학술논문

한국터널공학회논문집 2009년 9월
제11권 제3호, pp. 243-254

이중구조 라이닝의 배수공 막힘에 따른 수리-역학적 상호작용

신종호[1]*, 남택수[2], 채성은[3], 윤재웅[4]

Hydraulic and structural interaction of a double-lined tunnel lining due to drainhole blockings

Jong-Ho Shin, Taek-Soo Nam, Sung-Eun Chae, Jae-ung Yoon

Abstract Tunnel problems relate to pore water pressure generally occur due to the restriction of groundwater flow into the tunnel which is generally caused by the deterioration of drainage systems. Previous studies have identified the problem as combined mechanical and hydraulic interaction occasions. In this study, detrimental effects of pore water pressure on the lining were investigated using the finite element method considering deterioration of the drainage system. Particularly, double-lined linings with drain-holes are considered. Deterioration of drainage system is represented as blockages of drain-holes. It is identified that the secondary lining can be influenced by the deterioration of drainage system. It is shown that a tunnel with all drain-holes blocked moved upward, and unbalanced drain-hole blocking may result in torsional behavior of the tunnel which causes significant damages to the secondary linings.

Keywords: Tunnel, fem, hydraulic interaction, double-lined, blocking, clogging

요 지 지하수 작용과 관련하여 현장에서 발생하는 문제는 1차 라이닝의 투수계수의 저하에 따른 영향뿐만 아니라 배수재의 투수성능에 따른 복합적인 요인의 상호 작용의 결과로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이중구조라이닝 연계 FEM 해석을 통해 지반-라이닝-배수재의 투수영향에 중점을 두고 배수시스템의 성능저하에 따른 터널구조물에 미치는 영향을 조사하였다. 해석 결과 배수장애가 발생할 경우의 수압증가는 2차라이닝에 심각한 구조적 부담을 줄 수 있음이 확인되었다. 배수공이 모두 폐색되는 경우 비배수 터널이 되어 수직으로 뜨는 형태의 거동을 보였다. 그리고 배수공의 폐색이 비대칭적으로 발생하는 경우 터널 축방향 비틂 거동을 야기하여 2차라이닝 구조에 심각한 영향을 미칠 수 있음이 확인되었다.

주요어: 터널, 유한요소법, 수리상호작용, 이중구조 라이닝, 막힘, 폐색

1. 서 론

일반적으로 국내에 적용되어온 배수형 터널의 경우 배수시스템이 정상적으로 유지된다는 개념으로, 터널 라이닝에 작용하는 수압의 영향을 고려하지 않았다. 또한 터널-지반 수리 상호작용문제는 경계조건의 이론적 표현의 한계 그리고 시간 의존적 거동으로 인해 연구의 제약이 많았다. 대부분의 수치해석은 지반과 1차 라이닝의 단일구조 상호작용에 의한 침투력, 구조적 영향 등을 모델링 하여 그 결과를 예상해왔다. Reddi et al.(2002), Shin et al.(2002)은 배수조건으로 설계된 터널의 경우에도 장기적인 거동으로 인해 배수재의 압착과 폐색으로 배수시스템의 수리기능저하가 발생하고, 이로 인해 간극수압이 증가하여 누수를 가속화 시키며, 라이닝의 열화를 초래한다고 보고하였다.

더 나아가 신종호 등(2006)은 광범위한 수리경계조건에서 지하수-터널 수리상호 작용 연구를 수행하여 기존의 전반 배수기능 열화만 고려하던 연구를 부분배수 문제까지 확장하여 수리 상호작용을 조사하였다. 또한 고수압 조건에서 라이닝과 지반의 수리·구조적 거동 특성을 조사(신종호 등, 2008a)하여 터널 설계시 열화와 같은 수리거동의 장기적인 영향을 조사해야한다고 보고하였다. 이는 터널의 배수기능 저하는 라이닝에 작용하는 하중의 증가로 이어져 터널의 안정에 치명적인 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다.

배수시스템의 열화가 진행되면서 발생하는 간극수압의 평가 방법(신종호 등, 2008c)과 터널 라이닝의 열화에 의한 누수 조사법(신종호 등, 2008b)은 보고되었다.

[1]정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
[2]포스코건설, 토목환경사업본부 사원
[3]건국대학교 토목공학과 석사과정
[4]건국대학교 토목공학과 석사과정
*교신저자: 신종호 (E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr)

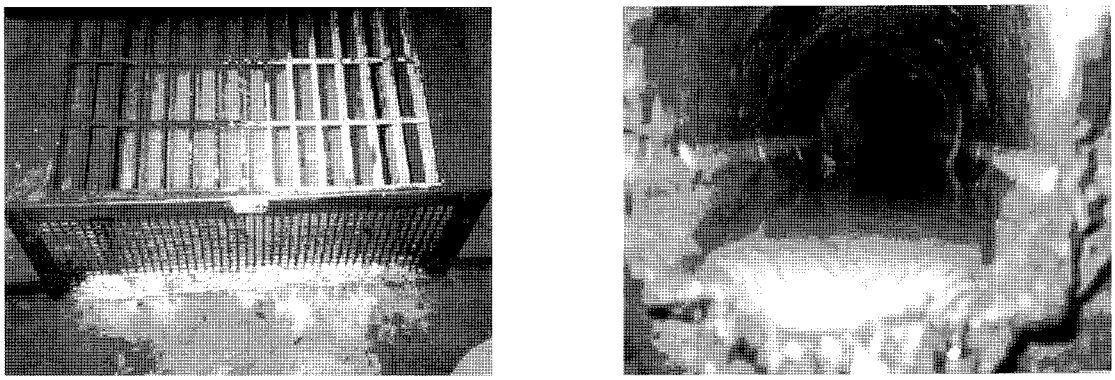
하지만 터널 현장에서 발생하는 문제는 1차 라이닝 투수계수의 저하에 따른 문제만이 아닌, 지반 및 라이닝 투수성과 더불어 배수재의 투수성능에 따른 복합적인 상호 작용에 의해서도 발생된다.

실제 터널에서 침전물의 배수공 퇴적(그림 1)으로 인해 배수성능이 저하되어 문제가 발생하는 경우가 많이 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 배수공 퇴적으로 인한 배수시스템 수리기능 저하로 인해 잔류수압 발생 메카니즘을 이중구조 NATM 라이닝의 '지반-라이닝-배수재'의 상대적 투수성을 적용한 연계 수치해석 모델을 사용하여 '이중구조 라이닝'의 수리상호작용 관계를 고찰하였다.

2. 지반공학적 모델링

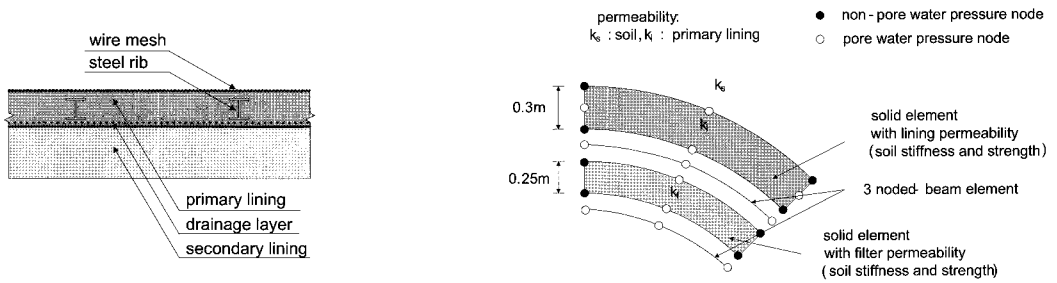
본 연구에서는 라이닝의 수리거동을 모사하기 위해 신종호 등(2006)에 적용된 모델에 배수재와 2차라이닝을 추가 적용하였다. 지반은 8절점 등매개요소(isoparametric), 라이닝은 선형탄성의 3절점 빔요소(Day and Potts, 1990)를 사용하였으며, 간극수압은 4절점 요소로 모델링하였다. 1차라이닝의 구조적거동을 나타내는 Beam 요소와 투수거동을 나타내는 Solid 요소의 결합모델에 2차라이닝의 거동과 배수재의 투수성을 나타내는 요소를 추가함으로써 1, 2차라이닝의 상호작용을 통한 거동을 조사 하였다. 그림 2는 이중구조 라이닝 및 배수재 모델을 보인 것이다.

굴착과정의 굴착경계면 수리경계조건을 배수조건으로 설정함으로써 라이닝의 설치 및 투수기능 저하에 따라 지하수위가 상승하는 실제 조건을 모델링하였다. 그리고 모델의 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였다. 또한 색소를 이용한 모형실험을 통하여 터널주변의 유



(a) 배수확인구 침전물퇴적　　(b) 배수공 내부 침전물 퇴적

그림 1. 배수공 침전물 퇴적 사례



(a) 이중구조 라이닝　　(b) 수치해석모델

그림 2. 이중구조 라이닝 및 수치해석 모델

선거동을 파악하고 수치 해석적으로 재현하여 운영 중인 터널의 배수시스템 조건 모델링은 터널주면 유출이 아닌 배수공 유출 경계조건이 보다 적절함을 나타낸 연구(신종호 등, 2008d) 결과를 바탕으로 집수공 배수 모델링을 이용하였다. 그림 3은 지하수 유출 모델을 나타낸 것이다. 해석 프로그램은 Biot(1941) 방정식을 기초로 하는 ICFEP을 이용하여 연계 FEM 해석을 수행하였다.

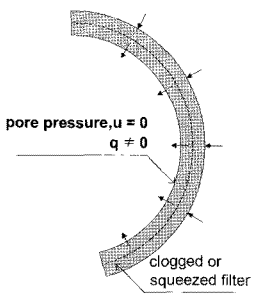
3. 해석 모델 및 케이스

지반구성 식은 해석결과를 기존 연구결과와 비교하기 위하여 Shin et al.(2007) 채용 모델과 동일한 모델을 사용하였다. 지층 구성은 크게 매립/충적토, 화강토, 풍화암 및 암반의 4 가지 지층으로 구성된다. 터널 및 터널 주변 지반의 거동이 중요하므로 지반 모델링은 화강토 지반에 초점을 두었다. 화강토를 적절히 표현하기 위하여 탄소성 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

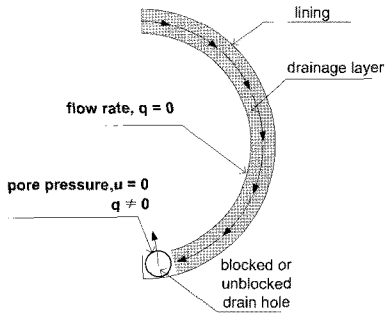
풍화가 덜 진행된 지반일수록 투수계수는 작아지기 때문에 화강암층의 깊이가 증가함에 따라 투수계수가 작아지는 것으로 가정하였고, 지반에 따라 선형 투수모델과 비선형 투수모델의 적용을 달리하였다. 탄성모델 선정과 마찬가지로 해석의 주요 관심은 터널이 굴착되는 화강토 지반에 있다. 이 지층은 Vaughan(1989)이 제시한 비선형 모델을 적용하였고, 터널 굴착의 영향을 크게 받지 않는 매립/충적층은 선형 모델을 적용하였다. 식 (1)은 지반 수리모델링에 적용한 Vaughan(1989)이 제안한 비선형 투수계수 식이다.

$$k = k_0 e^{-Bp'} \tag{1}$$

여기서, k_0 : 평균유효응력이 0인 경우의 투수계수,
B : 모델 파라미터,
p' : 평균유효응력



(a) 터널주면 유출



(b) 배수공 유출

그림 3. 지하수 유출 모델

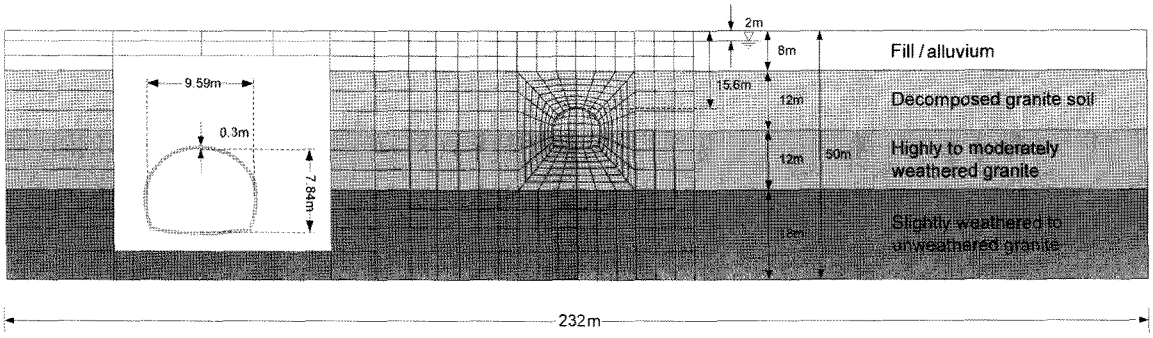


그림 4. 해석 모델

터널은 지름 폭 9.59 m, 높이 7.84 m의 마제형터널이며 라이닝 두께는 0.3 m로 설정하였다. 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 모델링의 폭은 터널 지름의 약 25배인 232 m로 하였다. 그림 4는 모델 Mesh를 표 1, 2는 지반 및 투수계수 파라미터를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 지반-라이닝-배수재의 상호작용에 따른 거동을 알아보기 위해 특정 라이닝, 배수재의 투수계수 변화에 따른 배수재의 열화 및 전반·중앙·우측 배수공 폐색의 따른 수리기능열화에 대한 해석케이스를 설정하였다. 표 3은 해석케이스를 요약한 것이다.

배수공은 그림 5에서와 같이 좌·우측과 중앙에 각각 배수공을 설치하여 완전배수(u=0)의 조건을 부여함으

표 1. 지반 파라미터

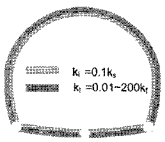
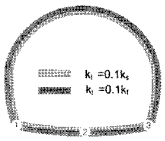
Soil constitutive models (pre-yield)				
	Isotropic linear elastic (z: 지층깊이)			
	탄성계수 (kPa)	포아송비	측압계수	단위중량 (kN/m^3)
Fill/alluvium	1.47×10^4	0.35	k_0=0.54	15.7
Decomposed granite soil	$1.47\times10^4+5.44\times10^3z$	0.32	k_0=0.45	19.6
Highly to moderately weathered granite	$8.00\times10^4+7.67\times10^4z$	0.30	k_0=0.42	21.5
Slightly weathered to unweathered granite	$1.00\times10^6+1.06\times10^6z$	0.28	k_0=0.35	24.5

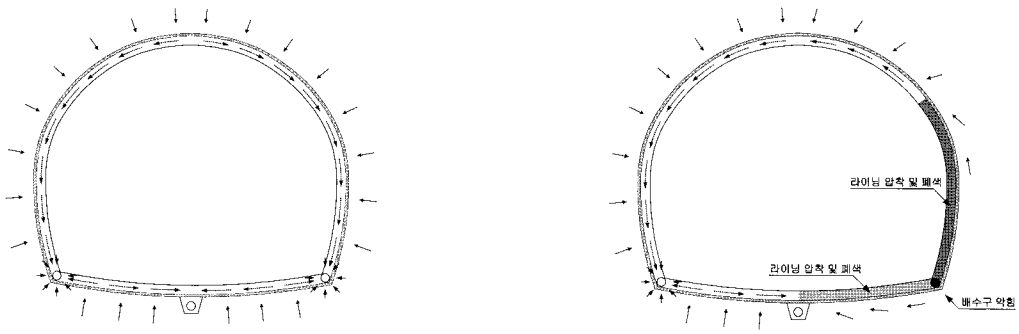
Soil constitutive models (post-yield)			
	Mohr-Coulomb yield parameters (z: 지층깊이)		
	점착력 (kPa)	전단저항각 (degree)	Angle of dilatancy (degree)
Fill/alluvium	Linear elastic		
Decomposed granite soil	2+0.667z	31.0	15.5
Highly to moderately weathered granite	10+7.500z	42.0	21.0
Slightly weathered to unweathered granite	100+500z	56.0	28.0

표 2. 투수계수 파라미터

	Coefficient of permeability					
	Isotropic permeability (spatially varying, m/s)	Nonlinear permeability($k=k_0e^{-Bp'}$)				
		k_0 (m/s)	β	p'_1	p'_2	R (k_{max}/k_{min})
Fill/alluvium	2.0×10^{-4}	-	-	-	-	-
Decomposed granite soil	$1.0\times10^{-8}+8.250\times10^{-8}z$	1.9×10^{-6}	0.0043	5	50	100
Highly to moderately weathered granite	$1.0\times10^{-6}-0.542\times10^{-7}z$	1.9×10^{-6}	0.0043	5	50	100
Slightly weathered to unweathered granite	$3.5\times10^{-7}-0.139\times10^{-7}z$	-	-	-	-	-

표 3. 해석케이스

구 분		경계 조건		비고
		k_l/k_s	k_f/k_l	
배수공 기능정상, 배수재 수리 기능저하		0.1	0.01~200	k_s: 지반 k_l: 라이닝 k_f: 배수재 $k_s = 3.4\times10^{-6}$
배수공전반 폐색		0.1	10	
중앙 배수공(②) 폐색				
우측 배수공(③) 폐색				



(a) 정상배수 (b) 배수기능 저하

그림 5. 정상배수 및 배수시스템 열화에 따른 흐름 개념도

로써 배수공의 막힘의 다양한 조건을 모사하였다. 배수 장애는 완전배수 조건을 비배수(q=0)조건으로 변경함으로써 모델링 하였다.

4. 해석결과

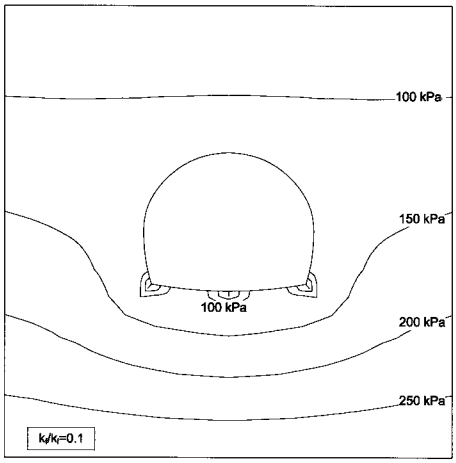
해석결과는 배수재 수리 기능저하 조건과 배수공 폐색조건 두 가지 조건에 대하여 분석하였다. "터널에 잔류수압이 발생하게 되면 라이닝에 작용하는 하중의 증가로 이어져 라이닝의 누수 및 손상의 리스크는 증가할 것이다(신종호 등, 2005)". 그러므로 본 해석에서 이를 수치해석적으로 고찰해 보고자 터널 주변 및 1,2차 라이닝에 작용하는 간극수압, 유속벡터, 라이닝의 변형을 중점적으로 고찰하였다.

4.1 배수재 전반 수리기능 저하시 배수공 정상 기능

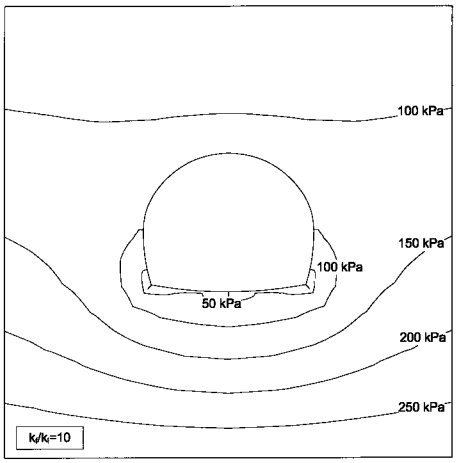
(1) 터널주변 간극수압 분포 및 유속벡터

배수재에 대한 1차라이닝의 투수계수는 지반의 투수계수의 1/10배인 상태에서 평형상태 도달 후(장기거동) 간극수압 분포를 보인 것이다. 배수재의 투수성이 숏크리트 라이닝 투수계수의 1/10배인 경우 배수구 주변을 제외한 터널 전단면에 100~150 kPa의 수압분포를 보였다. 하지만, 그림 6(b)의 경우 터널 스프링라인까지 100 kPa이하의 수압이 작용하며, 배수재의 투수성이 저하된 상황보다 터널에 작용하는 수압이 작아진 것을 알 수 있다.

터널 주변의 장기 정상상태의 유속벡터는 배수재의 투수성이 숏크리트 라이닝보다 작을 경우(1/10배) 배수재를 타고 흐르는 흐름벡터는 작다. 반면에 배수재의 투

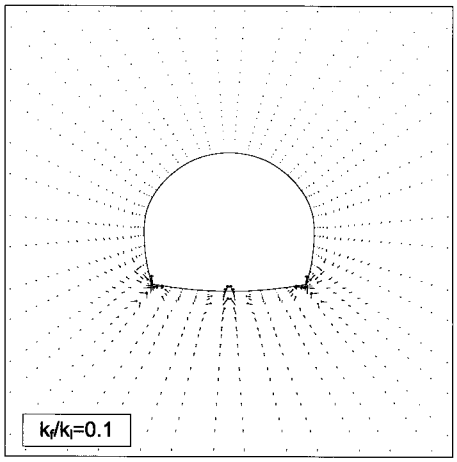


(a) $k_f/k_l = 0.1$

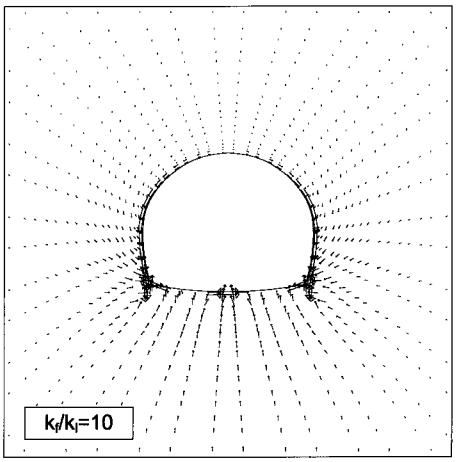


(b) $k_f/k_l = 10$

그림 6. 간극수압 분포(전반 수리기능 저하, 배수공정상)



(a) $k_f/k_l = 0.1$



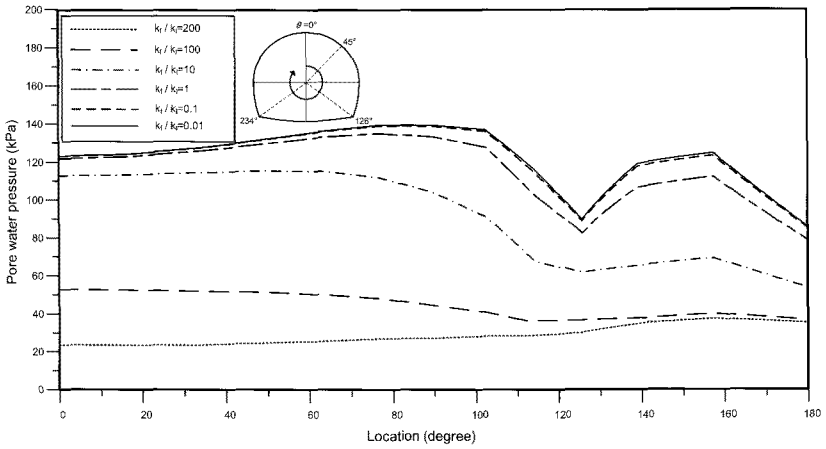
(b) $k_f/k_l = 10$

그림 7. 유속벡터(전반 수리기능 저하, 배수공정상)

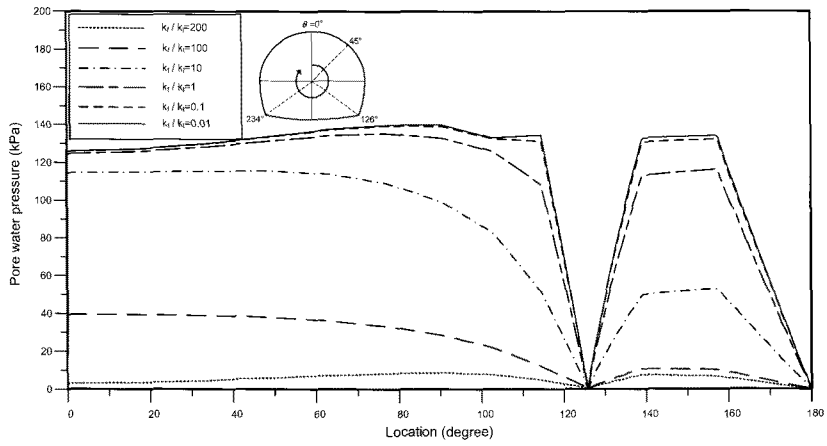
수성이 좋을 경우 원활한 배수흐름을 보이며 흐름이 배수구로 집중되는 것을 확인 하였다.

(2) 라이닝에 작용하는 간극수압

배수시스템의 열화는 터널주변의 흐름의 변화를 주고 이는 라이닝의 작용하는 간극수압에 영향을 미친다. 그림 8은 라이닝에 작용하는 간극수압을 나타낸 것이다. 배수재의 성능이 1차라이닝 투수계수보다 200배 클 경우 1차라이닝과 2차라이닝에 작용하는 간극수압은 터널 주변을 따른 간극수압의 크기가 0~110° 부분에서 거의 일정한 값을 보인다. 배수재의 투수성능이 1차라이닝의 100배인 경우에는 터널 천단부에 작용하는 간극수압은 약 50 kPa를 나타냈으나 2차라이닝에서는 40 kPa로 낮아졌다. 이는 배수재의 투수성이 1차라이닝의 100배 이상일 경우 터널 단면에 작용하는 간극수압은 급격히 낮아지는 것으로 판단할 수 있다.



(a) 1차 라이닝



(b) 2차 라이닝

그림 8. 라이닝에 작용하는 간극수압(배수재 수리기능 저하)

(3) 라이닝 변형

1차 라이닝은 배수재의 열화로 인해 투수성이 낮아질 경우 인버트 부에서의 바닥 융기 현상이 증가하는 것으로 나타났다. 2차라이닝에 작용하는 변형은 배수재의 성능이 지반의 투수성보다 낮을 경우에는 인버트 부에서의 변위는 하나의 값으로 수렴하는 경향이 있다. 2차라이닝의 변형은 1차라이닝의 변형 형태와는 달리 전체적으로 아래로 침하하는 형태를 볼 수 있으며, 그 변위는 천단부에서 최대 7.9 mm로 1차라이닝의 변위량과 유사한 값임을 알 수 있다.

4.2 배수공 폐색에 따른 수리기능 저하

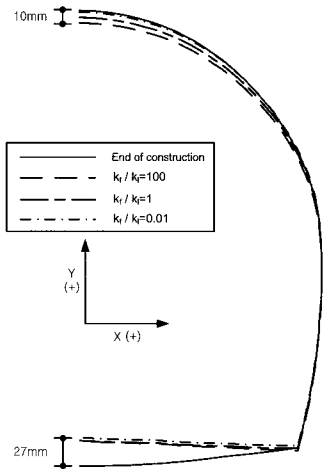
부분 열화의 경우 라이닝 완전배수 조건과 비교 검토를 위해 $k_l = 0.1k_s$, $k_f = 10k_l$를 기본 해석조건으로 설정하고 배수공을 전반, 중앙, 우측부분을 폐색함으로써 배수공 막힘 현상을 나타냈다.

(1) 터널 주변 간극 수압 및 유속백터

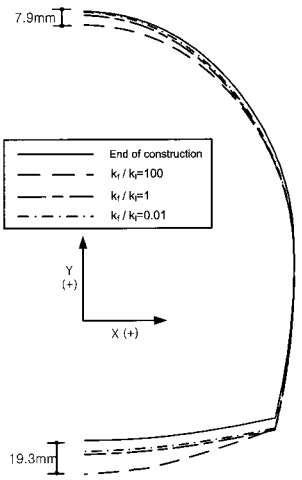
"전체 배수공이 폐색될 경우 비배수 상태와 동일한 상태로 볼 수 있기 때문에 정수압 상태로 나타난다(신종호 등, 2009)". 이 경우, 흐름이 없으므로 유속 벡터는 모두 영(0)이 된다. 그러므로 이를 제외하고 그림 10, 11에서

는 비대칭일 경우의 간극수압분포와 유속벡터를 나타내었다. 그림 10(a)는 중앙 배수공이 폐색 되었을 경우를 보여주는데 정상기능 배수공에서는 간극수압이 50~100 kPa의 값을 나타낸 데 비해, 중앙배수공 주변은 100 kPa 이상의 값을 보인다. 즉, 폐쇄된 중앙배수공 주변수압이 크게 증가함을 나타낸다. 그림 10(b)는 우측벽 배수공 폐색에 따른 터널 주변의 간극수압 분포를 나타낸 것이다. 우측 배수공이 폐색될 경우 우측 모서리에서 수압이 증가하여 터널 스프링라인까지 150 kPa의 분포를 나타내며, 좌측의 100 kPa이하의 값보다 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 그림 11은 터널 주변 지반의 유속벡터 상태를 나타낸다. 배수공의 폐색이 되면 정상적으로 작용하는 배수공 방향으로 흐름이 집중됨을 확인 할 수 있다.

이를 통해 배수공이 폐색이 될 경우에 터널주변에 간극수압이 증가함을 알 수 있다. 이는 수리기능이 열화 되어 수압이 증가하는 NATM 해석결과(신종호 등, 2006)와 비슷한 양상을 보인다.

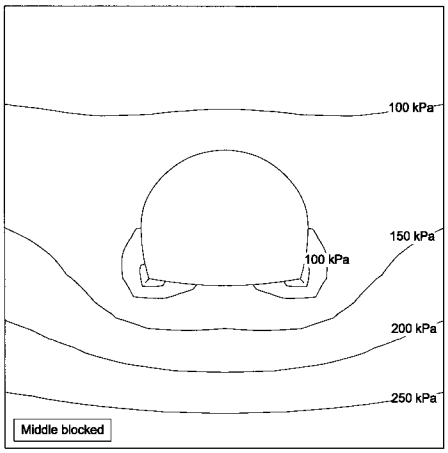


(a) 1차 라이닝

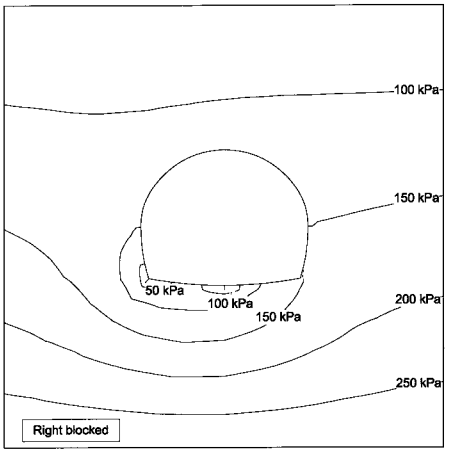


(b) 2차 라이닝

그림 9. 라이닝 변형(배수재 수리기능 저하)

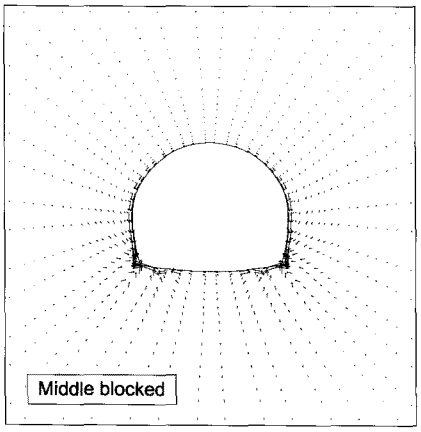


(a) 중앙배수공 폐색

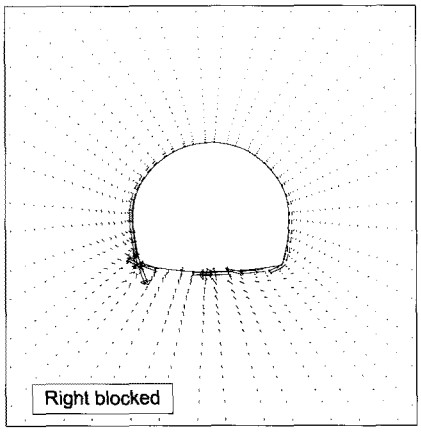


(b) 우측배수공 폐색

그림 10. 터널주변 간극수압

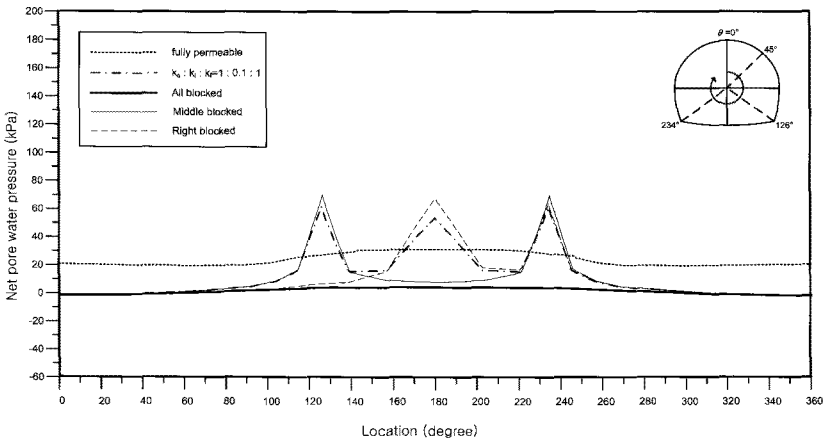


(a) 중앙배수공 폐색

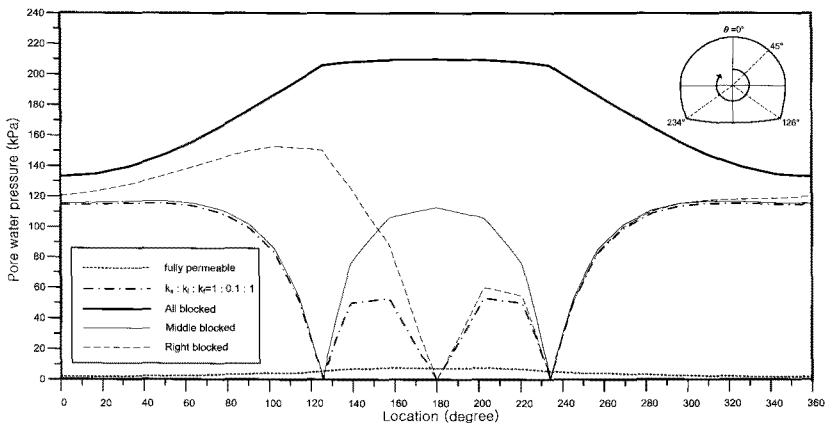


(b) 우측배수공 폐색

그림 11. 유속벡터



(a) 1차 라이닝



(b) 2차 라이닝

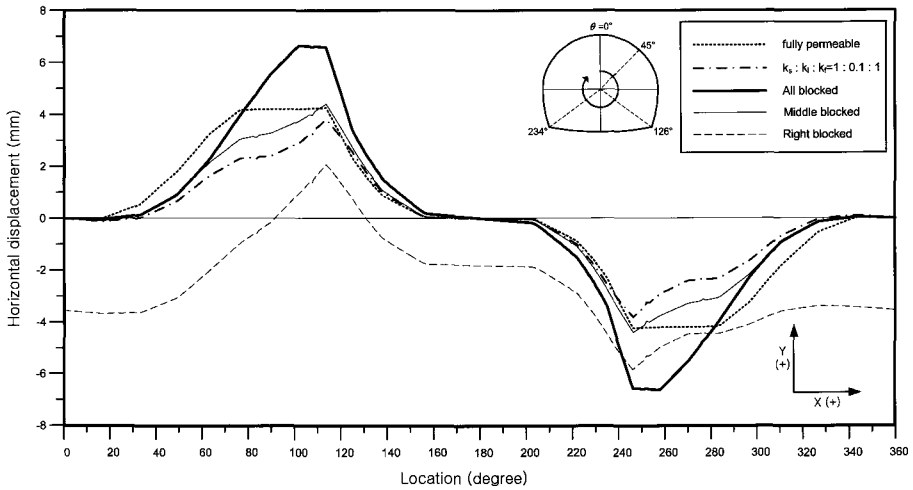
그림 12. 배수공 폐색에 따른 라이닝에 작용 간극수압

(2) 라이닝에 작용하는 간극수압

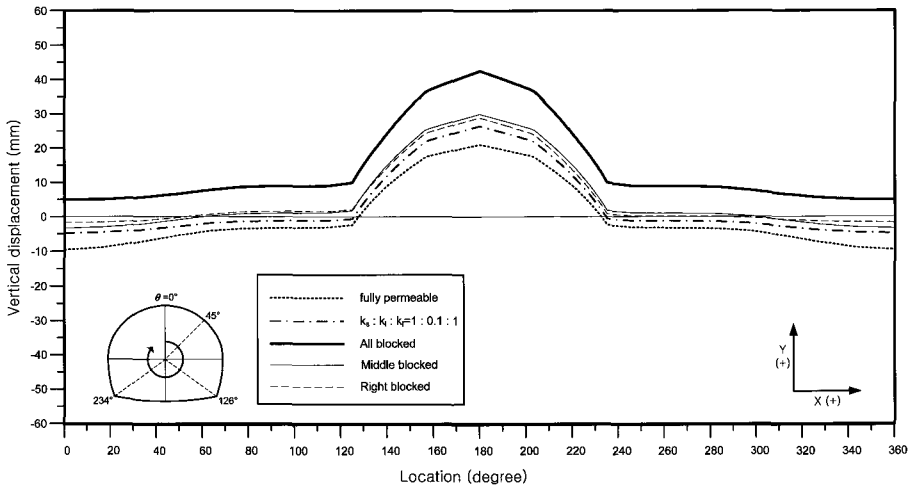
배수공이 폐색 되면 라이닝에 작용하는 간극수압은 정상상태의 배수공 위치에서 크게 나타난다. 배수공 주변을 제외한 나머지 위치에서 거의 '0'의 값을 가진다. 그림 12(b)의 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 살펴보면 완전배수 상태일 경우 거의 '0'에 가까운 값을 나타낸다. 또한 정상상태의 배수공($k_s : k_l : k_f = 1 : 0.1 : 1$)에서는 2차 라이닝에 작용하는 간극수압은 모두 소산되나 배수공이 폐색될 경우 그 영향으로 인해 간극수압은 다시 상승하여 1차 라이닝에서 작용하는 수압이 그대로 작용하는 것을 알 수 있다.

(3) 라이닝 변형

배수공이 폐색되면 기본해석조건($k_s : k_l : k_f = 1 : 0.1 : 1$)의 상태보다 라이닝의 변형이 많이 일어나는 것을 그림 13, 14를 통해 알 수 있다. 특히, 폐색이 우측(비대칭)으로 발생할 시에 터널의 2차 라이닝에 발생하는 수평변위는 전면·중앙에 배수공 폐색이 발생될 때보다 매우 크게

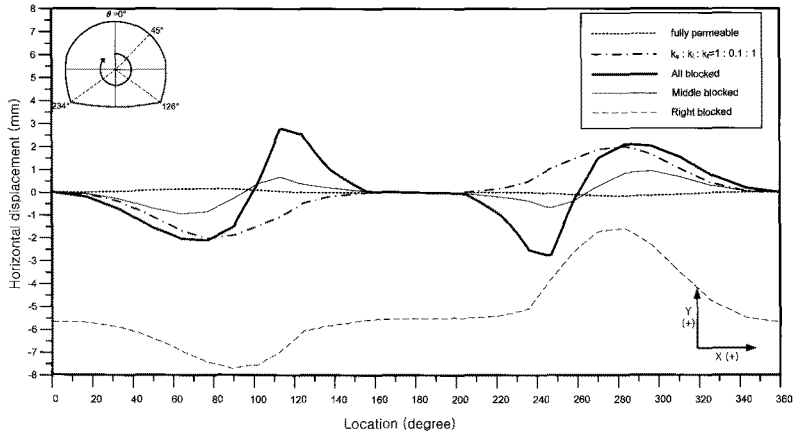


(a) 수평변위

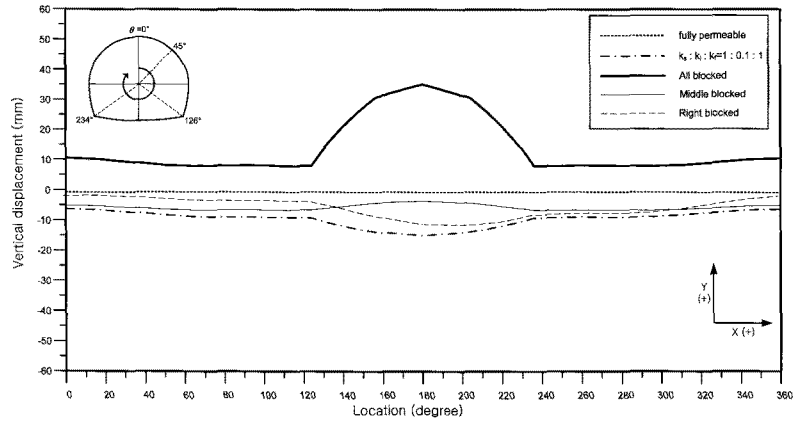


(a) 수직변위

그림 13. 배수공 폐색에 따른 1차 라이닝 변위

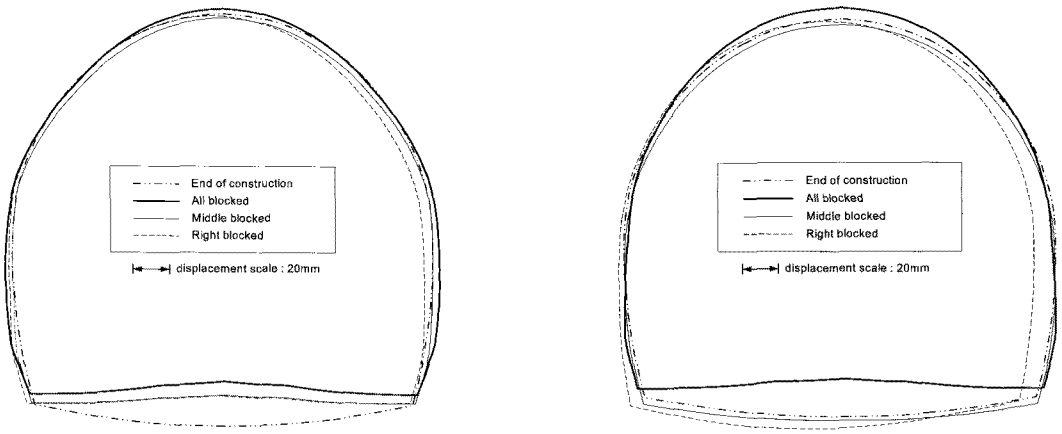


(a) 수평변위



(b) 수직변위

그림 14. 배수공 폐색에 따른 2차 라이닝 변위



(a) 1차 라이닝 (b) 2차 라이닝

그림 15. 배수공 폐색에 따른 라이닝 변형

좌측으로 이동하는 경향이 나타난다. 라이닝의 수직 변위는 배수공 폐색 시 단면이 전체적으로 위쪽으로 향하여 거동하는 것을 파악할 수 있다. 이를 통해 배수공이 비대칭으로 발생하는 경우 터널 축방향 비틂거동을 야기하여 라이닝 구조에 심각한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 NATM 터널에서 발생가능한 수리상호작용을 가장 실제 현상에 부합하게 모델링을 시도하였다. 이러한 모델링 기법은 2차라이닝에 발생하는 수압 및 라이닝 변위 조사에 유용함이 확인되었다. 본 연구로부터 2차라이닝에 수압이 작용하는 메카니즘을 파악할 수 있으며, 수치해석을 통해 배수공 폐색에 따른 영향의 평가가 가능하였다. 주요 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 복합요소 모델은 터널 라이닝과 지반의 수리 상호작용을 적절히 표현할 수 있으며, '1차 라이닝-2차 라이닝' 상호거동은 복합요소를 중첩 적용하여 모사 가능하다.
2. 배수장애가 발생할 경우 수압증가는 라이닝에 심각한 영향을 미칠 수 있음이 확인되었다.
3. 배수공 폐색에 따른 배수 시스템 열화시 지반하중은 약간 증가하고, 수압이 증가하는 만큼 유효응력은 감소하는 것으로 나타났다.
4. 배수구의 폐색이 비대칭적으로 발생하는 경우 축방향 비틂 거동을 야기하여 2차라이닝 구조에 심각한 영향을 미칠 수 있다.
5. 터널 배수구가 모두 폐색되는 경우 비배수 터널이 되어 수직으로 뜨는 형태의 거동을 보였다.

감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단의 2007년 신진교수연구지원사업(KRF-2007-331-D00473) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신용석 (2006), "잔류수압을 받는 배수터널 안전성평가", 한국시설안전기술공단 기술개발성과발표회 논문집, pp. 73-103.
2. 신종호, 박동인, 주은정 (2008a), "라이닝-지반 수리상호작용이 해저터널에 미치는 영향", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 49-57.
3. 신종호, 신용석, 안상로, 박동인 (2006), "지하수-터널 수리 상호작용에 따른 터널의 장기 거동 연구", 한국지반공학회 정기학술대회 논문집, pp. 239-248.
4. 신종호, 신용석, 윤종열, 김호종 (2008b), "전기비저항탐사를 이용한 터널라이닝 누수조사 연구", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제3호, pp. 257-267.
5. 신종호, 신용석, 남택수, 채성은 (2009), "이중구조라이닝 폐색에 따른 영향도 평가", 한국터널공학회 학술논문집, pp. 277-281.
6. 신종호, 신용석, 최규철 (2008c), "운영 중 터널에 작용하는 간극수압 평가기법", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 361-369.
7. 신종호, 안상로, 신용석 (2005), "배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한터널설계", 대한토목학회 논문집/전문학회 세션, pp. 2943-2950.
8. 신종호, 최민구, 강소라, 남택수 (2008d), "천층터널 주변의 흐름거동 및 수치 해석적 모델링 기법 연구", 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제10권, 제1호, pp.37-47.
9. Biot (1941), "General theory of three-dimensional consolidation", J.appl.Physics, Vol. 12, pp. 155-169.
10. Day, R.A. and Potts, D.M. (1990), Curved Mindlin beam and axisymmetric shell elements a new approach, Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 1263-1274.
11. Potts, D.M. and Zdravkovic (1999), "Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory", Thomas Telford, London.
12. Reddi, L.N. Ming, X. Hajra, M.G. and Lee, I.M. (2000), Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126(3), pp. 236-246.
13. 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.
14. Shin, J.H., Shin, Y.S., Kim, S.H. and Shin, H.S. (2007), "Evaluation of residual pore water pressures on linings for under sea tunnels", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 26, Supp. 2.
15. Vaughan, P.R. (1989), "Non-linearity in seepage problems-Theory and field observation", De Mello Volume, Sao Paulo, pp. 501-516.

접수일(2009.7.17), 수정일(2009.8.3), 게재확정일(2009.8.5)