된다 할 수 있다.

Fig. 13. BCR of Micropiled Raft by the dia. of Micropile

또한 점착력에 따라 전면기초는 Fig. 9에 보인 바와 같이 지지력의 증가가 크다. 또한 점착력이 증가함에 따라 동일 길이로 설치된 마이크로파일-지지력도 증가하나, 점착력의 증가로 인한 마이크로파일-레프트의 지지력 증가는 전면기초인 경우보다 상대적으로 작으므로 지지력비가 차이를 보였다. 따라서 파일강성에 따라 지지력비가 상이해진 것으로 판단된다.

현장에서는 통상 마이크로파일을 기존 파일과같은 설계 방법으로 설치방법 및 기존 기초의 보강방법이 결정된다. 그러나 본 연구결과에서도 알 수 있듯이 마이크로파일의 강성에 따라 지반과 파일강성이 달라지므로 이를 고려한 보강방법이 강구되어야 할 것이며, 전면기초에 대한 마이크로파일의 보강효과는 적어도 2배 이상 기대할 수 있다.

7. 결 론

본 연구는 마이크로파일 강성조건의 변화에 따른 마이크로파일의 보강효과를 평가하기 위해 수치해석방법으로 전면기초와 파일직경이 상이한 마이크로파일-레프트의 지지

특성을 평가하였으며, 세부적인 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 파일체, 그라우트, 지반 순으로 전이되는 마이크로파일의 하중전이특성으로 인해 마이크로파일-레프트의 지지특성은 파일직경이 큰 경우 인접지반의 점착력 변화보다 마이크로파일의 직경변화에 크게 좌우되는 반면, 파일직경이 작은 경우 점착력의 변화에 지지력 증가가 좌우되었다.
- (2) 파일축강성이 작은 마이크로파일-레프트의 거동은 파일내의 지반과 인접지반으로 변위가 전이되는 특성을 보인 반면, 상대적으로 파일의 축강성이 큰 파일직경인 경우 파일내의 지반에 변위가 집중되는 특성을 보였다.
- (3) 전면기초에 대한 마이크로파일의 보강효과는 파일단면이 작은 경우 파일의 구속효과에, 파일단면이 큰 마이크로파일은 파일체의 강성에 따라 좌우되며, 전면기초에 대한 보강효과가 적어도 2배 이상 발휘되었다.

본 연구결과는 이상화된 지반조건을 모사한 수치해석을

통해 도출된 결과로, 파일길이와 다층지반 등 파일길이와 현장지반조건에 따라 결과가 상이 할 수 있어 좀 더 다양한 조건을 반영한 연구가 요구된다.

References

- Bowles, J.E. (1997). *Foundation analysis and design*. New York: McGraw-Hill, pp. 315-316.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2005). *Micro-pile design and construction*. FHWA NHI-05-039, Unite States Department of Transportation, pp. 5-1-5-18.
- 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.
- Han, J.T., Kim, S.R., Jang, Y.E., and Lee, S.H. (2013). Evaluation of bearing capacity of waveform micropile by numerical analyses. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5906-5914.
- Hong, W.P., Cho, S.D., Choi, C.H., and Lee, C.M. (2012). Skin friction mobilized on pack micropiles subjected to uplift force. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 19-29.
- Hwang, T.H., and Kwon, O.Y. (2011). Installation methods of micro-piles by the length ratio of pile and the depth of rock layer. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 5-20.
- Hwang, T.H., Mun, K.R., Shin, Y.S., and Kwon, O.Y. (2012). Installation of micro-piles appropriate to soil conditions. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 55-65.
- KR. (2012). *Working stress design method*. Korea Rail Network, pp. 5-6.
- Lee, T.H., and Im, J.C. (2006). An experimental study on the reinforcement effect of installed micropile under footing on dense sand. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3C, pp. 191-200.
- MIDAS. (2010). *Manuals of MIDAS GTS: Application method and input material properties of interface element*. MIDAS IT, Korea.
- Poulos, H.G., and Davis, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. John Wiley & Sons. pp. 78-144.
- Shin, J.H. (2015). *Geomechanics & engineering: Analysis and design*. Seoul: CIR. pp. 571-608.
- Sim, J.U., Jeong, S.S., and Lee, J.H. (2015). Numerical analysis of self-supported earth retaining wall stabilizing piles. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 35-46.
- Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., and You, G. (2006). Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforcing with micro-piles. *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 3, pp. 367-376.

Received	January 25, 2019
Revised	January 25, 2019
Accepted	March 12, 2019