

# 최적의 정착길이 산정을 위한 인발시험에 대한 수치해석\*

박병수\*\*, 심도식

본 연구에서는 마이크로 파일로 지반보강을 하기 위하여 현장인발시험의 하중-변위 결과 자료를 이용하여 마이크로 파일의 최적의 정착길이 산정을 위한 수치해석을 실시하였다. 퇴적층 하부 풍화암층에 장착한 마이크로 파일의 타설조건에 대하여 허용인발지지력을 산정하기 위하여 기존의 이론식과 경험식을 사용하여 분석한 결과, 10배 이상의 상이한 결과를 나타냄을 확인하여 기존식 적용시 유의하여야 할 것으로 판단된다. 지반조건 및 마이크로파일 물성에 적합한 대표값을 적용하여 수치해석을 수행한 결과, 하중-변위 특성에 대한 현장 인발 실험결과와 유사한 분석결과를 얻었다. 한편, 정착길이 변화에 의한 매개변수적 수치해석을 실시하여 주어진 설계하중에 대하여 최적의 정착장 길이를 산정하였다.

주제어: 현장인발시험, 마이크로파일, 최적의 정착길이

## 1. 서론

최근 도심지내의 좁은 구역 기초공사나 기존 건물의 리모델링과 같은 곳에서 기존 말뚝기초의 시공이 어려운 경우 마이크로 파일의 적용사례가 많아지고 있다.

마이크로파일은 150~300mm의 직경을 가지는 현장타설말뚝으로 정의되며 소구경 현장타설 파일의 한 종류로서 파일의 직경이 작기 때문에 좌굴이나 수평력에 대한 저항력이 대구경 파일에 비해 취약하다는 단점이 있으나 구조물이나 지반에 미치는 영향을 최소화 하면서 시공하는 것이 가능하다. 또한 소형장비로 시공이 가능하므로 협소한 기존 구조물 보강 및 역사 신·증축 공사, 작업공간에 대한 제약이 심한 도심지 근접 시공 등에서도 시공의 어려움이 거의 없으며 진동 및 소음 등의 민원문제가 발생치 않고 대구경파일과 동등이상의 지지력을 확보할 수 있다는 장점이 있어 그 필요성이 더욱 중요하게 인식되고 있다.

마이크로파일이 국내에서 활용된 시기는 1980년대에 처음으로 소개된 후, 1990년대 들어와서 사용

\* 본 연구는 강릉과학산업진흥원 지역산학연 공동연구개발 지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문에서 분석한 시험자료를 제공해 주신 (주)풍림산업의 정용일 소장님께 감사드립니다.

\*\* 교신저자.

빈도수가 점차 증가하고 있다. 이러한 추세를 반영하듯 마이크로파일을 활용한 연구는 최근 들어 다양하게 진행되고 있고 많은 부분에서 활용되고 있다. 그러나 이러한 연구 활동에도 불구하고 활용 조건에 따른 설계방안이 마련되지 않은 상태이며 현재 시공함에 있어 어떠한 규정 없이 현장 시공이 이루어지고 있는 것이 현실이다.

Lizzi(1978)는 파일의 간격과 배열 형식에 대한 실내 모형실험을 통하여 지반-파일의 상호작용에 의한 지지력 증감을 확인하였다. 또한 Guilloux 등(1983)은 지반과 보강재 사이의 마찰력해석을 통해 지지력에 미치는 영향을 알아보았고 Plumelle(1984)는 실물실험을 통하여 뿌리말뚝으로 보강된 지반의 지지력에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, Abbas(1984)는 파일로 보강한 연약지반의 탱크기초를 수치해석적 방법으로 해석하였고 Juran 등(1999)은 시공시 그라우팅 기술 및 방법이 마이크로파일 주변과 지반사이의 부착력에 영향을 주어 그라우팅 압력의 크기에 따라 4가지 형태로 마이크로파일을 분류하였다. 김무연(2004)은 마이크로 파일에 대한 현장 압축 및 인발 재하시험을 통하여 시공현장에서 장소가 협소하여 압축재하 시험으로 지지력을 확인하기 어려운 경우에 인장시험만으로도 소요의 지지력을 확인할 수 있다고 하였으며 최상익(2011)은 수치해석을 통하여 마이크로 파일을 이용한 흙막이 벽체의 보강효과를 알아보고 마이크로 파일의 설치방법에 따른 흙막이 벽체의 변위에 미치는 영향을 산정하였다. 또한, 정동진(2006)은 말뚝 캡이 씌워진 실물 크기의 마이크로파일 재하시험 자료를 바탕으로 3차원 비선형 유한요소해석을 실시하여 마이크로 파일과 래프트의 하중분담 거동을 분석하고 Case Study를 통해 각각의 변수들이 하중분담 거동에 미치는 영향을 파악하였다.

한편, 지반에 근입된 마이크로 파일의 인발력은 일반적으로 하중-변위에 의해 결정되므로 파일의 하중-변위 거동을 파악하기 위한 가장 좋은 방법은 현장 인발시험을 수행하는 것이다. 그러나 현장재하시험은 비용과 장비의 한계성을 가지기 때문에 수치해석을 통하여 파일의 거동을 예측할 수 있다면 실제 설계에 매우 유용할 것이다.

따라서 본 연구에서는 실제 건물증축 공사현장 지반의 지지력 확보를 위하여 현장 마이크로파일 재하시험을 수행한 자료를 획득하고 이에 대한 수치해석을 통하여 마이크로 파일의 거동을 비교 분석하는 한편, 현장 지반의 지지력 확보를 위한 마이크로 파일의 최적의 풍화암 근입심도를 알아보고자 하였다.

## II. 지지력산정에 관한 이론식

### 1. Meyerhof 이론식

Meyerhof(1973)는 연직 앵커의 순 극한 인발력은 식(1)과 같이 전체 극한인발력에서 파일의 유효자중을 뺀 식으로 나타내며, <그림 1>에 나타난 바와 같이 흙과 파일 경계면 마찰저항에 의하여 저

항하고 내부마찰각 변화에 따른 인발계수의 변화를 고려하여 모래 지반에 근입되어 있는 연직 앵커에 대한 순극한인발력( $Q_u$ ) 산정식을 식(2)로 제시하였다.

$$Q_u = Q_{u(g)} - W_p \tag{식 1}$$

$$Q_u = (\sigma'_o K_u \tan \delta) A_s \tag{식 2}$$

여기서  $\sigma'_o$  = 평균유효상재압,  $K_u$  = 인발계수,  $\delta$  = 흙과 파일의 경계면 내부마찰각,  $A_s$  = 근입된 파일의 표면적이다.

그리고 식(2) 에 나타난 바와 같이 평균 유효 연직응력( $\sigma'_o$ )과 표면적( $A_s$ )을 결합하여 식(3)과 식(4)로 나타내었다.

$$Q_u = \frac{1}{2} \gamma L K_u \tan \delta \pi D L = \frac{\pi}{2} \gamma D L^2 K_u \tan \delta \tag{식 3}$$

$$Q_u = A_s \bar{f} \tag{식 4}$$

$$\bar{f} = \frac{1}{2} K_u \gamma L \tan \delta$$

여기서,  $\bar{f}$  은 흙과 파일 경계면의 단위면적당 평균마찰저항을 나타낸다.

## 2. Das 이론식

Das *et. al.*,(1975)은 Mayerhof의 이론식을 확장하여 흙과 파일 경계면에서의 마찰저항을 산정하기 위하여 모래 지반에서의 모형시험에 의한 마찰형 파일의 극한인발력에 대한 실험치를 제시하고, 파일의 근입깊이에 따른 단위면적당 마찰저항( $f$ )의 다양한 결과치를 이끌어 냈다.

Das의 이론식은 주어진 파일에 대한 근입비  $L/D$ 를 산정하여 한계근입비  $(L/D)_{cr}$ 와 비교 만약,  $L/D \leq (L/D)_{cr}$  일 때 순극한인발력은 원형 단면과 정사각형 단면을 가진 파일에 대하여 식(5), (6)으로 나타내었다.

$$Q_u = \frac{\pi}{2} D \gamma L^2 K_u \tan \delta \tag{식 5}$$

$$Q_u = \left(\frac{1}{2}\right) (4D) \gamma L^2 K_u \tan \delta = 2D \gamma L^2 K_u \tan \delta \tag{식 6}$$

만약,  $L/D > (L/D)_{cr}$  일 때의 순극한인발력은 <그림 2>에 나타난 바와 같이 한계근입길이( $L_{cr}$ )까지의 마찰저항력과 한계근입길이 이하의 마찰저항력을 결합하여 전체 극한인발력을 식(7)로 제시하였다.

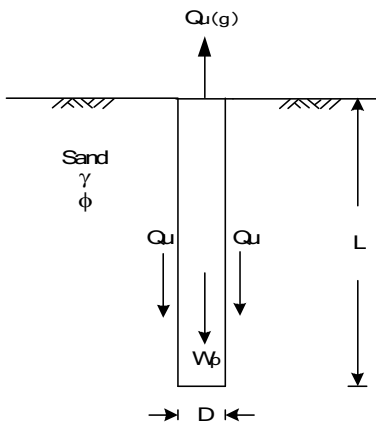
$$Q_u = \int_0^{L_{cr}} p f \cdot dz + p f_{(at\ z=L_{cr})} \cdot (L - L_{cr}) \tag{식 7}$$

### 3. N치에 의한 경험식

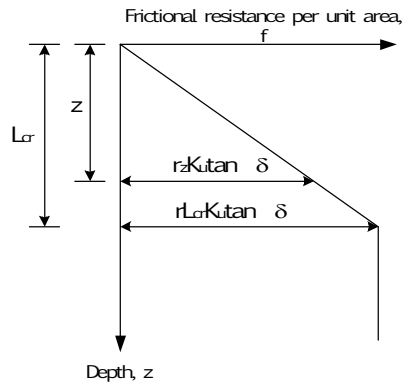
Fujita *et. al.*,(1978)은 현장시험과 연계된 해석모델에 의해 최대주면마찰력과 N치 사이의 직접적인 상호관계식을 제안하였다.

$$\bar{\tau}_{max} = 0.0584 \bar{N} + 0.546 \tag{식 8}$$

또한 일본 그라운드앵커기술협회에서 통계적으로 제안하고 있는 주면마찰력은 가압주입앵커에 대한 데이터를 통계적으로 정리한 것으로 영구앵커에 대해서는 크리프에 의한 변형량이 설계치 보다 큰 경향을 나타낼 수 있으므로 제시된 표의 사용 시 크리프 파괴에 대해 주의할 것을 요구하고 있다.



<그림 1> Micropile in sand ground



<그림 2> f value curve by depth

### III. 현장재하시험 자료분석

기존에 실시한 마이크로파일 현장 재하시험은 실제 건물증축 공사현장 지반의 지지력 확보를 위하여 실시한 것으로 현장 재하시험 자료를 다음과 같이 간략하게 요약하였다. 현장시험을 실시한 지역은 부산지역으로 시험구간의 지층구성은 퇴적층 16.5~18m, 풍화토층 3~10.5m, 풍화암층 21.0~28.0 m 로 구성되어 있고 시험은 풍화암 지반에 마이크로 파일을 정착시킨 시험을 실시한 것으로 파악하였다. 지반조사 결과에 의한 시험위치별 지층조건은 <표 1>과 같다(풍림산업, 2012).

### 1. 현장시험 내용 및 방법

현장인발시험은 마이크로 파일의 재하지지력 및 인발거동에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로 <표 2>에 나타낸 바와 같이 마이크로 파일의 전체장과 비정착장, 정착장 등을 변화시킨 현장재하 시험이다. 또한, 현장 재하시험에 사용된 마이크로 파일은 직경 165mm(보강용 강봉 65mm), 단면적 33.18cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.0×10<sup>6</sup> kgf/cm<sup>2</sup>, 항복강도는 166tf이다.

현장재하시험은 지표면에 Support Beam을 대칭되게 설치한 후 Support Beam 상부에 Main Beam을 설치하고, Main Beam 상부에 인발력을 가하기 위한 300t 용량의 Hydraulic Center Hole Jack을 설치하고 인발하중 측정을 위해 Load Cell을 설치하였다. 또한, Load Cell 상부에 Bearing Plate를 설치한 후 상부에 Nut를 체결하여 고정하고 텐던에 LVDT 측정을 위한 Jig를 부착하고 양쪽에 Reference Beam을 설치하여 0.01mm 정밀도를 갖는 LVDT로 텐던의 변위를 측정하는 것으로 파악되었다.

<표 1> Layer condition

Type		Site		
		A Zone	B Zone	C Zone
Layer thickness & Average N value	Weathered soil	15.5m /40	13.4m /40	10.8m /40
	Weathered rock	8.0m /50	20.0m /50	19.5m /50
Total Length		23.5m	33.4m	30.3m

<표 2> Type of field pullout tests

Site	Pile spec.	Total length (m)	Unbonded length (m)	Bonded length (m)
A Zone	φ165mm (Steel bar: 65mm)	23.5	15.5	8.0 (weathered rock)
C Zone		33.4	13.4	19.5 (weathered rock)
B Zone		30.3	10.8	20.0 (weathered rock)

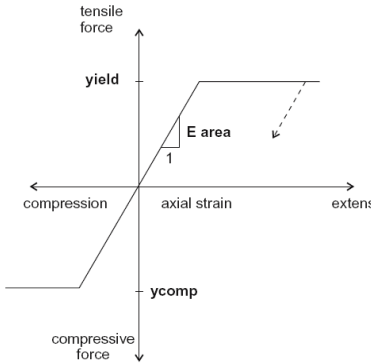
### IV. 수치해석

현장 재하시험 내용 중 마이크로 파일의 지반 정착길이를 변화시킨 3가지 경우에 대한 내용을 수치

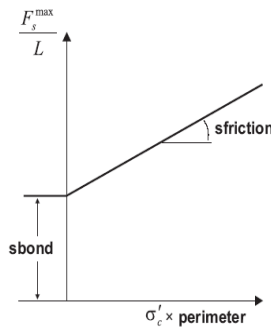
해석적으로 검증하고 풍화암에 근입시키는 최적의 마이크로파일을 알아보기 위하여 풍화암 근입심도를 변화시킨 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 수치해석 프로그램은 지반공학적 문제의 해석에 널리 사용되는 유한차분 범용 해석프로그램인 FLAC을 사용하였다.

### 1. 유한차분모델링

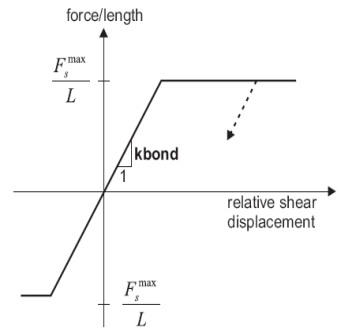
본 해석에서 사용된 지반 구성 모델은 탄소성 거동을 보이는 지반에 적합한 것으로 알려진 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 이에 대한 파괴규준을 따랐다. 또한 마이크로 파일의 인발저항에 대한 거동을 모사하기 위하여 <그림 3>과 같이 Cable 요소를 사용하였다. Cable요소는 그라우트 와 Cable사이 또는 원지반과 Cable사이의 전단저항(접합력)으로 앵커의 전단저항을 모델링하였다. Cable요소는 보강재의 전체길이에서의 변형에 대한 저항력을 고려할 뿐 아니라 그라우트체의 부분적 전단파괴를 모델링하는데 적합하다. 그라우트의 전단방향 거동은 전단스프링으로 모델링하였으며 보강재와 그라우트/원지반 사이의 상대변위에 의해 유발되는 그라우트체의 전단방향 거동은 <그림 4>에 나타낸 바와 같이 그라우트 강성에 의해 수치적으로 표현된다.



<그림 3> Cable element



(a) Grout strength



(b) Shear force-displacement

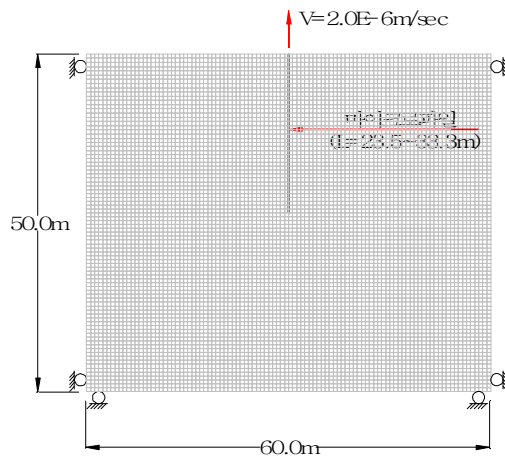
<그림 4> Behavior of grout material

### 2. 해석영역 및 유한차분 격자망

마이크로 파일의 인발시험을 모사하기 위하여 해석에 사용된 지반 및 재료의 물성값을 <표 3>에 나타내었고 <그림 5>에 나타낸 바와 같이 유한 차분 격자망을 구성하였다.

<표 3> Input data of material

Type	Weathered soil	Weathered rock	Tendon	Grout
Unit weight ( $tf/m^3$ )	1.9	2.1	-	-
$\phi$ (°)	30	33	-	-
$c$ ( $tf/m^2$ )	3.0	5.0	-	-
Poisson's ratio	0.35	0.33	-	-
Elastic modulus ( $tf/m^2$ )	4.0E+3	1.0E+4	2.0E+7	2.0E+6



<그림 5> FDM mesh

<그림 5>에 나타낸 바와 같이 해석영역의 크기는 수평방향을 60m 로 하여 인발에 의한 영향을 충분히 고려하였으며 수직방향은 마이크로 파일의 최대길이가 33.5m 인 점을 고려하여 50m로 설정하였다. 또한, 유한차분 격자망은 인발시험에 의한 지반의 국부파괴(Local Failure)를 반영하기 위해 정사각형(0.6m×0.6m)의 작은 크기로 격자망을 구성하였다. 한편, 인발시험을 모사하기 위해 Cable요소의 끝점에 미소한 크기의 일정속도  $v = 2.0E-06m/sec$ 를 작용시켰다.

## V. 결과분석

### 1. 이론 및 경험에 의한 지지력산정

현장에서 시험 시공한 마이크로 파일에 대하여 Meyerhof와 Das가 제안한 이론식에 의하여 지지력

산정시 마이크로파일 직경(D)은 165mm, 근입깊이(23.5~33.4m), 단위중량( $\gamma_t$ )은 풍화토 1.9tf/m<sup>3</sup>, 풍화암 2.1tf/m<sup>3</sup>를 적용하고, 내부마찰각( $\phi$ )은 풍화토 30°, 풍화암 33°, 상대밀도( $D_r$ ) 80%, 한계근입비  $(L/D)_c = 14.5$  ( $D_r \geq 70\%$ ),  $\delta/\phi=1$ 의 모래 지반으로 가정하였다.

한편, N치에 따른 지지력 산정은 지층별 평균 N치와 지층두께를 고려하여 Fujita *et. al.*,(1978)의 제안식과 일본 그라운드앵커기술협회의 지층과 N치에 따른 주면마찰력을 적용하여 산정하였다. 마이크로 파일의 지지력 산정시 다음 식(9)와 같이 작은 단면적으로 인하여 선단지지력은 무시하며 주면마찰력만 고려하여 지지력을 산정하였다.

$$Q_u = q_b A_p + f_s A_s = f_s A_s (\because q_b A_p \cong 0) \quad (\text{식 9})$$

여기서,  $q_b$  : 선단부 지지력(tf/m<sup>2</sup>),  $A_p$  : 말뚝 선단 단면적(m<sup>2</sup>),  $f_s$  : 말뚝주면의 극한지지력(tf/m<sup>2</sup>),  $A_s$  : 말뚝 주면부 면적(m<sup>2</sup>).

<표 4>에 상기 이론식과 N치에 따른 경험식으로 산정된 허용지지력(안전율 3.0)을 나타내었다.

허용지지력 산정결과 이론식과 경험식 모두 마이크로 파일의 길이가 증가할수록 허용지지력이 증가하였으며 A Zone은 18~160tf, B Zone은 26~274tf, C Zone은 24~256tf으로 나타났다.

허용지지력 값은 Fujita와 Meyerhof 값은 유사한 값을 나타내었으며 Das값이 가장 작게 나타났고 일본앵커협회가 제안한 경험식이 가장 크게 산정되었는데 Das값보다 9~11배 가량 크게 나타났다. Das가 제안한 이론식은 한계 근입깊이까지의 마찰저항력과 한계 근입깊이 이하의 마찰저항력을 결합하여 전체 극한인발력을 평가하나 한계 근입깊이 이상에서는 일정한 마찰저항력을 갖기 때문에 과소 평가되는 경향이 있다.

일본 앵커협회의 제안식은 압력식 그라우팅을 실시하는 앵커에 적합한 경험식으로 마이크로파일에 적용시 그라우팅 방법에 따라 적용여부를 판단해야 하는 것으로 나타났다.

## 2. 수치해석 결과

마이크로 파일의 풍화암 정착길이를 8m(A Zone), 20m(B Zone), 19.5m(C Zone)로 변화시킨 현장 재하시험과 수치해석의 하중-변위 결과를 비교하여 <그림 6~8>에 나타내었다.

그림에 나타낸 바와 같이 수치해석 및 현장재하시험 결과가 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 또한 풍화암의 정착길이가 증가함에 따라 한계하중값이 증가하였고 풍화암 정착길이가 19.5m와 20m는 거의 유사한 결과를 나타내었다.

풍화암 정착길이가 8m(A Zone)인 경우는 설계하중 50tf/분을 상회하는 56tf/분의 인발하중에 대한 변위가 상한과 하한선 사이에 나타나므로 마이크로 파일이 풍화암에 정착되어 안정한 것으로 나타났다. 그러나 풍화암 정착길이가 20m(B Zone), 19.5m(C Zone)인 경우는 100tf/분의 인발하중에 대한

변위가 하한선 보다 작게 나타나므로 마이크로 파일은 정착장 길이를 감소시켜도 안정성 확보가 가능한 것으로 나타났다. 따라서 현장 시험시공 된 3가지 종류의 마이크로 파일에 대해 현장실험 및 수치 해석 결과 B Zone(전체장=33.4m, 풍화암정착장=20m)과 C Zone(전체장=30.3m, 풍화암정착장=19.5m)에 시공된 마이크로 파일은 하한치 이하로 변위가 미소하게 나타나 설계하중 50tf임을 고려할 때 전체장 및 풍화암 정착길이가 과다한 것으로 나타났으며 A Zone(전체장=23.5m, 풍화암정착장=8m)에 시공된 마이크로파일은 하중 변위 그래프가 상한과 하한 사이에 위치하므로 설계하중 50tf에 대해 정착길이가 적절한 것으로 나타났다.

### 3. 최적의 마이크로파일 정착길이 산정

위의 해석결과를 바탕으로 설계하중 50tonf을 만족하는 최적 마이크로파일 길이를 알아보기 위하여 <표 5>에 나타낸 바와 같이 A Zone조건에서 풍화암 근입심도를 2, 5, 8, 10, 12, 15m로 변경하여 수치해석을 수행하였다.

풍화암 정착길이를 변화시킨 해석 결과를 <그림 9>에 도시하였다.

<표 4> Theoretical bearing capacity

Type		Allowable bearing capacity (tonf)		
		A Zone	B Zone	C Zone
Total Length (m)		23.5	33.4	30.3
Theoretical	Meyerhof	92	203	169
	Das	18	26	24
N-value	Fujita	125	186	170
	Japan anchor Associ.	160	274	256

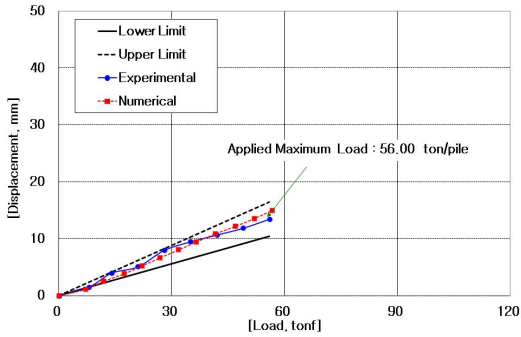
<표 5> List of numerical analysis

Content (A Zone)	Thickness(m)		Total length (m)
	Bonded length (weathered soil)(m)	Bonded length (weathered rock)(m)	
T-4-2	15.5	2	17.5
T-4-5	15.5	5	20.5
T-4-8	15.5	8	23.5
T-4-10	15.5	10	25.5
T-4-12	15.5	12	27.5
T-4-15	15.5	15	30.5

그림에 도시한 바와 같이 풍화암 근입심도가 2, 5m인 경우 하중-변위 그래프가 상한치 이상으로 안정성 확보가 어려운 것으로 나타났으며 풍화암 근입심도가 8, 10m인 경우 하중-변위 그래프가 상

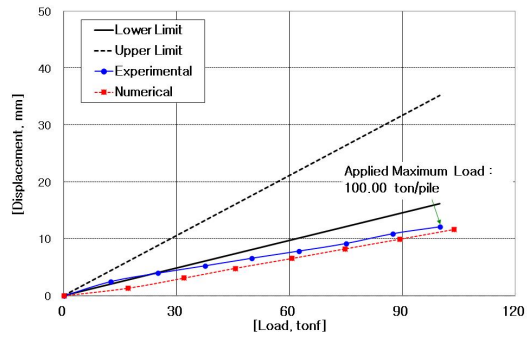
한치와 하한치 사이로 안정성 확보가 가능한 것으로 나타났다. 또한 풍화암 근입심도가 12, 15m인 경우 하중-변위 그래프가 하한치를 벗어나 근입심도가 과다한 것으로 나타났다.

따라서 상재하중 50tf 작용시 마이크로파일의 최적길이를 산정하기 위해 풍화암 근입심도를 변경하며 해석을 수행한 결과, 마이크로파일의 최적길이는 하중-변위 그래프가 상한과 하한의 중간범위에 위치하는 8~10m 사이인 것으로 분석되었다.



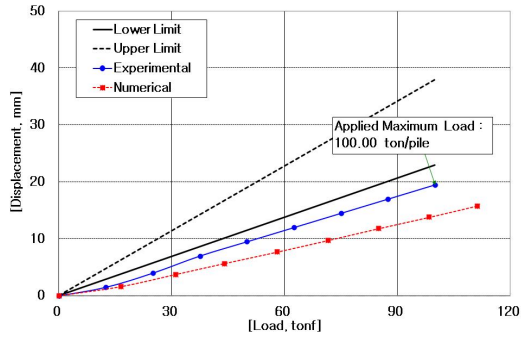
<그림 6> Load-displacement curve

(A Zone, Total length=23.5m, Bonded length=19.5m)



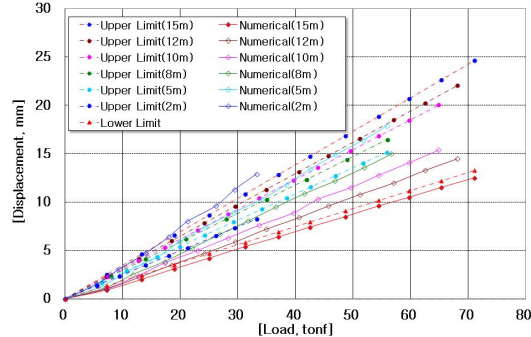
<그림 7> Load-displacement curve

(B Zone, Total length=33.4m, Bonded length=20m)



<그림 8> Load-displacement curve

(C Zone, Total length=30.3m, Bonded length=19.5m)



<그림 9> Load-displacement curve by embedded depth

## VI. 결론

본 연구에서는 현장 마이크로파일 인발시험의 자료로 부터 이에 대한 수치해석과 제안된 지지력식의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 풍화암에 근입되어 인발하중을 받는 마이크로파일에 대하여 유한차분의 수치모델링을 통하여 마이크로파일의 지지력을 예측하였다.
- 2) 마이크로파일의 지지력 산정을 위한 이론 및 경험식과 비교한 결과, 허용지지력 값은 Fujita와 Meyerhof 값은 유사한 값을 나타내었으며 Das값이 가장 작게 나타났고 일본앵커협회의 경험식은 Das 제안식 값보다 10배 정도 큰 값이 산정되었다.
- 3) 수치해석 및 현장재하시험 결과가 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었으며 풍화암의 정착길이가 증가함에 따라 한계하중값이 증가하였고 풍화암 정착길이가 19.5m와 20m는 거의 유사한 결과를 나타내었다.
- 4) 현장 시험시공 된 3가지 종류의 마이크로 파일에 대해 현장실험 및 수치해석 결과 B Zone(전체장=33.4m, 풍화암정착장=20m)과 C Zone(전체장=30.3m, 풍화암정착장=19.5m)에 시공된 마이크로 파일은 하한치 이하로 변위가 미소하게 나타나 설계하중 50tf임을 고려할 때 전체장 및 풍화암 정착길이가 과도한 것으로 나타났으며 A Zone(전체장=23.5m, 풍화암정착장=8m)에 시공된 마이크로파일은 하중 변위 그래프가 상한과 하한 사이에 위치하므로 설계하중 50tf에 대해 정착길이가 적절한 것으로 나타났다.
- 5) 마이크로파일의 최적길이를 산정하기 위해 풍화암 근입심도를 변경하며 해석을 수행한 결과, 마이크로파일의 최적길이는 하중-변위 그래프가 상한과 하한의 중간범위에 위치하는 8~10m 사이인 것으로 분석되었다.

## 참고문헌

- 김무연. 2004. 현장재하시험에 의한 마이크로파일의 지지특성. 건국대학교 석사학위 논문.
- 정동진. 2006. 마이크로파일 기초시스템의 하중분담 거동에 관한 수치해석 평가. 단국대학교 석사학위 논문.
- 최상익. 2011. 수치해석을 통한 마이크로파일의 흙막이 벽체 보강효과에 관한 연구. 세종대학교 석사학위논문.
- 풍림산업. 2012. Micropile 재하시험 보고서.
- Abbas, J.M. 1984. Analysis of Time dependent Laterally Loaded Pile in Clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 14: 1-10 .
- Das, B.M. and Seeley, G.R. 1975. Uplift Capacity of Buried Model Piles in Sand. *Journal of the Geotech.* 101: 1091-1094.
- Fujita, K., Ueda, K. and Kusabuka, M. 1978. A Method to Predict the Load Displacement Relationship of Ground Anchors. *Revue Francaise de Geotechnique*. 3: 58-62.

- Guilloux, A., Notte, G. and Gonnin, H. 1983. *Experiences of a Retaining Structure by Nailing in Moraine Soils*. Proc. of 8th Euro. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 473-476.
- Juran, I., Bruce, D. A., Dimillio, A. and Benslimane, A. 1999. Micropiles: The State of Practice. Part II: Design of Single micropiles and Groups and Networks of Micropiles. *Ground Improvement*. 3(3): 89-100.
- Lizzi, F., 1978. *Reticulated Root Piles: to Correct Landslides, ASCE Convention*. Chicago, Preprint.
- Meyerhof, G.G. 1973. *Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles*. Proc. 8th ICSMFE. 2(1): 167-172.
- Plumelle, C. 1984. *Improvement of the Bearing Capacity of Soil by Inserts of Group and Reticulated Micropiles*. Proc. of Int. Conf. of In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, 83-89.

---

**朴炳洙**: 강원대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 직접법에 의한 지반공학문제의 System Identification, 1999. 08), 현재 강원도립대학 건설토목과 교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 지반공학, 구조공학, 지반방재 등이며, 주요 논문으로는 “강원 영서지역 산사태 및 강우특성 분석(2012)”, “토석류 발생 사면의 불포화토 사면안정 해석(2012)”, “그라운드 앵커의 인발거동 및 파괴메카니즘에 대한 수치해석(2010)”. 등이 있다(bspark@gw.ac.kr).

**沈度植**: 강원대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 특별직교 이방성 복합판 이론에 의한 연속 콘크리트 슬래브교의 자유진동 해석, 1997. 08), 현재 강원도립대학 건설토목과 교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 구조공학, 지반방재 등이며, 주요 논문으로는 “강원도 순환골재 재활용 실태 및 활성화 방안(2012)”, “모르타르 봉 시험 방법을 적용한 쇄석 골재의 알칼리-실리카 반응성(2011)”, “급결제 종류 및 혼입량에 따른 습식 슛크리트의 응결 및 강도 특성(2011)” 등이 있다(claynsand@hanmail.net).

투 고 일: 2012년 08월 10일

수 정 일: 2012년 08월 27일

게재확정일: 2012년 09월 03일

## Numerical Analysis for the Pullout Test to Estimate the Optimum Length of Anchorage

Byung Soo Park, Do Sik Shim

In this study, field pullout test has been conducted to reinforce the ground with micropiles. Numerical analysis was performed to estimate the optimum length of anchorage of micropiles using the load–displacement results. Various existing theoretical and empirical equations were used to estimate the allowable capacity of micropile anchored at the weathered rocks underneath sedimented deposits. Different values of pullout capacity in order of 10 times were found to obtain so that cares should be paid to use to estimate the capacity appropriately. As results of numerical analyses by applying the typical values of ground condition and properties of micropiles, similar results of load and displacement relationship of micropile to field test result were obtained. On the other hands, parametric numerical analysis with changing the anchorage length of micropile was also performed to find the optimum anchorage length for the given design load.

**Key words:** field pullout test, micropile, optimum anchorage length