

# 삼축 마이크로파일(TMP)의 현장수평재하시험과 3차원 수치해석을 통한 거동 분석

## Behavioral Analysis of Triaxial Micropile (TMP) through Field Loading Test and 3D-numerical Analysis

김 태 현<sup>1)</sup> · 안 광 국<sup>†</sup> · 안 성 울<sup>2)</sup>

Taehyun Kim · Kwangkuk Ahn · Sungyul An

Received: March 13<sup>th</sup>, 2021; Revised: March 19<sup>th</sup>, 2021; Accepted: March 26<sup>th</sup>, 2021

**ABSTRACT** : Various micropiles have been developed through research related to micropiles, which have been carried out with the increased use of micropiles. Among the micropile construction methods being developed, the triaxial micropile (tmp), which is recently developed for the purpose of increasing the horizontal bearing capacity (seismic resistance), is representative. The three-axis micropile has the advantage of a method that can resist horizontal load more effectively because three micropiles installed inclined on each axis resist horizontal load. However, there is a problem in effectively using this pile method due to insufficient research on the support characteristics of the triaxial group micropile. In order to effectively utilize the triaxial group micropile (tmp), it is required to evaluate the bearing capacity for the factors that affect the horizontal bearing capacity of the pile. Therefore, in this study, field horizontal loading Tests were performed for each load direction, field loading Tests were verified through three-dimensional finite element analysis, behavioral characteristics of triaxial micropiles were evaluated, and appropriate horizontal bearing capacity was analyzed in consideration of horizontal load directions.

**Keywords** : Micropile, Horizontal load, Seismic resistant pile

**요 지** : 마이크로파일의 활용증가로 수행되었던 마이크로파일의 관련연구를 통해 다양한 마이크로파일이 개발되어왔다. 개발되고 있는 마이크로파일 공법들 중 최근 수평지지력(내진저항력)의 증가를 위한 목적으로 개발된 삼축 마이크로파일(Triaxial micropile, TMP)이 대표적이라 할 수 있다. 삼축 마이크로파일은 각축에 경사지게 설치된 3개의 마이크로파일이 수평하중에 저항하므로 좀 더 효과적으로 수평하중에 저항할 수 있는 공법의 장점이 있다. 그러나 삼축 마이크로파일에 대한 지지특성에 대한 연구가 부족하여 이 파일공법을 효과적으로 활용하는데 문제가 있다. 즉, 삼축 마이크로파일(TMP)의 효과적인 활용을 위해서는 파일의 수평지지력에 영향을 주는 요인에 대한 지지력 평가가 요구된다. 이에 본 연구에서는 하중 방향별 현장수평재하시험을 수행하고 3차원 유한요소해석을 통해 현장 재하시험을 검증하고 거동 특성을 고찰하였으며, 수평하중의 방향을 고려한 적절한 수평지지력을 분석하였다.

**주요어** : 마이크로파일, 수평하중, 내진말뚝

## 1. 서 론

마이크로파일 공법은 1950년대 처음 개발된 이후 언더피닝 공법 중 하나로, 기존 구조물의 침하억제 또는 지지력 보강을 위한 목적으로 활용되어왔다. 그리고 대형기초 굴착 장비의 진입이 불가능한 협소한 지역, 타워 굴뚝 및 송전탑의 기초파일, 연약지반, 사면의 보강, 소음 규제지역의 구조물 기초파일, 구조물 내진 보강, 기존구조물 부력대항 등 사용 목적에 따라 광범위하게 활용되고 있다. 기존 연구를 살펴보면, 마이크로파일의 시공상 장점과 적정 설치방법을 통

해 마이크로파일도 충분한 수평지지력(내진저항력)을 발휘할 수 있음을 알 수 있다(Abdollahi & Mortezaei, 2015; Hussain et al., 2019; Hwang et al., 2020; Kim et al., 2020). 최근 들어, 마이크로파일에 대한 인식전환과 수평지지력 및 내진 저항력에 대한 연구사례 그리고 실무에서의 적용 사례 증가로, 몇몇 기술자들이 연구결과를 바탕으로 한 관련기술을 개발하고 있는데, 파일체의 수평지지력(내진성능)을 증가시키고자 개발된 대표적인 기술이 삼축 마이크로파일(Triaxial micropile, TMP)이다.

일반적으로 기존 건축물 설계에서는 지진시 발생하는 파

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

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

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

일머리에 작용하는 수평력을 고려하지 않고 상시작용하는 건축물 하중으로 인한 축력만을 고려하여 PHC파일이나 마이크로파일이 적용되고 있다. 보통 파일길이 15m 이상의 긴 파일의 경우 파일공법 적용에 대한 경제성이 확보되나 건축물에 주로 적용하는 짧은 파일인 경우 공법에 대한 경제성이 저하되는 문제가 있다. 또한 대형장비를 활용하는 복합파일은 협소한 공간에서 파일시공이 불가능하므로 기존 구조물의 수평지지력 보강을 위한 별도의 보강대책이 강구되어야 한다. 이와 같이 파일공법(PHC 파일, 강관 파일 등) 적용에 따른 문제점과 수평지지력이 적은 기존 마이크로파일의 문제점을 보완하기 위해 삼축 마이크로파일이 개발되었다.

삼축 마이크로파일은 최근 개정된 건축물의 내진설계에도 적용이 가능한 공법이나 아직까지 개발기술이 초기단계로 다양한 조건(현장지반, 하중방향등)을 고려한 지지력 평가가 현재까지 미흡한 실정이다. 이러한 삼축 마이크로파일의 효과적인 활용을 위해서는 원형 파일체를 대상으로 한 파일거동 특성 및 이에 따른 파일의 수평지지력에 대한 평가가 요구된다.

이에 본 연구에서는 삼축 마이크로파일에 대한 수평거동 특성 및 수평저항력을 평가하고자 원형 파일체를 대상으로 현장 수평재하시험을 수행하였다. 그리고 현장조건과 재하시험 과정을 모사한 3차원 수치해석을 수행하여 재하시험과 비교, 분석하였으며 삼축 마이크로파일의 적정한 수평지지력을 평가하고자 하였다.

## 2. 삼축 마이크로파일

### 2.1 개요

최근 마이크로파일의 활용이 증가함에 따라 다양한 방법을 통해 파일의 설치조건에 따른 마이크로파일의 지지특성에 대한 연구가 진행되었다. Lee & Im(2006)와 Hwang et al.(2010)는 연구결과를 통해 마이크로파일의 연직지지력은 설치조건에 따라 크게 달라질 수 있음을 보였다. 마이크로파일의 수평지지력도 파일의 설치조건에 따라 큰 수평지지력의 증가 효과를 기대할 수 있음을 보인 바 있다.

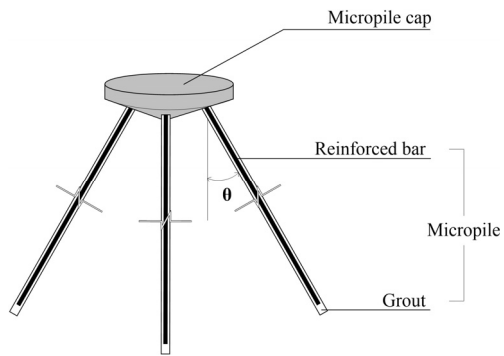
Abdollahi & Mortezaei(2015)는 지진하중에 저항하는 마이크로파일(Micropile groups)의 휨 강성(Bending stiffness)을 평가하기 위해 파일직경, 파일길이비, 설치간격을 달리 하여 수치해석을 수행하였으며, 연구결과를 통해 지진하중에 대한 파일의 저항성이 설치각도( $\theta$ )가 20~30°인 경우 최대임을 보인 바 있다. Oh et al.(2015)는 모형시험을 통해

단열로 설치된 마이크로파일의 수평지지특성에 대해 평가한 바 있다. 그리고 시험결과 통해 수평하중을 받는 마이크로파일은 짧은 파일조건이면 양의 방향( $\theta > 0^\circ$ )으로,  $L/d \geq 50$ 인 긴 파일조건이면 음의 방향( $\theta < 0^\circ$ )으로 경사지게 설치함이 효과적이라 제안한 바 있다. 또한 Hussain et al.(2019)은 지반의 상대밀도와 파일의 설치조건(파일길이비, 간격)을 달리한 모형시험을 통해 마이크로파일의 수평저항성에 대해 평가하였다. 그리고 시험결과를 통해 파일의 설치간격 2D인 경우 마이크로파일의 효율이 지반의 상대밀도와 관계없이 감소하는 반면, 설치간격 4D인 경우 상대밀도가 증가함에 따라 파일의 효율도 증가함을 보였다. Hwang et al.(2020)는 복열로 설치된 마이크로파일의 설치각도와 간격을 달리하여 모형시험을 수행하여 설치조건에 대한 파일의 수평지지력 증가효과를 평가하였다. 그리고 연구결과를 통해 복열로 설치된 마이크로파일의 수평지지력 증가효과는 파일길이비와 설치각도에 큰 차이를 보이며, 특히 파일의 설치길이보다 설치각도에 좀 더 좌우된다고 제안한 바 있다. Kim et al.(2020)은 삼축 마이크로파일과 유사한 형태의 마이크로파일을 개발하여 마이크로파일의 내진효과에 대해 평가한 바 있으나, 파일의 설치조건에 따른 세부적인 검토가 수행되지 않았다.

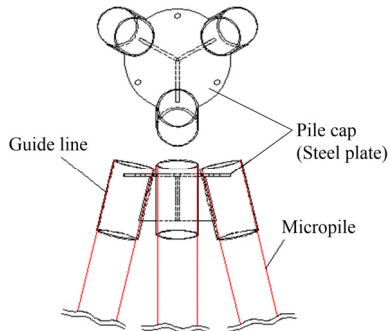
이 같은 연구결과를 통해 알 수 있듯이 마이크로파일의 설치조건(특히 설치각도)에 따라 수평하중에 저항하는 효과는 달라 질 수 있다. 이 같은 연구결과를 바탕으로 개발된 파일이 삼축 마이크로파일이다.

### 2.2 구조

삼축 마이크로파일의 구조는 Fig. 1에 보인 바와 같이 강관으로 구성된 파일두부 캡에 그라우트로 채워진 직경 114~158mm인 소구경 마이크로파일이 3축 방향으로 결합된 구조이다(파일캡 설치 후 마이크로파일 관입, 연결 및 그라우팅 채움). 즉 파일캡으로 결합된 마이크로파일은 일종의 소구경 채움 콘크리트 강관파일이라 할 수 있다. 이 파일의 장점은 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 설계자가 요구하는 파일의 설치각도(Installation angle of pile,  $\theta$ )로 각축의 파일을 경사지게 설치 가능함에 있다. 이 같은 경사 마이크로파일의 설치가 가능하고, 각축에 설치된 마이크로파일이 Fig. 1(b)와 같이 파일캡(Pile cap)으로 강결합되어 있어 일체화 거동이 가능하다. 따라서 파일구조의 개선을 통해 기존 마이크로파일보다 좀 더 수평지지력을 증가시킬 수 있다. 또한 일반 마이크로파일과 같이 소형 파일 설치장비를 사용하므로 기존 파일공법(PHC 파일, 강관 파일 등)과 달리 협소한 공간에서도 파일 시공이 가능하다. 따라서 최근 구조물



(a) Structure of TMP



(b) Structure of TMP head

Fig. 1. Structure of triaxial micropile (TMP)

의 내진 성능을 향상시키기 위한 공법으로 많이 활용되고 있다.

### 2.3 수평지지력의 결정

일반적으로 국내·외 수평하중을 받는 파일에 관한 연구를 살펴보면, 대부분이 파일의 수평변위 허용기준을 15~50 mm 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 마이크로파일의 수평지지력을 결정하였다.

## 3. 하중방향에 따른 현장 수평재하시험

### 3.1 현장지반

삼축 마이크로파일이 설치된 지반에 대한 지층구조 및 상태를 조사하기 위해 본 연구에서는 현장지반조사를 수행하였고, 지반조사결과는 Fig. 2와 같다. 현장지반은 매립층

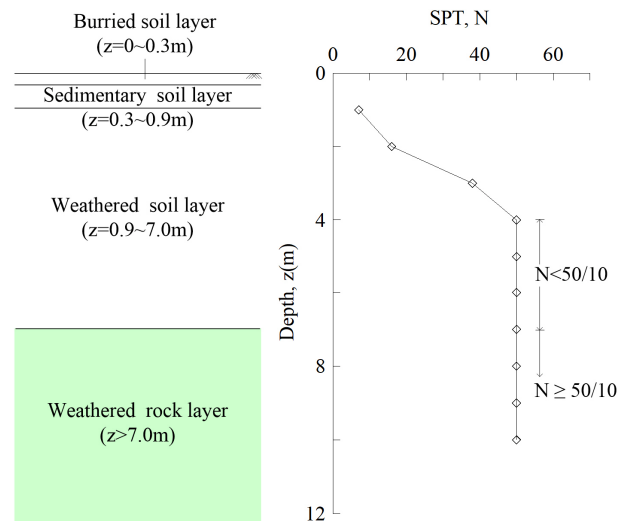


Fig. 2. Result of geotechnical investigation

(지층두께=0~0.9m), 풍화토층(지층두께=0.9~7.0m), 풍화암층(지층두께 ≥7.0m)으로 구성된 것으로 나타났다. 토사층을 구성하는 매립층의 경우 SPT의  $N \leq 7$ 인 연약 모래지반이고, 풍화토의 경우  $N=10\sim50$ 인 중간 또는 조밀한 모래지반인 것으로 조사되었다. 또한 풍화암층은 매우 파쇄가 심한 상태였고, 암반 타격시 실트질 중립모래로 파쇄되는 상태였다.

### 3.2 수평재하시험

Fig. 3은 현장지반에 설치된 삼축 마이크로파일이다. 각 축에 설치된 마이크로파일은 Fig. 3에 보인 바와 같이 외경이 90mm(내경 75mm)이고 두께 7.5mm인 강관에 내부가 그라우트로 채워진 구조의 파일이다. 그리고 각축의 파일은 파일캡으로 결합되어 있다.

현장 수평재하시험 과정은 FHWA(2005)에서 제안한 시험과정과 동일하며, 적용한 시험하중은 설계하중(40kN)의 2배 이상의 하중으로 90kN을 현장시험에 적용하였다. 파일의 구조상 수평하중의 작용 방향에 따라 파일의 거동 특성

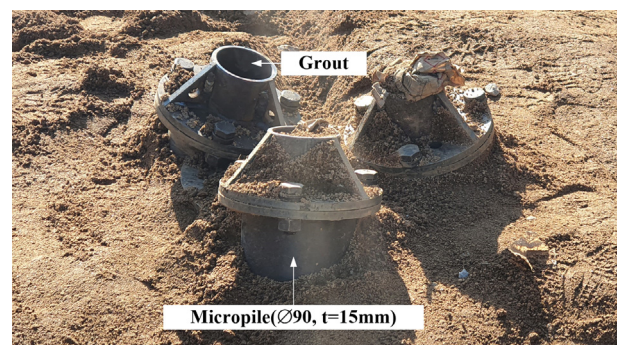


Fig. 3. TMP installed in soil layer

이 상이해질 수 있을 것으로 판단되어 본 연구에서는 대비되는 2가지 수평하중 방향으로 재하시험을 수행하였다.

Fig. 4는 삼축 마이크로파일의 파일번호와 시험시 수평하중 작용방향을 보인 것이다. 현장지반에 설치한 각축의 파일번호는 시계방향 순으로 정하였으며, No.1 파일 방향으로 하중을 가하는 경우(Test #1)와 No.2와 No.3 파일 사이 방향으로 하중을 가하는 경우(Test #2)로 구분하여 현장 실험을 수행하였다.

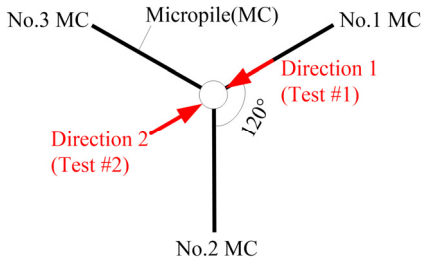


Fig. 4. Direction of lateral load in field test

Fig. 5는 지반에 설치된 시험파일, 하중재하 장치와 계측 장치를 보인 것이다. 하중재하는 로드셀(Load cell)이 설치된 유압잭(Hydraulic jack)을 활용해 수평하중을 가하였다. 시험시 가한 하중단계는 총 9단계이며, 각 단계별 수평하중은 10kN이다( $\Delta P_H=10kN$ ). 각 단계하중 재하시 지속시간(Duration time)은 10분 이내이며, 파일변위가 수렴되면 다음 단계의 하중을 가하였다. 그리고 최종단계의 수평하중을 가한 후, 파일에 발생된 소성변위를 측정하고자 재하(Unloading, 적용하중=10kN)하였다.

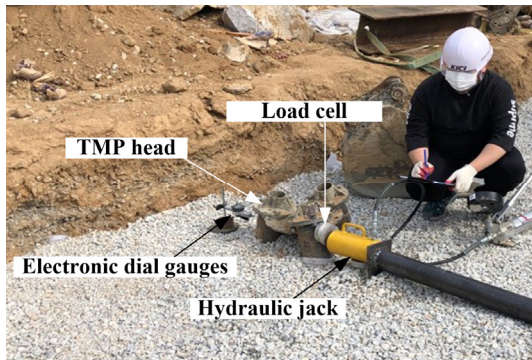


Fig. 5. Applying lateral load on head of No.1 MC (Test #1)

### 3.3 현장시험 결과

Fig. 6은 수평하중의 방향을 달리한 현장시험결과로부터 조사된 삼축 마이크로파일의 수평하중-변위관계( $P_H-\delta_h$ )를 보인 것이다. 하중방향을 달리하여 수평하중을 가한 결과, Test #1과 #2인 경우 파일의 하중-변위관계는 수평하중의

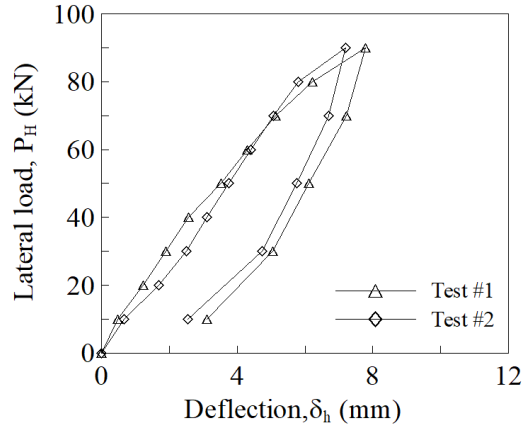


Fig. 6. Results of filed test on TMP

방향과 관계없이 Fig. 6에 보인 바와 같이 유사하고, 두 경우 모두가 하중이 증가함에 따라 파일에 발생된 수평변위가 대체로 선형적으로 증가하였다. 이 때 설계하중(90kN) 단계에서 파일에 발생한 파일변위는 Test #1 방향에서 7.8mm, Test #2 방향에서 7.2mm로 Test #1 방향에서 약간 큰 변위가 발생하였다. 또한 재하시 삼축 마이크로파일에 발생한 소성 변위는 약 2~3mm 정도로 나타났다. 수평하중의 방향에 따른 변위 차이는 미미한 것으로 이처럼 수평하중의 방향을 달리해도 파일에 발생한 변위가 큰 차이를 보이는 않는 요인은 Fig. 1에 보인 바와 같이 파일 캡에 의해 삼축 마이크로파일이 일체거동하기 때문인 것으로 판단되며, 수평하중 방향에 저항하는 각 축에 설치된 파일이 지반내에서 압축 또는 인장파일로서 복합적으로 저항하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

## 4. 3차원 수치해석

### 4.1 개요

현장 실험을 수행한 결과로부터 삼축 마이크로파일의 수평하중의 작용방향에 따라 파일의 수평변위량이 크게 달라지지 않았으나 파일 설계 시 고려한 설계하중의 2배(90kN)까지만 수행되었으며 이때의 수평변위는 8mm 이내로 수평 지지력을 산정하기 위한 15mm 변위까지 수평하중을 재하지 못하였다. 그리고 삼축 마이크로파일의 구조상 파일의 수평변위 특성이 수평하중의 작용방향에 따라 다르게 거동할 것으로 판단됨에 따라 이를 확인하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 3차원 수치해석은 현장 수평재하시험과 동일한 지반조건(지반, 하중조건)을 모사하여 수치해석을 수행하였으며, 현장시험과 동일한 조건에서의 수치해석 결과

와 비교하여 수치해석의 유효성을 확인하였으며, 현장재하시험에서 확인하지 못한 삼축 마이크로파일의 거동특성을 분석하였다. 그리고 현장재하시험에서 확인하지 못한 수평 지지력을 평가하기 위해 15mm 변위 발생 이상의 수평하중을 재하하중으로 수치해석에 적용하기 위해 현장실험결과를 기반으로 현장시험의 재하하중(90kN)의 2배 이상의 하중인 180kN을 재하하중으로 선정하여 수평지지력을 확인하였다.

## 4.2 수치해석 모델링 및 해석조건

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

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

Fig. 7은 현장지반 및 삼축 마이크로파일을 모델링한 해석단면을 보인 것이다. 해석단면의 크기는 파일캡의 크기, 각축 파일의 경사각과 길이 등을 고려하여 Fig. 7(a)와 같이 20×20×15(m)로 결정하였다. 지반요소의 크기는 파일에 인접한 요소의 경우 촘촘하게(요소크기=0.01m), 지반 경계부의 경우 느슨하게(요소 크기=3.0m) 형성시켰다.

모델링한 삼축 마이크로파일은 Fig. 1과 3에 보인 원형 파일구조를 동일하게 모사하였다. 각축에 설치한 마이크로파일의 구조는 강관 내부가 그라우트로 채워진 구조이므로, 모델링시 강관은 2차원 쉘요소(2D Shell element), 그라우트는 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 수평거동특성을 고려해 인터페이스 요소(Interface element)를 적용하였다. 파일과 지반에 대한 인터페이스 고려시 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,

R과  $t_v$ 는 강도감소계수와 가상두께(인터페이스)를 의미한다. 모래와 매끄러운 강철의 관계는 Shin(2015)가 제안한 바를 고려해 강도감소계수(R)은 0.65를 적용하고, 가상두께 계수( $t_v$ )는 0.1을 적용하였다. 모델링시 수평하중의 방향은 Fig. 7(b)와 같이 현장시험시 적용한 하중방향과 동일하게 적용하였다(Fig. 4). 수평하중은 현장시험과정에서 모사한 수치해석의 모사가능여부를 판단하는 경우 시험하중과 동일한 90kN을 적용하였으며 하중재하조건은 현장시험과 동일하게 단계별 하중 재하( $P_H=10kN$ )와 재하( $P_{H-unloading}=10kN$ )를 적용하였다.

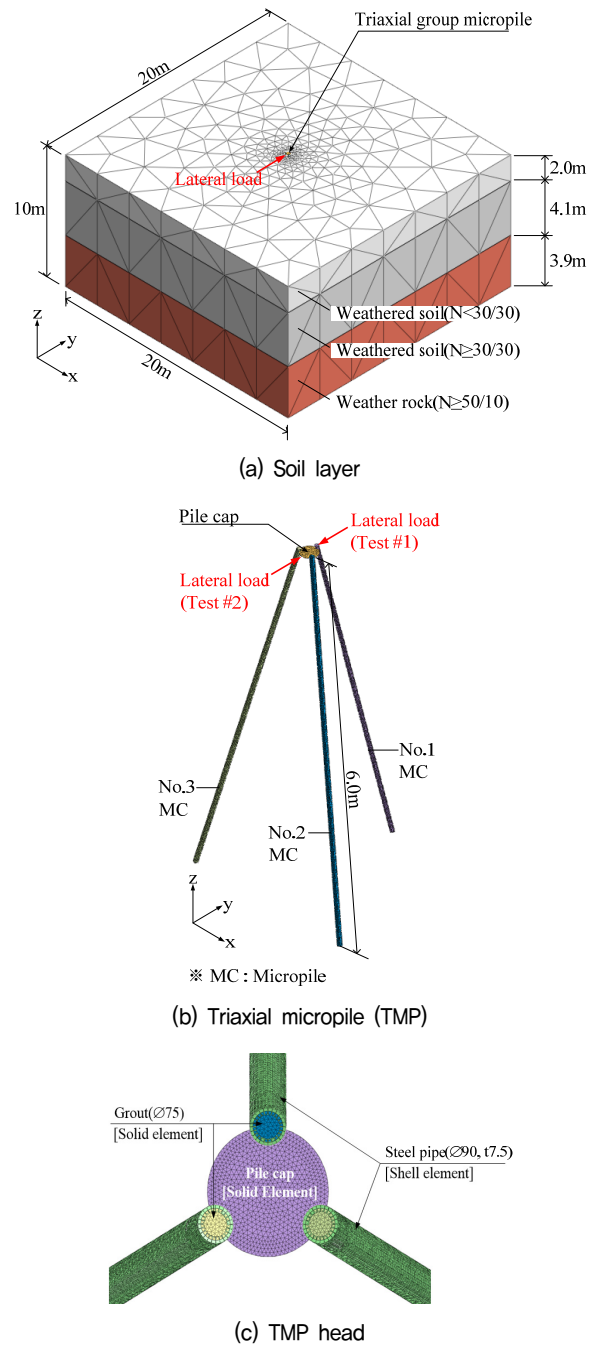


Fig. 7. Numerical modeling of TMP and soil layer

또한 삼축 마이크로파일의 수평지지력 결정을 위한 해석을 수행하는 경우 수평하중은 180kN을 적용하였으며, 하중 재하조건은 단계별 하중( $P_H=30kN$ )을 적용하였다. 객관적인 해석결과의 도출을 위해 모델링시 재료의 탄성계수(E), 프라송비( $\nu$ ), 단위중량( $\gamma$ ), 점착력(c), 흙의 전단저항각( $\phi$ ) 등의 재료물성값이 요구됨에 따라 본 연구에서는 현장지반조건과 실무에서 주로 적용하고 있는 경험적 제안값(AASHTO, 2002; FHWA, 2005, Shin, 2015)을 고려해 물성값을 결정하였으며, Table 1과 같이 산정하여 수치해석에 적용하였다.

Table 1. Input data used in numerical analysis

| Classification         | $\gamma$<br>( $kN/m^3$ ) | E<br>(MPa)         | $\nu$ | c<br>(kPa) | $\phi$<br>( $^\circ$ ) |
|------------------------|--------------------------|--------------------|-------|------------|------------------------|
| Upper weathered soils  | 18.0                     | 15,400             | 0.30  | 0          | 30                     |
| Lower weathered soils  | 20.0                     | 28,000             | 0.35  | 0          | 35                     |
| Weathered rocks        | 21.0                     | $1.00 \times 10^5$ | 0.33  | 20         | 33                     |
| Micropile (Steel pipe) | 78.5                     | $2.05 \times 10^8$ | 0.35  | -          | -                      |
| Pile cap (Steel)       | 78.5                     | $2.05 \times 10^8$ | 0.35  | -          | -                      |
| Grout                  | 23.5                     | $2.17 \times 10^7$ | 0.15  | -          | -                      |

### 4.3 결과분석

#### 4.3.1 현장재하시험과 3D 수치해석 변위비교

Fig. 8은 수치해석결과와 현장시험결과와의 비교를 통해 수치해석의 유효성을 평가하기 위해 수평하중 90kN을 Test #1과 Test #2의 방향으로 가한 경우의 수치해석결과와 현장 시험결과를 비교한 것이다. 수치해석결과, 수평하중 방향 Test #1인 경우 삼축 마이크로파일의 하중-변위 관계는 Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 수평하중이 증가함에 따라 변위가 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났고, 수평하중 90kN에 대한 수평변위는 7.8mm로 나타났다. 수평하중방향 Test #2인 경우 파일의 하중-변위 곡선도 Fig. 8(b)와 같이 하중 증가시 변위가 선형적으로 증가하였고, 수평하중 90kN에 대한 수평변위는 7.5mm로 나타났다. 그리고 시험결과와 수치해석을 통해 구한 파일의 하중-변위관계가 매우 유사한 것으로 나타났다. 그러므로 수치해석을 통해 지반내 마이크로파일 거동과 삼축 마이크로파일의 수평지지력에 대한 평가가 가능할 것으로 확인된다.

#### 4.3.2 수평하중 Direction 1 적용시 파일거동

Fig. 9는 No.1 마이크로파일 두부에 Fig. 7(b)의 Test #1

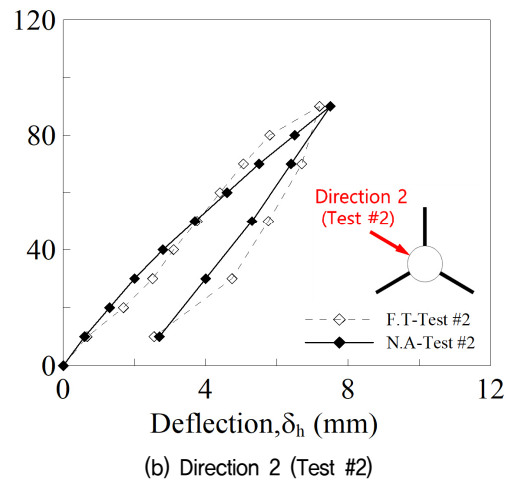
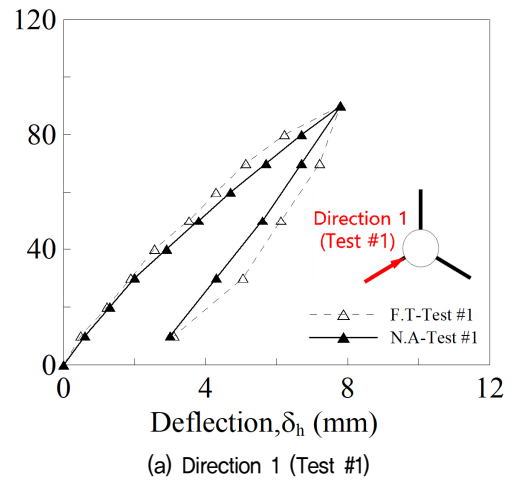
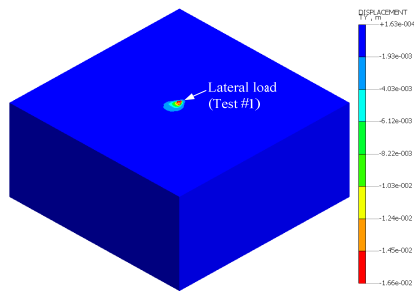


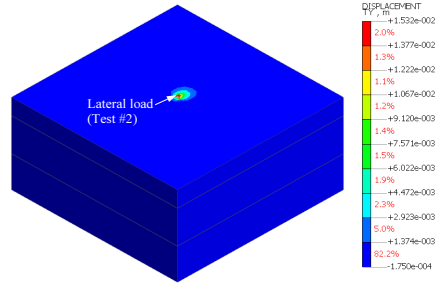
Fig. 8. Comparison of results in numerical analysis and field test

방향으로 수평하중 180kN을 가한 경우의 해석결과로부터 평가된 삼축 마이크로파일의 거동을 보인 것이다. 지반과 파일에 발생한 변위는 Fig. 9(a), (b)에 보인 바와 같이 지표면 부근의 지반과 파일 상단에 집중되었다. 특히 파일길이에 따라 발생한 변위는 Fig. 9(b)에 보인 바와 같이 전체 파일 길이의 약 1/3정도인 상부 파일길이 내에 집중되는 것으로 나타났다. 이때 삼축 마이크로파일에 발생한 최대 수평 변위는 15.83mm이었다.

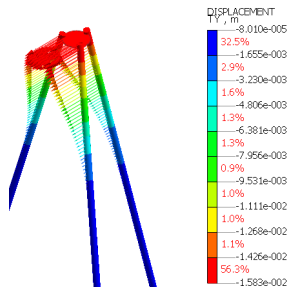
수평하중에 의해 각축 마이크로파일에 발생한 축력은 Fig. 9(c)에 보인 바와 같이 하중작용 방향에 위치한 No.1 파일의 경우 인장축력(+)을 보이며 파일길이에 따라 마이크로파일 전체에 발생된 축력이 감소되었다. 그러나 수평하중의 반대방향에 위치한 No.2와 No.3의 축력은 압축력(-)을 보이고 마이크로파일 전체에서 균질하게 발생하는 것으로 분석되었다. 각축의 파일모멘트는 Fig. 9(d)에 보인 바와 같이 No.2와 3의 마이크로파일에서 No.1보다 큰 모멘트가 발생하고 파일 상단에 집중되는 것으로 나타났다.



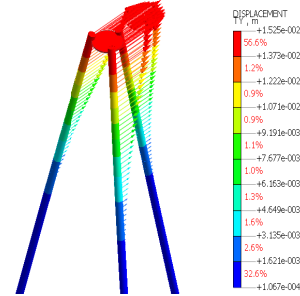
(a) Displacement contour (Y-direction)



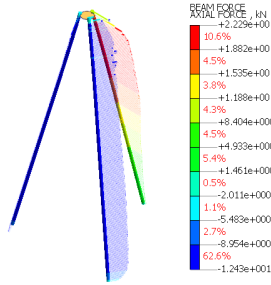
(a) Displacement contour (Y-direction)



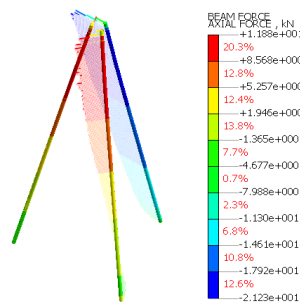
(b) Displacement vector (Y-direction)



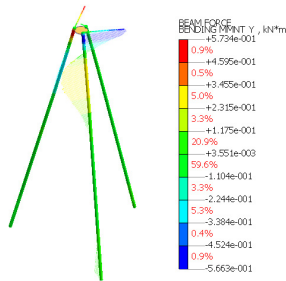
(b) Displacement vector (Y-direction)



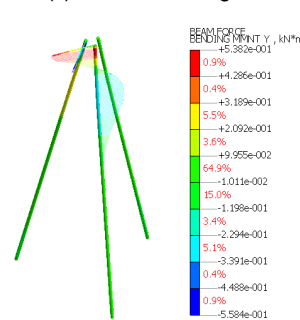
(c) Axial force diagram



(c) Axial force diagram



(d) Bending moment diagram (Y-direction)



(d) Bending moment diagram (Y-direction)

Fig. 9. Horizontal behavior of TMP for Direction 1

Fig. 10. Horizontal behavior of TMP for Direction 2

### 4.3.3 수평하중 Direction 2 적용시 파일거동

Fig. 10은 각축의 파일 중 No.2와 3인 마이크로파일 중앙의 두부에 Fig. 7(b)의 Test #2방향으로 수평하중 180kN을 가한 경우의 해석결과를 보인 것이다. 해석결과, 지반과 파일에 발생한 변위는 Fig. 10(a), (b)에 보인 바와 같이 파일에 인접한 지표면과 파일전체 길이의 1/3에 해당하는 상단 파일에 변위가 집중되는 것으로 평가되었다. 파일캡에서 최대 변위가 발생하였고, 이때 수평변위는 15.25mm인 것으로 나타났다. 마이크로파일의 축력은 Fig. 10(c)에 보인 바와

같이 No.1인 파일의 경우 파일 전체에 압축력(-)이 작용하는 것으로 나타났고, 이에 반해 No.2와 3 마이크로파일은 파일 상단에 인장력(+)이 크게 발생하는 반면, 하단에서는 인장력이 감소하는 것으로 평가되었다. 각축의 마이크로파일 모멘트는 Fig. 9(10)에 보인 바와 같이 No.2와 3의 마이크로파일에서 No.1보다 큰 모멘트가 발생하고 파일 상부에 집중되는 것으로 나타났다.

수치해석결과로부터 평가된 Fig. 9와 10의 결과에 보인

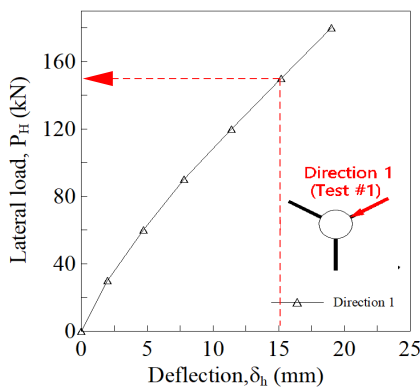
삼축 마이크로파일의 거동을 보면 하중작용의 방향에 따라 각축에 설치된 마이크로파일이 서로 다른 거동을 보인다. 특히 수평하중에 의해 발생된 각축의 파일축력을 보면, 수평하중의 작용방향에 위치한 마이크로파일에서는 인장축력이 발생하고 반대에 위치한 마이크로파일에서는 압축축력이 발생함을 알 수 있으며 이러한 영향 때문에 작용하는 하중 방향이 다르더라도 전체 삼축 마이크로파일은 유사한 변위 양상이 나타나는 것으로 판단된다.

#### 4.3.4 수평지지력 평가

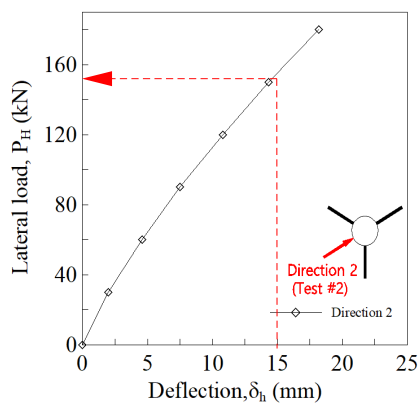
Fig. 11은 각 하중 방향별(Test #1,#2) 수평지지력 산정을 위해 수평하중(180kN)을 작용시켰을 경우 수치해석결과로부터 삼축 마이크로파일의 수평하중-변위 관계를 보인 것이다.

수평하중에 대한 파일의 허용 수평변위기준인 15mm를 기준한 경우, 해석결과로부터 평가된 삼축 마이크로파일의 수평지지력은 Test #1, Test #2 방향별로 각각 149, 155kN으로 약 4%의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다

방향별 약간의 지지력 차이는 방향별로 각각 삼축 마이크로파일에 작용하는 축력이 다르게 발생하고 지반과의 저항력 분포의 차이로 인해 파일의 지지력에 영향을 미치는



(a) Test #1



(b) Test #2

Fig. 11. Numerical analysis result with a 180kn horizontal load

것으로 판단할 수 있다.

거동분석결과 Test #2 방향인 경우 2개의 파일(MC2, MC3)에 인장(+)축력 발생하고, Test #1인 경우 1개의 파일(MC1)에 인장(+)축력이 발생하는 것으로 분석되었으며, 인장(+)축력에 더 큰 저항력을 나타내는 마이크로파일의 특성이 반영되어 Test #2 방향에서 미미하게 더 큰 저항력이 발휘되는 것으로 평가된다.

## 5. 결 론

본 연구는 삼축 마이크로파일의 거동특성 및 지지력을 평가하기 위해 현장시험과 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 조사된 지반조건에 대한 삼축 마이크로파일의 하중방향 Test #1, Test #2에 따른 현장수평재하시험 결과 수평하중 90kN 재하시 각각 7.8, 7.2mm의 변위가 발생하였다. Test #1 방향에서 변위가 미소하게 크게 발생하였으나 차이는 미미한 것으로 분석되었다. 그리고 현장시험과 동일한 조건으로 수치해석을 수행한 결과 수평 재하 및 제하에 따른 응력-변위 거동특성 및 수평하중 방향별 거동특성 모두 현장시험 결과와 유사하게 나타남에 따라 3차원 수치해석을 통한 삼축 마이크로파일의 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (2) 3차원 수치해석에 의한 각축의 마이크로파일의 거동 분석결과 Test #1 방향인 경우 1개의 마이크로파일(MC1)에 인장(+)축력이 발생하고, Test #2방향 수평하중인 경우 2개의 마이크로파일(MC1, MC2)에 인장(+)축력 발생하는 것으로 분석되었다. 인장(+)축력이 더 많이 발휘되는 Test #2 방향 수평하중에 대하여 약간 큰 수평 저항력을 나타내는 것으로 분석되었다. 그러나, 이 방향에 따른 수평 저항력의 차이는 매우 미미하고 30도 차이로 반복되는 특성을 고려할 때 방향에 따른 거동특성은 거의 동일한 것으로 평가되었다.
- (3) 대상 현장의 3차원 수치해석에 의한 삼축 마이크로파일 수평지지력은 미미하지만 변위가 상대적으로 큰 Test #1방향에 대하여 산정하는 것이 바람직하며 수평지지력은 149kN으로 산정되었다.
- (4) 그러나 삼축 마이크로파일의 효율적인 현장적용을 위해 삼축 마이크로파일의 거동 및 지지력, 내진 저항성 등에 영향을 미치는 삼축 마이크로파일의 설치 각도, 파일 길이 등의 영향인자를 고려한 다양한 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. FHWA (2005), Micropile design and construction, U.S. department of transportation, FHWA NHI-05-039, December, pp. 7-1~7-28.
4. 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).
5. 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*, Vol. 36, No. 11, pp. 25~49 (In Korean).
6. 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, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 6, pp. 29~38 (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*, Vol. 21, No. 7, pp. 5~16 (In Korean).
8. 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. 3, pp. 191~200 (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*, Vol. 31, No. 6, pp. 5~13 (In Korean).
11. Shin, J. H. (2015), *Geomechanics & Engineering-analysis and design*, CIR, Korea, pp. 573~608 (In Korean).