

선압축 보강마이크로파일의 하중분담 특성을 고려한 건물 보강효과에 대한 연구

이광훈* · 박용찬** · 문성진*** · 유광호****

Lee, Kwang Hoon*, Park, Yong Chan**, Moon, Sung Jin***, You, Kwang Ho****

Reinforcing Effect of Buildings Considering Load Distribution Characteristics of a Pre-compressed Micropile

ABSTRACT

Micropiles can be used to support additional load in extended building structures. However, their use brings about a risk of exceeding the bearing capacity of existing piles. In this study, pre-compression was applied to distribute the load of an existing building to micropiles, and an indoor loading test was performed to confirm the structural applicability of a wedge-type anchorage device designed to improve its capacity. According to the test results, the maximum strain of the anchorage device was 0.63 times that of the yield strain, and the amount of slip generated at the time of anchorage was 0.11 mm, satisfying structural standards. In addition, using MIDAS GTS, a geotechnical finite element analysis software, the effect of the size of the pre-compression, the thickness of the soil layer, and the ground conditions around the tip on the reaction force of the existing piles and micropiles were analyzed. From the numerical analysis, as the size of the pre-compression load increased, the reaction force of the existing pile decreased, resulting in a reduction rate of up to 36%. In addition, as the soil layer increased by 5 m, the reduction rate decreased by 4%, and when the ground condition at the tip of the micropile was weathered rock, the reduction rate increased by 14% compared with that of weathered soil.

Key words : Vertical extension, Micropile, Pre-compression, Load distribution

초 록

건물이나 구조물 증축 시 사용되는 마이크로파일은 추가하중의 일부만을 지지하여 기존 말뚝의 경우 허용지지력을 초과하는 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 건물의 하중을 마이크로파일에 분배하고자 선압축 공법을 적용하였고, 정착성능을 개선한 웨지형 정착장치의 적용성을 확인하고자 실내재하시험을 수행하였다. 시험결과, 정착장치의 최대변형률은 항복변형률의 0.63배였고, 웨지와 콘크리트 사이 슬립발생량은 0.11 mm로 구조적인 기준을 만족하였다. 또한, 지반범용 해석프로그램인 MIDAS GTS를 활용하여 선형 압축하중, 토사층 두께, 선단 지반조건이 기존 말뚝과 마이크로파일의 반력에 미치는 영향을 분석하였다. 해석결과, 선압축 하중의 크기가 증가할수록 기존말뚝의 반력이 감소하여 최대 36%의 저감효과를 보였다. 토사층 두께가 5 m 증가됨에 따라 반력저감률은 4% 감소하였고, 마이크로파일의 선단이 풍화암에 놓일 경우 풍화토와 비교하여 반력저감률이 14% 증가하였다.

검색어 : 수직증축, 마이크로파일, 선압축, 하중분담

* 정희원 · 수원대학교 건설환경공학과 박사과정 (The University of Suwon · thomas4711@hanmail.net)

** (주)비티엠이엔씨 기술연구소 전무, 공학박사 (BTM E&C CO.,LTD. · ycpark0303@hanmail.net)

*** 정희원 · (주)이도카건설컨설팅 기술연구소 연구원 (EDOGA Consultants CO.,LTD. · moonsj82@nate.com)

**** 종신회원 · 교신저자 · 수원대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · The University of Suwon · khyou@suwon.ac.kr)

Received November 24, 2021/ revised January 12, 2022/ accepted June 10, 2022

1. 서론

마이크로파일 공법은 일반적으로 지반을 안정시키고 구조물을 지지하기 위해 사용된다. FHWA(2005)에서는 지반 보강에 관한 기존의 연구들을 정리하여 설계 및 시공 매뉴얼을 제시하였다. 그러나 매뉴얼에서는 일반적인 시공방법 및 설계절차에 관한 내용들이 주를 이뤘고 지반의 안정성 분석이 부족하였다. 이에 Lee and Lim(2006)은 마이크로파일의 영향인자를 변경하여 지반의 안정성에 대해 평가하였고, Hwang et al.(2012)은 모형실험을 통해 지반조건에 적합한 설치방법을 제안하였다.

마이크로파일은 협소한 장소에서도 설치할 수 있고 소음과 진동이 적어 기존 건축물의 기초보강 목적으로 많이 사용된다. 그러나 수직증축으로 인한 건물하중이 증가하는 경우에는 기초를 보강하기 위하여 추가로 말뚝 기초를 설치하여도 증축 전의 연직하중은 기존말뚝에서만 지지하기 때문에 설계 시의 허용지지력을 초과하게 된다(MOLIT, 2014).

추가로 보강되는 말뚝에 선재하를 가함으로써 기존말뚝에 가해지는 하중을 감소시키는 방법에 관한 연구는 이전부터 진행되어 왔다(Cole, 1993; O'Neil and Pierry, 1989). 국내에서도 최근 KICT(2014)에서 기존의 건물하중을 보강말뚝으로 분담하여 지지하는 선재하 보강말뚝 공법을 제안하였다. 그러나 기존의 선재하 보강말뚝 공법은 삽입방식이 매우 복잡하며 삽입방향과 가압방향이 반대이므로 도입력에 대한 손실이 크다는 단점이 있다. 이러한 선재하 보강말뚝 공법을 보완하기 위해 MSS(2021)의 웨지정착장치에 의한 선압축 보강마이크로파일을 개발하였고, KICT(2014)를 참고하여 일산 1기 신도시의 지반조건을 고려한 선압축 하중 크기에 따른 수치해석을 수행하였다(Lee et al., 2021a; Lee et al., 2021b). 그러나 웨지정착장치에 대한 구조적 검증이 불충분하였고, 다양한 현장조건을 고려한 선압축 보강마이크로파일의 하중분담 효과에 대한 연구가 부족하였다.

따라서, 본 논문에서는 실내 재하시험을 통해 선압축 마이크로파일의 정착력 및 최대 지지력을 파악하고, 웨지정착장치의 구조적 안정성을 확인하였다. 또한, 하중분담에 영향을 줄 것으로 판단되는 토사층 두께, 선단부 조건과 같은 지반조건을 파라미터로 선정하여 수치해석을 통한 민감도 분석을 수행하였다.

2. 선압축 마이크로파일 공법의 개요

선압축 하중(Pre-compression, 이하 pre-comp.)은 보강말뚝을 설치하고 압축력을 가하여 원상태로 돌아오려는 반발력을 이용하여 기존 건물의 하중과 추가분을 일부 분담하게 된다. Fig. 1은 이러한 선압축 하중 시스템의 원리를 도시한 개념도이다.

선압축 하중재하시스템은 하중을 재하하여 PC강봉이 하향으로 압입되면서 선단지지력을 확보하도록 하고, 압입된 PC강봉의 반력을 친공홀 내부 설치된 정착콘이 정착웨지와 맞물려 췌기식에 의해 내부에 정착함으로써 지지력을 확보할 수 있는 장치이다. Table 1에 장치 구성품의 기능 및 역할을 나타내었고, Fig. 2에 선압축 하중재하 시공순서를 단계별로 도시하였다.

3. 선압축 가압 및 정착 장치개발을 위한 실내 재하시험

3.1 실내 재하시험 개요 및 방법

선압축 하중재하장치의 시작품을 제작하여 하중재하시험을 통해 정착장치의 구조적 안정성을 확인하였다. 또한, 선압축 마이크로파일의 최대지지력과 정착력을 파악하고자 하였으며, 1000 kN 피로시험기에서 정적압축시험과 정착시험을 진행하였다.

압축시험은 최대하중까지 압축을 가하여 마이크로파일의 지지력과 정착콘 상하부, 웨지의 변형률 분포를 파악하였다. 정착시험은 하부 보강철관과 고강도 스프링에 의한 반력을 이용하여, 마이크로

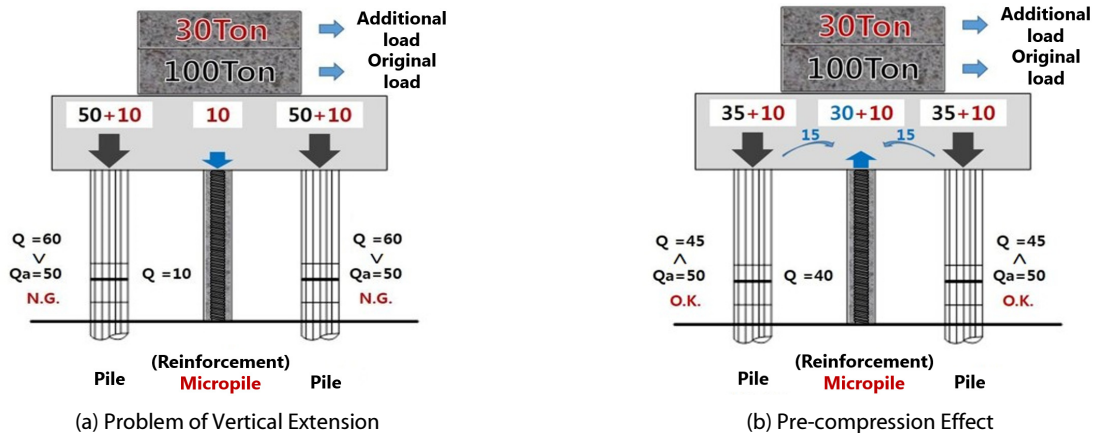


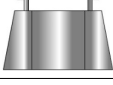





Fig. 1. Conceptual Diagram of Pre-compression (KICT, 2014)

Table 1. Components of the Pre-compressed Loading Device

Component	Shape	Size	Positioning and Functions
Micropile		Thread bar $\Phi=40-90$ mm	<ul style="list-style-type: none"> Settled on rock 10-30m above ground Supports the upper load
Anchorage nut		$\Phi=150-200$ mm	<ul style="list-style-type: none"> Installed on the thread bar Transfers the pre-comp. load to the anchorage cone
Anchorage cone		$\Phi=150-220$ mm	<ul style="list-style-type: none"> Installation of the anchorage nut by engaging with the anchorage wedge Transfers pre-comp. load to anchorage wedge
Anchorage wedge		$\Phi=150-250$ mm	<ul style="list-style-type: none"> Installed in conjunction with the anchorage cone Transfers pre-comp. load to raft
Holding device		L=500 mm $\Phi=200-250$ mm	<ul style="list-style-type: none"> Transfers the pressure of the hydraulic jack to the thread bar Fixes the hydraulic jack to the top of the holding device
Hydraulic jack		$\Phi=200-250$ mm stroke=200 mm	<ul style="list-style-type: none"> Pre-comp. loading device Pushes in the thread bar as much as the stroke

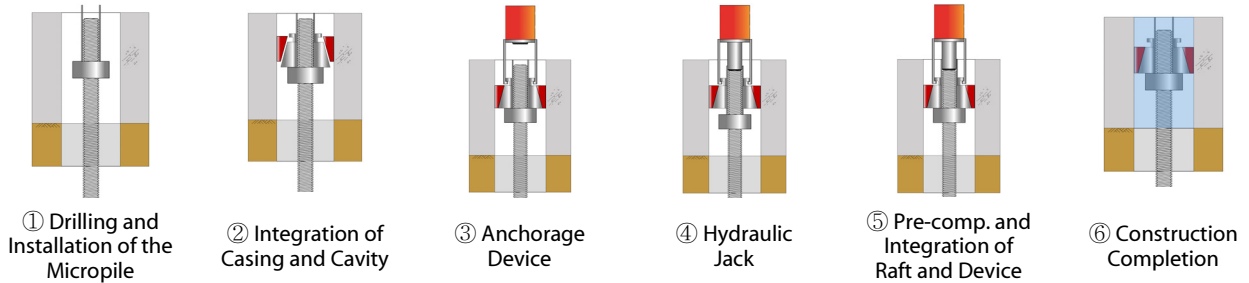
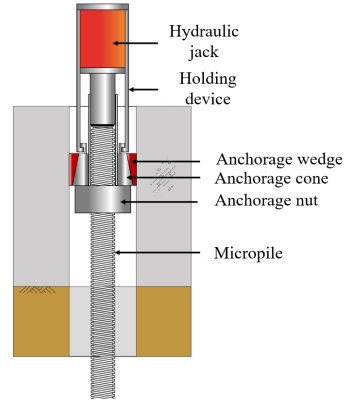
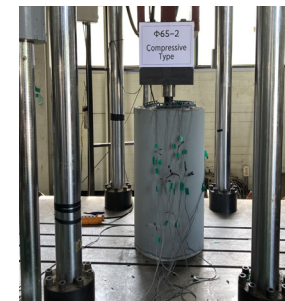


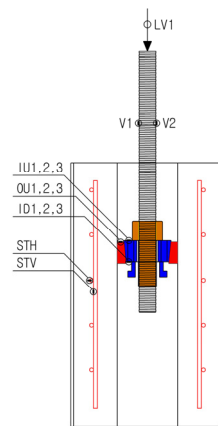
Fig. 2. Construction Sequence of a Pre-compressed Micropile



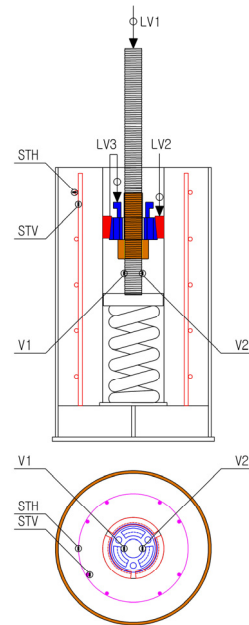
(a) Compression Test Specimen



(b) Anchorage Test Specimen



(c) Location of the Compression Test Sensor



(d) Location of the Anchorage Test Sensor

Fig. 3. Images and Sectional Views of a Test Specimen

파일, 정착콘, 웨지의 변위와 변형률을 측정하고, 마이크로파일의 보유하중, 정착콘과 웨지의 슬립여부 등을 파악하였다.

시험체는 적용 강봉(55, 65 mm)에 따라 압축시험용 O-55, O-65, 정착시험용 F-55, F-65로 구분되며, Fig. 3은 시험체의 세팅 사진 및 측정센서 위치를 표시한 시험체의 단면도이다.

3.2 실내 재하시험 결과

압축시험 및 정착시험 결과로부터 얻어진 하중-변위 및 하중-변형률 곡선을 Figs. 4~7까지에 도시하였으며, 시험결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다.

압축시험 결과, O-55 시험체의 경우는 마이크로파일 압축변형률이 탄성한계에 도달하여 최대하중 543 kN 지점에서 시험을 종료하였으며, 최대하중에서의 정착콘과 웨지의 최대 변형률은 각각 -576×10^{-6} , -513×10^{-6} 의 압축변형만이 발생하여 항복 변형률 $1,980 \times 10^{-6}$ 대비 각각 0.29, 0.26배로 안정적인 정착을 보이고 있다.

O-65 시험체의 경우는 반력 콘크리트 내부 보강철근의 인장변형률이 증가하고, 콘크리트 표면에 수직균열 발생으로 인해 시험상의 안전을 고려하여 최대하중 688 kN 지점에서 시험을 종료하였으며, 최대하중에서의 마이크로파일의 최대 변형률은 $-1,122 \times 10^{-6}$, 정

착콘과 웨지의 최대 변형률은 각각 $-1,209 \times 10^{-6}$, $-1,265 \times 10^{-6}$ 의 압축변형이 발생하여 항복 변형률 $1,980 \times 10^{-6}$ 대비 각각 0.56배로부터 0.63배 사이로 안정적인 정착을 보이고 있다.

정착시험 결과, 마이크로파일 변위 60 mm까지 스프링을 압축시켜 각각의 변위를 측정된 결과 정착콘과 웨지 사이의 변위는 각각 2.10 mm, 0.85 mm의 슬립이 측정되었으며, 웨지와 콘크리트 사이의 변위는 안정적인 정착력으로 각각 0.11 mm, -0.08 mm의 슬립이 측정되어 웨지와 구속 콘크리트 사이에서 슬립은 거의 발생하지 않는 것으로 나타났고, 마이크로파일의 변형률은 각각 -491×10^{-6} , -293×10^{-6} 의 압축변형이 발생하였으나 시험종료까지 슬립으로 인한 마이크로파일의 변형을 저하는 나타나지 않았다.

이상으로부터 압축시험 및 정착시험 결과 마이크로파일, 정착콘, 웨지 모두 정착력에 있어서 구조적으로 문제가 없는 것으로 나타났다.

4. 선압축 마이크로파일 적용을 고려한 수치해석

4.1 해석단면 선정 및 모델링

본 장에서는 선압축 마이크로파일의 적용을 수치해석 상에서 모사하여 하중분담 효과를 확인하고자 하였다. 또한 파라메트릭

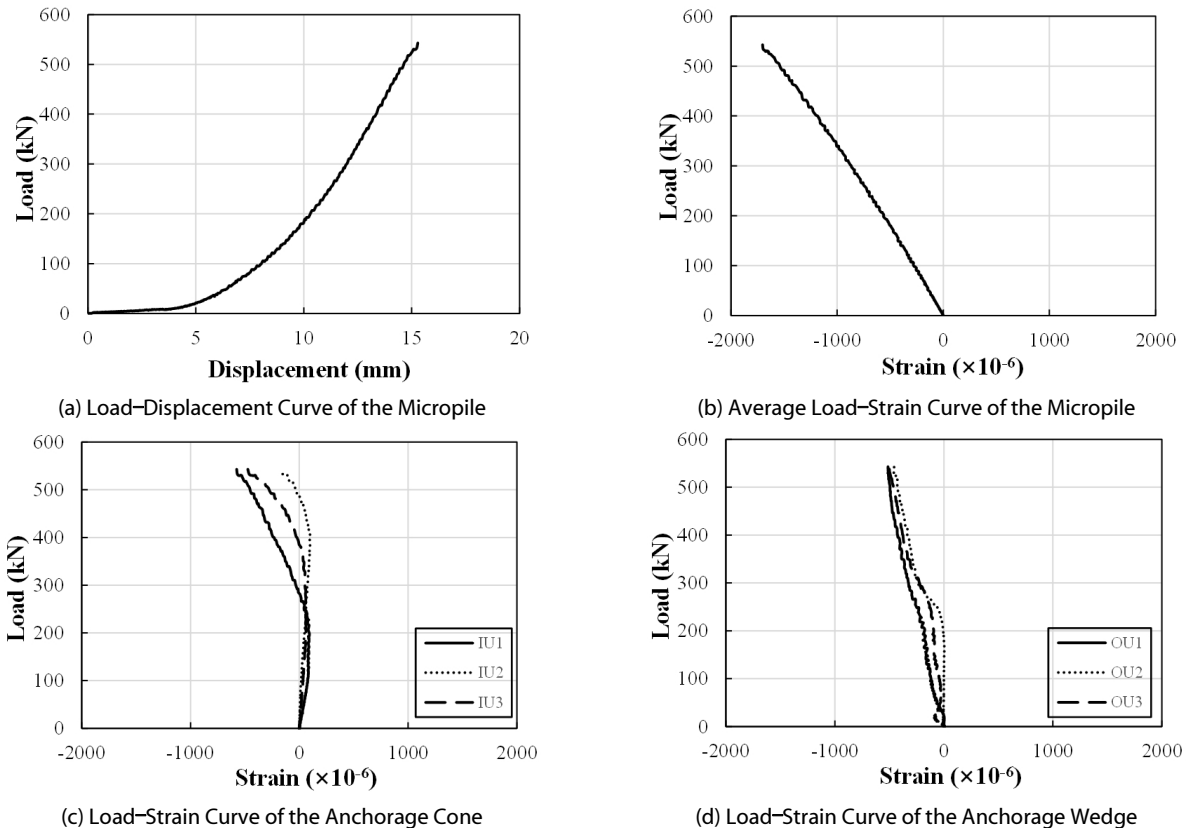


Fig. 4. Results of the O-55 Specimen

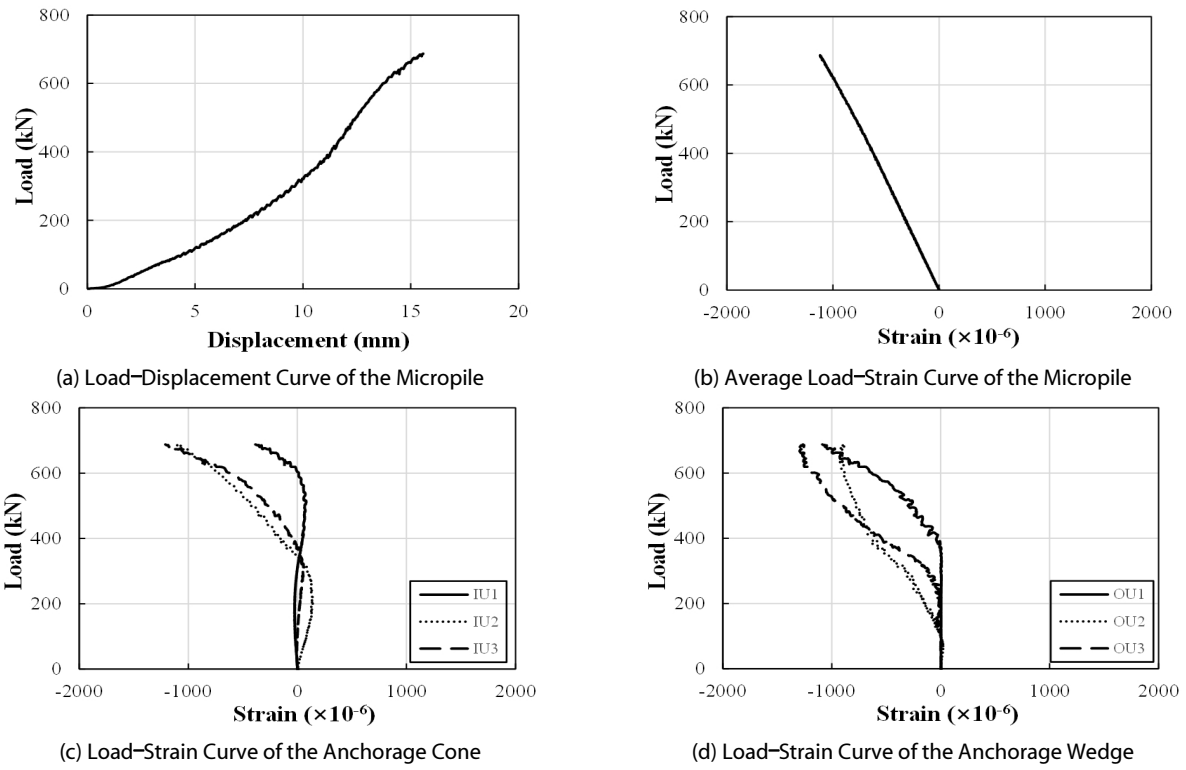


Fig. 5. Results of the O-65 Specimen

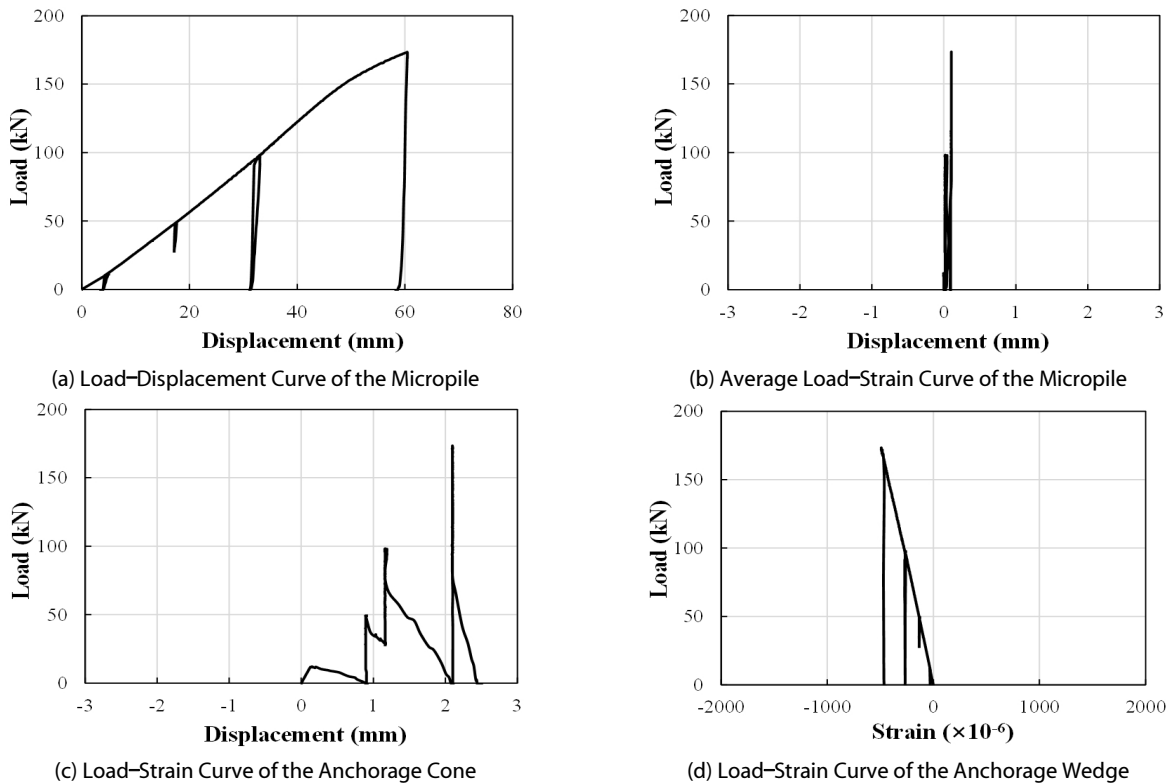


Fig. 6. Results of the F-55 Specimen

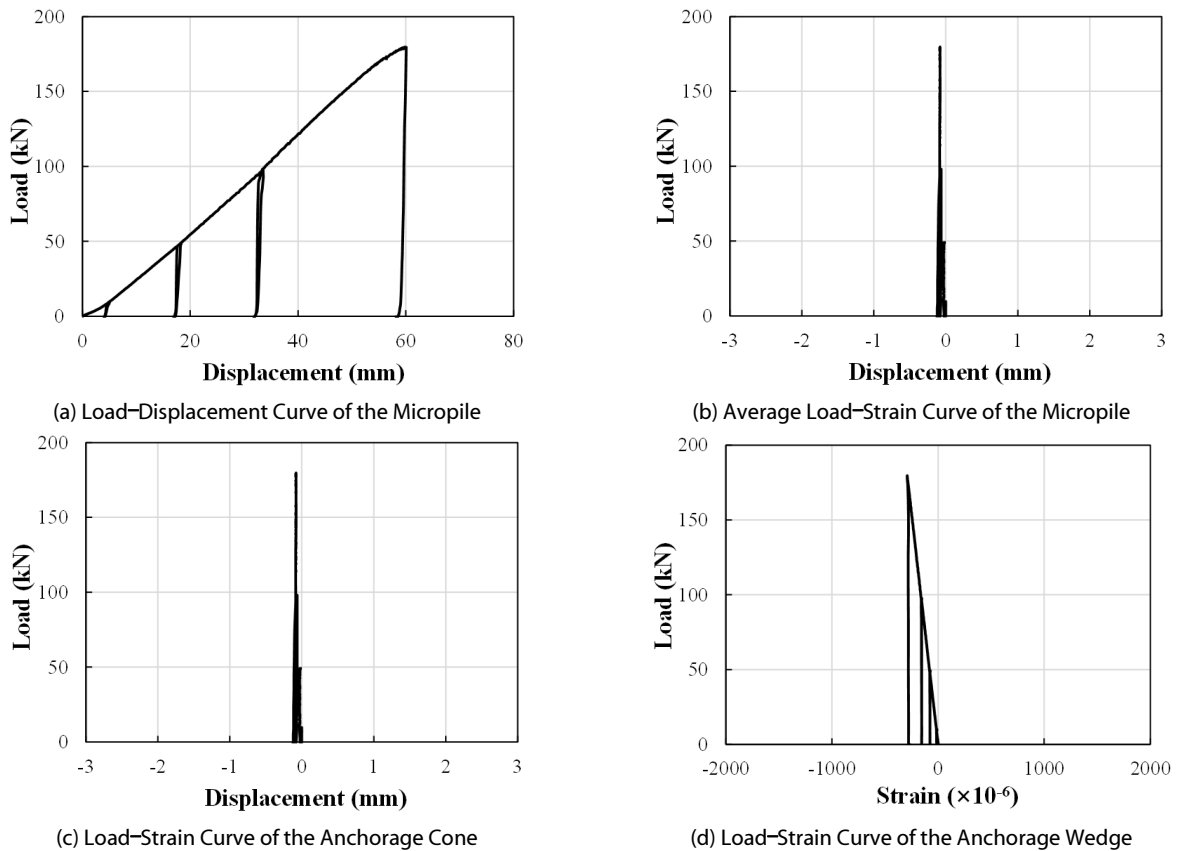


Fig. 7. Results of the F-65 Specimen

Table 2. Results of the Indoor Loading Test

Parameter		Micropile diameter (mm)	
		∅ 55	∅ 65
Compression test	Maximum load (kN)	543	688
	Micropile maximum strain	$-1,704 \times 10^{-6}$	$-1,122 \times 10^{-6}$
	Wedge maximum strain	-513×10^{-6}	$-1,265 \times 10^{-6}$
	Cone maximum strain	-576×10^{-6}	$-1,209 \times 10^{-6}$
	Displacement (mm)	15.29	15.57
Anchorage test	Maximum load (kN)	173	180
	Micropile displacement (mm)	60.45	60.09
	Wedge displacement (mm)	0.11	-0.08
	Cone displacement (mm)	2.10	0.85
	Strain	-491×10^{-6}	-293×10^{-6}

해석을 통해 조건에 따른 하중분배 효과를 정량적으로 분석하여, 향후 예정된 실험 현장시험의 예비검토 자료로 활용하고자 하였다.

KICT(2014)를 통해 수직 증축 리모델링의 대상이 되는 일산 1기 신도시의 공동주택 기초평면도 및 마이크로파일 보강계획을 참고하였으며, Fig. 8과 같이 반력이 가장 크게 발생하는 건물

중심부인 A-A 단면을 해석단면으로 선정하였다. 수치해석 프로그램은 유한요소 지반해석 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX (Midas, 2019)를 사용하였다.

해석영역은 A-A 단면의 외부 기초판은 무시하고 내부 기초판에 작용하는 하중만 고려한 지반거동 해석을 위해 가로 7 m, 세로

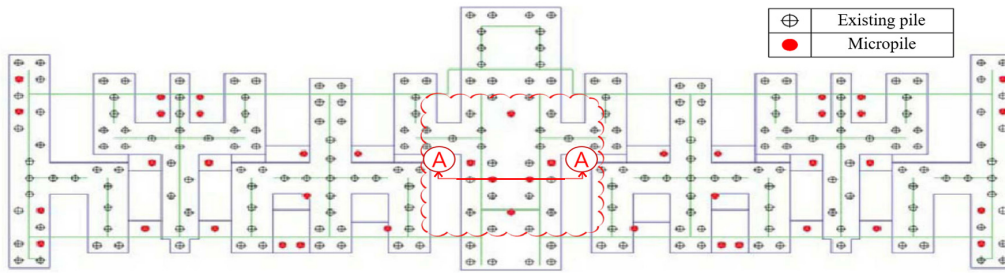


Fig. 8. Plane Section of Reinforced Foundation Pile (KICT, 2014)

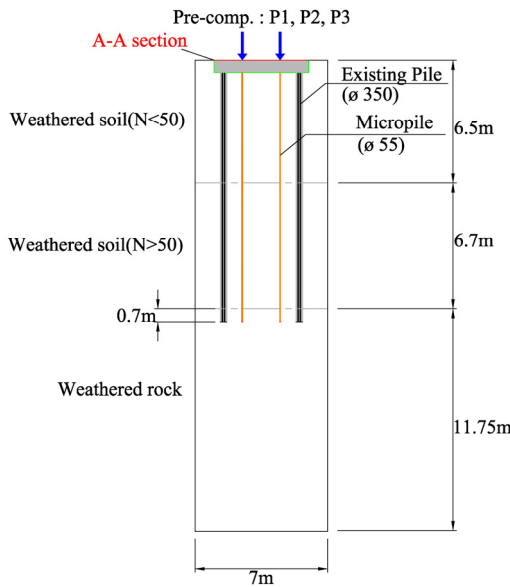


Fig. 9. Main Details of the Numerical Modeling

25 m로 설정하였고, 해석 경계는 좌·우측은 수평변위, 하단은 수직변위를 구속하였다. 또한, 요소의 간격은 0.1 m로 마이크로파일의 직경보다 작게 설정하여 정확한 응력을 산출하고자 하였다. Fig. 9는 적용된 해석단면 개요도이다. 해석상에서 선압축 하중의 적용은 프로그램의 하중재하 기능 중 프리스트레스를 (-)값으로 설정하여 압축으로 변환 후 적용하였다. 지층구조 선정을 위해 1기 신도시 건설 당시 수행한 지반조사 결과 Korea Land and Housing Corporation(1990)을 검토하였으며, 조사결과 중 풍화암의 출현심도가 가장 깊은 13.2 m를 적용하였다.

Fig. 9와 같이 전체 풍화도층은 13.2 m이고, N값 50이하 구간은 6.5 m, N값 50이상 구간은 6.7 m로 적용하였다. 이때 말뚝의 근입깊이는 말뚝 직경의 2배인 0.7 m로 설정하였다.

4.2 적용 물성치 및 시공단계 선정

보강마이크로파일은 크게 중심부의 강봉과 천공장에 채워지는 그라우트, N값 50이하의 풍화도 지반에 공벽 붕괴방지를 위해

삽입되는 케이싱으로 구성된다. 마이크로파일은 수치해석 상에서 ID Beam 요소로 모델링 되므로 강봉과 케이싱, 그라우트를 개별적으로 모사하기 어려워 Eqs. (1) and (2)와 같이 등가물성치로 나타내어 적용하였다.

$$E_{eq} = \frac{A_{st}}{A_g + A_{st}} E_{st} + \frac{A_g}{A_g + A_{st}} E_g \quad (1)$$

$$\gamma_{eq} = \frac{A_{st}}{A_g + A_{st}} \gamma_{st} + \frac{A_g}{A_g + A_{st}} \gamma_g \quad (2)$$

여기서, A_{st} 는 강재 넓이로 0.002 m^2 , A_g 는 그라우팅 넓이로 0.016 m^2 , E_{st} 는 강재 탄성계수로 210 GPa, E_g 는 그라우팅 탄성계수로 17.9 GPa, γ_{st} 는 강재 단위중량으로 78.5 kN/m^3 , γ_g 는 그라우팅 단위중량으로 19.3 kN/m^3 으로 적용하여 등가물성치로 환산하였다. 말뚝과 기초판은 탄성모델을 적용하였으며, 세부 물성치 및 규격은 Table 3에 나타내었다.

지반물성치는 ‘일산의 ○○시설 신축공사’의 지반조사보고서를 참조하여 결정하였으며, Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 적용된 지반물성치는 Table 4에 나타내었다.

A-A단면 기초판에 작용하는 건물 하중을 산정하기 위해 말뚝 선단부에서 발생한 응력이 설계허용지지력에 근접한 수치가 나올 때까지 160 kN/m부터 10 kN/m씩 증가시켜서 반복적으로 해석을 수행하였고 그 결과 230 kN/m를 적정하중으로 결정하였다. 시공단계에 따른 하중은 KICT(2014)에서 제시한 시공단계별 하중비율에 의하여 증감시켜 적용하였다. 따라서 Table 5와 같이 시공단계에 따라 수치해석에 적용하였고 시공단계는 기존 건물단계, 철거단계, 1, 2, 3층 증축단계로 구분하였다.

4.3 영향분석을 위한 파라미터 선정

본 논문에서는 3가지를 파라미터로 선정하여 하중분담 효과에 미치는 영향을 분석하였다. 선압축 하중의 크기를 파라미터로 하여 무보강시의 보강 후에 선압축 하중을 0 kN부터 300 kN까지 100 kN씩 증가시켰을 경우를 비교하여 기존말뚝이 받는 하중의 감소를

Table 3. Properties and Specifications of the Piles and the Raft

Type	Model	Properties			Specification
		γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	
Reinforced micropiles	Elastic	25.9	39	0.2	Diameter: 50 mm
Existing piles		24.0	24	0.2	Diameter: 350 mm Length: 13.25 m
Raft		24.0	24	0.2	Thickness: 650 mm Length: 5 m

Table 4. Properties and Constitutive Model of Soil Layers

Type	Model	Properties				
		γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (deg.)	E (MPa)	ν
Weathered soil (N<50)	Mohr-Coulomb	18.0	22	24	25	0.33
Weathered soil (N>50)		19.0	25	25	55	0.32
Weathered rock		21.0	26	31	400	0.30

Table 5. Load Change Ratio according to Construction Stage

Construction stage	Load (kN/m)	Load change ratio (%)
Existing state	230.0	100
Demolition	133.4	58
1 floor extension	248.0	108
2 floor extension	269.0	117
3 floor extension	287.5	125

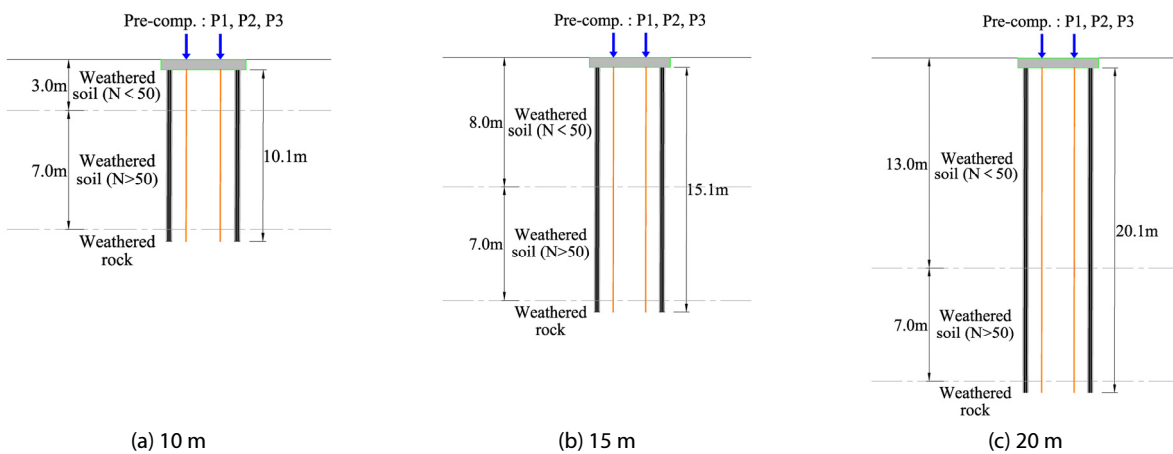


Fig. 10. Main Modeling Details with Various Thicknesses of Upper Weathered Soil

확인하고 정량적으로 나타냈다. 한편, 토사층의 두께를 파라미터로 하는 수치해석을 진행하고자 Fig. 10과 같이 N값이 50 이상인 하부 풍화토 구간은 7 m로 고정하였고 N값이 50 이하인 상부 풍화토 구간은 3 m, 8 m, 13 m로 설정하여 3가지에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 연약한 지반층이 깊어질수록 선압축 하중의 크기에 따른 기존말뚝의 응력변화를 파악하고자 하였다. 마이크로파일은 본래 마찰말뚝이지만 본 논문에서는 선압축

하중에 의한 압축력으로 선단부에서 지지하기 때문에 주면마찰력보다 선단부의 지지력이 크다고 판단하여 선단지지 말뚝으로 구분하였다. 따라서 선단부가 지지하는 지반조건에 따라 프리컴프레션의 효과가 크게 달라질 수 있다고 판단하였고 해당 조건을 하나의 파라미터로 선정하여 해석을 수행하였다. 풍화토 근입, 풍화암 근입, 풍화암 2 m 추가근입의 조건으로 구분하여 Fig. 11과 같이 도시하였다.

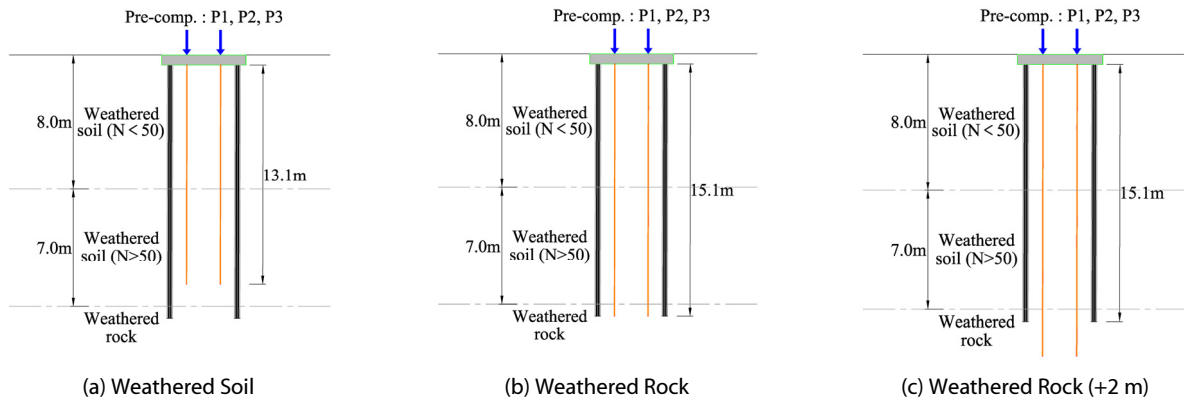


Fig. 11. Main Modeling Details with Various Ground Conditions around Tip of Micropiles

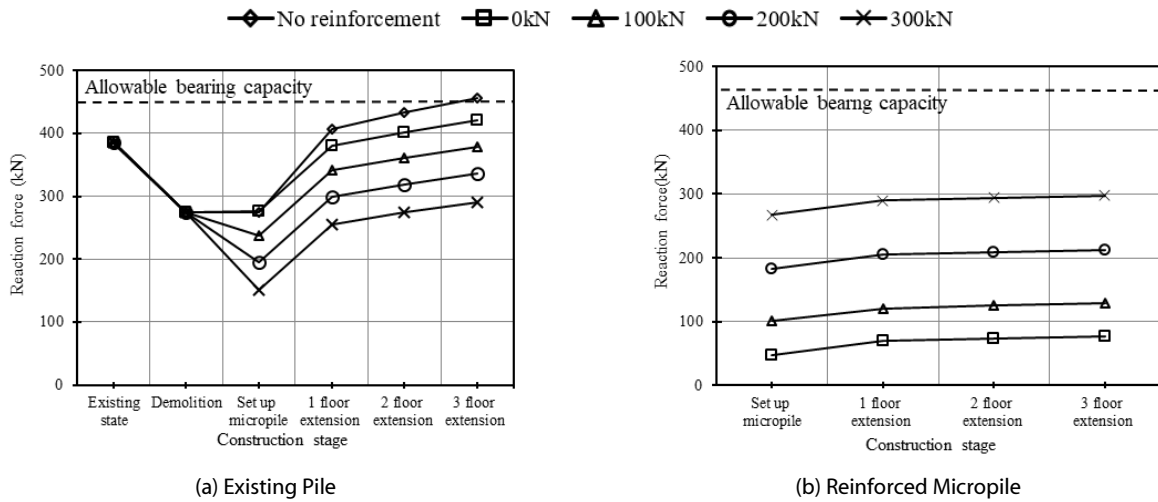


Fig. 12. Reaction Forces with Different Pre-compression Loads

5. 수치해석에 의한 보강 효과 분석

지반을 고려한 선입축 보강마이크로파일의 하중분담 효과를 파악하고자 기존말뚝과 보강마이크로파일 1개씩의 반력을 산정하였다. 반력은 수치해석을 통해 각 말뚝 선단부 지반의 수직응력을 확인하고 말뚝의 단면 특성을 반영하여 환산하였다. 이후 정량적인 하중분담 효과를 분석하기 위하여 무보강시를 기준으로 하여 보강 마이크로파일 설치 및 선입축을 가하면서 감소한 기존말뚝의 반력을 백분율로 나타낸 저감률(Reduction rate)을 산정하였다.

5.1 선입축 하중의 크기

선입축 하중에 따른 선입축 보강마이크로파일의 반력 결과를 Fig. 12와 같이 도시하였다. 분석결과 3층 증축 시공 시 보강마이크로파일을 적용하지 않을 경우, 기존말뚝의 반력은 허용지지력을 초과하였으나 보강마이크로파일은 모든 경우에서 허용지지력을

만족하였다. 그러나 보강마이크로파일을 설치하면서 기존말뚝의 반력은 감소하여 허용지지력을 만족하였고 선입축 하중 크기가 100 kN씩 증가함에 따라 평균 40 kN씩 감소하는 것으로 나타났다.

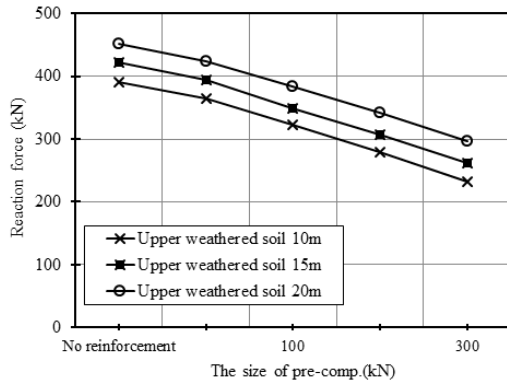
반면에 Fig. 12의 (b)와 같이 보강마이크로파일은 기존말뚝의 반력 감소량보다 많은 평균 76 kN씩 증가하였다. 이는 보강마이크로파일에 40 kN의 하중을 분담하고 선입축 하중의 일부가 반력으로 더해진 것으로 판단된다. 따라서 선입축 하중 산정시 마이크로파일의 허용지지력을 검토하고, 기존말뚝의 하중분담분과 마이크로파일에 작용하는 압축력을 고려하여 적정 하중을 산정하여 할 것으로 판단된다.

저감률 분석결과 Table 6과 같이 선입축 하중을 0 kN부터 100 kN 단위로 증가시킬수록 기존말뚝의 반력이 9~10 %씩 감소하여 최대 36 %까지 감소하였다. 또한, 프리컴프레션의 효과를 확인하고자 기존의 마이크로파일 공법과 선입축 보강마이크로파일 공법을 비교하였을 때 최대 28 %의 차이가 나타났다.

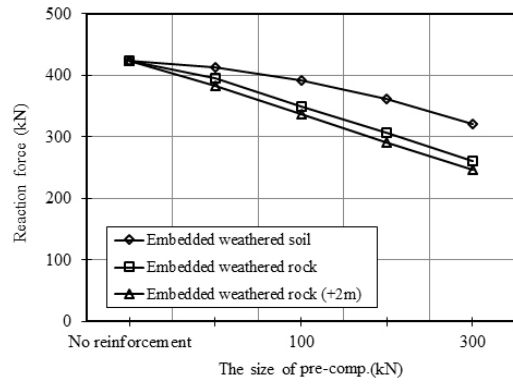
Table 6. Numerical Analysis Results in the Case of Three-Floor Extension with Different Pre-compression Loads

Pre-compression load		Existing pile		Micropile
		Reaction force	Reduction rate* (%)	Reaction force
No reinforcement (kN)		456.5	0	-
Reinforcement with pre-comp. load (kN)	0	420.2	8	76.6
	100	378.7	17	128.4
	200	335.8	26	212.3
	300	290.7	36	297.4

* Reduction rate (%) = {1-(Reaction force of pre-comp.) / (Reaction force of no reinforcement)} × 100



(a) Thickness of the Upper Weathered Soil



(b) Ground Conditions around Micropile Tips

Fig. 13. Reaction Forces of Existing Piles in the Case of a Three-Floor Extension

5.2 토사층 두께 및 선단지지 지층조건

토사층 두께 및 선단지지 지층조건이 기존말뚝에 발생하는 반력에 미치는 영향을 파악하고자 토사층 두께를 10 m, 15 m, 20 m로 증가시켜 수치해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 13(a)에 도시하였다. 토사층 두께가 5 m씩 증가할수록 기존말뚝 반력의 크기는 평균 30 kN씩 증가하였으나 이는 토사층의 무게가 합산된 것으로 분석된다. 그러므로 토사층이 두꺼운 조건에서 얇은 조건과 같은 반력을 얻기 위해서는 더 큰 선압축 하중을 가압해야 하는 것으로 판단된다. 따라서 토사층 10 m에서 선압축 하중 100 kN을 가했을 경우의 반력을 얻기 위해서 토사층 15 m에서는 약 200 kN, 토사층 20 m에서는 약 300 kN을 가압해야 했다.

한편, 선단지지 지층조건을 풍화토 근입, 풍화암 근입, 풍화암 2 m 추가근입으로 구분하고 수치해석을 수행한 결과를 Fig. 13(b)에 도시하였다. 풍화토 근입조건과 풍화암 근입조건은 모두 선압축 하중크기가 증가할수록 기존말뚝의 반력이 22~51 kN씩 감소하여 하중분담 효과가 나타났다. 선압축 하중을 300 kN 가하였을 때 풍화암 근입조건과 풍화암 2 m 추가 근입조건은 15 kN의 차이가 발생하였으나 풍화토 근입조건과 풍화암 근입조건은 59 kN로 4배에 가까운 차이가 발생하였다. 또한, 풍화토 근입조건에서 풍화암 근입조건의 선압축 하중을 100 kN 가했을 경우와 동일한 반력을

얻기 위해서는 선압축 하중 200 kN정도를 추가로 가압해야 했다.

파라미터에 따른 기존말뚝의 반력결과를 정량적으로 분석하고자 저감률을 산정하여 Table 7에 나타내었다. 토사층 두께에 따른 기존말뚝 저감을 검토결과 토사층 10 m에서는 41 %, 15 m에서는 38 %, 20 m에서는 34 %로 나타나 토사층 두께 5 m 증가에 따라 저감률이 3~4 % 감소하였다.

선압축 보강마이크로파일의 선단부가 지지하는 지층조건에 따른 기존말뚝 저감을 산정결과 풍화토 근입(W.soil)의 경우 저감률이 최대 24 %까지 나타났지만, 풍화암에 근입(W.rock)하게 되면 최대 38 %까지 나타나 14 %의 차이가 발생하였다. 풍화암 2 m 추가 근입(W.rock (+2 m))의 경우에는 42 %의 저감률을 나타내어 풍화암 근입조건과 4 %의 차이가 발생하였다. 이는 보강마이크로파일의 근입길이보다 근입지층 조건이 기존말뚝 하중분배에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 확인되었다.

6. 결론

본 연구에서는 선압축 보강마이크로파일의 하중 가압 및 정착 장치의 구조적 안정성을 검토하고자 실내실험을 진행하였고, 지반 해석 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 선압축 하중

Table 7. Reaction Forces and Reduction Rate of Existing Piles by Parameter

Parameter			No reinforcement	Reinforcement with pre-comp. load (kN)			
				0	100	200	300
Thickness of w. soil	10 m	Existing pile (kN)	391.3	364.8	323.0	278.8	231.4
		Reduction rate (%)	0	7	18	29	41
	15 m	Existing pile (kN)	422.8	395.1	349.4	306.8	261.3
		Reduction rate (%)	0	6	17	27	38
	20 m	Existing pile (kN)	452.0	423.4	383.3	341.4	297.1
		Reduction rate (%)	0	6	15	24	34
Embedded	w. soil	Existing pile (kN)	422.8	413.5	391.1	361.3	320.4
		Reduction rate (%)	0	2	8	15	24
	w. rock	Existing pile (kN)	422.8	395.1	349.4	306.8	261.3
		Reduction rate (%)	0	6	17	27	38
	w. rock (+2 m)	Existing pile (kN)	422.8	382.7	336.8	291.8	246.9
		Reduction rate (%)	0	9	20	31	42

크기, 토사층 두께, 선단부 지지조건 3개를 파라미터로 하여 파라메트릭 해석을 수행하여 하중분배를 통한 구조물 기초의 보강효과를 확인하였다. 실내실험과 수치해석에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구를 통해 개발된 선압축 보강마이크로파일 가압 및 정착 장치에 대한 적용성을 확인하기 위하여 수행한 실내 재하시험 결과 직경별로 마이크로파일 재료에 대한 탄성한계인 543-688 kN까지 가압이 가능한 것으로 확인되어 수치해석에 적용된 선압축 하중 300 kN은 적절한 것으로 판단된다.
- (2) 압축시험 결과 정착콘과 웨지에 발생하는 최대변형률은 항복변형률 대비 강봉직경 55 mm일 때 0.26, 0.29배, 강봉직경 65 mm일 때 0.61, 0.63배로 안정적인 정착을 보이고 있다. 정착시험 결과 웨지와 콘크리트 사이의 변위는 안정적인 정착력으로 각각 0.11 mm, -0.08 mm의 슬립이 측정되어 웨지와 구속 콘크리트 사이에서 슬립은 거의 발생하지 않는 것으로 나타났고, 시험종료까지 슬립으로 인한 마이크로파일의 변형을 저하는 나타나지 않았다.
- (3) 수치해석을 통한 구조물 보강효과 민감도 분석결과, 선압축 하중 크기가 증가할수록 기존말뚝에 작용하는 하중이 최대 36 % 감소하는 하중분담 효과가 나타났다. 한편 기존말뚝의 반력 감소량보다 보강마이크로파일의 반력 증가량이 더 큰 것으로 나타났는데 이는 선압축 하중의 일부가 더해진 것으로 판단된다. 또한, 기존의 마이크로파일 공법과 비교하였을 때 기존말뚝에 작용하는 반력이 28 % 감소하여 선압축 보강마이크로파일은 구조물의 보강에 도움을 주는 것으로 나타났다.
- (4) 토사층 두께, 선단지지조건이 기존말뚝 반력에 미치는 영향을 확인하고자 파라메트릭 해석을 수행하였다. 그 결과, 토사층의

두께가 두꺼울수록 기존말뚝의 반력 크기를 증가시켜 5 m당 약 30 kN의 차이가 나타났고, 보강마이크로파일 선단부를 단단한 지반에 지지하면 토사 지지시 보다 저감률이 14 %까지 증가하는 것으로 나타났다.

- (5) 본 해석은 마이크로파일의 천공과정시 발생하는 슬라임이 충분히 제거되고 지지층에 확고히 근착되었다는 전제조건에서 수행하였다. 따라서 시공시 선압축에 대한 효과를 충분히 발휘하기 위해 슬라임 처리를 철저히 하여 마이크로파일 선단부가 지지층에 근착될 수 있도록 하여야 할 것이다.

종합적으로 마이크로파일에 가하는 선압축 하중의 크기가 증가할수록 하중분담율이 증가하며 기존말뚝에 작용하는 하중이 약 30 % 경감되는 것으로 분석되었다. 다만 지층의 분포 특성, 마이크로파일의 길이, 선단지지 조건 등을 종합적으로 고려하여 가압력을 결정해야 할 것으로 사료된다.

또한, 향후 마이크로파일의 주면마찰력을 고려한 수치해석을 위해 지반과 말뚝의 인터페이스 요소를 반영한 검토를 진행할 예정이며, 실험형 현장시험을 통해 선압축에 대한 하중분담 효과를 확인하고, 수치해석을 통해 비교·검증하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 ‘리모델링시 하중배분 기초보강용 프리컴프레션 마이크로파일 제품의 개발(S2973921)’ 과제의 일환으로 2020년도 중소벤처기업부 구매조건부 신제품 개발사업의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

본 논문은 2021 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Cole, K. W. (1993). *Underpinning and retention*, Springer, Boston, USA, pp. 61-83.
- Federal Highway Administration (FHWA) (2005). *Micropile design and construction*, Reference Manual for NHI Course, pp. 436.
- Hwang, T. H., Moon, 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 (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2014). *Development of pre-loading method for reinforcement piles of apartment remodeling*, Technical Report, pp. 1000 (in Korean).
- Korea Land and Housing Corporation (LH) (1990). *Land quality survey report for housing site development project in Goyang and Ilsan*, Technical Report, pp. 455 (in Korean).
- Lee, G. H., Moon, S. J., Kwon, S. C. and You, K. H. (2021a). "Site applicability study of precompression micropile for 1st new town." *The Annual Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, Kim Dae Jung Convention Center, pp. 419-420 (in Korean).
- Lee, G. H., Lim, H. S., Bae, J., Park, Y. C., You, K. H. (2021b). "Applicability study of precompression micropile for foundation reinforcement by numerical analysis." *The Annual Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, Kim Dae Jung Convention Center, pp. 663-664 (in Korean).
- Lee, T. H. and Lim, 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*, KSCE, Vol. 22, No. 5, pp. 69-81 (in Korean).
- Midas, G. (2019). *GTS NX user manual*, MIDAS Information Technology Corporation Ltd., Seongnam (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). *Structural standards for remodeling with vertical extension*, Housing Act, pp. 14.
- Ministry of SMEs and Startups (MSS) (2021). *Development of a precompression micropile product for foundation reinforcement of load distribution during remodeling*, Technical Report, pp. 175.
- O'Neil, M. W. and Pierry, R. F. (1989). "Behaviour of mini-grouted piles used in foundation underpinning in Beaumont clay." *Proceeding of the International Conference Piling and Deep Foundation*, Houston, Texas, USA, pp. 101-109.