토사터널에 사용된 마이크로파일의 지반침하 억제효과에 관한 실내모형실험

The laboratory model test for the settlement restraint effect of ground of the micro-pile installed around the soft ground tunnel

임종철[1], Jong-Chul Im, *고호성[2], Ho-Seong Ko, 박이근[3], Lee-Keun Park, 오명렬[4], Myung-Ryoul Oh

[1]부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

[2]부산대학교 토목공학과 박사과정수료, Completion of a doctor course, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

[3]부산대학교 토목공학과 석사, Master of engineering, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

[4]삼성물산 건설부문 토목기술팀 차장, Senior Manager, Civil Eng. Technology Team, Engineering & Construction Group, SAMSUNG Corporation.

SYNOPSIS : In this study, the reinforcing effect of micro-pile for soft tunnel is analysed by laboratory model test. Especially, the effect of direction, form, and range of reinforcement are focused. The results of test are as follow: ① The effective direction of micro-pile is $d\varepsilon_3$ direction, and ② the close form is more effective than the opened form of micro-pile.

Key words : the model test, micro-pile, soft ground tunnel, settlement restraint effect, soil tank

1. 서론

국토가 좁고 유용공간이 넓지 않은 우리 나라의 경우 운송, 저장, 정보, 에너지의 수송 등등을 해결하기 위해 지하공간의 개발이 증가하고 있다. 이미 여러 지역에서 터널 등 지하공간에 대한 개발을 진행해 왔고, 앞으로 산악지역 뿐만 아니라 도심부에 이르기까지 많은 계획이 진행 중에 있다. 산악터널의 진입부와 도시터널의 경우의 많은 지역이 토사로 구성되어 있다. 특히 도심지 터널 굴착 시 주변의 건물 등의 주요구조물이 있는 경우 구조물의 안정유지를 위하여 지반침하가 억제되어야 한다.

토사터널에 사용되고 있는 보조공법으로는 ① 강관다단공법, ② 터널내부 네일링, ③ 지반 전체의 강도증가를 목적으로 하는 지반개량공법 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이들 공법 외에 지표면에서 마이크로파일을 시공할 때의 지반침하 억제효과를 실내실험을 통해서 분석하여 토사터널 굴착시 지반침하를 억제하여 주변 구조물에 미치는 영향을 최소화하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험장치

① 평면변형률 토조 : 평면변형률 토조[1]는 크기가 720(H) × 1650(L) × 400(W) mm(V=0.475m^3)이다. 앞면과 뒷면에는 마찰저항이 비교적 작은 아크릴판을 부착하여 평면변형률 상태를 재현할 뿐만 아니라 지반의 거동을 관찰할 수 있도록 제작되었다. 변위구속을 위해 전·후면부에 충분한 강성을 가진 채널로 보강하였다.

그림 35 평면변형률 토조

② 횡단방향 모형터널장치 : 횡단방향 모형터널장치는 사진 5.2와 같이 직경 9cm로 제작되었는데, 외부의 핸들을 회전하면 내부의 터널장치는 회전 없이 직경이 초기 직경의 약 10%까지 축소하도록 설계되었다.

③ 모형마이크로파일 : 마이크로파일은 0.2mm 철선에 모래입자를 도포하여 제작하였다.

④ 모형지반제작장치 : 모형지반제작장치는 스롯형 모래뿌리기 장치, 호스뿌리기장치[5](터널 하부 지반제작에 사용), 지표면 성형기 등으로 구성되어 있다.

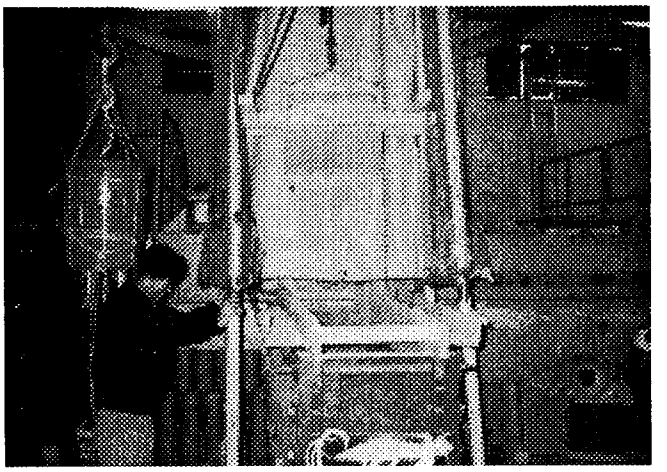

그림 36 지반제작 광경

⑤ 변위측정장치 : 지반거동의 관찰을 위하여 아크릴판 안쪽 면에는 격자가 인쇄된 타겟을 부착한다. 실험과정 중 사진법을 이용하여 격자의 변위를 관측 및 실측한다. 유한요소법[4]을 사용하여 실측한 변위값으로 지반내부의 변형률 특성면[6] 등 역학적 거동을 분석한다. 지표의 침하는 변위계(다이알게이지)를 지표에 설치하여 계측한다.

3.2 모형지반의 제작과 실험방법

3.2.1 모형지반의 재료

모형지반으로는 체(#20~#200)로 쳐서 물로 씻어 자연건조시킨 입도조정 구포사를 사용하였다. 모형지반의 물성치는 표 1과 같다.

표 10 지반재료의 물성치

200번체 통과량(%)	비중	통일분류	최대건조밀도	최소 건조밀도
0.1%	2.67	SP	1.491gf/cm^3	1.274gf/cm^3

3.2.2 모형지반의 제작

모형지반은 공중낙하법을 이용하여 제작되었다. 균일한 밀도의 지반을 제작하기 위하여, 일반지반조성시에는 슬롯형 모래뿌리기방법을, 터널하부 지반제작시에는 호스뿌리기방법을 사용하였다. 본 실험에서의 모래의 낙하고는 그림 3에서와 같이 '낙하고에 따른 밀도시험' 결과 밀도가 일정하게 유지되는 1.2m로 하였다. 각 실험에서의 지반밀도는 여러 위치에 6개의 캔을 설치하여 측정하였다. 모래뿌리기 속도는 평균 115 $cm^3/cm \cdot$ min 이다.

실험 낙하고인 1.2m에서 낙하시켜 제작한 시료에 대해 직접전단시험을 실시한 결과 전단저항각 ϕ_{ds} 는 36.7 ° 였다.

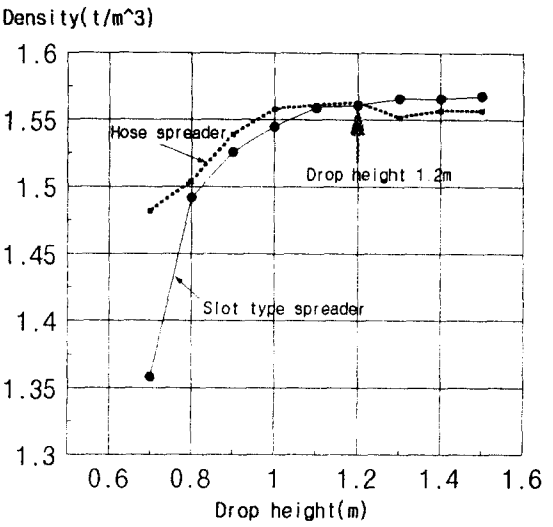

그림 37 낙하고에 따른 밀도시험

3.3 실험순서

실험의 순서는 다음과 같다.

① 모형터널장치 설치, ② 타겟의 설치[3] : 모형지반의 변형측정용 ③ 모형지반의 제작 : 슬롯형 모래뿌리기방법과 호스뿌리기방법을 병행 ④ 마이크로파일 설치 : 마이크로파일을 지표면에서 관입 설치 ⑤ 지표면 침하계측용 변위계 설치 ⑥ 초기값 계측 : 초기지반상태를 사진촬영 ⑦ 터널단면 변형 : 터널단면을 계획량만큼 변형시키면서 지반의 거동 및 지표침하를 계측 및 사진촬영 ⑧ 밀도시험: 상대밀도 측정 ⑨ 사진판독 및 변형해석

3.4 실험종류

3.4.1 보강방향에 따른 실험종류

보강방향에 따른 변위억제효과를 비교하기 위하여 변위가 가장 큰 토층비 1에서 지표면과 이루는 각을 그림 4와 같이 60° , 90° , 120° 로 설치하여 지표침하 및 지반거동을 관측하였다. 여기서 보강각도는 무보강시의 ε_1방향(120°), ε_3방향(60°)를 기준으로 정하였다.

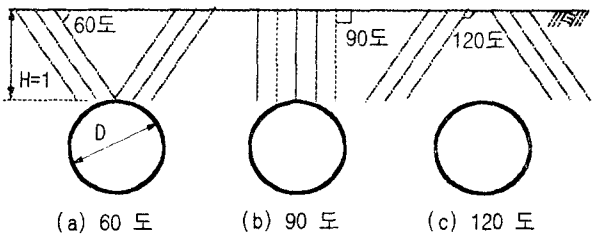

그림 38 마이크로파일 보강방향

3.4.2 보강형태에 따른 실험종류

그림 5과 같이 동량의 마이크로파일로 open형태와 close형태로 보강하여 변위를 비교하였다. close형은 그림 5(a)와 같이 마이크로파일이 터널천단 상부부분에서 폐합된 형태이며 open형은 그림 5(b)와 같이 열린 형태이다.

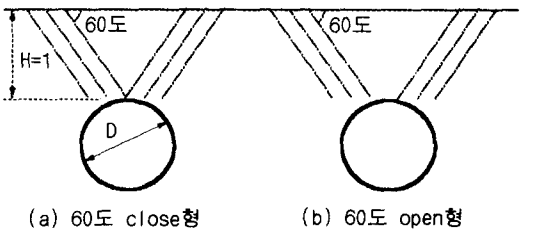

그림 39 마이크로파일 보강형태

3.4.3 보강범위에 따른 실험종류

보강범위에 대한 침하억제효과를 구하기 위하여, 토층비 1과 토층비 2의 경우 ε_3방향인 보강방향 60° 와 close 형 보강을 이용하여 보강재 수를 증가시키면서 그 범위를 확대하였다. 보강재간의 중심간격비는 $\frac{\text{중심거리}}{\text{터널직경}} = \frac{2}{9} = 0.222$이다. 보강재의 길이비는 $\frac{\text{보강재 길이}}{\text{토층비}} = 1$로 하였다.

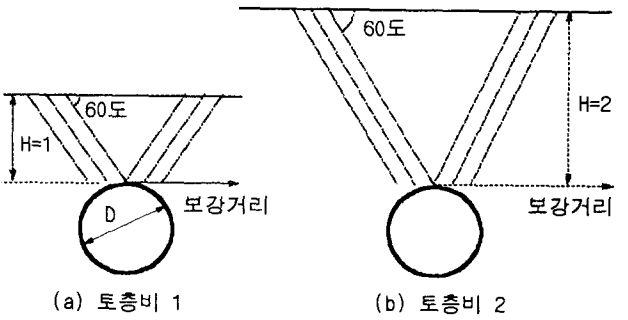

그림 40 보강범위에 따른 실험종류

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지반재료 실험결과

조성된 지반의 건조밀도의 범위는 1.528 t/m^3~1.591 t/m^3이고, 평균값은 1.55 t/m^3이고, 상대밀도는 122%이다. 함수비는 평균 0.34%이다.

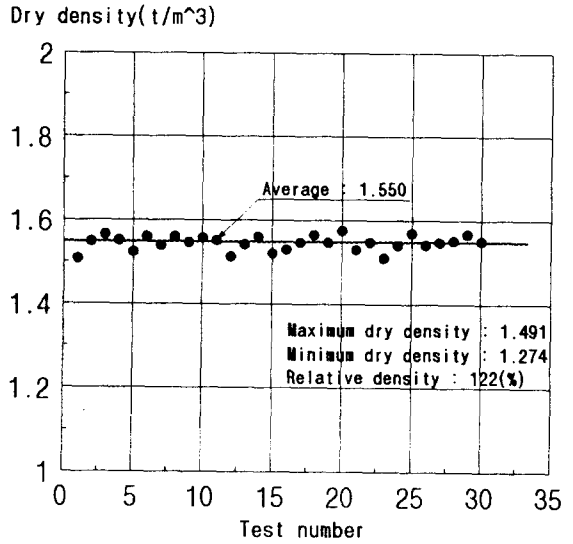

그림 41 지반재료의 밀도분포

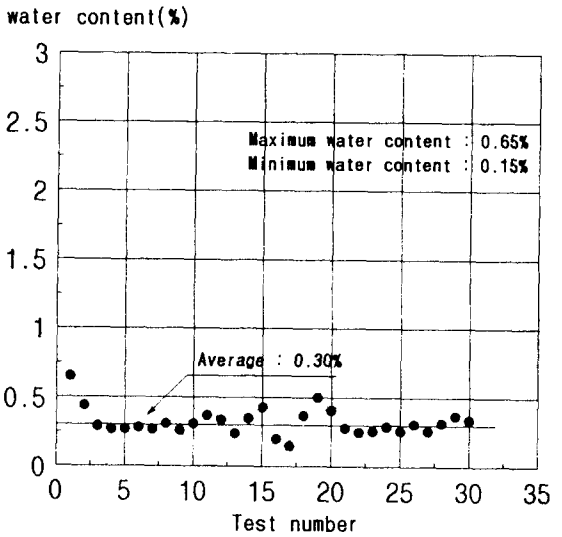

그림 42 지반재료의 함수비 분포

4.2 보강방향에 따른 지반 거동분석

보강방향에 따른 지표면의 침하비는 그림 9와 같다. 그림에서 ε_3방향인 60° 로 보강했을 경우가 ε_1 방향인 120° 로 보강했을 경우보다 침하비가 약 30%감소함을 알 수 있다. 즉 60° , 90° , 120° 의 침하비 비교에 있어서 ε_3방향으로 보강한 경우가 가장 효과가 크다는 것을 의미한다.

그림 10 ~ 그림 13의 무신축방향과 전단변형률 등고선을 통하여 지반내의 파괴면을 관찰하였다. ε_3 방향의 보강 시에 있어서는 파괴면을 관측하기 어려운 반면 ε_1방향의 보강의 경우는 명백하게 파괴면이 발생하였다. 이러한 점에서 마이크로 파일보강 시 ε_3방향으로 보강할 경우 지반변위억제에 유리한 보강을 할 수 있을 것으로 판단된다.

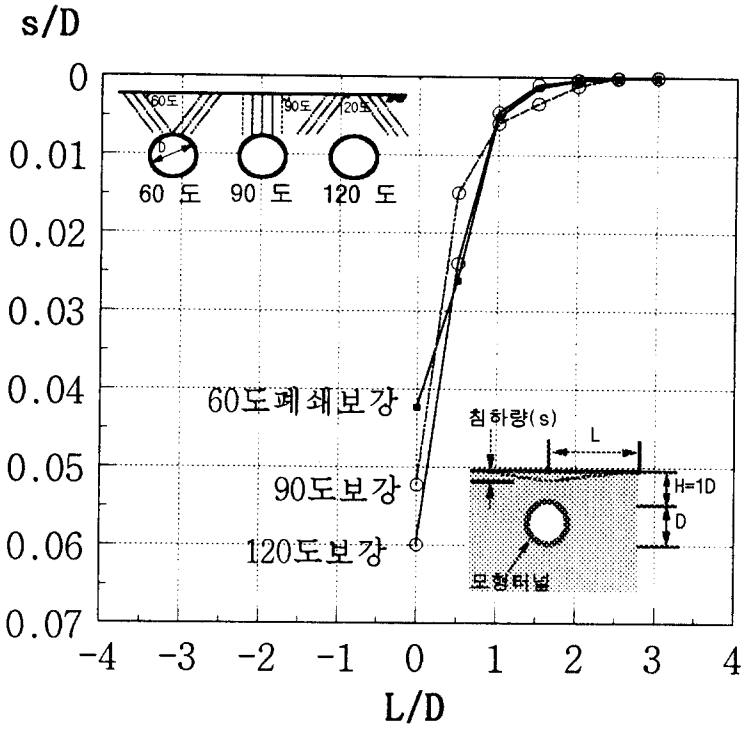

그림 43 보강방향에 따른 침하비-지표면 위치 관계

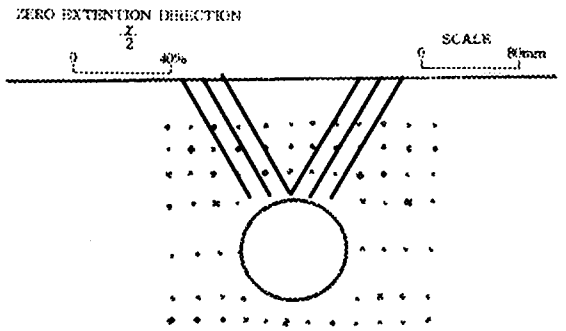

그림 44 마이크로파일 보강시의 무신축 방향(60° 보강)

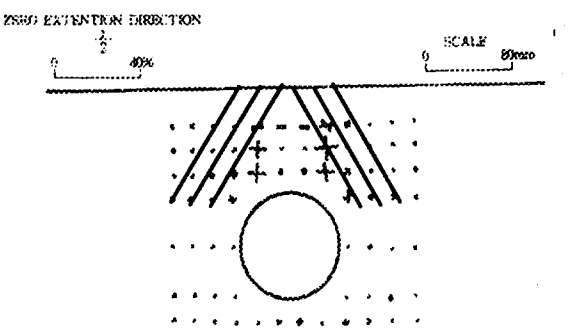

그림 45 마이크로파일 보강시의 무신축 방향(120° 보강)

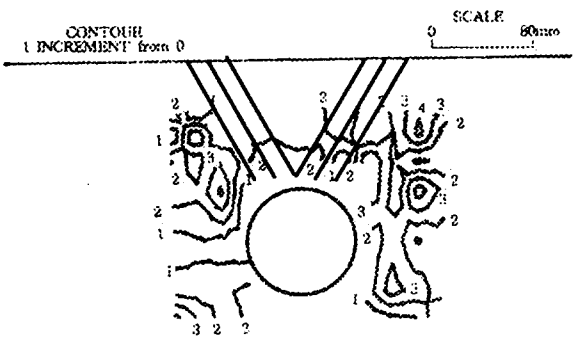

그림 46 마이크로파일 보강시의 전단변형률 등고선(60° 보강)

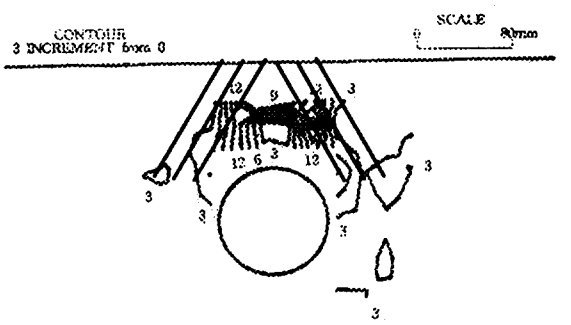

그림 47 마이크로파일 보강시의 전단변형률 등고선(120° 보강)

4.3 보강형태에 따른 지반거동분석

그림 14의 침하비-지표면위치의 관계그래프를 살펴보면 close형의 보강이 open형의 보강보다 훨씬 유리하며 close형의 보강시의 천단지표점의 침하는 open형의 보강시의 침하의 약 65%임을 알 수 있다. 그림 15~그림 16에서의 파괴면을 보면 close형의 보강의 경우 뚜렷한 파괴면이 발생하지 않는 반면 open형의 보강에서는 터널 어깨부에서 파괴가 진행됨을 알 수 있다.

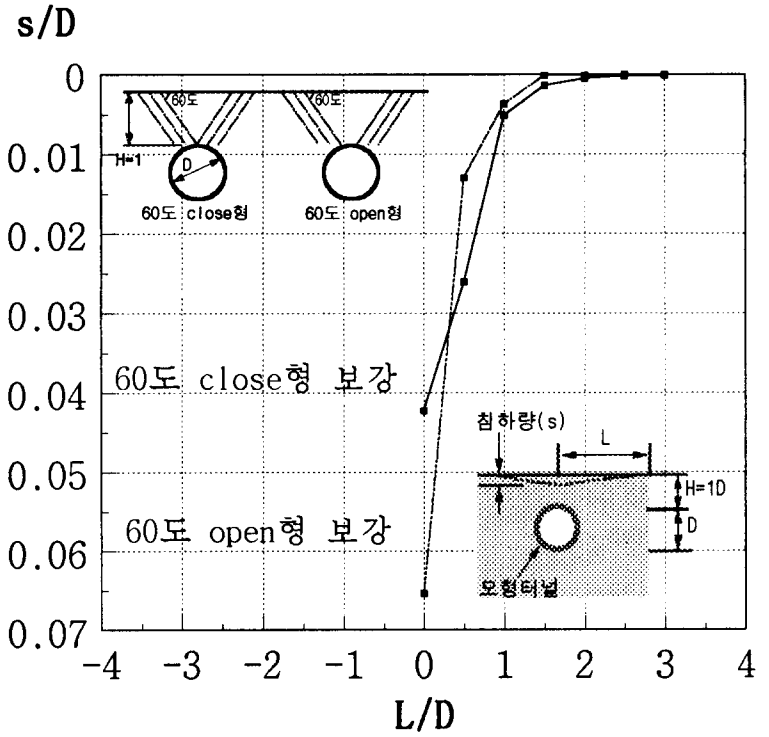

그림 14 침하비 - 지표위치 (보강형태에 따른 분류)

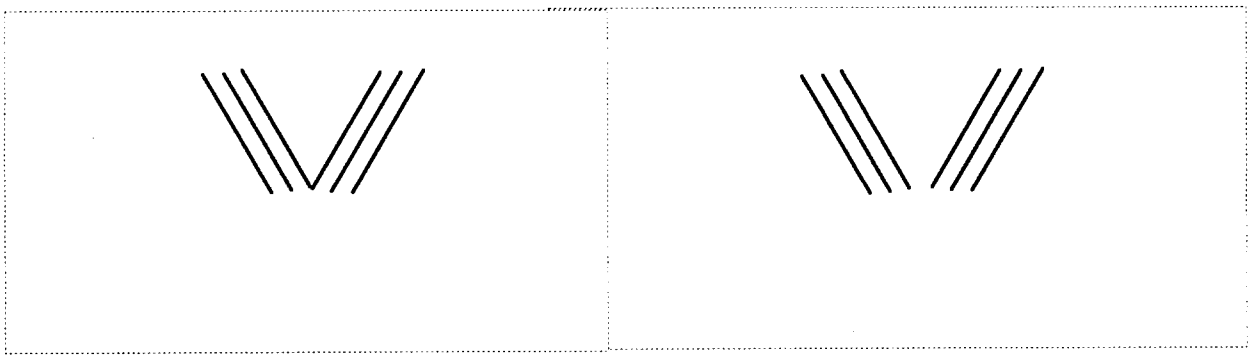

그림 15 close형의 전단변형률 등고선

그림 16 open형의 전단변형률 등고선

4.4 보강범위에 대한 효과

그림 17은 보강재 수에 따른 최종지표침하분석 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 효과적이고 경제적인 보강위치는 터널 천단상부 지표점에서 H 인 곳까지이다(그림 18 참조).

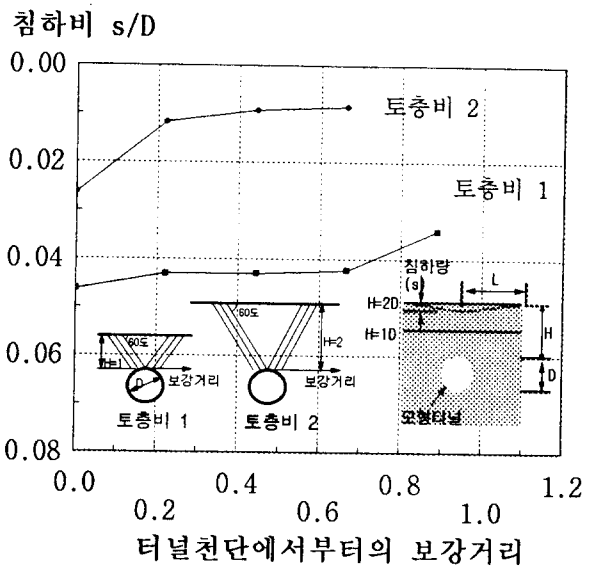

그림 17 보강거리에 따른 침하비

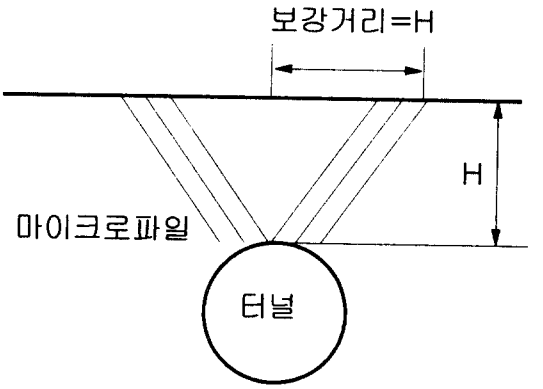

그림 18 효과적인 보강위치

4.5 마이크로파일의 지표침하억제효과

그림 19은 마이크로파일공법에 의한 지표침하억제비를 나타내었다. 지표침하억제비는 무보강 시의 침하량을 100으로 두고(%단위) 감소된 침하량을 비로써 나타내었다.

$$\text{침하억제비} = \left[\ 1 - \frac{\text{마이크로 파일보강시의 침하량}}{\text{무보강시의 침하량}}\ \right] \times 100$$

그림 20는 토층비에 따른 보강비를 나타내고 있다. 토층비 1의 경우 ε_3방향인 60° 보강 및 close 형 보강인 경우에만 천단지표점의 침하를 억제할 수 있었고, 그 경우 약 20%의 침하억제가 가능하였다. 토층비 2의 경우 ε_3방향인 60° 보강 및 close 형 보강인 경우 약 60%정도의 천단지표점 침하를 억제할 수 있었다.

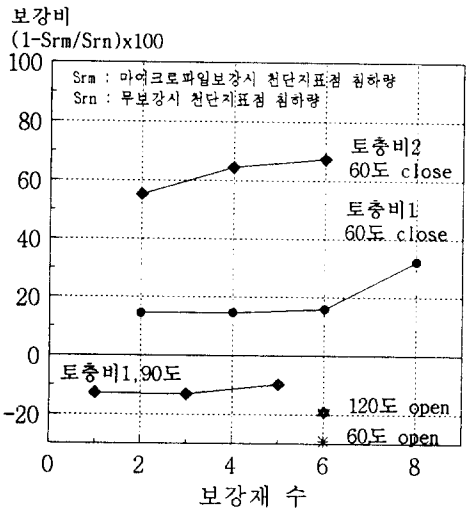

그림 19 보강재 수에 따른 침하억제비

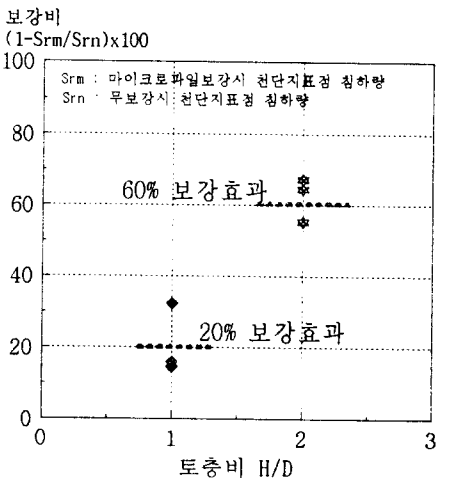

그림 20 토층비에 따른 침하억제비

5. 결론

① 전체 실험에서 지반은 건조밀도 1.55t/m2, 함수비 0.3%로 균질하게 조성되었다

② ε_3방향으로의 마이크로파일의 보강할 경우 ε_1방향의 보강시보다 지표침하가 40% 감소하였다.

③ 지반거동의 경우 ε_1방향의 보강 시 지반내부에 넓은 파괴영역이 발생하나, ε_3방향으로 마이크로 파일의 보강할 경우 뚜렷한 파괴면이 발생하지 않았다.

④ ε_3방향의 보강에 있어서도 지표침하 및 지반거동의 결과를 살펴볼 때 open형의 경우보다 close형의 보강이 더욱 유리한 보강방법으로 판단된다.

⑤ 마이크로파일을 이용하여 천단지표점의 침하를 억제하고자 할 시 토층비가 1인 경우는 천단지표점의 침하를 20%, 토층비는 2의 경우는 60%의 침하를 억제할 수 있었다. 즉 토층비 1의 경우 마이크로파일 보강에 의한 지표침하억제를 위한 사전지반보강효과가 크지 않지만, 토층비가 2인 경우에서는 마이크로파일보강에 의한 천단지표점의 침하억제효과는 크다.

참고문헌

1. 강낙안, 박성재, 임종철, 공영주, "지반 굴착시 지반앵커에 의한 근접구조물의 변형 억제효과", 대한토목학회, 1994년도 학술발표회 논문집(Ⅰ), 1994. 10, pp. 607~610.
2. 임종철, 고호성, 박이근, 오명렬, "모래지반내의 터널굴착시 지반거동에 관한 실내모형실험", 대한토목학회, 1996년도 학술발표회 논문집(Ⅱ), pp. 371~374.
3. 임종철, 박이근, 고호성, "모래지반 내의 터널굴착시 볼트의 최적 설치위치 및 설치길이에 관한 실험적 연구", 부산대학교 생산기술연구소 논문집 제53집, 1997. 12, pp. 1~11.
4. 林鍾鐵, 朴性栽, 朱仁坤, 朴鏞富, 金永仁, "평면변형률 상태에 있는 모형지반의 변형해석법", 韓國地盤工學會誌, 1992. 3, pp. 29~39.
5. 홍석우, " SI앵커의 인발저항력에 관한 연구", 부산대학교 석사논문, 1994. 2, pp 32~33.
6. 林鍾鐵, "砂地盤內のグラウンドアンカー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, pp. 778~782