KGS Spring 2000 National Conference / March 25, 2000 / Seoul / Korea

연직 마이크로파일의 지반 지지력 및 강성 증대 효과에 관한 실험적 연구
An Experimental Study on Increasing Effect of Bearing Capacity and Stiffness by Vertical Micropile

*이상효[1], Sang-Hyo Lee, 임종철[2], Jong-Chul Im, 공영주[3], Yeung-Joo Kong

[1]부산대학교 토목공학과 석사과정, Master course Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.
[2]부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.
[3]부산대학교 토목공학과 박사과정, Doctor course student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

SYNOPSIS : In this study, the reinforcing effect of micropile for weathered rock is analysed by laboratory model tests. Especially, the effect of the number, the surface roughness, and length of micropile are focused. The results of tests are as follows: ① The deformation modulus of reinforced ground is less than equivalent deformation modulus, and ② Increasing effect of unconfined compressive strength is not large as times as increasing the number of micropile.

Key words : the model test, micro-pile, weathered rock, reinforcing effect

1. 서론

마이크로파일은 1950년대 초반 이탈리아에서 건물과 기념물에 대한 보강의 목적으로 구조물이나 인접 지역에 영향을 끼치지 않으면서 지반 변위를 최소화하고 시공성과 적용성이 높은 공법으로 고안된 이래 마이크로파일에 관한 관심과 기술 발전이 급속히 이루어져 왔다.

이러한 발전의 배경은 축하중에 대한 마이크로파일의 지지력이 우수할 뿐만 아니라 재래 말뚝의 설치 시 발생했던 지반 상태나 현장 상황의 제약조건을 상당히 극복할 수 있었기 때문이었으며 또한, 마이크로파일은 정적하중이나 지진하중을 받는 기초로서의 역할 뿐 만 아니라 사면 보강이나 굴착지반의 안정에도 활용될 수 있었기 때문이다.

그러나, 마이크로파일의 이러한 광범위한 활용에도 불구하고 현재 마이크로파일과 지반의 상호작용이나 거동이 역학적으로 명확히 밝혀져 있지 않고 있으며 설계방법에 있어서도 기준이 없이 경험에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 풍화암 지역에 연직 마이크로파일을 이용하여 기초 지반의 지지력과 강성을 개량하는 경우, ① 마이크로파일의 설치 개수, ② 시공 길이, ③ 표면 상태에 따른 영향을 파악하기 위하여, 기초적으로 모형지반에 대한 일축압축강도시험을 통해서 효과를 분석하여, 적절한 마이크로파일 설치 방법을 제시하고자 한다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험장치

① 시료 성형용 PVC몰드와 고정장치 : 모형 지반을 제작하기 위해 내경 20cm, 높이 50cm인 PVC 파이프를 사용하였다.
② 콘크리트 믹서 : 풍화토와 콘크리트를 혼합하기 위해, 80ℓ 용량의 콘크리트 믹서를 사용하였다.
③ 재하판 : 시료를 완성한 후 일축압축시험시 변형률게이지 리더선을 보호하기 위하여 두께 25mm의 철판을 홈을 파서 보조 재하판으로 사용하였다.
④ 변형률 측정장치 : 강관에 연직 방향으로 붙인 변형률게이지의 변형률을 측정하기 위해 UCAM-10A[1]를 이용하여 마이크로 스트레인(μs)의 단위로 출력값을 얻었다.
⑤ 하중재하장치 및 제어·계측장치 : 하중재하장치는 최대용량이 압축 200ton, 인장 200ton, ±0.5%의 정밀도를 가지는 UTM[1]을 이용하였다. 재하속도는 0.001~110mm/min이다.

2.2 모형지반의 제작

2.2.1 모형지반의 재료

풍화암[6] 모형지반을 제작하기 위한 재료는 그림 1과 같고, 풍화토는 부산 대연동 지하철 현장에서 채취한 것으로 직경 4.76mm인 체를 통과시킨 것을 사용하였으며, 모형 마이크로파일은 외경 22mm, 두께 1.4mm인 강관과 D22 원형철근, 이형철근으로 하였다.

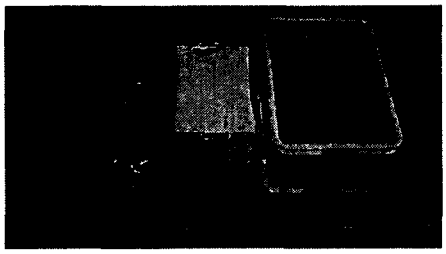


그림 1 모형지반의 재료

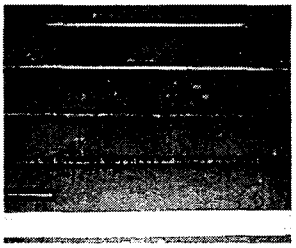


그림 2 모형 마이크로파일

2.2.2 모형지반의 제작

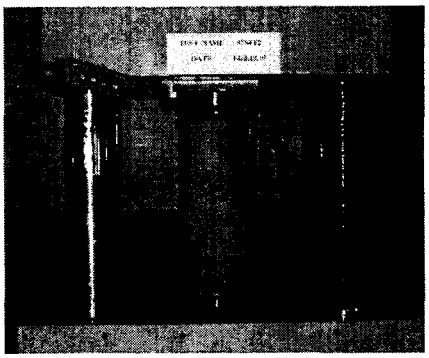
본 실내 실험에서는 모형 마이크로파일이 연직으로 설치된 PVC몰드에 풍화토와 시멘트를 혼합한 소일시멘트를 넣어 성형한 원형 모형지반을 제작하였다.

모형지반의 제작 순서는 다음과 같다.

① 시멘트와 풍하토를 실험종류에 따른 배합비로 혼합한다.
② PVC몰드에 모형 마이크로파일을 설치한다.
③ 시멘트와 풍화토 중량의 20%를 첨수한다.
④ 혼합한 소일시멘트를 모형 마이크로파일이 설치된 PVC몰드 속에 넣어 시료를 성형한다.
⑤ 1일 경과후 공시체를 캡핑한다.
⑥ 7일간 습윤양생시킨 다음 몰드로부터 분리한다.

2.3 실험방법

풍화암 모형지반은 소일시멘트의 강도와 모형 마이크로파일의 종류, 길이, 설치갯수를 다르게 제작하여, 각각의 경우가 지반 보강에 미치는 효과를 알아보기 위해 UTM(하중재하장치)을 사용하여 모형지반에 대한 일축압축시험을 실시하였다. 각 경우에 대하여 4개씩의 공시체를 제작하였고, 그 중 1개의 경우는 변형률게이지를 연직방향 11cm 간격으로 5개소씩 양면에 부착한 마이크로파일로 제작하였다.



그리고, 모형지반의 순수 소일시멘트의 강도정수를 구하기 위해 실내 요소시험을 실시한 결과 전단저항각(ϕ_u)은 34.75°, 점착력(c)은 48.45 kgf/cm^2였다.

그림 3은 완성된 모형지반에 대한 일축압축시험을 보여주고 있다. 그림 3 UTM에의한 압축시험

2.4 실험종류

본 실험에서는 실험명을 표 1과 같이 정의하였다.

예) S 3 S F F U(C)

S(P): 배합비 1:1(3:1), 3: 마이크로파일개수 3, S: 강관, F: 강관의 두부가 모형지반의 상면과 일치, F: 강관의 선단부가 모형지반의 하면과 일치, U(C): 자유(구속)

표 1 실험의 종류

실험명	풍화토:시멘트 중량 배합비		마이크로 파일 개수	마이크로파일의 종류			상하단부 길이		측면구속 여부
	1:1	3:1		강관	원형 철근	이형 철근	상단부 이격	하단부 이격	
S0U00U	*		0						
S1SFFU	*		1	*					
S3SFFU	*		3	*					
P0U00U		*	0						
P1SFFC		*	1	*					*
P3SFFC		*	3	*					*
S1DFFU	*		1			*			
S1RFFU	*		1		*				
S1SFDU	*		1	*				*	
S1SDDU	*		1	*			*	*	

2.4.1 마이크로파일의 설치 개수에 따른 실험종류

마이크로파일의 설치 개수에 따른 기초지반의 지지력과 강성 증대 효과를 파악하기 위하여 마이크로파일을 모형지반 중앙에 1개소 설치한 경우와 3개소 설치한 경우 그리고, 각각의 경우에 대해 모형지반 제작후 PVC몰드를 해체하지 않은 경우에 대해 압축시험을 실시하였다.

2.4.2 마이크로파일의 표면 거칠기에 따른 실험종류

마이크로파일로 사용된 재료의 표면 거칠기에 대한 영향을 분석하기 위하여 공칭단면적이 같은 D22 원형철근과 이형철근을 모형지반 중앙에 1개소씩 설치한 모형지반을 제작하여 실험하였다..

2.4.3 마이크로파일의 상·하단부 조건에 따른 실험종류

마이크로파일의 상·하단부의 조건에 따른 효과를 알아보기 위하여 마이크로파일의 두부와 선단부를 모형지반의 상하 표면에 일치하게 설치한 경우와 마이크로파일의 두부는 모형지반의 표면과 일치하게 두고 선단부를 말뚝직경만큼 띄우도록 설치한 경우, 마이크로파일의 두부와 선단부를 공시체 상·하 단면으로부터 직경만큼 떨어지게 한 경우에 대하여 압축시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

지지력과 강성 증대에 대한 평가를 위해 기초적으로 일축압축시험에서 얻은 응력~변형률 곡선에서 최대점인 압축강도와 할선탄성계수(E_{50})를 사용하였다. 계산에 의한 강도와 탄성계수는 복합 단면적에 대한 평균 강도와 등가환산탄성계수[4]로하였다.

3.1 마이크로파일의 설치 개수에 따른 효과

마이크로파일의 길이를 모형지반과 동일한 높이로 설치한 뒤 압축시험을 실시한 결과 구속이 없이 마이크로파일을 1개소 설치한 경우는 무보강에 비해 강도가 9% 증가하였다. 구속이 있는 경우에는 무보강, 1개소, 3개소 순서로 강도가 증가하였고, 1개소 설치한 경우에 비해 3개소 설치한 경우 강도는 5%, 탄성계수는 17% 크게 나타났다.(구속이 있는 경우, 무보강의 경우의 강도는 구속이 없는 무보강 강도에 대한 보정치임.) 주위의 구속이 없이 마이크로파일을 3개소 설치한 경우는 무보강에 비해 강도가 15% 적게 나타났다. 즉, 구속이 없는 경우에는 마이크로파일의 개수 증가에 따른 강도의 증가는 분명치 못한 반면, 구속이 있는 경우는 개수의 증가에 따라 강도는 계속 증가한 것으로 나타났다. 이는 현장 지반과 유사한 상태를 유지하기 위해 모형 지반을 구속한 경우, 일정한 크기의 재하판 아래 설치된 연직 보강재수의 증가는 지반의 강성 개량과 지지력 증대에 효과가 있을 것으로 판단된다. 그리고, 계산에 의한 강도와 비교해 볼 때, 지반의 구속이 없이 말뚝을 1개소 설치한 경우가 실험의 오차를 감안한다면 비교적 유사하지만 3개소 설치한 경우와는 잘 일치하지 않았다.

그리고, 탄성계수는 구속이 없는 경우 무보강의 경우에 비해 적은 값을 얻었고, 계산에 의한 등가환산탄성계수와는 차이가 있음을 알 수 있었다.

표 2 압축시험 결과

Test name	Unconfined compressive strength (kgf/cm^2)					Secant modulus of elasticity (kgf/cm^2)				
	Tested				Calculated	Tested				Calculated
	1	2	3	Average		1	2	3	Average	
S0U00U	236.3	249.8	244.2	243.4		43,194	43,510	43,518	43,408	
S1SFFU	287.1	276.5	229.4	264.3	255.5	41,073	42,374	38,374	40,563	49,050
S3SFFU	204.7	202.7	216.5	208.0	281.2	32,930	32,308	35,810	33,683	60,336
P0U00U	228.3	196.2	218.2	214.2						
P1SFFC	203.6	227.9	228.1	219.9		23,710	28,810	29,975	27,831	
P3SFFC	227.7	240.8	240.4	236.3		32,786	33,135	33,883	33,268	

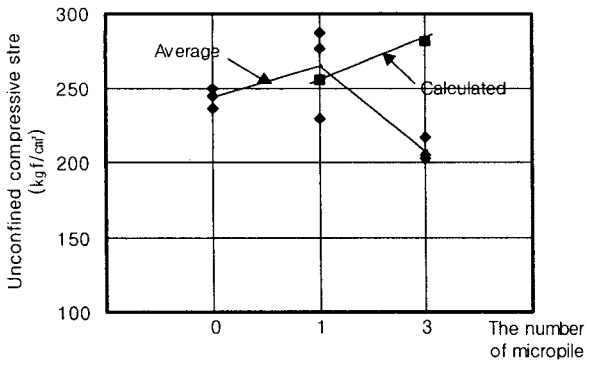


그림 4 구속이 없는 경우의 압축강도 비교
(마이크로파일 두부·선단부 구속)

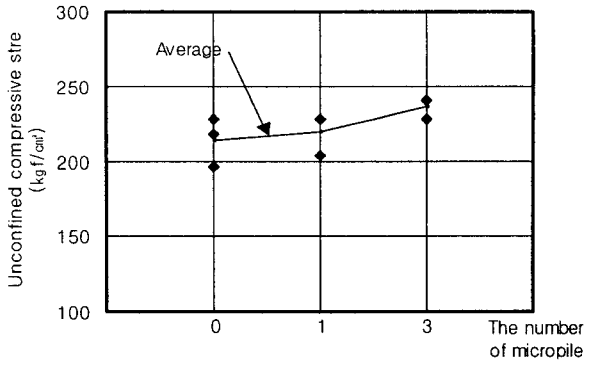


그림 5 구속이 있는 경우의 압축강도 비교
(마이크로파일 두부·선단부 구속)

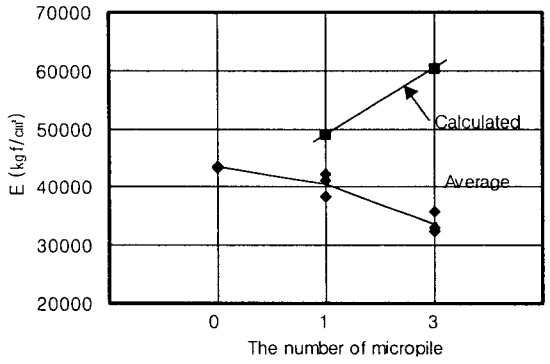


그림 6 구속이 없는 경우의 탄성계수 비교
(마이크로파일 두부·선단부 구속)

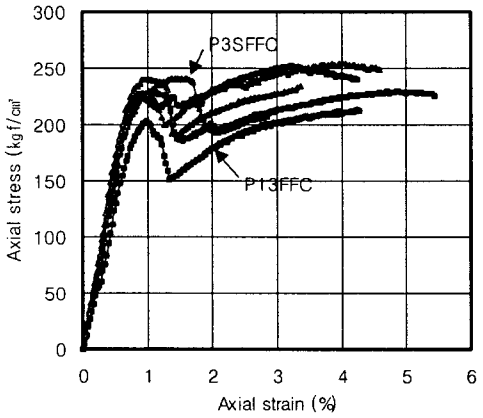


그림 7 구속이 있는 경우의 압축응력~변형률 분포도
(마이크로파일 두부·선단부 구속)

일반적으로 마이크로파일은 세장한 부재이어서 압축을 받을 때, 선단지지력은 무시되고 지반과의 마찰을 통해 하중을 지반으로 전달하지만, 본 실험과 같이 암에 구속이 없이 마이크로파일을 설치한 경우 지반의 강도가 크게 나타난 것은 말뚝의 선단 저항의 발휘가 원인이고, 마이크로파일을 3개소 설치한 경우가 1개소 설치한 경우에 비해 선단면적이나 표면적이 3배 큰 경우이지만 오히려 강도와 탄성계수가 적게 나타난 것은 말뚝의 선단저항은 커졌지만, 일정한 크기의 재하판 아래 비교적 조밀한 간격으로 설치되어 지반의 강도약화가 마이크로파일의 일축압축강도보다 크기 때문으로 판단된다.

구속이 있는 경우는 실험 종료후, 공시체를 조사해 본 결과 보강재가 찌그러지고 휘어져 있었고, 응력~변형률 곡선에서는 마이크로파일로 보강된 지반이 1차 피크점을 지난후 변형률의 증가와 강도의 저하 현상이 발생한 후 다시 강도가 증가하였는대, 이는 지반과 말뚝의 마찰이 부분적으로 해제되었지만, 구속압으로 인한 강도가 발휘되었기 때문이고 판단할 수 있다.

3.2 마이크로파일의 표면 거칠기에 따른 효과

말뚝의 표면 거칠기에 대한 영향을 알아보기 위해 마이크로파일을 공칭단면적이 같은 이형철근과 원형철근을 사용하여 시험하였다. 이때의 공시체의 측면은 구속하지 않았으며 시험의 결과, 강도와 탄성계수는 차이가 크지 않았다.

마이크로파일은 시공 방법의 결과로 인해 지반과의 높은 접착능력을 갖게 되고 이로 인하여, 선단지

지력보다 표면 마찰을 통해 하중을 전달하는 특성을 갖게된다. 그러나, 본 실험에서는 마이크로파일이 현장의 가압이 없는 중력식 그라우트[5]에 의해 시공된 경우와 유사하고, 이형 철근과 원형 철근의 표면적 차이가 크지 않은 이유로 실험상의 결과가 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 암반지역에 중력식 그라우트로 시공되는 연직 마이크로파일의 경우 표면 거칠기에 따른 영향은 크지 않을 것으로 판단할 수 있다.

표 3 압축시험의 결과

Test name	Unconfined compressive strength (kgf/cm^2)					Secant modulus of elasticity (kgf/cm^2)				
	1	2	3	4	Average	1	2	3	4	Average
S1DFFU	205.6	206.8	222.4	213.3	212.0	35,339	40,074	38,291	42,512	39,054
S1RFFU	215.6	200.8	237.9	243.4	224.4	35,659	34,921	41,179	43,388	38,787

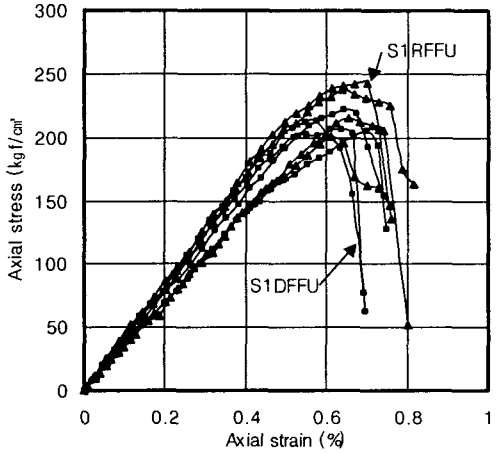


그림 8 압축응력~변형률 분포도
(마이크로파일 1개소, 두부 · 선단부 구속)

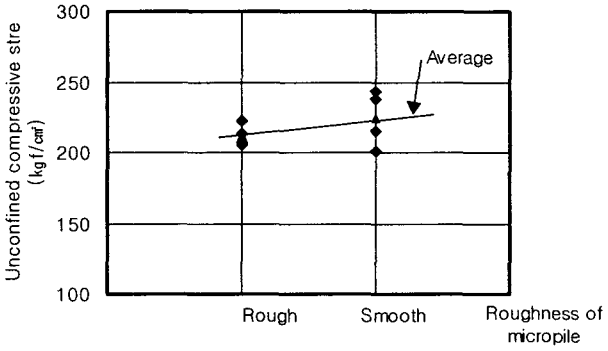


그림 9 표면거칠기에 따른 강도 비교
(마이크로파일 1개소, 두부 · 선단부 구속)

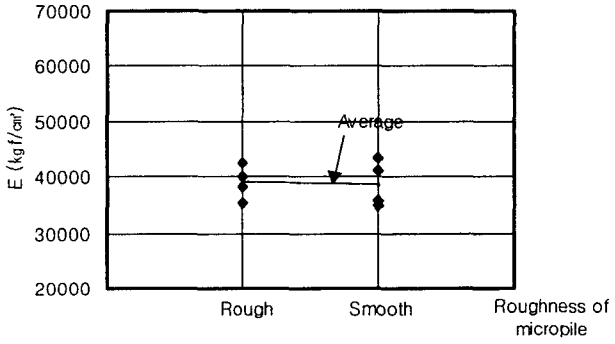


그림 10 표면거칠기에 따른 탄성계수 비교
(마이크로파일 1개소, 두부 · 선단부 구속)

3.3 마이크로파일의 상 · 하단부 조건에 따른 효과

실험의 결과 마이크로파일의 두부와 선단부가 모두 재하판과 접촉한 경우에 비해 선단부만 떨어지게

설치한 경우는 강도가 5% 저하하였고, 두부 선단부 모두 떨어지게 한 경우는 9% 적은 강도를 얻었다. 이는 설치 방법에 따라 5%~9% 정도의 강도 차이가 발생할 수 있음을 보여준다. 그리고, 탄성계수는 선단부만 떨어지게 설치한 경우가 무보강의 경우와 비슷하였고, 나머지 경우는 적게 나타났으며, 등가환산탄성계수와는 차이를 보였다.

마이크로파일로 보강된 지반의 압축재하에 대한 움직임은 복합지반의 변형계수와 지반과 보강재의 접촉면을 따라 발생하는 하중전이[5] 특성을 갖게 되는데, 마이크로파일로부터 주변 지반으로의 하중 전달은 재하동안에 발생하는 상대적인 움직임을 필요로 한다.

표 4 압축시험의 결과

Test name	Unconfined compressive strength (kgf/cm^2)				Secant modulus of elasticity (kgf/cm^2)			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
S1SFFU	287.1	276.5	229.4	264.2	41,073	42,242	38,374	40,563
S1SFDU	259.6	249.8	244.8	251.4	44,656	43,751	42,646	43,684
S1SDDU	241.2	226.7		241.2	41,547	37,213		39,380

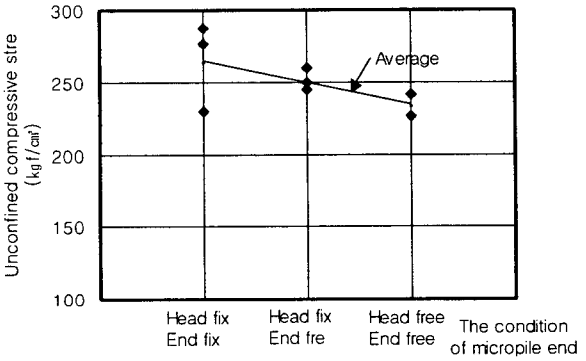


그림 11 단부의 접촉 조건에 따른 압축강도 비교 (마이크로파일 1개소)

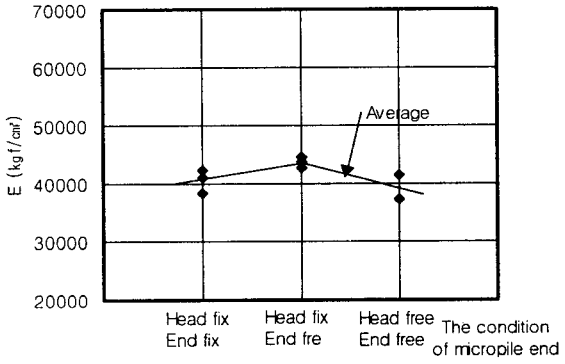


그림 12 단부의 접촉 조건에 따른 탄성계수 비교 (마이크로파일 1개소)

본 실험에서 변형률 분포를 검토해 보면 두부와 선단부가 모두 재하판에 접촉한 경우는 하중이 증가함에 따라 마이크로파일이 전 길이에 걸쳐 균일한 변형을 일으키고 있고, 두부와 선단부가 떨어진 경우는 마이크로파일에 편심이 작용한 것으로 보인다. 두부 접촉, 선단부 자유의 경우는 변형률이 크지 않은 것으로 보아 모형지반의 길이 방향으로 관입이 발생한 것으로 판단된다. 전 길이에 걸쳐 변형은 유사하고, 마이크로파일 상·하단부에서 변형률이 집중되는 현상은 발생하지 않았다.

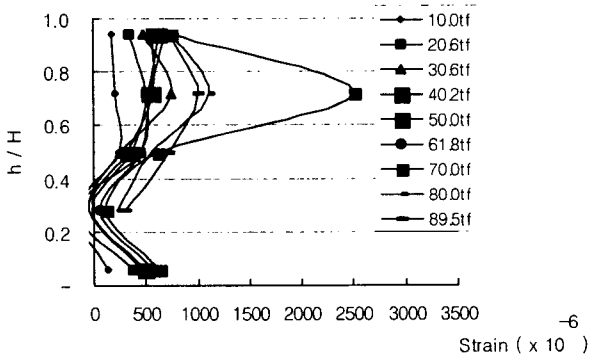


그림 13 마이크로파일의 변형률 분포도(S1SDD)

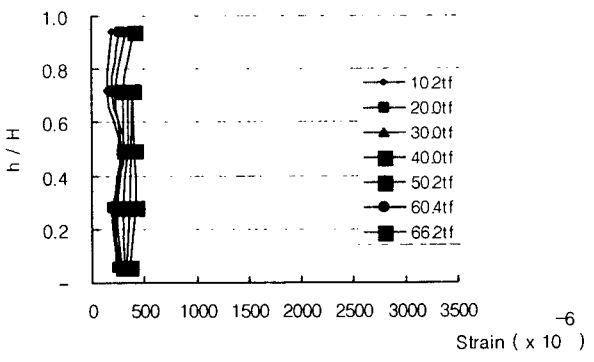


그림 14 마이크로파일의 변형률 분포도(S1SFD)

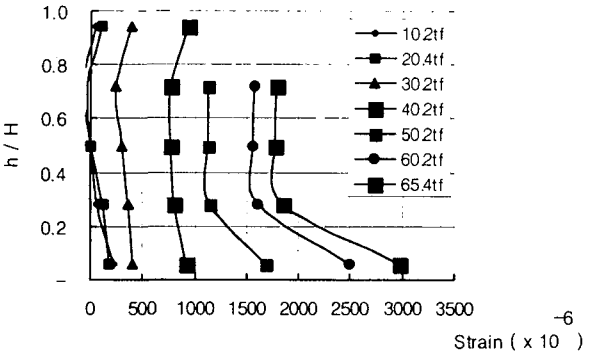


그림 15 마이크로파일의 변형률 분포도(S1SFF)

4. 결론

① 전체 실험에서 압축강도는 계산에 의한 강도의 73% ~ 103%, 탄성계수는 등가환산탄성계수의 56% ~89% 범위로 나타나, 연직 마이크로파일로 풍화암 지역을 보강하는 경우 등가환산탄성계수와는 잘 일치하지 않았다.

② 구속이 있는 경우 동일한 크기의 재하판에 대하여 무보강, 1개소, 3개소 순서로 강도가 증가하였고, 1개소 설치한 경우에 비해 3개소 설치한 경우 강도는 5%, 탄성계수는 17% 크게 나타났다.

③ 암지역에 중력식 그라우트로 시공되는 마이크로파일의 표면 거칠기에 따른 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

④ 마이크로파일의 상·하단부 설치 방법에 따라 5% ~ 10%의 강도 차이가 발생하였고, 마이크로파일 상·하단부에서 변형률이 집중되는 현상은 발생하지 않았다

<참고문헌>

1) 홍석우, "SSC앵커의 인발저항특성과 설계법에 관한 연구", 부산대학교 박사논문, 1999. 2, pp 69~72.
2) 이승현, 김운영, "소구경말뚝(Micropile)의 이해.", 대한토목학회, 제 44권 제7호, 1996, pp. 48~54.
3) 이원택, "얕은 기초에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 지반 보강 효과에 관한 연구", 서울대학교 박사논문,1991
4) Colin JFP Jones, "Earth reinforcement and soil structure." 1985, pp. 83 ~85.
5) Bruce, D.A and Juran, I., "Drilled and Grouted Micropiles : State of pratice Review.", FHWA-RD-96, Volume Ⅰ.,Ⅱ.1997.
6) 林鍾鐵, "砂地盤內のグラウンドアンカ-の引抜き抵抗メカニズムに關する硏究", 東京大學 工學博士 學位論文, 1989. 3.
7) Hoke and Bray 著, 小野寺 透, 吉中 龍之進 譯, "岩盤斜面工學", 2nd Ed. 朝倉書店, 1987 pp.79.