터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제20권 제4호, 2010년 8월, pp. 260~266

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 20, No. 4, 2010, pp. 260-266
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

그라우팅 강성도에 따른 2-Arch 터널의 거동

이종민[1], 이상덕[2]*

Behavior of 2-Arch Tunnel with Stiffness of Grouting

Jong-Min Lee, Sang-Duk Lee

Abstract In this study, wish to analyze effect that affect on each tunnel (right and left tunnel) according as proceeding of leading tunnel (right tunnel), following tunnel (left tunnel) and pilot tunnel excavation through behavior of tunnel and surrounding base by model tests. And stress-transfer mechanism that occurs from in-situ loosing area and arching effect by difference of stiffness ratio and overburden heights were verified experimentally. The model tests were carried out by varying the stiffness of reinforced area and overburden height, measured deformation of tunnel and displacement of surrounding base. The model tests followed exactly the real 2-Arch tunnel construction stages.

Key words 2-Arch tunnel, Reinforced area, Stress-transfer, Loosing area

초 록 본 연구에서는 모형실험을 통한 2-Arch 터널의 거동과 주변지반의 거동으로부터 중앙부 Pilot 터널굴착 및 선행터널(우측터널)과 후행터널(좌측터널) 굴착에 따라 좌·우 터널 상호간에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 보강영역의 상대강성비와 토피고에 따라 발생하는 원지반 이완영역 및 아칭효과에 의한 중앙필러 및 주변지반의 하중전이 현상을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 2-Arch 터널의 시공순서를 반영한 실험순서에 따라 모형실험을 수행하였으며, 보강영역의 강성 및 토피고를 변화시켜 이에 따른 2-Arch 터널의 변형 및 주변지반의 변위를 측정하였다.

핵심어 2-Arch 터널, 보강영역, 하중전이, 이완영역

1. 서 론

현재까지 국내에 시공된 도로터널은 2차로 병렬로 이루어진 산악터널이 주종을 이루고 있으나 최근에는 자연환경 훼손 최소화, 주변지장물 보호 및 입·출구부 구조물과의 연계성 확보를 위하여 대단면 터널 또는 2-Arch 터널을 채택하는 사례가 증가하고 있다.

일반적으로 지반 및 토피조건이 양호하고 일방향 4차로로 구성되는 경우에는 대단면 터널을 적용하고, 지반 및 토피조건이 불리하거나 양방향 4차로로 구성되는 경우에는 터널안정성 및 운전자 주행성 등에 유리한 2-Arch 터널이 적용되고 있다(이상덕, 1997).

이와 같이 2-Arch 터널이 적용되는 경우에는 터널의 경제적인 측면보다는 병설터널의 구조적 안정성 확보가 중요시되는데, 아직까지 국내에서는 근접 병설터널에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족하다. 또한, 그 역학적 거동에 대한 연구가 미흡하기 때문에 구조적 안정성에 대한 확신을 갖지 못하여, 자신 있게 적용하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 2-Arch 터널의 1/70 크기로 축소한 모형실험기를 제작하고 시공단계에 따라 모형실험을 수행함으로써 2-Arch 터널의 역학적 거동특성을 규명하고자 하였으며 그라우팅 보강영역의 강성 및 토피고를 변화시켜 주변지반의 거동 특성을 확인하였다.

2. 모형실험

2.1 실험개요

본 연구에서는 사질토지반에서 그라우팅의 두께와 토

[1] 주식회사 솔토 대표이사
[2] 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
* 교신저자 : lsangduk@ajou.ac.kr
접수일 : 2010년 7월 13일
심사 완료일 : 2010년 8월 17일
게재 확정일 : 2010년 8월 26일

피고에 따른 2-Arch 터널의 거동을 실험적으로 고찰하여 중앙필러 및 주변지반으로 전이된 하중에 의한 지표 및 지중 침하량을 정량적으로 제시함으로써 원지반 이완에 의한 하중전이 현상을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 중앙필러를 포함한 선행 및 후행 터널을 제작하고 모형터널을 지지하고 있는 바닥판을 가동판으로 제작함으로써 지반변형이 용이하도록 하였다. 또한 지표 및 지중 침하는 일정한 심도별로 설치한 침하판 및 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다.

모형실험은 Pilot 터널굴착에서 본선터널굴착으로 이어지는 시공단계에 따라 진행되었으며 원지반의 토피고와 그라우팅 보강영역의 강성 변화에 따른 2-Arch 터널 및 주변지반의 거동을 확인하였다.

2.2 모형토조

모형토조는 300 mm × 1,200 mm ×1,100 mm(폭 × 길이 × 높이)로 제작하여 모형터널 측벽에서 좌·우로 1D, 천단에서 2D까지 지반을 조성할 수 있도록 하였으며, 벽체는 실험의 전 과정을 외부에서 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴판을 이용하여 제작하였다. 벽면과 아크릴판 사이의 마찰을 줄이기 위해 유리판을 지반과 아크릴판 사이에 부착하였고 모형지반에 의한 재료의 변형을 방지하기 위하여 외부에 16 mm × 80 mm의 평철(steel flat bars)을 이용한 프레임으로 단단히 구속하였다(그림 1).

가동판과 바닥판은 시험하중(최대 100 kg)에 비하여 강성이 크고 성형이 쉬운 베이클라이트판을 사용하였다. 가동판은 시공단계를 고려하여 Pilot 터널굴착을 구현하기 위한 Pilot 터널부와 본선터널에 해당하는 Right 및 Left 터널부(각각 300 mm × 134 mm)의 세 개의 분리된 시스템(전체 가동판 길이 400 mm, 1D)으로 제작하였다. 주변 바닥판은 하중의 민감한 변화를 측정하기 위하여 터널에 인접한 곳은 좁은 폭으로 하고 터널에서 멀어질수록 넓은 폭으로 하여 300 mm × 30, 40, 50, 65, 80 mm의 크기로 제작하였다. 각 판에는 로드셀을 부착하여 실험단계에 따른 하중의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

가동판의 연직변위는 직선운동 베어링인 Linear Guide를 가동판 측면 4개소에 좌·우 대칭으로 설치하여 마찰이 최소화되도록 하였으며 일정한 속도 유지 및 변위조정이 용이하도록 기어박스를 제작하였다(K. Terzaghi의 Trapdoor실험에서 착안 및 응용, 1943).

모형토조의 뒷면 벽체에는 바닥으로부터 선·후행 터널 높이에 해당하는 위치에 개폐가 용이한 작업구를 설치하여 지반조성 단계에서는 작업구를 차단하고 본선터널굴착 단계에서는 작업구를 개방하여 선·후행 터널 내부의 지반을 제거할 수 있도록 하였다.

그림 2는 실내모형실험기의 개요도이다.

2.3 모형 그라우트체 - 보강된 지반

본 연구에서는 그림 3과 같이 터널 라이닝 형태의 아크릴 틀에 진흙(점성토) 반죽을 균질한 두께로 씌워 모형 그라우트체로 성형하였다.

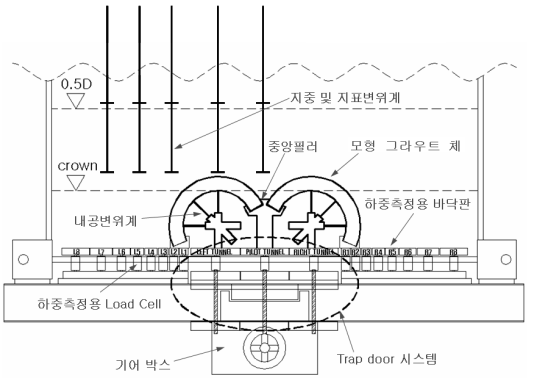


그림 2. 실내모형실험기 개요도

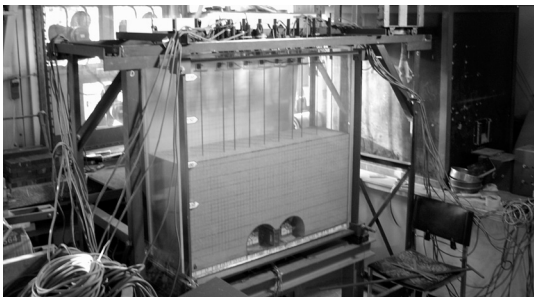


그림 1. 실내모형실험기 개요도

그림 3. 모형 그라우트체의 성형

경도(硬度:굳기)가 낮고 물을 적당량 함유할 때 자유로이 여러 형상으로 만들 수 있는 가소성(可塑性, Plasticity)이 있으며, 이번 연구에서는 전혀 굳히지 않은(함수비 40%) 상태의 모형 그라우트체로 실험을 수행하였다.

한편, 축소 모형실험(Reduced Model Test)에서 정량적인 결과를 도출하기 위하여 지반상태와 터널구조물의 축소율을 결정하는 것은 매우 중요한 과정으로 모형실험상에서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모사함에 있어 상사성 원리를 충족시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 원지반상태와 보강된 지반의 강도특성이 고려된 '상대강성비'를 도입하여 모형 그라우트체의 두께를 결정함으로써 상사성 원리를 만족시키고자 하였다.

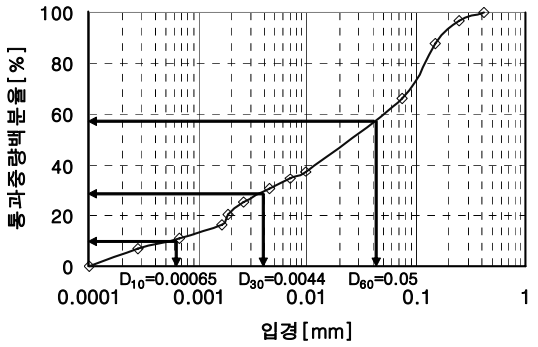


그림 4. 모형 그라우트체 재료의 입경가적곡선

표 1. 모형 그라우트체 재료의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	Cu = 76.92, Cc = 0.60
단위중량	γ_t = 1.85 tf/m^3, γ_d = 1.32 tf/m^3
비 중	Gs = 2.51
함 수 비	w = 40%
액성한계, 소성한계	w_L= 69%, w_p= 27%
액성지수, 소성지수	I_L = 0.31, I_p = 42%
컨시스턴시 지수	I_c= 0.69
통일분류법에 의한 지반 분류	CH

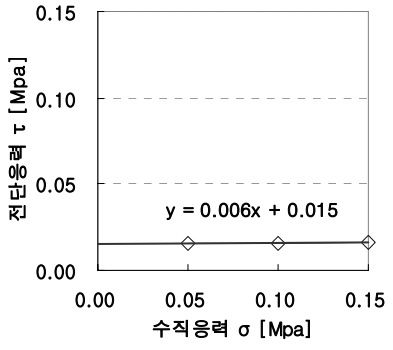
연구에 사용되는 모형 그라우트체의 공학적 특성을 파악하기 위하여 기본물성실험, 직접전단시험 및 일축압축시험 등을 수행하였다. 입도분포시험을 통한 입경가적곡선은 그림 4와 같으며, 모형지반의 물리적 시험결과는 표 1과 같다.

그림 5는 모형 그라우트체의 재료에 대해 직접전단시험과 일축압축시험을 실시한 결과이다. 점착력은 0.15 MPa 정도이고, 내부마찰각은 거의 없는 것으로 추정되었다. 일축압축시험의 결과 q_u = 0.04 MPa, E_{50} = 1.4 MPa 이었다. 모든 물성시험의 결과를 분석하면 그라우트체 재료의 컨시스턴시는 약소성 상태이다.

상대강성법(relative stiffness method)은 일반적으로 터널의 라이닝과 라이닝을 둘러싸고 있는 지반 사이의 상대적 강성에 따라 터널의 역학적 거동이 좌우된다는 실험 결과 및 수치해석 결과를 바탕으로 전개하는 해석법이다. 본 연구에서는 이 해석법을 터널의 보강영역이 주변 지반에 대해, 그리고 작용하는 지압에 대해 어느 정도 취성적(stiff)인지, 유연(flexible)한지를 나타내는 지표변수를 해석의 기초로 사용하였다. 이러한 지표변수에 휨강성비(flexibility ratio)가 있다(김동갑, 2005).

F(flexibility ratio, 휨강성비)는 보강영역의 휨강성에 대한 지반의 강성의 값으로서, 보강영역과 지반내 공동이 순수 전단 상태에 해당하는 압력을 각각 받고 있을 때의 매체와 보강영역의 강성비로 정의한다.

$$F = \frac{E_m \cdot (1-\nu_l^2) \cdot R^3}{6E_l I_l \cdot (1+\nu_m)} \tag{1}$$



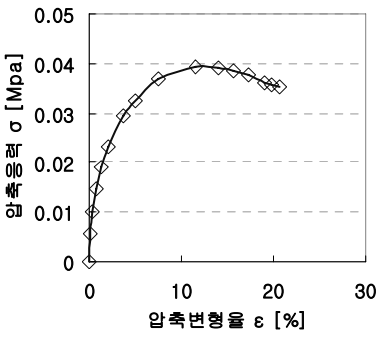


그림 5. 직접전단시험 및 일축압축시험 결과

F : 휨강성비
E_m, E_l : 지반 및 보강영역의 탄성계수
ν_m, ν_l : 지반 및 보강영역의 프아송비
R : 보강영역의 내부반경
I_l : 보강영역 단위길이당 단면2차모멘트

본 연구에서는 풍화암 지반에서 그라우팅에 의해 발생한 보강영역의 규모를 가정하고, 각각에 해당하는 일반적인 물성을 적용함으로써 2-Arch 터널굴착에 따른 휨강성비를 산정하였다(표 2).

2.4 모형지반

모형지반은 No.12 체 통과 No.40 체 잔류하는 입경이 작은 주문진 자연사를 이용하여 조성하였으며 심도별로 균질하게 조성되도록 하기 위하여 샌드커튼 방식의 강사기를 이용하였으며, 기본물성시험 및 직접전단시험 수행결과는 표 2, 3과 같다.

아래 표 3과 4와 같은 물성을 갖는 모형지반의 탄성계수는 50 MPa 정도이며, 이는 상대강성비 개념을 적용하여 계산하였을 때 실제지반의 풍화암에 해당한다(이상덕, 1998).

2.5 실험변수

보강영역의 강성비는 각각 1.03E-3, 6.37E-3, 44.3E-3로 변화시켰으며, 토피고는 0.5D(230 mm), 1.0D(460 mm), 1.5D(690 mm)로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다(표 5).

표 2. 지반에 대한 보강영역의 휨강성비 산정

구분	휨강성비 ($\times10^{-3}$)	지반탄성계수 (MPa)	보강영역 탄성계수 (MPa)	반경 (m)	보강영역의두께 (m)	지반 종류
실제 보강영역	1.038	600	650～900	7.40	0.80	풍화암
	6.314			7.20	0.40	
	45.059			7.10	0.20	
모형 보강영역	1.033	50	1.4	0.120	0.04	모래
	6.366			0.11	0.02	
	44.297			0.105	0.10	

표 3. 모형지반의 물리적 시험 결과

물리적 특성	결 과
입도분포	D_{10} = 0.46, Cu = 1.72, Cc = 0.93
최대·최소 건조단위중량	γ_{dmax} = 1.79 tf/m^3, γ_{dmin} = 1.46tf/m^3
비 중	Gs = 2.61
통일분류법에 의한 지반 분류	SP

표 4. 직접전단시험 결과

상대밀도 D_r[%]	내부마찰각 ϕ[°]	점착력 c [kN/m^2]
74.8	37.4	0

표 5. 실험변수

강성비 \ 토피고		0.5D	[D05]	1.0D	[D10]	1.5D	[D15]
1.03E-3	[SR1]	SR1D05		SR1D10		SR1D15	
6.37E-3	[SR2]	SR2D05		SR2D10		SR2D15	
44.3E-3	[SR3]	SR3D05		SR3D10		SR3D15	

D : 터널폭(460 mm)

2.6 계측

원지반 초기하중 및 실험단계에 따라 발생하는 중앙필러 작용하중은 터널중앙에 두 개의 로드셀(Load Cell)을 전·후로 설치하여 측정하였으며, 주변지반의 하중변화 및 선·후행 터널 기초부의 축력은 좌·우 각각 8개로 분리된 바닥판에 수직으로 설치함으로써 측정하였다.

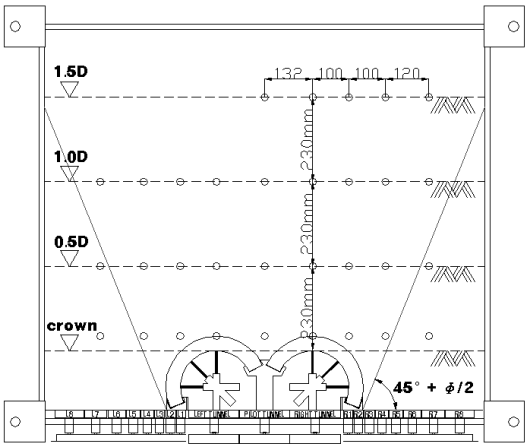


그림 6. 심도별 지중 및 지표침하 측정위치

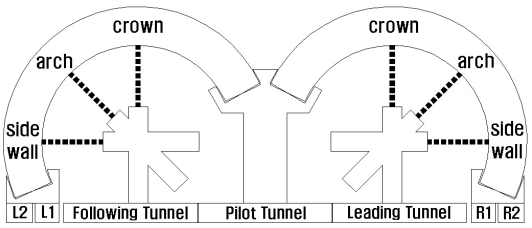


그림 7. 내공변위 측정위치

지표 및 지중 침하 측정위치의 선정은 좌·우 터널 측벽에서 $45°+\phi/2$ 의 접선방향으로 지표까지 이어지는 예상파괴면과 문헌에 의한 가동판 실험에서 얻어진 이상적인 파괴면(가동판 끝 부분에서 연직선)을 기준으로 하였다(그림 6).

터널의 내공변위는 천정, 어깨, 측벽의 세 부분을 기준으로 하였으며 자세한 계측위치는 그림 7에 나타나 있다.

2.7 실험방법

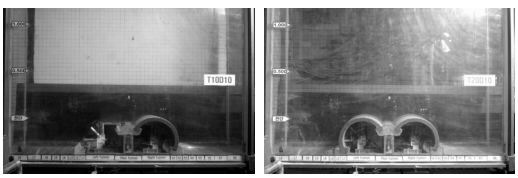
본 연구는 실험의 정확성을 유지하고, 연구성과의 제고를 위하여 다음의 순서에 따라 구성하여 수행되었다.

3. 실험결과

3.1 지중 및 지표침하

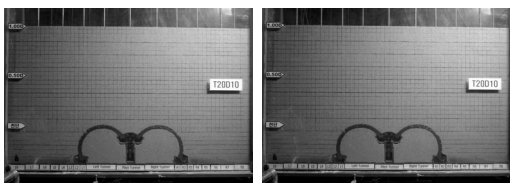
Pilot 터널 굴착 및 본선터널굴착에 따른 터널 상부지반의 깊이별 침하경향을 파악하기 위하여 심도에 따라 0.5D(200 mm) 간격으로 침하판을 설치하였으며 침하판의 변위로부터 지중 및 지표침하를 측정하였다. 또한 지반조성시 일정한 간격(60 mm)으로 염색사를 뿌려 실험지반과 구분되어 보이는 얇은 띠를 형성시킴으로써 터널굴착으로 인한 주변지반의 전체적인 변형을 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. 시공단계에 따라 측정된 지중 및 지표침하량과 염색사의 변형형상으로부터 그라우트체의 두께 및 토피고에 따른 이완영역을 확인하였으며, 침하의 발생정도를 뚜렷이 나타내기 위해 결과값에 약 100배를 취하여 그래프를 작성하였다.

그림 9(a)는 토피고가 1.5D일 때, 그라우트체의 두께 각각에 대해서 Pilot 터널부의 바닥판을 중앙필러의 하중의 수렴 지점까지 강하하였을 때 발생한 지중 및 지

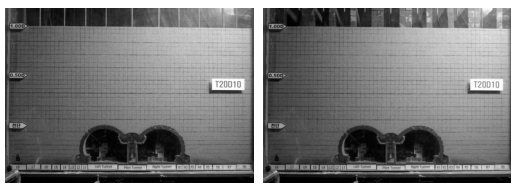


① 초기상태

② 지반조성

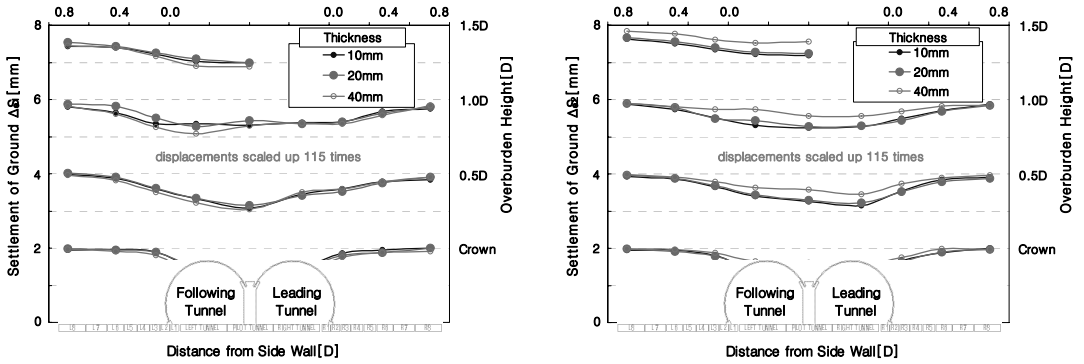


③ 지반조성완료 및 Pilot터널부 강하



④ 본선터널굴착 및 상재하중재하

그림 8. 실험 수행 과정



(a) Pilot Tunnel Excavation (b) Main Tunnel Excavation

그림 9. 터널 굴착에 따른 침하

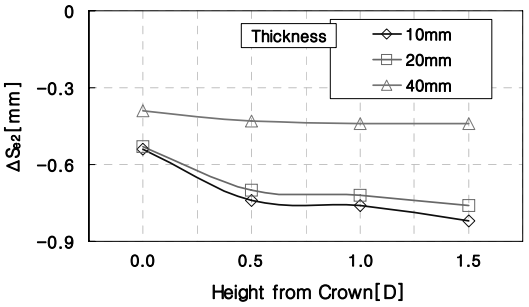


그림 10. 본선터널 굴착단계 중 부분별 침하

표침하를 나타낸 것이다. 이를 통해 Pilot 터널 굴착단계에서는 그라우팅의 두께가 지중 및 지표침하에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

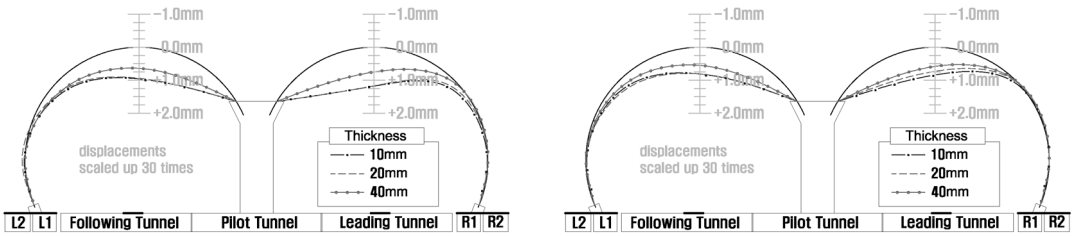
그림 9(b)는 토피고가 1.5D이고, 그라우트체의 두께 각각에 대해서 본선터널의 굴착을 완료하였을 때 발생한 지중 및 지표침하를 나타낸 것이다. 선행터널 굴착시에 이완이 크게 되어 전체적으로 좌·우 비대칭의 형상이 나타나며, 지중에서 지표쪽으로 갈수록 대체로 침하가 줄어드는 경향을 보인다. 그라우팅의 두께가 10 mm일 때 침하가 가장 크게 발생하지만, 20 mm일 때와 크게 차이가 없었다. 그라우팅의 두께가 40 mm일 때에는 침하가 크게 줄어든다는 것을 쉽게 확인할 수 있었다.

그림 10은 본선터널 굴착 단계에서 지중 및 지표의 침하를 그라우팅의 두께에 따라 아래에서부터 수직 위치의 순서대로 나타낸 것으로, Pilot터널의 상부에서 측정한 결과 값이다. 대체로 그라우트체가 두꺼울수록 침하가 적게 발생하였다. 그라우트체의 두께가 10 mm와 20 mm일 때에는 뚜렷한 차이가 없었으며, 40 mm일 때 그 경향이 가장 뚜렷하였다.

3.4 내공변위

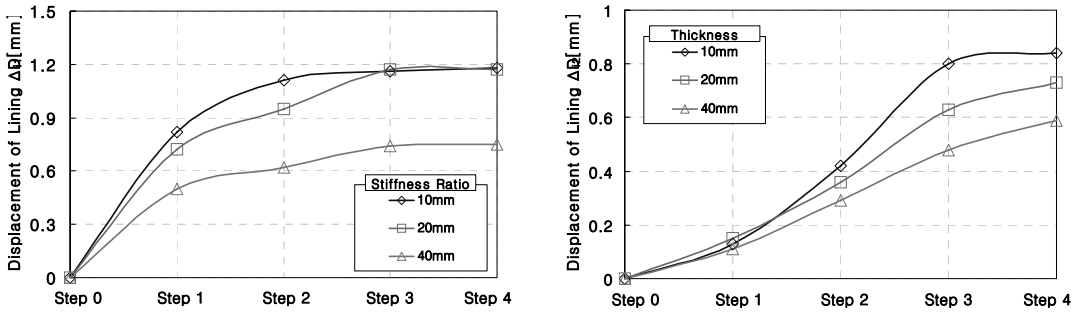
내공변위는 내공변위 측정용 LVDT를 지반조성 전 모형터널 내부에 반경방향으로 설치하여 측정하였으며, 측정위치는 선·후행 터널 천단, 어깨, 측벽의 6개소이다. 본 연구에서는 내공단면 축소방향을 양(+)으로 하였으며, 발생정도를 뚜렷이 나타내기 위해 결과값에 30배를 취하였다.

그림 11(a)에서 그라우트 체의 두께가 10 mm와 20 mm일 때는 비슷한 크기의 변위가 발생하며, 40 mm일 때에는 이보다 변위가 적게 발생하였다.



(a) Main Tunnel Excavation (b) Loading Stage

그림 11. 터널 굴착 및 재하에 따른 내공변위



(a) Main Tunnel Excavation (b) Loading Stage

그림 12. 굴착 및 재하에 따른 천단부 변위

그림 11(b)는 상재하중재하를 4단계까지 하였을 때 내공변위의 변화를 그라우트 체의 두께에 따라 나타낸 것으로, 그라우트 체가 두꺼울수록 변위가 적게 발생하였으며 그 차이가 작고 뚜렷하지 않았다.

그림 12는 선행터널 천단변위를 그라우트 체의 두께에 따라 굴착단계(a) 및 재하단계(b)별로 나타낸 것으로 그라우트 체가 두꺼울수록 내공변위가 적게 발생하였으며, 상부에 비해 하부굴착단계에서 변위가 급격하게 줄어드는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

1) 대체로 그라우트 체의 두께가 두꺼울수록 지중 및 지표변위, 내공변위가 적게 발생하여 안정한 경향을 보인다.
2) 그라우트 체의 두께가 10 mm와 20 mm일 때 침하 발생정도나 응력분포가 큰 차이를 나타내지 않고, 두께가 40 mm로 두꺼워졌을 때 큰 차이를 나타내는 것으로 보아, 그라우트 체가 특정한 값 이상의 두께를 가졌을 때 효과가 확연해진다는 것을 알 수 있다.
3) 그라우트 체의 두께가 얇을수록 중앙필러의 하중분담율이 더 크며, 상대적으로 주변지반에 작은 하중을 전이하여 주변지반의 하중분담율을 감소시킨다. 즉, 그라우트 체가 얇아질 경우 중앙필러의 강성을 증대시켜야 할 것으로 사료된다.
4) 상재하중재하시 그라우트체의 두께에 관계없이 비슷한 크기의 하중영향이 중앙필러부 및 바닥판에 작용하고, 토피고가 높을 때 필러부에 하중이 집중된다.
5) 본선터널굴착 진행에 따른 중앙필러부의 하중분배율을 알아본 결과, 모든 실험에서 상부굴착단계가 85%이상의 하중이 분배된다.

참고문헌

1. 이상덕 외 2명, 1997, 안정된 지하구조물의 설계 및 시공, 도서출판 새론.
2. 이상덕, 1998, 토질역학, 도서출판 새론.
3. 김동갑, 2005, 기존터널에 근접한 하부터널 굴착에 따른 교차부 지반의 거동, 아주대학교 대학원 박사학위 논문.
4. K. Terzaghi, 1943, Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.

이 종 민

1988년 국립금오공과대학교 토목공학과 학사
1990년 국립금오공과대학교 토목공학과 석사
2008년 아주대학교 건설교통공학과 박사 수료
Tel: 031-423-0083
E-mail: lee200jm@hanmail.net
현재 주식회사 솔토 대표이사

이 상 덕

1980년 서울대학교 토목공학과 공학사
1982년 서울대학교 토목공학과 공학석사
1987년 독일 Stuttgart대학교 공학박사
Tel: 031-219-2503
E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr
현재 아주대학교 환경건설교통공학부 교수