한국지반공학회논문집 제39권 4호 2023년 4월 pp. 31 ~ 44
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.39, No.4, April 2023 pp. 31 ~ 44

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2023.39.4.31

현장재하시험을 통한 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대효과 분석

Evaluation of Bearing Capacity Enhancement Effect of Base Expansion Micropile Based on a Field Load Test

김 석 중[1] Kim, Seok-Jung　　이 석 형[2] Lee, Seokhyung
한 진 태[3] Han, Jin-Tae　　황 규 철[4] Hwang, Gyu-Cheol
이 정 섭[5] Lee, Jeong-Seob　　유 민 택[6] Yoo, Mintaek

Abstract

A base expansion micropile was developed to improve the bearing capacity of the micropile, which bears a simple device installed at the pile base. Under an axial load, this base expansion structure radially expands at the pile tip and attaches itself around ground, compressing the boring wall in the construction stage. In this study, conventional and base expansion micropiles were constructed in the weathered rock where micropiles are commonly installed. Further, field load tests were conducted to verify the bearing capacity enhancement effect. From the load test results, it was revealed that the shaft resistance of base expansion micropiles was about 12% higher than that of conventional micropiles. The load transfer analysis results also showed that compared to conventional micropiles, the unit skin friction and unit end bearing of base expansion micropiles were 15.4% and 315.1% higher, respectively, in the bearing zone of the micropile.

요 지

선단확장형 마이크로파일은 시공시 강봉 선단에 확장 구조체를 설치하여, 강봉이 지중에 설치될 때 자중 등 압축하중이 작용하여 선단확장구가 팽창, 천공홀 주변 지반을 압착함으로써 선단부에서의 추가적인 마찰력 및 선단 지지력을 확보함으로써 지지력 증대효과를 유발하는 공법이다. 본 연구에서는 마이크로파일이 일반적으로 시공되는 풍화암 근입지반에 마이크로파일을 시공하고 재하시험을 수행하여 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대효과를 분석하였다. 정재하 시험 결과, 선단확장형 마이크로파일의 지지성능은 일반마이크로파일의 주면지지력 대비 약 12% 크게 발현됨을 확인하였다. 추가로, 하중전이분석을 통해 단위 주면지지력과 선단지지력을 비교한 결과, 최대 단위주면지지력은 일반 마이크로파일 대비 약 15.4%, 선단지지력의 경우, 약 315.1% 크게 나타나, 선단 지압구의 효과에 따라 지지력 증대효과가 발생함을 확인하였다.

Keywords : Bearing capacity enhancement, Base expansion structure, Field load test, Load transfer analysis, Micropile

1 정회원, 한국건설기술연구원 경영기획실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Planning and Coordination Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
2 정회원, 한국원자력안전기술원 구조부지평가실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Structure & Site Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety)
3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
4 정회원, 재성건설 대표이사 (Member, CEO, Jaesung Construction Co. Ltd.)
5 비회원, ㈜세진이엔시 설계부 차장 (Deputy general Manager, Design Department, Sejin E&C Co. Ltd.)
6 정회원, 가천대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Enviornmental Eng., Gachon Univ., Tel: +82-31-750-5339, mintaekyoo@gachon.ac..kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 10월 31일까지 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.

1. 서 론

마이크로파일(Micropile) 공법은 직경 300mm 이하의 소구경 현장타설말뚝으로, 건축물 기초 보강을 목적으로 1950년대 초반 이탈리아에서 개발된 공법이다(Bruce, D.A. and DiMilloi, A.F., 1995). 일반적으로 중대형 건축물의 기초구조물로 활용되는 매입말뚝이나 현장타설말뚝에 비하여 시공법이 간단하고 공사비용이 상대적으로 저렴할 뿐 아니라 대형 시공 장비 등이 필요하지 않고, 대구경 말뚝에 비해 시공 중 공사소음이나 진동 발생이 적어 민원이 적다는 장점이 있다. 이러한 시공성 및 적용성에 따라 민원에 민감한 도심지에서도 널리 이용할 수 있다는 장점을 바탕으로, 도심지 내 건축물의 기초구조물 보수보강에 적극적으로 활용되고 있는 공법이다(Lee and Im, 2006; Hwang et al., 2018; Han et al., 2013,; Lee et al., 2021; Kim et al., 2021).

건축물의 기초보강 시장은 최근 급격히 확대되고 있다. 최근 성남시나 고양시 등 1기 신도시의 공동주택 노후화에 따른 재건축 요구와 사실상 재건축이 어려운 노후 아파트 단지를 중심으로 리모델링 수요가 증가하고 있으며, 이러한 수요는 윤석열 정부의 주택공급 공약(임기 5년간 250만호 이상을 공급)와 맞물려 재건축 및 리모델링 시장 활성화에 대한 기대감을 고조시키고 있다. 공동주택의 재건축 및 리모델링시 필연적으로 상부 구조물의 하중이 증가되기 때문에 기존의 기초만으로 하중을 지지할 수 없어 기초 보강이 필수적으로 고려되고 있으며, 이에 따라 마이크로파일의 수요도 증가하고 있다.

마이크로파일은 일반적으로 약 100mm에서 300mm 사이의 직경을 갖는 소구경 말뚝으로, Fig. 1과 같이 지반을 목표심도까지 천공한 뒤 강봉을 삽입하고 그라우트를 타설하는 방식으로 시공되는 공법이다. 소구경 말뚝이라는 한계로 인해 마이크로파일의 설계시 선단지지력을 고려하지 않는 것이 일반적이며, 상대적으로 연약한 토사층에서의 주면마찰력 역시 무시하며, 암반 근입층 등 지지층에서의 주면마찰력만으로 말뚝의 지지력을 고려한다(FHWA, 2005). 이러한 설계방식으로 인해 충분한 지지력을 확보하기 위해 말뚝의 길이가 과도하게 길어지는 설계가 되며, 이로 인해 시공성 및 경제성이 악화된다는 한계가 있다(Juran et al., 2001; Gomez et al., 2003; You et al., 2003; Sadek and Isam, 2004; Tsukade et al., 2006).

이와 같은 한계를 극복하기 위하여, 마이크로파일의

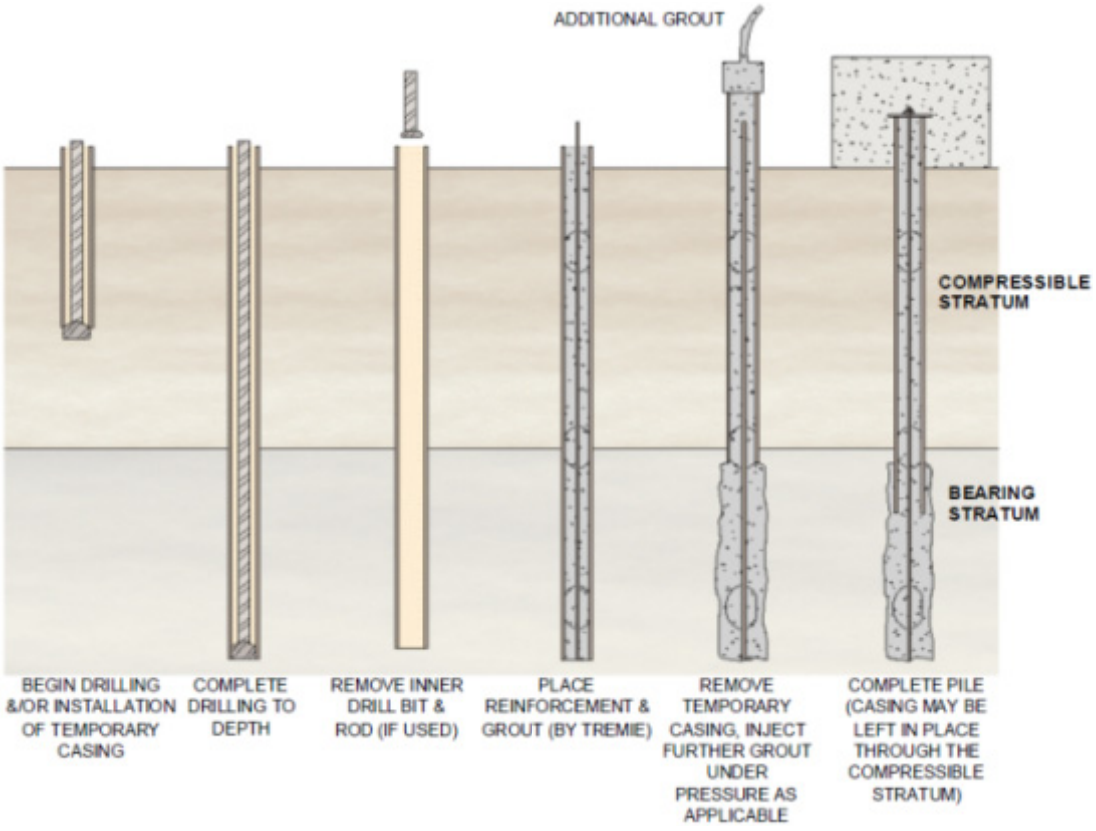
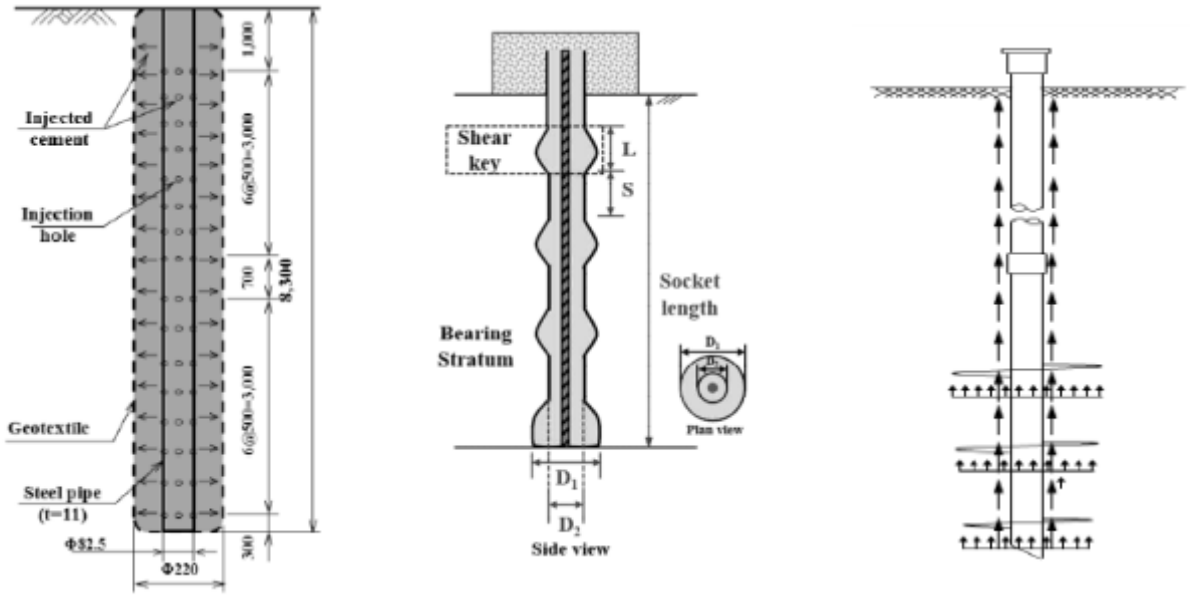


Fig. 1. Micropile construction sequence

시공방법 및 형상 개선을 통한 지지력 및 경제성을 증대시키기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 특히, 말뚝의 형상 및 선단부의 형상을 개선하여 마이크로파일의 지지력을 증대시키는 연구가 다양하게 진행되었다. 헬리컬 파일, 팩 마크로파일, 파형 마이크로파일 등 기존의 마이크로파일을 개선한 공법들이 다양하게 개발되었으며, 지지거동에 대한 실험적, 해석적 검증이 진행된 바 있다(Hong et al., 2012; Han et al., 2013; Jang et al., 2015; Jang et al., 2016; Bae et al., 2020).

하지만 이런 개선 공법들은 기존의 마이크로파일공법과 비교하여 추가적인 시공 단계나 별도의 시공장비를 필요로 하여, 시공성과 경제성 확보라는 기존의 마이크로파일의 강점을 상쇄하는 단점이 발생하였다. 이에, 말뚝 선단에 고정 지압구 구조체를 장착한 선단확장형 마이크로파일이 개발되었다(Lee et al., 2021). 선단확장형 마이크로파일은 Fig. 3 및 Fig. 4에 제시한 바와 같이 지반 천공 후 설치되는 말뚝에 수직하중을 재하 할 때, 말뚝 선단부에 위치한 지압구가 압축·팽창하면서 선단 면적이 확대되고 공벽에 쐐기 수평력이 발휘되어 그라우팅 이전에 조기에 안착될 뿐만 아니라 지지력을 증대시킬 수 있는 공법으로, 별도의 시공단계나 장비 없이 선단지압구 만을 추가하는 매우 간단한 공정만으로 지지력 향상 효과를 유발할 수 있는 공법이다. 마이크로파일 설치시 강봉 하단에 선단지압구를 설치



(a) Pack micropile (b) Waveform micropile (c) Helical micropile

Fig. 2. Various modification concepts of micropile

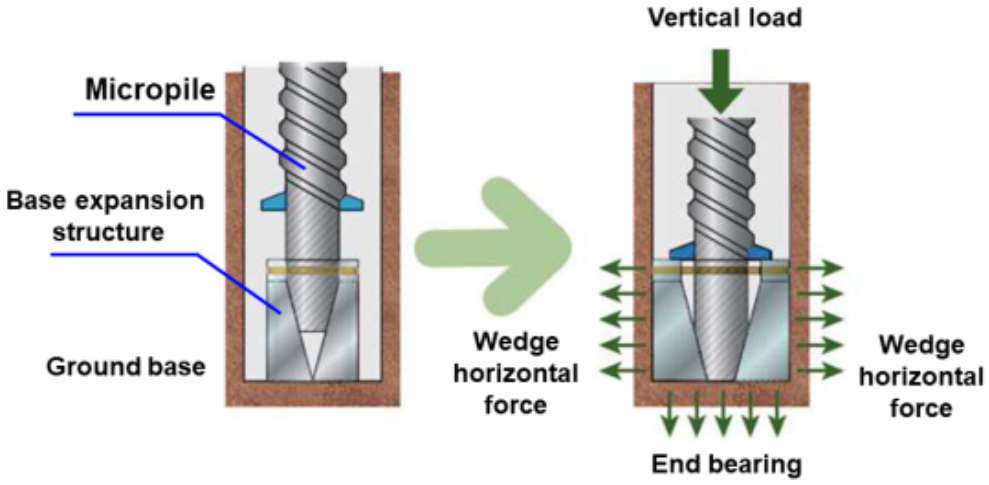


Fig. 3. Conceptual diagram for the installation of base expansion micropile

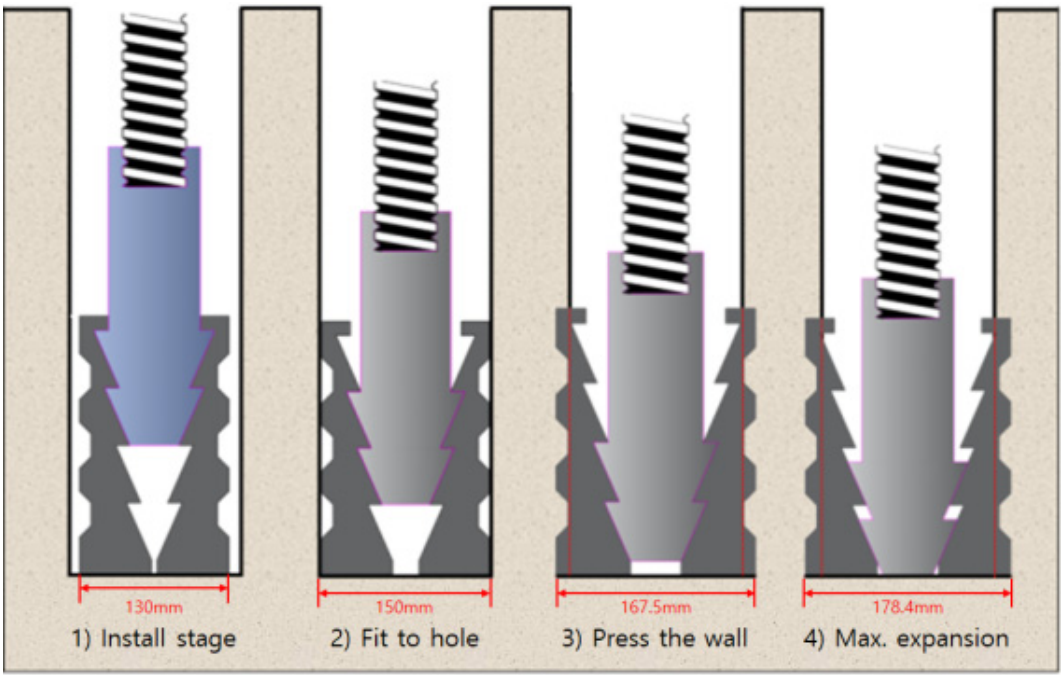


Fig. 4. Installation procedure for base expansion micropile

하였을 때의 지압구 직경은 약 130mm로, 일반적인 마이크로파일 시공을 위한 천공경(d=150mm)보다 작아 천공부에 관입시에도 별도의 확경이 필요 없으며, 압축하중을 받아 지압구가 팽창하여 최대 외경이 178mm까지 확장되어 공벽과 접촉 및 관입함으로써 추가적인 지지력을 확보할 수 있다. 또한, 선단확장형 마이크로파일 공법에 대한 지지 메커니즘 및 지지력 증대효과를 3차원 수치해석 및 원심모형실험을 통해 검증한 바 있다 (Lee et al., 2021; Lee et al., 2022; Kim et al., 2021).

본 연구에서는 실제 마이크로파일이 적용되는 현장조건에서 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대효과를 검증하기 위하여 수행하였다. 선단 지압구의 유무에 따른 지지력 증대효과를 확인하기 위하여, 일반 마이크로파일과 선단확장형 마이크로파일을 시공하여 각각의 지지력을 비교하였다. 또한, 두부 정재하시험을 통한 지지성능 비교 뿐만 아니라, 하중전이분석을 통해 심도별 축하중을 도출하고 시험말뚝의 선단 및 주면지지력을 도출하여 이를 비교함으로써, 선단지압구에 의한 지지성능 향상효과를 검증하였다.

2. 현장재하시험 조건 및 방법

2.1 지반조건

본 연구에서 현장재하시험을 수행한 위치는 경기도 이천시에 위치한 부지이다. 소음 및 진동에 의한 민원 발생의 가능성이 적은 부지이며, 일반적인 마이크로파일이 시공되는 풍화암 지반이 발달하여 시험말뚝의 현

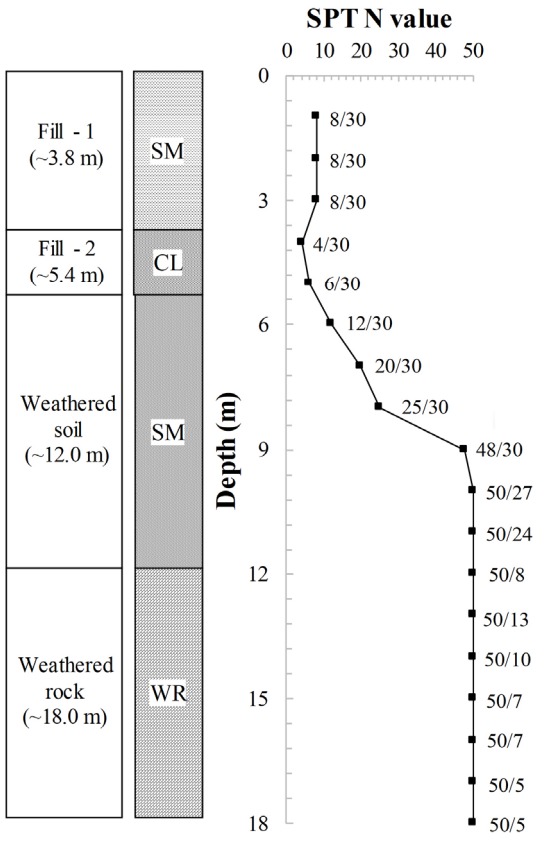


Fig. 5. Site investigation results(Boring log)

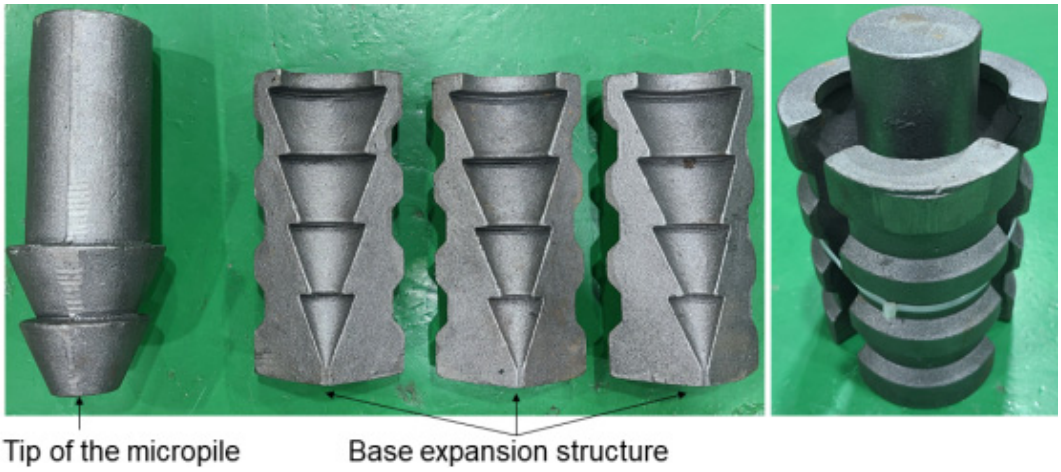


Fig. 6. Base expansion structure

장 시공성 및 대표성을 확보할 수 있는 시험 위치로 적정한 곳으로 판단되었다. 현장의 중심부에서 수행된 지반결과는 Fig. 5의 시추주상도와 같으며, 각 심도별 지층 구성과 표준관입시험 결과를 정리하였다. 지표로부터 0~5.4m 구간은 매립토 구간으로, 통일분류법에 따라 3.8m 까지는 실트질모래(SM), 3.8~5.4m 구간은 실트질 점토(CL) 구간으로 확인되었다. 매립층 하부에는 풍화토층이 6.6m의 층후로 존재하며, 심도가 깊어질수록 특이사항 없이 N값이 증가하는 경향을 보였다. 마지막으로, 지반조사가 수행된 12.0~18.0m 심도까지 절리가 많은 풍화암층이 발달한 것으로 나타났다.

2.2 시험말뚝 시공

본 연구에서 검증하고자 하는 선단확장형 마이크로파일은 말뚝 시공시 강봉의 자중 및 경타 하중 등 연직하중에 따라 단계적으로 공벽에 활착되는 선단 지압구를 마이크로파일 강봉의 선단부에 설치하는 마이크로파일이다. 선단 지압구는 Fig. 6과 같이 120° 간격으로 3개의 요소로 구성되어, 합체 시 원기둥 형상을 띈다. 각 요소 내부에는 3단계 쐐기를 설치하여 압축하중 재하 시 강봉 연결부가 내려감에 따라 고정 지압구가 확장되거나, 인발하중 재하 시 강봉 연결부가 내부 쐐기에 걸려 인발에 저항할 수 있도록 고안되었다. 또한, 천공홀 내부 지반과 고정 지압구 외면에서의 마찰력을 증대시키기 위하여, 외부 표면은 요철형태로 제작되었으며, 단순한 시공 메커니즘으로 선단지지력, 주면마찰력 및 인발저항력의 증가를 도모하고자 하였다(Lee et al., 2021).

현장재하시험을 위한 마이크로파일 설치시, 일반 마이크로파일에 활용되는 동일한 강봉(직경 50mm, 항복하중 982kN)의 선단에 제작한 선단 지압구를 설치하였다. 3개의 지압구 요소들은 천공홀 관입시에는 공벽의 직경(150mm)보다 작은 130mm를 유지하며 말뚝 선단

(a) Connector with thread bar (b) Base expansion structure

(c) Tip of base expansion micropile (d) Installation

Fig. 7. Connection of base expansion structure with thread bar of micropile

이 위치할 근입층에 도달할 수 있도록 케이블 타이로 묶어 강봉 선단에 설치하였으며(Fig. 7), 목표 설치심도까지 도달한 이후에는 강봉의 자중 및 설치 하중, 그리고 경타하중에 의해 케이블 타이가 절단파괴되며 지압구의 개별요소가 각각 분리되어 팽창하며 공벽에 접촉, 근입층에 활착될 수 있도록 하였다.

두부 정재하시험 방식으로 수행되는 현장재하시험에서는 하중-침하 곡선을 통한 말뚝별 지지력 측정이 가능하다. 다만, 본 연구에서는 선단 확장형 마이크로파일의 거동 특성 분석을 위하여, 말뚝별 지지력 뿐만 아니라 주면 및 선단지지력 확인이 필요하였기 때문에, 별도의 하중전이분석이 필요하였다. 따라서, 재하시험 시 주면지지력 및 선단지지력을 확인하기 위하여, 일반 마이크로파일 1본과 선단확장형 마이크로파일 1본, 총 2본에 대하여 변형률계를 설치하였다. 변형률계는 마이크로파일 강봉의 면을 따라 심도별로 말뚝당 4개 심도에 180도 방향으로 설치하였다. 변형률계 설치시 직경

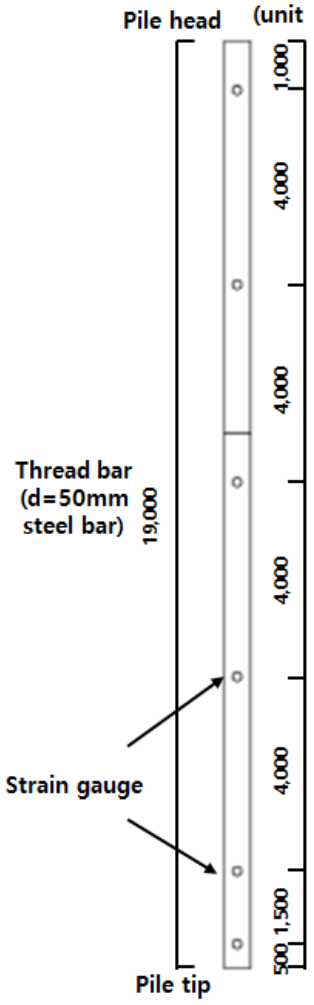


Fig. 8. Location of strain gauge for load transfer analysis

50mm, 길이 19m의 강봉의 면을 따라 말뚝 선단을 기준으로 0.5m, 2m, 6m, 10m, 14m, 18m, 19m 위치에 변형률계를 설치하였으며, 강봉 삽입 후 시험말뚝의 길이에 따라 강봉을 절단하며, 말뚝 두부에 가깝게 위치한 변형률계가 절단되기도 하였다. 또한, 재사히험시 변형률계가 망실되는 결과도 발생하였으며, 결과적으로 최종 변형률계의 설치계획은 Fig. 8, 설치 과정은 Fig. 9와 같다.

시험말뚝의 시공 순서는 일반적인 마이크로파일의 시공법에 따라, 토사층에 케이싱을 삽입하며 설계 깊이까지 천공한 뒤, 강봉을 삽입한 후, 중력식 그라우팅을 통해 말뚝체를 시공하였다. 다만, 선단확장형 마이크로파일의 경우, 강봉 설치 전 강봉의 선단부에 선단지압구를 설치하였으며, 시험말뚝의 설계 심도에 도달한 후 지압구의 팽창 및 천공홀 내부에 지압구가 접촉할 수 있도록 자중 유지 및 약간의 경타를 가하였으며, 그 후에 콘크리트를 타설하여 말뚝체를 형성하였다.

시험말뚝인 일반 및 선단확장형 마이크로파일의 시공을 위하여, 말뚝 설치 심도를 결정하였다. 시험말뚝의 설계하중은 마이크로파일의 일반적인 설계하중인 400kN으로 가정하고, 직경 150mm인 마이크로파일의 전체 길이는 아래 식 (1)에 따라 역산하였다.

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

여기서, α_{bond}는 말뚝체와 지반의 부착력을, $F.S.$는 안전율을 의미한다. 또한 D_b와 L_b은 각각 마이크로파일의 직경과 정착부의 길이를 의미한다. 시험말뚝인 일반 및 선단확장형 마이크로파일은 중력식 그라우팅 방식으로 말뚝체를 타설하기 때문에, 이를 고려하여 FHWA(2005)에서 제시하고 있는 부착력(α_{bond})을 각각 적용하여 정착부 길이를 산정하였다. 이를 고려하였을 때, 마이크로파일의 길이는 케이싱 길이 14.5m 및 풍화암 정착부 길이 4.2m로 총 18.7m로 계산되었다. 산정된 말뚝길이를 바탕으로 시험말뚝을 현장에 시공하였으며, 일반마이크로파일의 경우 계획심도인 18.7m 까지 설치가 용이하게 되었으나, 선단확장형 마이크로파일의 경우, 말뚝 선단의 지압구의 존재 및 선단 슬라임 및 공벽내의 잡석 등의 유무에 따라 약 17.5m 심도에 설치되었다. Fig. 10에 각 시험말뚝의 근입 지반 및 형상을 정리하였으며, Fig. 11에 시험말뚝인 일반 마이크로파일 및 선단확장

(a) Attach the strain gauge

(b) 1st waterproof coating (acrylic coating spray)

(c) 2nd waterproof coating (Butyl rubber tape)

(d) 3rd waterproof coating (Vinyl electrical tape)

(e) Cover censor gaurd

(f) Finish installation

Fig. 9. Installation procedure of strain gauge for load transfer analysis

형 마이크로파일, 그리고 재하시험을 위한 반력앵커의 배치도를 정리하였다.

2.3 하중재하시험 방법 및 재하시험 결과분석 방법

본 연구에서 반력앵커를 활용하여 재하대 설치 후 시험말뚝의 두부에 압축하중을 가하는 정재하시험 방식을 채택하여 현장재하시험을 수행하였다. Fig. 12와 같이 시험말뚝 주변에 재하대를 설치하여 4,000kN 용량의 유압잭을 활용하여 압축하중을 가하였으며, 이때, 말뚝 두부에 하중계 및 변위계를 설치하여 연직하중 및 변위를 각각 측정하였다. 재하시험 시, ASTM(1994)의 급속재하시험 방식에 따라 연직 하중을 100kN 씩 나눠 단계적으로 가했으며, 각 단계별 하중을 최소 5분에서

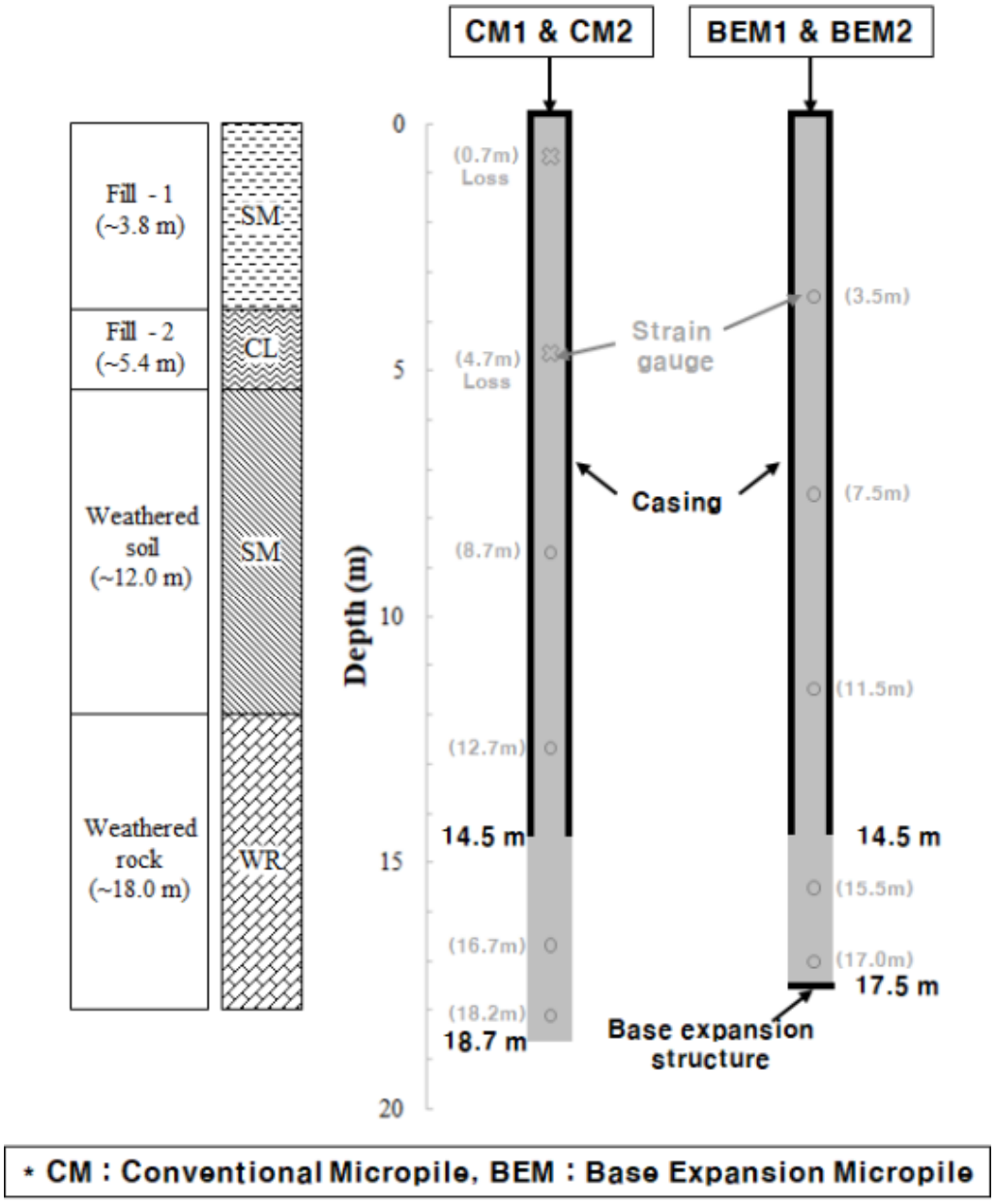


Fig. 10. Schematic diagram of test piles with soil layers

최대 20분간 유지하였다.

말뚝의 허용지지력은 현장재하시험을 통해 시험말뚝의 하중-침하 거동을 확인하고, 항복 또는 극한(또는 파괴)을 확인한 후 안전율을 적용하여 허용지지력을 결정한다. 하지만, 현장재하시험시 재하 가능한 반력의 한계 등으로 인해 설계하중의 2~3배 크기의 하중을 가하는 경우가 일반적이며, 이 경우, 극한(파괴) 하중을 확인하기 어려운 경우가 대부분이다. 이 경우, 항복하중을 평하중-침하곡선을 통해 항복하중을 산출하는 도해법을 적용하며, 대표적으로는 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). 또는, 말뚝 두부에서의 침하량을 기준으로 일정 침하량이 발생하였을 때의 하중을 극한하중을 결정하는 방법 등이 활용되고 있다. 본 연구에서는 각 시험말뚝에 대하여 두부 정재하시험을 수행하고, 시험말뚝에 가한 하중과 발생 침하량 사이의 관계를 하중-침하곡선으로 도시한 후, 가장 대표적인 P-S 분석법으로 항복하중을 산정하였다. 또한, 전침하량 기준으로 Terzaghi and Peck(1943) 등이 제안한 25.4mm 의 침하량 기준으로도 항복하중을 결정하여 지지력을 비교하였다.

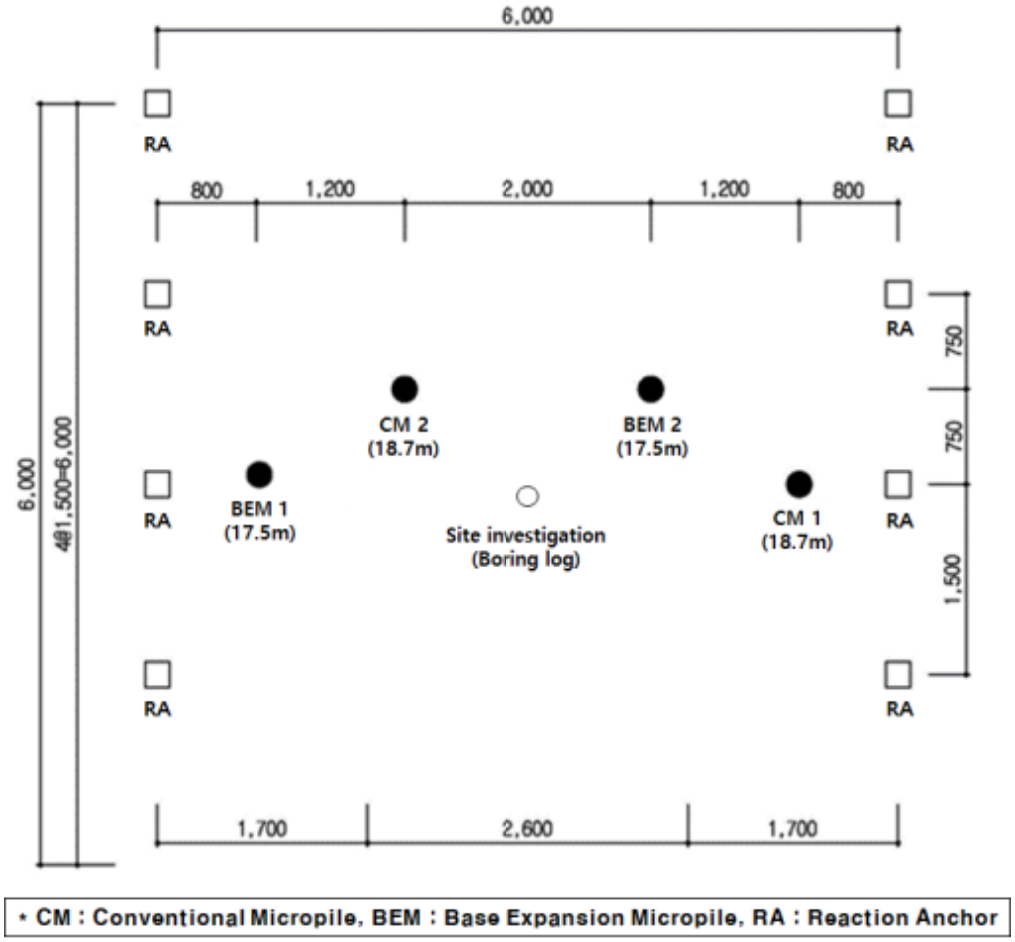


Fig. 11. Layout of the test piles and reaction anchors

Fig. 12. Field load tests

3. 현장재하시험 결과 분석

3.1 정재하시험 결과

본 연구에서는 일반적인 정재하시험에서의 재하하중인 설계하중의 약 2~3배 수준을 넘어 각 시험말뚝의 항복 거동이 발생할 때까지 하중을 재하하였다. Fig. 13에 일반 마이크로파일 2본과 선단확장형 마이크로파일 2본의 하중-침하곡선(P-S 곡선)을 각각 도시하였다. 2본의 일반 마이크로파일(Conventional Micropile, CM1 & CM2)에서는 하중증가에 따른 침하량이 급격히 증가하는 항복하중이 비교적 명확하게 확인되었으나, 2본의 선단확장형 마이크로파일(Base Expansion Micropile, BEM1 & BEM2)에서는 항복하중을 명확히 결정하기 어려웠

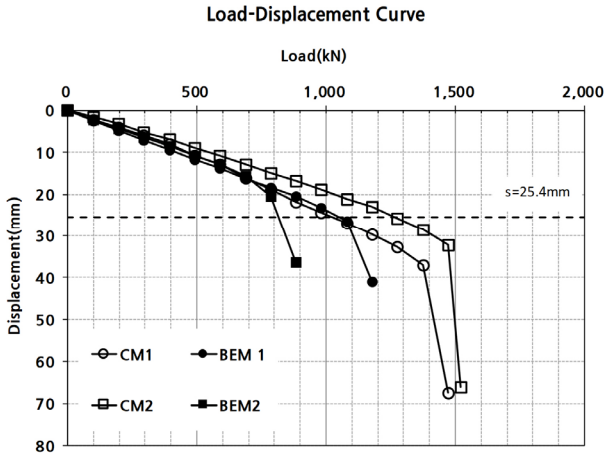


Fig. 13. Load(P)–Displacement(S) curves for each test piles

다. 따라서, 모든 시험말뚝에서, 하중-침하곡선의 도해법으로 결정한 항복하중과 25.4mm 의 전침하량 기준으로 결정한 항복하중을 비교하여, 둘 중 보수적인 작은 값을 최종적으로 항복하중으로 정의하고 안전율 2.0을 적용하여 허용지지력을 산정하였다. 각 시험말뚝별 산정된 항복하중 및 허용하중은 Table 1에 정리하였다.

각 시험말뚝별 허용 지지력 산정 결과를 직접 비교하면, 선단확장형 마이크로파일의 지지력이 일반 마이크로파일보다 작게 산정되어 지지성능이 일반 마이크로파일 대비 더 좋지 않은 것으로 확인된다. 하지만, 2.2절과 Fig. 10에 나타낸 바와 같이, 마이크로파일의 지지력을 결정하는 지지층의 소켓길이(케이싱 종료심도~말뚝 선단위치 심도)가 일반 마이크로파일은 약 4.2m인데 반해, 선단확장형 마이크로파일은 약 3.0m로 선단확장형 마이크로파일의 근입 깊이가 달라 시험결과를 직접 비교하는 데는 무리가 있다. 또한, 일반 마이크로파일과 선단확장형 마이크로파일의 하중 초기에는 비슷한 강성으로 거동하다가 선단확장형 마이크로파일이 먼저 항복 또는 극한상태에 도달하는데, 이는 선단확장형 마이크로파일의 소켓길이가 일반 마이크로파일의 소켓길이보다 짧아서 작용하중에 대해 먼저 항복한 것으로 판단된다.

일반적으로 마이크로파일의 설계시 암반근입층 등 지지층에서의 주면마찰력으로 말뚝의 지지력을 산정함을 고려하여(FHWA, 2005), 마이크로파일의 지지력이 발현되는 구간인 상부 케이싱 구간을 제외한 소켓구간에서의 단위주면마찰력을 비교하였으며, 그 결과는 Table 2에 정리하였다. 항복하중을 기준으로 산정한 각 시험말뚝별 단위 주면마찰력은 일반 마이크로파일에서는 515.8~640.1kPa(평균 577.9kPa), 선단확장형 마이크로파일에서는 555.1~742.9kPa(평균 649.0kPa)로 나타났다. 이상의 결과로부터, 실제 풍화암 지반에서의 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대 효과는 일반 마이크로파일의 주면마찰력 대비 약 12% 정도로 판단된다.

3.2 하중전이분석 결과

선단확장형 마이크로파일의 경우, 일반 마이크로파일의 선단에 간단한 선단 지압구를 장착함으로써 쐐기수평력에 의한 지지력 증가를 유도하는 공법이다. 즉, 지압구를 통해 지지층에서의 주면 및 선단지지력 증대 효과를 확인하는 것이 재하시험의 주요 목적 중에 하나

Table 1. Yield load from field load tests

Test pile	Yield load (kN)		Allowable load (kN)	Note
	P–S curve	s=25.4mm		
CM1	1,373.4	**1020.795**	510.4	F.S. = 2.0
CM2	1,471.5	**1266.811**	633.4	
BEM1	1,079.1	**1050.293**	525.1	
BEM2	**784.8**	815.5431	392.4	

* CM : Conventional Micropile, BEM : Base Expansion Micropile

Table 2. Unit friction resistance of test piles

Test pile	Yield load (kN)	Socket length (m)	Unit friction resistance (kPa)	
			Each piles	average
CM1	1020.795	4.2	515.8	577.9
CM2	1266.811	4.2	640.1	
BEM1	1050.293	3.0	742.9	649.0
BEM2	784.8	3.0	555.1	

* Increasing ratio = 649.0 / 577.9 = 1.12

이며, 이를 위하여 재하시험시 심도별 하중전이분석을 통해 지지층에서의 주면지지력 및 선단지지력 증대효과를 확인하였다.

하중전이분석은 심도별로 설치한 변형률계를 바탕으로, 심도별 축하중의 분포를 각 재하하중 단계별로 측정하는 것이다. Fig. 14에 나타낸 바와 같이(Jung et al., 2011), 각각의 심도에서 측정된 변형률에 말뚝의 단면적과 말뚝 변형계수(E)를 곱하여 말뚝의 축하중 분포도를 그릴 수 있다. 이때 180도 방향으로 설치된 변형률계의 계측값의 평균을 활용하였으며, 좌우측의 편차가 크지 않아 편심에 따른 말뚝의 휨은 없다고 판단할 수 있었다. 말뚝 두부부터 말뚝의 설치 심도에 따라 감소하는 축하중의 차이를 바탕으로 해당 구간에서의 말뚝 주면 마찰력을 계산할 수 있으며, 이를 말뚝의 주면면적으로 나누어 단위 주면마찰력을 산정할 수 있다. 또한, 말뚝 선단까지 전달된 축하중을 바탕으로 말뚝의 단위 선단지지력을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 시험말뚝별 주면마찰력 및 선단지지력을 비교하기 위하여 일반 및 선단확장형 마이크로파일 각각 1본씩(CM1 & BEM2), 총 2본에 대하여 하중전이분석을 수행하였다. 두부 정재하시험 결과로부터 유추한 각 시험말뚝별 항복하중 재하시까지의 결과를 바탕으로 일반 및 선단확장형 마이크로파일의 하중전이

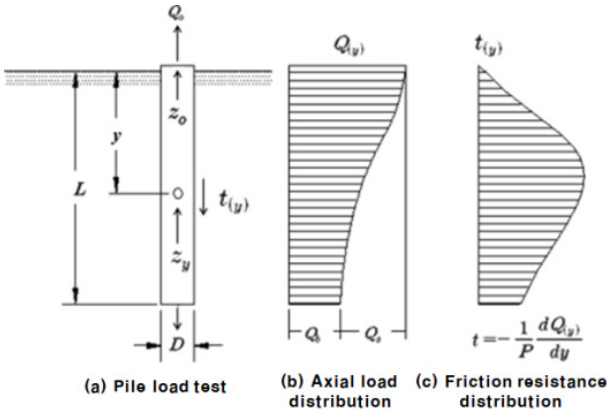
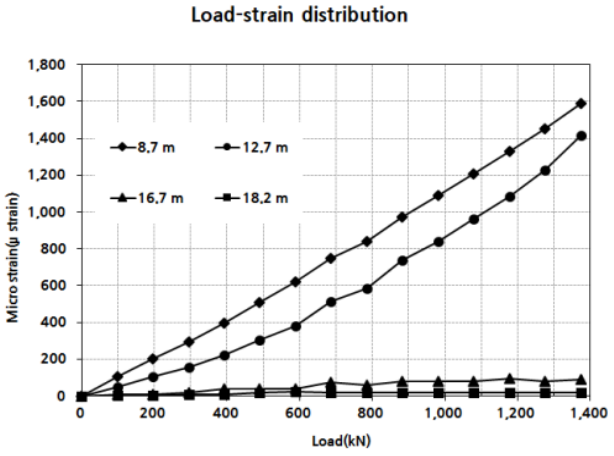
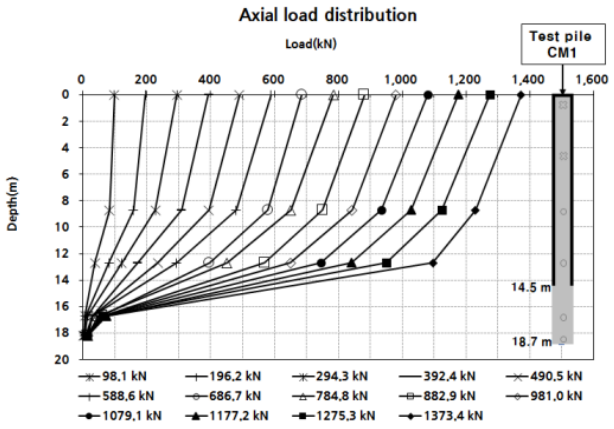


Fig. 14. Load transfer analysis from pile load test

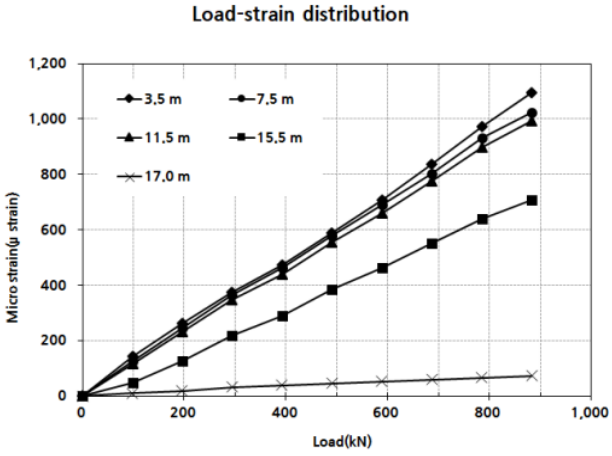


(a) Load–strain distribution

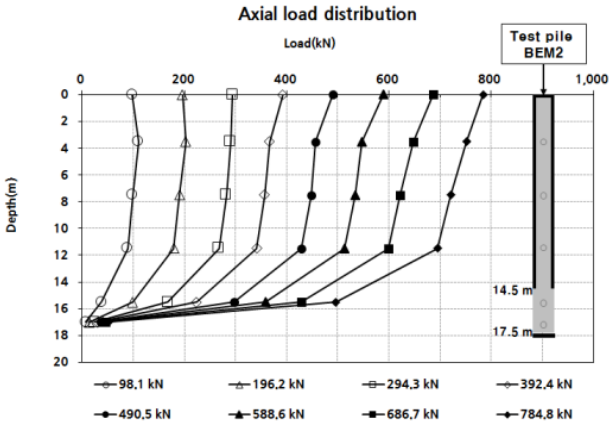


(b) Axial load distribution

Fig. 15. Load transfer analysis results for conventional micropile (CM1)



(a) Load–strain distribution



(b) Axial load distribution

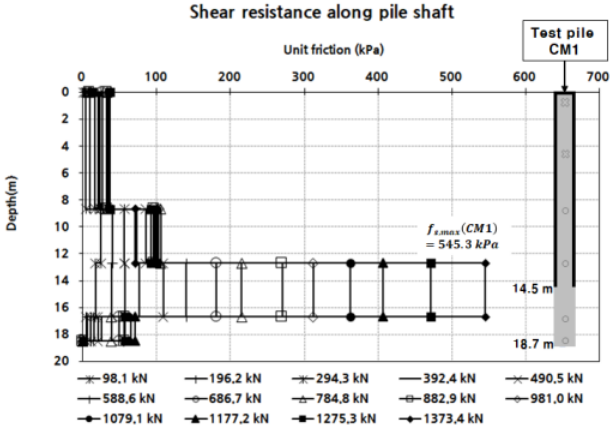
Fig. 16. Load transfer analysis results for base expansion micropile (BEM2)

분석 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 각각 도시하였다. 각 심도별로 설치된 변형률계에서 측정된 하중-변형률 분포(Fig. 15(a) 및 Fig. 16(a)) 및 하중-변형률 분포로부터 도출한 각 심도별 축하중 분포(Fig. 15(b) 및 Fig. 16(b))를 도시하였다.

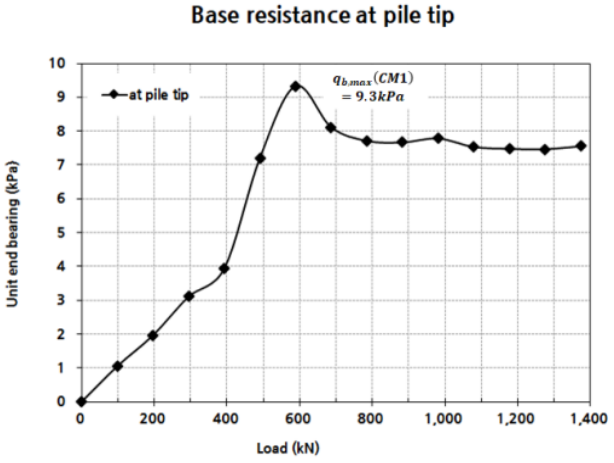
각각의 축하중분포에서 확인할 수 있듯이, 말뚝 두부에서 가까울수록 변형율이 크게 나타났으며, 이에 따라 축하중도 크게 산정되었다. 축하중 분포에서 확인할 수 있듯이, 마이크로파일의 설치시 공벽 붕괴 방지 등을 위해 케이싱이 삽입된 심도까지는 일부 지지력이 발현되어 축하중이 감소하기는 하나 그 크기가 크지 않고, 대부분의 지지력이 상부 케이싱 구간이 아닌 지지층 소켓구간에서 대부분의 지지력이 발현되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 시험말뚝의 선단부에서의 축하중은 전체 재하하중 중 극히 일부만이 전달되는 것을 미루어 볼 때, 선단지지력보다는 지지층 소켓구간에서의 주면마찰력에 의해 마이크로파일의 지지력이 결정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 마이크로파일 설계시 주면마찰력 만으로 말뚝의 지지력을 산정하는 일반적인 설계 방식(FHWA, 2005)에 부합한 실험 결과임을 의미한다.

시험말뚝별로 축하중을 바탕으로 심도별 단위주면지지력과 단위선단지지력을 산정하여 비교하였으며, 각각의 결과를 Fig. 17과 Fig. 18에 도시하였다. 그 결과, 일반 마이크로파일의 심도별 최대 단위주면지지력은 12.7m~16.7m 구간에서 약 545.3kPa로 산정(Fig. 17(a))되었으며, 말뚝 선단에서의 단위선단지지력은 약 9.3kPa로 산정(Fig. 17(b))되었으며, 선단확장형 마이크로파일의 심도별 최대 단위주면지지력은 15.5m~17.0m 구간에서 약 629.3kPa(Fig. 18(a)), 단위선단지지력은 약 29.3kPa로 산정(Fig. 18(b))되었다.

일반 마이크로파일과 선단확장형 마이크로파일의 하

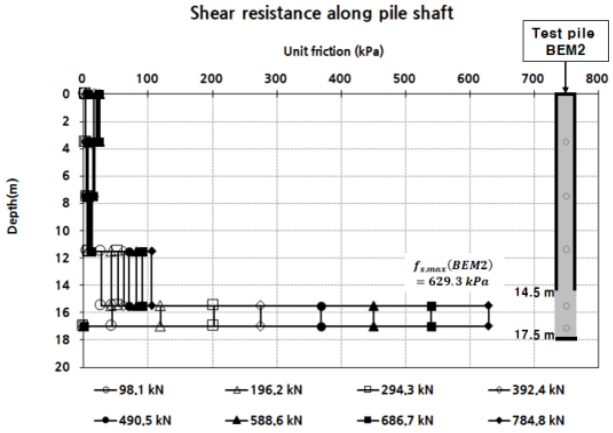


(a) Shear resistance

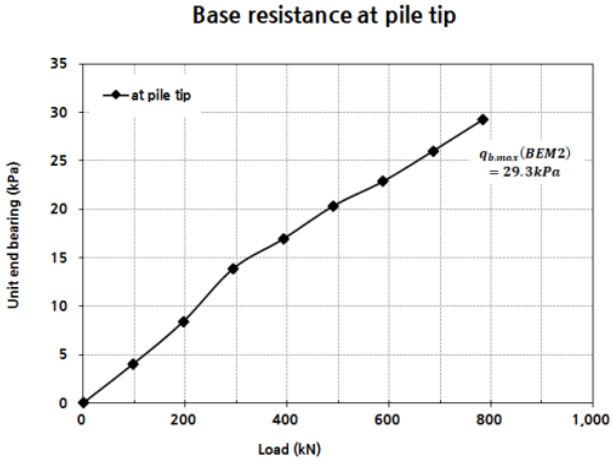


(b) Base resistance

Fig. 17. Unit shear and base resistance for conventional micropile (CM1)



(a) Shear resistance



(b) Base resistance

Fig. 18. Unit shear and base resistance for base expansion micropile (BEM2)

중전이분석 결과를 바탕으로 지지력 증대효과를 비교한 결과, 선단 지압구가 설치되어 말뚝의 선단에서 말뚝 설치시 쐐기 수평력에 의한 지지력 증가가 유도된 선단확장형 마이크로파일의 경우, 케이싱 구간 이하의 지지력 발현 구간인 소켓구간에서의 최대 단위주면지지력이 일반 마이크로파일 대비 15.4% 큰 값으로 나타났다. 또한, 선단지지력의 경우에는 선단 확장형 마이크로파일이 일반 마이크로파일 대비 약 315.1% 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이를 미루어 판단할 때, 선단 지압구의 효과에 따라 지지력 증대효과가 발생하였으며, 특히, 일반적인 마이크로파일에서는 무시할만큼 작은 선단 지지력이, 선단확장형 마이크로파일에서는 유의미하게 발현됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 선단 지압구를 활용한 선단 확장형 마이크로파일의 지지력 증대효과를 분석하기 위하여 현장재하시험을 수행하고, 일반 마이크로파일과의 지지성능을 비교하였다. 일반 마이크로파일과 선단확장형 마이크로파일을 각각 두 본씩, 총 네 본을 시공하여 재하시험을 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 선단 확장형 마이크로파일은 일반적인 마이크로파일의 선단에 지압구를 장착하여 지지력을 증대시킬 수 있는 공법이다. 일반적으로 마이크로파일이 시공되는 풍화암 지반을 대상으로 시험말뚝들을 시공하였으며, 현장시공시 지압구의 존재 및 선단 슬리임 및 공벽 내의 잡석 등 유무에 따라 선단확장형 마이크로파일의 시공 길이가 다소 감소하였으나, 재하시험 초기의 시험말뚝 강성이 일반 마이크로파일과 유사한 지지거동을 보임을 확인하였다.

(2) 두부 정재하시험을 통해 일반 및 선단확장형 마이크로파일의 지지력을 비교하였다. 지지층의 소켓길이가 다르기 때문에, 직접적인 비교를 위하여 항복하중 재하시의 지지력을 바탕으로 단위주면마찰력을 구하여 시험말뚝별 지지성능을 비교하였다. 그 결과, 시험말뚝별 단위 주면지지력은 일반 마이크로파일에서 515.8～640.1kPa(평균 577.9kPa), 선단확장형 마이크로파일에서 555.1～742.9kPa(평균 649.0kPa)로 나타나, 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대 효과는 일반 마이크로파일의 주면지지력 대비 약 12% 정도임을 확인하였다.

(3) 하중전이분석을 통해 일반 및 선단확장형 마이크로파일의 단위 주면지지력과 선단지지력을 비교하였다. 그 결과, 선단확장형 마이크로파일의 지지층에서의 최대 단위주면지지력은 약 629.3kPa로 산정되어, 이는 일반 마이크로파일의 최대 단위주면지지력 대비 약 15.4% 크게 발현되는 것을 확인하였다. 또한, 선단지지력의 경우, 선단확장형 마이크로파일에서는 약 29.3kPa이 발현되었으며, 일반 마이크로파일의 9.3kPa과 비교하여 약 315.1% 크게 나타났다.

상기 결과들을 바탕으로 선단 지압구의 효과에 따라 지지력 증대효과가 발생하였으며, 특히, 일반적인 마이크로파일에서는 무시할만큼 작은 선단 지지력이, 선단확장형 마이크로파일에서는 유의미하게 발현됨을 확인할 수 있었다. 다만, 시공 및 재하시험 사례가 부족한 만큼 보다 다양한 현장에서 많은 시공 사례를 추가하고 이를 분석함으로써 그 성능을 검토해야할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230132-001, 건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구).

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. Bae, J.H., Lee, J.W., Shin, S.H., and Kim, D.W. (2020), Analysis of Vertical and Horizontal Behavior of Helical Piles in Sands Varying Helix Shapes and Locations, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol.40, No.4, pp.393-400.
3. Bruce, D.A. and DiMillo, A.F. (1995), A Primer on Micropiles, *Civil Engineering*, Vol.65, No.12, pp.51-54.
4. FHWA (2005), “Micropile Design and Construction”, Publication No. FHWA NHI-05-039, U.S Department of Transportation, Washington, D.C.
5. 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.
6. 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.
7. Hwang G.C., Ahn, U.J., Lee, J.S., and Ha, I.S. (2018), A Study on the Bearing Characteristics of No-grouted and End-compressed Micropile Adopting Wedge Horizontal, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.3, pp.67-75.
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., 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.
10. Jung, H. Y., Hwang, S. C., and Choi, Y. (2011), A Study on Perimeter Load Transfer Fuctions of the Large Diameter Drilled Shafts Depending on Soil Types During the Static Pile Load Tests, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol.31, No.5C, pp.163-170.
11. KGS (2018), Commentary on Standard Guideline for the Design of Foundation Structures, Korean Geotechnical Society.
12. Kim, J.H., Kim, S.J., Han, J.T., and Lee, S.H. (2021), Evaluation of the Installation Mechanism of the Micropile with the Base Expansion Structure Using a Centrifuge Model Test, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.37, No.11, pp.37-49.
13. Lee, T.H. and Im, J.C. (2006), An Experimental Study on the Reinforcement Effect of Installed Micropiles in the Surround of Footing on Dense Sand, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.5, pp.69-81.
14. Lee, S.H., Han, J.T., Jin, H.S., and Kim, S.J. (2021), 3-D Numerical Analysis for the Verification of Bearing Mechanism and Bearing Capacity Enhancement Effect on the Base Expansion Micropile, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.2, pp. 19-31.
15. Lee, S.H., Kim, S.J., Han, J.T., Jin, H.S., Hwang, G.C., and Lee, J.S. (2022), Three-Dimensional Numerical Analysis for Verifying Behavioral Mechanism and Bearing Capacity Enhancement Effect According to Tip Elements, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.9, pp.53-67.

Received : March 14th, 2023
Revised : March 21st, 2023
Accepted : March 23rd, 2023