

터널설계시 지하수의 고려방안 연구 Groundwater Considerations in Tunnel Design

이인모, In-Mo Lee^{*1}

김용진, Yong-Jin Kim^{*2}

이명재, Myung-Jae Lee^{*2}

남석우, Seok-Woo Nam^{*3}

*1 : 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., Seoul

*2 : 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., Seoul

*3 : 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., Seoul

SYNOPSIS : This paper concerns the analytical concept of tunnel design for the case where the groundwater level remains almost to a standstill even though the steady state groundwater flow occurs through tunnel drainage systems. The effect of the seepage force is considered in analysis. Two case studies are made : the one the round shape tunnel ; the other the horse shape. The design moments, shear forces and axial forces are calculated and these results are compared to the case of water proof tunnel design as well as the case of the tunnel design without groundwater consideration.

1. 서론

터널의 방수목적은 누수로 인한 내부설비의 기능 저하 및 라이닝의 안정성 저하 등을 방지하여 터널의 수명을 연장하는데 있다. 일반적으로 터널 설계시 지하수를 고려하는 방법은 배수조건에 따라 두가지로 분류하는데 터널 라이닝 배면에 지하수를 유도하는 배수공을 매설하는 배수공법과 터널 라이닝 주변을 완전 방수 처리하여 라이닝 내부로 지하수가 침투하지 못하도록 하는 비배수공법(완전방수공법)이 있다.

배수공법에서의 터널 해석은 지중응력 상태를 「전응력(=유효응력)」으로 고려하며, 비배수공법에서는 「유효응력 + 정수압」으로 해석조건을 설정한다. 그러므로, NATM개념으로 터널을 설계할 때 배수공법에서는 라이닝에 거의 하중이 작용하지 않으며, 비배수공법에서는 정수압이 작용한다. 하지만, 하천 인접구간 등 지하수가 풍부하여 지하수위의 저하가 크지 않은 경우에 배수공법으로 설계된 터널은 상기에서 언급한 배수,비배수 개념과는 상당히 다른 지중응력 상태이다.

현재에는 이와 같은 경우에도 주로 배수개념(즉, 수압을 고려하지 않은 개념)에 의해 설계가 이루어지고 있다. 물론, 지하수가 저하되지 않고 정상류(steady state flow)의 흐름이 발생하는 경우에 라이닝에 배수층이 설치되어 있으면 수압은 0이 되지만, 지중응력 상태는 「유효응력 + 침투수압」이므로 라이닝에 작용하는 하중은 배수개념과는 상당히 다른 상태에 있다.

본 고에서는 이와 같이 지하수의 저하가 크지 않고 배수층 및 배수시설의 기능이 정상적인 상태에서 지하수의 흐름이 정상류일 때의 지중응력 조건을 해석이 반영하여, 지중응력 상태를 「전응력(=유효응력)」으로 고려한 배수개념과는 다른 지하수 침투를 고려한 배수개념에 의한 터널설계 방법을 제안하였다. 또한, 에제 해석을 통하여 배수조건 및 지하수위 강하조건에 따라 라이닝에 걸리는 하중의 차이를 비교 검토하여 터널 설계시 지하수의 합리적인 고려방안을 제시하였다.

2. 지하수를 고려한 터널 설계

2.1 배수조건에 따른 터널의 종류

라이닝 배면부에 지하수가 채류하면 라이닝 배면에 과도한 수압이 작용하게 되어 터널의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 누수에 의해 내부설비의 기능 저하, 라이닝의 제질약화 및 유지관리상의 문제 등을 초래할 수 있으므로, 터널 설계시 지하수의 합리적인 고려 방안이 요구된다.

일반적으로 지하수를 고려한 터널의 설계방법은 크게 두가지로 분류하는데 라이닝 배면에 지하수를 유도하는 배수공을 매설하는 배수공법과 터널 굴착후 라이닝 주변을 완전 방수처리하여 라이닝 내부로 지하수가 침투하지 못하도록 하는 비배수공법(완전방수공법)이 있다.

두 공법의 특징은 표 1. 에 수록한 바와 같이 배수공법은 라이닝의 수압을 고려하지 않으므로 시공비가 적게 드는 장점이 있으나 지하수위 저하를 초래하여 지표침하 문제를 야기할 뿐만 아니라 시공후 운영중에 항상 배수시설을 가동하여야 하는 문제점이 있다. 이에 반하여 완전방수터널은 라이닝에 정수압이 작용하므로 단면 보강으로 인한 시공비가 증가하는 문제점이 있다.

2.2 배수조건에 따른 터널의 설계 개념

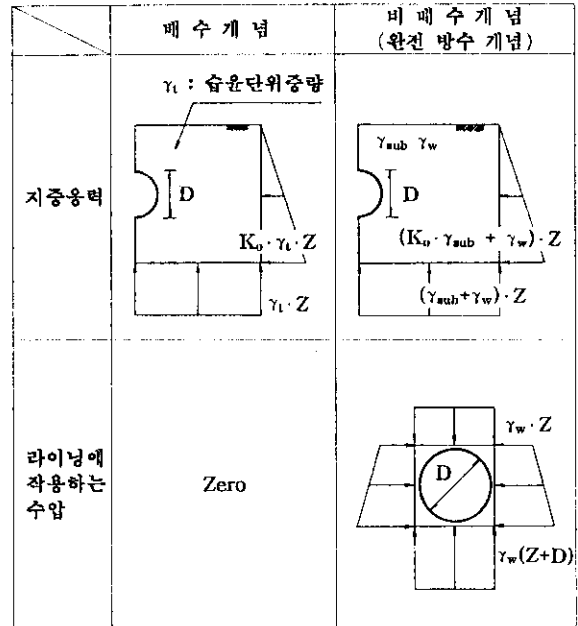
배수조건에 따른 터널의 설계 개념은 표 2. 에 보인 바와 같이 배수개념의 경우에 지중응력을 전응력으로 고려하고 라이닝에 수압이 걸리지 않는 것으로 설계하므로 NATM에서는 라이닝에 작용하는 하중을 거의 무시할 수 있다.

비배수개념은 지중응력을 유효응력과 정수압으로 고려하므로, 라이닝에 정수압이 작용하게 되며, NATM에서도 수압에 견딜 수 있도록 라이닝의 단면을 보강하여야 한다.

표 1. 배수조건에 따른 터널의 비교

	배수공법	비배수공법 (완전 방수공법)
형식	방수포를 터널 천정부와 측면부에 설치하고 유입수를 배수층을 통하여 터널 내부로 유도하여 배수처리	터널 전단면에 방수포에 의한 차수층을 설치하여 지하수의 유입을 완전 차단
장점	<ul style="list-style-type: none"> 라이닝 수압을 고려하지 않으므로 구조적으로 얇은 무근 콘크리트 라이닝도 가능하다. 특수 대단면 시공이 가능하다. 누수시 보수가 용이하다. 시공비가 적게 든다. 	<ul style="list-style-type: none"> 유지비가 적게 든다. 터널 내부가 청결하며 관리가 용이하다. 지하수위 변화가 없으므로 주변환경에 영향을 주지 않는다.
단점	<ul style="list-style-type: none"> 자연배수가 불가능한 경우에 유지비가 많이 든다. 지하수위 저하로 주변 지반 침하와 지하수 이용에 문제가 생길 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 시공비가 많이 든다. 특수 대단면에서는 단면이 커져 비경제적이다. 누수가 발생하면 보수비가 많이 들고 완전보수가 어렵다. 라이닝의 두께가 커지고 그에 따라 철근이 요구된다.
적용	<ul style="list-style-type: none"> 지질조건이 양호 주변에 구조물이 없을 때 지하수가 낮을 때 	<ul style="list-style-type: none"> 지질조건이 불량 지하수가 높거나, 지하수의 공급이 많을 때 도심 등 주변에 중요 구조물이 존재할 때

표 2. 배수조건에 따른 터널의 설계 개념



을 고려하지 않으면 터널 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 또한 국내의 지하철 터널에서 실제 배수층을 shotcrete층과 라이닝 사이에 설치함으로 누수계수가 적은 shotcrete층에 상당한 수압이 작용하게 될 가능성도 존재한다.

표 3에 나타낸 바와 같이 지하수위의 저하가 크지 않은 배수터널에서는 지하수의 흐름이 발생하며 이로 인하여 지중응력 상태가 변화하므로 라이닝에 영향을 끼친다.

표 4에 보인 바와 같이 침투가 발생하는 터널의 지중응력은 유효응력과 침투압이며, 침투 경계에서는 정수압이 작용하다가 라이닝 배수층에서 수압이 0이 된다.

2.3 지하수를 고려한 터널 설계

배수터널의 설계 개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정 하에서 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 이 가정은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위 저하가 크지 않은 하천 인접 구간 등에서는 침투력(seepage force)이 라이닝에 작용하므로 수압

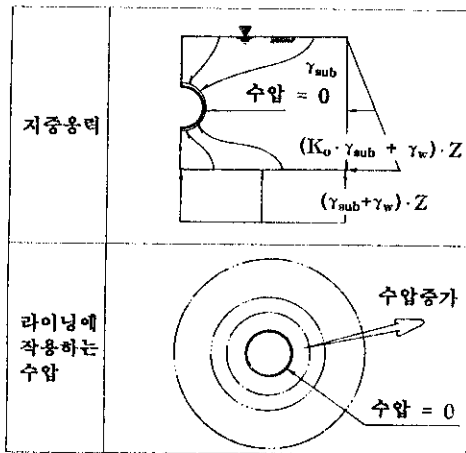
표 3. 배수조건에 따른 터널해석

	배수개념	비배수개념 (완전 방수개념)	침투를 고려한 배수개념
개념			
지하수위	배수에 의한 강하 발생	변동 없음	변동 없음
침투	발생	발생 없음	발생
해석 조건	계곡 경계부	전응력 (=유효응력)	유효응력 + 정수압
	지중응력	유효응력 (=전응력)	유효응력 + 정수압
	라이닝에 작용하는 수압	0	정수압
			0

이와 같이 라이닝 배수층에 걸리는 수압이 0이나, 지하수가 터널 하단부 이하로 하강한 배수터널과 비교해 보면 지중의 응력상태는 현저하게 다르다.

상기에서 언급한 바와 같이 실제 침투가 발생하는 터널의 라이닝 설계는, 해석 경계부는 유효응력과 정수압이 작용하는 방수개념을 적용하고, 라이닝에 걸리는 수압은 영이며, 지중에는 해석경계부와 라이닝과의 수두차(터널 중심에서의 지하수위)로 인한 정상류(steady state)의 흐름으로 인한 유효응력과 침투수압을 적용해야 한다.

표 4. 침투를 고려한 터널 설계



3. 예제 해석

3.1 개요

터널 설계시 타당한 지하수의 고려 방안을 연구하기 위하여 기존에 적용되고 있는 수압을 고려하지 않은 배수개념, 정수압을 작용시키는 비배수개념(완전방수개념), 그리고 앞장에서 언급한 침투(seepage)를 고려한 배수개념으로 원형단면과 마제형 단면의 예제 해석을 수행하였다.

예제터널에서 침투에 미치는 영향인자는 지반조건, 지하수위, 지반 및 지보재의 투수성, 배수 및 침투조건 등이다. 본 예제에서는 지하수위와 지반조건을 변화시키면서 상기 3가지 개념의 해석 방법을 비교 분석하였다.

터널해석은 유한차분법으로 이루어진 지반구조물 해석 프로그램인 'FLAC(3.03)'을 이용하였으며, 지반 구성 모델은 Mohr-Coulomb model 을 사용하였다. 해석과정은 유효응력 계산 시에는 지반의 불성질을 사용하고, 굴착단계에서는 카공분율과 null model을 사용하여 3차원 효과를 고려하였으며 하중단계로는 shotcrete, rock bolt 및 라이닝의 지보재를 설치하였다. 지하수의 흐름해석도 터널해석과 동일한 program으로 수행하였으며, 침투를 고려한 배수개념해석시에는 라이닝 타설 후 응력계산과 침투해석을 동시에 실시하였다.

3.2 해석 조건

본 예제에서 택한 해석 조건은, 수압을 고려하지 않은 배수개념 해석에서는 지중응력 상태가 「전응력(=유효응력)」이며, 수압은 무시하였다. 방수개념 해석에서는 지중 응력 상태가 「유효응력 + 정수압」으로 구성되며 결국 라이닝에 정수압이 작용한다.

침투를 고려한 배수개념 해석에서는 해석 경계부에는 「유효응력 + 정수압」이 작용하고, 라이닝 배면에 작용하는 수압이 0이며, 지중응력은 터널 중심부에서 지하수위까지의 거리만큼의 수두차로 인한 정상류 흐름으로 인한 「유효응력 + 침투수압」의 상태이다.

라이닝 형상에 따른 영향을 검토하기 위하여 원형단면과 서울 지하철 북선 터널 단면 중의 하나인 마제형 단면을 택하여 해석하였다. 또한, 지반 및 지하수위의 영향을 검토하기 위하여 원형단면에서 터널 crown에서 지표면까지의 거리를 2D, 3D, 4D (D는 터널 직경)인 경우와 각 경우에 지하수위를 변경하면서 해석을 실시하였다.

실제 설계 적용을 위하여 서울 지하철 마제형 단면에 작용하는 모멘트, 전단력 및 축력을 3가지 해석 개념으로 분석하여, 각 경우에 대한 단면 설계 예를 보였다.

3.3 예제 해석

3.3.1 원형 단면

원형 단면의 지반은 층적으로 구성된 사질토로써, 지반 상수는 그림 1 에 나타내었다. 토사구간에 NATM 개념으로 시공하기 위하여 터널주변 0.5D를 그라우팅으로 보강하였으며, 투수계수는 주변지반과 동일한 값을 사용하여 균일(homogeneous)한 흐름조건이 되도록 하였다.

해석조건은 표 5 에 보인 바와 같이 지반조건과 지하수위에 따라 9가지 예를 해석하였으며, 상기에서 언급한 3가지 해석개념으로 조합하면 총 21가지 경우에 대하여 해석하였다.

해석에 적용된 하중 분담율은 지반 불성질을 변화시켜 굴착시 50%, shotcrete 타설시 75%, 라이닝 설치 전에 100% 를 적용하였다.

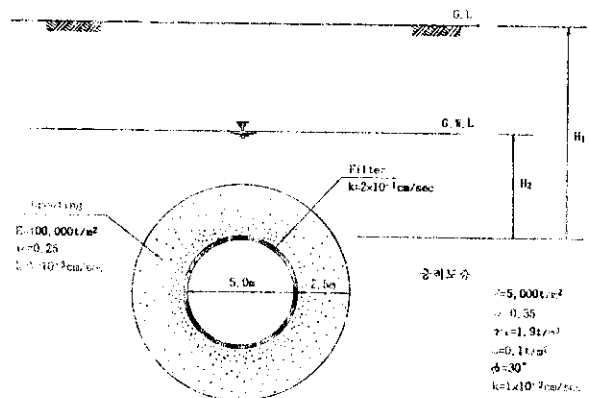


그림 1. 지반조건 (원형 단면)

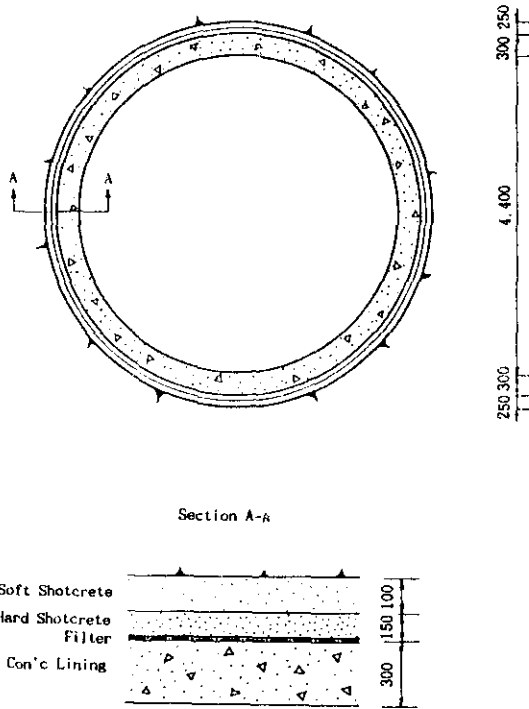
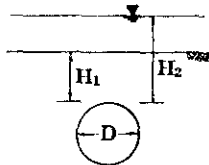


그림 2. 터널 단면도 (원형 단면)

표 5. 해석조건 (원형단면)

지반고 지하 수위	$H_1 = 2D$	$H_1 = 3D$	$H_1 = 4D$
$H_2 = 0.5H_1$	배수(수압=0) 배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(수압=0) 배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(수압=0) 배수(침투고려) 비배수(정수압)
$H_2 = H_1$	배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(침투고려) 비배수(정수압)
$H_2 = 1.5H_1$	배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(침투고려) 비배수(정수압)	배수(침투고려) 비배수(정수압)



D : 터널 직경

H_1 : 지반고 (터널 crown 에서 지표까지 거리)

H_2 : 지하수위 (터널 crown 에서 지하수위까지 거리)

3.3.2 마제형 단면

마제형 단면의 지반은 매립토, 충적토, 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있으며, 지하수위는 계획 홍수위 (GL+3m) 를 기준으로 하였다(그림 3 참조). 터널 굴착전에 토사층 단면의 주변에 직경 80cm의 분사식 시멘트 그라우팅을 2열로 시공하여 굴착시 지보공으로 활용하고 차수효과를 기대하고 있으며 25 cm 두께의

shotcrete는 wire mesh와 강지보재로 하였고 천정부와 측벽부는 30 ~ 110 cm (평균 : 70 cm), 저부에는 30 cm 두께의 무근콘크리트 라이닝을 설치하였다. 그라우팅층의 무수계수는 5×10^{-5} cm/sec로 증착토의 1/20로 가정하였다(그림 4 참조).

터널굴착은 6분할 단면으로 이루어지며 각 분할 단면에서 하중 분담율은 지반물성치를 변화시켜 굴착시 50%, 1st shotcrete 75%, 2nd shotcrete 100% 를 적용시켰다.

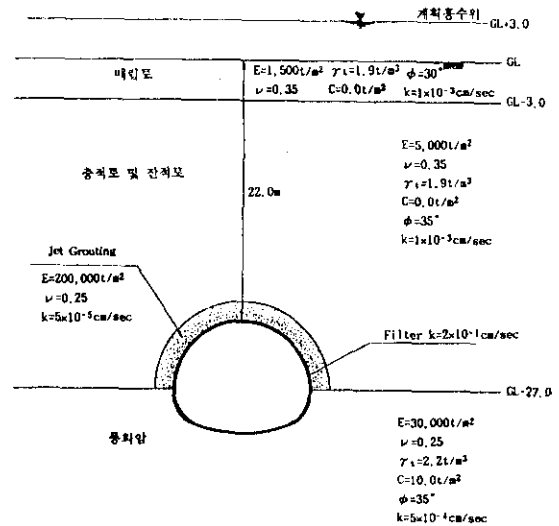


그림 3. 지반조건 (마제형 단면)

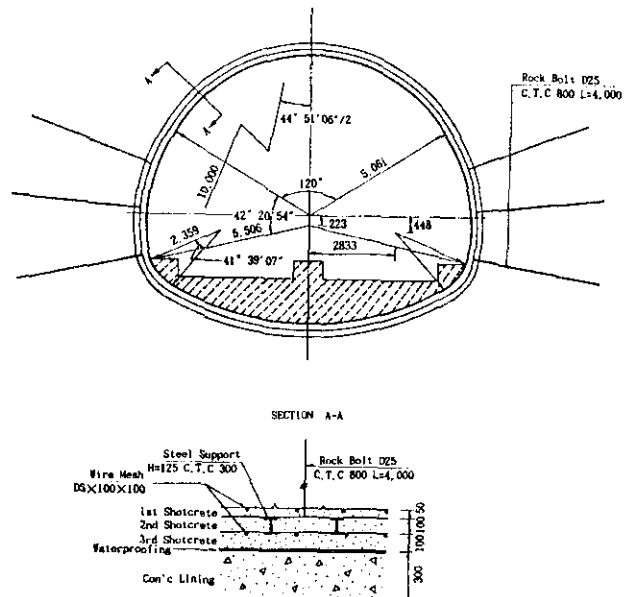


그림 4. 터널 단면도 (마제형 단면)

3.4 결과 분석 및 설계

3.4.1 원형단면

원형단면의 터널에서 지반고 및 지하수위 조건에 따라 각각 배수 조건을 달리하여 라이닝에 걸리는 하중을 비교 검토 하였다.

그림 5 ~ 그림 8에 나타난 것처럼, 배수조건에 따라 라이닝에 걸리는 하중은 큰 차이를 보인다. 수압을 고려하지 않고 지중응력을 「전응력(=유효응력)」으로 해석한 비배수계법 해석에서는 라이닝에 거의 하중이 작용하지 않으며, 지중응력을 「유효응력 + 정수압」으로 고려한 비배수 계법의 해석에는 라이닝에 상당히 큰 하중이 작용한다. 정상류 상태의 지하수 흐름을 고려한 배수계법 해석에서 라이닝에 걸리는 축응력은 동일한 비배수 조건의 10~50% 정도의 크기가 작용한다. 그림 9와 그림 10에 나타난 터널 crown 과 invert의 수직변위와 그림 11에 나타난 라이닝에 작용하는 축력 및 모멘트는 배수조건에 따라 큰 차이를 보인다. 그림 12에 지하수의 정상류 흐름시 지중의 수압분포를 나타냈다.

상기 결과에서 보인 바와 같이 지하수 저하가 크지 않은 지하수가 풍부한 배수 터널에서 수압의 영향을 고려하지 않고 라이닝을 설계하는 해석방법은 상당한 위험측의 선택임을 알 수 있다. 지하수를 고려한 터널의 합리적인 설계를 위해서는 터널의 배수 조건 뿐만아니라 지하수위 저하정도에 따라 타당한 지중응력 상태를 해석에 반영하여야 한다.

기 호	배 수 (수압=0)	기 호	배 수 (침투고려)	기 호	비배수 (정수압)
△	$H_1 = 2D$	▲	$H_1 = 2D$	▲	$H_1 = 2D$
□	$H_1 = 3D$	▣	$H_1 = 3D$	■	$H_1 = 3D$
○	$H_1 = 4D$	●	$H_1 = 4D$	●	$H_1 = 4D$

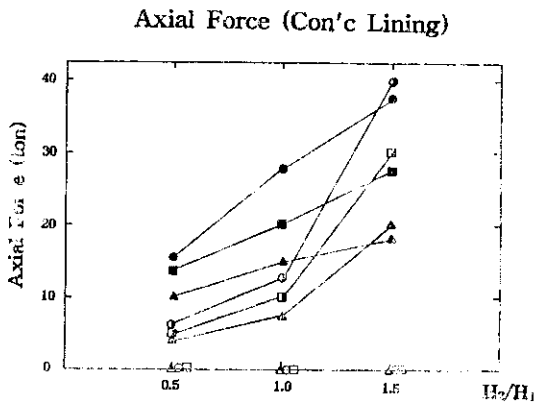


그림 5. 라이닝에 작용하는 최대축력(원형단면)

Moment (Con'c Lining)

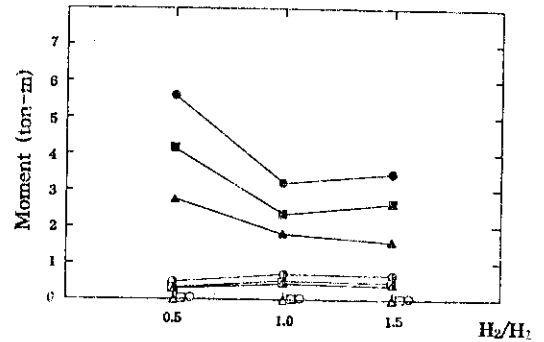


그림 6. 라이닝에 작용하는 최대모멘트(원형단면)

Shear Force (Con'c Lining)

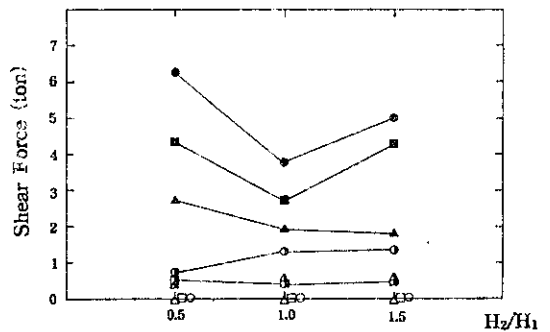


그림 7. 라이닝에 작용하는 최대전단력(원형단면)

Axial Stress (Con'c Lining)

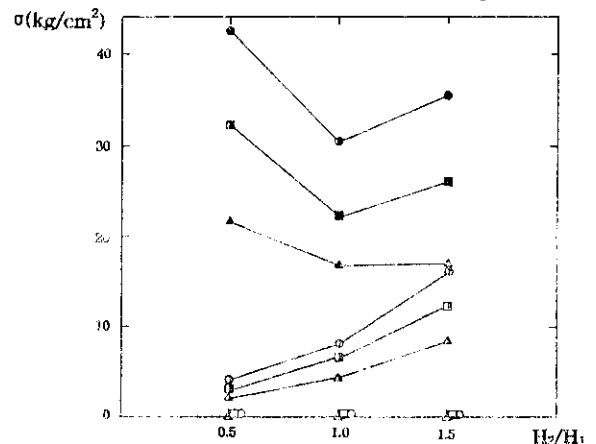


그림 8. 라이닝에 작용하는 최대축응력(원형단면)

Disp.(cm): Crown

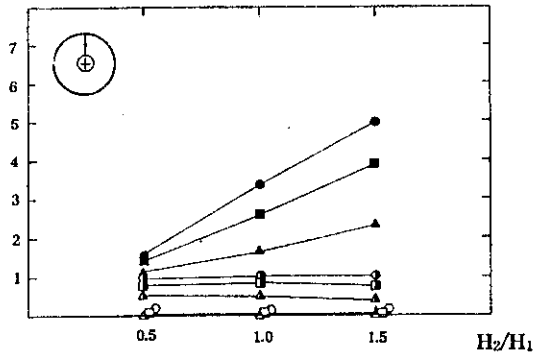


그림 9. 터널 천장부의 수직변위(원형단면)

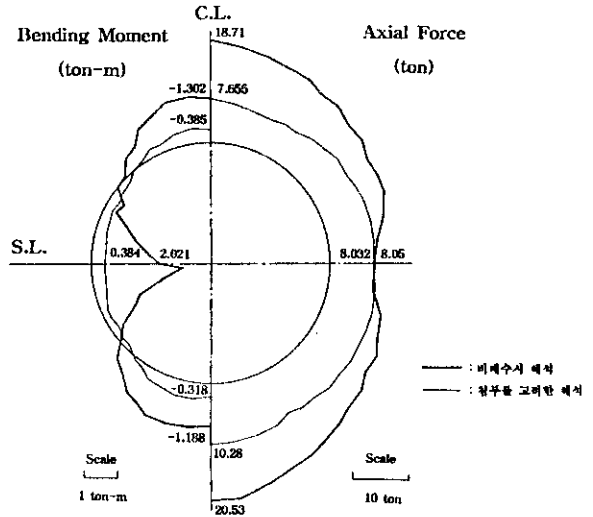


그림 11. 원형단면에서 배수조건에 따른 라이닝의 축력 및 모멘트 ($H_1 = 3D$, $H_2 = H_1$)

Disp.(cm): Invert

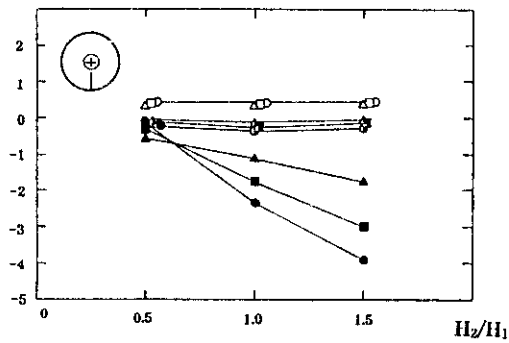


그림 10. 터널 하단부의 수직변위(원형단면)

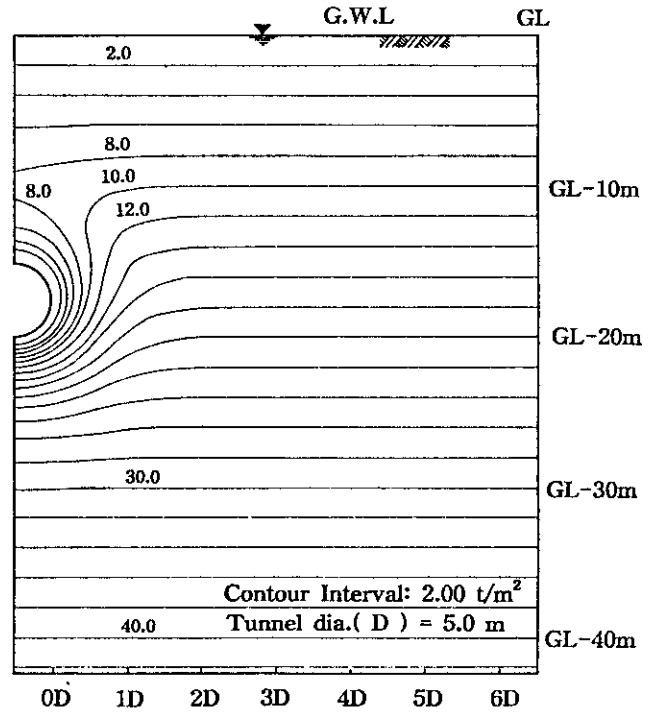


그림 12. 원형단면에서 지하수 정상류 흐름시 수압

3.4.2 마제형단면

마제형단면의 터널에서 지하수위는 계획홍수위(GL+3m)를 기준으로 하였으며, 이때 배수조건에 따라 라이닝에 작용하는 하중을 비교 검토하였다. 그림 13에서 보듯이 원형단면에서와 같이 수압을 고려하지 않은 배수개념 해석에서는 라이닝에 거의 하중이 작용하지 않으며, 계획홍수위시 비배수 개념의 해석에서는 모멘트 104 ton-m/m, 축력 216 ton/m가 라이닝에 작용한다. 계획홍수위시 정상류 상태의 지하수 흐름을 고려한 배수개념해석에서는 모멘트 47 ton-m/m, 축력 101 ton/m가 라이닝에 작용한다.

상기 결과를 토대로 침투를 고려한 배수터널과 비배수 터널에서 라이닝 단면 설계 예를 표 7에 수록 하였다. 마제형 단면은 원형단면과 비교해 볼 때, 배수조건에 따라 라이닝에 걸리는 하중의 차이가 훨씬 크므로 터널 형상이 원형이 아닐 때에는 배수조건에 따른 지하수의 합리적인 고려가 더욱 중요하다.

그림 14는 정상류 흐름시 수압을 나타내었으며, 이로부터 그라우팅으로 인한 지하수의 차수효과를 알 수 있다.

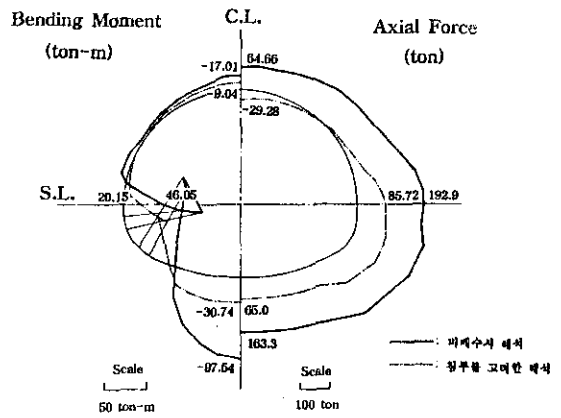


그림 13. 마제형단면에서 배수조건에 따른 라이닝의 축력 및 모멘트

표 6. 라이닝에 작용하는 최대하중(마제형단면)

배수조건	라이닝 하중	Moment (T-M/M)	Shear (Ton/M)	Axial (Ton/M)
배수	수	0.003	0.003	0.005
배수 (침투고려)		47.05	34.32	101.4
비배수		104.1	73.75	216.3

표 7. 배수조건에 따른 라이닝의 단면설계 예 (마제형단면)

해석조건	라이닝 단면설계
배수 (수압=0)	두께 : 40 cm (무근 Con'c)
배수 (침투고려)	두께 : 80 cm (D25 @ 100) 전단철근보강
비배수 (정수압)	두께 : 150 cm (D32 @ 100) 전단철근보강

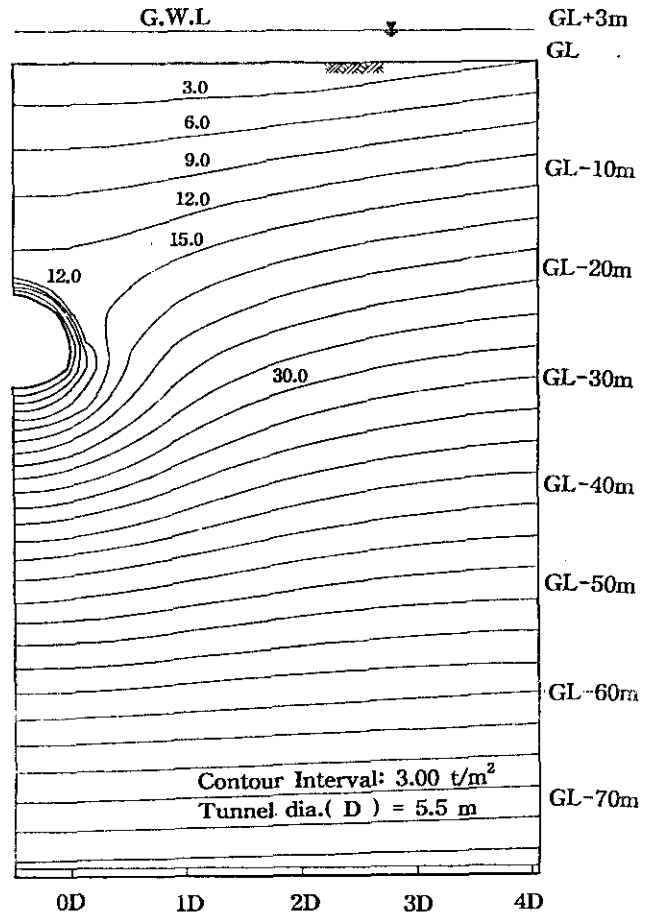


그림 14. 마제형단면에서 지하수 정상류 흐름시 수압 (그라우팅층 투수계수 = 5×10^{-5} cm/sec)

4. 결론

본 고에서는 지하수가 풍부하여 지하수위의 저하가 크지 않은 경우에 배수조건에 따른 기존의 배수, 비배수 개념과는 별도로 지하수 정상류 흐름시 침투를 고려한 배수개념을 이용한 터널해석 방법을 제시하였으며, 원형단면과 마제형단면의 예제해석을 통해 라이닝에 걸리는 하중을 비교 분석 하였다.

지하수위의 저하가 크지 않은 지반조건에서 수압을 고려하지 않은 배수 개념으로 해석하는 것은 지중용력이 해석조건과 실제상태와 큰 차이가 있다. 침투가 발생할 때의 지중용력 상태는 「유효용력과 침투수압」으로 구성되며, 이로 인해 라이닝에는 상당한 하중이 작용하므로 수압을 고려하지 않은 배수개념의 설계는 상당한 위험측의 선택이다.

그러므로 지하수위의 저하가 크지 않은 지반조건에서의 터널은 침투를 고려한 배수개념이나 점수압을 고려한 비배수 개념으로 라이닝 설계를 해야할 것으로 판단된다.

참고문헌

FLAC (1991), Manual (Ver. 3.0), Itasca Consulting Group, Inc. Minnesota, U.S.A.

Károly Szechy (1973), 'The Art of Tunnelling', Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary.

R.S. Sinha (1991), 'Underground Structures - Design and Construction', Elsevier, U.S.A.

R.B. Peck (1984), 'State of the Art : Soft Ground Tunnelling', Symposium of Tunnelling in Soil and Rock, ASCE, Georgia, U.S.A.