

## 현장 재하시험을 통한 파형 마이크로파일의 기초보강 효과 분석

### Evaluation of the Effect of Waveform Micropiles on Reinforcement of Foundation Structures Through Field Load Tests

백 성 하<sup>1</sup>      Baek, Sung-Ha      한 진 태<sup>2</sup>      Han, Jin-Tae  
김 석 중<sup>3</sup>      Kim, Seok-Jung      김 준 영<sup>4</sup>      Kim, Joonyoung

#### Abstract

In this study, we investigated the reinforcing effects of waveform micropiles in a stratigraphic setting comprising buried soil, weathered soil, and weathered rock. We conducted a series of field load tests and determined that waveform micropiles exhibited sufficient bearing capacity through frictional resistance in the soil layer and demonstrated favorable constructability in conditions with deep bedrock layers. Moreover, the vertical stiffness of waveform micropiles was approximately 2.2 times higher than that of conventional micropiles when subjected to the same design load. Pile group load tests comprising conventional and waveform micropiles showed that micropiles with higher stiffness carried a greater proportion of the load. Although there was no significant difference in the bearing capacity between conventional and waveform micropiles under the same design load, waveform micropiles with higher stiffness showed a load-carrying capacity 1.7 to 3.2 times greater than that of conventional micropiles. These findings suggest that waveform micropiles can be effectively used for foundation reinforcement and reduce the risk of foundation failure when increased loads due to modifications such as expansion remodeling are expected.

#### 요 지

본 연구에서는 파형 마이크로파일의 기초보강 효과를 분석하기 위해서, 매립토-풍화토-풍화암의 지층구조를 보이는 지반에 마이크로파일을 설치한 뒤 현장 재하시험을 수행했다. 단일 마이크로파일 재하시험 결과, 파형 마이크로파일은 토사층에서 발견되는 주면마찰력만으로도 충분한 지지력을 가져 암반층의 심도가 깊은 지반 조건에서 유리한 시공성을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 동일한 설계하중이 적용되었음에도, 단일 마이크로파일 재하시험 시 설계하중 범위 내에서 평가된 파형 마이크로파일의 연직강성이 일반 마이크로파일의 연직강성에 비해 약 2.2배 큰 것으로 나타났다. 일반 및 파형 마이크로파일로 구성된 무리말뚝 재하시험 결과, 강성이 큰 마이크로파일이 높은 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 일반 및 파형 마이크로파일 모두 동일한 설계하중이 적용되어 지지력에는 큰 차이를 보이지 않았음에도, 강성이 큰 파형 마이크로파일이 작게는 1.7배에서 크게는 3.2배 큰 하중 분담율을 보였다. 파형 마이크

- 1 정희원, 한경국립대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National Univ.)
- 2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 경영기획실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Planning and Coordination Department, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)
- 4 정희원, 한남대학교 AI융합학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Department of Artificial Intelligence, Hannam Univ., Tel: +82-42-629-7473, jykim91@hnu.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 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.

로파일은 대부분 보강기초로 활용될 것으로 예상되는데, 증축 리모델링 등을 통해 추가적인 하중 작용 시 많은 하중을 분담함으로써 기존 기초의 지지력 파괴 가능성을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords :** Axial load capacity, Axial stiffness, Field load test, Waveform micropile

## 1. 서 론

국내에서 공동주택 리모델링과 관련한 법적 근거가 마련된 2002년 이래 정책적, 기술적 발전을 거듭한 결과(Jang, 2013), 최근 노후한 구조물의 리모델링과 내진 보강 사례가 증가하고 있다. 내진 성능 향상 및 구조물의 리모델링 시 요구되는 연직 지지력 향상을 위해 보강 말뚝(reinforcing pile)을 설치하는 경우, 제한적인 현장 조건을 고려해 협소한 공간에서 높은 시공성을 보이는 마이크로파일(micropile) 공법이 주로 적용된다. 마이크로파일 공법은 1950년대 이탈리아에서 처음 소개된 공법으로 대형 장비의 진입이 어려운 지역의 신설 기초, 기존 기초의 지지력 보강 및 침하 억제 등을 위한 목적으로 다양하게 사용되고 있다(Bruce and DiMilloi, 1995). 그러나 마이크로파일은 100mm에서 300mm 사이의 직경을 갖는 소구경 말뚝이므로 말뚝 설계 시 선단지지력의 영향을 고려하지 않으며, 상대적으로 연약한 토사층에서의 주면마찰력을 무시한다(FHWA, 2005). 이러한 설계 방식은 높은 지지력 확보를 위해 말뚝의 길이를 과도하게 늘리는 결과를 초래해 경제성을 악화시키는 원인으로 작용한다. 따라서, 마이크로파일의 시공방법 및 형상 개선을 통해 지지력 및 경제성을 증대시키기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다(Juran et al., 2001; Gomez et al., 2003; You et al., 2003; Sadek and Isam, 2004; Tsukade et al., 2006; Han et al., 2013; Jang et al., 2015; Jang et al., 2016).

이 중 Han et al.(2013)은 제트 그라우팅(jet-grouting)을 통해 말뚝체를 파형(waveform)의 형상으로 시공하는 파형 마이크로파일(waveform micropile) 공법을 개발한 바 있다. 파형 마이크로파일 공법은 말뚝의 측면에 일정 간격으로 돌출된 전단키(shear key)를 형성해 토사층에서 큰 주면마찰력을 발생시켜 지지력을 향상시키는 공법이다. 여러 연구자들(Jang and Han, 2018; Jang and Han, 2019; Jang et al., 2019)은 파형 마이크로파일의 지지력 향상 효과 검증 및 지지거동 평가를 위해서 현장시험, 모형시험, 수치해석 등을 수행해 왔다. Jang

and Han(2018)은 풍화토 지반에서 현장시험을 수행하여 파형 마이크로파일의 지지능 향상 효과를 검증했다. 현장시험 결과, 길이가 3m 더 긴 일반 마이크로파일과 비교해 파형 마이크로파일의 지지력이 1.3배에서 2.3배 크며, 동일한 크기의 하중(사용하중 범위) 재하 시 파형 마이크로파일의 변위가 일반 마이크로파일에 비해 최대 약 46.3% 감소하는 것으로 나타났다. Jang and Han(2019)은 건조한 모래지반을 조성한 뒤 원심모형시험(centrifuge model test)을 수행하여 전단키의 위치가 파형 마이크로파일의 지지력에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과, 파형 마이크로파일의 지지력은 일반 마이크로파일의 지지력보다 두 배 이상 우수하며, 전단키가 깊은 위치에 형성될수록(즉, 구속압이 큰 지중에 형성될수록) 지지력 향상 효과가 크게 나타났다. Jang et al.(2019)은 수치모델링(numerical modeling)을 통해 파형 마이크로파일이 연직하중을 받을 때 주변 지반의 변위를 분석해 지지거동을 규명하였고, 이를 바탕으로 파형 마이크로파일의 지지력 예측식을 제안했다. Jang and Han(2018)이 수행한 현장시험 결과와 Jang and Han(2019)이 수행한 원심모형시험 결과를 바탕으로, 제안된 예측식을 통해 파형 마이크로파일의 지지력을 비교적 정확히 평가할 수 있음을 확인했다.

상술한 연구들(Jang and Han, 2018; Jang and Han, 2019; Jang et al., 2019)은 일반 마이크로파일과 비교해 파형 마이크로파일이 높은 지지력을 보임을 확인했다는 의의가 있었으나, 비교 대상으로 설정된 일반 마이크로파일이 모두 토사층(풍화토, 모래 등)에 거치되었다는 한계가 있었다. 실제 일반 마이크로파일의 선단이 대부분 암반층(풍화암 혹은 연암)에 위치하며, 암반층에서 발견되는 주면마찰력이 지지력의 주요한 성분임을 고려할 때 기존 연구 결과는 실제와 다소 차이가 있을 것으로 보인다. 또한, 파형 마이크로파일은 대부분 기존 기초가 존재하는 상태에서 추가로 설치되는 보강기초이다. 따라서 파형 마이크로파일은 구조물의 원래 하중과 증축 리모델링 등을 통해 추가적으로 발생하는 하중을 기존 기초와 분담하게 된다. 기존 기초는 이미 상당

한 크기의 구조물 하중을 받고 있어 추가적인 하중이 가해지는 경우 지지력 파괴 가능성이 높은 상태이므로, 보강기초인 파형 마이크로파일의 최대한 많은 하중을 분담해야 한다. 상술한 연구들을 통해 높은 지지성능이 확인된 만큼 파형 마이크로파일이 많은 하중을 분담할 수 있을 것으로 예상되지만, 이를 실제 현장에서 검증한 사례는 없는 것으로 파악된다.

본 연구는 실제 마이크로파일 공법이 적용되는 현장 조건에서 파형 마이크로파일의 기초보강 효과를 분석하기 위해 수행되었다. 매립토-풍화토-풍화암의 지층구성을 보이는 지반에 총 여덟 본의 마이크로파일(일반 마이크로파일 다섯 본과 파형 마이크로파일 세 본)을 설치한 뒤 현장 재하시험을 수행했다. 우선 일반 마이크로파일 한 본과 파형 마이크로파일 두 본에는 항복(yield)이 나타날 때까지 압축하중을 가하여 지지력 및 강성을 평가했다. 나머지 말뚝(일반 마이크로파일 네 본과 파형 마이크로파일 한 본)에는 설계하중을 약간 상회하는 수준까지만 압축하중을 가해 강성을 평가한 뒤, 하중을 제거했다. 이후 일반 마이크로파일 네 본과 파형 마이크로파일 한 본을 기초 슬래브(foundation slab)로 묶어 무리 말뚝을 모사했다. 기초 슬래브에 2,000kN의 연직하중을 재하한 뒤, 이를 205일 간 유지시키며 무리말뚝 내에서 각각의 마이크로파일에 가해지는 하중을 측정해 하중 분담율을 분석했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 연구에서 수행된 현장 재하시험의 조건 및 방법을 요약했다. 3절에서는 단일 마이크로파일 재하시험 결과에 대해 기술했고, 4절에서는 무리 말뚝 재하시험 결과를 통해 하중 분담율을 분석했다. 본 연구의 요약 및 결론은 5절에서 기술했다.

## 2. 현장 재하시험 조건 및 방법

### 2.1 지반 조건

본 연구에서는 경기도 이천시 마장면에 위치한 현장에 마이크로파일을 설치한 뒤 재하시험을 수행했다. Fig. 1은 현장의 중앙부에서 수행된 시추조사 결과로, 각 심도별 지층구성과 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)을 통해 구해진 SPT N값을 보여준다.

대상 현장은 매립토-풍화토-풍화암의 전형적인 국내 지층구조를 보였다. 지표로부터 5.4m까지는 매립토가 나타

났는데, 3.8m까지는 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 따라 SM(실트질 모래), 3.8m에서 5.4m까지는 CL(실트질 점토)로 분류되었다. 5.4m 아래부터는 국내의 대표적인 지층구조인 풍화대층(풍화토 및 풍화암층)이 존재했다. 풍화대층의 SPT N값은 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보였는데, 이는 모암(parent rock)의 풍화도가 심도에 따라 감소하기 때문으로 판단된다(Lee, 1993). KGS(2009)에 따라 SPT N값 50/15을 기준(즉, 표준관입시험 샘플러 50회 타격 시 관입깊이 15cm 이하를 기준)으로 풍화토와 풍화암을 구분한 결과, 5.4m에서 12m까지는 풍화토층, 12m부터 18m까지는 풍화암층이 분포하는 것으로 나타났다.

### 2.2 마이크로파일 설계 및 시공

Fig. 1과 같은 지층 분포를 보이는 대상 현장에 일반 마이크로파일 다섯 본과 파형 마이크로파일을 세 본을 시공한 뒤, 압축하중 재하시험을 수행했다. 일반 마이

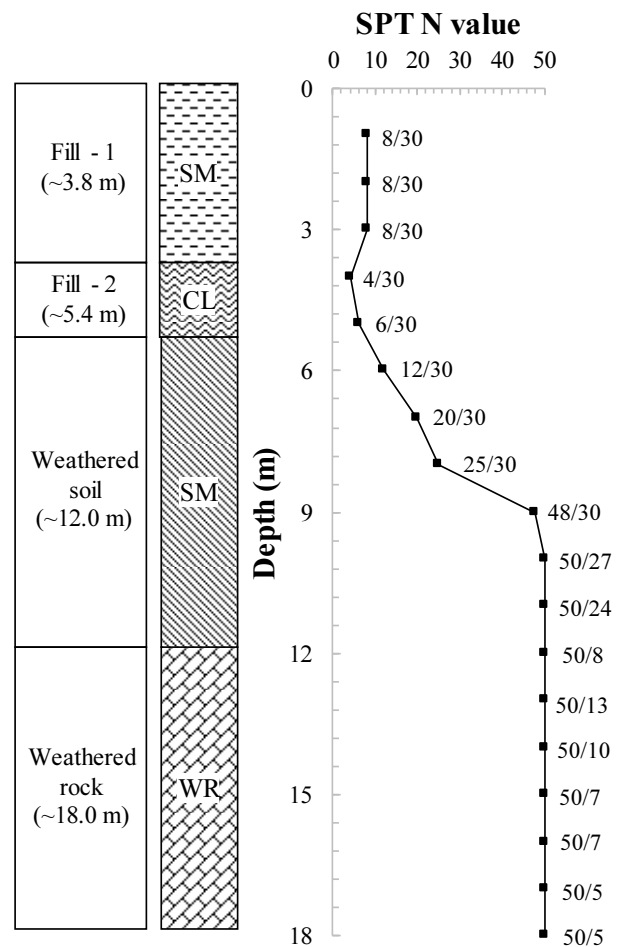


Fig. 1. Soil profiles and SPT N variations of the test site

크로파일은 토사층에 케이싱(casing)을 삽입하며 설계 깊이까지 천공한 뒤 이형 강봉(직경이 50mm이고 항복하중이 982kN 인 이형 강봉)을 근입한 후, 중력식 그라우팅을 통해 말뚝체를 시공했다. 파형 마이크로파일은 제트 그라우팅 기능이 구비된 천공 장비로 설계 깊이까지 천공한 후, 장비의 인발 시간을 조절(그라우트 분사 압은 약 40MPa로 고정)해 파형의 말뚝체가 형성되도록 시공했다(Jang and Han, 2016). 파형 마이크로파일의 중앙에도 일반 마이크로파일과 동일한 강봉을 근입했다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 일반 마이크로파일의 직경( $D$ )은 150mm이고, 파형 마이크로파일 본체의 직경( $D_i$ )과 전단키의 직경( $D_o$ )은 각각 300mm와 500mm였다. 또한 Han et al.(2013)의 연구에서 동일한 크기의 하중이 가해질 때 가장 뚜렷한 변위 억제 효과를 나타냈던 파형 마이크로파일 형상을 참고해, 전단키의 길이( $l$ )와 간격( $s$ )은 모두 500mm로 결정되었다. 마이크로파일의 전체 길이( $L$ )는 FHWA(2005)의 마이크로파일 설계하중( $P_{allow}$ ) 식 (1)이 600kN이 되도록 결정했다.

$$P_{allow} = \frac{\alpha_{bond}}{F.S.} \times \pi \times D_b \times L_b \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_{bond}$ 는 말뚝체와 지반의 부착력을,  $F.S.$ 는 안전율을 의미한다. 또한  $D_b$ 와  $L_b$ 은 각각 마이크로파일의 직경과 정착부의 길이를 의미한다. FHWA(2005)은 마이크로파일이 설치된 지반의 특성과 그라우팅 방식(중력식 그라우팅, 가압식 그라우팅 등)을 고려해  $\alpha_{bond}$ 의 범위를 제시하고 있다. 본 연구에서는 일반 및 파형 마이크로파일이 각각 중력식 그라우팅과 가압식 그라우팅(즉, 제트 그라우팅)으로 시공되었음을 고려해, 각각의 그라우팅 방식에 대해 제시된  $\alpha_{bond}$  중 지층별 강도(느슨 혹은 연약한 경우 하한값, 조밀한 경우 상한값)에 부합하는 값을 사용했다. 또한 일반 마이크로파일의 정착길이( $L_b$ )는 케이싱이 설치되지 않은 풍화암층만을 고려했다. 파형 마이크로파일에는 케이싱이 적용되지 않으므로 전체 길이( $L$ )와 정착길이를 동일하게 적용했다. 다만, 파형 마이크로파일의 직경 변화를 고려한 설계하중 산정 방법이 제시된 바 없으므로, 보수적인 관점에서 마이크로파일 본체의 직경( $D_i$ )만을 고려했다(Jang and Han, 2016). 안전율은 모두 2.0을 적용했다. 상술한 과정에 따라 산정된 일반 및 파형 마이크로파일의 길이는 각각 15.7m와 10.8m였다. 즉, 일반 마이크로파일의 지지력은 정착부에 해당하는 풍화암층 3.7m에서 발현되고, 파형 마이크로파일의 지지력은 토사층 10.8m에 걸쳐 발현될 것으로 예상된다.

Fig. 3은 여덟 본의 시험말뚝과 총 17m 심도까지(풍화암층의 5m 깊이까지) 설치된 반력 앵커(anchor)의 배치도를 나타낸다. 일반 마이크로파일 1(CV1)과 파형 마이크로파일 1, 2(WF1, WF2)는 항복(yield)이 나타날 때까지 압축하중을 가하여 지지력 및 강성을 평가했다. 나머지 일반 마이크로파일(CV2, CV3, CV4, CV5)과 파형 마이크로파일(WF3)은 설계하중을 약간 상회하는 수준까지만 압축하중을 가해 강성을 평가한 뒤, 하중을 제거했다. 이후 이들을 철근 콘크리트로 제작된 기초 슬래브로 묶어 무리말뚝을 모사했다. 기초 슬래브의 무게는 총 227kN으로 바닥면이 지반에 닿도록 시공했다. 이후 기초 슬래브의 중앙에 2,000kN의 압축하중을 재하한 뒤, 이를 205일 간 유지시키며 무리말뚝 내에서 각각의 마이크로파일에 가해지는 하중을 측정해 하중 분담율을 분석했다.

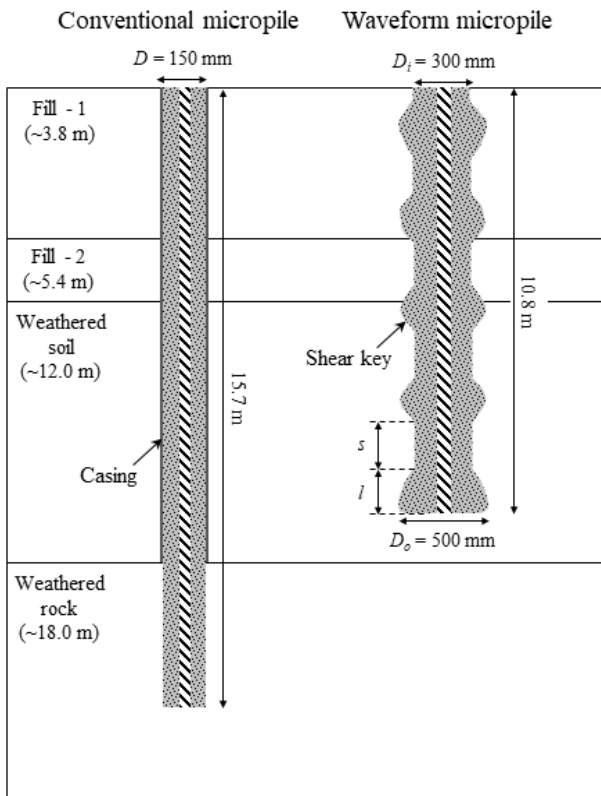
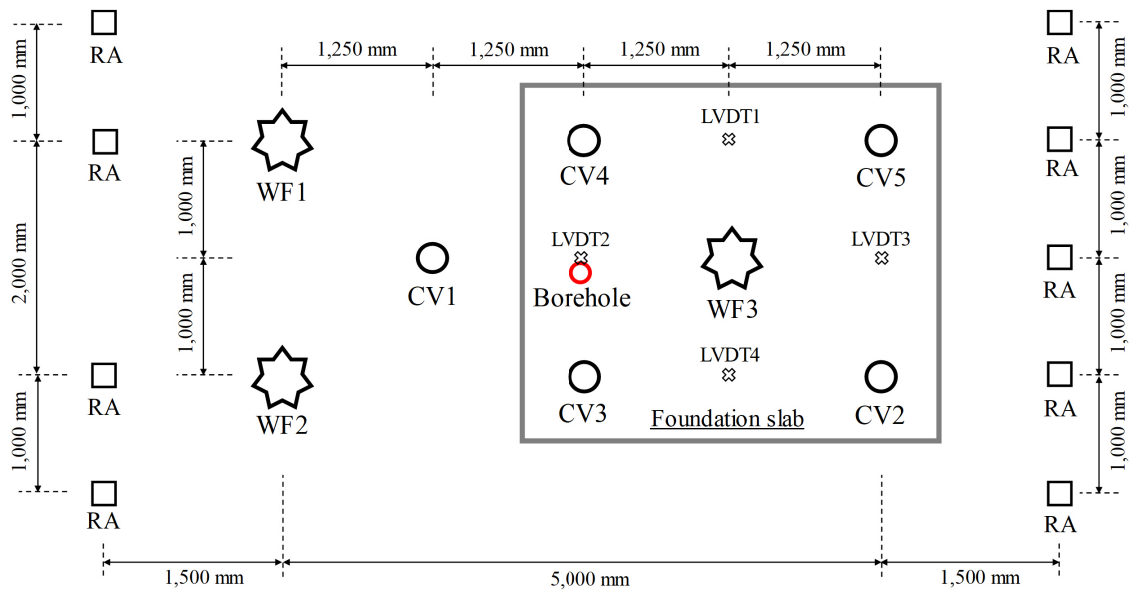


Fig. 2. Schematic diagram of conventional and waveform micropiles used in this study



WF: Waveform micropile, CV: Conventional micropile, RA: Reaction anchor

Fig. 3. Layout of the test piles and reaction anchors

### 2.3 현장 재하시험 방법

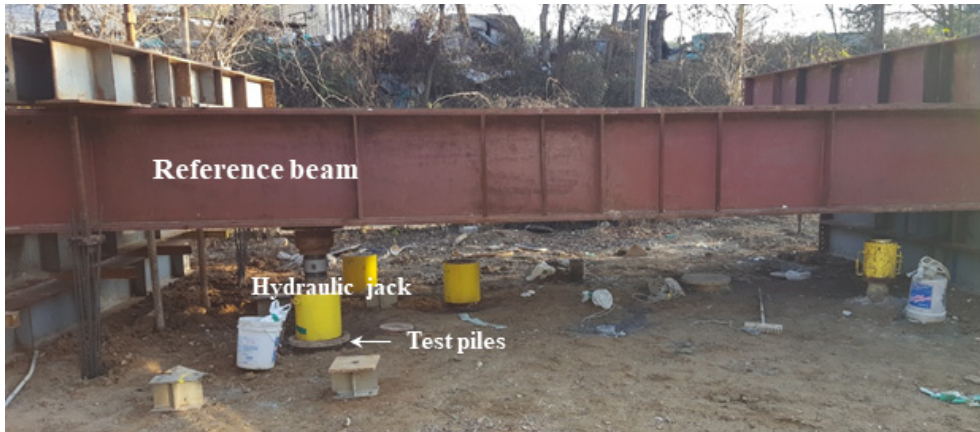
Fig. 4는 본 연구에서 수행된 현장 재하시험의 사진을 보여준다. 마이크로파일 시공 후 28일 동안 그라우트를 양생시킨 뒤 현장 재하시험을 수행했다. 공칭치수가 900mm × 300mm 및 700mm × 300mm인 H형강을 반력 앵커에 연결해 재하대(reference beam)로 사용했다. 4,000kN의 용량을 가지는 유압잭(hydraulic jack)을 이용해 말뚝 두부 혹은 기초 슬래브의 중앙에 압축하중을 가했고, 이때 하중계(load cell)과 변위계(linear variable displacement transducer, LVDT)를 이용해 연직하중과 변위를 각각 측정했다. 모든 재하시험 시 하중계는 말뚝 두부와 유압잭 사이에 설치했다. 또한 단일 마이크로파일 재하시험 시 연직변위는 말뚝 두부에 변위계를 설치해 직접 측정했고, 무리말뚝 재하시험 시 연직변위는 기초 슬래브의 네 위치에 변위계를 설치한 뒤 측정했다(Fig. 3 참조).

또한 본 연구에서는 EM(Elasto-Magnetic) 센서를 도입해 무리말뚝을 구성하는 각각의 마이크로파일(CV2, CV3, CV4, CV5, WF3)에 가해지는 연직하중을 장기계측 하였다. Fig. 5(a)와 같이 EM 센서는 두 개의 원통형 코일로 구성되어 있으며, 1차 코일(primary coil)은 자기장을 생성하고 전자기 유도원리(패러데이의 법칙)에 의해 2차 코일(secondary coil)에 유도된 전압을 측정한다. 이와 같은 과정을 통해 상대투자율(relative magnetic

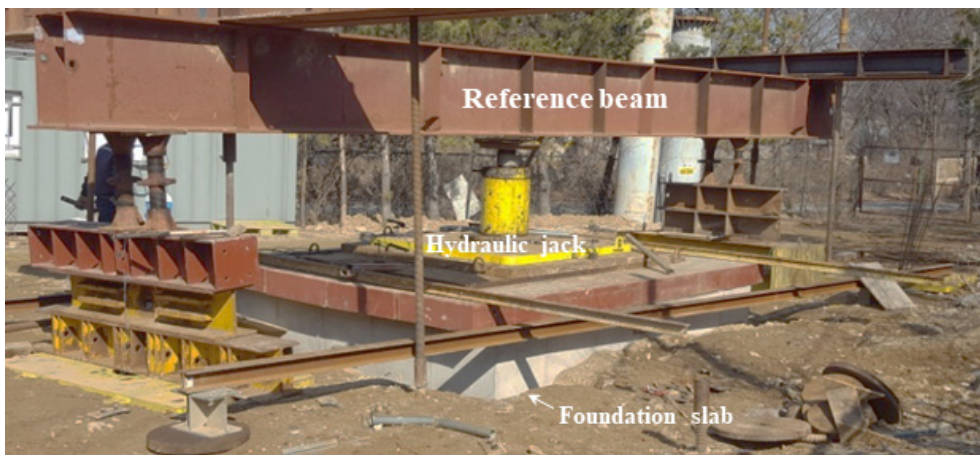
permeability)을 산정하면, 강봉과 같은 강자성(ferromagnetic) 재료의 투자율이 온도와 응력의 함수라는 사실에 기초해 강봉에 가해지는 하중을 측정할 수 있다(Sumitro et al., 2002; Cappello et al., 2018). Fig. 5(b)와 같이 마이크로파일의 중심부에 근입되는 이형 강봉의 선단부에 EM 센서를 부착했다. 기초 슬래브를 시공하기 전 마이크로파일의 두부에 설계하중 이하의 연직하중(400kN)을 서서히 가했고, 이때 하중계를 통해 측정되는 연직력을 통해 EM 센서 측정값을 교정(calibration)한 뒤 사용했다.

단일 마이크로파일의 재하시험 시, ASTM(1994)을 참고해 연직 압축력을 100kN 씩 나눠 단계적으로 가했으며 각 단계별 하중을 최소 5분에서 최대 20분간 유지했다. 일반 마이크로파일 1(CV1)과 파형 마이크로파일 1, 2(WF1, WF2)는 말뚝 두부의 하중-변위 곡선을 통해 항복하중이 확인될 때까지 하중을 가했다. 나머지 일반 마이크로파일(CV2, CV3, CV4, CV5)과 파형 마이크로파일(WF3)은 설계하중을 약간 상회하는 수준까지만 하중을 가했다.

일반 마이크로파일(CV2, CV3, CV4, CV5)과 파형 마이크로파일(WF3)을 하나의 기초 슬래브로 묶은 뒤 수행된 무리말뚝 재하시험은 연직 압축력을 250kN 씩 나눠 단계적으로 수행했다. 각 단계별 하중은 15분간 유지했으며, 최종적으로 2,000kN의 연직하중을 205일 간 유

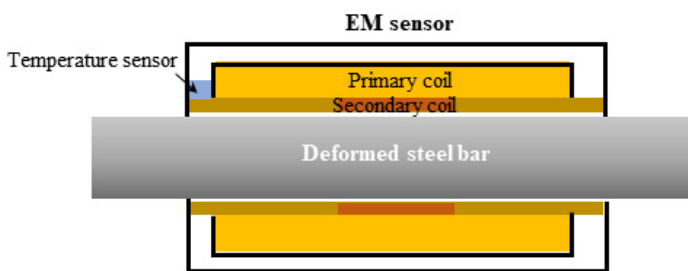


(a)



(b)

Fig. 4. Pictures of the pile load tests conducted in this study: (a) a single pile load test and (b) a group pile load test



(a)



(b)

Fig. 5. EM (Elasto-Magnetic) sensors attached to a deformed steel bar used in this study: (a) schematic and (b) picture

지시키며 무리말뚝 내에서 각각의 마이크로파일에 가해지는 하중을 측정해 하중 분담율을 분석했다.

#### 2.4 마이크로파일 지지력 및 강성 평가 방법

말뚝의 허용지지력은 현장 재하시험 결과로부터 말

뚝의 극한하중을 평가한 뒤 안전율 3.0을 적용하여 결정할 수 있다. 하지만, 현장 재하시험 시 말뚝에 설계하중의 2배에서 3배 크기의 하중을 가하는 것이 일반적이기 때문에 극한하중을 확인할 수 없는 경우가 많다. 이러한 경우, 현장 재하시험 결과로부터 항복하중을 평가하고 안전율 2.0을 적용하여 허용지지력을 결정한다. 이때 항

복하중은 현장 재하시험 중 하중(P)-시간(T)-침하량(S) 측정값으로부터 도출한 곡선의 특성을 기하학적으로 분석하거나 수학적 변형을 통하여 항복하중을 산출하는 방법, 하중-침하량 외에 침하량 발생의 시간 경과에 따른 특성을 추가하여 해석하는 방법, 하중재하에 따른 말뚝재료의 탄성변위를 감안하는 방법 등의 해석기법이 제안되어 있다. 대표적으로 P-S 분석법, Log P-Log S 분석법, Log T-S 분석법, P-Log S 분석법, P-dS/d(Log T) 분석법 등이 있다(KGS, 2018). 본 연구에서는 설계하중의 약 3배까지 재하한 일반 마이크로파일 한 본(CV1)과 파형 마이크로파일 두 본(WF1, WF2)의 현장 재하시험 결과로부터 다양한 항복하중 분석법을 적용하여 항복하중과 허용지지력을 평가하였다. 또한, 일반 마이크로파일 다섯 본과 파형 마이크로파일 세 본에 대해 설계하중 600kN을 재하하였을 때 발생한 말뚝 두부의 침하량으로부터 설계하중 범위 안에서의 말뚝 연직강성을 평가하였다.

### 3. 단일 마이크로파일 재하시험 결과

설계하중의 약 3배까지 재하한 일반 마이크로파일 한 본(CV1)과 파형 마이크로파일 두 본(WF1, WF2)의 현장 재하시험 결과로부터 항복하중과 허용지지력을 평가하였다. 먼저, 세 본의 파일에 대해 하중(P)-말뚝 두부 전체 침하량(S) 곡선을 Fig. 6에 도시하였다. 그리고 하중(P)-말뚝 두부 전체 침하량(S)을 양대수 평면에 도시하여 Fig. 7에 나타내었다. P-S 곡선과 log P-log S 곡선 모두에서 항복하중이 1번 파형 마이크로파일(WF1)은 약 1700kN, 2번 파형 마이크로파일(WF2)은 약 1,600kN,

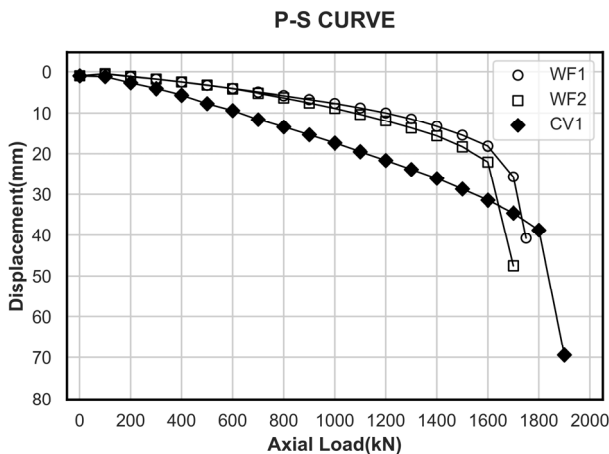


Fig. 6. Load (P) - total displacement (S) curve for WF1, WF2, CV1

1번 일반 마이크로파일(CV1)을 약 1,800kN 정도로 나타냈다.

log T - S 분석법은 각 하중 단계에서 재하 후 경과시간(T)과 전체 침하량(S)를 반대수 평면에 도시하고, 경과시간에 따른 침하량이 급격하게 증가하는 하중을 항복하중으로 결정한다. 세 본의 마이크로파일에 대해 경과시간에 따른 침하량이 급격하게 증가하는 하중 단계의 log T - S곡선을 Fig. 8에 도시하였다. WF1의 경우, 1,700kN까지는 재하 후 시간이 경과하여도 추가 침하가 거의 발생하지 않았으나, 1,750kN에서는 재하 후 약 10분까지 상당한 침하가 발생하였다. WF2는 1,700kN의 하중 단계에서 재하 직후부터 5분까지, CV1은 1,700kN의 하중 단계에서 재하 후 5분이 경과한 후부터 급격하게 침하가 증가하였다.

P - dS/d(Log T) 분석법은 각 하중단계에서 재하 후 일정시간 동안의 침하속도를 하중과 함께 도시하고, 곡

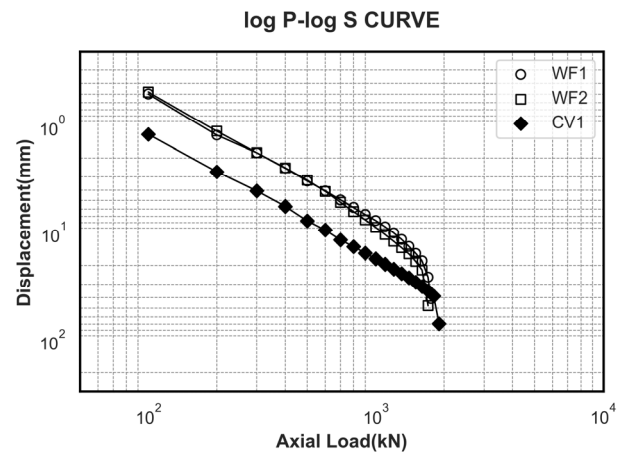


Fig. 7. Load (log P) - total displacement (log S) curve for WF1, WF2, CV1

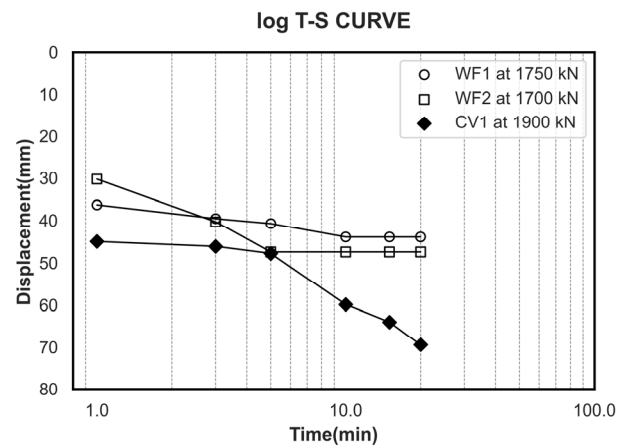


Fig. 8. Time (log T) - total displacement (S) curve for WF1, WF2, CV1

선이 급격하게 꺾이는 지점을 항복하중으로 결정한다. 본 연구에서는 재하 후 3분, 20분이 경과하였을 때 측정된 침하량을 사용하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9로부터 WF1, WF2는 1,600kN, CV1은 1,800kN을 항복하중으로 평가할 수 있다.

세 본의 마이크로파일에 대한 현장 재하시험 결과에 네 가지 분석법을 적용하여 평가한 항복하중을 Table 1에 정리하였다. 항복하중이 WF1은 1,600~1,750kN, WF2는 1,600~1,700kN, CV1은 1,800~1,900kN 정도로 분석 방법에 따른 편차는 크지 않았다. 안전측으로 WF1과 WF2는 1,600kN, CV1은 1,800kN을 항복하중으로 결정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 안전율 2.0을 적용하였을 때 허용지지력은 WF1과 WF2는 800kN, CV1은 900kN으로 설계하중을 초과하여 일반 마이크로파일 뿐만 아니라 파형 마이크로파일도 충분한 지지 성능을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 파형 마이크로파일은 말뚝 직경을 증가시키고 전단키를 형성함으로써 토사층에서 발현되는 주변마찰력만으로 충분한 지지력을 가져 암반층의 심도가 깊은 지반 조건에서 유리한 시공성을 가질 수 있음을 확인하였다.

무리말뚝을 모사하기 위한 네 본의 일반 마이크로파일(CV2, CV3, CV4, CV5)과 한 본의 파형 마이크로파일(WF3)은 설계하중을 약간 상회하는 800kN까지 재하한 후 하중을 제거하였다. 하중 재하 시의 하중(P)-말뚝 두부 전체 침하량(S) 곡선을 Fig. 10에 도시하였다. 앞선 세 본의 말뚝에 비해 상대적으로 작은 하중이 재하되었기 때문에 말뚝의 항복은 발생하지 않았다.

현장 재하시험 중 측정된 하중과 변위를 통해 세 본의 파형 마이크로파일과 다섯 본의 일반 마이크로파일의 연직방향 강성( $K_v$ )을 평가하여 Table 2에 정리하였다. 하중이 증가함에 따라 강성이 점차 변화하나, 설계하중 600kN 범위 안에서의 평균적인 강성을 평가하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 세 본의 파형 마이크로파일의 설계하중 내에서의 연직방향 강성( $K_v$ )은 약 124.1~135.4kN/mm로, 다섯 본의 일반 마이크로파일의 설계하중 내에서의 연직방향 강성은 약 30.0~98.4kN/mm로 평가되었다. 세 본의 파형 마이크로파일의 연직방향 강성 평균값은 129.7kN/mm로, 다섯 본의 일반 마이크로파일의 연직방향 강성 평균값 59.4kN/mm보다 약 2.2배 크게 나타났다. 파형 마이크로파일 1, 2번(WF1, WF2)과

일(WF3)은 설계하중을 약간 상회하는 800kN까지 재하한 후 하중을 제거하였다. 하중 재하 시의 하중(P)-말뚝 두부 전체 침하량(S) 곡선을 Fig. 10에 도시하였다. 앞선 세 본의 말뚝에 비해 상대적으로 작은 하중이 재하되었기 때문에 말뚝의 항복은 발생하지 않았다.

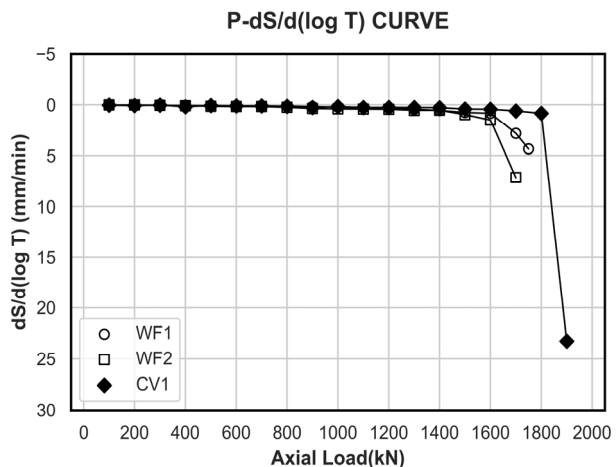


Fig. 9. Load (P) - dS/d (log T) curve for WF1, WF2, CV1

Table 1. Yield load from field load tests (unit: kN)

Method	WF1	WF2	CV1
P - S	1,700	1,600	1,800
log P - log S	1,700	1,600	1,800
log T - S	1,750	1,700	1,900
P - dS (log T)	1,600	1,600	1,800

P-S CURVE

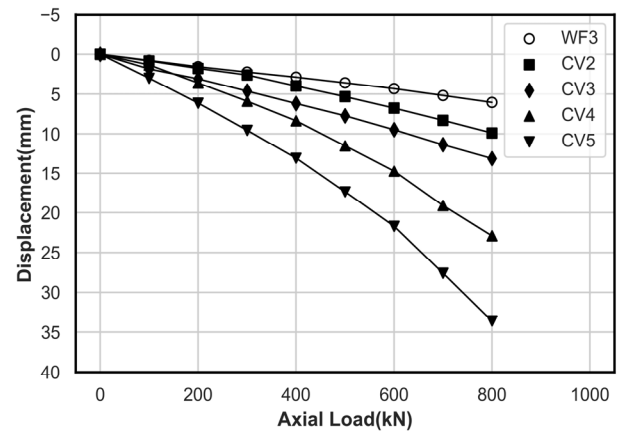


Fig. 10. Load (P) - total displacement (S) curve for WF3, CV2, CV3, CV4, CV5

Table 2. Axial stiffness of micropiles estimated from field load tests (unit: kN/mm)

Micropile	Axial pile stiffness	Mean	Standard deviation
WF1	135.4	129.7	5.65
WF2	124.1		
WF3	129.6		
CV1	58.4	59.4	25.29
CV2	98.4		
CV3	63.3		
CV4	46.9		
CV5	30.0		



일반 마이크로파일 1번(CV1)의 항복 하중이 비슷한 반면, 연직방향 강성이 2배 이상 큰 것으로 미루어 볼 때, 파형 마이크로파일의 전단키가 파일의 연직방향 침하량 감소에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 또한, 파형 마이크로파일의 연직방향 강성 표준편차는 5.65kN/mm로, 일반 마이크로파일의 연직방향 강성 표준편차 25.29kN/mm 보다 매우 작게 나타났다. 이로부터 파형 마이크로파일이 설계대로 시공되었을 때 일관성 있는 성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있다. 일반 마이크로파일의 경우, 시험 부지 중앙에서 수행된 지반조사 결과를 토대로 지지력이 정착부에 해당하는 풍화암층 3.7m에서 발현될 것으로 설계하였는데, 그 길이가 상대적으로 짧기 때문에 마이크로파일이 설치된 위치에서의 실제 정착부 길이에 따라 편차가 커진 것으로 판단된다.

#### 4. 무리말뚝 재하시험 결과

Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 일반 마이크로파일 네 본(CV2, CV3, CV4, CV5)과 파형 마이크로파일 한 본(WF3)을 하나의 기초 슬래브로 묶어 무리말뚝을 모사했다. Fig. 4(b)와 같이 기초 슬래브의 중앙에 압축하중을 재하하면서 연직하중과 변위를 측정했다. 목표한 최대 압축하중 2,000kN을 모두 재하한 뒤에는 이를 205일간 유지시키며, 이형 강봉에 부착된 EM 센서를 통해 각각의 마이크로파일이 분담하는 하중을 측정했다. 기초 슬래브의 무게(227kN)는 제외하고 유압잭에 의해 추가로 가해지는 연직하중에 대한 분석만 실시했다.

Fig. 11은 기초 슬래브에 가해지는 연직하중과 서로 다른 네 위치에서 측정된 변위를 나타낸다(Fig. 3 참조).

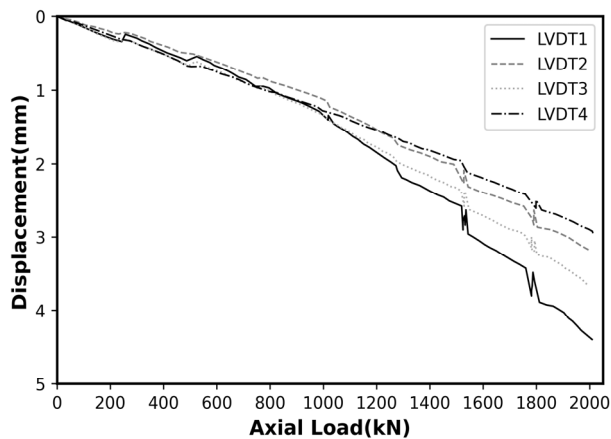


Fig. 11. Axial load and displacement curves of a foundation slab

낮은 연직하중에서는 위치별 변위가 거의 유사했지만, 하중 크기가 일정 수준(약 1,250kN)을 넘어서면 LVDT-4, LVDT-2, LVDT-3, LVDT-1의 순으로 큰 변위가 측정되었다. 즉, 단일 마이크로파일 재하시험 시 비교적 큰 연직강성을 보인 CV2와 CV3 사이에 위치한 LVDT-4의 변위가 가장 작고, 비교적 작은 연직강성을 보인 CV4와 CV5 사이에 위치한 LVDT-1의 변위가 가장 컸다. 이는 무리말뚝을 구성하는 마이크로파일의 강성이 기초 슬래브의 침하에 큰 영향을 준다는 사실을 보여준다.

또한 본 연구의 최대 압축하중인 2,000kN 재하시 기초 슬래브의 최대 부등침하(LVDT-1과 LVDT-4의 연직 변위 차이)는 약 1.42mm였다. LVDT-1과 LVDT-4 사이의 거리가 2,500mm임을 고려할 때 각변위는 약 0.0005(=1.42/2,500)였는데, Skempton and MacDonald(1956)가 제시한 각변위 기준 1/300의 15%로 허용할만한 수준이었다. 그러나 기초 슬래브의 위치별 변위 차이가 하중 크기가 커질수록 더욱 두드러지게 나타나므로, 마이크로파일의 위치별 강성차이가 구조물의 안정성에 미치는 영향은 추후 더 큰 하중을 적용한 재하시험을 통해 확인해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 12는 2,000kN의 하중이 가해질 때 무리말뚝을 구성하는 각각의 마이크로파일이 분담하는 하중을 시간(일)에 따라 나타낸 것이다. 기초 슬래브 하부 지반(soil)이 분담하는 하중은 전체 하중(2,000kN)과 마이크로파일이 받는 하중의 총합의 차로부터 산정했다. 그 결과, 연직강성이 가장 큰 파형 마이크로파일(WF3)이 가장 많은 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 일반 마이크로파일 중에는 비교적 큰 연직강성을 가지는 CV2와 CV3가 상대적으로 많은 하중을 분담하고, 작은 연직강성을

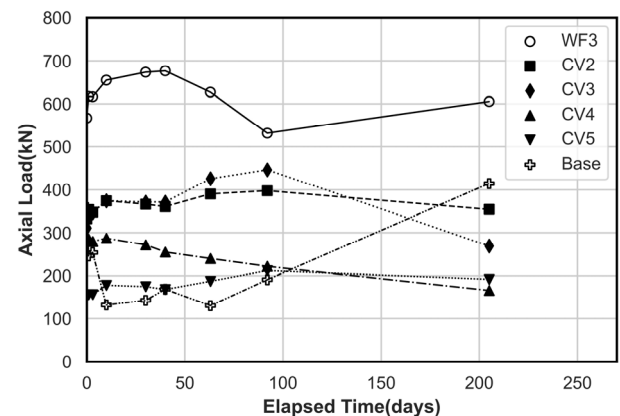


Fig. 12. Axial load and elapsed time curves of each component in a group pile

가지는 CV4와 CV5가 상대적으로 적은 하중을 분담했다. 한편, 지반이 분담하는 하중은 시간에 따라 크게 변화하는 경향을 보였다. 지반이 분담하는 하중은 하중 도입 초기에는 CV2 및 CV3과 비슷했지만, 점차 마이크로파일 쪽으로 전이되며 감소했다. 이후 90일이 지나는 시점부터는 파형 마이크로파일을 제외한 모든 일반 마이크로파일이 분담하는 하중이 감소하면서 지반이 분담하는 하중이 크게 증가했다.

Table 3은 전체 하중(2,000kN) 대비 무리말뚝을 구성하는 각 성분(일반 및 파형 마이크로파일과 하부 지반)이 받는 하중의 비(%)로 정의되는 하중 분담율(load distribution ratio)을 나타낸다. Fig. 12를 통해 확인한 바와 같이, 시간이 지남에 따라 일반 및 파형 마이크로파일과 하부 지반이 분담하는 하중의 크기(즉, 하중 분담율)가 변화했다. 연직강성이 큰 마이크로파일이 전반적으로 큰 하중 분담율을 나타냈지만, 상대적으로 적은 강성차이를 보이는 경우(CV2와 CV3 혹은 CV4와 CV5) 하중 분담율이 역전되는 현상도 관찰되었다. 이는 개별 마이크로파일의 선단 및 주면과 무리말뚝 내에서 발생하는 하중 전이 거동에 기인한 것으로 보이므로, 향후 보다 다양한 계측장비(변형율계 등)를 적용해 시간에 따른 하중 전이 거동 변화를 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

최대 연직하중이 도입된 후 205일이 경과한 뒤 하중 분담율을 산정한 결과, 파형 마이크로파일(WF3)은 30.27%의 하중을 분담하고 일반 마이크로파일은 9.58%에서 17.71%의 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 즉, 일반 및 파형 마이크로파일 모두 동일한 설계하중 600kN으로 시공되어 지지력에는 큰 차이를 보이지 않았음에도, 강성이 큰 파형 마이크로파일이 작게는 1.7배에서 크게

는 3.2배 큰 하중 분담율을 보였다. 파형 마이크로파일은 대부분 보강기초로 활용될 것으로 예상되는데, 증축 리모델링 등을 통해 추가적인 하중 작용 시 많은 하중을 분담함으로써 기존 기초의 지지력 파괴 가능성을 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기초 슬래브 하부 지반의 하중 분담율도 20.72%에 달해, 마이크로파일로 구성된 무리말뚝의 지지력 발현 시 지표면의 지내력도 상당한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 무리말뚝을 구성하고 있는 마이크로파일 하중 분담율의 절대적인 크기는 연직하중 재하 방향 및 말뚝의 배열(위치)에 따라 달라질 수 있을 것으로 예상되므로, 추가적인 현장 재하시험 연구를 통해 그 효과를 확인하고 상술한 내용을 보완할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 토사층에서 큰 지지력을 보인다고 알려진 파형 마이크로파일의 기초보강 효과를 분석하기 위해 수행되었다. 매립토-풍화토-풍화암의 전형적인 국내 지층구조를 보이는 지반에 총 여덟 본의 마이크로파일(일반 마이크로파일 다섯 본과 파형 마이크로파일 세 본)을 설치한 뒤 현장 재하시험을 수행했고, 다음과 같은 결론을 도출했다.

- (1) 단일 마이크로파일 재하시험 결과, 일반 및 파형 마이크로파일의 지지력이 모두 설계하중을 초과하여 충분한 지지성을 보였다. 특히, 파형 마이크로파일은 말뚝 직경을 증가시키고 전단키를 형성함으로써 토사층에서 발현되는 주면마찰력만으로 충분한 지지력을 가져 암반층의 심도가 깊은 지반

Table 3. The load distribution ratio of each component in a group pile

Day	Load distribution ratio (%)					
	WF3	CV2	CV3	CV4	CV5	Base soil
0	28.34	16.61	15.55	14.00	7.59	17.92
1	30.86	17.69	17.08	14.28	7.81	12.29
3	30.82	17.38	17.33	13.98	7.81	12.69
10	32.75	18.72	18.71	14.36	8.89	6.59
30	33.68	18.32	18.57	13.59	8.73	7.13
40	33.83	18.04	18.57	12.74	8.40	8.43
63	31.35	19.51	21.29	11.99	9.36	6.51
92	26.58	19.89	22.33	11.09	10.59	9.54
205	30.27	17.71	13.45	8.29	9.58	20.72

조건에서 유리한 시공성을 가질 수 있음을 확인하였다.

- (2) 동일한 설계하중이 적용되어 유사한 지지력을 보이는 경우, 파형 마이크로파일의 연직강성이 일반 마이크로파일의 연직강성에 비해 약 2.2배 큰 것으로 나타났다. 이는 파형 마이크로파일의 전단키가 말뚝의 연직방향 침하량 감소에 효과가 있음을 보여주는 결과이다. 또한 파형 마이크로파일의 연직방향 강성 표준편차가 일반 마이크로파일의 연직방향 강성 표준편차에 비해 매우 작게 나타나, 파형 마이크로파일이 설계대로 시공되었을 때 일관성 있는 성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (3) 일반 및 파형 마이크로파일로 구성된 무리말뚝 재하시험 결과, 강성이 큰 마이크로파일이 높은 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 무리말뚝에 2,000kN의 연직하중을 가하고 205일이 경과한 뒤 하중 분담율을 산정한 결과, 파형 마이크로파일은 30.27%의 하중을 분담하고 일반 마이크로파일은 9.58%에서 17.71%의 하중을 분담하는 것으로 나타났다. 즉, 일반 및 파형 마이크로파일 모두 동일한 설계하중 600kN으로 시공되어 지지력에는 큰 차이를 보이지 않았음에도, 강성이 큰 파형 마이크로파일이 작게는 1.7배에서 크게는 3.2배 큰 하중 분담율을 보였다.

상기 결과가 매립토-풍화토-풍화암의 전형적인 국내 지층구조를 보이는 지반에서 수행된 현장 실재하시험을 바탕으로 도출된 것임을 고려할 때, 이를 파형 마이크로파일의 지지성능(지지력, 강성, 하중 분담율)을 검증하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 보인다. 다만, 파형 마이크로파일의 지지성능은 토사층의 특성 및 시공 품질에 따라 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서 파형 마이크로파일의 현장 적용을 위해서는 보다 다양한 지층구조를 보이는 현장에서 시공 품질을 향상시키기 위한 실증 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었으며(과제

번호 20230132-001, 건축물 내진성능 확보를 위한 삼축 내진말뚝 개선 연구), 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. ASTM (1994), Standard test method for piles under static axial compressive load. ASTM standard D1143-81, In Annual book of ASTM standards.
2. Bruce, D.A. and DiMillo, A.F. (1995), A Primer on Micropiles, *Civil Engineering*, 65(12), 51-54.
3. Cappello, C., Zonta, D., Ait Laasri, H., Glisic, B., and Wang, M. (2018), Calibration of Elasto-magnetic Sensors on In-service Cable-stayed Bridges for Stress Monitoring, *Sensors*, Vol.18, No.2, p.466.
4. FHWA (2005), Micropile Design and Construction: Reference Manual. FHWA-NHI-05-039, *Federal Highway Administration*, Vol.1, No.1, pp.7-28.
5. Gomez, J., Cadden, A., and Bruce, D.A. (2003), Micropiles Founded in Rock: Development and Evolution of Bond Stresses under Repeated Loading, *Proc. of the 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Germany, pp.1911-1916.
6. 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.
7. Jang, D.U. (2013), Seismic Reinforcement Techniques and Examples for Vertical/Horizontal Expansion of Apartment House Remodeling, *Construction Engineering and Management*, Vol.14, No.6, pp.34-39.
8. Jang, Y.E. and Han, J.T. (2016), A Field Study on the Constructability and Performance Evaluation of Waveform Micropile, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.10, pp.67-79.
9. Jang, Y.E. and Han, J.T. (2018), Field Study on Axial Bearing Capacity and Load Transfer Characteristic of Waveform Micropile, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55, No.5, pp.653-665.
10. Jang, Y.E. and Han, J.T. (2019), Analysis of the Shape Effect on the Axial Performance of a Waveform Micropile by Centrifuge Model Tests, *Acta Geotechnica*, 14, pp.505-518.
11. Jang, Y.E., Kim, B., Wang, C., and Han, J.T. (2019), Prediction of Vertical Bearing Capacity of Waveform Micropile, *Geotechnique Letters*, Vol.9, No.3, pp.198-204.
12. Jang, Y.E., Han, J.T., Kim, J.H., Park, H.J., and Kim, S.H. (2015), Evaluation of Axial Bearing Capacity of Waveform Micropile by Centrifuge Test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.8, pp.39-49.
13. Juran, I., Benslimane, A., and Hanna, S. (2001), Engineering Analysis of Dynamic behavior of Micropile Systems, *Transportation Research Record*, 1772, pp.91-106.
14. KGS (2009), Standard Guideline for the Design of Foundation Structures, Korean Geotechnical Society.
15. KGS (2018), Commentary on Standard Guideline for the Design of Foundation Structures, Korean Geotechnical Society.
16. Sadek, M. and Isam, S. (2004), Three-dimensional Finite Element Analysis of the Seismic behavior of Inclined Micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.24, No.6, pp.473-485.
17. Skempton, A.W. and MacDonald, D.H. (1956), The Allowable Settlements of Buildings, *Proceedings of the Institution of Civil*

*Engineers*, Vol.5, No.6, pp.727-768.

18. Sumitro, S., Jarosevic, A., and Wang, M.L. (2002), Elasto-magnetic Sensor Utilization on Steel Cable Stress Measurement. In The First fib Congress, *Concrete Structures in the 21th Century*, Osaka, pp. 13-19.
19. Tsukada, K., Miura, Y., Tsubokawa, Y., and Otani, G.L. (2006), Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforced with Micropiles, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.367-376.
20. You, G.L., Miura, K., and Ishito, M. (2003), Behavior of Micropile Foundation under Inclined Loads in Laboratory Tests, *Journal of Lowland Technology International*, Vol.5, No.2, pp.16-26.

Received : March 7<sup>th</sup>, 2023

Revised : March 16<sup>th</sup>, 2023

Accepted : March 16<sup>th</sup>, 2023