

터널굴착에 따른 인접 구조물 침하 억제효과에 관한 실내모형실험 Model Tests for the Effect of Settlement Restraint of Adjacent Structure During Tunnel Excavation

*유문오¹⁾, Mun-Oh Yoo, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 고희성³⁾, Ho-Seong Ko, 박이근⁴⁾, Lee-Keun Park

- ¹⁾부산대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.
²⁾부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.
³⁾생산기술 연구소 특별연구원, A special Researcher, Research Institute of Industrial Technology
⁴⁾부산대학교 토목공학과 박사과정, Doctor course, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

SYNOPSIS : In this study, differential settlements of adjacent structure and behaviour of ground during tunnel excavation and the effect of micropile installed to preserve differential settlement of structure are measured and analyzed by model test. In the test results, the effective range of reinforcement is suggested.

Key words : the model test, micropile, tunnel excavation, differential settlements, reinforcement

1. 서론

최근 선진국에서는 교통 소통의 원활성과 소음, 먼지 등의 도심지 환경공해에 대한 영향을 극소화시키기 위하여 지하구조물 시공시 개착공법보다는 터널방식을 많이 채택하고 있는 추세이다. 터널공사를 안전하고도 효과적으로 시공하기 위해서는 그 대상 지반에 대한 철저한 지반조사와 더불어 입지조건 및 지장물 등의 조사를 통한 정밀한 사전 계획과, 터널 굴착 중에는 완벽한 시공관리가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 터널 굴착 시 인접 구조물 주변지반의 부등침하와 인접 구조물에 대한 영향을 분석하고, 이에 대한 대책에 대해 실내 모형실험을 통해 고찰한다. 침하방지 대책으로 마이크로파일공법¹⁾을 택하여, 마이크로파일의 직경, 설치간격 및 설치위치 변화에 따른 지상구조물의 침하 억제효과를 분석한다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험장치

- ① 평면변형률 토조²⁾ : 720(H)×1650(L)×400(W) mm($V=0.475m^3$) 이다. 앞면과 뒷면에는 아크릴 판을 부착하였으며 변위구속을 위해 전·후면부에 충분한 강성을 가진 채널로 보강.
- ② 횡단방향 모형터널장치³⁾ : 횡단방향 모형터널장치는 직경이 186mm이며, 직경이 초기 직경의 약 $\alpha=7\%$ 까지 축소하도록 설계(α : 터널직경 축소율).
- ③ 모형마이크로파일⁴⁾ : 마이크로파일은 0.6, 1.0, 1.6mm 철선에 모래입자를 도포하여 제작.
- ④ 모형지반제작장치 : 슬롯형과 호스형 뿌리기⁵⁾를 병행 사용.
- ⑤ 변위측정 : 타겟과 지표침하계(변위계)를 설치 계측.
- ⑥ Load Cell : 터널주위에 발생하는 반경방향응력과 접선응력 측정.

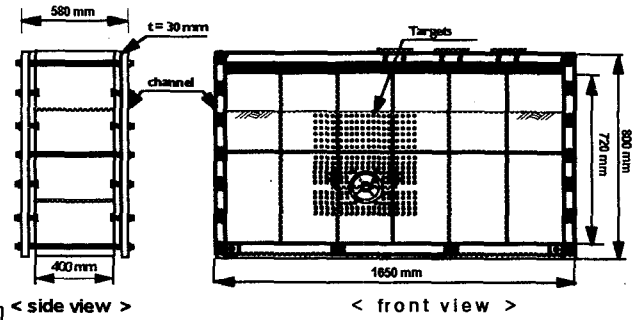


그림 1 평면변형률 토조

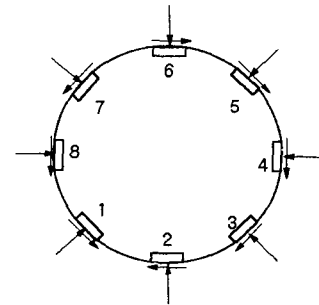


그림 2 Load Cell 위치

3.2 모형지반의 제작과 실험방법

3.2.1 모형지반의 재료

모형지반은 주문진 표준사를 이용하여 제작하였다. 주문진 표준사의 물성치는 표 1과 같다.

3.2.2 모형지반의 제작

모형지반은 공중낙하법을 이용하여 제작되었다. 일반지반조성 시에는 슬롯형 모래뿌리기방법을, 터널하부 지반제작 시에는 호스뿌리기방법을 사용하였다. 본 실험에서의 모래의 낙하고는 그림 3에서와 같이 밀도가 일정하게 유지되는 1.2m로 하였다.

실험 낙하고인 1.2m에서 낙하시켜 제작한 시료에 대해 평면변형률 압축시험을 실시한 결과 전단저항각 ϕ_{psc} 는 51.6°였다.

표 1 지반의 물성치

물성종류	물성치
최대간극비, e_{max}	0.843
최소간극비, e_{min}	0.617
최대전조밀도, γ_{dmax} (g/cm ³)	1.639
최소건조밀도, γ_{dmin} (g/cm ³)	1.438
비중, G_s	2.65
함수비, w (%)	0.3
평균입경, D_{50} (mm)	0.595
유효입경, D_{10} (mm)	0.443
균등계수 C_u	1.402
곡률계수 C_g	0.912

3.3 실험순서

실험의 순서는 다음과 같다; ① 모형터널장치 설치, ② 타겟의 설치⁶⁾ : 모형지반의 변형측정용 ③ 모형지반의 제작 : 슬롯형 모래뿌리기방법⁵⁾과 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 : 상대 밀도 측정 ⑨ 사진판독 및 변형해석

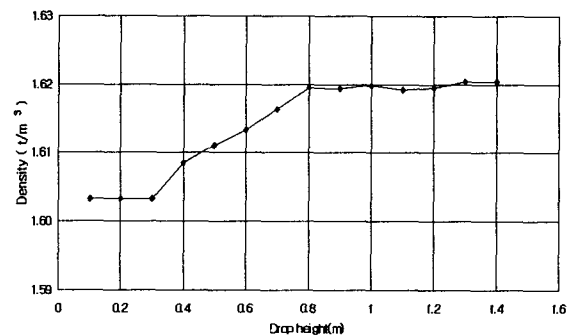


그림 3 낙하고에 따른 밀도

3.4 실험종류

본 연구에서는 토층비(H/D)가 1.5인 경우에 있어서, 마이크로파일의 간격변화(5, 8, 10, 14cm)에 대해 4 종류, 마이크로파일의 직경(강성)변화(0.6, 1.6mm)에 대해 2종류, 마이크로파일의 설치위치 변화(10.5, 14, 18.5cm)에 대해 3종류, 무보강-상재하중인 경우 총 10종류의 실험을 실시하였다(표 2 참조).

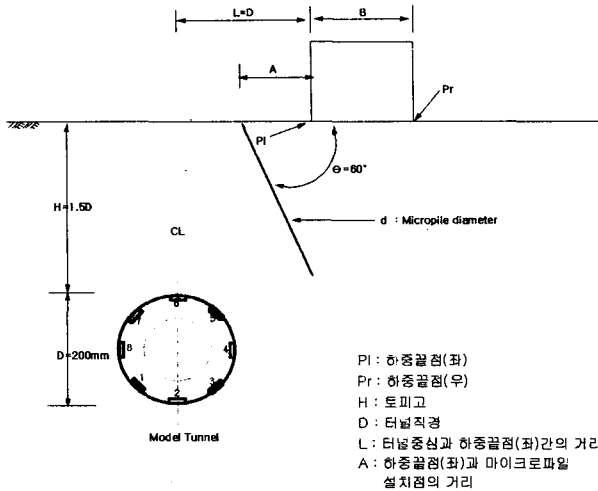


그림 4 실험 종류

표 2 실험 종류

실험명	마이크로파일 보강				
	설치간격	RS/d	파일직경	설치위치	A/L
N1	140mm	140	1.0mm	3.5mm	0.0175
R1	100mm	100	1.0mm	3.5mm	0.0175
R2	80mm	80	1.0mm	3.5mm	0.0175
R3	50mm	50	1.0mm	3.5mm	0.0175
R4	50mm	83.3	0.6mm	3.5mm	0.0175
R5	50mm	31.2	1.6mm	3.5mm	0.0175
R6	50mm	50	1.0mm	3.5mm	0.0175
R7	50mm	50	1.0mm	105mm	0.525
R8	50mm	50	1.0mm	140mm	0.7
R9	50mm	50	1.0mm	185mm	0.925

① 보강간격에 따른 실험종류 : 보강간격에 따른 변위억제효과를 비교하기 위하여 토층비 1.5에서 마이크로파일 설치각도를 그림 4와 같이 60° 로 설치하여 지표침하, 토압 및 지반거동을 관측하였다. 여기서 보강각도는 무보강시(N1)의 최소주변형률(ϵ_3)방향을 택하였으며, 이는 기존 연구⁷⁾의 무보강시의 ϵ_1 방향(120°), ϵ_3 방향(60°)과 일치한다.

② 보강강성에 따른 실험종류 : 그림 5와 같이 동량의 마이크로파일의 직경(강성)을 0.6, 1.0, 1.6mm(이때의 RS(보강간격)/d(파일직경)는 83, 50, 31이다)로 변화시켜 지반의 거동 및 토압을 비교하였다.

③ 설치위치에 따른 실험종류 : 보강설치위치에 대한 침하 억제효과를 구하기 위하여, 기존 연구⁷⁾의 토층비 1.5의 결과에 따라 ϵ_3 방향인 보강방향 60°를 보강방향으로 하고 마이크로파일 설치위치를 변화시키면서 침하 범위가 확대되어 가는 양상을 분석하였다.

표 3 주문진 표준사의 시험결과

CASE	$(\sigma_3)_f$ (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm ²)	ϕ_{psc}
80 kp	0.82	6.77	51.58°
100kp	1.02	7.79	
150kp	1.53	11.48	
200kp	2.04	13.89	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지반재료 실험결과

조성된 지반의 건조밀도의 범위는 1.623 t/m³~1.641 t/m³이고, 평균값은 1.632 t/m³이고, 상대밀도는 97%이다. 주문진표준사의 내부마찰각(ϕ_{psc})은 51.6°이다.

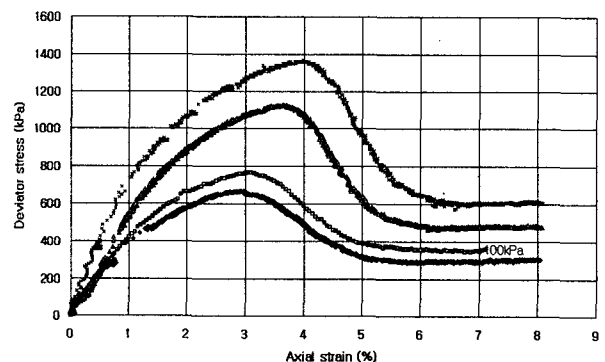


그림 5 응력·변형률 관계

4.2 보강간격비에 따른 지반거동 분석

마이크로파일 보강간격에 따른 영향을 분석하기 위하여 1.5D 길이의 마이크로파일을 구조물(좌)에서 3.5cm(그림 4의 A) 떨어진 곳에 설치하여 보강 실험을 하였다. 종방향 설치간격은 5, 8, 10, 14cm 간격으로 구분하였다.

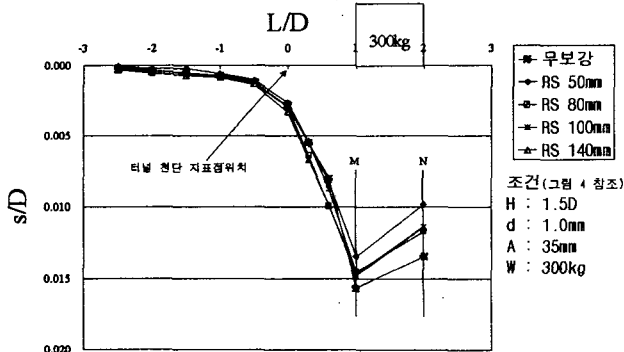


그림 6 마이크로파일 간격별 침하곡선

표 4 간격별 PI의 침하비

실험명	침하량(mm)	침하비			
		M선	N선		
무보강	N1	3.136	2.708	1.0	1.0
보강	R1	2.961	2.282	0.944	0.84
	R2	2.948	2.27	0.94	0.838
	R3	2.913	2.334	0.929	0.862
	R4	2.696	1.962	0.86	0.725

그림 6은 각 경우에 있어서의 지표위치-침하비 그래프이다. 표 4는 마이크로파일 간격변화시의 구조물(좌측기준)침하량 및 보강효과에 따른 지표 침하곡의 면적을 나타낸다. 여기에서 최대 보강효과를 보인 설치간격은 5cm(이때 RS/d는 50)이며, 이때 무보강과 비교하여 구조물 M선과 N선의 침하비는 각각 0.86, 0.725이다.

다음은 마이크로파일의 직경변화에 따른 영향을 연구하기 위하여 실험에서 마이크로파일의 직경(d)을 변화시켜 RS/d 값이 83.3, 50, 31.2인 경우에 대해서 실험하였다.

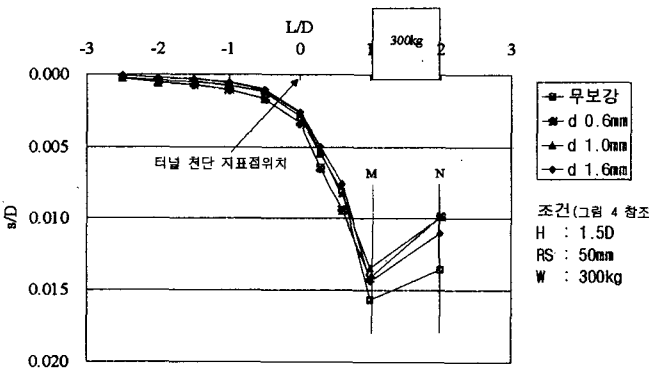


그림 7 마이크로파일 직경별 침하곡선

표 5 직경별 PI의 침하비

실험명	침하량(mm)	침하비			
		M선	N선		
무보강	N1	3.136	2.708	1.0	1.0
보강	R4	2.696	1.962	0.86	0.725
	R5	2.82	1.976	0.9	0.73
	R6	2.874	2.196	0.92	0.811

그림 7을 보면 RS/d 값이 50인 경우(이때의 마이크로파일의 직경이 1.0mm)의 지표면과 구조물(좌측 기준)의 침하량이 가장 많이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그림 7의 모든 실험에 대한 M선의 침하량 및 무보강에 대한 보강시의 침하량의 비를 표 5에 나타내었다. 또한, 그림 8은 표 4 및 표 5를 RS/d에 대한 침하비로 나타낸 것이다. 여기에서 최대 보강효과를 보인 간격비(RS/d)는 50이며 이때 PI(구조물 좌측 기준 M선)의 침하비는 0.86이다.

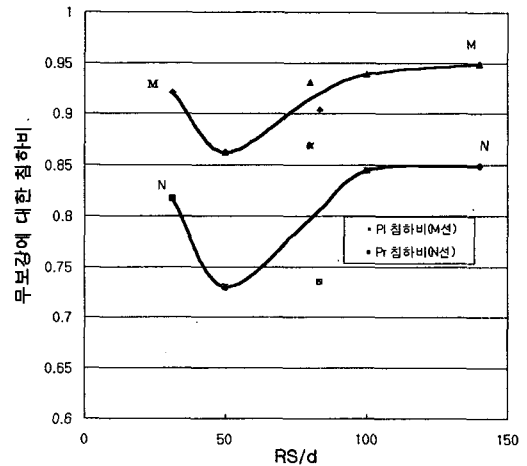


그림 8 마이크로파일의 직경 및 설치간격에 따른 무보강에 대한 침하비

4.3 보강설치위치에 대한 효과

본 실험에서는 마이크로파일 설치위치에 따른 영향을 분석하기 위하여 건물하중 작용 시작점(M선)으로부터 마이크로파일 설치위치까지의 거리와 터널 천단 지표점까지의 거리비(A/L)를 0.175, 0.525, 0.7, 0.925로 변화시켜 실험을 행하였다(본 연구에서는 터널천단에서 건물하중 작용시작점(P1)까지의 거리(L)는 터널직경(D)과 같은 거리이다).

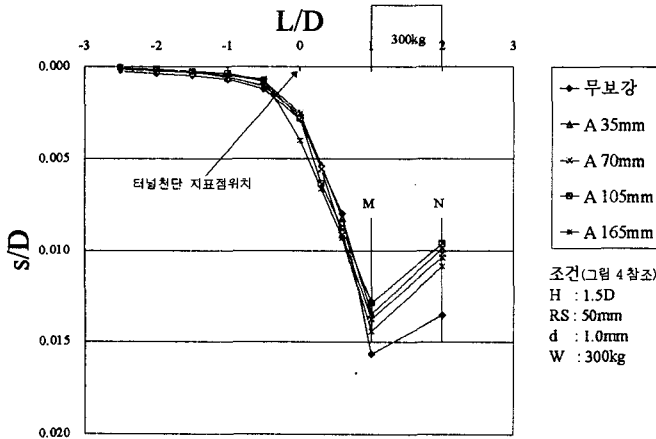


그림 9 마이크로파일 설치위치별 침하곡선

그림 9는 보강설치위치에 따른 지표면 침하의 형상이며, 표 6은 각 경우에서의 건물기초의 터널 직경이 7% 축소되었을 시의 침하량과 침하비이다. 그림 10에서와 같이 각 설치위치에 따른 침하비를 분석하면, 침하비는 거리비(A/L)가 약 0.7지점에서 침하비의 경우 0.81 정도로 최대 침하 억제효과가 있었다. 하지만 거리비가 0.7이상이 되는 경우, 침하 억제효과가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

거리비(A/L)가 0.175~0.7의 범위인 경우의 침하 억제효과는 M선이 0.13~0.18, 반대측이 0.23~0.29이다. 따라서, 본 연구와 같이 구조물이 터널 천단 지표점에서 1.0D 떨어져 있는 경우의 구조물 침하 억제를 위한 적절한 보강위치는 건물하중 시작점에서 천단 지표점까지의 거리의 0.7배의 거리 이내 즉, 거리비(A/L)가 0.7 이내로 판단된다.

표 6 설치 위치별 P1의 침하비

실험명		침하량(mm)		침하비	
		M선	N선	M선	N선
무보강	N1	3.136	2.708	1.0	1.0
보강	R4	2.696	1.962	0.86	0.725
	R7	2.75	2.08	0.877	0.768
	R8	2.576	1.926	0.821	0.711
	R9	2.886	2.18	0.92	0.81

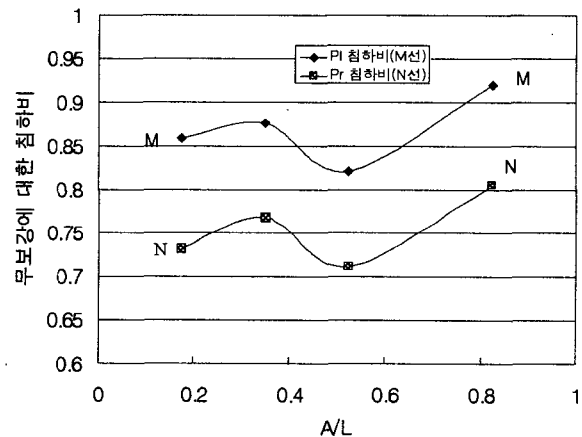


그림 10 마이크로파일 설치 위치에 따른 무보강에 대한 침하비

4.4 터널에 발생하는 토압의 분석

본 연구에서는 터널에 발생하는 토압을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 8개의 2방향 로드셀을 설치하였다. 각각의 실험에 있어서 모형터널 장치가 수축될 때의 변위비(Disp/D)와 그 때의 토압의 관계를 각 로드셀에서 구하였으며, 이들 중 구조물의 영향이 가장 크게 작용하는 위치의 로드셀 No.5(LCN. 5)에 대한 반경방향응력 및 접선응력을 그림 11~그림 16에 나타내었다. 여기서, D는 모형터널의 직경(D=200 mm)이며, Disp(Displacement)는 모형터널의 수축시 직경 변위량, P₀는 토피비(H/D)가 1.5인 무보강 지반에서의 터널에 작용하는 초기 토압, P는 실험단계마다 실측한 토압을 나타낸다.

4.5.1 보강 간격비에 따른 토압의 분포

그림 11과 그림 12는 터널굴착에 따라 발생하는 토압의 경감을 반경방향응력과 접선응력으로 분리하여 나타내었다. 그림 11과 그림 12의 반경방향응력과 접선응력을 보면 마이크로파일의 보강간격이 줄어들수록 토압비(P/P_0)가 빠르게 감소하는데 반경방향응력의 형상은 보강 간격비(보강간격/파일직경, RS/d)가 80이하에서 수렴하나, 접선방향 응력의 경우 50이하인 경우 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 지표 침하비로 결과를 정리하였을 경우 보강간격비 50이하에서 침하비가 감소하는 결과(4.2절 참조)와 유사하다.

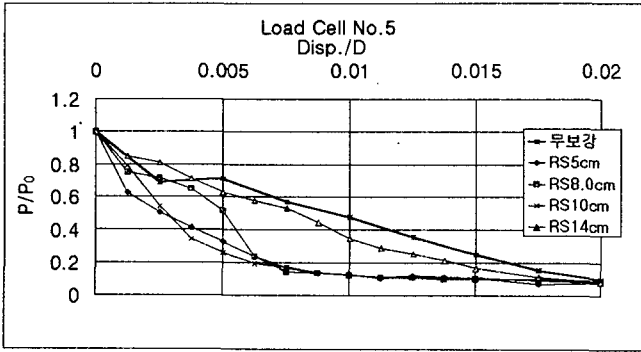


그림 11 터널 반경방향의 토압(LCN 5)

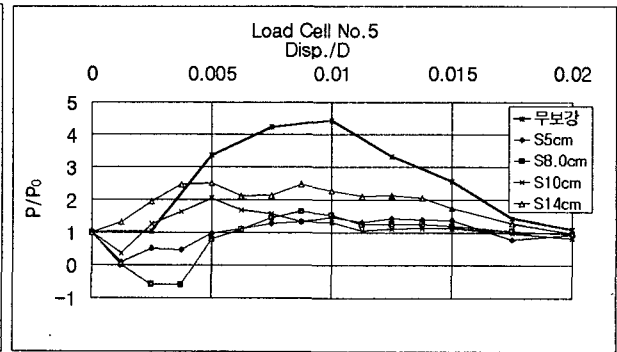


그림 12 터널 접선방향의 토압(LCN 5)

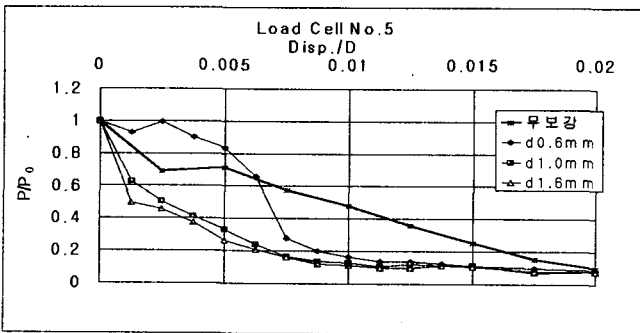


그림 13 터널 반경방향의 토압(LCN. 5)

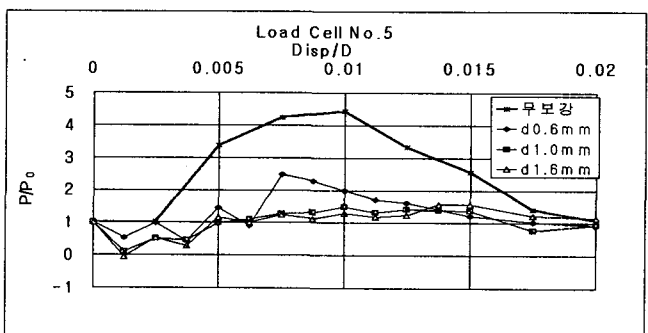


그림 14 터널 접선방향의 토압(LCN. 5)

그림 13과 그림 14은 마이크로파일 직경의 변화에 따른 토압의 변화를 나타낸 것이다. RS/d 의 값이 50 이상인 경우 토압이 일정치로 수렴하는 결과를 보이며, 이는 보강 간격비를 달리한 실험 결과와 비슷함을 알 수 있다.

4.5.2 보강설치위치에 따른 토압의 분포

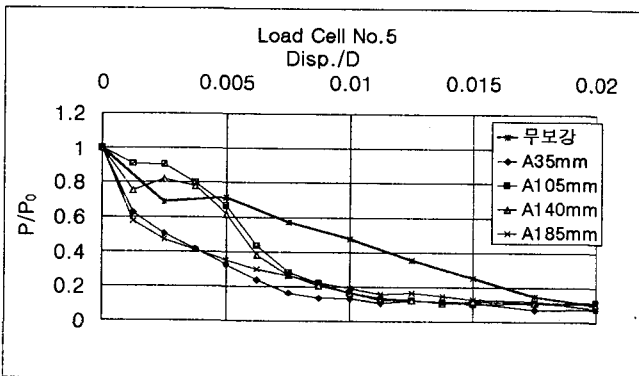


그림 15 터널 반경방향의 토압(LCN. 5)

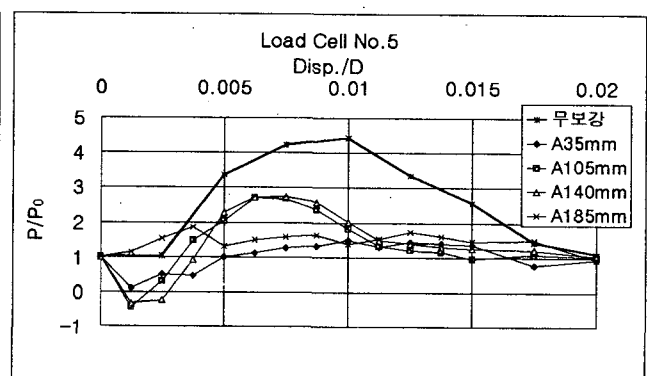


그림 16 터널 접선방향의 토압(LCN. 5)

그림 15과 그림 16은 보강재 설치위치에 따른 터널에 작용하는 토압을 나타내었다. 그림에서와 같이 파일보강설치의 거리비(A/L)가 증가함에 따라 토압은 전반적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 4.3절의 설치위치에 따른 구조물 침하 억제효과와는 다른 양상임을 알 수 있다. 이는 마이크로파일의 설치되는 위치가 지반 내에서 파괴면 형성에 영향을 미치기 때문이라 여겨진다. 또한, 거리비가 증가함에 따라 서서히 증가하던 토압이 거리비가 0.925인 경우 급격히 감소하는데, 이점 역시 마이크로파일이 지반내부에서 파괴면 근처에 보강되었기 때문으로 판단된다. 이 경우 터널에 작용하는 토압은 감소하나, 인접구조물의 침하량은 증가한다. 따라서, 인접 구조물의 침하 억제를 위한 적절한 보강영역은 거리비(A/L)가 0.7 이내 즉, 구조물 시작위치(M선)에서 천단지표점까지의 거리가 0.7L 이내이다.

4.5 주변지반의 거동 분석

사진법을 이용하여 모형지반의 거동을 분석하였다. 무보강 및 마이크로파일 설치 위치를 변화시킨 경우에 대해서 변위등고선을 그림 21에 나타내었다.

그림 17은 무보강-상재하중인 경우와 마이크로파일 보강시의 변위등고선이다. 그림 17 (a)에서 보면 터널굴착시 터널 좌측 어깨부 부근에 변위가 발생하여 터널 양어깨부에서 발달된 변위가 구조물 부근의 지표면까지 확대되어감을 알 수 있다. 그림 17 (a)와 (b)를 비교하면, 마이크로파일의 보강효과로 인하여 동일한 변위등고선 값으로 둘러싸인 면적의 영역이 감소되는 것을 알 수 있다. 그림 17 (b)와 (c)를 비교하면 그림 17(b)에서 변위등고선 5.0이상의 값에 해당하는 면적이 터널 양어깨부에 존재하나 그림 17(c)에서는 우측 어깨부에만 존재한다.

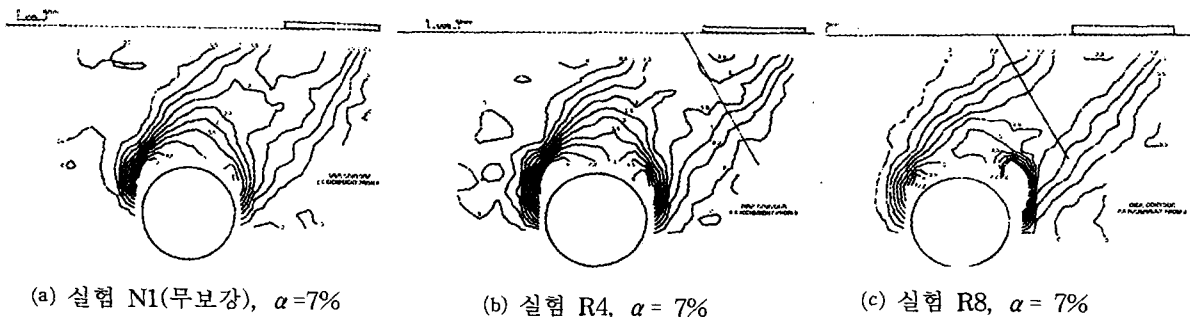


그림 17 변위등고선도

5. 결론

- ① 본 연구는 토피고(H)는 1.5D, 구조물 위치는 1D, 마이크로파일 설치각도는 60°, 또한 전체 실험에서 지반은 건조밀도 1.632t/m³, 함수비 0.3%로 균질하게 조성되었다
- ② 본 실험에서 무보강과 비교하여 간격비(보강간격(RS)/파일직경(d))가 50이하에서 침하비는 M선 0.86, N선 0.725로 침하 억제 및 보강이 효과적임을 알 수 있다.
- ③ 보강효과는 거리비(A/L)가 약 0.7지점에서 침하량의 경우 M선 2.576mm, N선 1.926mm이며, 침하비의 경우 M선 0.821, N선 0.711로 감소효과가 탁월하였다. 하지만 거리비에 따른 침하 억제효과는 거리비 0.7이상의 경우 급격하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 거리비(A/L)가 0.7이내인 영역을 보강하는 것이 효과적이라고 판단된다.
- ④ 보강 간격 및 마이크로파일 직경의 변화에 따른 토압은 RS/d가 50이내에서 반경방향응력 및 접선응력이 일정한 최소치로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

<참고문헌>

- 1) 임종철, 고희성, 박이근, 오명렬 (1998). “토사터널에 사용된 마이크로파일의 지반침하 억제효과에 관한 실내모형실험”, 1998 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.365-372.
- 2) 林漢旭, 李喜根 (1995). “터널·지하공간 굴착공학”, 歐美書館, pp. 27-38.
- 3) 임종철, 강낙안, 공영주, 주인곤 (1996. 6). “지반굴착시의 지반앵커에 의한 근접 구조물의 침하 억제 효과”, 부산대학교 생산기술연구소 논문집, 제 50집, pp.49-59.
- 4) 임종철, 고희성, 박이근, 장지건 등 (1997). “실내모형실험에 의한 토사NATM의 연구용역 보고서”, 부산대학교 생산기술 연구소, pp. 69-76.
- 5) 姜樂安 (1995). “모래地盤 掘鑿 時 近接 構造物의 沈下抑制 效果에 관한 實驗的 研究”, 博士學位論文, 釜山大學校
- 6) 임종철, 고희성, 박이근, 오명렬 (1996). “모래지반내의 터널굴착시 지반거동에 관한 실내모형실험”, 1996년도 학술발표회 논문집(II), pp. 371~374.
- 7) 윤이환, “실드 테일보이드가 地上構造物의 沈下에 미치는 影響과 沈下抑制對策에 관한 基礎的 研究”, 부산대학교 공학석사 학위논문, 1999년 2월.