

성능검증을 위한 마이크로파일 현장 시험시공 및 재하시험 Verification Studies for Field Performance of Micropiling

구정민¹⁾, Jeong-Min Goo, 이기환²⁾, Ki-Hwan Lee, 조영준³⁾, Young-Jun Cho, 최창호¹⁾, Chang-Ho Choi

¹⁾ 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 선임연구원, Senior Researcher, Earth&Foundation Engr. Div.,
Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 쌍용건설, 토목기술부 부장, General Manager, Civil Engineering Technology Dept., Ssangyong Engineering
& Construction Co., Ltd.

³⁾ 동아지질, 토목기술부 과장, Manager, Dong-A Geological Engineering Co. Ltd.

SYNOPSIS : This paper describes field installation and load test results performed for three types of micropiles in the process of developing a new micropiling method. Field tests were performed for two conventional types(*i.e.*, micropile reinforced with steel bar and gravity grouting, micropile reinforced with steel bar and steel casing and gravity grouting) and a proposed type(*i.e.*, micropile reinforced with hollow steel pipe wrapped with geotextile-pack and pressurized grouting). The load test results subjected to axial compression and tension and lateral loading conditions are described in this paper. The micropiles were exposed in the air in order to verify the installation quality and curing condition of grouting material via ground excavation. Axial compression and tension test results indicate that the new micropile type provide at least 40% higher bearing capacity than that of conventional types. Based on the examination of exposed piles, it is induced that the proposed method, packed micropile, provides better interlocking between grouts and surrounding soils and increases higher frictional resistance comparing to conventional types.

Keywords : micropile, bearing capacity, post grouting, p-y curve, pack

1. 서론

마이크로파일은 직경 300mm 이하의 기성말뚝 혹은 조립이 가능한 말뚝을 지칭하며, 강보강재가 사용되는 현장타설말뚝의 한 종류로 소구경 그라우트말뚝으로 분류되는데 일반적으로 매입형 마이크로파일(Drilled micropile)인 경우 300mm이하, 타입형 마이크로파일(Driven micropile)인 경우 150mm이하의 직경을 가지는 것으로 알려져 있다(BS EN 14199:2005).

최근 마이크로파일 공법은 주로 구조물 기초공사시 작업 공간의 여유가 제한되는 도심지 내 시공조건이 불량한 공사에 많이 적용되며, 신설 기초공사를 포함하여 지하구조물의 재건설 및 기존 기초의 보강 그리고 교량 기초 지지력 보강 및 내진 보강 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그에 따른 말뚝의 성능과 적용 범위가 광범위하고 다양한 지반에 적용 가능하다는 점, 그리고 타 공법과 연계하여 사용할 수 있는 장점으로 인하여 유럽을 중심으로 구조물 보강 용도로 그 사용이 증가하고 있으며, 일본과 미국의 경우 내진보강용으로 적용되고 있다(국토해양부, 2007). 따라서 마이크로파일 공법은 국내 전체 주택보급율이 이미 100%이상을 달성하여 주택 건축정책의 기초가 신규개발에서 유지, 보수, 재상의 단계로 전환됨에 따라 재건축에 대한 규제완화와 리모델링에 대한 사회적 관심이 높아지고 있는 국내 현실을 감안해 볼 때(이정훈, 2008), 최근 들어 재건축 규제완화와 함께 리모델링내 주택보급 정책이 기존 구조물을 유지한 채로 기초의 보수·보강분야에 그 활용성이 높은 것으로 판단된다.

본 현장 시험시공 및 재하시험은 국토해양부 R&D VC 10 과제 중 하나의 핵심과제인 “성능·환경 복

원기술개발사업”에 세세부과제로 포함되는 “구조물 성능복원-지반” 3차년도 연구의 일부인 지반구조물 보수·보강 핵심기술들 중 “복합지지형 마이크로파일공법” 기술개발 1단계 추진전략인 “핵심기술 개발 모형 및 1차 기술개발” 목표를 달성하기 위하여 수행하였다.

일반적으로 마이크로파일은 파일과 지반 또는 암반에서의 주변마찰력으로 상부구조물을 지지하는데 그라우트재와 지반 간의 점착특성은 지반특성, 지하수, 천공방법 및 그라우팅방법에 의해 결정된다(Anil Misra et al., 2007).

국내 적용되고 있는 대부분 마이크로파일의 설계과정에서는 파일과 토사층 간의 주변마찰력은 없는 것으로 가정하고 있어 파일의 지지력 검토과정이 비합리적이고, 해외 설계규정을 여과없이 국내에 적용하고 있으므로 국내 실정에 맞는 시방 정립에 필요한 양질의 자료들이 절대적으로 부족한 상태이다. 또한 시공과정에서는 시방/품질 평가규정이 따로 정립되어 있지 않은 상태이기 때문에 시공업자의 경험에 상당부분 의존하고 있어 마이크로파일 품질평가가 불가능한 실정이다.

따라서 본 현장 시험시공 및 재하시험은 파일 선단을 암반에 소켓팅하지 않고 파일과 주변 토사층과의 마찰지지력을 평가하고, 시공과정에서 품질평가를 위한 기초자료들을 확보하여 효과적인 설계기반 구축 및 설계효율 증진에 따른 정량적 시공 기반을 제공하기 위하여 수행되었다. 또한 본 연구과제에서 마이크로파일의 지지력 개선을 위하여 가압주입이 가능하도록 토목섬유인 팩을 파일체에 도입한 “복합지지형 마이크로파일”의 파일구조체 성능을 검증하였다.

2. 현장 시험시공

본 현장 시험시공 및 재하시험은 ‘경의선 복선전철 용산/문산 2공구 OO건설 현장사무소’ 인근의 경기도 고양시 덕양구 화전리 000번지에서 수행되었다.

성능 검증을 위한 현장 재하시험에 앞서 2008년 11월 13일(목)~11월 19일(수)에 걸쳐 반력앵커체 9본과 기존 마이크로파일 6본 및 복합지지형 마이크로파일 6본, 그리고 예비시험용 2본을 포함하여 총 14본을 시공하였다. 이후 현장 재하시험을 2008년 11월 25일(화)~11월 29일(토)에 걸쳐 실시하였다.

2.1 현장시험구 지반조사

현장시험부지의 지반상태를 평가하고자 2008년 7월 31일 및 8월 1일에 걸쳐 현장시험구 내 대표적 위치인 두 곳을 선정하여 현장시추를 실시하였는데, 파일이 시공될 부분인 9m 심도 이내에서는 매립층과 퇴적층으로 구성된 것으로 나타났다. 매립층은 실트 및 자갈섞인 모래로 구성되었으며, 통일분류법에 따라 SP로 분류되었다. 퇴적층은 BH1의 경우 심도 2.8m~12.9m, BH2의 경우, 심도 4.5~13.5m에 위치하였고, 실트섞인 모래로 SM으로 분류되었다. N치는 BH1의 경우, 4/30~15/30의 범위 내에 있었고, BH2의 경우, 6/30~14/30의 범위 내에 있어 느슨하거나 중간 정도의 다짐도를 가지는 것으로 평가되었다.

풍화암은 심도 15m 아래에서 나타났으며 그 아래 층에는 양호한 암반대가 위치하는 것으로 조사되었다. 따라서 현장재하시험 수행을 위한 반력앵커의 설계과정에서 파일들의 극한지지력을 고려하여, 최소 18m이상의 천공심도가 필요할 것으로 판단되었다.

2.1 시험시공 상세

본 현장 시험에서는 국내에서 일반적으로 시공되고 있는 기존 방식의 2종류-강봉 보강 및 중력식 그라우팅 방법의 마이크로파일, 강봉 보강과 케이싱 사장된 중력식 그라우팅 방법의 마이크로파일-의 마이크로파일과 본 과업을 통하여 개발 중에 있는 토목섬유인 한 종류인 부직포 형태의 팩을 파일에 도입하여 가압그라우팅이 가능한 신개념 마이크로파일을 선정하였다.

현장 시험시공 및 재하시험 수행을 위하여 시험부지에 설치한 파일 본수는 다음 표 1과 같고, 총 14본의 마이크로파일(예비용 2본 포함)을 시공하였다.

표 1. 현장 재하시험용 시공 마이크로파일 종류

구분	표기	연직압축재하	연직인발	수평재하
기존 마이크로파일(강봉보강)	Type A	1(1)	1(1)	1
기존 마이크로파일(강봉보강/케이싱 사장)	Type B	1	1	1
신개념 마이크로파일	Type C	2	2	2

※ 괄호안의 숫자는 예비시험용으로 시공한 파일 개수임.

2.1.1 마이크로파일 및 반력앵커 설계

반력앵커 시공 및 현장 재하시험을 수행하기 위해서는 각 파일 종류별 최대시험하중 예상치가 필요하며, 다음 표 2는 각 파일별 최대시험하중 추정치를 요약한 것이다.

Type A의 경우, 극한지지력은 64.7tonf, Type B는 그라우팅 후 철재 케이싱을 지반 내 사장하였기 때문에 지반과 케이싱 간의 점착력이 거의 없을 것으로 예상되어 극한지지력은 64.7tonf보다 작을 것으로 예상된다. 신개념 마이크로파일인 Type C의 경우 97.2tonf로 계산되었다.

표 2. 현장 시험시공 마이크로파일 최대 시험하중 추정치

구분		극한압축하중 (tonf)	극한인장하중 (tonf)	그라우트재-보강재의 극한점착력 (tonf)	극한지지력 (tonf)	최대시험하중 (추정치) (tonf)
Type A	연직압축	131.2 (105.0)	-	-	64.7	64.7
	연직인발	-	98.2 (78.6)	251.3 (201.0)	64.7	64.7
Type B	연직압축	131.2 (105.0)	-	-	-	< 64.7
	연직인발	-	98.2 (78.6)	251.3 (201.0)	-	< 64.7
Type C	연직압축	138.5 (110.8)	-	-	97.2	97.2
	연직인발	-	106.0 (84.8)	201.1 (160.9)	97.2	97.2

※ 표 안의 ()내 값은 일반적으로 재하시험 수행과정에서 극한하중값의 80%를 초과하지 말 것을 권장하고 있기 때문에 그 값을 계산한 것임(FHWA, 2005).

재하시험 수행과정에서 반력앵커 1본당 받는 설계축력(T)=48.6tonf, 안전율(FS)=2.0으로 가정하여 반력앵커 설계를 수행하였으며, 검토된 마찰저항장(정착장)이 5.09m였으나, 현장 재하시험 과정에서의 안전을 고려하여 6.0m로 결정하였다. 마찰저항장 설계는,

$$\frac{T \cdot FS}{\pi \cdot D \cdot v_u} = \frac{48.6 \times 2.0}{\pi \times 0.152 \times 40.0} = 5.09m \quad (1)$$

여기서 T ; 반력앵커 1본이 받는 설계축력(tonf)

FS ; 안전율(=2.0)

D ; 천공경(=0.152m)

v_u ; 지반별 마찰저항(풍화암의 경우, 4~10kgf/cm²)

부착저항장 설계는,

$$\frac{T}{\pi \cdot N \cdot D_s \cdot v_a} = \frac{48.6}{\pi \times 6 \times 0.0127 \times 70} = 2.90m \quad (2)$$

여기서 N ; 스트랜드 사용갯수(=6, 본 시험시공에서는 6연선의 PC 강연선 사용)

D_s ; 스트랜드지름(=0.0127m)

v_a ; 주입재와 부착응력(=70tonf/m²로 가정)

2.1.2 시공부재별 재료특성

다음 표 3은 본 시험시공과정에서 사용된 강재의 재료특성을 요약한 것이다.

표 3. 마이크로파일 제작에 사용된 강재별 재료 특성

강재종류 \ 항목	외경 (mm)	내경 (mm)	항복강도 (tonf/m ²)	길이 (m)	비고
강 관	82.5	60.5	49,184	3.0	커플러로 연결하여 총연장 8.5m로 제작.
강 봉	50	-	71,319	8.7	
커플러	80	50	-	0.16	

Type B는 삭공 함몰 방지를 위해 강재케이싱을 지반 내 사장하는데 자재의 제원이 외경(O/D)=165.2 mm, 두께(t)=4.85mm, 길이(L)=2.0인 제품을 사용하였다. 천공과 동시에 철제케이싱을 2m 깊이로 관입 후 용접을 실시하여 연속적으로 강재케이싱을 지반 내 관입하여 시공하였다.

2.1.3 파일 시공 및 반력앵커 시공

현장 시험시공 및 재하시험 수행을 위하여 8×11m의 시험부지에 재하시험용 마이크로파일 12본과 반력앵커 9본을 배치하였다. ASTM D 1143 규정에 따르면, 파일의 연직압축재하 시험을 수행할 경우, 반력앵커와 시험대상용 파일 간의 간섭을 배제하기 위하여 반력앵커와 파일 중심 간의 거리를 최소 2m 이상 이격하도록 권장하고 있는데, 본 현장 시험시공 및 재하시험의 경우 앵커와 파일 중심 간 거리를 최소 2.10m 이상 확보하였다. 또한 연직압축재하 시험 대상용 마이크로파일 1본당 4개의 반력앵커로 지지가 되도록 배치하였다.

연직인발 시험용 마이크로파일들은 일렬로 파일 간 거리를 2m 확보하였고, 수평재하의 경우 동일 종류의 파일들을 1.2m 간격으로 시공하였다.

현장 시험구에서 마이크로파일들을 퇴적층 내인 8m 심도로 시공하였으며, 재하시험 수행을 위하여 파일두부가 지표면으로부터 0.5m 돌출되도록 시공하였다.

현장지반조사에 따르면 풍화암대는 심도 16m 이하에서 존재하는데 시험의 안전한 시험수행을 위하여 연직압축재하 시험을 위한 반력앵커 설치심도를 풍화토에서 최소 8m 깊이로 소켓팅되도록 심도 18.5m로 시공하였으며, 현장 재하시험 수행과정에서 반력지지대와의 체결을 위하여 지표면으로부터 0.5m 이상 길이를 확보하였다.

반력앵커시공을 위한 천공작업은 지표면에서 풍화암이 존재하는 심도 16.5m까지는 케이싱 드릴을 이용한 회전수세식 방법을 적용하였고, 그 이하 심도에서 18.5m까지는 회전타격식 암반천공용 해머드릴을 이용하여 작업을 수행하였다.

마이크로파일 시공을 위한 천공작업은 케이싱 드릴을 이용한 회전수세식 방법으로 천공하였다. 다음 표 4는 반력앵커 및 마이크로파일 시공에 이용된 장비 제원을 요약·정리한 것이다.

표 4. 반력앵커 및 마이크로파일 시공에 이용된 장비

작업 종류	장비 및 제원	
	장비명	제원(외경, mm)
반력앵커	케이싱	120
	케이싱드릴	136
	굴착용 헤머	106
마이크로파일	케이싱	152
	케이싱드릴	186

천공작업이 완료된 후 그라우팅 작업은 현장배합 믹서기로 기성제품인 보통포틀란트 시멘트와 물을 물/시멘트비(w/c)=45%가 되도록 연속적으로 교반하면서 디지털식으로 주입압 및 주입량이 제어 및 기록이 가능한 유량계가 설치된 그라우트재 주입장치를 이용하여 주입압 및 주입량을 조절하여 실시하였다. 이때 그라우팅 과정에서 유동성과 팽창성 및 급결성 확보를 위하여 혼화제를 1% 첨가하였다.

반력앵커 및 기존 마이크로파일의 경우, 시멘트 모르타르재를 중력식으로 삭공 내 충전하였다. 신개념 마이크로파일의 경우, 시멘트 모르타르재를 중력식 방법으로 천공홀을 채운 후, 파일장의 중간 정도인 4.5m 정도에서 에어패커를 이용하여 팩 내부에 $\Delta p=100\text{kPa}$ 의 압력으로 1차 가압주입 후, 파일 상부에서 $\Delta p=200\sim 300\text{kPa}$ 의 크기로 2차 가압주입을 실시하여 파일을 완성하였다.

3. 현장 파일재하 시험

본 현장재하시험의 장치 설치는 ASTM D 1143(연직압축재하), ASTM D3689(연직인발) 및 ASTM D3966(수평재하)에 준하였으며, 마이크로파일이 소구경 현장타설 말뚝이므로 파일재하시험 수행과정에서 파일의 편심에 대한 영향을 고려하여 FHWA의 마이크로파일 설계 및 시공에 관련된 매뉴얼을 참고하여 재하단계를 결정하였다(FHWA, 2005).

본 현장 파일재하시험 결과는 침하량에 의한 분석법 중 전침하량 분석법으로 항복하중을 결정하였다. 전침하량 분석법은 파일 직경의 10%에 해당하는 침하가 발생할 때의 하중 또는 허용침하량 25.4mm 일 때 대응하는 하중을 항복하중으로 판단하는데, 본 시험결과는 침하량 25.4mm일 때의 하중을 항복하중으로 결정하였다.

표 5. 파일종류별 현장재하시험 결과값

파일종류 \ 시험종류	항복하중(tonf)		
	연직압축재하	연직인발	수평재하
Type A	35.6	41.6	2.2
Type B	28.2	-	2.0
Type C	53.2	57.8	2.5

시험 결과 Type B(강봉보강 및 철제케이싱 사장)의 경우, 연직인발시험이 불가능하였는데 지반 내 사장된 철제케이싱과 지반간의 점착력이 거의 없다는 점을 입증하는 것이며, 차후 이와 같은 마이크로파일을 설계할 경우, 토사층에서 파일과 주변 지반 간의 점착력 산정에 유의해야 할 것으로 판단된다.

신개념 파일인 Type C는 지지력이 Type A 대비 50%, Type B 대비 80%이상 개선된 것으로 나타났다. 따라서 Type C 방식으로 마이크로파일을 시공할 경우, 파일장의 단축 및 동일 상재하중 하에서 시공되는 파일개수 단축이 가능할 것으로 판단된다.

수평재하시험의 경우, 신개념 마이크로파일과 기존 마이크로파일의 결과값의 차이가 없는 것으로 나

타났는데 시험결과는 파일 길이방향의 종단면이 수평하중에 대하여 저항하는 정도를 나타내는 것이므로 신개념 마이크로파일이 기존 마이크로파일에 비하여 파일 종단면 방향의 단면적이 크게 증가되지 않은 사실을 추정할 수 있다.

4. 파일 회수

그라우팅 방법의 차이에 따라 지반 내 양생형태의 변화를 관측하고자 시험구에 시공된 파일들에 대하여 6m 이상 굴삭하여 파일을 회수하였으며 다음 그림 1은 파일회수작업을 나타내고 있다. M1-1-1은 Type A형으로, M2-1-1은 Type B형, 그리고 M3-1-1, M3-2-1은 Type C형으로 시공된 파일들인데 M1-1-1과 M3-1-1을 비교해 볼 때 M3-1-1은 파일장 전체에 대하여 균일한 직경으로 양호한 상태로 지반 내 파일이 형성된 것을 알 수 있으며, M1-1-1은 형성된 파일표면 자체가 매우 불규칙하며, 파일회수과정에서 작은 충격에도 그라우트체의 활렬파괴가 발생되어 지반 내 파일형성상태가 불량한 것을 추정할 수 있었다.

지반 내 양생된 파일의 직경을 비교한 그림 2를 볼 때, Type A와 Type C의 파일외경이 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, 이는 수평재하시험 결과와 잘 일치되고 있다. 따라서 Type C의 지지력향상 원인은 가압주입에 따른 파일 단면적 증가보다는 주입된 그라우트가 양호한 상태로 양생되어 파일전진도가 향상되었고, 파일과 주변 지반 간의 양호한 결합으로 점착력 향상에 따른 것으로 판단된다.

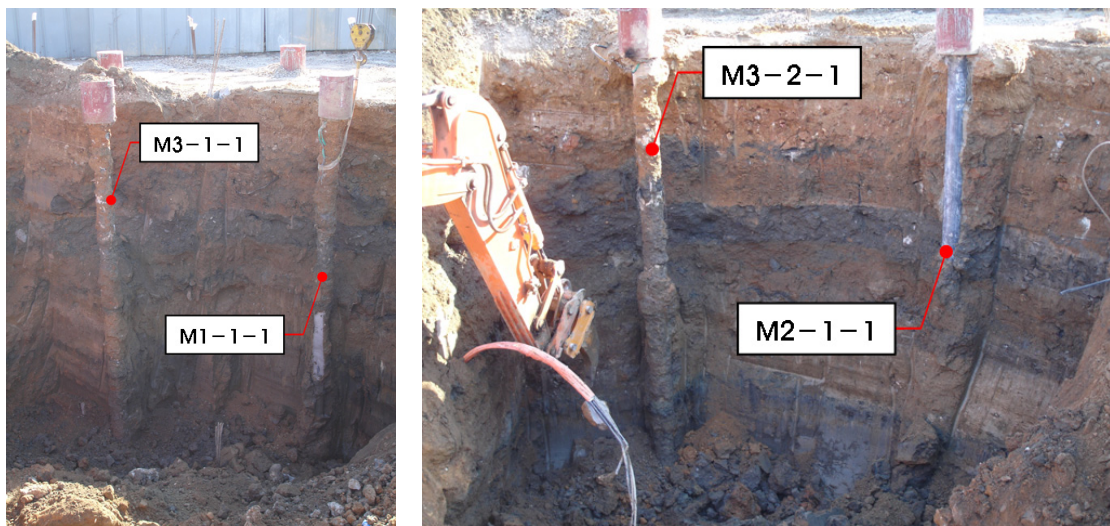


그림 1. 파일회수작업



그림 2. 절단전 파일회수 상태

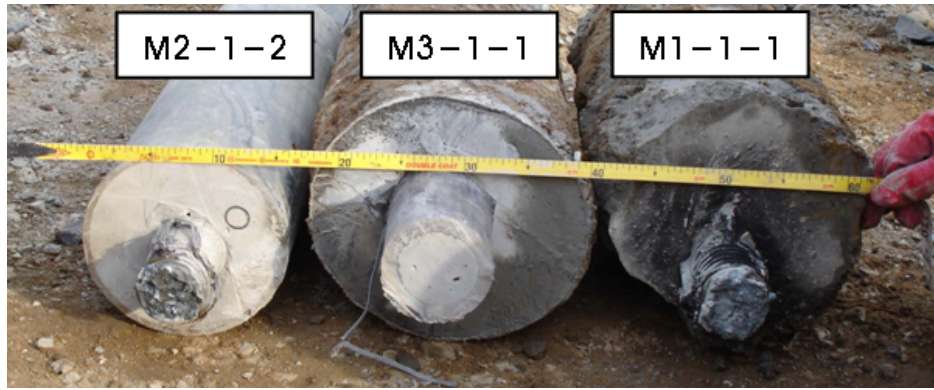


그림 3. 각 파일별 절단 후 외경 비교

5. 결론

국내 마이크로파일 시공과정에서 정량적 자료 제공을 통한 마이크로파일의 합리적 설계 자료 제공과 파일재하시험을 통한 시공종류별 마이크로파일의 지지력 특성 파악 및 신개념 마이크로파일의 성능 비교 및 지지력 개선 검증을 위하여 수행된 현장 시험시공 및 재하시험 결과를 다음과 같이 요약한다.

1. 마이크로파일의 현장 재하시험을 위하여 시험부지의 지반조사에 기초하여 설계한 반력앵커 및 마이크로파일의 배치는 합리적인 것으로 판단된다.
2. 현장 재하시험 결과, Type B인 경우 연직인발시험의 진행이 불가능하였으며 이는 파일과 주변 지반 간의 점착력이 거의 없기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한 Type C는 기존 마이크로파일 시공형태인 Type A 및 Type B에 비해 지지력이 향상되었다. 따라서 팩의 개념을 도입한 신개념 마이크로파일로 시공할 경우 토사층에서 주변마찰력 향상에 따라 시공심도 단축 및 시공개수 감소가 가능할 것으로 판단된다.
3. 파일 회수 결과 Type C는 Type A에 비해 지반 내 형성된 파일직경이 크게 증가되지 않고 전체 파일장에 대하여 일정한 직경을 가지는 것으로 지반 내 파일이 형성되었다. 수평재하시험 결과와 종합해 볼 때 파일단면적 증가의 원인보다는 가압주입에 따른 파일건전도 향상 및 파일과 주변 지반 간의 점착력 향상에 의한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제 번호:07도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부(2008), 구조물 성능복원 기술개발 R&D/06 건설핵심A01 보고서, pp.93~99.
2. 이정훈, 최창호, 조삼덕, 이기환, 조현(2008), “마이크로파일을 이용한 기초보강공법의 국내 적용 사례”, 한국지반공학회 봄학술발표대회 발표집, pp.359~365.
3. 임병조, 김영수(1998), 토질시험법 형설출판사 1998
4. 한국지반공학회(2003), 건설교통부 개정 구조물 기초설계기준 해설, pp.277~362.
5. Anil Misra, Lance A. Roberts, Rajesh Oberoi and C.-H. Chen(2007), “Uncertainty Analysis of Micropile Pullout Based upon Load Test Results”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, vol. 133, no.8, pp.1017~1025.
6. ASTM(1994), “Standard Test Methods of Piles Under Static Axial Compressive Load”, *The*

- Annual Book of ASTM Standards D 1143*, CD-Rom, Soil and Rock(1).
7. ASTM(1994), "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load", *The Annual Book of ASTM Standards D 3689*, CD-Rom, Soil and Rock(1).
 8. ASTM(1994), "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load", *The Annual Book of ASTM Standards D 3966*, CD-Rom, Soil and Rock(1).
 9. FHWA, (2005), **Micropile Design and Construction**, NHI-05-039, pp.7-1 ~7-28.
 10. EN14199:2005, (2005), **Execution of special geotechnical works-Micropiles**, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.