

침투력을 고려한 터널의 내공변위 제어 미케니즘

Convergence-confinement method of a tunnel with the consideration of seepage forces

이인모*¹, 유승열², 남석우³, 신영진⁴

Lee, In-Mo · Yoo, Seung-Youl · Nam, Seok-Woo · Shin, Young-Jin

Abstract

When a tunnel is excavated below groundwater table, the groundwater flow occurs towards the tunnel resulting in the seepage pressure. In this paper, the effect of groundwater flows on the behavior of shotcrete lining installed between ground-liner interfaces was studied considering permeability ratio between the ground and the shotcrete into account. Three-dimensional coupled finite element analysis was performed for this assessment. Seepage forces will seriously affect the shotcrete behavior since arching phenomena do not occur in seepage forces. A parametric study was conducted on the various tunnelling situations including interfacial properties between ground and shotcrete lining, the shape of tunnel cross-section and the thickness of liner, etc. Moreover, the convergence-confinement method (CCM) of a NATM tunnel considering seepage forces was proposed. The result showed that the more watertight is the shotcrete, the smaller is the convergence and the larger is the internal pressure. Therefore, the watertight fiber-reinforced shotcrete is found to be even more advantageous when used in underwater tunnel.

Keywords: Seepage forces, shotcrete lining, convergence-confinement, permeability ratio

요 지

지하수위 하에서 터널을 굴착하게 되면, 지하수 흐름은 터널내로 발생하면서 터널 단면에 침투력이 작용하게 된다. 본 연구에서는 지하수 흐름을 고려한 슛크리트 라이닝 거동을 지반 및 슛크리트 라이닝 상호간의 투수계수의 비율에 따라 검토하였다. 슛크리트 응력 및 변위 관계는 3차원 유한요소 연계해석을 수행하여 산정하였다. 지하수 흐름 자체는 아칭효과가 발휘되지 않기 때문에, 터널의 응력이 평형상태에 도달한 후에도 침투력은 계속적으로 슛크리트 라이닝에 작용하여 심각한 영향을 준다. 지반 및 슛크리트 라이닝 상호간의 인터페이스 특성 및 터널의 단면형상 그리고 라이닝의 두께를 포함한 슛크리트 거동의 영향 인자에 대해 매개변수분석을 실시하였다. 또한 NATM 터널에서의 침투력을 고려한 내공변위 제어법을 제안하였다. 해석결과를 보면, 슛크리트의 투수성이 낮아질수록 잔류수압에 따른 유효응력의 감소로 인해 내공변위는 감소하고, 내압은 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 차수성이 강한 강섬유보강 슛크리트가 해저/하저 터널의 지보재로서 더욱 유리하다는 결론을 얻었다.

주요어: 침투력, 슛크리트 라이닝, 내공변위 제어, 투수계수 비

*1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학부 교수 (inmolee@korea.ac.kr)

2 정회원, (주) 바우컨설턴트 기술연구소

3 정회원, Purdue University 박사후 과정

4 고려대학교 사회환경시스템공학부 박사 과정

1. 서론

기존의 배수형 터널 해석시에는 숏크리트 및 지반의 투수계수가 동일하다고 가정하였으나 실제로 숏크리트는 균열이 발생하지 않는 이상 차수효과를 발휘하게 된다. Bobet (2003)는 Einstein 및 Schwartz (1979)의 단순설계법을 바탕으로 지하수를 고려한 지반-라이닝간의 응력에 대해 이론식을 제안한 바 있으며, 라이닝 응력은 터널의 배수조건에 무관하다는 결과를 나타냈다. Schweiger 등 (1991)에 의하면 지하수 흐름 고려시의 지층의 투수계수의 변화는 터널주변의 수압분포 및 유량에는 영향을 미치지만 침투력에 의한 지보재의 응력 및 변형에는 민감하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 지금까지 진행된 연구는 숏크리트의 차수성 및 하중분배율이 고려되지 않은 한계점을 지니고 있기 때문에 본 연구에서는 숏크리트 및 지반 상호간의 투수성 및 아칭효과를 감안하여 숏크리트 거동의 경향성을 검토하였다. 지하수 이외에도 지반 및 숏크리트 사이의 인터페이스 특성 또한 숏크리트에 추가하중을 야기시킬 수 있으므로 단면형상을 변화하여 매개변수분석을 수행하였다. 내공 변위-제어방법은 터널막장 부근에서 지보재 설치 후 발생하는 변위를 제어함으로써 터널의 안정을 도모하는 기본원리로 터널지보재의 작용원리이며 종단변형곡선, 지반반응곡선 및 지보재특성곡선의 3대 요소로 구성된다. 침투력을 고려한 내공변위 제어법의 이론식 및 수치해석에 근거하여 숏크리트 및 지반의 투수성에 따른 내공변위 제어법을 개념적으로 연구하였다.

2. 침투력을 고려한 숏크리트 거동

2.1 숏크리트 및 지반 상호간의 투수성을 고려한 수치해석적 모델링 방법

본 해석에서 3차원 유한요소 연계해석 프로그램인 'PENTAGON-3D'를 사용하여 침투력을 산정하였으며 이를 물체력 (Body Force)으로 간주하여 지하수흐름이 발생하는 곳의 동수경사와 물의 단위중량을 곱한 값

을 갖게 된다. 지반의 구성모델은 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 적용하였으며 해석대상지반은 풍화토 지반을 대상으로 하였으며 소성변형을 산정에는 연합유동법칙 (associated flow rule)을 적용하였다. 해석대상지반 및 지보재의 물성치는 표 1과 같다. 그림 1과 같이 지반은 2차원상의 4절점 솔리드 요소를 이용하였으며 3차원상에서는 8절점 솔리드 요소를 생성시켰으며 숏크리트는 구조요소인 4절점 셸 요소로 모델링하였으며 탄성재료로 가정하였다. 그러나 셸 요소 특성상 투수계수를 부여할 수 없기 때문에 Shin 등 (2002)이 제시한 모델링 기법을 적용하여 터널주변에 숏크리트 두께의 솔리드 요소를 형성하고 숏크리트의 투수계수 및 지반의 강성을 부여하는 방법을 이용하였다.

또한 실제 숏크리트의 시공 순서대로 연성 숏크리트를 설치한 지점에 한 막장 굴착 후 다시 강성 숏크리트를 설치하였으며, 상단부의 숏크리트를 먼저 설치하고 변위가 수렴된 후에 하단부 지점에 숏크리트를 타설하는 시공과정을 모사하였다.

표 1. 해석대상지반 및 지보재의 물성치

지반 종류	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	마찰각 (deg)	탄성계수 (kPa)	포아송비
풍화토	18.6	9.81	32.0	50,000	0.35
연성 숏크리트	24.5	-	-	5,000,000	0.2
강성 숏크리트	24.5	-	-	15,000,000	0.2

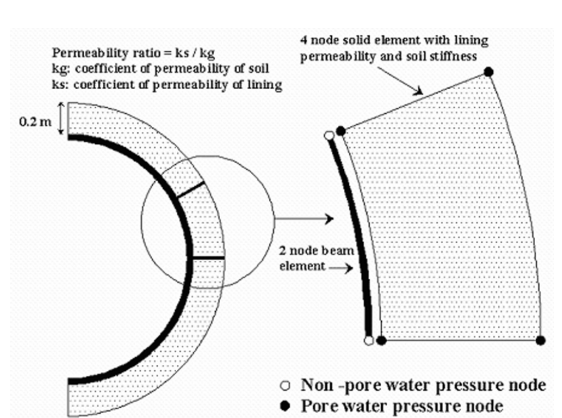


그림 1. 라이닝 투수계수 모델링 개요

표 2의 서울지하철 7호선 표준지보패턴 설계기준에 근거하여 본 해석 지반에서의 굴진장을 1.0m로 설정하였다. 해석대상 터널의 직경 (D)은 5m이며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭이므로 우측 반단면에 대해서 해석을 수행하였다. 해석영역은 터널막장 전방 및 후방을 각각 2D, 횡방향의 거리를 10D로 설정하였으며 토피고 (C) 및 초기지하수위 (H)는 각각 C/D=4 및 H/D=4로 설정하였다. 표 3에서 나타낸 바와 같이 건조지반인 경우와 시공중에는 지하수위가 터널 바닥부까지 저하하다가 시공 완료 후에 지하수위가 복원되는 경우, 그리고 시공중 및 운용 중에도 지하수위가 지표면에 계속적으로 존재하는 경우에 대해 각각 슛크리트의 투수계수 (k_s)를 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. 지반의 투수계수는 이방성을 나타내는 것이 원지반을 반영하는데 있어서 도움이 되지 만 또 다른 변수의 도입으로 인해 결론을 도출하는데 어려움이 따르기 때문에 터널주변 지반이 등방성 (Isotropic) 및 균질성 (Homogeneous)을 지닌다고 가정하여 풍화토의 투수계수 (k_g)는 10^{-6} m/sec로 고정하였으며 해석 지반의 축압계수는 0.5로 가정하였다. 여기서, $k_s/k_g=1$ 인 경우는 타설된 슛크리트에 균열이 다수 발생되어 지반의 투수계수와 비슷한 경우이며, $k_s/k_g=10^{-6}$ 은 강섬유보강 슛크리트를 타설한 경우로 보면 될 것이다. 한국수자원공사 (KOWACO, 1997)의 실험결과에 의하면 콘크리트는 균열폭이 감소함에 따라 투수계수의 범위가 작

아지는 것을 알 수 있었으며 강섬유보강 슛크리트는 이러한 측면에서 균열확대에 대한 저항력이 크므로 투수계수를 감소시켜 차수성을 발휘할 수 있다.

2.2 지하수위 복원시의 슛크리트 거동

지하수위가 복원되기 전에 상단부 슛크리트를 설치하고 굴진이 끝난 시점에서 하단부 슛크리트를 설치하였으며 시공 완료 후 시점에서 지하수위가 복원된 것으로 가정하여 표 3에서 언급한 바와 같이 Case 1, Case 2, Case 3에 대한 슛크리트 응력분포 및 내공변위 양상을 중심으로 경향성을 검토하였다.

2.2.1 슛크리트 응력 양상

건조상태인 경우에는 축압계수 ($K_0=0.5$)의 영향으로 인해 측벽부의 최대주응력이 천정부에 비해 더욱 커지므로 축력 또한 10%정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 불균등한 하중분포로 인해, 측벽부에서는 부 (-)의 휨모멘트, 천정부에서는 정 (+)의 휨모멘트가 발생하였다. 그러나 지하수위가 복원되는 경우인 Case 2 및 Case 3인 조건에서는 심도가 깊어짐에 따라 침투력과 동시에 축압계수의 영향까지 가해져 측벽부보다 천정부 및 바닥부에서 하중이 상대적으로 크게 작용하여 축력의 크기 및 모멘트의 부호가 반대되는 결과를 보였다.

따라서 그림 2와 같이 슛크리트 휨응력 또한 측벽부에 비해 천정부 및 바닥부에서 더욱 크게 나타났다. 여기서 슛크리트의 투수계수가 지반의 투수계수에 비해 현저하게 낮은 경우에는 축력 및 휨모멘트의 절대값이 전체적으로 크게 나타나 Case 3의 슛크리트 휨응력은 Case 2 보다 50%정도 크게 작용한다. 이는 투수성이 낮아질수록 잔류수압 거동에 근접하기 때문이다. 과도한 휨모

표 2. 서울지하철 7호선 표준지보패턴도

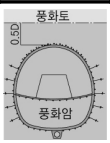

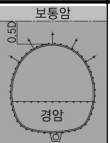
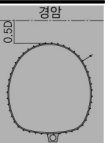
구 분	PS - 2A	PS - 3A	PS - 4	PS - 5	
적용지반					
굴착방법	링컷	상하분할	상하분할	전단면	
굴진장	0.8m	1.0m	1.2m	1.5m	
스�크리트 두께	20cm	16cm	10cm	8cm	
록볼트 간격	중	0.8m	1.0m	1.2m	Random
	횡	1.0m	1.2m	1.5m	Random
라이닝 두께	300mm	300mm	300mm	300mm	

표 3. 슛크리트 투수계수변화에 의한 해석조건

조건	k_s/k_g	
	1	10^{-6}
건조상태	Case 1	
지하수위 복원시	Case 2	Case 3
지하수위 상존시	Case 4	Case 5

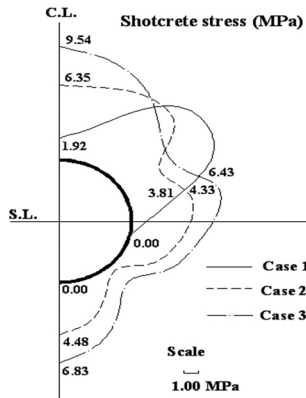


그림 2. 지하수위복원시의 슛크리트휨응력분포

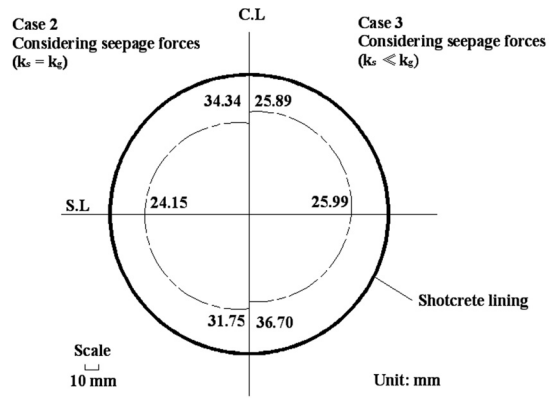


그림 3. 지하수위복원시의 내공변위 분포

멘트는 휨압축응력뿐만 아니라 휨인장응력까지 유발시켜 허용응력의 기준치를 초과시킨다. 따라서 콘크리트 구조설계기준 (2003) 에서 제시된 바와 같이 식 (1) 및 식 (2)의 휨압축강도 및 휨인장강도를 상회하는 휨응력이 발생하는 경우에는 슛크리트의 안정성에 문제점을 야기시킬 수 있다. 강성 슛크리트의 일축압축강도의 설계 적용치는 일반적으로 20MPa이며 이는 건식 슛크리트의 1일 양생에 해당하여 보수적인 설계로 판단된다. 따라서 본 수치해석시에는 타설방법을 습식으로 가정하여 28일 양생된 경우의 슛크리트 일축압축강도 (f_{ck})에 해당하는 36.4MPa를 적용하여 14.56MPa의 휨압축강도 (f_{rc}) 및 3.8MPa의 휨인장강도 (f_{rt})를 산정하여 허용응력의 초과여부를 검토하였으며 그 결과, 건조 지반인 경우 및 침투력을 고려한 경우 모두 허용응력 이내에 머무르는 것으로 나타났다.

$$f_{rc} = 0.40f_{ck} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$f_{rt} = 0.63\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

2.2.2 터널의 내공변위 양상

그림 3의 결과에서 잔류수압 거동을 보이는 $k_s \ll k_g$ 인 경우의 측벽부 및 바닥부의 내공변위는 원활한 배수가 이뤄지는 $k_s = k_g$ 인 경우에 비해 10%가량 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 천정부의 내공변위는 Case 2인 경우가 Case 3에 비해 크게 나타났으며 Case 2의 바닥부 변위가 천정부 변위보다 작게 나타났다. 이는 Case 3인 경우에 잔류수압의 영향으로 인해 유효응력이 감소된 점

과 동시에 압밀현상과 같은 거동을 나타내는 Case 2의 지표침하량이 Case 3에 비해 2배 정도 크게 발생하였기 때문에 분석된다. 따라서 지표침하량이 내공변위에 미치는 영향을 정량적으로 검토하기 위해 식 (3)과 같이 천정부의 내공변위 (u_{crown}) 및 지표침하량 ($u_{ground\ surface}$)의 상대적인 변위차를 천정부의 내공변위로 정규화하여 상대변위비 (U)를 정의하였다. 상대변위비가 클수록 변위는 슛크리트 경계면에서 급격하게 증가하는 양상을 보이며, 이와 반대로 상대변위비가 작을수록 지표면에서의 침하량이 증가하게 된다.

$$U = \frac{u_{crown} - u_{ground\ surface}}{u_{crown}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

표 4의 결과로부터 Case 2의 천정부 내공변위는 지표 침하량의 비중이 크며 Case 3의 내공변위는 잔류수압의 영향으로 인해 변위가 급격하게 증가함을 의미한다.

2.3 지하수위 상존시의 슛크리트 거동

2.3.1 슛크리트 응력 양상

지하수위 상존시의 슛크리트 응력은 지하수위 복원시와 비교했을 때 전체적으로 작게 나타났다. 이는 지하수

표 4. 지하수위 복원시의 상대변위비

조건	상대변위비 (%)
Case 2	30.87
Case 3	52.30

위가 저하된 경우, 지하하중이 수중단위중량 (r_{sub})이 아닌 습윤단위중량 (r_s)으로 계산되었기 때문에 Case 5인 경우의 축력은 Case 4에 비해 30%~40%의 분포로 나타났다. 폐합된 원형단면의 경우에는 상대적으로 모멘트보다 축력의 영향을 크게 받으므로 그림 4와 같이 슛크리트 휨응력 분포는 축력 분포와 매우 흡사한 양상을 나타냈다. 건조 상태 및 지하수흐름을 고려한 모든 경우에 대해서 슛크리트 휨응력은 허용기준치를 상회하지 않는 것으로 나타났다.

2.3.2 터널의 내공변위 양상

지하수위 상존시의 내공변위 양상은 지하수위 복원시의 경우와 매우 흡사하며, 그림 5와 같이 잔류수압 거동 시에는 바닥부에서 과대변위가 발생하게 된다. 정수압에 가까운 잔류수압은 내공변위를 증대시킬 수는 있으나, 슛크리트 배면에 작용하는 잔류수압으로 인해 유효응력

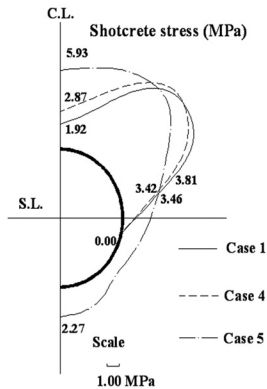


그림 4. 지하수위 상존시의 슛크리트휨응력분포

이 감소하며, 지표침하량 또한 줄어들어 내공변위 증대 효과가 상쇄되는 것으로 나타났다.

3. 단면형상 및 인터페이스를 고려한 슛크리트 거동

3.1 마제형 단면에서의 슛크리트 거동

원형터널의 단면적으로부터 마제형 단면의 등가반경을 3m로 환산하여 측벽부의 응력집중발생 및 지반 및 슛크리트의 변위를 중심으로 검토하였다. 단면의 기하학적인 특성으로 인해 원형터널에 비해 마제형 터널은 측벽부에서의 과도한 휨모멘트가 나타나, 그림 6에서 나타난 바와 같이 식 (1) 및 식 (2)의 허용응력기준치를 상회하는 슛크리트응력이 발생하였다.

침투력 고려시, 원형단면보다 마제형단면이 변위면에서 증가하는 경향을 보이며 그림 7과 같이 수직변형에 비해 전단변형이 우세한 마제형 터널에서의 내공변위 분

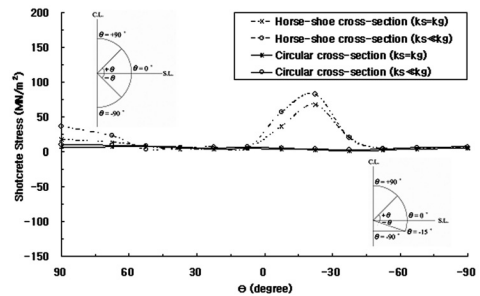


그림 6. 단면형상에 따른 슛크리트휨응력 분포

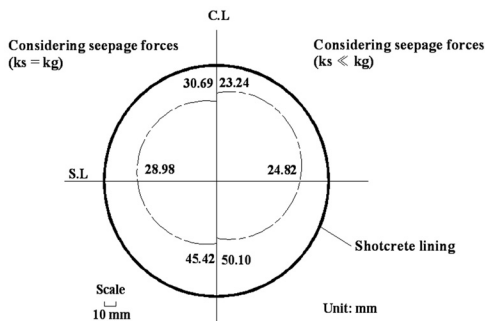


그림 5. 지하수위 상존시의 내공변위 분포

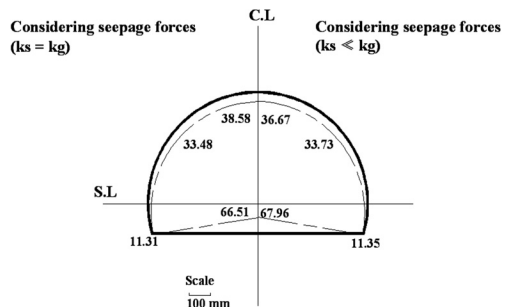


그림 7. 마제형 터널의 내공변위 분포

포는 측벽부에서 하방향 변위가 과도하게 발생되어 어깨 부에서 미끄럼 (Slip) 현상이 일어날 가능성이 크다. 따라서 그림 8과 같이 인터페이스 특성을 고려할 필요가 있다.

3.2 지반 및 슛크리트 상호간의 인터페이스 특성을 고려한 슛크리트 거동

스�크리트 및 지반 사이의 인터페이스 거동을 모델링하기 위해 쉘요소인 슛크리트 배면에 지반의 물성치와 같은 인터페이스 요소를 모사하여 수치해석을 수행하였다. (그림 8 참조) 배규진 등 (2003)에 의하면 슛크리트의 수직강성계수 (k_n) 및 전단강성계수 (k_s)가 슛크리트와 지반의 거동에 미치는 영향이 가장 지배적인 것으로 나타났다. 따라서 슛크리트 및 지반의 인터페이스 자체에 충분한 부착력이 존재하는 경우와 슛크리트 및 지반이 서로 떨어진 상태 (De-bonding)인 경우, 그리고 장수호 등 (2004)에 의해 터널 현장의 슛크리트-암석 코어로부터 얻어진 실험값에 근거한 강성계수를 적용한 경우를 포함하여 크게 3가지 경우로 구분하여 매개변수 분석을 수행하였다.

3.2.1 건조지반 상태의 인터페이스 특성에 관한 슛크리트 거동

상기에서 언급한 3가지 경우에 대한 슛크리트 휨응력 분포는 그림 9와 같으며 부착력에 관계없이 슛크리트 휨응력이 비슷한 양상을 이루고 있는 것으로 보아 수압과 같은 추가하중이 슛크리트에 작용하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2 침투력을 고려한 인터페이스 특성에 관한 슛크리트 거동

지하수위의 복원으로 인하여 시공완료 시점에서 침투력이 터널 주변 지반에 작용하는 경우에는 침투력으로

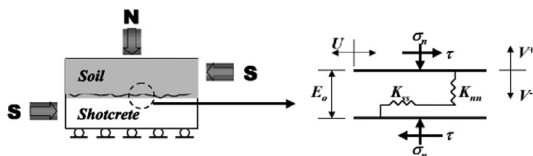


그림 8. 인터페이스의 기본 구성 요소

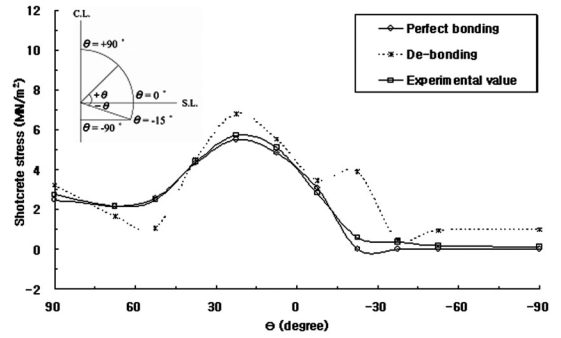


그림 9. 건조지반에서의 부착력에 따른 슛크리트 응력분포

인한 슛크리트 응력의 증가 효과는 더욱 현저할 것이며 인터페이스의 부착력에 따라 증가율도 달라지게 된다. Perfect bonding 상태 및 실험값에 근거한 강성계수 적용시의 슛크리트 응력을 비교한 결과, 잔류수압 거동 시에는 그림 10과 같이 인터페이스를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 측벽부에서 슛크리트 응력이 70% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 또한 소성영역이 측벽부 및 바닥부에서 확대한 것으로 나타나 인터페이스는 지반강도의 저하를 야기시키는 영향인자임을 확인할 수 있다. De-bonding 상태의 천정부 및 지표면 사이의 연직변위분포를 검토한 결과, 그림 11과 같이 잔류수압 거동시의 내공변위는 배수가 원활한 경우의 내공변위에 비해 더욱 크게 나타났으며 이는 인터페이스를 고려하지 않은 경우와 반대되는 양상이다. 이미 부착력이 저하된 상태에서 잔류수압은 슛크리트 및 지반 사이의 인터페이스에 직접적으로 작용하기 때문에 슛크리트에 전단력이 전달되

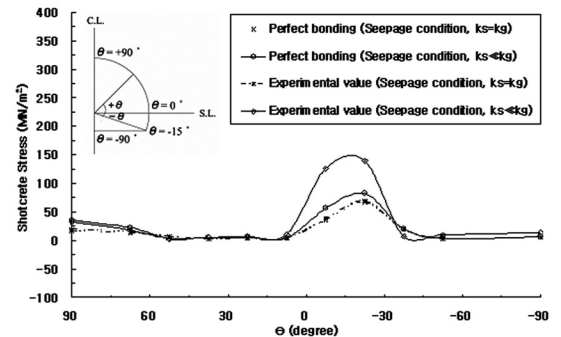


그림 10. Perfect bonding 상태와 실험값에 근거한 강성계수 적용시의 슛크리트 응력

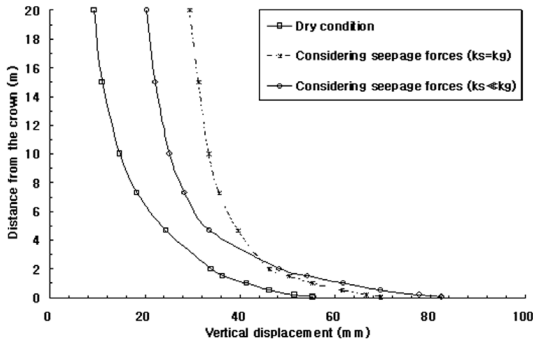


그림 11. De-bonding 상태의 천정부 및 지표면 사이의 연직변위분포

지 않아 과도한 내공변위를 일으키는 것으로 판단된다.

4. 침투력을 고려한 내공변위 제어법

4.1 침투력을 고려한 종단변형곡선

수치해석을 이용하여 Case 1, Case 2, Case 3 (표 3 참조)에 대해서 종단변형곡선을 구한 결과, 지하수를 고려한 경우에는 침투력의 영향으로 인해 그림 12와 같이 막장전방에서 변위 발생시점이 16D로서 건조지반의 경우보다 8배정도의 영향범위를 나타냈으며 최종변위 또한 커지는 경향을 보였다. Case 2 및 Case 3를 비교한 결과, 막장후방과 막장전방의 변위양상이 뚜렷한 차이를 나타냈다. 막장전방 및 막장후방은 각각 지표침하 및 잔

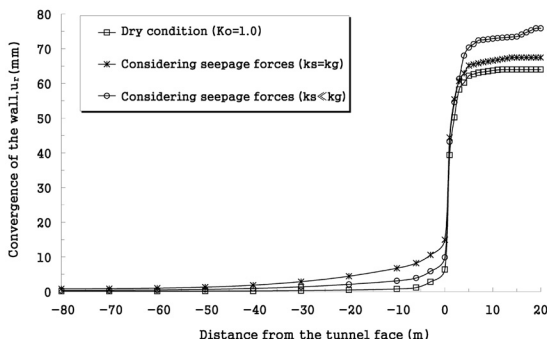


그림 12. 건조한 지반조건 및 침투력을 고려한 종단변형곡선

류수압의 영향에 민감하게 반응하기 때문이다. 막장 후방으로 굴진장 (L=1m)만큼 떨어진 곳에서의 변위를 구하여 지보재 설치시점으로써 지보재특성곡선 (SCC)이 그려지는 시작점으로 이용된다.

4.2 침투력을 고려한 지반반응곡선

수치해석상에서 터널 굴착시 작용하는 내압을 하중분배율로서 10단계로 감소시켜가면서 지반반응곡선을 산정하였다.

$k_s=k_g$ 인 경우 및 $k_s \ll k_g$ 인 경우의 침투력은 침투해석에 근거하여 정수압의 각각 50% 및 80%로 결정하였다. 그림 13에서 나타난 바와 같이 슛크리트의 투수계수가 반영된 후부터 잔류수압이 터널경계면에 작용하여 내공변위가 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

4.3 지보재특성곡선을 고려한 슛크리트 라이닝 거동분석

종단변형곡선상에서 막장후방으로 굴진장 (L)만큼 떨어진 지점에서의 내공변위를 통해 지보재 설치시기를 결정하여 지보재특성곡선을 그리게 되면 지반반응곡선과 교차하는 평형상태의 D점에서의 수렴된 변위 (u_r^D) 및 지보압 (p_s^D)을 구할 수 있다. (그림 14 및 그림 15 참조) 그림 14에서 건조상태 및 침투력을 고려한 경우의 p_s^D 는 각각 20% 및 30%이며, u_r^D 는 각각 39.36mm 및 44.42mm로 나타났다. 가상지반압력이 소멸된 후에도

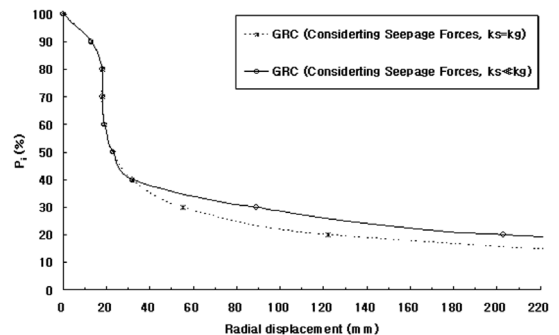


그림 13. 슛크리트 및 지반의 상대투수성에 따른 이론식에 근거한 지반반응곡선

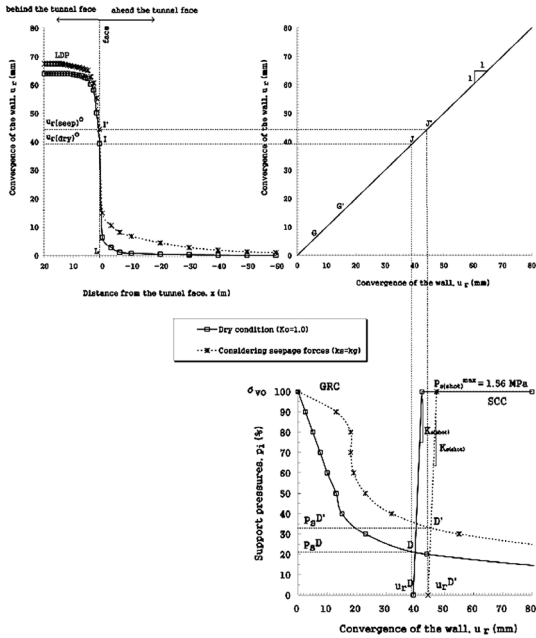


그림 14. 건조지반 상태 및 침투력을 고려한 경우의 내공변위 제어법

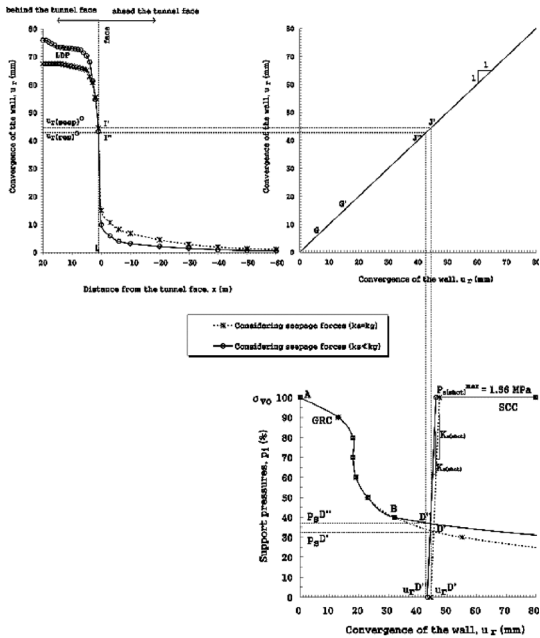


그림 15. 지하수 흐름시 상대투수성을 고려한 경우의 내공변위 제어법

침투력은 계속 숏크리트에 작용하게 되므로 침투력을 고려한 경우의 내공변위가 건조상태인 경우보다 더욱 크게 나타났다. 그러나 지반 및 숏크리트의 투수성이 낮을수록 지표침하의 영향이 작게 나타나 막장전방에서의 변위는 작게 나타나는 반면에, 막장후방에서는 잔류수압의 영향으로 인하여 내공변위가 더욱 증대되었다. 이러한 현상으로 인하여 $k_s=k_g$ 및 $k_s \ll k_g$ 인 경우에는 그림 15에서 나타난 바와 같이 지보재 설치시점이 각각 44.42mm 및 43.21mm로 결정되었다. 초기지압에 비해 숏크리트의 강성이 매우 크기 때문에, 지보재를 설치하자마자 내공변위는 수렴되므로 숏크리트 라이닝에 의해 수렴되는 최종변위 u_r^D 또한 $k_s \ll k_g$ 인 경우가 $k_s=k_g$ 에 비해 작게 나타났다. 따라서 숏크리트의 투수계수가 지반의 투수계수와 같은 경우의 지반반응곡선은, 곡선 ABD'의 궤적을 따르게 되며, 숏크리트의 차수성을 고려한 경우의 지반반응곡선은 곡선 ABD'와 같이 나타나며 최종변위는 D' 점에서 수렴하게 된다. $k_s=k_g$ 및 $k_s \ll k_g$ 인 경우의 p_s^D 는 각각 30% 및 40%로서 내압의 차이가 10% 정도 되는 것으로 보아 숏크리트의 차수성이 응력의 증가를 야기시키는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 3차원 연계해석결과, 투수성이 낮을수록 잔류수압의 영향으로 숏크리트 응력은 증가하는 반면에, 터널천정부의 변위는 유효응력의 감소로 인해 오히려 작아지는 경향을 나타냈다.
2. 단면의 기하학적 특성으로 인해, 마제형 터널은 원형 터널에 비해 응력집중이 현저하게 발생하여 허용응력기준치를 초과할 가능성이 큰 것으로 나타났다.
3. 전단변형의 발생이 지배적인 마제형 터널의 미끄럼(slip) 현상을 근거로 인터페이스 특성을 고려한 결과, 부착력이 저하된 상태에서 잔류수압은 인터페이스 자체에 직접적으로 작용하기 때문에 숏크리트에 전달력이 전달되지 않아 과도한 내공변위를 야기키는 것으로 나타났다.
4. 침투력을 고려한 내공변위 제어법으로부터 숏크리트

의 투수성이 낮아질수록 잔류수압에 따른 유효응력의 감소로 인해 지보재 설치시점의 변위가 작아지게 되었다. 따라서지보재특성곡선(SCC)을 그리게 되면, 차수효과가 증대될수록 숏크리트의 변위는 작아지는 반면에, 내압은 10%정도 증가하였다.

- 상기의 결과를 종합하여 볼때, 차수성을 발휘하는 강섬유보강 숏크리트를 설치하게 되는 경우에는 숏크리트 응력이 커지고 내공변위는 작게 나타나므로 터널의 안정성 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 하는 2004년도 건설핵심기술연구개발사업, “공사핵심기술 C01”에 의하여 연구비가 지원된 연구로서 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 배규진, 이두화, 장수호, 김영근 (2003), “숏크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감

도분석”, 대한토목학회논문집, Vol. 23, No. 5C, pp. 345-356.

- 장수호, 이석원, 배규진, 최순옥, 박해균, 김재권 (2004), “지반과 숏크리트 라이닝의 인터페이스 특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학학회논문집, Vol. 20, No. 5, pp. 79-86.
- 한국콘크리트학회 (2003), “콘크리트 구조 설계기준”.
- Bobet, A. (2003), “Effect of Pore Water Pressure on Tunnel Support during Static and Seismic Loading”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 377-393.
- Einstein, H. H. and Schwartz, C. W. (1979), “Simplified Analysis for Tunnel Supports”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 105, pp. 499-518.
- KOWACO (1997), “Report on design issues of the concrete lining of waterway tunnel”.
- Schweiger, H. F., Pottler, R. K. and Steiner, H. (1991), “Effect of Seepage Forces on the Shotcrete Lining of a Large Undersea Cavern”, *Computer Method and Advances in Geomechanics*, Beer, Booker & Carter (eds), pp. 1503-1508.
- Shin, J. H., Addenbrooke, T. I. and Potts, D. M (2002), “A Numerical Study of the Effect of Ground-water Movement on Long-Term Tunnel Behaviour”, *Geotechnique*, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.



이인모

고려대학교 사회환경시스템공학과 교수
inmolee@korea.ac.kr



유승열

(주) 바우컨설팅 기술연구소 정회원,
civilyou@nate.com



남석우

Purdue University 박사후 과정
namong88@hotmail.com



신영진

고려대학교 사회환경시스템공학부 박사 과정
civilman2@korea.ac.kr