

## 기초 폭 및 암반층의 영향을 고려한 마이크로파일 설치방안에 관한 연구

### The Effects of the Breadth of Foundation and Rock Layer on the Installation Method of Micro-piles

황 태 현<sup>1</sup> Hwang, Tae-Hyun

김 지 호<sup>2</sup> Kim, Ji-Ho

권 오 엽<sup>3</sup> Kwon, Oh-Yeob

#### Abstract

Micro-piles have been used to increase the bearing capacity or to restrain settlement of existing shallow foundation. Recently, micro-piles are used to support the shallow foundation, to stabilize the slope and to resist the sliding of retaining wall. Using the micro-piles in geotechnical engineering, some investigators have studied the effective installing method by model test or field test. But most of previous studies are chiefly focused on the micro-piles in sand or clay layer. If a rock layer exists in soil, the installing length of micro-piles may be determined by the depth of rock layer. In this case, the stiffness of pile may be changed by the installing length of pile, and so the installing method has to be altered by the changed stiffness of pile. Model tests have been conducted to study the installation method of micro-pile in soil with rock layer. As a result, when the ratio of length of pile is below 50 ( $L/d \leq 50$ ), installing of micro-piles in vertical position is effective regardless of the depth of rock layer. If the depth of rock layer is deeper than soil failure zone and the ratio of the length of pile exceeds 50 ( $L/d > 50$ ), installing of the micro-piles in sloped position is effective.

#### 요 지

마이크로파일은 기존 얇은 기초의 지지력 증가 또는 침하 억제 목적으로 주로 사용되어 왔다. 최근에는 이러한 목적에만 국한되지 않고, 기존 파일과 유사한 지지파일, 사면의 안정을 위한 억지말뚝, 옹벽의 전단기 등과 같은 사용 목적에 따라 다양하게 현장에서 활용되고 있다. 마이크로파일의 활용 빈도가 점차 증가함에 따라 몇몇 연구자들이 현장 시험 또는 모형시험을 통해 최적의 설치 방법에 대해 연구를 하고 있다. 그러나 진행되고 있는 연구는 대부분이 토사 또는 점토지반을 대상으로 한 것이다. 현장지반은 단일 토사 또는 점토 지반만으로 구성된 경우가 드물다. 또한 암반층이 존재하는 지반에서는 암반층의 위치에 따라 파일 길이가 결정되며, 결정된 파일길이에 따라 파일 강성이 달라질 수 있으므로 이에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 암반층의 위치에 따른 마이크로파일의 최적 설치방안을 규명하기 위해 모형시험을 실시하였다. 연구 결과, 파일 강성과 관련된 파일 길이비( $L/d$ )가 50이하인 경우에는 암반층 위치와 관계없이 수직으로 설치하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 또한 파일 길이비가 50을 초과하고, 암반층위치가 지반 파괴깊이보다 깊으면, 파일을 경사지게 설치하는 것이 더 효과적인 것으로 나타났다.

**Keywords :** Micro-pile, Model test, Soils with rock layer, Ratio of length of pile

1 정희원, 건국대 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., makgoh77@nate.com, 교신저자)

2 정희원, (주)쏘일텍코리아 대표이사 (Member, President, Soil tech Korea)

3 정희원, 건국대 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 도심지에 설치되는 구조물의 크기가 대형화됨에 따라 깊은 심도까지 지반을 굴착하거나 기존 구조물을 증축하는 경우가 빈번하다. 이러한 경우, 지반의 안정성을 확보하기 위해 다양한 언더피닝 공법이 많은 연구자들에 의해 소개되어 왔고, 현장에도 적용되고 있다. 이러한 공법 중 하나인 마이크로파일 공법(Micro-pile method)은 1950년대 처음 소개된 이후, 기존 구조물의 지지력증가 또는 침하억제를 목적으로 주로 사용되어 왔다. 또한 최근 들어서는 기존 파일과 유사한 지지파일, 사면의 안정을 위한 역지말뚝, 옹벽의 전단기 등과 같은 사용목적에 따라 다양하게 현장에서 활용되고 있다. 이 파일은 굴착한 지반 내에 보강용 강봉(Reinforced rebar)을 설치한 후, 그라우팅 작업을 하여 설치한 소구경 콘크리트 말뚝(파일직경( $d$ )  $\leq 300\text{mm}$ )을 말하며, 기존의 매입말뚝(Bored pile)과 유사한 구조이다.

이 파일의 지지특성은 선단지지력과 주면마찰력에 의해 상부구조물을 지지하는 기존 파일과 달리, 파일의 표면에 작용하는 주면 마찰력에 의해서만 상부하중을 지지하는 특징이 있다. 이러한 지지특성을 고려하여 현장에서는 마이크로파일 설계 시 선단지지력을 고려하지 않고, 주면마찰력만을 고려하여 설계에 적용하고 있다. 이러한 방법으로 설계·시공한 마이크로파일은 몇몇 현장시험 사례를 통해, 직경이 작은 말뚝에 비해 지지효과가 큰 것으로 나타났다.

그러나 몇몇 연구자들의 연구결과를 보면 이러한 특징을 보이는 마이크로파일은 파일의 설치방법에 따라 지지효과가 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 좀 더 효과적인 설치방법을 강구하기 위해 국내·외의 많은 연구자들은 최근까지 현장시험, 실내 모형시험 등과 같은 다양한 방법을 통해 연구를 수행하고 있다. 현장시험을 통해 설치방법을 제안한 Lizzi(1982)는 설치각도( $\theta$ )에 대해서는 고려하지 않고 있으나, 지반의 특성에 따라 파일길이(L)를 10~30m, 파일간격(s)을 직경(d)의 3~4배 정도로 설치할 것을 제안하고 있다.

Tsukata 등(2006)은, 모형시험을 통해, 각도를 달리하여 파일을 설치한 경우의 지반 지지력에 대해 비교·분석하였다. 시험결과를 통해 파일의 설치각도를 30°경사를 두어 지반에 설치할 것을 제안하였다.

이와 임(2006)의 연구결과를 보면 기초를 대상으로 한 경우, 파일길이를 기초폭(B)의 4배이상 설치하는 것

이 바람직한 것으로 제안하고 있다.

위와 같은 결과를 볼 때, 마이크로파일을 설치하는 경우, 파일간격은 직경의 3~4배, 파일길이는 기초 폭의 4배이상, 그리고 파일의 설치각도는 30°내외로 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

그러나 대부분의 기존 연구결과는 토사 또는 점토지반을 대상으로 한 경우이다. 만약 암반층이 지반에 존재하는 경우, 마이크로파일의 설치방법이 달라질 수 있다. 왜냐하면 Poulos and Davis(1980)의 문헌을 보면, 파일 길이에 따른 파일직경의 길이비에 따라 파일의 강성이 달라지기 때문이다. 일반적으로 장단주 효과를 적용하는 길이비(L/d)는 10이다. 만약 단주에 해당하는 경우(L/d < 10), 기존 강재파일과 동일하게 설계·설치하는 것이 바람직할 것이다. 또한 Han and Ye(2006)의 연구결과를 보면(현장시험 시 적용한 파일의 길이비(L/d)  $\approx 40$ ) 단주인 강재파일과 같이 고려하여 마이크로 파일의 지지력을 산정한 경우, 산정값과 예측값이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나 현장에서 사용하고 있는 마이크로파일은 목적에 따라 선택하는 파일직경이 다르나 일반적으로 사용하는 파일직경은 200mm내외이며, 파일길이는 약 30m정도 내외에서 적용하고 있다(FHWA, 2005). 이러한 경우, 파일 길이에 대한 파일직경의 길이비는 150내외로, Poulos and Davis가 연구한 바와 같이(L/d  $\geq 100$ ; Slender pile), 가는 파일(Slender pile)로 구분할 수 있다. 이 조건(길이비 등과 같은 조건을 고려한 경우)에서 기존파일과 동일하게 설계적용하는 것은 다소 의문이 든다. 또한 아직까지도 논란이 되고 있는 부분인 마이크로파일을 연성파일로 고려할 것인가(Tsukata 등, 2006)에 대해서도 역시 마찬가지이다. 그러나 분명한 것은, 위와 같은 사항을 고려해 볼 때, 토사지반보다 강성이 큰 암반층의 위치에 따라 파일의 강성이 달라질 수 있다. 그리고 암반층의 위치에 따라 설치방법을 달리할 경우, 파일의 지지효과는 달라질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 암반층의 깊이에 따른 효과적인 마이크로 파일의 설치방법(파일길이(L), 파일각도( $\theta$ ))을 제안하기 위해 모형시험을 실시하였다. 그리고 모형시험 시 나타난 각 경우별 시험결과를 통해 암반층의 깊이에 따른 마이크로파일의 효과적인 설치방법을 제안하였다.

## 2. 실내 모형시험 및 시험조건

지반내의 암반층의 위치에 따른 효과적인 설치방법

을 알아보기 위해, 본 연구에서 사용한 토조의 크기(길이×높이×폭)는 1200mm× 800mm× 500mm이다.

시험 시, 토조내에 모형 암반층을 형성하는 경우, 표면에 거친 콘크리트 블록을 쌓은 다음 콘크리트 표면에 얇은 고무판(2mm)을 설치하였다. 얇은 고무판 설치한 목적은, 하중 재하 시, 암반층 표면에 접해있는 파일선단부의 미끄러짐을 최대한 방지하기 위함이다. 암반층 형성 시 이용한 콘크리트 블록의 크기(길이×높이× 폭)는 250mm×100mm×400mm이다.

실내 모형시험은 지반을 균질하게 조성하는 것이 중요하다. 그리하여 시험기 내에 설치된 강사장치를 이용하여 모형 암반층 위에 지반을 조성하였고, 조성한 지반의 물성치는 표 1과 같다. 조성한 지반의 강도정수( $c, \phi$ )는 직접 전단시험을 실시하여 구하였다. 지반을 조성하는 경우, 검정 모래를 지반 내에 얇게 조성하여, 육안으

로 지반 파괴형상이 관찰되도록 하였다(검정모래 층당 표시간격=50mm). 또한 파일이 설치된 위치를 검정 모래로 표시하여 하중재하 시 변화되는 거동을 관찰할 수 있게 하였다. 이러한 과정을 통해 조성한 지반은 그림 1과 같다.

모형 기초는 강판으로 제작하였고, 제작한 모형기초의 크기(길이×높이×폭)는 100mm×20mm×500mm 이다. 그리고 제작한 모형 기초의 바닥부에는 5mm두께의 고무판을 부착시켜, 가능한 접지압이 고르게 발생하도록 하였다.

모형 파일은 직경이 200mm인 원형 마이크로 파일을 모델로 하였다. 모형파일을 제작하는 경우, 모형 기초와 같이 길이에 대한 축소비(1/35)를 적용하면 요구되는 파일의 직경은 6mm이다. 이 경우, 상대적으로 모형 파일의 강성이 강성 축소비를 적용한 경우에 비해 요구되는 파일직경보다 클 수 있다. 또한 앞 절에서 말한 바와 같이 파일길이에 따라 파일강성이 영향을 많이 받으므로, 본 연구에서는 길이비 1/35에 해당하는 강성 축소비를 적용하여 파일을 제작하였다. 이 때 요구되는 모형 파일의 직경은 약 2mm(=2.13mm)이며, 본 연구에서는 직경 2mm인 스틸 바(Steel Bar)를 이용하여 모형파일을 제작하였다. 모형 파일표면은, Tsukada 등(2006)이 적용한 방법과 같이 모래를 부착시켜 파일과 지반사이에서 주면마찰력이 발휘되도록 하였다. 모형시험 시 마이크로 파일 크기와 형태는 그림 2와 같다.

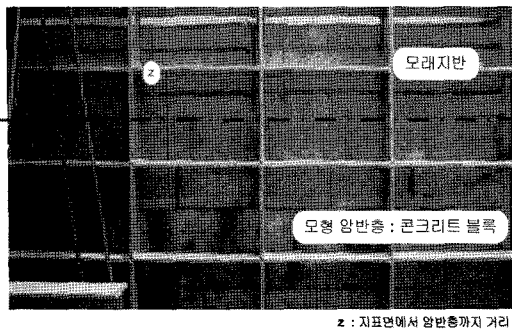


그림 1.  $z=2B$ (B:기초 폭)인 경우, 조성된 지반

표 1. 지반 물성치

비중(Gs)	2.64
단위중량( $\gamma_d, kN/m^3$ )	15.50
상대밀도(%)	$52 \pm 2$
전단저항각( $\phi$ )	$31^\circ$
점착력( $c, kN/m^2$ )	0

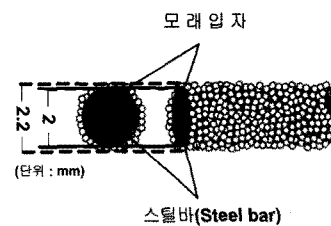


그림 2. 모형 파일의 구조 및 규격

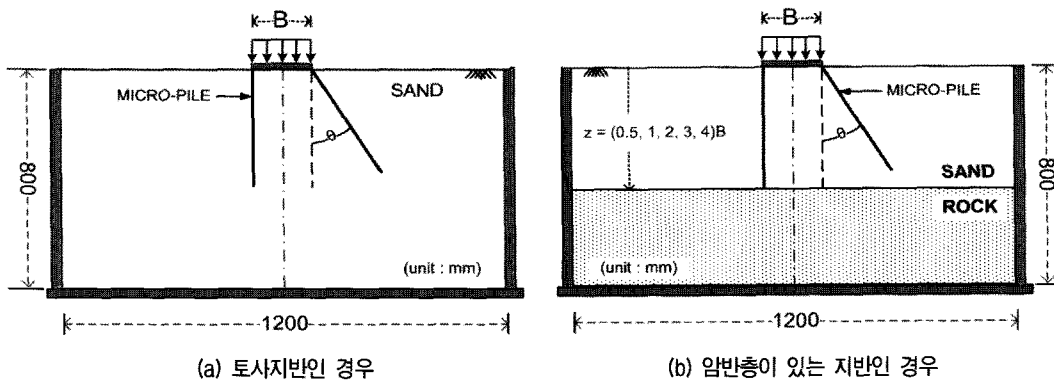


그림 3. 모형 마이크로파일 설치방법

표 2. 모형시험조건

Testing Type	Soil Condition		Installed Method of Micro-Pile		Notation
	Soil Layer	Depth of Rock Layer (z)	Length (L)	Gradient ( $\theta$ )	
Bearing Capacity of Soil	Sand	-	-	-	$q_s$
		0.5B	-	-	$q_{sr}(z=0.5B)$
		1B	-	-	$q_{sr}(z=1B)$
		2B	-	-	$q_{sr}(z=2B)$
Bearing Capacity of Reinforced Soil	Sand	-	1B	0°	$q_s(B-0)$
		-	1B	30°	$q_s(B-30)$
		-	4B	0°	$q_s(4B-0)$
		-	4B	30°	$q_s(4B-30)$
	Sand	0.5B	0.5B	0°	$q_{sr}(0.5B-0)$
		1B	1B	0°	$q_{sr}(1B-0)$
		2B	2B	0°	$q_{sr}(2B-0)$
		3B	3B	0°	$q_{sr}(3B-0)$
	Sand	4B	4B	0°	$q_{sr}(4B-0)$
		0.5B	0.5B	30°	$q_{sr}(0.5B-30)$
		1B	1B	30°	$q_{sr}(1B-30)$
		2B	2B	30°	$q_{sr}(2B-30)$
	Sand	3B	3B	30°	$q_{sr}(3B-30)$
		4B	4B	30°	$q_{sr}(4B-30)$

※ Relative Density of Soil ( $D_r$ ) =  $52 \pm 2\%$ , Breadth of Foundation = B

그림 3과 표 2는 본 연구에서 적용한 시험조건과 각 경우별, 파일 설치방법을 나타낸 것이다. 토사지반만 존재하는 경우에는 파일 설치방법은 기존 연구결과에서 제시한 방법을 적용하였다(길이(L)=4B; 각도( $\theta$ )=0°, 30°; 간격(s)=3d). 그리고 지반파괴깊이 따라 지지력이 달라질 수 있으므로 추가적으로 지반파괴깊이에 해당하는 파일 길이(L)=1B인 모형파일을 설치하여 지지력시험을 실시하였다. 암반층이 존재하는 지반에 모형파일을 수직으로 설치하는 경우 암반층 표면에 접하도록 설치하였다.

경사지계 파일을 설치하는 경우, 암반층에 접하도록 파일을 설치하면 파일길이가 길어진다. 이 경우 수직인 경우에 비해 길이비가 커지게 되므로, 동일한 파일길이비(L/d)가 되도록 하기 위해, 파일 설치길이는 수직으로 설치한 경우와 동일하게 적용하였다. 지반에 파일설치가 완료된 후에는 모형시험기에 설치된 재하 장치로 조성된 지반이 파괴될 때까지 하중을 가하였다(그림 4, 5 참조).

모형시험 시 나타난 각 경우별 측정된 결과 값은, 식 (1)과 같이, 비교·분석하여 암반층에 따른 파일의 설치 방법을 제안하였다.

$$BCR = q_{(s-m)} / q_s \quad (1)$$

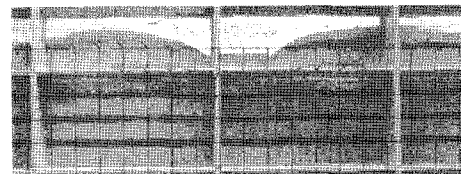


그림 4. 토사지반 파괴거동( $D_r=52 \pm 2\%$ )

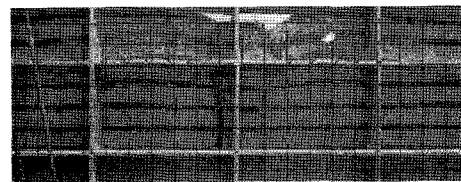


그림 5. 파일설치 시 파괴거동( $D_r=52 \pm 2\%$ )

여기서, BCR : 지지력 비(Bearing capacity ratio)

$q_{(s-m)}$  : 마이크로 파일이 설치된 지반의 지지력

$q_s$  : 원지반 지지력

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 토사지반인 경우, 지지력

파괴시점은, Han and Ye(2006)가 현장시험 시 적용한

것과 같이, 전체 축변형량( $\Delta\delta$ )이 기초폭(B)의 10%이상 발생한 경우로 하였다. 또한 10%내에서 지지력이 최대로 나타난 경우에는 그 시점을 파괴시점으로 하였다.

그림 4는, 모형시험 후, 발생한 전체 축변형율( $\epsilon_v = \Delta\delta/B$ )이 약 10%이상 발생한 경우에 나타난 토사지반 파괴형상이다. 그림에서 보는 것과 같이, 지반에 형성되는 파괴깊이는 기초폭의 약 1~1.5B정도인 것으로 나타났다. 이때 측정된 토사지반의 지지력( $q_s$ )은  $17.27kN/m^2$ 이다.

표 3은 토사지반을 대상으로 한 기존연구 지지력과 본 연구에서 모형시험 시 나타난 지지력을 비교한 것이다. 표에서 보는 것과 같이, 기존연구 결과에서 나타난 지지력 범위는  $14.39 \sim 19.58kN/m^2$ 이다. 본 연구에서 모형시험을 수행하여 측정된 지지력은 이 범위내의 중간정도에 해당되는 값이다. 이 결과를 통해, 본 연구에 적용한 파괴시점( $\epsilon_v \geq 10\%$ )일 때의 지지력을 극한지지력으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다.

그림 5는 토사지반에 모형파일을 수직으로 설치한 경우, 나타난 지반 파괴거동( $\epsilon_v \geq 10\%$ )이다. 그림에서 보는 것과 같이, 얇은 기초에서 나타나는 지반 파괴형상과 유사한 형태가 나타났다. 또한 파일이 설치된 위치를 표시한 검정 모래의 변위를 보면 지반과 파일의 수평변위가 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 6과 표 4는 토사지반과 모형파일을 설치한 지반에 하중을 가한 경우 측정된 지지력을 비교한 것이다. 측정결과, 파일길이 1B인 경우( $\theta=0^\circ, 30^\circ$ )에는 토사지반의 지지력과 거의 유사하게 지지력이 나타났다. 파일길이가 4B인 경우에는 경사지계 파일을 설치한 경우( $\theta=30^\circ$ )가 토사지반에 비해 1.8배 정도 지지력이 증가하는 것으로 나타났으며, 동일하게 조성한 지반조건에서 시험한 경우 중 가장 큰 효과를 보이는 것으로 나타났다. 위와 같은 결과를 통해 파일깊이는 지반 강도특성과 밀접한 관계를 가진 파괴깊이( $H_1$ )와 관련성이 큰 것을 알 수 있었다. 그리하여 본 연구에서는 파괴깊이와 관련된 깊이비( $\kappa = H_2/H_1$ )와 토사지반에 대상으로 한 기존연구와 본 연구에서 나

표 3. 극한지지력 비교

Terzaghi (1943)	$17.55kN/m^2$
Meyerhof (1951)	$14.39kN/m^2$
Soubra (1999)	$19.58kN/m^2$
Zhu et.al. (2001)	$16.02kN/m^2$
Silvestri (2003)	$17.67kN/m^2$
Model test ( $\epsilon_v=10\%$ )	$17.27kN/m^2$

※ For,  $c=0, \phi=31^\circ, q=0$

타난 지지력비를 비교해보았다. 여기서  $H_2$ 는 전체 파일길이(L)에서 지반파괴깊이를 뺀 값으로, 파괴깊이의 외부에 근입된 파일길이이다( $H_2 = L - H_1$ ; 이후 근입깊이로 칭함).

표 5는 기초 폭과 전단저항각( $\phi_{ave}$ )을 이용하여, 기존 연구와 본 연구에서 시험 시 조성한 지반의 예상되는 지반파괴깊이( $H_1$ )를 나타낸 것이다.

그림 7은 위와 같이 계산하여 얻은 깊이비( $\kappa$ )와 지지력비(BCR) 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이, 직각파일인 경우, 이와 임(2006)의 연구에서 나타난 결과값

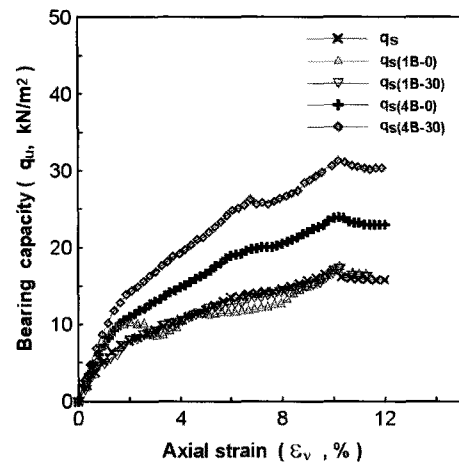


그림 6. 토사지반과 파일 설치된 지반의 지지력비교

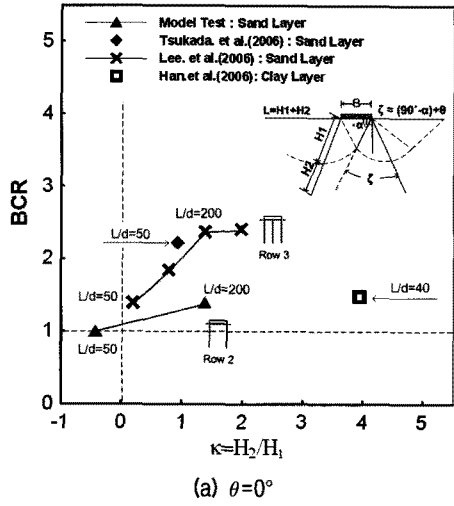
표 4. 극한지지력과 지지력비(BCR)

Notation	Ultimate Bearing Capacity	Ratio of Bearing Capacity (BCR)
$q_s$	$17.27kN/m^2$	1
$q_s(1B-0)$	$17.38kN/m^2$	1.01
$q_s(1B-30)$	$17.15kN/m^2$	0.99
$q_s(4B-0)$	$24.03kN/m^2$	1.39
$q_s(4B-30)$	$31.08kN/m^2$	1.80

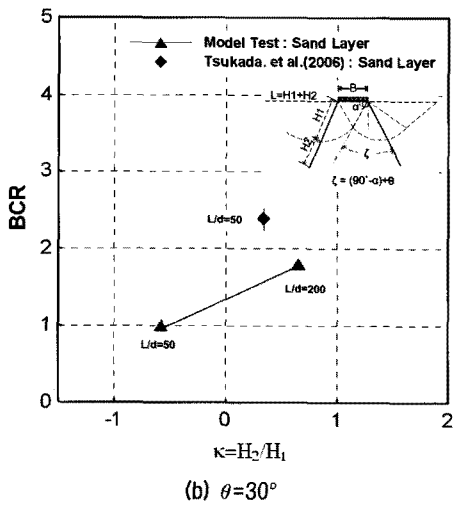
표 5. 기초폭(B)과  $\phi_{(ave)}$ 에 따른  $H_1$ 의 관계

	B (cm)	$\phi_{(ave)}$	$\theta$	$\zeta$ (rad)	L (cm)	$H_1$ (cm)
Model test	10	31°	0°	0.52	10	17.67
			30°	1.04	40	24.21
Tsukada. et al.	4	34.8°	0°	0.48	10	7.65
			30°	1.01		11.01
Han. et al.	250	14°	0°	0.66	800	319.9
Lee. et al.	10	40°	0°	0.44	20	21.5
					30	
					40	

※  $H_1 = B \cdot \exp[(\pi/2 - i) \cdot \tan\phi] \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$   
 $L = H_1 + H_2$



(a)  $\theta=0^\circ$



(b)  $\theta=30^\circ$

그림 7. 토사지반 경우  $\kappa$ -BCR 비교

(파일열 수=3)과 차이는 있으나, 깊이비가 증가함에 따라 지지력비 역시 증가하는 것으로 나타났다. 또한 지반의 지지력 증대효과를 위해 요구되는 근입깊이( $H_2$ )는 지반 파괴깊이의 1배 이상( $\kappa \geq H_2/H_1=1$ )인 것으로 나타났다. 경사파일인 경우는, 추가적 연구가 요구되나 근입깊이가 증가함에 따라 지지력비는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 기존 연구결과와 본 연구결과를 통해, 요구되는 근입깊이는 약  $0.35H_1$ 인 것으로 나타났다.

위와 같은 관계를 통해 파일길이는 지반 파괴깊이에 따라 달라질 수 있다. 또한 직각 또는 경사파일로 설치하는 모든 경우, 지반파괴깊이의 일정 근입깊이가 요구되는 것을 알 수 있다(본 연구 시, 직각 파일;  $\kappa \geq H_2/H_1 \approx 1$ , 경사파일;  $\kappa \geq H_2/H_1 \approx 0.35$ ).

### 3.2 암반층이 존재하는 지반인 경우, 지지력

그림 8과 표 6은 토사지반과 암반층이 존재하는 지반

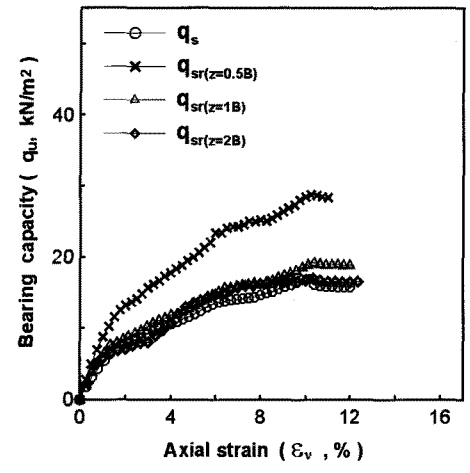


그림 8. 암반층위치에 따른 지반 지지력비교

표 6. 기존 연구와 지반 지지력 비교

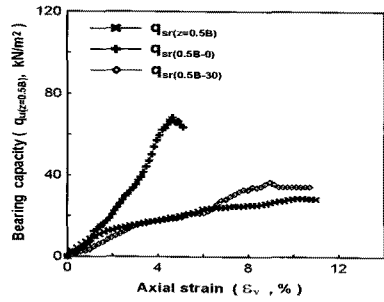
Depth of Rock Layer	Mandel 등 ( $kN/m^2$ )	$q_{sr}/q_s$	Model test ( $kN/m^2$ )	$q_{sr}/q_s$
$z=0.5B$	23.25	1.35	28.84	1.68
$z=1.0B$	14.73	0.86	19.17	1.11
$z=2.0B$	-	-	17.11	0.99

\* For  $\phi=30^\circ$ ,  $N_s^* \approx 30(z=0.5B)$ ,  $17(z=1.0B)$

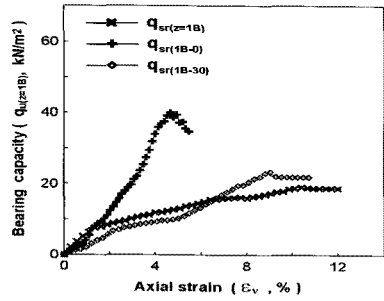
의 지지력을 비교한 것이다. 그림과 표에서 보는 것과 같이 암반층위치(z)에 따라 지반의 지지력이 달라지는 것을 알 수 있다. 특히 암반층위치가 2B이상인 경우( $z \geq 2B$ )는 원지반의 지지력과 거의 동일한 것을 알 수 있다. 또한 Mandel and Salencon(1972)의 연구결과와 비교하였을 경우 이론값에 적용한 지지력에 비해 본 연구 결과가 다소 크게 나타나는 경향이 있으나, 그리 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 9는 암반층이 존재하는 지반에 파일을 설치하는 경우 설치방법에 따른 지지력 결과를 비교한 것이다. 시험결과, 암반층의 위치에 따라 설치방법을 달리 한 경우 나타난 지지력이 달라지는 것을 알 수 있다.

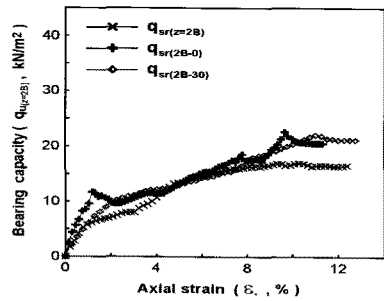
그림 10은 암반층위치에 따른 암반층깊이(z)와 파일 길이비에 따른 지지력비 변화를 나타낸 것이다. 암반층 위치에 따라 설치방법을 달리한 경우(그림 10(a)참조), 암반층위치가 1B이하( $z \leq 1.0B$ )인 지반에서는 파일을 연속으로 설치하는 경우가 경사지게 설치한 경우에 비해 지지력비가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 그러나 암반층위치가 2B이상( $z \geq 2.0B$ )인 지반에서는 경사지게 파일을 설치한 경우가 점차 지지력이 증가하는 것을 알 수 있다. 파일길이비(L/d)와 지지력비(그림 10(b)참조)의 관계를 보면, 길이비(L/d)가 25, 50( $L/d \leq 50$ )인 경우에 상당히 큰 지지력을 보이는 것으로 나타났다. 이는



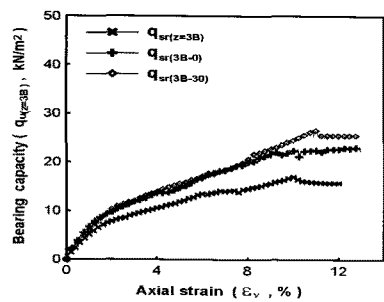
(a)  $z=0.5B$



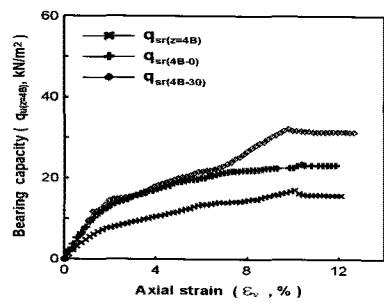
(b)  $z=1.0B$



(c)  $z=2.0B$

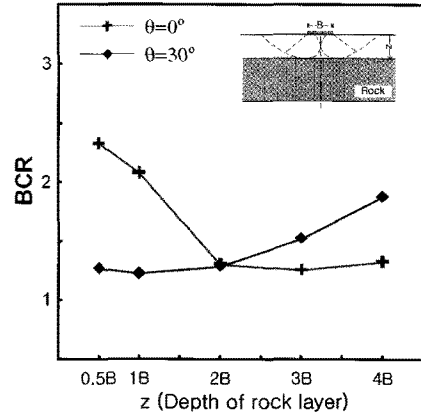


(d)  $z=3.0B$

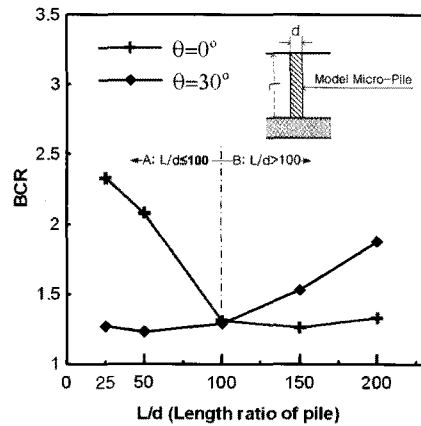


(e)  $z=4.0B$

그림 9. 암반층위치( $z$ )에 따른 지지력 비교



(a)  $z$ -BCR



(b)  $L/d$ -BCR

그림 10. 암반층위치  $z$ 와  $L/d$ 에 따른 지지력비변화

파일강성이 크기 때문에 나타난 현상으로, 기존파일과 같이 파일 선단에 위치한 암반층까지 하중을 파일이 지지하고 전달하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 그리하여 파일 선단부의 지지효과가 발휘되어 상대적으로 큰 강성을 가진 파일( $L/d \leq 50$ )의 경우에는 기존파일과 같이, 선단지지효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 유사한 결과는 현장시험을 통해 마이크로 파일의 지지특성을 연구한 Han and Ye( $L/d \approx 40$ , 2006)의 연구 결과를 통해서도 알 수 있다. 그러나 경사지게 설치한 경우에는 전체 파일길이가 지반 파괴영역 내에 존재하는 경우로 하중에 의해 발생한 수평토압에 파일전체가 영향을 받게 된다. 이러한 경우에는, 벽체 파일(Wall pile)과 같이, 지중에서 발생한 토압을 파일이 저항해야 하나 파일길이가 짧아(근입깊이,  $H_2=0$ ) 파일이 제 기능을 수행하지 못하여 지지력이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다.

암반층위치가 2B이상인 경우( $z \geq 2.0B$ ), 이 때 길이비는 100, 150, 200( $L/d \geq 100$ )으로, 가는 파일에 해당한다. 파일

깊이비가 100이상인 파일은 파일의 선단지지효과를 기대할 수 없으며, 파일의 지지특성은 파일길이와 무관하게 된다(Poulos and Davis,1980). 따라서 이 경우의 파일은 연성 파일이라 할 수 있으며, 이 파일은 기초에 작용하는 하중으로 인해 발생한 지중 수평변위를 구속시키는 벽체파일과 같은 형태가 된다. 그리하여 지반 수평변위 구속효과로 지반강성이 증가하여 상대적으로 지지력이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 수직으로 설치한 경우보다 경사지게 설치한 경우가 상대적으로 토압에 영향을 덜 받게 되므로, 이 경우의 파일은 파일을 수직으로 설치하는 것보다 경사지게 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 11은 본 연구에서 수행한 각 경우별 깊이비에 따른 지지력비(BCR)관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 수직으로 설치한 경우, 영역 A( $L/d \geq 50$  그리고  $H_1 \leq z$ )에서는 지지효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 암반층깊이가 증가함에 따라 지지력비는 점차 감소하여 일정 깊이비( $B; \kappa \geq 1$ )이상부터는 거의 일정해지는 것을 알 수 있다. 경사지게 설치한 경우, 영역 A에서는 지지력비가 거의 일정한 것으로 나타났으나, 일정 깊이비( $C; \kappa \geq 0.35$ )이상부터 점차 지지력비가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 위의 결과를 통해, 지반 파괴면 내에 단단한 지지층이 존재하는 경우( $H_1 \leq z$ ), 길이비( $L/d$ )가 50이하 이면, 파일을 수직으로 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한 동일한 조건으로 파일을 설치한 경우, 깊이비가 1이상인 경우에는 지지력비가 일정해지는 것으로 보아 큰 지지효과를 기대할 수 없는 것으로 판단된다. 암반층깊이가 지반파괴 깊이보다 깊고, 파일길이비가 50을 초과한 파일은 지반에 설치 시 경사지게 설치하는 것이 바람직할 것으로

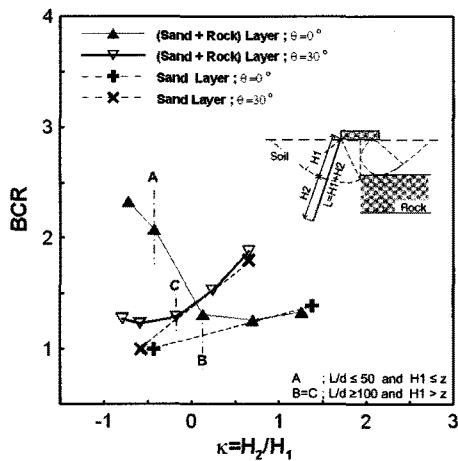
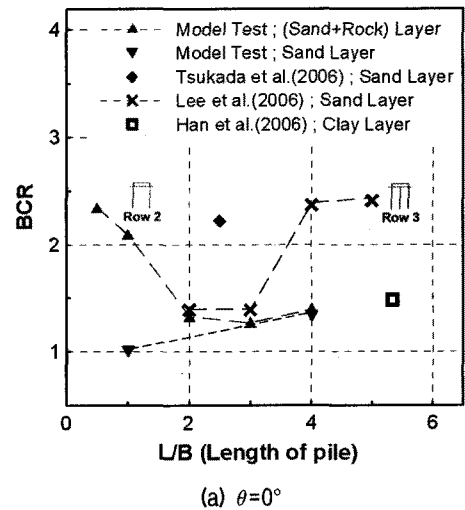


그림 11. 깊이비( $\kappa$ )-BCR 변화

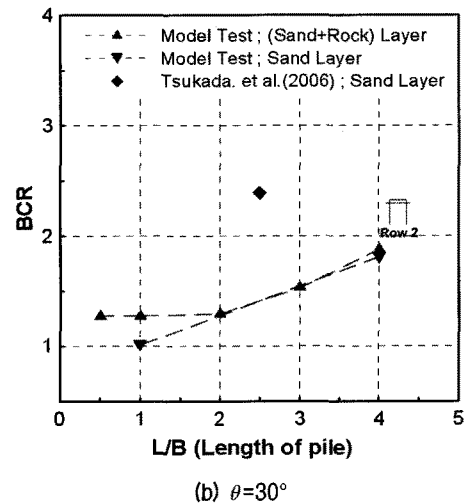
판단된다. 또한 마이크로 파일을 설치하여 지지력 증대 효과를 기대하기 위해서는 파일의 깊이비가 0.35이상 되도록 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 3.3 종합적 결과분석

그림 12는 기존연구와 본 연구에서 수행한 각 경우별 결과들 중에서 나타난 L/B-BCR관계를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이, 암반층이 존재하는 지반에 마이크로 파일을 수직으로 설치한 경우(그림 12(a) 참조), 이와 임(2006)의 시험결과와 상당히 유사한 경향을 보이고 있으며, 파일길이 1B이내에서 큰 지지효과를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 파일길이 2B이상인 경우( $L \geq 2B$ ), 토사지반에 동일한 조건으로 파일을 설치한 경우와 지지력비가 수렴되는 것으로 나타났다. 이는 파일길이에 따른 파일강성의 변화 때문인 것으로 파일강



(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 30^\circ$

그림 12. 기존연구결과와 비교(L/B-BCR)

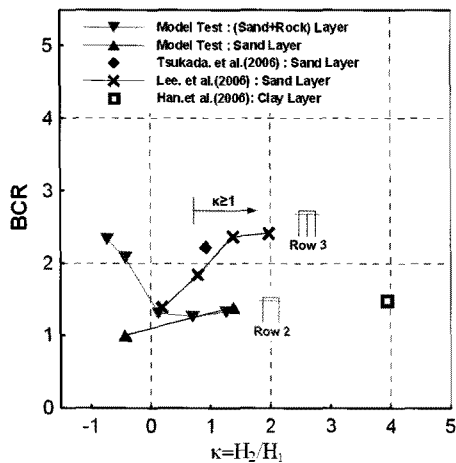


성이 감소할수록 파일길이는 파일의 지지효과와 무관하게 될 것이다. 따라서 파일의 선단지지효과가 발휘되지 않아 암반층이 얇은 깊이에 존재하는 지반인 경우에 비해 지지력이 감소하는 것으로 판단된다.

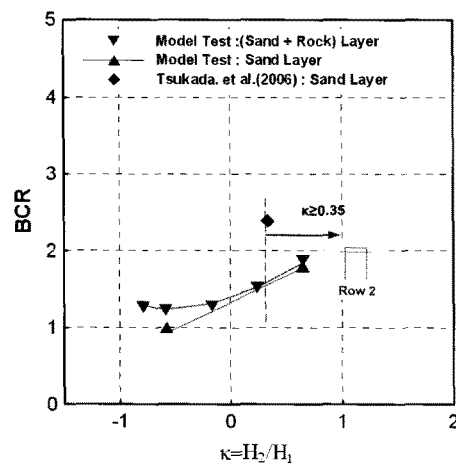
경사지게 설치한 파일(그림 12(b) 참조)은 파일길이가 1B 이하인 경우( $L \leq 1B$ ), 원지반에 비해 약간의 지지력증대 효과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 강성이 큰 암반층에 의해 지반이 구속되어 지지력이 약간 증가한 것으로 판단된다. 그러나 파일길이가 2B 이상인 경우( $L \geq 2B$ )는 원지반과 암반층이 있는 지반 모두 유사한 지지력비를 나타내고 있었으며, 길이가 증가함에 따라 지지력비 역시 증가하는 것으로 나타났다. 여기서 고려해 야 할 부분은 지반강성에 따라 형성되는 지반 파괴깊이이다. 왜냐하면 일률적으로 기초폭을 통해 파일길이를 결정한 경우 지반강성에 따라 지반 파괴깊이와 파일의 근입깊이가 달라질 수 있어 구조적으로 문제

가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 특성을 종합적으로 고려하기 위해 깊이비에 따른 지지력비 관계를 그림 13과 같이 나타내었다. 그림에서 보면 파일을 수직으로 설치한 경우(그림 13(a) 참조), 기존 연구결과와 모형시험 결과, 깊이비가 1이상인 경우( $\kappa \geq 1$ )에 지지력비가 거의 일정해지는 특성을 보이는 것으로 나타났다. 경사진 파일(그림 13(b) 참조)은, 깊이비가 0.35이상인 경우( $\kappa \geq 0.35$ ), 파일깊이비가 증가함에 따라 지지력비가 역시 점차 증가하는 것으로 나타났다.

그림 14는 기존연구와 본 연구 시 나타난 L/d-BCR 관계를 비교한 것으로 본 연구 결과와 유사한 경향을 얻을 수 있었다. 수직으로 설치한 지반의 지지력비를 비교해보면, 길이비가 50이하인 경우( $L/d \leq 50$ ), 기존 연구결과와 본 연구에서 나타난 지지력비는 약 1.5~2배 이상 증가하는 것으로 나타났다(그림 14(a) 참조). 또한 길이비가 100이상인 경우( $L/d \geq 100$ ), 토사지반인 경우의 지지력

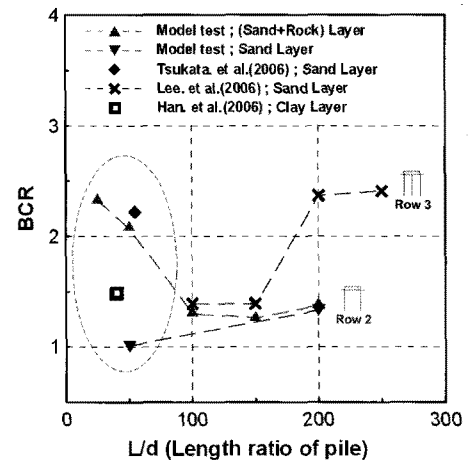


(a)  $\theta=0^\circ$

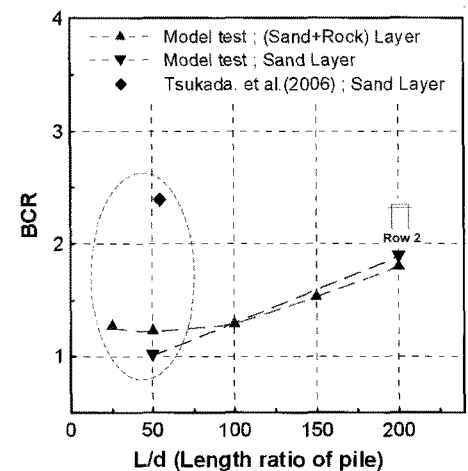


(b)  $\theta=30^\circ$

그림 13. 기존연구결과와 비교( $\kappa$ -BCR)



(a)  $\theta=0^\circ$



(b)  $\theta=30^\circ$

그림 14. 기존연구결과와 비교(L/d-BCR)

비와 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 파일길이에 따른 파일강성의 감소로 나타난 것이라 할 수 있다.

경사지계 설치한 경우, 본 연구에서 나타난 연구결과를 보면, 길이비가 50이상( $L/d \geq 50$ )에서는 지지력비가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 길이비가 100 이상( $L/d \geq 100$ )부터는 수직인 경우와 동일하게 토사지반의 지지력비와 거의 일치하였다. 수직인 경우에 비해 지지력이 증가한 요인은 경사진 경우가 토압에 영향을 덜 받게 되고, 상대적으로 수직인 경우에 비해 짧은 파일의 근입깊이로 지중에 발생한 토압을 파일이 저항할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 특성으로 인해 경사진 경우가 일정깊이이상 되면, 수직인 경우에 비해 지반의 지지력이 증가하는 것으로 판단된다.

위와 같은 결과를 통해 기존 구조물의 지반 지지력보강을 위해 마이크로 파일을 설치하는 경우, 우선적으로 구조물의 폭에 따른 암반층의 깊이가 지반 파괴깊이 내에 존재하는가를 따져본 후, 파일강성에 관련된 파일길이비를 고려해야 할 것이다. 왜냐하면 기초폭을 통해 파일길이를 산정하는 것은 다소 상대적일 수 있기 때문이다. 예를 들어, 기초폭이 1m인 경우와 10m인 경우에 요구되는 파일길이는 4m와 40m이다. 이러한 경우 동일한 파일 직경을 사용하는 것으로 가정하면, 파일길이비는 10배 정도차로 파일강성이 달라질 수 있다. 따라서 지반 파괴깊이 내에 암반층이 존재하는 경우, 파일길이 비가 50이내이면 수직으로 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 파일길이비가 50을 초과한 경우에는 파일강성이 급격하게 감소하게 되므로 경사지계 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 암반층이 존재하는 지반에 마이크로 파일을 설치하는 경우, 최적의 설치방법을 모색하기 위해 축소모형시험을 실시한 것이며, 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기초폭(B)을 기준으로 마이크로파일 설치깊이를 결정하는 것은 상대적일 수 있다. 따라서 기초크기와 지반 강도 특성을 고려하여 지반파괴깊이( $H_1$ )를 산정한 후, 파일길이를 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (2) 파일강성과 관련된 파일길이비가 50이하이면( $L/d \leq 50$ ), 암반층위치(z)에 관계없이( $z \leq H_1$  또는  $z \geq H_1$ ), 마이크로파일을 수직으로 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- (3) 파일길이비가 50을 초과하고( $L/d > 50$ ), 암반층위치(z)가 지반파괴깊이보다 깊으면, 파일강성이 감소하여 연성파일과 같은 특성을 보이게 되므로, 마이크로파일을 경사지계 설치하는 것(본 연구와 기존연구, 제안한 설치각도( $\theta$ )=30°)이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 암반층위치(z)가 지반파괴깊이( $H_1$ )보다 깊으면, 파일의 일정 근입깊이( $H_2$ )가 요구된다. 이 때 수직파일인 경우 대략 지반파괴깊이의 1배정도의 파일근입깊이를 두어 설치하는 것이 바람직할 것이다. 또한 경사진 파일인 경우에는 적어도 지반파괴깊이의 0.35배이상 근입깊이를 두어 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구는 축소모형시험을 통해 위와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 그러나 모형시험 시 사용한 모형파일과 실제 파일의 역학적 특성이 다를 수 있으므로, 현장시험과 같이, 원형파일을 대상으로 한 연구가 추가적으로 요구된다.

#### 참고 문헌

1. 이태형, 임종철 (2006), “조밀한 모래지반의 기초하부에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권, 제3C호, pp.191-200.
2. FHWA (2005), “Micropile Design and Construction”, United States Department of Transportation, No.FHWA NHI-05-039, December.
3. Han, J. and Ye, S.L. (2006), “A Field Study on The Behavior of a Foundation Underpinned by Micro-piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.1, pp.30-42.
4. Lizzi, F. (1982), “Static of Monuments”, Sage Publisher, Genoa, Italy.
5. Mandel, J. and Salencon, J. (1972), “Force Portante d'un sol sur Assise Rigide (etude theorique)”, *Geotechnique*, Vol.22, No.1, pp. 79-93.
6. Meyerhof, G.G. (1951), “The Ultimate Bearing Capacity of Foundation”, *Geotechnique*, Vol.2, No.4, pp.301-332.
7. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980), “Pile Foundation Analysis and Design”, John Wiley & Sons, INC., New York, pp.71-142.
8. Silvestri, V. (2003), “A Limit Equilibrium solution for Bearing Capacity of Strip Foundation on Sand”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.2, pp.351-361.
9. Soubra, A.H. (1999), “Upper-Bound Solutions for Bearing Capacity of Foundations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.1, pp.59-68.
10. Terzaghi, K. (1943), “Theoretical Soil Mechanics”, John Wiley and Sons, New York.
11. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., and You, G. (2006), “Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforcing with Micro-piles”, *Journal of Soil and Foundation*, Vol.46, No.3, pp.367-376.
12. Zhu, D.Y., Lee, C.F., and Jiang, H.D (2001), “A Numerical Study of The Bearing Capacity Factor  $N_\gamma$ ”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.5, pp.1090-1096.

(접수일자 2010. 3. 15, 심사완료일 2010. 6. 24)