

설치조건에 따른 삼축 마이크로파일(TMP)의 수평지지력

Lateral Bearing Capacity of Triaxial Micropile by Installaton Condition

김 태 현¹⁾ · 안 광 국[†] · 안 성 울²⁾

Taehyun Kim · Kwangkuk Ahn · Sungyul An

Received: April 11th, 2021; Revised: April 13th, 2021; Accepted: April 20th, 2021

ABSTRACT : Micropile refers to a small-diameter cast-in-place pile of less than 300 mm. In general, even though it is a small-diameter pile, it is known that the resistance of the pile to the vertical force is large, while the resistance to the lateral load is insufficient. Among several micropile methods, a triaxial micropile (TMP) was recently developed for the purpose of increasing the lateral bearing capacity (seismic resistance). A triaxial micropile has the advantage of being able to effectively resist lateral loads because three micropiles installed inclined on each axis resist lateral load. As a result of the study, In the short pile ($L/d < 60$), the lateral bearing capacity increased due to the increase in the pile length ratio, but in the long pile ($L/d \geq 60$), the increase in the bearing capacity was insignificant. The lateral bearing capacity increased as the triaxial micropile installation angle (θ) increased, but the increase in the lateral bearing capacity was clearly decreased when it exceeded 35° . The increase in the lateral bearing capacity was greater with the increase of the micropile installation angle (θ) in the long pile than the short pile.

Keywords : Micropile, Pile length ratio, Installation angle

요 지 : 마이크로파일은 300mm 이하인 소구경 현장타설말뚝을 말하며, 일반적으로 소구경 파일임에도 연직력에 대한 파일의 저항력이 큰 반면, 수평하중에 대한 저항성은 미비한 것으로 알려져 있다. 여러 마이크로파일 공법들 중 최근 수평지지력(내진저항력)의 증가를 위한 목적으로 개발된 삼축 마이크로파일(Triaxial micropile, TMP)이 개발되었다. 삼축 마이크로파일은 각축에 경사지게 설치된 3개의 마이크로파일이 수평하중에 저항하므로 좀 더 효과적으로 수평하중에 저항할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 파일 길이 및 설치각도를 달리 설치했을 경우 삼축 마이크로파일에 대한 수평지지력을 평가하고자 3차원 수치해석을 수행하였다. 연구결과, 짧은 파일($L/d < 60$)에서 파일길이비 증가에 따른 수평지지력 증가가 발생하였으나, 긴 파일($L/d \geq 60$)에서는 지지력 증가가 미미했다. 마이크로파일 설치각(θ)이 증가함에 따라 수평지지력이 증가하였으나 35° 초과 시 지지력 증가가 급격히 저하되었고, 짧은 파일보다 긴 파일에서 마이크로파일 설치각(θ)의 증가에 따른 수평지지력 상승이 컸다.

주요어 : 마이크로파일, 파일길이비, 설치각

1. 서 론

마이크로파일 공법은 통상 파일직경 300mm 이하인 소구경 현장타설말뚝으로 구조물 기초, 언더파닝, 사면보강 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 최근 들어 마이크로파일의 활용분야가 다양해지고 공법의 활용도 증가함에 따라 다양한 연구방법을 통해 마이크로파일의 지지력에 대한 연구가 진행되어 왔다(Abdollahi & Mortezaei, 2015; Hussain et al., 2019; Hwang et al., 2020; Kim et al., 2020). 또한 기존 연구결과를 바탕으로 하여 기존 마이크로파일 구조보다 개선된 마이크로파일이 개발, 제안되었는데 대표적인 마이크로파일 공법 중 하나가 삼축 마이크로파일(Triaxial micropile, TMP, 이후 TMP로 칭함)이다.

TMP의 구조는 삼축방향으로 일정 각도의 경사로 설치한 세 개의 마이크로파일을 강판으로 강결합한 구조이다. 이 같은 파일의 구조를 통해 기존 마이크로파일의 문제점이라 할 수 있는 파일의 수평지지력을 보완하는 것이 큰 장점이라 할 수 있다. 개발초기 단계인 TMP의 효과적인 활용을 위해서는 수평하중에 대한 저항을 효과적으로 발휘할 수 있도록 파일의 설치방법 등이 강구되어야 한다. 이는 파일의 설치조건에 따라 각 축에서 마이크로파일이 수평하중에 저항하는 정도가 상이하고, 각 축에 설치된 마이크로파일이 지반 내 압축 또는 인장파일 거동을 보이기 때문이다(Kim et al., 2021).

Oh et al.(2015)와 Hwang et al.(2020)의 연구결과에 따르면 경사지게 설치한 마이크로파일의 경우 설치각도에 따라

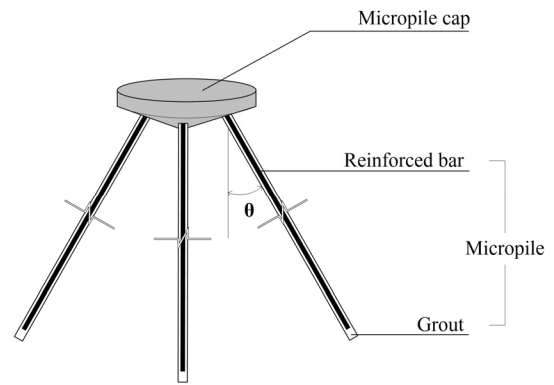
1) Executive Director, Korea Engineering Consultants Corp. (KECC)

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@cbnu.ac.kr)

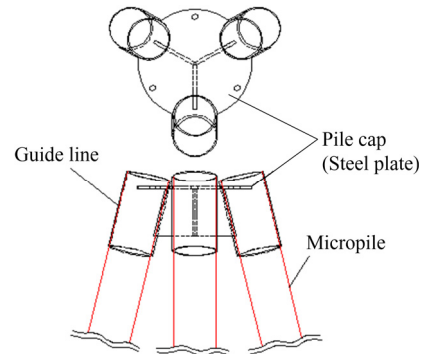
2) Director of Research, SY-tech Consultant co. Ltd.

인장 또는 압축파일과 같이 거동한다. 이 때문에 수평하중에 대한 효과적인 저항을 위해서는 파일길이, 직경, 설치각도 등 파일의 설치조건도 달리 적용해야 한다고 제안하였다. 이 같은 지반 내 파일 거동특성을 고려하면 수평하중의 방향에 따라 인장 또는 압축파일 거동을 보이는 복합 파일 구조인 TMP는 파일의 설치조건에 크게 좌우됨을 예측할 수 있다. 그러나 이에 대한 연구가 매우 미흡해 일률적인 설치방법(파일의 설치길이=10m, 설치각도=15°)으로만 시공되고 있다.

이에 본 연구에서는 TMP의 다양한 설치방법에 따른 영향을 확인하기 위해 지반조건 및 TMP의 다양한 설치방법을 고려할 수 있으며, 정량적인 수평지지력 평가가 가능한 3차원 수치해석을 수행하였다. 파일의 수평지지력은 설치조건 중 파일의 길이비(Length ratio of pile, L/D)와 관계된 파일길이(L)와 설치각도(θ)에 크게 좌우되므로, 수치해석 시 다양한 파일길이와 설치각도를 달리하였다. 그리고 조건별로 수행한 해석결과를 통해 구한 TMP의 수평지지력을 비교, 분석하여 설치조건에 따른 수평지지력의 증가효과를 검토하였다.



(a) Structure of TMP



(b) Structure of TMP head

Fig. 1. Structure of triaxial micropile (TMP)

2. 삼축 마이크로파일

2.1 삼축 마이크로파일(TMP)의 구조

파일의 수평저항성을 효과적으로 증가시키기 위한 방법은 인접지반을 보강하거나 파일의 길이, 각도 등 파일조건을 고려해 방법을 다르게 적용함이 일반적이다. 수평하중에 저항하는 지반 내 설치된 파일은 지표면에서 일정 길이까지 휨 거동에 큰 영향을 받으며, 일정 길이 이상부터는 휨 거동에 영향을 받지 않는다. 이 같은 지반 내 파일의 거동특성은 독특한 파일 구조를 가진 TMP도 마찬가지라 할 수 있다.

Fig. 1은 TMP의 상세구조를 보인 것으로, 파일구조는 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 삼축으로 마이크로파일이 설치되어 있다. 또한 각 축에 설치된 파일은 Fig. 1(b)와 같이 강철로 제작된 강판(파일캡)에 의해 결합되어 각 축의 마이크로파일이 수평하중에 저항하는 구조이다. 특히 강판으로 제작한 파일캡은 각 축의 파일을 일체화시켜 줌으로써 효과적으로 수평하중에 저항하는 구조이다.

2.2 기존 마이크로파일의 연구

마이크로파일의 활용이 증가함에 따라 다양한 방법을 통해 마이크로파일의 지지특성에 대한 연구가 진행되었고, 이들 연구를 통해 마이크로파일도 설치조건에 따라 파일지지

력의 증가 효과가 달라질 수 있음을 보인 바 있다. 최근 마이크로파일의 관련 연구들은 주로 효과적인 파일의 수평저항성 증가를 위한 연구와 파일의 내진 성능향상을 위한 방안이 연구되고 있다.

Park et al.(2007)은 마이크로파일로 보강된 교량기초의 정규화 거동 평가를 위해 유한요소해석을 수행하였고, 연구결과를 통해 상대길이비가 1.0~1.2인 경우 수직하중과 횡하중을 모두 고려한 최적의 상대길이비이며 경사 파일보강인 경우 보강효율이 매우 크다고 제시하였다. Shahrour et al.(2012)는 경사 마이크로파일의 지지특성을 평가하고자 3차원 탄소성해석을 수행하였으며, 연구결과를 통해 수평하중에 대한 파일의 저항성이 파일의 설치각도(θ) 20°인 경우 최적임을 보인 바 있다. 그러나 이 연구는 다양한 지반조건에서 파일의 저항성이 달라질 수 있음에도 이를 고려하지 않은 문제가 있다. Ali et al.(2014)는 3차원 유한요소해석을 통해 지반과 마이크로파일 그리고 구조물의 상호작용에 의한 내진성능에 대한 종합적인 파라미터를 연구하였으며 지반을 비선형적 거동으로 가정할 경우 지반의 마찰각, 마이크로파일의 그룹 및 기울기 등이 내진성능 향상에 영향을 미친다는 결과를 제시하였다. Hwang et al.(2020)는 복열로 설치된 마이크로파일의 설치각도와 간격을 달리해 모형시험을 수행하였고, 복열로 설치된 마이크로파일은 수평하중

의 방향에 따라 인장 또는 압축파일거동을 보이므로, 이를 고려해 파일의 설치조건을 달리 적용해야 함을 제시한 바 있다. Kim et al.(2020)은 TMP 구조와 유사하게 제작한 우산형 마이크로파일(연직, 경사 마이크로파일로 구성된 구조)을 개발하였고, 수치해석방법을 통해 우산형 마이크로파일의 내진효과에 대해 평가하였다. 그리고 해석결과를 통해 기존 연직파일로 설치하는 설치방법보다는 우산형 마이크로파일이 좀 더 효과적인 내진성능을 발휘함을 보인 바 있다.

이 같은 기존 연구결과를 살펴본 바, 수평하중에 효과적으로 저항하기 위해서는 파일의 설치조건을 달리 적용해야 한다. 또한 삼축으로 마이크로파일을 설치하는 구조인 TMP의 경우도 수평하중의 방향에 따라 복합적으로 인장 또는 압축파일거동을 보일 것으로 예측되며, TMP의 효과적인 활용을 위해서는 다양한 지반조건을 고려해 달리 적용한 파일의 휨 거동과 관계된 파일길이에 대한 연구가 요구될 것으로 판단된다.

3. 설치조건에 따른 삼축 마이크로파일의 거동

3.1 개요

Kim et al.(2021)에서 현장 수평재하시험과 동일한 지반 조건(지반, 하중조건)을 모사하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 현장시험과 동일한 조건에서의 수치해석 결과와 비교하여 수치해석의 유효성을 확인하였고, 현장재하시험에서 확인하지 못한 삼축 마이크로파일의 거동특성을 분석하였다. 본 연구에서는 삼축 마이크로파일의 파일길이비 및 설치각 변화에 따른 수평저항력, 지지력비를 평가하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였으며 최적의 설치조건을 분석하였다.

3.2 수치해석 모델링

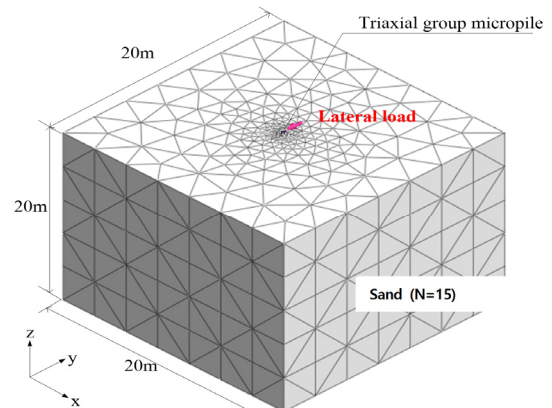
모델링한 삼축 마이크로파일의 구조는 Fig. 1에 보인 바와 같이 마이크로파일이 세 개의 축에 경사지게 설치되어 있고, 각 축의 마이크로파일은 파일캡에 의해 결합되어 있다.

파일 구조상 독립된 구조로 마이크로파일이 수평하중에 저항하는 형상이고, 축대칭 조건이 성립되지 않으므로 현장 시험과정을 모사하기 위해 본 연구에서는 지반 분야에서 많이 활용하고 있는 유한요소 해석 프로그램으로 MIDAS NX (ver. 3.20)을 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다.

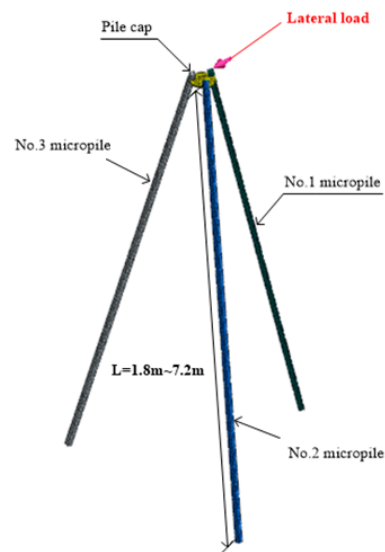
Fig. 2는 삼축 마이크로파일을 모델링한 해석단면을 보인 것이다. 해석단면의 크기는 파일캡의 크기, 각 축 파일의 경사각과 길이 등을 고려하여 Fig. 2(a)와 같이 20×20×15(m)

로 결정하였다. 지반 요소의 크기는 파일에 인접한 요소의 경우 촘촘하게(요소 크기 = 0.01m), 지반 경계부의 경우 느슨하게(요소 크기 = 3.0m) 형성시켰다.

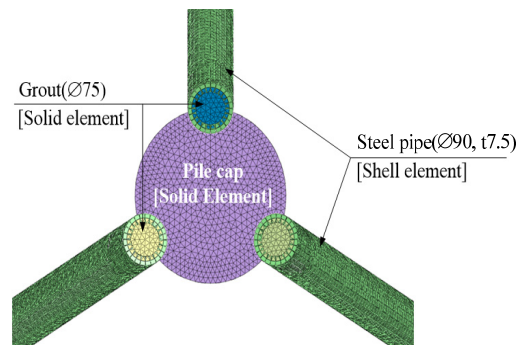
모델링한 삼축 마이크로파일은 Fig. 1과 Fig. 2에 보인 원형 파일구조를 동일하게 모사하였다. 각 축에 설치한 마이크로파일의 구조는 강관 내부가 그라우트로 채워진 구조이므로, 모델링 시 강관은 2차원 셸요소(2D Shell element), 그라



(a) Soil layer



(b) Triaxial micropile (TMP)



(c) TMP head

Fig. 2. Numerical modeling of TMP and soil layer

우트는 3차원 솔리드 요소(3D solid element)로 모델링하였다. 또한 각 축의 파일을 결합하는 파일캡은 3차원 솔리드 요소를 형성시킴으로써 원형 파일체를 모사하였다. 지반에 설치된 마이크로파일(매끄러운 강관)과 지반 상호경계면은 삼축 마이크로파일의 수평 거동 특성을 고려해 인터페이스 요소(Interface element)를 적용하였다. 파일과 지반에 대한 인터페이스 고려 시 적용된 수직과 전단탄성계수(K_n 과 K_t)는 다음과 같다(MIDAS, 2010).

$$K_n = E_s/t_v \quad (1)$$

$$K_t = R \cdot G_s/t_v \quad (2)$$

여기서, E_s 와 G_s 는 흙의 탄성계수와 전단탄성계수이고, R 과 t_v 는 강도감소계수와 가상두께(인터페이스)를 의미한다. 모래와 매끄러운 강철의 관계는 Shin(2015)가 제안한 바를 고려해 강도감소계수(R)은 0.65를 적용하고, 가상두께계수(t_v)는 0.1을 적용하였다. 수평하중은 수평지지력 결정(15mm 변위발생 시 수평하중)을 고려하여 20mm 변위 발생 시까지 수평하중을 작용시켰다. 지반이 복합지반일 경우 설치조건 변화에 따른 삼축 마이크로파일의 수평지지력에 대한 명확한 평가가 어렵다. 이를 고려해 단일지반으로 모델링하였고, 지반조건은 SPT의 N값을 기준해 느슨 또는 중간 밀도를 가진 사질지반(적용 N=15)을 적용하였다.

또한 객관적인 해석결과의 도출을 위해 모델링 시 재료의 탄성계수(E), 프아송비(ν), 단위중량(γ), 점착력(c), 흙의 전단저항각(ϕ) 등의 재료 물성값이 요구됨에 따라 본 연구에서는 현장지반조건과 실무에서 주로 적용하고 있는 경험적 제안값(AASHTO, 2002; FHWA, 2005; Shin, 2015)을 고려해 물성값을 Table 1과 같이 결정하여 수치해석에 적용하였다.

그리고, Kim et al.(2021)에서 삼축 마이크로파일의 현장 수평재하시험 결과 수평하중 방향에 따라 미미한 수평저항력의 차이가 발생하는 것으로 검토된바 조건별 수치해석의

Table 1. Input data used in numerical analysis

Classification	γ (kN/m^3)	E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Weathered soils	18.0	15,400	0.30	0	30
Micropile (Steel pipe)	78.5	2.05×10^8	0.35	-	-
Pile cap (Steel)	78.5	2.05×10^8	0.35	-	-
Grout	23.5	2.17×10^7	0.15	-	-

수평하중 방향은 Fig. 2(b)와 같은 압축방향(No.1 MC에 하중작용)으로 하중을 작용시켰다.

3.3 삼축 마이크로파일의 설치조건

수평하중에 저항하는 마이크로파일은 파일의 인접지반 조건(특히 상부길이에 인접된 지반조건)과 설치조건(파일 길이비, 설치각도)에 크게 좌우된다. 특히 파일의 설치각도에 따라 수평하중에 저항하는 파일은 수평하중의 작용방향에 따라 인장 또는 압축파일거동을 보이고, 파일길이비에 따라 지반 내 파일거동이 강체 또는 연성파일거동을 보인다(Hwang et al., 2020).

이 같은 지반 및 파일조건에 따라 상이한 거동특성 때문에 마이크로파일의 수평지지력이 달라지고, 효과적으로 저항할 수 있는 파일설치 조건도 달라진다. 삼축 마이크로파일 역시 마찬가지이다. 삼축 마이크로파일의 각 축에 설치된 마이크로파일은 수직 또는 경사설치가 가능하며, 파일구조상 수평하중을 부담할 경우 각축의 파일이 인장 또는 압축 파일 거동을 보이는 복합 구조라 할 수 있다.

경사진 마이크로파일이 인장 또는 압축파일 거동을 보일 경우 마이크로파일이 효과적으로 수평하중에 저항할 수 있는 적정 설치각도와 설치길이비 상이하다(Oh et al., 2015).

따라서 삼축 마이크로파일을 효과적으로 활용하기 위해서는 파일길이비(L/d)와 설치각(θ)이 수평지지력에 끼치는 영향에 대한 평가가 요구될 것이다. 이에 본 연구에서는 Table 2에 보인 바와 같이 파일길이비와 설치각도를 달리하여 모델링한 후 수치해석을 수행하였다. 파일의 직경은 현재 삼축 마이크로파일이 적용되고 있는 동일한 직경으로 적용하였다(강관의 외경 = 90mm, 두께 $t = 15$ mm). 이 같이 설치조건에 따른 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 평가하기 위해 달리한 해석조건은 총 24case이며, 조건별 해석 결과로부터 구한 삼축 마이크로파일의 지지력을 비교, 분석하여 수평지지력을 증대시킬 수 있는 파일의 최적 설치조건을 검토하였다.

3.4 수평지지력 및 지지력비

일반적으로 국내·외 수평하중을 받는 파일에 관한 연구를

Table 2. Numerical analysis case

N	Diameter (mm)	Pile length (L, m)	Pile length ratio (L/d)	Pile installation angle ($^\circ$)
15	90[15]	1.8	20	0, 5, 15, 25, 35, 40
	90[15]	3.6	40	0, 5, 15, 25, 35, 40
	90[15]	5.4	60	0, 5, 15, 25, 35, 40
	90[15]	7.2	80	0, 5, 15, 25, 35, 40

살펴보면, 대부분이 파일의 수평변위 허용기준을 15~50mm 이하를 적용하고 있다. 그러나 이 기준을 마이크로파일에 적용하는 경우, 허용변위에 해당하는 마이크로파일의 지지력이 과소 또는 과대평가될 수 있다. 이는 마이크로파일이 기존파일에 비해 파일의 직경이 작기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 마이크로파일의 허용변위에 대한 수평지지력을 결정하는 경우, FHWA(2005)에서 제안한 허용기준인 파일 두부의 허용변위 15mm에 해당하는 수평하중으로 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 결정하였다.

그리고 파일 설치조건에 따라 달라지는 수평지지력의 증가 효과를 평가하기 위해 Eq. (3)과 (4)와 같이 파일길이비 및 설치각도에 대한 지지력비(Bearing capacity ratio, BCR)를 사용하였다(Oh et al., 2015).

■ 파일길이비에 따른 지지력비

$$BCR_{L/d} = \frac{P_{a(L/d > 20)}}{P_{a(L/d = 20)}} \quad (3)$$

■ 파일설치각도에 따른 지지력비

$$BCR_{\theta} = \frac{P_{a(\theta > 0^\circ)}}{P_{a(\theta = 0^\circ)}} \quad (4)$$

여기서, $P_{a(L/d=20)}$ 와 $P_{a(L/d > 20)}$ 은 각각 파일길이비가 20인 경우와 파일길이비가 20을 초과한 경우의 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 말한다. 또한 $P_{a(\theta=0^\circ)}$ 와 $P_{a(\theta > 0^\circ)}$ 은 각각 수직파일과 경사파일 설치조건인 경우 파일의 수평지지력을 의미한다.

파일길이비에 대한 지지력비($BCR_{L/d}$)는 파일길이비가 20을 초과한 경우의 삼축 마이크로파일 지지력이 파일길이비 20인 경우보다 어느 정도 증가했는지를 보여주며, 파일길이비에 대한 지지력 증가효과를 의미한다. 파일 설치각에 대한 지지력비(BCR_{θ})는 파일의 설치각도에 따른 지지력 증가 효과를 보여주는 것으로, 경사파일 설치조건인 경우의 지지력이 수직파일 설치조건인 경우의 지지력보다 어느 정도 증가했음을 나타낸다.

3.5 결과분석

3.5.1 파일길이비 및 설치각에 따른 수평지지력

Fig. 3은 보통의 사질토 지반(N=15)에서 삼축 마이크로파일의 길이비(L/d)에 따른 수평지지력을 비교한 것이다. 삼축 마이크로파일의 수평지지력은 파일의 길이비가 증가함에 따라 증가하였으나, 파일길이비(L/d) 60 이상에서 지지력 증가 기울기가 완만해지는 것으로 나타났다.

삼축 마이크로파일 경사각이 0°(수직)인 경우 파일 길이

비에 대한 수평지지력 증가 효과는 매우 미미하였다. 경사각이 0°일 때 파일길이비에 따라 평가된 각 조건별 최대 수평지지력은 45.8~57.2kN이었다. 그리고 마이크로파일 경사설치각(θ)이 작을수록 파일의 길이비에 대한 수평지지력은 완만한 상승을 나타내었으며, 경사설치각(θ)이 커질수록 파일 길이비에 대한 수평지지력은 급격히 상승하는 것으로 분석되었다. 이때의 설치각도에 따라 조건별 파일의 최대 수평지지력은 45.8~212.8kN이었다.

Fig. 4는 삼축 마이크로파일의 경사설치각(θ)에 따른 수평지지력을 비교한 것이다. 설치각이 증가함에 따라 파일의 수평지지력도 증가하는 경향을 나타내었다.

삼축 마이크로파일 길이비(L/d) 60 미만(짧은 파일)에서는 경사설치각(θ)이 커질수록 수평지지력 증가가 전체적으로 완만하였고, 35°가 넘어서면서 지지력 증가 기울기가 더 완만해졌다. 설치길이비(L/d) 60 이상(긴 파일)에서는 설치각(θ)이 커질수록 수평지지력이 급격히 증가하였으나, 설치각(θ) 35°가 넘어가면서 오히려 수평지지력이 감소하는 것으로 검

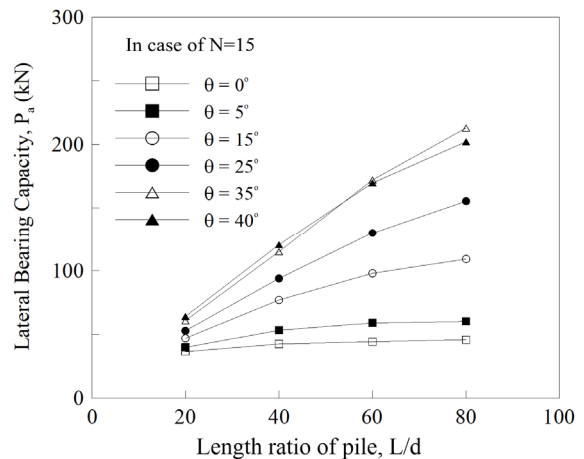


Fig. 3. Lateral bearing capacity by pile length ratio

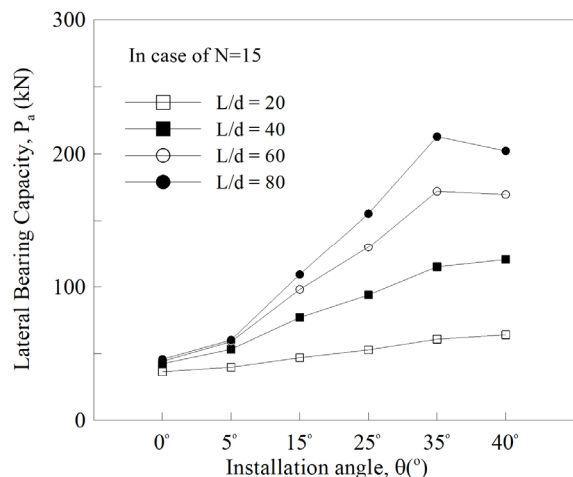


Fig. 4. Lateral bearing capacity by pile installation angle

토되었다.

삼축 마이크로파일의 최대 수평지지력은 설치각도가 $\theta=35^\circ(L/d=80)$ 인 경우였으며, 이때 파일길이비(L/d)에 따라 평가된 각 조건별 최대 수평지지력은 64.1~212.8kN이었다.

보통의 사질토 지반($N=15$)에서 전체적으로 삼축 마이크로파일은 수직으로 설치한 조건(설치각도, $\theta=0^\circ$)인 경우보다 경사지게 설치한 경우가 수평지지력의 증가에 효과적이었다. 그리고 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 효과적으로 증가시킬 수 있는 최적 설치각도가 35° 이며, 파일의 설치각도 35° 를 초과한 경우에는 큰 지지력 증가를 기대할 수 없거나 오히려 감소하므로 35° 내외로 설치하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되었다.

3.5.2 파일길이비 및 설치각에 따른 수평지지력비

Fig. 5는 보통의 사질토 지반($N=15$)에서 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 파일길이($L/d=20$ 기준)에 따른 파일의 지지력비($BCR_{L/d}$)로 환산한 후 비교한 것이다. 여기서 $BCR_{L/d}=1$ 은 파일길이비가 증가해도 파일길이비 20인 경우의 수평지지력과 유사하거나 동일함을 의미한다. 그리고 $BCR_{L/d} > 1$ 은 파일길이비가 증가하면 파일길이비 20인 경우의 지지력보다 증가되었음을 의미한다.

경사각이 0° (수직)인 경우 파일길이비 증가에 따라 수평지지력비가 미미하게 증가하는 것으로 나타났다. 수직파일 설치조건인 경우 삼축 마이크로파일의 최대지지력비는 1.25였다($\max.BCR_{L/d}(\theta=0^\circ) = 1.25$).

삼축 마이크로파일 설치각 0° (수직) 경우보다 설치각이 커질수록 파일길이비 증가에 따른 지지력비가 크게 발생하였다. 경사설치각(θ)이 작을수록 파일의 길이비에 대한 수평지지력비는 완만한 상승을 나타내었고, 경사설치각(θ)이 커질수록 파일의 길이비에 대한 수평지지력비가 급격히 상승하

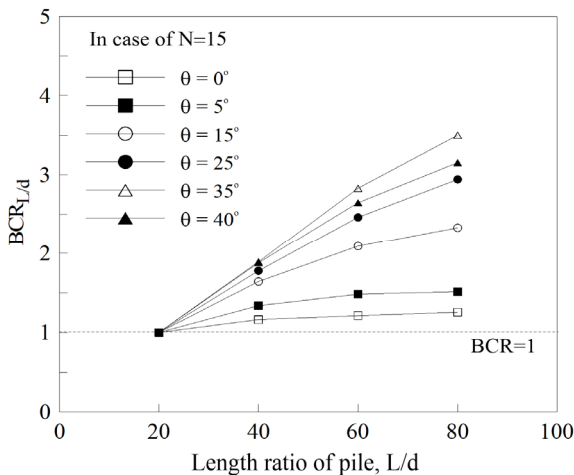


Fig. 5. $BCR_{L/d}$ by pile length ratio

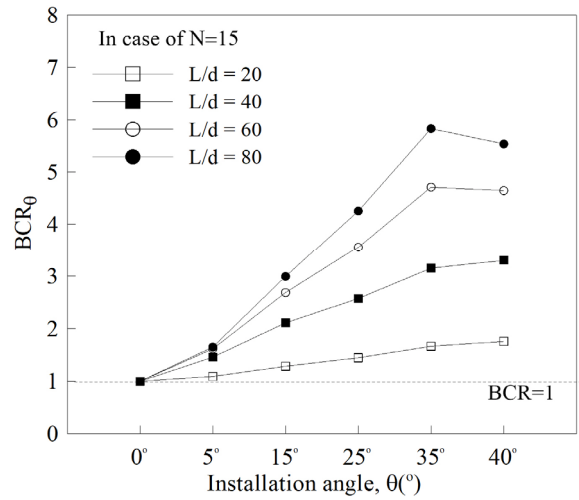


Fig. 6. BCR_{θ} by pile installation angle

였다.

파일길이비 80이고, 설치각 35° 에서 수평지지력비가 가장 큰 것으로 분석되었고, 이때 삼축 마이크로파일의 최대 지지력비는 약 3.5이었다($\max.BCR_{L/d}(\theta=35^\circ) = 3.5$).

이 지지력비 비교 결과를 통해 파일길이비에 대한 지지력 증가는 경사파일이 수직파일보다 효과적임을 알 수 있으며 경사파일 설치조건 중 설치각도 35° 인 경우 파일길이비에 의한 지지력 증가효과가 가장 크고, 파일길이비 20인 대비 최대 3.5배 정도 수평지지력의 증가를 기대할 수 있었다.

Fig. 6은 삼축 마이크로파일의 수평지지력을 설치각($\theta=0^\circ$ 기준)에 따른 파일의 지지력비(BCR_{θ})로 환산한 후 비교한 것이다. 설치각이 증가함에 따라 파일의 수평지지력비도 증가하는 경향을 나타내었다.

파일길이비(L/d) 60 미만(짧은 파일)에서는 설치각 증가에 따라 지지력비가 작지만 일정한 증가를 보여주었다. 파일길이비(L/d) 60 이상(긴 파일)에서는 설치각에 따라 지지력비가 크게 증가하였으나, 설치각 35° 가 넘어가면서 수평지지력비가 감소하는 것으로 분석되었다. 이때의 최대 수평지지력비는 5.83이었다($\max.BCR_{\theta}(L/d=80) = 5.83$).

경사설치각에 따른 삼축 마이크로파일의 수평지지력비의 분석결과 짧은 파일보다 긴 파일에서 설치각 증가에 따른 지지력 증가 효과를 기대할 수 있으며 여기서는 설치각이 35° , 파일길이비(L/d) 80에서 최대 5.8배 정도의 수평지지력비를 확인할 수 있었다.

3.5.3 수평지지력비 증가효과

Fig. 7과 Fig. 8은 연구결과를 바탕으로 파일의 설치조건에 따른 삼축 마이크로파일의 수평지지력비 증가효과를 정리한 것이다. 설치길이비 60에서 적정 설치각도 35° 로 설치

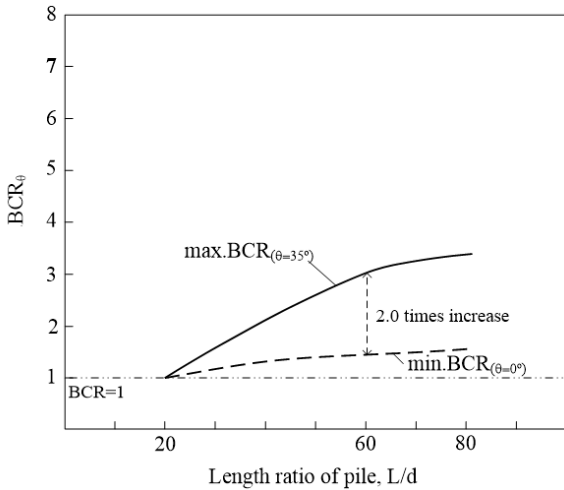


Fig. 7. Increase effect of lateral bearing capacity ratio by pile length ratio

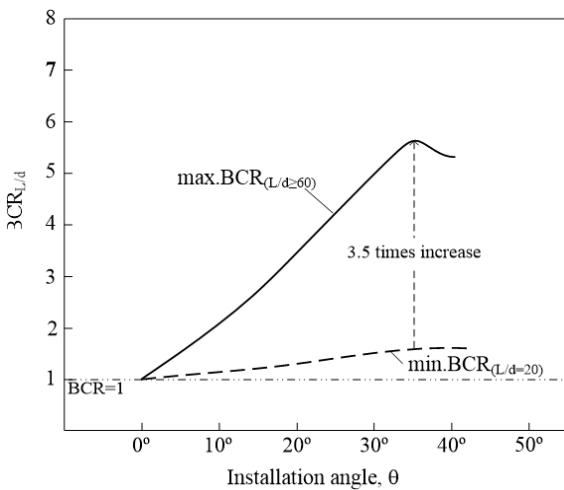


Fig. 8. Increase effect of lateral bearing capacity ratio by pile installation angle

했을 경우 파일길이비에 따른 수평지지력비의 증가효과는 최대 2배 정도였다. 또한, 설치각 $\theta=35^\circ$ 에서 적정 설치길이비 60로 설치했을 경우 파일의 설치각도에 따른 수평지지력비의 증가효과는 최대 3.5배 정도였다.

4. 결 론

본 연구는 삼축 마이크로파일의 파일길이비(L/d) 및 설치각(θ)에 따른 수평지지력 및 지지력비를 평가하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼축 마이크로파일의 길이비(L/d)가 증가할수록 파일의 수평지지력은 증가하였다. 수직조건인 삼축 마이크로파일에서는 길이비에 따른 수평지지력 증가가 미미하였

으나, 경사설치각(θ)이 커질수록 길이비에 따른 수평지지력 증가가 뚜렷한 것으로 나타났다.

- (2) 삼축 마이크로파일의 설치각(θ)이 증가할수록 짧은 파일 조건($L/d < 60$)에서는 수평지지력이 완만히 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 긴 파일($L/d \geq 60$) 조건에서는 수평지지력이 급격히 증가하는 경향을 나타내었으나 설치각이 35° 초과(40° 에서)하면서 수평지지력이 오히려 감소하는 것으로 분석되었다.
- (3) 수평지지력과 마찬가지로 삼축 마이크로파일의 파일길이비(L/d)가 증가함에 따라 수평지지력비(BCR)도 증가하였다. 수직 마이크로파일 조건인 경우($\theta=0^\circ$) 파일길이비(L/d)에 따라 지지력비(BCR)가 크게 증가하지 않는 것으로 나타났으나, 경사파일 설치조건인 경우 설치각이 증가할수록 파일길이비에 따라 지지력비(BCR) 증가가 뚜렷하게 발생하였다.
- (4) 삼축 마이크로파일의 경사설치각(θ)이 증가함에 따라 수평지지력비(BCR)도 증가하였다. 수평지지력비의 분석 결과 짧은 파일보다 긴 파일에서 경사설치각(θ) 증가에 따른 지지력증가 효과를 확인할 수 있었다.
- (5) 종합적인 분석결과 삼축 마이크로파일은 경사파일의 영향으로 긴 파일이 짧은 파일보다 수평지지력이 크다. 그리고 경사설치각이 커질수록 수평지지력 증가가 효과적으로 발생하였으며, 설치각 35° 에서 최적의 수평지지력의 증가를 기대할 수 있다.
- (6) 그러나 삼축 마이크로파일의 효율적인 설계적용을 위해 삼축 마이크로파일의 거동 및 지지력, 내진 저항성 등에 영향을 미치는 지반조건, 하중조건 등의 영향인자를 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. AASHTO (2002), Standard Specifications for Highway Bridge, Association of State Highway and Transportation Officials Publication, Washington, D.C. ISBN:156051-171-0.
2. Abdollahi, K. and Mortezaei, A. (2015), A new expression for determining the bending stiffness of circular micropile groups, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 77, pp. 58-70.
3. Ali, G., Hadi, H., Elias, G. and Jurgis, M. (2014), Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.58, pp.21-36.
4. FHWA (2005), Micropile Design and Construction, Unit States epartment of Transportation, No.FHWA NHI-05-039, December, pp. 7-1~7-28.

5. Hussain, Z., Sharma, B. and Rahman, T. (2019), Micropile group behaviour subjected to lateral loading, *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 4(1), [https://doi.org/ 10.1007/s41062-019-0206-3](https://doi.org/10.1007/s41062-019-0206-3) (In Korean).
6. Hwang, T. H., Kim, M. Y. and Lee, Y. S. (2020), Variation of lateral bearing capacity of 2-row micropile with installation conditions by model test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 36, No. 11, pp. 25~49 (In Korean).
7. Kim, S. B., Son, S. W. and Kim, J. M. (2020), Horizontal behavior characteristics of umbrella-type micropile applied in sandy soil subjected to seismic motion, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Korean Geo - Environmental Society, Vol. 21, No. 7, pp. 5~16 (In Korean).
8. Kim, T. H. (2021), Behavioral analysis of triaxial micropile through field loading test and 3D-numerical analysis, *Journal of the Korean Geo Environmental Society*, Korean Geo Environmental Society, Vol. 22, No. 2, pp. 15~22 (In Korean).
9. MIDAS (2010) *Manuals of MIDAS GTS: Application Method and Input Material Properties of Interface Element*. MIDAS IT, Korea.
10. 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, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 31, No. 6, pp. 5~13 (In Korean).
11. Park, S. W., Jung, D. J., Kwak, K. S. and Lee, J. H. (2007), Evaluation of normalized behavior of bridge foundation reinforced by micropile, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 5, pp. 5~14 (In Korean).
12. Shahrou, I., Alsaleh, H. and Souli, M. (2012), 3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles, *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol. 39, pp. 1~7.
13. Shin, J. H. (2015), *Geomechanics & Engineering-analysis and design*, CIR, Korea, pp. 573~608 (In Korean).