

지하수-터널 수리상호작용에 따른 터널의 장기거동 연구

A study on the long-term behavior due to the hydraulic interaction between ground water and tunnel

신종호¹⁾, Jong-Ho Shin, 신용석²⁾, Yong-Suk Shin, 안상로³⁾ Sang-Ro Ahn, 박동인⁴⁾, Dong-In Park

¹⁾ 건국대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University
jhshin@konkuk.ac.kr

²⁾ 시설안전기술공단 실장, Director, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

³⁾ 시설안전기술공단 단장, Director General, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

⁴⁾ 건국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

SYNOPSIS : The interaction between ground water and structure is complicated behavior which cannot be easily investigated in the laboratory and monitored in the fields. In this study numerical simulation of the interactive behavior was performed using sophisticated coupled-finite element method. Hydraulic behavior of structure is modeled using solid elements with finite permeability. Recovery of ground water table in the long-term is considered by controlling hydraulic boundary conditions. The results showed that the interaction effect is significant. Particularly non-symmetry in the lining permeability resulted in highly unbalanced pore water pressure which may cause detrimental effects on inner linings of tunnels acting as drains.

Key words : Tunnel, Ground water, Hydraulic interaction, Coupled analysis

1. 서 론

일반적으로 배수형 터널의 굴착경계면 수리경계조건은 설계나 시공과정에서 완전배수조건으로 고려되고 있다. 그러나 라이닝의 투수계수가 지반보다 작거나 터널의 배수기능이 적절히 확보되지 못하는 경우, 라이닝에 작용하는 간극수압은 완전배수조건으로 볼 수 없다. 즉 완전배수조건은 라이닝의 투수계수가 지반의 투수계수보다 크다는 조건에서만 만족된다. 위 조건을 만족하지 않는 터널의 거동은 반드시 라이닝에 작용하는 간극수압의 특성을 포함하여 고려되어야 한다. 또한 최근 들어 배수형 터널의 배수 시스템 열화로 인하여 팽창사고가 발생하면서 시민의 안전과 터널기능유지에 큰 우려가 되고 있으며 이러한 사고의 원인은 배수재의 압착 또는 투수재의 막힘이 주원인으로 보고되고 있다.

이와 같은 배경을 바탕으로 본 논문에서는 배수형 터널의 '지반-숏크리트 라이닝-배수층-복공콘크리트' 상호간의 장기거동 메카니즘을 살펴보고자한다. 특히 라이닝의 설치 및 투수기능 저하에 따라 지하수위가 상승하는 실제 조건을 모델링하여 기존의 Monotonic 수위조건(Shin *et al.*, 2002)과 비교·분석하고자 한다. 다양한 현장조건의 시뮬레이션이 가능한 수치해석법을 이용하여 여러 가지 조건에서의 수리영향을 조사하여 복공라이닝에 작용하는 수압을 설계기준으로 재 고찰하고자 한다.

2. 간극수압의 특성을 고려한 배수형터널 수치해석 모델링 고찰

Ward & Pender(1981)는 대부분의 터널은 배수구처럼 거동한다고 보고하였다. 하지만 실제 콘크리트 라이닝의 수리거동은 다소 복잡한 형태로 나타날 것이며 Shin *et al.*(2002)은 '지반-숏크리트 라이닝'의 거동은 두 재료의 투수계수비에 따라 뚜렷한 차이를 보임을 확인하였다. 본 논문에서는 라이닝의 투수계수 영향에 따른 수리거동을 고찰하기 위하여 라이닝을 구조적 거동을 하는 Beam 요소와 투수성질을 가지는 solid 요소로 모델링하였다. 투수성의 상대적 특성에 의해 유발되는 간극수압의 크기와 형태는 결국 '배수제-복공라이닝' 상호수리관계와 같게 될 것이다. 배수기능이 저하된 라이닝은 시스템 열화문제가 발생하는 부분의 라이닝 투수계수를 저하시키는 것으로 모델링이 가능할 것이다. 그림 1은 우리나라의 지하철에서 주로 채택되고 있는 배수형 터널의 라이닝 구조를 보인 것이며 그림 2는 본 연구의 라이닝 모델링 개념을 보인 것이다. 지반은 8절점의 Isoparametric 요소, 라이닝은 3절점의 Beam 요소를 사용하였으며 간극수압은 4절점 요소로 모델링 하였다.

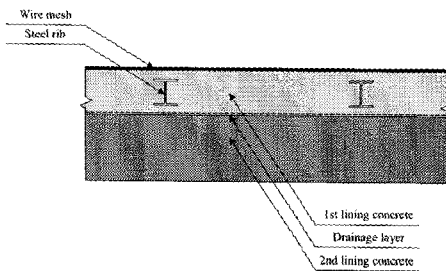


그림 1. 배수형 터널의 라이닝 구조

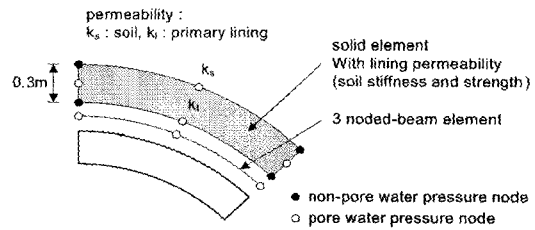


그림 2. 라이닝 모델링 개념

Vaughan(1989)은 지반수리거동 해석에 있어 투수계수의 다양성이 유발하는 부정확성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 수리현상을 적절하게 표현하는 투수계수 선정이 우선적으로 고려되어야 한다. 이미 널리 알려져 있듯이 흙의 투수성은 유효응력과 간극비에 따라 변화하므로 비선형 형태를 보인다(Lambe and whitman, 1969; Vaughan, 1989). Vaughan(1989)은 선형 투수계수가 실제 현상과 동떨어진 결과를 보인다는 점을 지적하고 유효응력의 변화가 투수계수의 현저한 변화를 수반한다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 Vaughan(1989)이 제시한 비선형 투수모델을 적용하였으며 터널건설은 터널 경계부에 많은 변형을 수반한다는 점을 고려하였을 때 비선형 투수계수 모델의 선정이 보다 타당한 것으로 보인다. 식(1)은 Vaughan(1989)의 비선형 투수계수식을 보인 것이다.

$$k = k_0 e^{-Bp'} \quad (1)$$

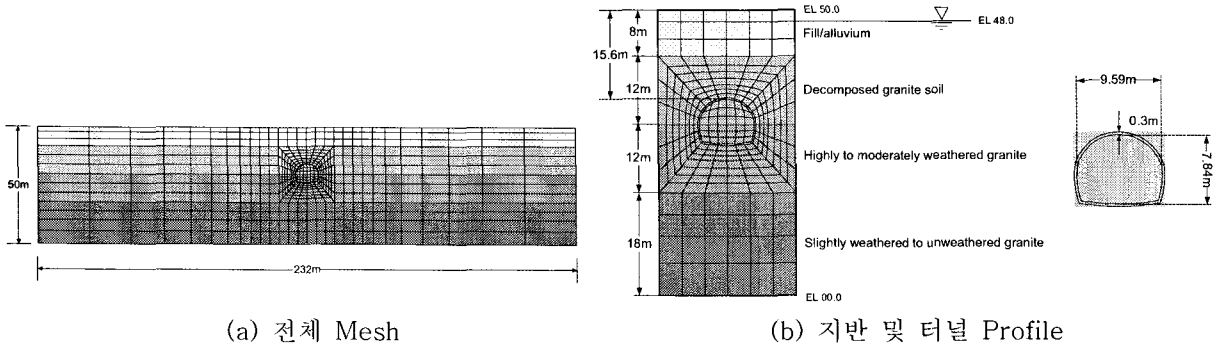
여기서, k_0 : 평균유효응력 0인 경우의 투수계수, B : 경험 Parameter, p' : 평균유효응력

3. 해석모델

수리현상을 포함하는 지반은 시간-의존적 거동을 보인다. 특히 터널건설은 터널경계부에서 많은 응력 변화 및 변위를 수반하고 시공공정 및 현장조건에 따라 수리조건을 달리하므로 이러한 현상을 적절히 표현하는 시간-연계해석(Coupled-analysis)이 필요하다. 본 연구에서는 Biot's equation을 기초로 하는 연계해석을 수행하여 터널라이닝과 지하수간의 수리상호작용을 고찰하였다.

본 연구에서는 4개의 지층으로 이루어진 화강토 지반에 굴착되는 터널을 모델링하였다. 터널은 지름 폭 9.59m, 높이 7.84m의 마재형터널이며 라이닝의 두께는 0.3m로 설정하였다. 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 모델링의 폭은 터널 지름의 약 25배인 232m로 하였다. 화강토를 적절히 표현하기 위하여 탄소성 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 터널이 위치하는 두 지반은

Jardinn(1985)이 제시한 Small strain 비선형 탄성 모델을 적용하였다. 그림 3.(a)은 해석모델의 전체 형상을 보인 것이며 그림 3.(b)은 터널 단면 및 지층구성을 보인 것이다. 모델의 좌·우측 경계는 횡방향 변위를 구속한 롤러로 구성하였고 모델의 바닥은 수직변위를 구속하였다. 라이닝은 하중 분담율 40%에 설치하였고, 터널의 장기거동을 예측하기 위하여 정적평형상태가 유지되는 시점까지 해석을 수행하였다. 표1은 해석에 사용된 지반의 세부 물성치를 보인 것이다.



(a) 전체 Mesh

(b) 지반 및 터널 Profile

그림 3. 터널 유한요소모델

표 1. 입력파라미터

Soil constitutive models												
	Isotropic linear elastic					Mohr-Coulomb yield parameters						
	탄성계수 (kPa)	포아송비	축압계수	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	Angle of dilatancy(°)					
Fill	1.47×10 ⁴	0.35	k ₀ =0.54	15.7	Linear elastic							
highly to moderately weathered granite	1.00×10 ⁶ +1.06×10 ⁶ z	0.28	k ₀ =0.35	24.5	2+0.667z	31.0	15.5					
Decomposed granite soil	-		k ₀ =0.42	21.5	-							
slightly wethered to unweathered granite			k ₀ =0.35	24.5								
Small strain nonlinear elastic												
Decomposed granite soil	A	B	C (%)	α	γ	E _{dmin} (%)	E _{dmax} (%)	G _{min} (kPa)	Mohr-Coulomb yield parameters			
	1,515	1,485	2×10 ⁻⁴	0.955	0.818	9×10 ⁻³	0.35	9,706	10+7.500z	42.0	21.0	
slightly wethered to unweathered granite	R	S	T (%)	δ	λ	ε _{vmin} (%)	ε _{vmin} (%)	K _{min} (%)	100+500z		56.0	28.0
	475	465	2×10 ⁻⁴	0.848	0.872	5×10 ⁻³	0.50	6,438				
Permeability models												
	Isotropic permeability (spatially varying) (m/s)					Nonlinear permeability (k = k ₀ e ^{-Bp'})						
						k ₀ (m/s)	β	p' ₁	p' ₂	R (k _{max} /k _{min})		
Fill	2.0×10 ⁻⁴					-	-	-	-	-		
highly to moderately weathered granite	3.5×10 ⁻⁷ -0.139×10 ⁻⁷					-	-	-	-	-		
Decomposed granite soil	-					1.9×10 ⁻⁶	0.0043	5	50	100		
slightly wethered to unweathered granite	-					1.9×10 ⁻⁶	0.0043	5	50	100		

3.1 수리 경계조건

이전까지의 연구(Shin *et al.*, 2002)는 지하수위조건을 Monotonic하게 유지하는 해석조건을 사용하였다. 이러한 기존의 수위조건과 달리 본 연구에서는 굴착과정의 굴착경계면 수리경계조건을 배수조건으로 설정함으로써 라이닝의 설치 및 투수기능 저하에 따라 지하수위가 상승하는 실제 조건을 모델링하였다. 자유수면은 지반의 투수성이 충분히 크고, 터널 내 지하수 유입량이 일정한 조건으로 구속흐름을 가정하였다. 모델의 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였으며 풍화가 크게 진행되지 않은 지반은 압밀의 효과가 없는 것으로 가정하였다.

3.2 해석 Cases

라이닝 설치에 따른 거동을 알아보기 위하여 5가지의 Cases를 설정하였다. 라이닝은 지반에 대한 투수계수비에 따라 그 거동을 달리하므로(Shin *et al.*, 2005) 라이닝의 투수계수를 지반의 1/10, 1/100, 1/1000로 각각 감소시켜 해석을 수행하였다. 또한 라이닝 거동의 기준을 설정하기 위하여 라이닝 완전 배수 조건과 완전비배수 조건을 추가하여 비교·검토하였다. 라이닝의 투수계수 산정을 위한 지반의 투수계수는 라이닝 인버트부의 유효응력을 기준으로 산정하였으며 터널주변의 초기 투수계수는 $k_s=3.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 이다. 표 2는 해석 Case 및 Case별 라이닝 투수계수를 보인 것이다. 배수시스템의 열화는 대칭, 비대칭으로 구분하여 총 7 Cases의 해석이 수행되었다. 라이닝 배수기능 열화에 따른 붕락 및 박락 사고는 주로 스프링라인에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며 이러한 사실과 터널배수 시스템의 구조적 설계를 바탕으로 라이닝의 비대칭 투수기능 저하 조건을 설정하였다. 거동의 양상을 확연히 파악할 수 있도록 배수기능 열화부분의 투수계수는 지반의 1/1000으로 감소시켜 해석을 수행하였고 열화 부분을 제외한 나머지 배수시스템은 기능저하가 없는 것으로 가정하였다.

열화특성	Symbol	단면	라이닝 투수계수(m/s)	
대칭	-		Fully permeable	-
	LPSK1		$k_s/10$	3.4×10^{-7}
	LPSK2		$k_s/100$	3.4×10^{-8}
	LPSK3		$k_s/1000$	3.4×10^{-9}
	-		Impermeable	-
비대칭	LPPR1		Fully permeable	-
			$k_s/1000$	3.4×10^{-9}
	LPPR2		Fully permeable	-
			$k_s/1000$	3.4×10^{-9}

그림 4. 해석 Cases 및 투수조건

4. 해석결과 분석

4.1 기존의 Monotonic 수위조건과 비교

그림 5은 본 연구에 사용된 수리경계조건과 이전 연구에 사용된 Monotonic 수위조건의 결과를 비교한 것이다. Monotonic 수위조건은 수위를 굴착전후 일정하게 한 조건이며, 수위회복 조건은 굴착시 수위가 저하하고 장기적으로 배수기능저하를 가정하여 수위를 회복시키는 조건이다. 두 해석 모두 비배수 라이닝 조건의 터널 거동을 나타낸 것이다. 지하수위조건을 Monotonic하게 유지하는 조건을 사용한 경우 터널 측벽주변 지반의 전응력이 수위회복 조건보다 더 낮게 나타나고 있다. 이 결과는 기존의 Monotonic 수위조건이 라이닝에 작용하는 토압을 과소평가할 수 있음을 보인 것이다.

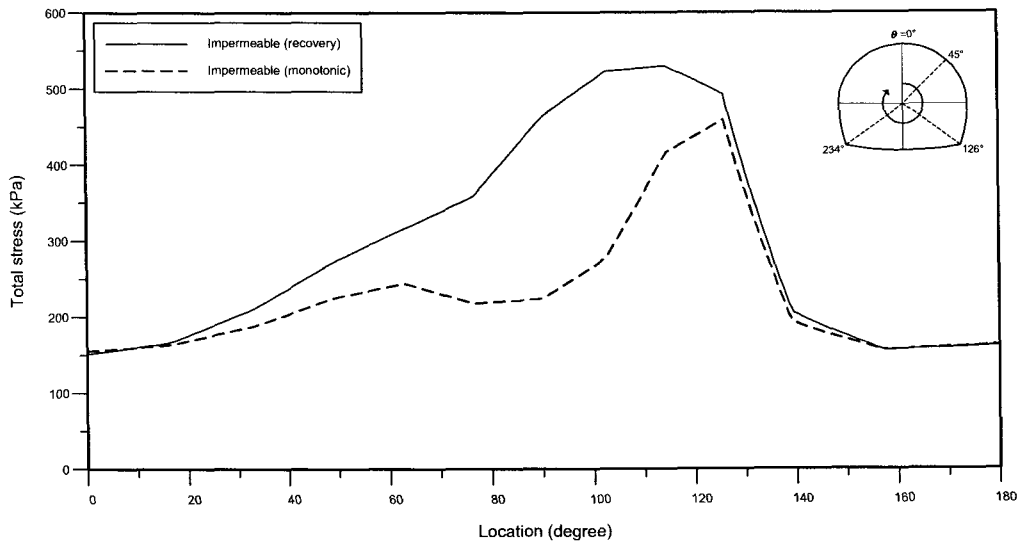


그림 5. Monotonic 수위조건과 수위 Recovery 조건의 전응력비교

4.2 라이닝배수기능 대칭저하에 따른 거동

4.2.1 지표-천단 구간의 전응력 및 간극수압 변화

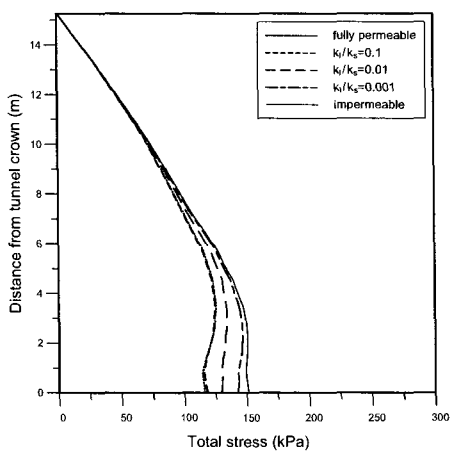


그림 6. 지표-천단 구간의 전응력 변화

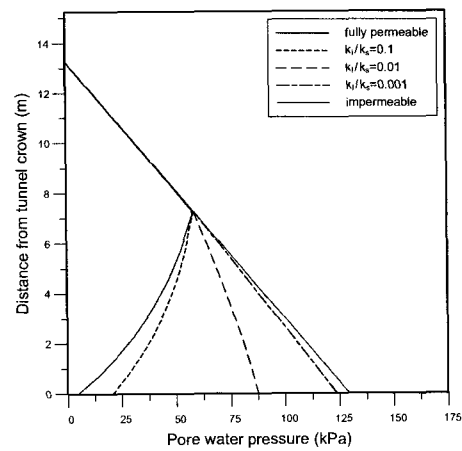


그림 7. 지표-천단 구간의 간극수압 변화

그림 6과 그림 7은 지표-천단 사이의 전응력과 간극수압을 각각 도식화 한 것이다. 라이닝의 투수계수가 낮아질수록 지표-천단간 응력분포 양상은 비배수 거동에 가까워짐을 알 수 있다. 특이한 점은 터널 천단부에서의 비배수 조건의 전응력은 배수 조건의 28%가 증가한 반면 간극수압은 큰 폭으로 증가하는 양상을 보인다는 사실이다. 이는 간극수압의 상승이 라이닝 작용수압의 구성비를 유효응력에서 간극수압으로 전이시키기 때문이다.

4.2.2 터널주변 지반의 전응력 및 간극수압 변화

그림 8은 투수계수 저하에 따른 라이닝에 작용하는 전응력을 나타낸 것으로 이는 구조물에 작용하는 토압을 의미한다. 최대응력은 스프링라인과 우각부 사이에서 발생하며 투수성이 작아질수록 우각부에서 스프링 라인으로 이동하는 것으로 나타났다. 비배수라이닝의 천단부와 스프링라인, 인버트부에서 전응력은 배수라이닝을 기준으로 최대 28%, 32%, 195% 증가하는 것으로 나타났다. 그림 9는 라이닝에 작용하는 간극수압을 보인 것이다. 라이닝의 투수계수가 작아질수록 라이닝에 작용하는 간극수압은 정수압에 가까워짐을 알 수 있다. 투수성이 작아질수록 터널지면에서는 유효응력이 줄어들고 간극수압이 늘어나며 궁극적으로 수압만 받는 상태가 됨을 보였다. 투수성라이닝의 경우 $\theta=126^\circ$ 에서 간극수압의 상승은 모서리에서 라이닝 Mesh 수직두께 증가에 따른 해석상의 문제로 판단된다.

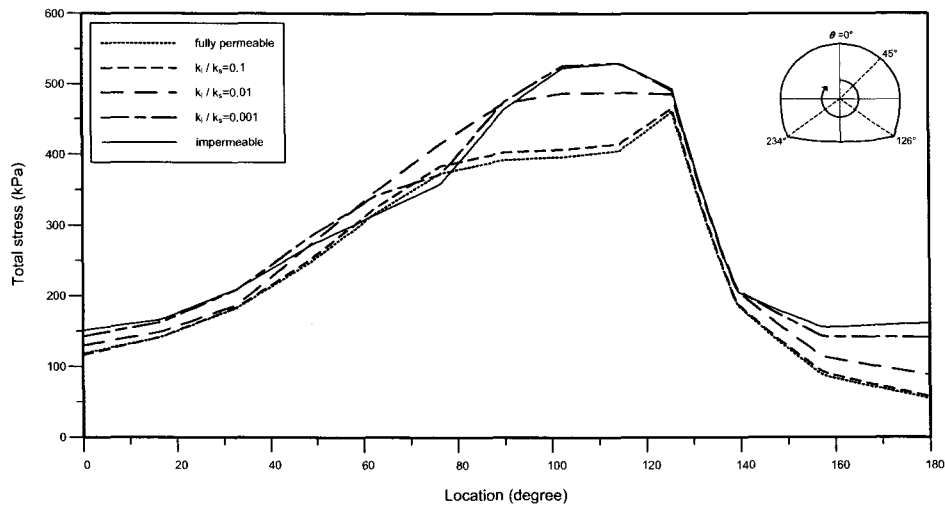


그림 8. 터널주변 지반의 전응력

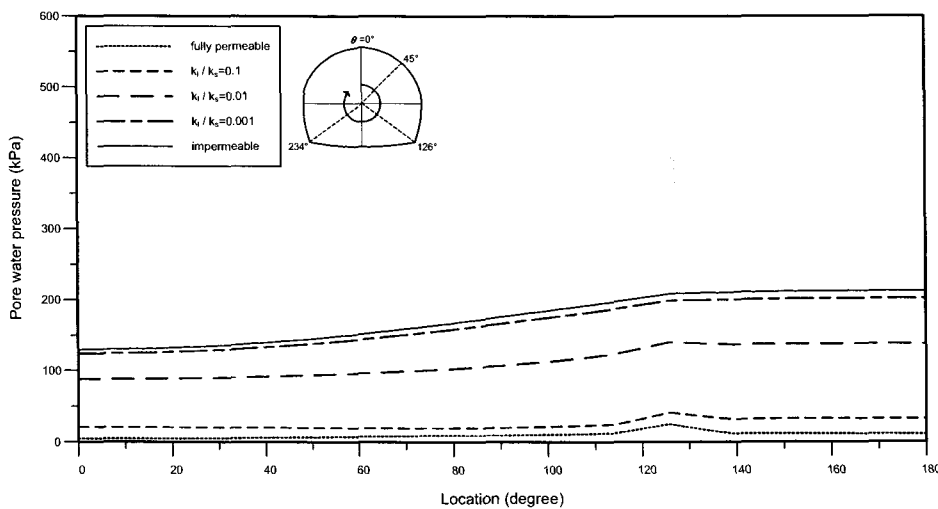


그림 9. 터널 주변 지반의 간극수압

그림 10은 라이닝에 작용하는 간극수압을 전응력으로 정규화한 것이다. 터널이 비배수거동에 가까워 질수록 간극수압이 전응력에서 차지하는 비중이 커짐을 알 수 있다. 인버트 부분에서 간극수압의 비율이 100%가 넘는 구간이 발생하는데 이는 라이닝 순작용압력이 수압만 존재함을 의미한다. 즉, 라이닝이 비배수에 가까울수록 터널은 마치 물에 떠서 부력을 받는 구조가 됨을 의미한다. 본 해석결과 라이닝 투수계수가 1/100~1/1000 사이에서 이러한 현상이 발생함을 보였다.

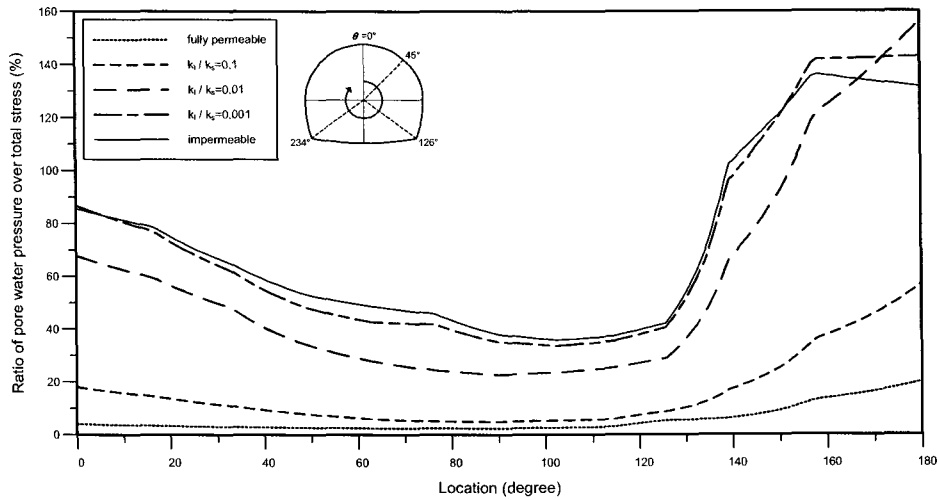


그림 10. 전응력에서 간극수압이 차지하는 비율

4.2.3 라이닝의 모멘트 및 축력 변화

그림 11과 12는 라이닝의 모멘트와 축력을 도식화 한 것이다. 라이닝의 투수성이 저하될수록 터널 모서리 및 인버트부에서 급격한 모멘트 증가를 보였으며 축력은 천단부 및 인버트부에서 급격히 증가하였다. 스프링라인을 제외한 터널 라이닝의 측벽부에서는 비교적 작은 크기의 모멘트가 작용하고 있음을 알 수 있었고 라이닝의 투수성이 감소할수록 라이닝의 휨응력 및 축응력은 증가함을 보였다.

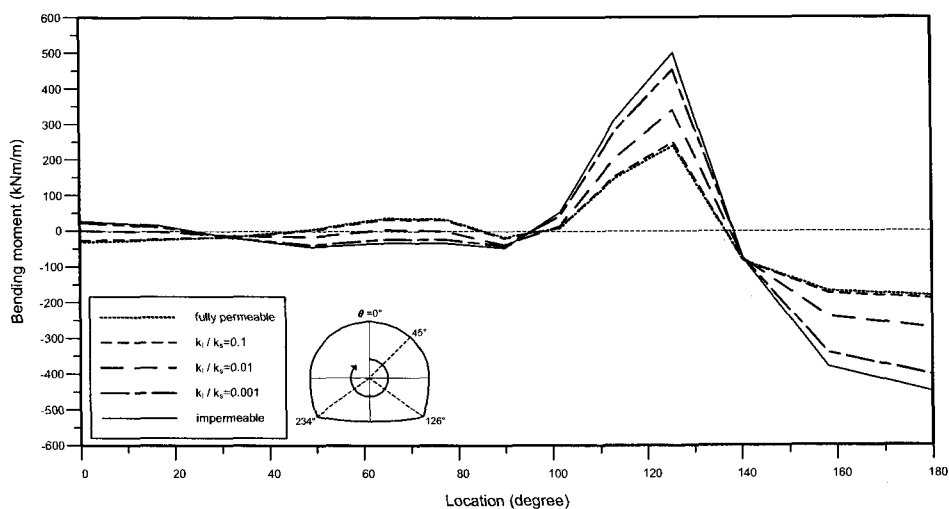


그림 11. 라이닝의 모멘트 변화

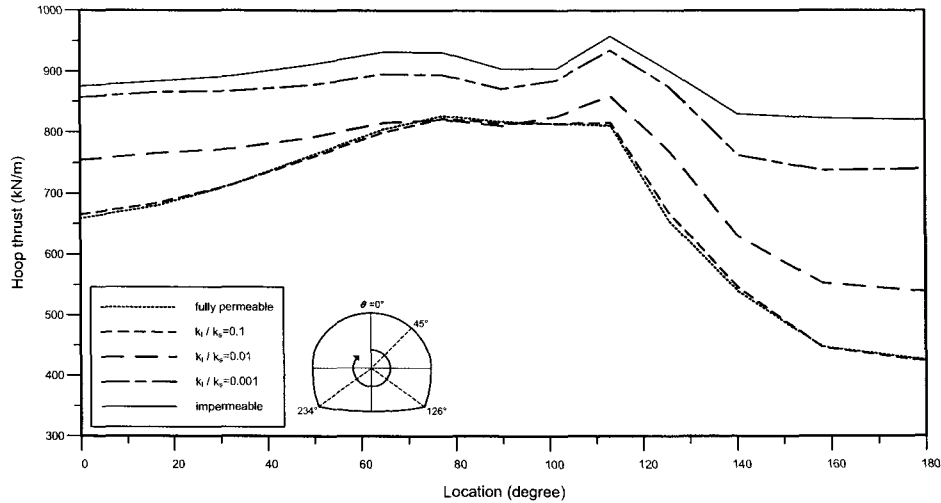


그림 12. 라이닝의 축력 변화

4.3 라이닝의 배수기능 저하에 따른 라이닝 거동 변화

그림 13과 14는 비대칭 배수기능 저하의 두 Cases에 대한 전응력과 간극수압의 변화를 완전투수 및 불투수 라이닝과 비교하여 보인 것이다. 전응력, 특히 간극수압이 터널라이닝을 따라 심한 비대칭 형태로 분포하였다. 전응력 및 간극수압의 증가는 배수기능 저하가 발생한 위치에서 두드러지게 나타나고 있으며 우측 모서리 상부배수지장인 경우(LPPR1), 전응력 및 간극수압은 각각 최대 52kN, 60kN의 증가량을 보였고, LPPR2의 경우 전응력 및 간극수압은 각각 최대 24kN, 106kN의 증가량을 나타내었다. 이는 배수기능 저하가 발생한다면 우측모서리 상하부 배수지장인 경우(LPPR2), 최대 106kN의 추가간극수압이 복공라이닝에 작용할 수 있음을 의미한다. 또한 배수기능 저하 영역이 확대될수록 간극수압의 증가량 및 증가범위가 큰 폭으로 커지는 것을 알 수 있다.

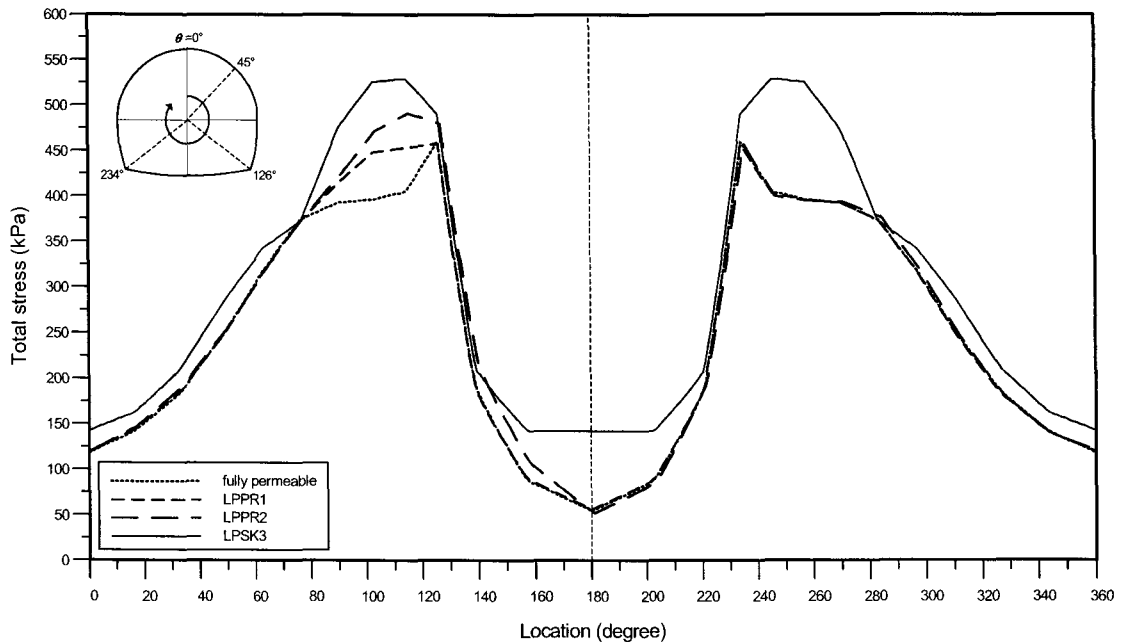


그림 13. 터널 주변 지반의 전응력

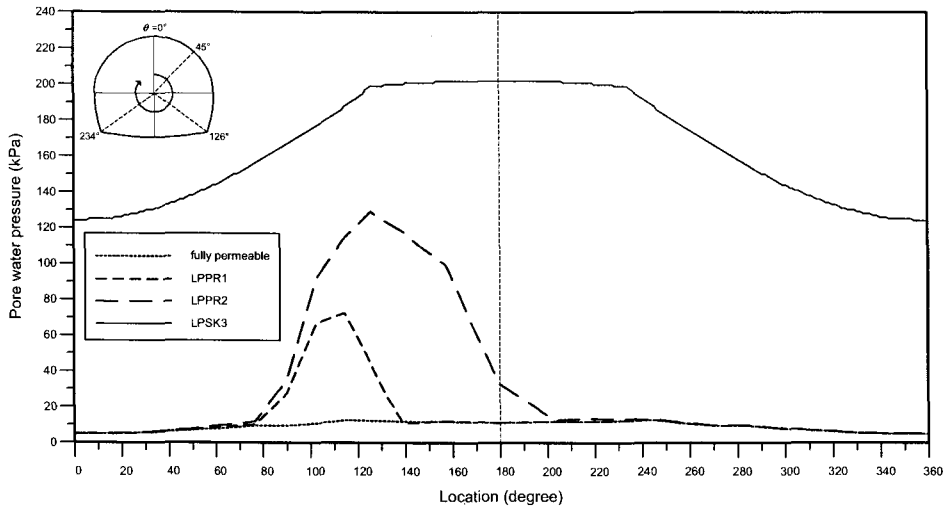


그림 14. 터널 주변 지반의 간극수압

5. 간극수압 설계기준 고찰

앞절에서 투수계수저하가 전응력의 증가에는 큰 영향을 미치지 않지만, 간극수압의 크기를 현저히 증가시켜 전응력의 구성비를 상승시킴을 고찰하였다. 전응력의 크기에 지배되는 1차라이닝은 비교적 투수성의 영향을 받지 않을 것이나, 간극수압의 직접적인 영향을 받는 복공라이닝의 경우 투수성의 저하는 터널의 장기안정과 관련하여 중요한 의미를 갖는다. 따라서 복공라이닝의 설계하중을 결정하기 위하여 배수재의 투수성능저하에 따른 간극수압의 크기를 산정해보는 것이 의미있을 것이다. 그림 15, 16은 표 2에 언급된 각 Case별 측벽 주변에 작용하는 간극수압을 정수압으로 정규화한 것이다. 그림 15는 라이닝의 투수계수저하가 대칭형으로 나타나는 경우, 그림 16은 투수계수저하가 비대칭형으로 나타나는 경우를 각각 도식화한 것이다. 그림 15는 라이닝 배수시스템의 배수성능이 1/10, 1/100, 1/1000로 저하된다면 복공라이닝에 작용하는 간극수압의 크기는 정수압의 약 20%, 67%, 95% 정도인 것으로 나타났으며 그림 16은 라이닝의 부분적인 배수성능의 저하가 발생하는 경우 복공라이닝에 작용하는 간극수압의 크기를 보여주고 있다. 라이닝의 우측벽 주변 지반에서는 간극수압의 변화가 거의 발생하지 않음에 반해 좌측벽 주변 지반에서는 배수성능 저하부위에 집중적인 간극수압 증가가 나타남을 확인할 수 있었다. 라이닝의 투수계수저하가 라이닝 전반에 걸쳐 발생하는 경우 간극수압의 분포형상은 전수압을 일정한 비율로 감소시킨 형태로 나타나고 있지만 부분적인 투수계수저하는 불규칙적이고 다소 복잡한 형태의 분포를 보였다.

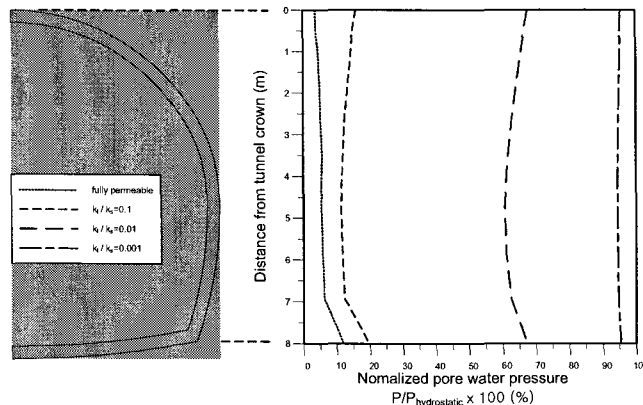


그림 15. 정규화된 간극수압 분포 (대칭해석)

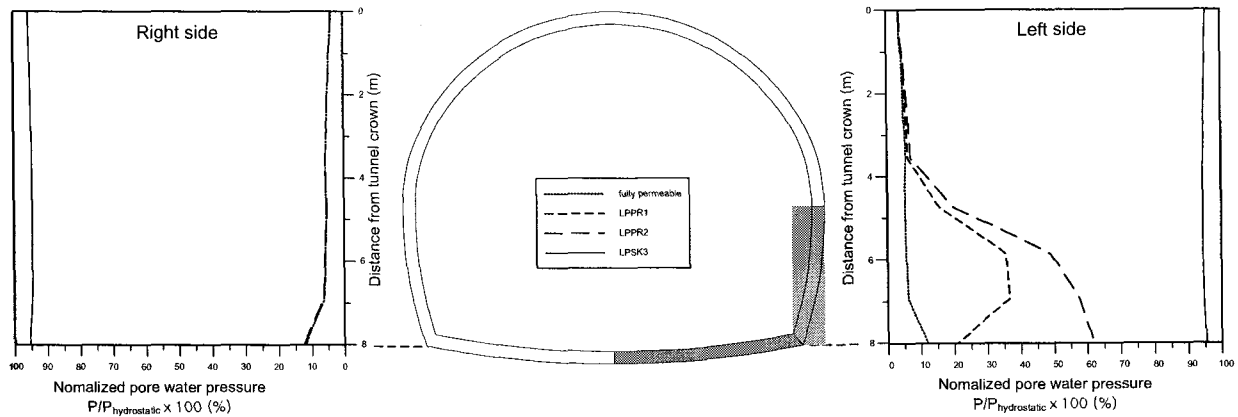


그림 16. 정규화된 간극수압 분포 (비대칭 해석)

6. 결론

본 연구에서는 배수형 터널의 '지반-숏크리트 라이닝-배수층-복공콘크리트' 상호간의 장기거동 메카니즘을 살펴보았다. 비선형 투수모델 및 Coupled-analysis를 적용한 유한요소법을 사용하여 수치해석을 수행하였다. Monotonic 수위조건과 수위회복조건에 따른 터널 거동의 차이를 검토하였고 라이닝의 설치 및 투수기능 저하가 터널의 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 다양한 수치해석 결과를 토대로 터널 거동의 변화 특성을 다음과 같이 확인하였다.

- (1) Monotonic 수위조건은 수위회복조건에 비하여 라이닝에 작용하는 토압을 과소평가 할 수 있다.
- (2) 라이닝의 투수계수가 낮아질수록 터널의 거동은 비배수 거동에 가까워지며 라이닝의 투수계수가 지반의 1/1000 이하가 되면 터널은 비배수와 흡사한 거동을 한다.
- (3) 라이닝 주변 지반에 작용하는 비배수 조건의 전응력은 배수 조건에 비해 소폭 증가한 반면 간극수압은 큰 폭으로 증가하는 양상을 보인다.
- (4) 터널 배수시스템의 부분적인 배수능력 저하는 복공라이닝에 집중적인 간극수압의 증가를 유발하며 배수기능 저하영역이 확대될수록 간극수압의 증가량 및 증가범위는 급격히 증가한다.

끝으로 특정 터널단면에 대하여 배수기능 저하조건인 설정이 가능하다면 그림 15, 16과 같은 도표를 이용하여 복공라이닝에 작용하는 수압의 평가가 가능할 수 있을 것이다. 이와 같이 완성된 도표는 복공라이닝의 수압하중평가에 참고할 수 있다.

참고 문헌

1. 신중호, 안상로, 신용석(2005), "배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2943~2950
2. Jardine, R.J.(1985), "Investigations of pile-soil behaviour with special reference to the foundations of offshore structures", PhD thesis, Imperial College, University of London.
3. Lambe, T.W. and Whitman, R.V.(1969), "Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York"
4. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I and Potts, D.M.(2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", Geotechnique Vol.52, No.6, pp.391~403
5. Vaughan, P.R.(1989), "Non-linearity in seepage problems-Theory and field observation", De Mello Volume, Sao Paulo, pp.501~516
6. Ward, W.H. and Pender, M.J.(1981), "Tunnelling in soft ground-general report", Proc. the 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.4, pp.261~275