

현장시험을 통한 파형 마이크로파일의 시공성 및 거동 평가

A Field Study on the Constructability and Performance Evaluation of Waveform Micropile

장 영 은¹ Jang, Young-Eun

한 진 태² Han, Jin-Tae

Abstract

Waveform micropile is an advanced construction method that combined the concept of conventional micropile with jet grouting method. This new form of micropile was developed to improve frictional resistance, which consequently leads to achieving higher bearing capacity and cost efficiency. Two field tests were conducted to examine the field applicability as well as to verify the effects of bearing capacity enhancement. In particular, waveform micropile construction using jet grouting method was performed to evaluate the viability of waveform micropile installation. After testing, the surrounding ground was excavated to check the accomplishment on the shape of waveform micropile. The result showed that waveform micropile can be installed by adjusting the grouting time and pressure. In the loading tests, waveform micropile's bearing capacity increased by 1.4 to 2.3 times depending on their shapes when compared with conventional micropile. Overall results clearly demonstrated that waveform micropile is an enhanced construction method that can improve bearing capacity.

요 지

파형 마이크로파일은 기존 마이크로파일과 제트 그라우팅 공법을 접목하여 그라우트체를 파형의 형상으로 시공하는 공법으로, 파형 구근에 의한 마찰저항 성능을 높여 마이크로파일의 지지력 및 경제성을 개선하기 위해 개발되었다. 본 연구에서는 파형 마이크로파일의 시공 타당성 및 지지성능 개선 효과를 검증하기 위해 총 2회의 현장시험을 수행하였다. 파형 마이크로파일의 시공성 분석을 위해 제트 그라우팅 공법을 활용하여 시간 및 압력 조절을 통한 파형 그라우트 형성 실험을 수행하고 지중 말뚝 굴착을 통해 파형 형성 여부를 확인하였다. 확인 결과, 제트 그라우팅의 압력 및 시간 조절을 통해 파형 마이크로파일의 요구 형상을 적절히 시공할 수 있는 것을 확인하였으며, 하중재하시험 결과에서는 전단키가 없는 마이크로파일과 비교해 파형 마이크로파일의 지지력이 형상에 따라 1.4 배에서 2.3배까지 증가해 파형 마이크로파일의 지지력 개선효과가 우수한 것으로 나타났다.

Keywords : Micropile, Waveform micropile, Jet grouting method, Field test, Load-settlement characteristics

1 정회원, 과학기술연합대학원대학교 지반신공간공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Geospace Engrg., Univ. of Science & Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원, UST 부교수 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0259, Fax: +82-31-910-0563, jimmyhan@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 개 요

마이크로파일은 1950년대 Italy에서 처음 소개 된 이후 현재까지 협소한 공간으로의 접근성과 시공성이 우수해 기존 구조물의 지지력 보강 및 침하억제 등을 위한 목적으로 다양하게 활용되고 있다. 마이크로파일은 100mm ~300mm 사이의 직경을 갖는 소구경 말뚝으로 지반 천공 후 고강도 보강재를 설치하고 공내에 그라우트를 주입하여 시공한다. 마이크로파일에 가해지는 외부 하중은 보강재와 그라우트체를 통해 지반으로 전달되고, 그라우트와 지반 사이의 부착력에 의해 지지력을 발휘하게 된다.

마이크로파일 설계시에는 일반적으로 소구경으로 인해 선단지지력의 영향을 고려하지 않는다(FHWA, 2005). 또한 상대적으로 연약한 상부 토사층에서의 지지력을 무시하고 풍화토 및 연암층에 관입된 말뚝의 주면마찰력을 지지력으로 고려하는데, 이러한 설계 방식은 요구 지지력 확보를 위한 말뚝의 길이를 증가시켜 경제성을 악화시키는 원인으로 작용하게 된다. 따라서 마이크로파일의 성능 개선을 통해 지지력 및 경제성을 증대시키기 위한 다양한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다.

기존 연구에서는 여러 연구자들에 의해 마이크로파일의 시공조건을 고려한 설계 방안(Misra et al., 2004; Seo et al., 2013; Abd Elaziz and El Nagggar, 2014) 및 시공방법과 구조재 개량을 통한 마이크로파일의 지지력

개선방안(Sabatini et al., 1999; Juran et al., 2001; Gomez et al., 2003; You et al., 2003; Sadek and Isam, 2004; Tsukade et al., 2006)이 제안되어 왔다. 또한 마이크로파일의 설계 및 시공 방법 개선을 통해 말뚝의 지지성을 개선하기 위한 현장시험 및 수치해석 연구(Jeon, 2004; Han and Ye, 2006; Huang et al., 2007; Valentino and Stevanoni, 2010)가 수행되었다. 그 중 Han et al.(2013)은 기존 마이크로파일의 지지성능 개선을 위한 목적으로 제트 그라우팅(jet-grouting)공법을 접목한 파형 마이크로파일을 제안한바 있다.

파형 마이크로파일은 일반적으로 토사층 하부 정착 길이에 대한 그라우트와 지반의 마찰력을 지지력으로 고려하는 기존 마이크로파일과 달리, 토사층에서의 추가적인 마찰력 발현을 통해 말뚝의 지지력 및 경제성을 개선하고자 개발되었다. Fig. 1의 (a)와 (b)는 기존 마이크로파일과 파형 마이크로파일의 일반적인 형태 및 지지력 발현 특성을 보여준다. 파형 마이크로파일은 기존 마이크로파일의 케이싱을 제거하는 대신 토사층에서의 그라우트체 일부를 Fig. 1의 (b)와 같이 파형의 형상으로 시공함으로써 토사층에서의 지지력이 극대화 되도록 하였다. Martin and DeStephen(1983), Cai et al.(2006), Qian et al.(2015) 등의 연구에 따르면 말뚝체의 일부분이 확대 시공된 현장타설 말뚝에서 연직 지지력 및 인발 저항력이 증가하는 것으로 나타났는데, 파형 마이크로파일 또한 토사층에서의 주면마찰력 뿐 아니라 파형을 구성하는 전단키와 지반 사이에서의 추가적인 저항력을 통해 지지력이 증대함을 수치해석 및 실내실험을 통해 확인한바 있다.

파형 마이크로파일의 형상은 Fig. 1의 (b)와 같이 파형을 이루는 전단키의 직경 D_1 과 전단키가 없는 부분의 직경 D_2 로 구성된다. 또한 파형의 형상은 각 전단키를 이루는 길이 L 와 전단키간의 간격 S 에 의해 결정되는데, Han et al.(2013), Jang and Han(2015)등에 따르면 전단키의 형상이 파형 마이크로파일의 하중지지 특성을 결정하는 주요 인자로 작용하는 것으로 나타났다.

파형 마이크로파일은 기존의 마이크로파일과 제트 그라우팅 공법을 접목하여 시공할 수 있다. 제트 그라우팅 공법은 그라우트 배합비, 분사압 및 시간등의 조절을 통해 지중에 그라우트체를 형성시키는 기술로써, 지반 보강 및 차수, 지반 굴착, 터널 보강 등을 위한 다양한 범위 및 지반조건에 활용이 가능하다(Bell, 1993; Covil and Skinner, 1994). 특히 제트 그라우팅 공법이 지반 강

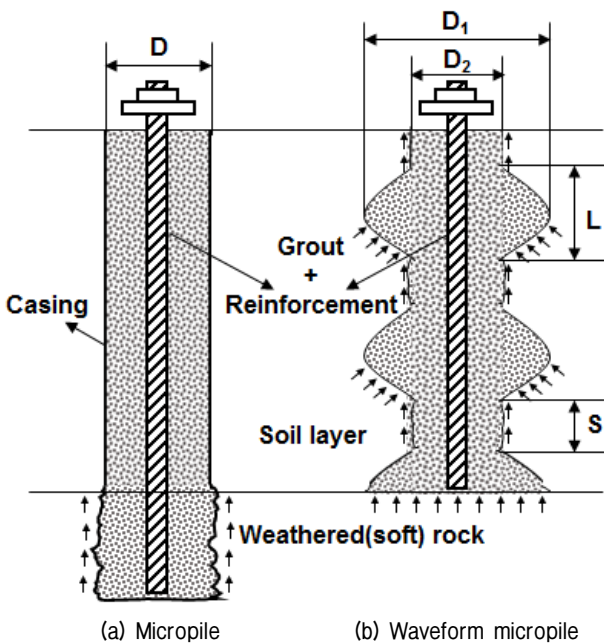


Fig. 1. Schematics of micropiles

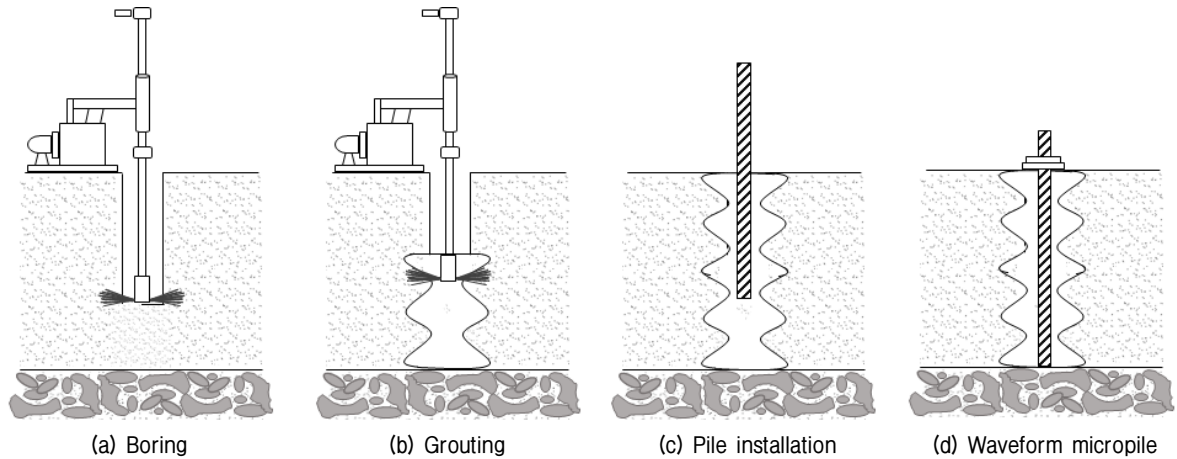


Fig. 2. Construction process of waveform micropile

도 증진에도 효과적으로 작용하는 점을 활용하여, 토사층 내에서의 추가적인 지지력 발현이 가능한 파형 형상의 그라우트체를 시공하고자 하였다.

파형 마이크로파일은 Fig. 2와 같이 (a) 천공수를 활용한 지반 천공, (b) 그라우트 시간 및 분사압 조절을 통한 파형의 그라우트체 형성 및 (c) 보강재 삽입 등의 과정을 통해 시공할 수 있다. 본 공법은 기존의 마이크로파일 시공시 수행되는 공벽 유지를 위한 케이싱 삽입 및 인발 과정의 생략을 통한 시공 절차와 시간을 간소화하였다.

파형 마이크로파일에 대한 기존 연구는 현장에서 검증되지 못했다는 단점이 있어, 본 연구에서는 파형 마이크로파일의 현장 시공성 및 지지력 증대 효과를 검토하기 위한 목적으로 현장시험을 수행하였다. 이를 위해 두 차례에 걸쳐 수행된 현장시험을 결과를 바탕으로 파형 마이크로파일의 시공절차 및 시공성을 평가하였고, 파형 마이크로파일을 포함한 세 종류의 시험말뚝을 대상으로 재하시험을 수행하여 파형 마이크로파일의 거동 특성을 분석하였다.

2. 1차 현장시험

1차 현장시험에서는 파형 마이크로파일의 현장 시공성 평가를 위한 시험시공을 실시하였다. 또한 일반 마이크로파일, 전단키를 갖지 않는 파형 마이크로파일(이하, 제트 그라우팅 마이크로파일) 및 파형 마이크로파일에 대한 하중재하 시험을 수행하고, 각 말뚝의 압축 인발 저항성능을 비교하였다.

2.1 시험조건

현장시험부지의 지반 특성을 조사하기 위해 시험 위치에 대한 표준관입시험(SPT) 시험을 실시하였다. 조사 결과 지반은 Fig. 3과 같이 상부 1.8m까지의 자갈 섞인 모래로 이루어진 충적토, 8m~10m 구간은 실트 및 자갈 섞인 모래를 포함하는 풍화토 그리고 10m 이후로는 풍화암층으로 구성된 것으로 나타났다. 또한 심도 9m 하부로는 N값의 범위가 50/24~50/10에 해당하는 매우 단단한 지층이 분포되어 있는 것을 확인하였다.

시험말뚝은 일반 마이크로파일(MP), 제트 그라우팅 마이크로파일(JP) 및 파형 마이크로파일(WM1, WM2)을 시공하고, 시험시공 및 재하시험을 통해 파형 마이크로파일의 시공성과 지지력 증대 효과를 평가하였다. 각 말뚝에는 50mm 이형 강봉($f_y = 982 \text{ kN}$) 보강재를 사용하

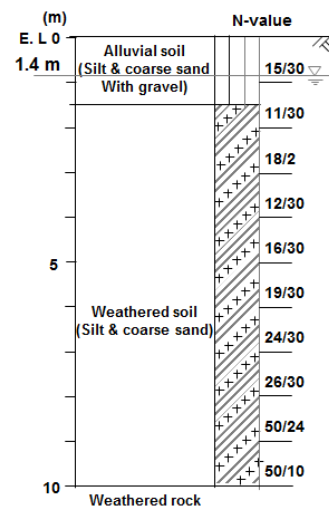


Fig. 3. SPT-N values (1st test)

였으며, Fig. 4와 같이 전체 직경 D는 일반 마이크로파일 이 200mm, 제트 그라우팅 마이크로파일 이 300mm이고, 파형 마이크로파일의 말뚝 직경 D₂와 전단키 부근의 직경 D₁은 각 300mm 및 500mm이다. 파형 마이크로파일의 경우에는 전단키의 길이 L이 D₁으로 동일하고, 간격 S는 각 D₁과 2D₁을 갖는 두 종류의 말뚝을 대상으로 파형의 형상에 따른 거동특성을 평가하였다. 여기서 파형의 형상은 Han et al.(2013)이 다양한 형상의 파형 마이크로파일을 대상으로 수행한 수치해석 연구에서 동일한 하중에 대해 가장 뚜렷한 변위 억제 효과를 나타낸 두 모델의 형상을 참고하여 결정하였다. 제트 그라우팅 마이크로파일은 파형 마이크로파일과 직경(300mm) 및 시공 방법이 동일하지만 전단키가 없는 말뚝을 의미하는데, 추후 파형 마이크로파일과의 지지력 비교를 통해 파형을 이루는 전단키의 지지력 분담정도를 평가하기 위해 시공하였다.

본 시험에서는 Fig. 4와 같이 일반 마이크로파일을 풍화암 상단에 거치되도록 9m로 시공하고, 제트 그라우팅 마이크로파일 및 파형 마이크로파일은 토사층에서의 마찰저항력 증대 효과를 고려하여 약 6m 길이로 시공하였다. 각 말뚝의 지지력을 FHWA(2005)의 마이크로파일 설계 지지력 식 (1)을 통해 검토하였다.

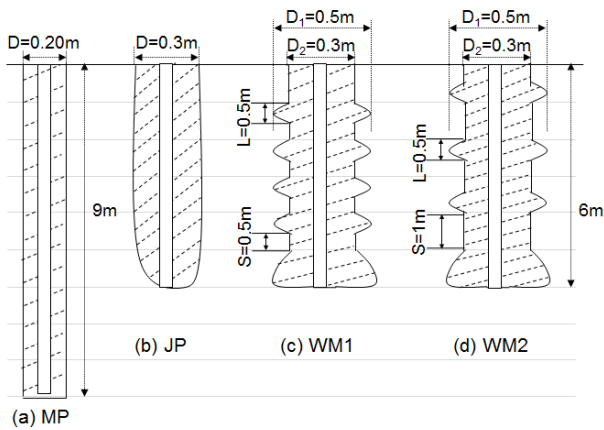


Fig. 4. Micropiles for the loading test (1st test)

Table 1. Test program for 1st field test

Pile	Depth (m)	D ₂ (mm)	Shear key shape (mm)			Design load (kN)	Loading test		
			D ₁	L	S		Compression	Pull-out	
(a)	MP	9	200	-	-	540.0	✓		
(b)	JP	6	300	-	-	520.3		✓	
(c)	WM1			500	D ₁	D ₁	> 520.3	✓	✓
(d)	WM2				D ₁	2D ₁		✓	✓

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

여기서, α_{bond} 는 그라우트체와 지반의 부착력, D_b 는 말뚝의 직경, L_b 는 말뚝 정착부의 길이, FS는 안전율이다. FHWA(2005)에서는 중력식 그라우팅, 가압식 그라우팅 및 압력 재주입(re-injection) 그라우팅 등의 다양한 그라우팅 공법과 지반의 특성을 고려할 수 있도록 α_{bond} 값의 범위를 제시하고 있다. 본 논문에서는 1차 시험 조건을 고려하여 실트질 사질토 지반에 중력식 그라우트로 시공된 일반 마이크로파일의 해당 범위 95kPa~215kPa과, 가압식 그라우트로 시공된 제트 그라우팅 마이크로파일을 의미하는 120kPa~360kPa 범위 중 각 지층별 강도에 부합하는 부착강도를 활용하였다.

지지력 계산시에는 일반 마이크로파일의 경우 케이싱이 없으므로 근입 깊이를 전체를 지지층으로 고려하였으며, 파형의 형상을 고려한 설계 방안이 도출되지 않은 파형 마이크로파일의 지지력은 말뚝체의 직경이 동일한 제트 그라우팅 마이크로파일과 동일하다고 가정하였다. 안전율 2.0을 적용하여 일반 마이크로파일의 허용 지지력 540.0kN, 제트 그라우팅 마이크로파일과 파형 마이크로파일의 허용 지지력 520.3kN을 산정하고, 일반 마이크로파일에 비해 길이가 감소한 제트 그라우팅 마이크로파일과 파형 마이크로파일의 지지력이 일반 마이크로파일과 유사한 것을 확인하였다. Table 1은 1차 현장시험의 시험조건을 보여주고 있다.

또한 FHWA(2005)의 제안식을 바탕으로 구조안정성 검토를 위한 말뚝의 극한압축하중(식 (2)) 및 극한인장하중(식 (3))을 산정하였다.

$$P_{ult-compression} = [0.85f'_{c-grout} \times A_{grout} + f_{y-casing} \times A_{casing} + f_{y-bar} \times A_{bar}] \quad (2)$$

$$P_{ult-tension} = [f_{y-casing} \times A_{casing} + f_{y-bar} \times A_{bar}] \quad (3)$$

여기서, $f_{y-casing}$, f_{y-bar} 는 각 그라우트, 케이싱, 강봉의 강도, A_{grout} , A_{casing} , A_{bar} 는 그라우트, 케이싱 및 강봉의 단면적이다. 본 실험에서는 케이싱을 사용하지 않았으므로, 계산시 케이싱에 대한 영향은 고려하지 않았다.

산정결과 일반 마이크로파일의 경우 극한 압축하중과 인장하중이 각 1,600kN, 1,000kN으로 나타났으며, 제트 그라우팅 마이크로파일의 경우 일반 마이크로파일의 1.5배에 해당하는 2,400kN의 압축하중 및 1,000kN의 인장하중을 갖는 것을 확인하였다. 또한 파형 마이크로파일의 경우 설계 지지력 산정 방법과 동일하게 제트 그라우팅 마이크로파일과 동일한 구조강도를 갖는다고 가정하였으며, 실제로는 전단키의 영향으로 지지력 및 구조안정성 모두 증가할 것으로 예상하였다. 압축재하 시험을 위한 반력말뚝은 일반 마이크로파일과 동일한 조건으로 지지력 및 시공깊이를 결정하였고, 시험말뚝 1본당 4본씩의 반력말뚝을 배치하였다.

Fig. 5는 파형 마이크로파일의 시험시공 및 성능검토 수행을 위한 시험말뚝 6본(압축 3본, 인발 3본)과 반력말뚝의 시공 위치를 나타낸다. 각 시험말뚝은 간섭효과 방지를 위해 파형 마이크로파일 최대 직경(500mm)의 6배에 해당하는 3m 간격으로 충분히 이격하였고, 시험말뚝과 반력말뚝의 거리는 말뚝직경의 4배 이상인 2.1m 간격으로 시공하였다. 또한 배치도상에 표시된 말뚝 외에 길이 약 3m의 파형 마이크로파일 두 본을 추가적으로 시공하고, 시험 시공 완료 후에 지반 굴착을 통해 파형 그라우트체 형성 결과를 확인하였다.

2.2 시험결과

2.2.1 시공성 평가

파형 마이크로파일은 천공장비의 그라우트 분사압을 약 40MPa로 고정하고, 천공 비트의 인발 시간 조절을

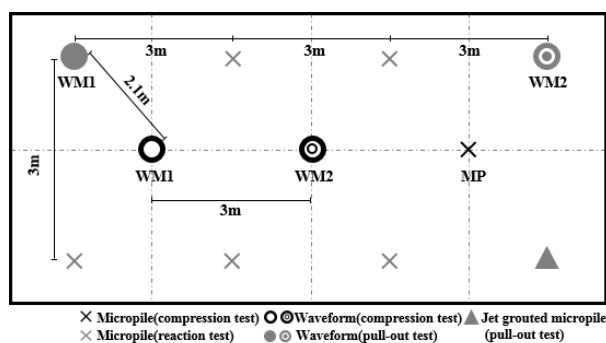


Fig. 5. Testing piles layout (1st test)

통해 직경 300mm 및 500mm로 이루어진 파형의 구근이 형성 되도록 하였다. Fig. 6은 본 시험에서 수행한 지반 천공, 파형 구근 형성 및 보강재 삽입 등으로 이루어진 파형 마이크로파일의 시공과정을 보여준다.

모든 시험말뚝 및 반력말뚝의 시공을 완료한 후에는 파형 그라우트체 형성결과 확인을 위해 별도로 시공한 말뚝 두 본 및 시험말뚝에 대한 굴착 작업을 수행하였다. 그 결과 시험체가 Fig. 7과 같이 목표로 했던 파형의 형상을 잘 반영하고 있는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과를 통해 파형 마이크로파일은 제트 그라우팅의 압력 및 시간을 조절을 통해 시공이 가능한 것을 확인하였다. 또한 시험시공시 각 말뚝별 시공속도를 비교한 결과 파형 마이크로파일의 시공이 일반 마이크로파일 시공에



(a) Ground boring

(b) Grouting



(c) Inserting a reinforcement

(d) Installation complete

Fig. 6. Field installation procedure of the waveform micropile



(a) Site excavation

(b) Extraction of the waveform micropile from ground

Fig. 7. View of the waveform micropile shaft

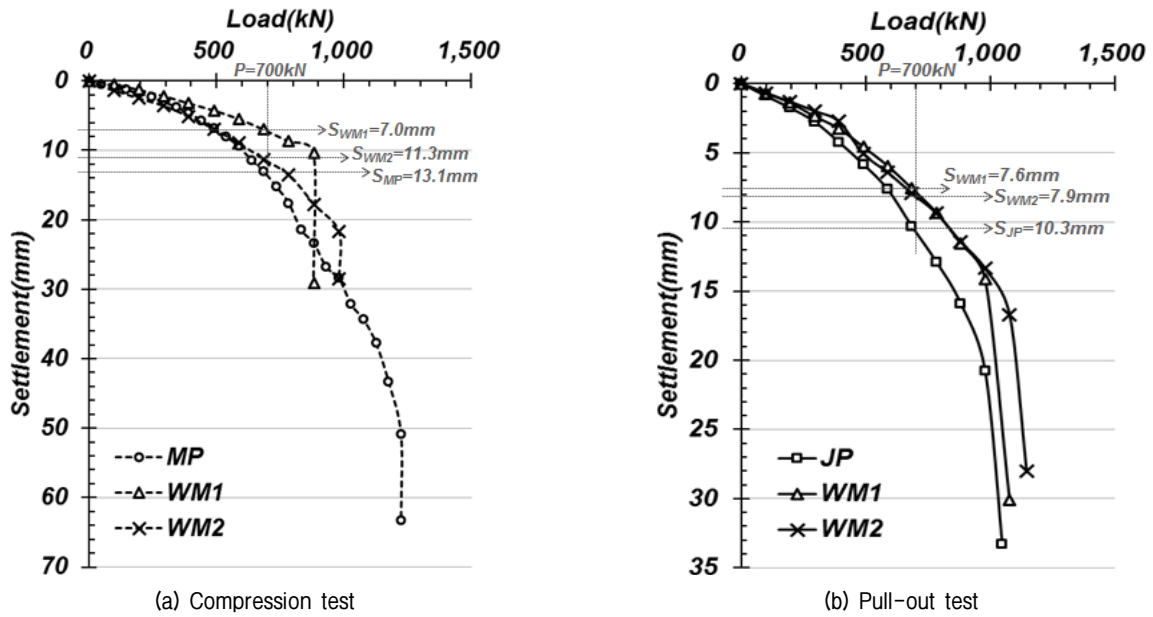


Fig. 8. Loading test results (1st test)

비해 약 30% 정도 단축되는 것으로 나타났다. 이와 같이 시공 시간에 차이가 나타난 이유는 일반 마이크로파일 시공시 요구되는 케이싱 설치 및 암반 천공 등과 같은 과정이 파형 마이크로파일 시공시에는 생략되었기 때문이다.

2.2.2 재하시험 결과

시험시공을 완료 후에는 28일 이상의 그라우트 양생 기간을 거쳐 재하시험을 수행하였으며, 시험 결과를 바탕으로 파형 마이크로파일의 하중-변위 거동을 분석하였다. 시험은 정재하시험기준 ASTM D 1143-81, KS F 2445를 참고하여 일반 마이크로파일(MP), 파형 마이크로파일 1(WM1) 및 파형 마이크로파일 2(WM2)에 대해 수행하였으며, 100kN의 하중을 단계적으로 재하하며 말뚝의 항복이 나타날 때까지 시험을 지속하였다. 또한 압축재하시험이 완료된 이후에는 제트 그라우팅 마이크로파일과 두 종류의 파형 마이크로파일에 대한 인발재하시험을 수행하고, 로드셀과 변위계를 통해 기록된 하중-변위 파형 구간 형성에 따른 말뚝의 인발 저항력 증대효과를 살펴보았다.

재하시험을 통해 Fig. 8과 같이 (a)압축재하시험 및 (b)인발재하시험으로부터 하중-변위 곡선을 도출하였다. 압축재하시험시의 일반 마이크로파일(MP), 파형 마이크로파일 1(WM1) 및 파형 마이크로파일 2(WM2)의 최대 재하하중은 각 1,225kN, 882kN, 980kN이었으며, 최



Fig. 9. Buckling shape of reinforcing steel bar

종 변위는 63.4mm, 29.1mm 및 24.5mm였다. 재하시험 도중 파형 마이크로파일 WM1과 WM2에서는 약 90kN ~100kN 사이의 하중에서 급격한 변위가 발생하여, 시험을 종료하고 시험 말뚝의 상태를 확인한 결과 Fig. 9와 같이 재하 하중에 의해 상부에 노출된 강봉이 좌굴된 것을 볼 수 있었다.

Fig. 8(a)에 도시한 하중-침하 곡선에서 강봉 좌굴이 발생하기 전까지의 초기 구간에서는 파형 마이크로파일의 지지력이 일반 마이크로파일에 비해 증가하였음을 확인하였다. 또한 파형을 구성하는 전단키의 간격이 상대적으로 좁은 WM1 모델의 지지력이 우세하게 나타났다. Fig. 8(b)에 도시한 제트 그라우팅 마이크로파일(JP)과 두 파형 마이크로파일(WM1, WM2) 모델에 대해 수행된 인발재하시험결과에서도 제트 그라우팅 말뚝에

비해서 파형 마이크로파일의 인발 저항력이 증가하였음을 확인하였다. 파형 마이크로파일 WM1과 WM2 모델은 유사한 인발저항 거동을 보여, 압축 지지력에 비해 파형 형상이 인발력 증가에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되었다.

시험 말뚝이 좌굴되어 극한 하중의 평가가 어렵다고 판단되었음에 따라 강봉 좌굴 이전의 초기 재하구간을 대상으로 말뚝별 지지력을 검토하고자 약 700kN을 설계 지지력으로 가정하고 침하량을 비교하였다. 압축재하 시험결과 MP 모델의 침하량이 13.1mm, WM1 및 WM2의 침하량이 각 7.0mm, 11.3mm로 산정되어, 파형 마이크로파일 WM1과 WM2의 침하량이 일반 마이크로파일에 비해 각 46.3%, 13.4%씩 감소한 것으로 나타났다. 인발 재하시험 결과에서는 설계 지지력 700kN에서의 JP, WM1, WM2 말뚝의 침하량이 각 10.3mm, 7.6mm 및 7.9mm으로 나타났으며, WM1과 WM2의 침하량이 JP 말뚝에 비해 각 26.4%, 23.1% 감소하였다. 계산 결과를 통해 일반 마이크로파일에 비해 길이가 30% 정도 감소했음에도 불구하고 파형 마이크로파일의 지지성능이 우수함을 확인하였다.

2.2.3 외삽법을 이용한 하중-침하 곡선 산정

본 연구에서는 파형 마이크로파일의 지지력 증대 효과를 확인하기 위한 재하시험을 수행하였으나, 앞 절에서 기술한 것과 같이 시험 중 파형 마이크로파일의 강봉

이 좌굴되어 직접적인 극한지지력 평가가 불가능하였다. 이에 따라, 본 절에서는 파형 마이크로파일의 하중-침하 곡선에 외삽법을 이용하여 말뚝의 지지력을 검토하였다. 하중재하 시험 결과로부터 말뚝의 거동을 평가하는 것은 이론적인 예측에 비해 높은 신뢰성을 보장하므로, 실험결과로부터 극한지지력의 확보가 어려운 경우에는 하중-침하 곡선을 외삽하여 지지력을 예측하기 위한 시도가 이루어져 왔다(Paikowsky and Tolosko, 1999; Castelli and Maugeri, 2002; Akbas and Kulhawy, 2009; Jung et al., 2009; Zhang and Zhang, 2012). 본 연구에서는 기존의 연구를 통해 현장타설 말뚝의 거동을 잘 반영하는 것으로 알려져 있는 쌍곡선 방법(식 (4))을 활용하여 파형 마이크로파일의 좌굴 이후 거동을 예측하였다.

$$P = \frac{S}{a + bS} \quad (4)$$

여기서, S 는 침하량, P 는 하중, a, b 는 회귀분석으로부터 결정되는 계수이며, a, b 는 말뚝의 침하량(S)과 하중(P)에 대한 비(S/P), 그리고 침하량(S)의 관계로부터 도출한다.

쌍곡선 방법으로 파형 마이크로파일의 하중-침하 곡선을 예측하기에 앞서 쌍곡선 방법이 시험 결과의 경향성을 잘 반영하는지 검토하였다. 이를 위해 일반 마이크로파일(MP)과 파형 마이크로파일 2(WM2)의 시험 결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 a, b 계수를 도출하였

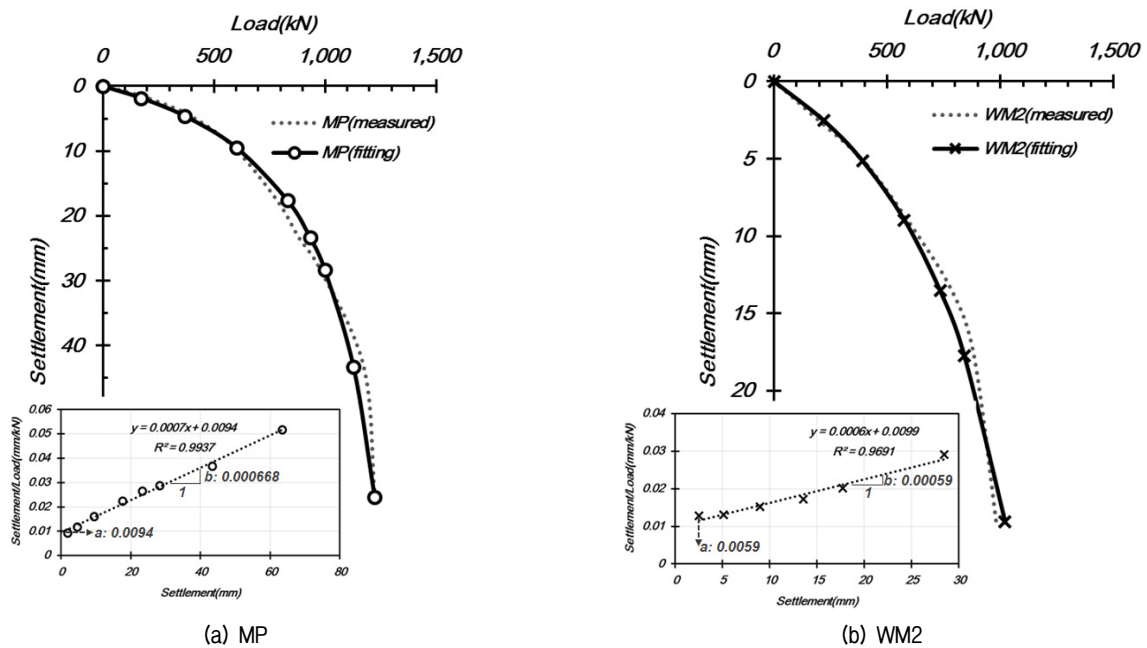


Fig. 10. Hyperbola fitting curves for the test piles, MP & WM2

으며, 계수를 적용하여 하중-변위 곡선을 도출하였다. 분석시 파형 마이크로파일 2(WM2)는 강봉이 좌굴되어 시험이 종료되기 전까지의 결과만이 확보되었다고 가정하였으며, 상대적으로 하중 재하 초기에 파괴가 발생한 WM1 모델은 경향성 검토에서 제외하였다. MP, WM2 모델에 대한 검토 결과 Fig. 10과 같이 쌍곡선 방법이 실제 계측결과와 매우 유사하게 나타나, 파형 마이크로파일의 추가적인 데이터 산정을 위한 외삽 방법으로 적합하다고 판단되었다.

위와 동일한 방법으로 쌍곡선함수를 이용한 외삽을 통해 강봉의 좌굴로 시험이 종료된 파형 마이크로파일 1과 2에 대한 추가적인 하중-침하곡선을 예측하였다. 각 말뚝의 a, b 계수는 강봉이 좌굴되기 전까지의 구간에 대해서 산정하였으며, 두 말뚝 모두에서 0.9 이상의 높은 회귀분석 상관계수(R^2)가 산정되었다.

파형 마이크로파일의 외삽을 위한 최종 변위는 일반 마이크로파일에서 계측된 최종 변위 63.4mm와 동일하게 설정하였으며, 외삽법으로 구해진 각 말뚝의 쌍곡선을 Fig. 11에 도시하였다. 그 결과 파형 마이크로파일의 최종 하중은 WM1과 WM2 모델에서 각 1,500kN 및 1,470kN 이었고, 하중-침하 곡선상의 기울기가 가장 크게 변할 때의 하중을 항복지지력으로 간주하는 P-S 방법을 이용하여 WM1, WM2 모델의 허용 지지력을 549kN 및 490kN 으로 산정하였다. 전체적인 하중-침하 특성을 살펴보면 파형 마이크로파일이 일반 마이크로파일에 비해 우세

한 거동을 보였고, 지지력 또한 일반 마이크로파일(MP)의 허용 지지력 415.5kN과 비교해 증가하였다. 파형 마이크로파일 중에서는 파형 구근을 구성하는 전단키의 간격이 상대적으로 좁게 시공된 WM1 모델에서 가장 큰 지지력이 도출되었다. 그러나 Fig. 11에 도시한 파형 마이크로파일의 외삽 곡선은 말뚝의 최종 변위에 제한을 두고 도출된 것이므로, 실제 말뚝 거동과는 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한 WM1 말뚝의 강봉 좌굴 이전 구간에 대한 하중-침하 곡선의 초기 강성이 나머지 두 말뚝에 비해 증가하였음을 볼 때, 최종 하중단계까지 재하시험이 진행될 경우 WM1 말뚝의 지지력이 더욱 증가할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 2차 현장시험

1차 현장시험에서는 강봉에 좌굴이 발생하여 직접적으로 파형 마이크로파일의 지지력을 평가하기 어려웠기 때문에, 파형 마이크로파일의 지지력 증대 효과에 대한 타당성을 검증하기 위해 추가적으로 2차 현장시험을 수행하였다. 1차 현장시험과 동일한 부지 내에서 일반 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일 및 파형 마이크로파일을 대상으로 압축 재하시험을 실시하고, 시험 결과를 바탕으로 파형 마이크로파일의 거동 특성을 검토하였다.

3.1 시험조건

2차 현장시험은 1차 현장시험 위치로부터 약 700m 이격된 곳에서 수행하였으며, 표준관입시험을 통해 지반의 특성을 조사하였다. Fig. 12와 같이 본 지반은 지표면에서 4.5m까지 자갈 섞인 모래로 구성된 매립층으로 이루어져 있고, 4.5m~7.5m의 퇴적층 역시 자갈 섞인 모래층으로 구성된 것으로 나타났다. 또한 지반의 N치가 상부에서 하부로 갈수록 증가하며, 느슨하거나 중간 조밀한 정도의 다짐도를 가지는 것을 확인하였다. 지중 3m 지점에서는 N치가 50/2로 매우 강하게 나타났지만 이는 지반조사 도중 매립층에 포함된 암석으로 인해 일시적으로 나타난 현상인 것으로 보여진다.

본 시험에서도 1차 시험과 동일하게 일반 마이크로파일(MP), 제트 그라우팅 마이크로파일(JP) 및 파형 마이크로파일(WM)을 대상으로 정재하시험을 수행하여 각 말뚝의 거동을 비교하였다. 파형 마이크로파일은 1차 시

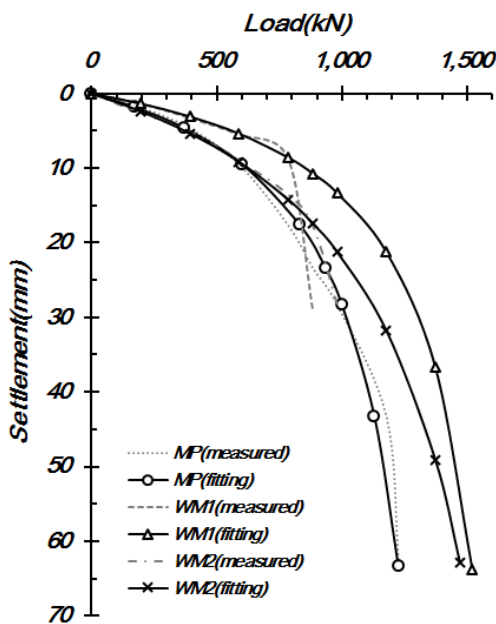


Fig. 11. Load-settlement curve using extrapolation method

험에서 가장 우수한 지지력을 나타낸 WM1 모델과 동일한 1(D₁):1(D₁) 비율의 파형 구근을 갖는 말뚝 한 본만을 시공하였다. 다만 현장에서 파형 구근을 형성하기 위한 제트 그라우팅 공법 시공 용이성을 확인하기 위해 기존 WM1 모델의 전단키 길이와 간격(D₁=500mm)에서 증가한 치수(2D₁=1,000mm)를 적용하였다. 또한 본 실험에서는 Fig. 13과 같이 말뚝을 8m의 동일한 길이로 시공하여 말뚝의 선단부가 N치 50내외인 풍화토 상단에 거치되도록 하였다. Table 2는 2차 현장시험의 시험조건을 보여주고 있다. 2차 시험에서는 말뚝의 충분한 재료강도를 확보하여 시험중 구조체의 파괴를 방지하고 극한 지지력을 도출할 수 있도록 1차 시험과는 달리 63.5mm 이형 강봉($f_y = 1,758kN$)을 보강재로 활용하였다. 각 말뚝의 전체 직경은 일반 마이크로파일인 200mm, 제트 그라우팅 말뚝이 300mm, 그리고 파형 마이크로파일이 각 D₁=500mm, D₂=300mm이다.

FHWA(2005)의 설계 지지력 검토식(식 (1))을 활용하여 구한 시험말뚝의 허용 지지력은 일반 마이크로파일의 경우 320.6kN, 제트 그라우트 파일의 경우 634.7kN

이었다. 파형 마이크로파일의 지지력은 1차 현장시험과 동일하게 제트 그라우팅 마이크로파일과 동일한 지지력을 갖는 것으로 가정하였다. 설계 지지력 산정시 그라우트와 지반의 부착강도(α_{bond})는 1차 현장시험과 동일하게 중력식 그라우트로 시공된 일반 마이크로파일의 해당 범위 95kPa~215kPa, 가압식 그라우트로 시공된 제트 그라우팅 마이크로파일을 의미하는 120kPa~360kPa 범위 중 각 지층별 강도에 부합하는 값을 적용하였다.

또한 압축재하시험을 수행하기 위해 앞서 2.1절에 기술한 식 (2)를 통해 시험 말뚝의 구조 안정성을 검토하였다. 2차 시험에서는 보강재의 직경이 63.5mm로 증가하였으므로 1차 시험에 비해 각 말뚝의 구조안정성 또한 향상되었음을 확인하였고, 극한 지지력을 바탕으로 최대 시험하중을 약 2,000kN으로 결정하였다. 시험말뚝 1본당 4본씩 배치되는 반력말뚝에 대해서도 지지력 및 극한압축하중을 산정하여 반력말뚝 4본이 재하시험 최대하중 2,000kN을 안정적으로 지지할 수 있는 것을 확인하였다.

2차 시험에서는 Fig. 14와 같이 시험말뚝 3본을 파형

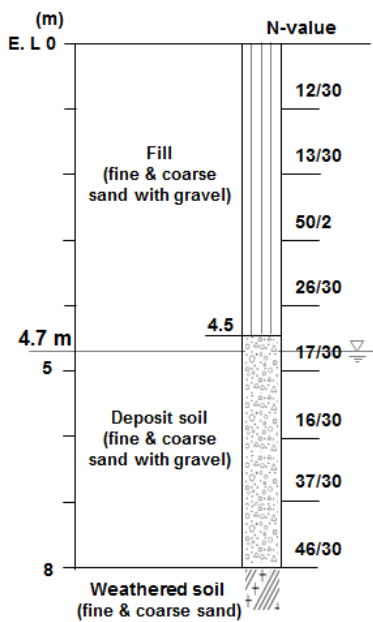


Fig. 12. SPT-N values (2nd test)

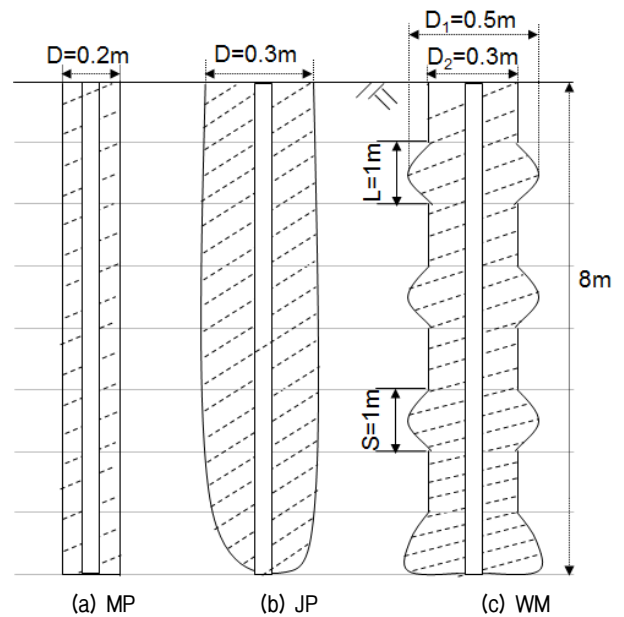


Fig. 13. Test micropiles for the loading test (2nd test)

Table 2. Test program for 2nd field test

Pile	Depth (m)	D ₂ (mm)	Shear key shape (mm)			Design load (kN)	Loading test Compression
			D ₁	L	S		
(a) MP	8	200	-	-	-	320.6	✓
(b) JP		300	-	-	-	634.7	✓
(c) WM		300	500	2D ₁	2D ₁	> 634.7	✓

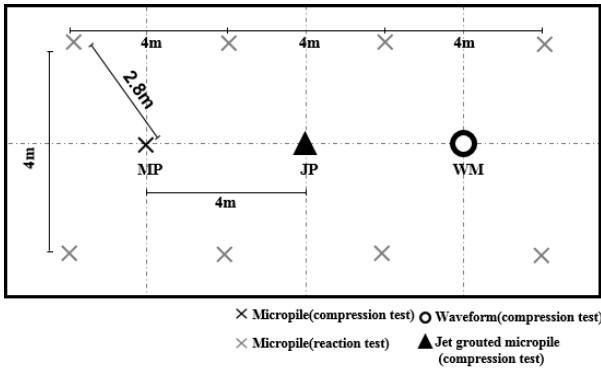


Fig. 14. Testing piles layout (2nd test)

마이크로파일 최대 직경의 8배인 4m 간격으로 배치하였고, 시험말뚝과 반력말뚝은 말뚝 직경의 5배 이상인 2.8m 간격으로 시공하였다. 파형 마이크로파일 시공은 1차 시험시공 절차와 동일하게 지반을 천공한 후 제트 그라우팅 공법을 활용하여 파형 구근을 형성하였다.

재하시험은 시공 후 그라우트의 28일 강도를 기준으로 실시하였으며, 하중 재하는 ASTM D 1143-81을 참고하여 단계적으로 진행하면서 말뚝 상부에 설치된 로드셀과 LVDT를 통해 말뚝의 하중-침하 거동을 측정하였다. 하중단계는 100kN씩 나누어 적용하였고, 각 재하 단계에서의 주기는 최소 5분, 최대 20분으로 하여 각 말뚝의 거동을 측정하였다. 또한 2차 시험에서는 각 말뚝의 축하중전이 측정을 위한 스트레인게이지를 부착하였으나, 이에 대한 분석 결과는 후속 논문에서 다루고자 한다.

3.2 시험결과 분석

3.2.1 재하시험 결과

시험은 일반 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일 그리고 파형 마이크로파일 순서대로 진행하였으며, 시험 종료후 각 말뚝에서의 최대하중과 변위는 각 900kN~31.0mm, 1,400kN~33.9mm 및 1,900kN~35.1mm로 나타났다. Fig. 15의 하중-재하 곡선을 통해 세 종류의 시험말뚝 거동을 살펴본 결과, 재하 하중의 증가에 따라 일반 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일 그리고 파형 마이크로파일 순서로 지지력이 발현되었음을 확인하였다. 특히, 제트 그라우팅 마이크로파일에서 전단키가 추가된 파형 마이크로파일의 지지력이 가장 우수하게 나타났는데, 이를 통해 말뚝에 추가된 전단키가 지지력 증가에 효과적으로 작용한 것을 확인하

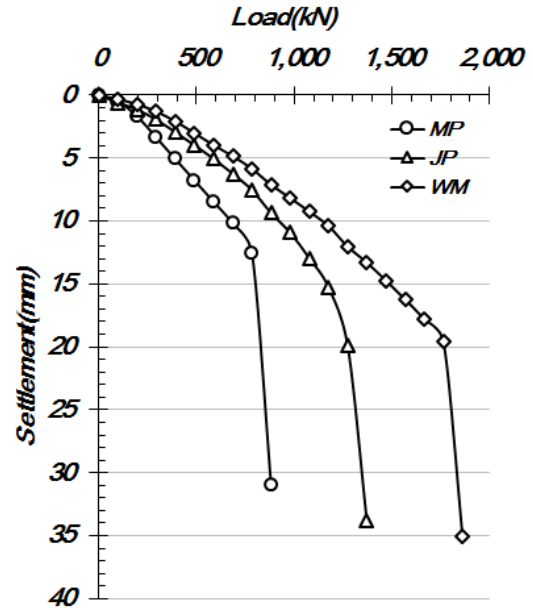


Fig. 15. Load-settlement curve for the test piles (2nd test)

Table 3. Allowable bearing capacities for the test micropiles

Allowable load (kN)	MP	JP	WM
Design bearing capacity	320.6	634.7	
Measured bearing capacity	400	650	900

였다.

각 말뚝의 거동을 상세히 살펴보기 위해 P-S 곡선법을 바탕으로 하중-변위 곡선에서의 최대 변곡점을 항복 지지력으로 결정하고, 안전율 2.0을 적용하여 허용 지지력을 산정하였으며 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 또한 위에서 계산한 각 말뚝의 설계 지지력을 함께 표시하였다.

각 말뚝의 허용지지력은 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일 및 파형 마이크로파일 순으로 나타났으며, 이에 대한 지지력은 400kN, 650kN 그리고 900kN 이었다. 또한 허용 지지력과 설계 지지력이 일반 마이크로파일과 제트 그라우팅 마이크로파일 모두 유사한 범위에서 나타난 것을 볼 수 있었다. 그러나 제트 그라우트 파일의 설계 지지력과 동일하다고 가정한 파형 마이크로파일의 허용 지지력은 설계 지지력에 비해 약 30% 정도 크게 나타나, 파형 마이크로파일의 거동을 합리적으로 반영할 수 있는 설계방안의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

각 말뚝의 허용 지지력을 살펴보면 일반 마이크로파일에 비해 제트 그라우팅 마이크로파일과 파형 마이크로파일의 지지력이 각각 38.5%, 55.6%씩 크게 나타났

다. 본 결과를 통해 파형 마이크로파일의 일반 마이크로파일과 비교해 지지력 증가 및 말뚝의 시공 길이 감소를 통한 경제성 증가에 기여할 수 있음을 확인하였다.

3.2.2 파형 마이크로파일의 선단지지 분담률 산정

일반적으로 말뚝의 지지력(Q_u)은 선단지지력(Q_p)과 주면마찰력(Q_s)에 의해 구성되는데, 마이크로파일의 경우에는 서론에서 기술한 바와 같이 지지력의 대부분을 선단지지력이 아닌 주면마찰력에 의존한다. 그러나 파형 마이크로파일은 지층에서의 전단기 형성을 통한 주면마찰력 증대와 함께 말뚝 선단부에도 전단기를 시공함으로써 말뚝 직경이 확대되어 추가적인 선단지지력이 발현될 수 있도록 하였다.

본 절에서는 2차 시험결과로부터 산정한 파형 마이크로파일의 항복 지지력 중 선단지지력과 주면마찰력의 분담율을 일반 마이크로파일 및 제트 그라우팅 말뚝과 상대적으로 비교하였다. 마이크로파일의 선단지지력은 기존에 제안된 식을 통해 산정하고, 파형 마이크로파일의 설계 방안이 마련되지 않았음을 고려해 현장시험으로부터 구한 전체 지지력과 계산된 선단지지력의 차이를 주면마찰력으로 간주하였다. 지지력 산정 결과를 바탕으로 MP, JP, WM 말뚝에서의 선단지지력 및 주면마찰력 발현 정도에 따른 상대적인 하중분담률을 비교하였다.

말뚝의 지지력 중 선단지지력을 산정하기 위한 대표적인 방법으로는 Janbu(1976), Vesic(1977), Meyerhof(1976), Coyle and Castello(1981) 등의 제안식을 활용할 수 있으며, 본 논문에서는 사질토 지반에서의 지지력 도출을 위한 Meyerhof(1976)의 경험식(식 (5))을 적용하였다.

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq (0.5 P_a N_q^* \tan \phi') A_p \quad (5)$$

여기서, A_p 는 말뚝 선단의 단면적, q' 은 말뚝 선단에서의 유효응력, N_q^* 는 지반 내부마찰각에 의해 결정되는 지지력 계수, P_a 는 대기압(=100kN/m²)이며 ϕ' 는 선단

지반의 내부마찰각이다. 본 논문에서는 2차 현장시험 위치에서 수행한 지반조사 결과를 바탕으로 ϕ' 를 35°로 가정하고, N_q^* 는 120으로 결정하였다.

위의 식을 통해 각 시험말뚝의 극한하중 상태에서의 선단지지력을 산정하고, 이 값과 시험결과를 이용하여 주면마찰력을 계산하였다. 선단지지력과 주면마찰력의 하중 분담정도는 Table 4에 정리하였다. 일반 마이크로파일의 산정 결과를 살펴보면 극한 지지력 800kN 중 선단지지력이 차지하는 비중이 약 16.5%이고, 80% 이상의 지지력의 대부분이 주면 저항에 의해 발현된 것을 볼 수 있다. 일반 마이크로파일과 비교해 큰 직경(300mm)을 갖는 제트 그라우팅 말뚝 또한 극한 지지력 1,300kN 중 약 22.8%의 선단저항이 발현된 것으로 나타났다. 반면 말뚝의 선단부에 전단기가 위치하도록 시공한 파형 마이크로파일에서는 전체 지지력 1,800kN 중 824.9kN의 선단 저항이 발현되어 전체 하중의 45.8%에 해당하는 큰 하중을 선단부에서 지지하는 것으로 나타났다. 분석 결과 통해 파형 마이크로파일의 지지력에 대한 주면마찰력과 선단지지력의 분담율이 일반 마이크로파일과 비교해 상대적으로 높은 것을 볼 때, 파형 마이크로파일은 말뚝의 주면마찰력 증가 뿐만 아니라 선단저항력에 증가로 높은 극한 지지력의 확보에도 유리하게 작용할 것으로 예상된다.

그러나, 본 계산은 각 말뚝별로 상대적인 지지력 분담률을 비교하고자 선단지지력 계산시 기존 이론식을 이용한 것이므로, 추후 2차 시험에 측정된 스트레인 값을 이용하여 각 말뚝별로 정량적인 하중전이를 분석할 예정이다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 기존 마이크로파일의 지지력 및 경제성 증대를 목적으로 개발된 파형 마이크로파일의 현장 시공성 및 거동 특성을 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구의 수행을 위해 파형 마이크로파일

Table 4. Computed end bearing capacity and shaft resistance for the test micropiles

Pile		(1) Ultimate capacity Q_u (kN) (Test result)	(2) Tip resistance Q_p (kN) (Analytical solution)	(1) - (2) Shaft resistance Q_s (kN)	Q_p/Q_u (%)	Q_s/Q_u (%)
(a)	MP	800	132.0	668	16.5	83.5
(b)	JP	1,300	297.0	1,003	22.8	77.2
(c)	WM	1,800	824.9	975.1	45.8	54.2

의 현장 시험시공 및 하중재하시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 파형 마이크로파일의 시공성 검토를 위해 제트 그라우팅 공법을 활용하여 전단기 길이 및 간격비가 1:1인 파형 마이크로파일을 시공하였으며, 시공 후에는 지반 굴착을 통해 파형 그라우트체의 형성 여부를 직접 확인하였다. 시험시공 결과 파형 마이크로파일의 시공 시간이 일반 마이크로파일에 비해 약 30% 감소되는 것을 확인하였으며, 제트 그라우팅의 압력 및 시간의 조절을 통해 파형 마이크로파일의 요구 형상을 적절히 구현할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 파형 마이크로파일의 지지력 증가 정도 분석을 위해 일반 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일, 파형 마이크로파일을 대상으로 하중재하시험을 수행하였다. 그 결과 일반 마이크로파일에 비해 길이가 약 3m 짧게 시공되었음에도 불구하고, 파형 마이크로파일의 지지력이 우수함을 확인하였다. 압축 재하시험결과를 통해 동일한 사용하중 700kN에서의 파형 마이크로파일의 변위가 일반 마이크로파일과 비교해 최대 약 46.3% 감소함을 확인하였고, 인발 재하시험 결과에서도 제트 그라우팅 마이크로파일에 비해 파형 마이크로파일의 변위 억제 효과가 큰 것으로 나타났다.
- (3) 1차 현장시험에서는 파형 마이크로파일 상부에 노출된 강봉이 시험중 좌굴되어 압축재하시험을 조기 종료하였음에 따라, 쌍곡선 방법을 바탕으로 하중-침하 곡선에 대한 외삽을 수행하였다. 외삽 결과 파형 마이크로파일의 허용 지지력이 일반 마이크로파일에 비해 최대 32% 증가하였다. 또한 파형 마이크로파일 중에서는 WM1 모델의 지지력이 상대적으로 크게 산정되었으며, 특히 강봉이 좌굴되기 전까지 하중-침하 거동의 초기 구간에서 높은 강성을 나타냈다.
- (4) 정확한 거동 평가를 위해 일반 마이크로파일, 제트 그라우팅 마이크로파일, 파형 마이크로파일을 대상으로 2차 현장시험을 추가로 실시하였으며, 하중-침하곡선을 통해 각 말뚝의 지지력을 산정하였다. 그 결과 파형 마이크로파일의 지지력이 일반 마이크로파일에 비해 약 55.6% 크게 나타나, 파형 마이크로파일의 지지력 증가 효과를 확인할 수 있었다. 또한

파형 마이크로파일에서 전단기 부분을 제외하고 시공한 제트 그라우팅 마이크로파일에 비해 약 27.8%의 지지력 증가가 나타나, 전단기의 시공이 추가적인 지지력 발현에 효과적임을 확인하였다.

- (5) 선단지지력 식과 2차 재하시험 결과를 바탕으로 각 말뚝의 극한 지지력 중 주면마찰력과 선단지지력 분담 정도를 분석하였다. 일반 마이크로파일에서는 극한 지지력의 16.5%를 선단에서 지지하는 반면 파형 마이크로파일의 선단지지 분담율은 45.8%로 크게 나타났다. 또한 동일한 말뚝 직경을 갖는 제트 그라우팅 마이크로파일의 선단지지 분담율에 비해서도 큰 분담율을 보였다. 분석 결과 선단부에 전단기가 위치하도록 시공하는 파형 마이크로파일의 특성으로 인해 일반 마이크로파일에 비해 추가적인 선단 지지력도 확보할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 본 계산은 각 말뚝별로 상대적인 지지력 분담률을 비교한 것이므로, 추후 2차 시험에 측정된 스트레인 값을 이용하여 각 말뚝별로 정량적인 하중전이를 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 ‘도심지 인프라에 기반한 인공지반 및 수직입체 지상공간 조성 기술 개발’ 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM D 1143-81. (2007), *Standard test method for piles deep foundations under static axial compressive load*, Annual book of ASTM Standards.
2. Abd Elaziz, A. Y. and El Naggar, M. H. (2014), “Geotechnical Capacity of Hollow-bar Micropiles in Cohesive Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.51, No.10, pp.1123-1138.
3. Akbas, S. O. and Kulhawy, F. H. (2009), “Axial Compression of Footings in Cohesionless Soils. I: Load-settlement behavior”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.11, pp.1562-1574.
4. Bell, A. L. (1993), *Jet grouting-Ground Improvement*, Ed. Moseley, E.D., Chapman & Hall, Glasgow, pp.149-174.
5. Cai, L., Li, Y., and Zhou, H. (2006), “Discussion on the Bearing Capacity of a Bored Pile with Reamed Enlargements”, *Foundation Analysis and Design: Innovative Methods*, pp.137-144, ASCE.
6. Castelli, F. and Maugeri, M. (2002), “Simplified Nonlinear Analysis for Settlement Prediction of Pile Groups”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.76-84.

7. Covil, C. S. and Skinner, A. E. (1994), "Jet Grouting – A Review of Some of the Operating Parameters that from the Basis of the Jet Grouting Process", *Proc. of Grouting in the Ground*, Ed. Bell, A. A., Thomas Telford, London, UK, pp.605-629.
8. Coyle, H. M. and Castello, R. R. (1981), "New Design Correlations for Piles in Sand", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.107 (ASCE 16379).
9. FHWA. (2005), *Micropile Design and Construction: Reference Manual*, FHWA-NHI-05-039, Federal Highway Administration, Vol.1, No.1, pp.7-28.
10. 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.
11. Han, J. and Ye, S. L. (2006), "A Field Study on the behavior of Micropiles in Clay under Compression or Tension", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.1, pp.19-29.
12. 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 (in Korean).
13. Huang, Y., Hajduk, E. L., Lipka, D. S., and Adams, J. C. (2007), "Micropile Load Testing and Installation Monitoring at the CATS Vehicle Maintenance Facility", *Contemporary Issues In Deep Foundations*, ASCE, pp.1-10.
14. Janbu, N. (1976), *Static bearing capacity of friction piles*, In Sechste Europaeische Konferenz Fuer Bodenmechanik Und Grundbau, Vol.1.
15. Jang, Y.E. and Han, J.T. (2015), "Study of Load Capacity of Waveform Micropile by Centrifuge Test", *Proc. of the 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, pp.700-706.
16. Jeon, S. S. (2004), "Interpretation of Load Tests on Minipiles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol. 157, No. 2, pp. 85-90.
17. Jung, S. J., Lee, S. I., Jeon, J. W., and Kim, M. M. (2009), "Prediction of Ultimate Load of Drilled Shafts Embedded in Weathered Rock by Extrapolation Method" *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.4C, pp.145-151.
18. Juran, I., Benslimane, A., and Hanna, S. (2001), *Engineering analysis of dynamic behavior of micropile systems*, Transportation Research Record, Vol.1772, pp.91-106.
19. KSF-2445. (2012), *Standard Method of Testing Piles Under Axial Compressive Load*, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul, Korea.
20. Martin, R. E. and DeStephen, R. A. (1983), "Large Diameter Double Underreamed Drilled Shafts", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.8, pp.1082-1098.
21. Meyerhof, G. G. (1976), "Bearing Capacity of Settlement of Pile Foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.102 (ASCE 1962), pp.195-228.
22. Misra, A. and Chen, C.H. (2004), "Analytical Solution for Micropile Design under Tension and Compression", *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol.22, No.2, pp.199-225.
23. Paikowsky, S. G. and Tolosko, T. A. (1999), *Extrapolation of pile capacity from non-failed load tests*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-170, Washington, D. C.
24. Qian, Y., Wang, J., and Wang, R. (2015), "The Analysis of the Vertical Uplift Bearing Capacity of Single CEP Pile", *Open Civil Engineering Journal*, Vol.9, pp.598-601.
25. Sabatini P. J., Pass, D. G., and Bachus, R. C. (1999), *Geotechnical engineering circular no.4 ground anchors and anchored system*, No. FHWA-SA-99-015.
26. 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.
27. Seo, H., Prezzi, M., and Salgado, R. (2013), "Instrumented Static Load Test on Rock-socketed Micropile", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.12, pp.2037-2047.
28. 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.
29. Valentino, R. and Stevanoni, D. (2010), "Micropiles Made of Reinforced Polyurethane Resins: Load Tests and Evaluation of the Bearing Capacity", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.15, pp.895-912.
30. Vesic, A. S. (1977), *Design of Pile Foundations*, *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42*, Transportation Research Board, Washington, DC (1977): pp.32-48.
31. 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.
32. Zhang, Q. Q. and Zhang, Z. M. (2012), "Simplified Calculation Approach for Settlement of Single Pile and Pile Groups", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.26, No.6, pp.750-758.

Received : September 6th, 2016

Revised : September 29th, 2016

Accepted : October 17th, 2016