

# 원심모형실험을 통한 파형 마이크로파일의 연직 지지력 평가

## Evaluation of Axial Bearing Capacity of Waveform Micropile by Centrifuge Test

장 영 은<sup>1</sup> Jang, Young-Eun

한 진 태<sup>2</sup> Han, Jin-Tae

김 재 현<sup>3</sup> Kim, Jae-Hyun

박 현 준<sup>4</sup> Park, Heon-Joon

김 상 환<sup>5</sup> Kim, Sang-Hwan

### Abstract

In this study, a series of centrifuge tests were performed in order to observe the bearing capacity of waveform micropile, a new concept of micropile that uses a modified jet grouting process. A total of six models were considered, conventional micropile, jet grouted pile, and four different shapes of waveform micropiles. The test results indicated that the waveform micropile effectively contributes to the increase of the bearing capacity compared to the micropile without the shear keys. Among the waveform micropiles, the model that has a relatively small space between the shear keys showed the most significant improvement of load capacity. Additionally, the ultimate load capacities of all piles were compared using well-known estimation method. As a result, P-S curve method and total settlement method with 25.4 mm were considered suitable to account ultimate load for the waveform micropile.

### 요 지

본 논문에서는 jet grouting 공법을 적용한 파형 마이크로파일의 지지력 향상 효과 및 거동 특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 각 말뚝의 형상에 따른 거동을 비교하기 위해 일반 마이크로파일, 파형이 없는 jet grouted 말뚝 및 네 종류의 파형 마이크로파일의 모델을 제작하여 원심모형실험을 수행하였다. 실험 결과 일반 마이크로파일 대비 파형 마이크로파일의 지지력 향상 효과를 확인 할 수 있었으며, 특히 파형의 간격이 상대적으로 좁은 말뚝의 지지력 개선 효과가 큰 것으로 분석되었다. 또한 기존의 재하시험에 의한 지지력 예측 및 평가 방법을 토대로 파형 마이크로파일의 지지력 산정 방안을 검토한 결과 P-S 곡선법과 25.4mm 전침하량기준이 파형 마이크로파일의 거동을 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Micropile, Waveform micropile, Jet grouting method, Pile load test, Pile load capacity

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

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

3 정회원, KAIST, 건설및환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)

4 정회원, KAIST, 건설및환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST)

5 정회원, 호서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engr., Hoseo Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 우리나라 정부는 수도권 및 사회초년생 등의 주택 임대 수요를 충족시키기 위한 목적으로 행복주택 조성계획을 발표한바 있다. 본 사업은 철도부지 등의 국유지 상부에 인공지반을 조성하고, 인공지반 상부를 주거단지 및 녹지공간으로 활용하기 위한 방안으로 주목받고 있다. 상기 인공지반 상부에 주거단지를 조성함으로써 접근성 및 편리성을 향상시키고, 상대적으로 저렴한 가격에 주택 공급이 가능한 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

인공지반이란 철근 콘크리트 등의 구조로 이루어진 데크(deck) 형식의 구조물을 의미하며, 상부 주거단지로부터 전달되는 하중을 지반에 전달하는 1차적인 역할을 하는 구조물이다. 그러므로 인공지반 계획, 설계 및 시공에는 다양한 분야의 기술이 요구되며, 특히 인공지반을 안정적으로 지지할 수 있는 적합한 기초구조물 관련 기술이 제시되어야 할 필요가 있다. 특히, 상기 철도부지 상부 및 근접 지역에 인공지반을 조성하기 위해서는 협소한 시공면적과, 기존 선로 운영을 고려한 시공 기간을 고려할 필요가 있으므로 근접·급속 시공이 가능한 기초구조물의 적용이 필수적이다. 이러한 측면에서 볼 때 시공 공간과 시간의 제약이 따르는 도심지 및 접근이 어려운 협소 공간에 널리 적용 되어온 마이크로파일을 활용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

마이크로파일은 300mm 이하의 소구경 말뚝으로 고강도 강봉(steel) 보강재와 그라우트 조합으로 이루어진 말뚝이다. 보강재의 종류와 시공 방법에 따라 신축 및 보강 기초로서 다양하게 활용 가능한 마이크로파일은

1950년대 첫 소개 이후부터 관련 성능 개선을 통해 더욱 광범위한 분야로 적용하기 위해 지속적인 연구가 이루어져 왔다(Juran et al., 2001; Sadek and Isam, 2004; Tsukada et al., 2006; Finno, 2002; Gomez et al., 2003; Seo et al., 2013). 마이크로파일 설계 가이드라인 FHWA (2005)에서는 마이크로파일 설계 시 말뚝 정착부가 토사층 또는 연암에 근입된 경우 말뚝의 소구경으로 인한 선단지지력을 무시하고, 강봉-그라우트체-지반에서 발휘되는 마찰력만을 지지력으로 고려하도록 명시하고 있다. 예외적으로 마이크로파일의 시공 대상 지반 하부에 강도 높은 경암이 존재할 경우에 대해서는 말뚝의 선단지지력을 주면마찰력에 앞서 고려하도록 되어있다. 현재 국내에서는 마이크로파일의 정착장을 풍화암 또는 연암층까지 시공하는 방식으로 시공하고 있으므로, 일반적인 마이크로파일 설계 방법과 같이 말뚝의 지지력을 주면마찰력으로 설계하고 있다. 또한 마이크로파일의 안정적인 지지력 확보를 위해 암반층에 비해 연약한 상부 토사층에서의 주면마찰력은 고려하지 않고 설계를 수행하는데, 이는 말뚝의 요구 지지력 증가에 따라 말뚝 길이의 증가를 야기하게 되므로 말뚝의 시공성 및 경제성의 감소 원인으로 작용하게 된다(Lee et al., 2014).

Han et al.(2013)은 상기 마이크로파일의 국내 설계 여건을 고려하여 철도부지 및 협소한 도심지에 적용하기 위한 신개념 마이크로파일을 개발하였다. 이는 기존의 마이크로파일 시공 순서 및 그라우트의 형상을 개량하여 토사층 내에서의 추가적인 지지력을 발휘를 도모하고, 기존의 마이크로파일의 시공성과 지지력을 증가시킬 목적을 가지는 파형 마이크로파일이다. 파형 마이크로파일은 지반 천공 후 고강도 강봉을 삽입하고 그라

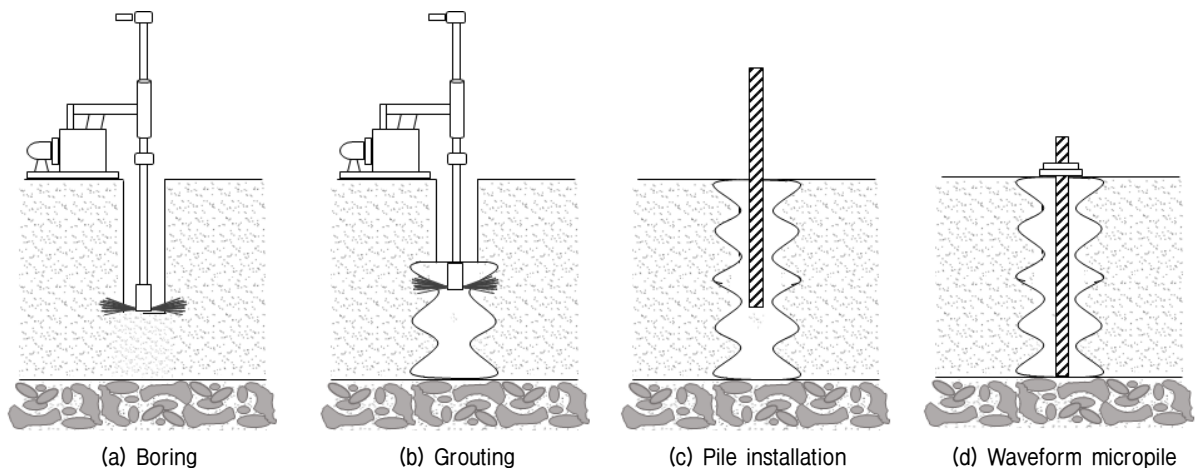
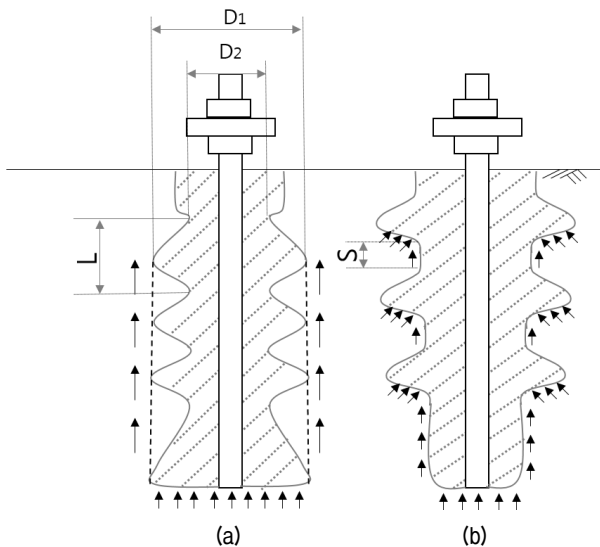


Fig. 1. Schematic of waveform micropile construction

우팅 작업을 수행하는 일반 마이크로파일과 다르게 Fig. 1과 같이 (a) 천공 - (b) 그라우트 - (c) 강봉 삽입 등의 순서로 시공한다. 특히, 파형 마이크로파일은 시공 과정 중 그라우트를 파형의 형상으로 시공하고, 파형을 이루는 전단키와 지반의 접촉면에서의 저항력 증가를 통해 지지력 증대 효과를 나타내고자 하였다. 파형 그라우트체의 시공은 제트 그라우팅(jet grouting) 공법을 활용하고, 그라우트 분사 시 소요 압력과 시간의 조절을 통해 그라우트체의 전단키를 형성하는 방식으로 시공할 수 있다. 1960년대 일본에서 개발된 제트그라우팅 공법은 공기나 물의 고압분사를 통해 지반을 절삭하고 그라우트를 분사하여 지반의 일정 영역을 고결시키는 공법으로, 적용 가능한 지반의 범위가 넓고 제트그라우팅을 통해 교반된 지층과 그라우트의 고결로 인한 지반 강도 증진 효과가 높다고 알려져 있다. 활용 목적에 따라 그라우트 배합비, 분사압 및 시간 등의 조절을 통해 soil column의 형상과 크기를 조절하여 그라우팅을 수행할 수 있으므로, 현재까지 지반 보강 및 차수, 지반 굴착, 터널 보강 등을 위한 다양한 범위에 활용되어 오고 있다(Jarintgam, 2003).

파형 마이크로파일은 파형을 이루는 전단키의 길이와 간격에 따라 Fig. 2의 (a)와 (b)의 경우로 나눌 수 있으며, 전단키의 크기와 간격에 의해 지지력 발현 양상에 차이가 나타날 것으로 예상 된다. 만약 Fig. 2(a)와 같이 전단키의 간격이 0일 경우에는 전단키 주변에 표시된



D<sub>1</sub>: Max. diameter of waveform micropile of shear key zone  
D<sub>2</sub>: Diameter of waveform micropile of none shear key zone  
L: Length of shear key, S: Spacing between shear keys

Fig. 2. Concept of waveform micropile

점선에 따라 하나의 말뚝체로 거동하며, 말뚝 주변에서의 마찰지지력만을 발현할 것으로 보인다. 반면에 Fig. 2(b)와 같이 전단키의 간격이 0보다 크다면 마찰 지지력 뿐만 아니라 전단키와 지반의 접촉면으로부터의 추가적인 지지력 발현이 있을 것으로 보인다.

Han et al.(2013)은 수치해석적 연구를 통해 파형 마이크로파일이 기존 마이크로파일과 비교해 뚜렷한 지지력 증가를 나타내는 것을 확인하였으나, 실험적 연구를 통한 전단키의 크기와 간격 등이 지지력에 미치는 영향에 대한 보다 상세한 연구의 필요성을 주장한바 있다. 이에 본 연구에서는 선행 연구 결과를 바탕으로 파형 마이크로파일이 지지력 증가에 미치는 영향을 평가하고, 저항력 증대에 효과적인 파형 마이크로파일 형상을 도출하기 위한 목적으로 원심모형실험을 수행하였다. 또한 실험으로부터 얻어진 하중-침하 곡선에 4가지 지지력 평가 기준(Davisson's 방법, P-S 곡선법, 25.4mm 전침하량 기준, FHWA 0.15mm/kN)을 적용하여 지지력을 평가하고, 마이크로파일 지지력 예측 결과와 비교하여 파형 마이크로파일의 지지력을 산정하기 위한 합리적인 방안을 검토하고자 하였다.

## 2. 원심모형실험 계획 및 조건

본 연구에서는 파형 마이크로파일의 지지력 발현 양상을 분석하기 위해 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형실험은 축소모형을 고속으로 회전시켜 인위적인 원심력을 가함으로써, 실제 현장과 동일한 응력 상태를 재현할 수 있는 실험이다. 본 실험에서는 Fig. 3의 KREONET 망을 활용한 KOCED 원심모형실험기를 이용하여 실험



Fig. 3. KOCED Geo-centrifuge, KAIST

을 수행하였다. 본 원심모형실험기는 회전반경 5.0m, 최대 가속도 130g, 최대 상재하중 2,400kg의 크기로 다양한 규모의 지반 분야 실험이 가능하다(Kim et al., 2013). 본 실험에서는 20g의 중력장에서 실험하였으며, 각 실험 대상 말뚝을 원심모형실험에 적용 가능한 상사비에 따라 1/20로 축소하여 제작하였다.

실험을 위한 모델은 서론에서 기술한 것과 같이 파형 마이크로파일의 구성 요소인 전단키의 길이(L)와 간격(S)에 따라 파형 마이크로파일의 형상을 결정하였으며, 이를 실험에 적용하여 전단키의 배치에 따른 지지력 발현 양상을 분석하고자 하였다. 또한 원심모형실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 추가적으로 1g 축소모형 실험을 실시하여 파형 여부 및 형상에 따른 연직 압축 하중을 받는 말뚝 주변지반의 거동을 사전에 예측하였다. 1g 실험에서는 파형 마이크로파일의 지중 응력 분포를 관찰하기 위하여 투명 토조 내에 조성된 쌀 시료를 활용하였다. 건조된 쌀 시료는 입자가 균일하고 입자간의 거동이 명확하여 하중 재하에 따른 말뚝의 거동에 대한 경향성을 쉽게 파악 할 수 있다고 판단하였다. 시료 조성이 완료된 토조에서 (a) 전단키의 간격이 없는 파형 마이크로파일, (b) 전단키의 간격이 직경과 동일한 파형 마이크로파일 그리고 (c) 일반 마이크로파일 등 3가지 경우에 대하여 하중을 재하 하는 동안 주변 지반의 거동을 영상으로 관찰하였다. 실험 결과 Fig. 4의 실선 표시 결과가 보여주는 바와 같이 (a)와 (b)의 파형 마이크로파일로 인한 하중 전달 범위가 파형이 없는 일반 마이크로파일 (c)의 경우와 비교해 더욱 크게 확장되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 하중 재하 시 전단키와 지반의 상호작용으로 인해 지반 강도가 증가하고, 하중

에 저항 가능한 지반 영향 범위를 확대시키기 때문으로 관찰되었다. 또한 파형의 간격이 없는 모델 (a)와 파형의 간격이 이격되어 있는 모델 (b)이 주변 지반부에 미치는 영향 범위가 근소하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으나, 전단키의 배치 간격이 지지력 산정 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 보다 상세한 실험적 연구가 필요하다고 판단하였다. 이에 따라, 파형 마이크로파일의 경우 말뚝의 형상별 지지력 정도를 자세히 비교·분석하기 위해 형상이 다른 4개의 모형을 제작하였다. 또한 파형 마이크로파일의 지지력 개선 정도를 파악하고자 일반마이크로파일 모형, 그리고 파형 마이크로파일과 동일한 시공 방법으로 시공되지만 파형이 없는 jet grouted 말뚝 모형을 함께 제작하였다.

축소모형은 70 GPa의 탄성계수를 가지는 알루미늄으로 제작하고, 상사비에 따라 각 원형말뚝의 1/20 축소모형을 제작하였다. 축소모형의 원형 말뚝 형상은 위의 Fig. 2에서 나타내고 있는 것과 같이 전단키 부근의 직경  $D_1$ 과 전단키가 없는 부분의 직경  $D_2$ 가 각각 500mm, 300mm이다(Han et al., 2013). 본 연구에서는 파형 마이크로파일의 형상에 따른 연직 지지력 변화를 살펴보고자 하였으므로, 말뚝의 길이에 대한 상사비를 적용하여 강성체로서 거동 가능한 축소모형을 제작하였다. 실험에 적용한 각 말뚝의 원형과 축소모형의 종류별 형상은 Table 1 및 Fig. 5와 같다.

실험 수행에 앞서 원형 모델의 지지력을 FHWA(2005) 마이크로파일 설계 가이드라인에서 제시하는 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 아래 식에서  $\alpha_{bond}$ 는 지반과 그라우트와의 부착강도(kPa),  $FS$ 는 안전율,  $D_b$ 는 천공홀의 직경(m),  $L_b$ 는 말뚝의 정착 길이(m)를 의미한다. 설계 지지력은 일반 마이크로파일(conventional micropile)과 jet

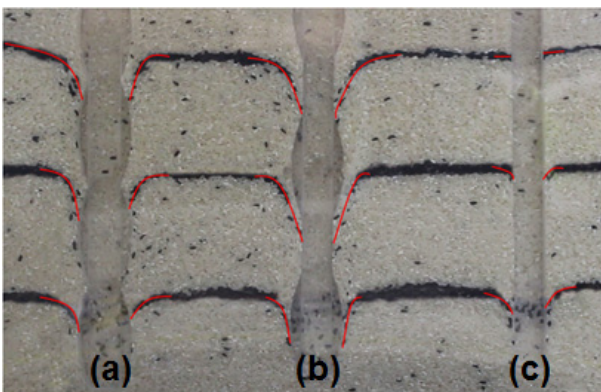


Fig. 4. Soil movement modes by different shape of micropile: (a) Waveform (w/o space), (b) Waveform (w/space), (c) Conventional micropile

Table 1. Dimensions of prototypes and experimental models

Type	Prototype	Centrifuge model
Conventional micropile	D = 180 mm	D = 9 mm
Jet grouted pile	D = 300 mm	D = 15 mm
Waveform micropile ( $D_1 = 500$ , $D_2 = 300$ mm)		
WM1 (L&S: $D_1$ )	L&S:500 mm	L&S:25 mm
WM2 (L: $2D_1$ , S:0)	L:1,000 mm, S:0	L:50 mm, S:0
WM3 (L: $2D_1$ , S: $D_1$ )	L:1,000, S:500 mm	L:50, S:25 mm
WM4 (L: $2D_1$ , S: $5D_1$ )	L:1,000, S:2,500 mm	L:50, S:125 mm

grouted 말뚝을 대상으로 도출하였다. 파형 마이크로파일의 지지력은 jet grouted 말뚝과 동일하다고 가정하였으나, 실제 전단키의 시공이 추가될 경우 파형 마이크로파일의 지지력은 jet grouted 말뚝에 비해 증가할 것으로 판단된다. 실험조건과 같이 말뚝모형을 원형으로 환산 시 5m의 깊이의 사질토 지반에 관입되어 있다고 가정하였다. 지반-그라우트간 부착 강도  $\alpha_{bond}$ 는 FHWA(2005)에서 지반의 종류와 그라우트 방법에 따라 제안하고 있는 범위를 참고하여 결정하였다. 이를 위해 일반 마이크로파일은 중간 조밀한 실트질 사질토 내에 중력식 그라우트로 시공된 말뚝을 의미하는 범위(70~145kPa)의 중간 값 107kPa을, jet grouted 말뚝의 경우 가압식 그라우트 말뚝을 의미하는 범위(70~190kPa)의 중간 값 130kPa을 각각 적용하였다. 계산 결과 일반 마이크로파일과 jet grouted 말뚝의 허용 지지력은 각 152.0kN, 306.3kN이었다.

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

실험에 사용된 흙은 통일분류법상 SP에 해당하는 규사(silica sand)를 활용하였다. Table 2 및 Fig. 6과 같이 토사의 최대, 최소 단위 중량  $\gamma_{dmax}$ 와  $\gamma_{dmin}$ 은 각 16.5kN/m<sup>3</sup>, 12.4kN/m<sup>3</sup>이며, 곡률계수 C<sub>c</sub>와 균등계수 C<sub>u</sub>는 각각 1.77



Fig. 5. Scaled model for centrifuge test

Table 2. Basic properties of silica sand

Silica sand	USCS	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
	SP		1.58	1.25	1.77

과 1.66이다. 지반 조성은 실험실 내의 자동 강사장치를 활용해 직경 0.9m, 높이 0.7m의 토조내에 상대밀도 약 75%, 지반고 0.4m로 조성하였다. 말뚝의 관입에 따른 지반의 교란을 방지하기 위해서 0.2m 높이까지 1차 강사를 수행하고 말뚝 선단 0.05m를 설치하였으며, 2차 낙사 0.2m를 추가적으로 수행하는 방식으로 말뚝을 설치하였다. 지반조성과 말뚝 설치가 완료된 토조에는 Fig. 7과 같이 로드셀과 두 개의 변위계를 설치해 하중-변위 관계를 측정하였다. 변위 제어 방식으로 수행된 본 실험은 선형 액추에이터를 이용하여 하중속도 0.05mm/sec로 최종 변위 5.0mm까지 관입실험을 수행하였다.

### 3. 실험 결과 분석

#### 3.1 하중-침하곡선

실험을 통해 산정한 하중-침하 관계를 원형 크기로

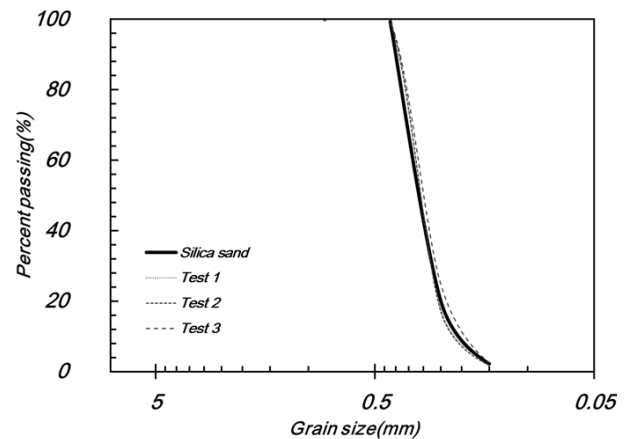


Fig. 6. Particle size distribution of silica sand

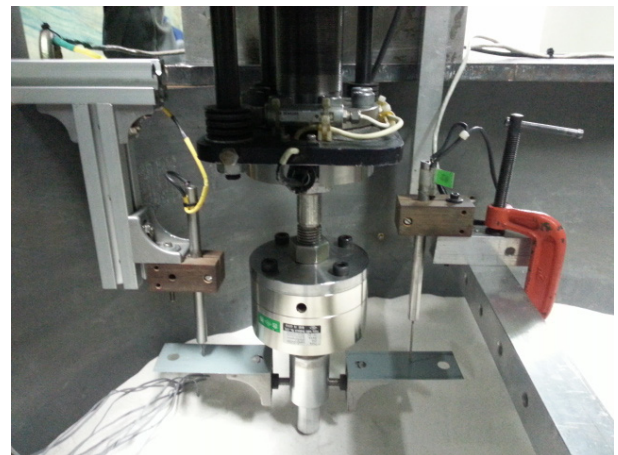


Fig. 7. View of model pile with instrumentation system for centrifuge test

환산하여 말뚝 변위 80mm까지 정리하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 결과를 통해 각 말뚝의 지지력이 파형 마이크로파일, jet grouted 말뚝, 일반 마이크로파일 순서로 발현되며 파형 마이크로파일의 지지력이 증가하였음을 확인하였고, 일반 마이크로파일과 jet grouted 말뚝의 허용 지지력  $Q_C$  152.0kN,  $Q_G$  306.3kN에 해당하는 말뚝의 침하량은 각 4.7mm, 10.0mm인 정도인 것으로 나타났다.

파형 마이크로파일의 지지성능은 일반 마이크로파일 및 jet grouted 말뚝에 비해 개선된 것을 확인할 수 있었다. 파형 마이크로파일 중에서는 전단키의 간격이 최대 직경  $D_1$ (500mm)의 5배인 WM4 모델을 제외하고 모두 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

산정 결과를 바탕으로 Terzaghi and Peck(1967)의 전침하량기준 25.4mm에 대응하는 각 말뚝의 지지력을 비교해 볼 때 일반 마이크로파일에 비해 jet grouted 말뚝은 약 26.1% 증가한 반면, 파형 마이크로파일 WM1, WM2, WM3 모델은 평균 약 85.1%로 증가한 것을 통해 확인할 수 있다. 또한 jet grouted 말뚝에 비해  $S=5D_1$ 인 WM4 모델은 약 22.6%의 지지력 증가율을 보였고,  $S=0$  또는  $D_1$ 으로 시공된 WM1, WM2, WM3 모델은 평균 약 47.53%가 증가하였다.

파일의 형상 차이가 지지력 발현에 미치는 영향을 파악하고자 전단키의 간격과 길이에 따른 지지력 산정 결과를 비교하였다. 그 결과 전단키의 간격은 동일하지만 길이가 다른 파형 마이크로파일 WM1(L: $D_1$ , S: $D_1$ ) 및

WM3(L:2 $D_1$ , S: $D_1$ ) 말뚝의 지지력이 각 726.2kN, 759.5kN으로 나타나, 전단키 길이의 증가로 인한 하중의 차이는 약 4.4% 정도로 각 말뚝의 하중이 유사하게 산정되었음을 확인하였다. 또한 전단키의 길이(L)가 2 $D_1$ 이고 고정하고 간격(S)을 0,  $D_1$ , 5 $D_1$ 으로 제작한 WM2(L:2 $D_1$ , S:0), WM3(L:2 $D_1$ , S: $D_1$ ), WM4(L:2 $D_1$ , S:5 $D_1$ ) 말뚝의 지지력 산정 결과를 비교한 결과, 각 말뚝의 하중이 755.0kN, 759.5kN, 620.1kN인 것을 확인하였다. 분석 결과 전단키의 간격이 0인 경우에 비해  $D_1$ 으로 증가한 경우 지지력이 유사한 것으로 나타났지만, 간격이 5 $D_1$ 으로 넓어지는 경우에는 간격이 0(WM2)인 말뚝에 비해 17% 가량 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 전단키로 인한 지지력 증가 효과가 WM1, WM2, WM3, WM4 모두에서 나타났으나, 전단키의 간격이 과다하게 넓어질 경우(L=5 $D_1$ )에는 그렇지 않은 경우에 비해 지지력 증가 효과가 감소하는 것을 의미하고 있다.

이와 같이 전단키의 간격이 0 또는  $D_1$ 인 모델이 전단키의 간격이 5 $D_1$ 인 모델과 비교해 지지력 증가를 보였는데, 이는 하중 재하시 상대적으로 좁은 전단키 간격을 가지는 말뚝이 인접 지반과의 상호작용을 통해 토사의 압축성을 증가시키는데 크게 기여했기 때문으로 판단된다. 즉, 말뚝의 침하 거동에 따라 전단키 사이에 인접한 토사는 추가적인 하중의 영향을 받게 되고, 이로 인해 지지력 발현을 위한 지중 영향범위가 확대되는 것으로 나타났다. 그러므로 본 실험 결과는 파형 마이크로파일의 형상 특성이 지지력 향상에 효과적으로 영향을 미치고 있으며, 전단키의 경계와 지반면에서 발현되는 저항력이 파형의 간격에 따라 차이가 있음을 나타냈다.

### 3.2 지지력 산정 및 비교

본 절에서는 상기 실험결과로부터 얻어진 하중-침하 곡선으로부터 각 말뚝의 지지력을 평가하고, 그 결과를 통해 설계식 및 재하시험을 통한 지지력 평가 방법들에 대한 타당성을 분석하고자 하였다. 말뚝의 지지력을 평가할 경우에는 다양한 분석 방법을 적용해본 후, 설계자의 공학적 판단에 따라 지지력을 결정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 재하시험 결과로부터 말뚝의 지지력을 산정하기 위해 제안된 방법 중 현재까지 마이크로파일 지지력 평가에 활용되고 있는 Davisson's 방법(Davisson, 1972), P-S 곡선법, 전침하량기준(Terzaghi and Peck, 1967; Touma and Reese, 1974) 및 FHWA(2005)

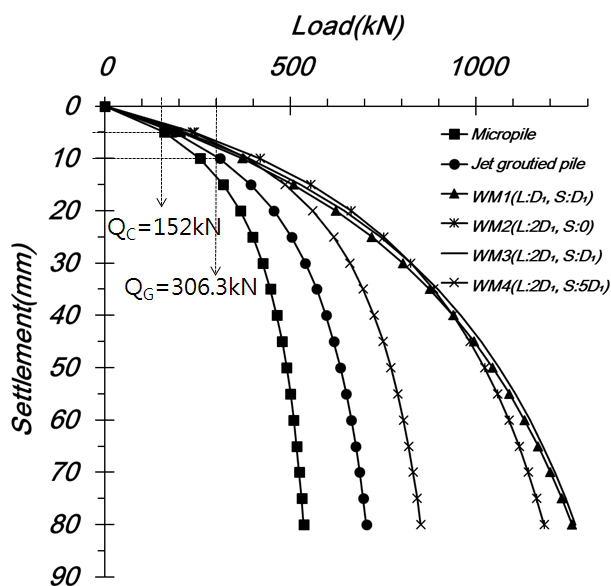


Fig. 8. Load-settlement curve of experimental models (prototype scale)

등 4개의 분석방법을 활용하였다. 각 방법은 다음과 같은 특징이 있다.

(a) Davisson's 방법(Davisson, 1972): 말뚝의 지지력을 산정하는데 가장 보편적으로 사용되는 방법으로 보수적인 결과를 산정한다고 알려져 있다. Davisson's 방법을 통한 지지력 평가시에는 아래 식 (2)에 의해 탄성 침하량(elastic compression)을 구하고, 이를 식 (3) 또는 (4)에 적용하여 Davisson's offset line을 산정하여 도시한다. 상기 과정을 통해 도출된 직선과 하중-침하곡선과의 교점을 말뚝의 항복하중으로 간주한다.

$$\text{Elastic compression: } \Delta_{elastic} = \frac{PL}{EA} \quad (2)$$

$$\text{Davisson's offset line } D > 60\text{cm: } X = \frac{D}{30} \quad (3)$$

$$D < 60\text{cm: } X = 0.38\text{cm} + \frac{D}{120} \quad (4)$$

여기서, P: 말뚝 하중, EA=말뚝의 수직 강성, L:말뚝의 길이, D: 말뚝의 직경

(b) P-S 곡선법: 재하 단계별 하중 (P)와 침하량 (S)를 plot 하였을 때, 곡선의 기울기가 가장 크게 변하는 지점을 항복하중으로 결정한다.

(c) 전침하량기준(total settlement method): 허용하중에 대응하는 말뚝 침하량 규정은 나라 및 연구기관에 따라 조금씩 다르게 제안되고 있으며, 본 연구에서는 Terzaghi and Peck(1967), Touma and Reese(1974) 등이 제안한 25.4mm 침하시의 하중을 극한하중으로 산정하였다.

(d) FHWA(2005): 미연방도로국(FHWA, Federal Highway Administration)의 마이크로파일 설계 매뉴얼은 하중-침하 곡선에서 0.15mm/kN 기울기가 나타나는 때를 마이크로파일의 극한하중으로 산정하도록 제시하고 있다.

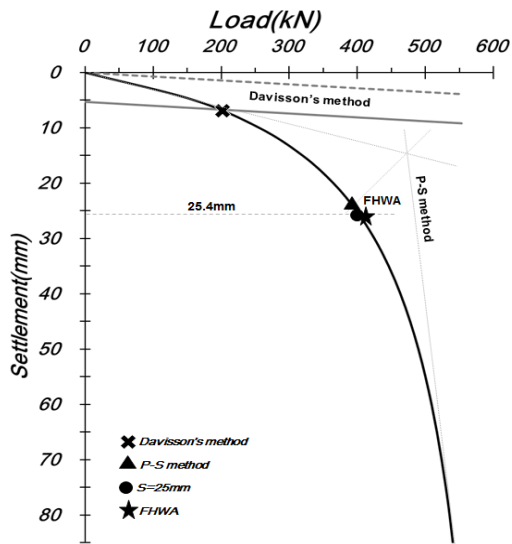
Fig. 9는 4개의 평가 방법으로 산정된 각 말뚝의 극한 지지력을 나타내고 있다. 그래프를 통해 공통적으로 Davisson's 방법으로 산정된 결과가 가장 작은 값을, FHWA가 제안한 방법으로 산정한 극한 지지력이 가장

큰 것을 확인할 수 있다.

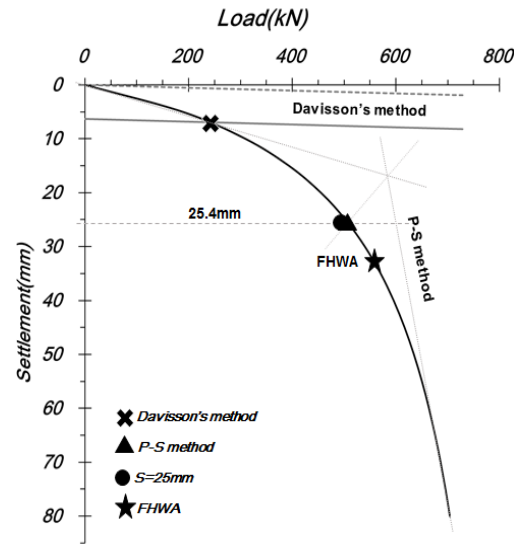
상기 4가지 방법으로 평가된 말뚝의 지지력과 식 1을 통해 예측한 지지력을 Table 3과 Fig. 10에 정리하였다. 각 말뚝의 극한 지지력  $Q_u$ 와 허용 지지력  $Q_a$ 를 표시하였으며,  $Q_a$  산정시에는 FHWA에서 제안한 안전율 2.0을 적용하였다.

일반 마이크로파일의 경우 예측 지지력이 152.0kN으로 산정되었고, 각 지지력 평가를 통한 허용 지지력은 Davisson's 방법이 99.7kN, P-S 곡선법이 196.0kN, 전침하량기준이 199.0kN 그리고 FHWA 방법이 199.4kN으로 분석되었다. 예측 지지력이 Davisson's 방법과 비교해 34.4% 큰 것으로 확인되었고, 나머지 3가지 방법에 비해 각 22.4%, 23.6%, 23.8%씩 작게 산정되었다. 이 중, 예측식에 비해 약 34.4%로 가장 작게 산정된 Davisson's 방법에서의 허용 침하량 또한 3.5mm 정도의 매우 보수적인 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 이는 현장타설 말뚝 및 항타 말뚝의 지지력 산정을 위해 제안된 방법인 Davisson's 방법을 말뚝의 소구경 및 강봉-지반-그라우트간의 부착강도 등을 고려해 지지력이 발휘되는 마이크로파일에 적용하기에는 적합하지 않기 때문으로 나타났다. 실제로, Baligh & Abdelrahman(2005)와 FHWA(2005)에서는 Davisson's 방법이 직경 300mm 이하인 소구경 마이크로파일의 허용 지지력을 평가하는 데는 합리적이지 않은 것으로 주장한바 있다. 반면, P-S 곡선법과 전침하량기준 및 FHWA 매뉴얼에 따라 산정된 지지력은 말뚝의 거동을 직접적으로 내포하는 하중-침하 관계로부터 극한 지지력을 산정하도록 하고 있는 방법이므로, 본 실험에서 산정된 말뚝의 항복 거동을 비교적 합리적으로 나타내고 있다고 사료된다. 예측 지지력이 평가 지지력에 비해 작게 산정된 경향 및 Davisson's 방법이 보수적인 결과를 나타내는 결과는 jet grouted 말뚝의 지지력 산정 결과에서도 유사하게 나타났다.

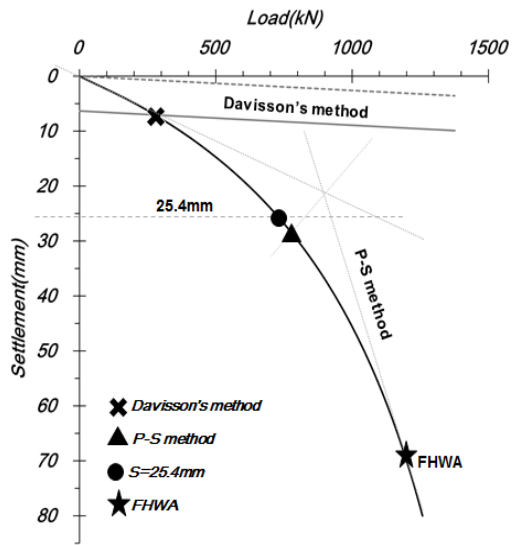
파형 마이크로파일 WM1, WM2, WM3, WM4의 경우에도 Davisson's 방법을 통한 평가 결과가 예측 허용 지지력인 306.3kN에 비해 평균 49% 정도의 차이를 나타냈다. 분석 결과 전단기의 간격 S가 5D<sub>1</sub>으로 비교적 넓은 간격의 전단기를 가지는 파형 마이크로파일에서는 P-S 곡선법(303.6kN), 전침하량기준(310.1kN), FHWA(352.8kN)의 3가지 방법의 결과가 유사한 경향을 보였으나, S가 0 또는 D<sub>1</sub>인 WM1, WM2, WM3에서의 결과는 P-S 곡선법, 전침하량기준과 FHWA 방법의 차이가 증가했다. 각 결과간의 차이는 WM1의 경우 37.3%, WM2



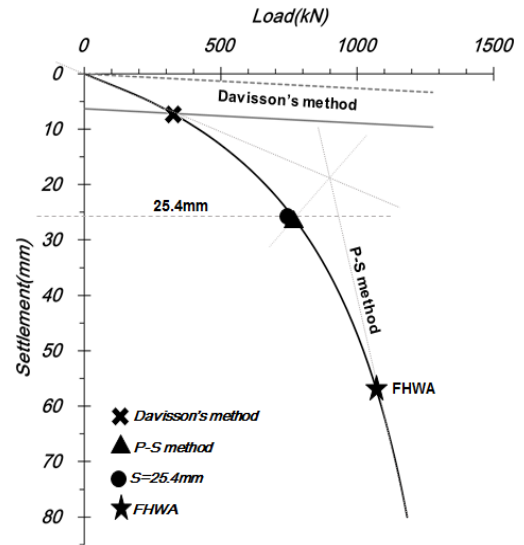
(a) Conventional micropile



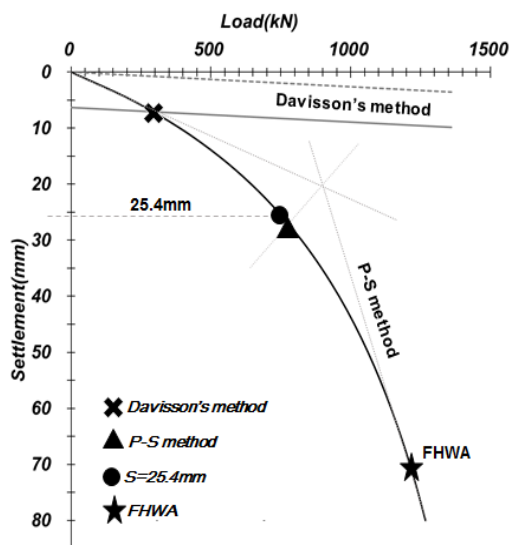
(b) Jet grouted pile



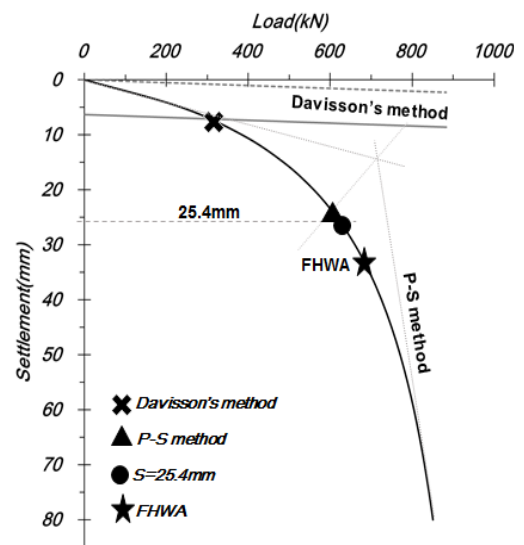
(c) WM1 (L:D<sub>1</sub>, S:D<sub>1</sub>)



(d) WM2 (L:2D<sub>1</sub>, S:0)



(e) WM3 (L:2D<sub>1</sub>, S:D<sub>1</sub>)



(f) WM4 (L:2D<sub>1</sub>, S:5D<sub>1</sub>)

Fig. 9. Estimation of pile load capacity by different methods



Table 3. Comparison between predicted and measured pile load capacities

	Predicted load (kN)		Load test result (kN)											
			Davisson's method			P-S method			Total settlement method			FHWA manual		
	Q <sub>u</sub>	Q <sub>a</sub>	Q <sub>u</sub>	δ	Q <sub>a</sub>	Q <sub>u</sub>	δ	Q <sub>a</sub>	Q <sub>u</sub>	δ	Q <sub>a</sub>	Q <sub>u</sub>	δ	Q <sub>a</sub>
Micropile	303.9	152.0	199.4	6.7	99.7	391.9	23.8	196.0	398.0	25.4	199.0	398.7	25	199.4
Jet-grouted pile	612.6	306.3	238.6	6.9	119.3	506.0	25.5	253.0	505.0		252.5	560.3	33.4	280.2
WM1	612.6<	306.3<	274.8	7.0	137.4	778.1	28.6	389.1	726.2		363.1	1,200	70	600.0
WM2			323.9	7.2	162.0	767.4	25.9	383.7	755.0		377.5	1,072.8	57.5	536.4
WM3			291.9	7.1	146.0	778.4	26.8	389.2	759.5		379.8	1,195.9	67.5	598.0
WM4			309.1	7.0	154.6	607.1	23.9	303.6	620.1		310.1	705.6	36.7	352.8

Q<sub>u</sub>: Ultimate load capacity, Q<sub>a</sub>: Allowable load capacity, δ (mm): Vertical displacement

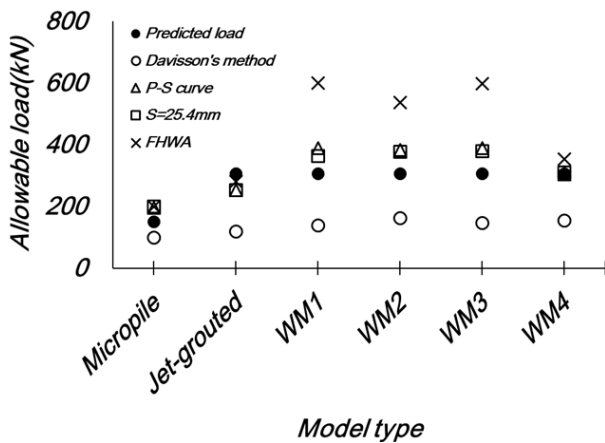


Fig. 10. Predicted and measured pile load capacities

는 29.05%, WM3는 35.7%로, 전단키의 배치 비율이 증가해 저항이 증가함에 따라 FHWA 방법을 통한 평가 결과가 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 파형 마이크로파일의 형상을 구성하는 전단키의 간격이 지지력 평가 결과에 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 결과로 전단키 간격 사이에서 발견되는 추가적인 지반 저항력이 말뚝 전체의 강성을 증가시키는 원인으로 작용했기 때문으로 판단된다. 그러므로 일반 마이크로파일의 하중-침하 관계의 기울기  $0.15\text{mm/kN}$ 로부터 극한하중을 산정하도록 제안하고 있는 FHWA 방법은 강성의 증가가 발생한 파형 마이크로파일의 지지력 평가에 적용할 경우에는 지지력을 과대평가하는 것으로 분석되었다. 따라서 파형 마이크로파일의 지지력 평가시에는 FHWA 방법을 제외한 P-S 곡선법과 전침하량기준을 바탕으로 검토하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

상기 검토를 통해 마이크로파일, jet grouted 파일 및 파형 마이크로파일의 지지력 평가에 적합하다고 판단된 결과와 예측지지력 결과를 비교해 보면 일반 마이크

로파일과 jet grouted 말뚝의 경우 P-S 곡선법, 전침하량기준, FHWA 방법을 통한 각 평가 결과가 예측지지력 결과보다 각 23.3%, 3.3% 정도 차이를 나타내며 비교적 합리적인 범위에서 지지력을 예측하였음을 확인할 수 있었다. 반면, 지지력이 증대된 파형 마이크로파일의 경우에는 P-S 곡선법과 전침하량기준을 통해 평가된 결과에 비해 평균 33.4% 정도 작게 지지력을 예측하는 것으로 나타났다. FHWA 마이크로파일 설계 매뉴얼에 제안된 마이크로파일 지지력 산정식을 통해 예측한 설계지지력과 재하시험을 통한 파형 마이크로파일의 지지력의 평가 결과가 큰 차이를 나타내는 이유는 상기 제안식이 파형 마이크로파일의 전단키와 지반의 상호작용으로 인해 발생하는 거동 특성을 엄밀히 고려하고 있지 못하기 때문으로 판단된다. 특히 상기 지지력 예측식이 결과를 산정하는데 있어서 마이크로파일의 그라우트체와 지반의 부착강도  $\alpha_{bond}$ , 말뚝의 직경, 재료의 특성 등만을 주요 인자로 고려하고 있으므로, 파형 마이크로파일의 하중 저항 메커니즘을 반영해 지지력을 산정하는데 부족했기 때문으로 분석된다. 그러므로 추후 연구를 통해 파형 마이크로파일의 거동 특성을 반영하여 지지력을 예측할 수 있는 합리적인 방안의 도출이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 근접/급속시공 가능 기초형식으로 개발된 파형 마이크로파일의 지지력 특성을 분석하고자 원심모형실험을 수행하였다. 실험 결과의 비교분석을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

- (1) 원심모형실험 결과, 파형 마이크로파일의 지지력이

jet grouted 말뚝 및 일반 마이크로파일에 비해 우수한 것으로 나타났다. 실험결과를 바탕으로 전침하량기준 25.4mm에서 각 말뚝의 지지력 증가 정도를 비교한 결과 일반 마이크로파일에 비해 확대된 직경을 가지는 jet grouted 말뚝의 지지력이 일반 마이크로파일과 비교해 약 26% 이상 증가하였음을 확인하였다. 파형 마이크로파일의 지지력은 일반 마이크로파일과 비교해 최대 85%까지 증가된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전단키의 형성을 통한 파형 마이크로파일이 하중 저항성 증대에 더욱 효과적일 수 있음을 의미한다.

- (2) 전단키의 길이 및 간격을 변화시킨 파형 마이크로파일의 실험 결과로부터 전단키의 간격이 전단키의 길이에 비해 말뚝 저항력 증가에 큰 영향으로 작용하는 것을 확인하였다. 특히 간격이 파형 마이크로파일의 최대 직경과 동일하거나 간격이 0인 모델에서 가장 큰 지지력이 관찰되었다. 이는 전단키 간의 간격이 상대적으로 좁을 경우에 전단키 경계와 지반의 접촉면에서의 마찰력이 증가하기 때문으로 판단된다.
- (3) 원심모형실험 결과를 바탕으로 Davisson's 방법, P-S 곡선법, 전침하량기준 및 FHWA 제안 기준 등의 4가지 방법을 활용하여 말뚝의 극한 지지력을 평가하였다. 그 결과 Davisson's 방법을 통한 지지력 평가 결과는 일반마이크로파일, jet-grouted 말뚝, 파형 마이크로파일의 허용 침하량 및 하중을 매우 보수적으로 산정하는 것으로 분석되었다. Davisson's 방법을 제외한 P-S 곡선법, 25.4mm 전침하량기준 및 FHWA 방법에 따른 지지력은 설계식으로 예측한 지지력과 비교적 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 파형 마이크로파일의 경우에는 말뚝의 강성이 일반 마이크로파일에 비해 크게 증가함에 따라, 하중과 변위의 증가 정도로부터 지지력을 평가하도록 제안하고 있는 FHWA 방법을 적용하는 것이 적합하지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 상기 4가지 방법을 바탕으로 산정한 평가 지지력과 식을 통해 산정된 지지력과 비교해 보았을 때, 공통적으로 예측 지지력이 평가 지지력에 비해 작게 산정되는 경향을 나타냄을 확인하였다. 특히, 지지력이 증대되는 파형 마이크로파일의 경우에는 예측 지지력과 평가 지지력의 차이가 약 33.4%에 달하는 것으로 나타났는데, 이는 설계 계산식이 파형 마이

크로파일의 지지 메커니즘을 엄밀히 고려하지 못하기 때문이다. 그러므로 파형 마이크로파일의 거동 특성을 반영하여 지지력을 산정할 수 있는 합리적인 설계 방안의 도출이 필요하다고 판단되며, 이를 위해 추가적인 실험과 수치해석 등의 수행을 통해 파형 마이크로파일의 설계 방안 도출을 위한 신뢰성 있는 데이터를 구축해 갈 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. Balign, F. A. and Abdelrahman, G. E. (2005), "Modification of Davisson's Method", *Proc. of the International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*. Vol.16, No.4, pp.2079-2082.
2. Davisson, M. T. (1972), "High Capacity Piles. Proceedings, Lecture Series, Innovations in Foundation Construction", *ASCE, Illinois Section*, Chicago, pp.81-112.
3. FHWA (2005), *Micropile Design and Construction: Reference Manual, FHWA-NHI-05-039*, Federal Highway Administration, Vol.1, No.1, pp.7-28.
4. Finno, R. J. (2002), "Evaluation of Capacity of Micropiles Embedded in Dolomite.", *Final Rep. of Infrastructure Technology Institute*, Northwestern Univ., Evanston, IL.
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 (Soil Rock America 2003)*, VGE, Essen, 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. Jaritngam, S. (2003), "Design Concept of Soil Improvement for Road Construction on Soft Clay", *In Proceedings of the eastern Asia society for transportation studies*, Vol.4, pp.311-322.
8. Juran, I., Benslimane, A., and Hanna, S. (2001), *Engineering analysis of dynamic behavior of micropile systems*, Transportation Research Record No. 1772: Soil Mechanics, pp.91-106.
9. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W., and Cho, G. C. (2013), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.77-84.
10. Lee, J. M. and Kim, D. H. (2014), "A Bearing Capacity of Micropile with Expanded Drill Hole", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.14, No.4, pp.127-133.

11. 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.
12. 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.
13. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed*, John Wiley and Sons, New York, pp.346-352.
14. Tornaghi, R. and Cippo, A. P. (1985), "Soil Improvement by Jet Grouting for the Solution of Tunnelling Problems", *Proc. of the 4th International Symposium Tunnelling*. Vol.85, pp.1-10.
15. Touma, F. T. and Reese, L. C. (1974), "Behavior of Bored Piles in Sand", *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.100, No.7, pp.749-761.
16. Tsukada, K., Miura, Y., Tsubokawa, Y., and Otani, G. L. (2006), "Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforced with Micropiles", *Journal of soils and foundations*, Vol.46, No.3, pp.367-376.

Received : May 20<sup>th</sup>, 2015

Revised : July 9<sup>th</sup>, 2015

Accepted : August 3<sup>rd</sup>, 2015