

침투력이 터널 막장의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구

The Effect of Seepage Forces on the Tunnel Face Stability

이 인 모^{*1} Lee, In-Mo
남 석 우^{*2} Nam, Seok-Woo
안 재 훈^{*3} Ahn, Jae-Hun

Abstract

In this study, two factors are simultaneously considered for assessing tunnel face stability: one is the effective stress acting on the tunnel face calculated by upper bound solution; and the other is the seepage force calculated by numerical analysis under the condition of steady-state groundwater flow. The seepage forces calculated by numerical analysis are compared with the results of a model test. From the results of derivations of the upper bound solution with the consideration of seepage forces acting on the tunnel face, it could be found that the minimum support pressure for the face stability is equal to the sum of effective support pressure and seepage pressure acting on the tunnel face. It could be also found that the average seepage pressure acting on the tunnel face is proportional to the hydrostatic pressure at the same elevation. The model tests performed with a tunnel model have a similar trend with the seepage calculated by numerical analysis.

요 지

본 연구에서는 하천인접구간에서와 같이 지하수가 풍부한 지반에서 시공되는 터널의 막장 안정성을 평가하기 위하여 터널 막장에 작용하는 힘의 두가지 요소를 고려하였다. 하나는 극한해석 중 upper bound solution으로부터 산출된 유효응력이며, 또 하나는 지하수의 정상류 흐름조건을 고려한 수치해석으로부터 산출된 침투력이다. 지하수가 풍부한 토사지반에서의 터널 시공시 터널 막장에 작용하는 힘을 구하기 위하여 침투력을 고려한 극한해석의 해를 구한 결과 터널 막장의 안정성을 유지하기 위한 최소 지보력은 터널 막장에 작용하는 유효응력과 침투력의 합으로 나타낼 수 있었다. 또한 터널 막장에 작용하는 평균침투압은 지하수위에 비례하여 작용하는 것으로 나타났으며, 이를 실내모형 실험 결과를 통하여 검증하였다. 지하수의 정상류 조건 하에서의 토사터널에 대한 실내모형실험 결과, 터널 막장에 작용하는 침투력은 수치해석 결과 비슷한 양상을 보여주어 제안된 이론의 타당성을 입증하였다.

Keywords : Face stability, Limit analysis, Model test, Seepage force, Upper bound solution

1. 서 론

지하수가 상존하는 지반에서 터널 굴착이 이루어질

경우, 터널 막장으로도 지하수의 침투가 발생하게 되며, 이에 따라 터널 막장에 작용하는 침투력은 막장의 안정성을 심각하게 저해하는 요인이 될 수 있다. 터널 설계

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

*2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정

*3 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 석사

시 지하수 고려방안에 대해서는 지금까지 많은 연구가 이루어져 오고 있으나 여전히 지하수 관련 문제는 터널 설계 및 시공시 어려운 부분중의 하나로 남아있다. 특히 터널 막장의 안정성은 터널 굴착시 가장 문제가 되는 부분 중의 하나이나, 그 기하학적 복잡성으로 인해 터널 지보재나 주변지반의 안정성 문제에 비해서 상대적으로 그리 많은 연구가 이루어지지 않은 상태이다. Leca와 Dormieux(1990)는 점착력이 없는 재료에 굴착되는 얇은 터널에 대한 막장의 안정성을 평가하기 위하여 한계 상태 해석개념을 적용하였으며, 그 결과 산출된 upper bound solution이 막장의 실제거동을 대표할 수 있음을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 Leca와 Dormieux(1990)에 의해 산출된 upper bound solution에 추가로 정상류 상태의 지하수 흐름에 의해 터널 막장에 작용하게 되는 침투력(seepage force)을 고려하여 터널 막장의 안정성을 수치해석 및 실내실험을 통하여 재검토하고 그 결과 정상류 상태의 지하수 조건에서 막장에 작용하는 침투력 산출 및 극한해석을 통하여 터널 막장의 안정성을 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 극한해석을 통한 막장의 지보력 산정

2.1 극한해석

Leca와 Dormieux(1990)는 사질토 지반에 굴착되는 터널 막장에 대한 안정성 문제를 극한해석을 통해 평가하였으며, 그 결과를 모형실험의 결과와 비교하였다. 그 결과, upper bound solution을 이용한 결과가 모형실험의 결과와 일치하는 경향을 나타내었다. 이에 따라 본 연구에서는, 터널 막장의 안정성 평가를 위해 제안된 upper bound theorem을 사용하였다.

터널 막장에 대한 극한해석에서는 σ_s/σ_c , σ_T/σ_c , 그리고 $\gamma D/\sigma_c$ 등 세 개의 하중계수(loading parameter)가 사용된다. 이 때, σ_s 는 지표면에 가해지는 surcharge, σ_c 는 지반의 일축압축강도, 그리고 σ_T 는 터널 내부에서 가해지는 내압이며, D 는 터널직경을 나타낸다. 제안된 upper bound solution에서는 세가지 파괴 메카니즘이 고려되며, 이들은 모두 원형단면을 가진 콘 블록의 이동 현상으로 가정되었다. 이에 따르면, 터널 막장면의 붕괴는 하나 또는 두 개의 콘 블록의 붕괴에 기인하는데, 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 터널 막장의 대표적인 붕괴 메카니즘인 두 개의 콘 블록의 붕괴 메카니즘

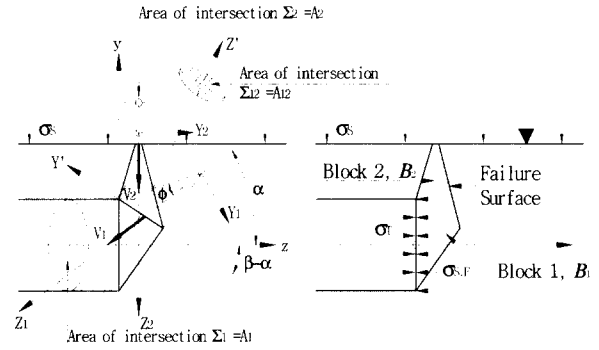


그림 1. 두 개의 콘 블록에 의한 막장붕괴 메카니즘

에 침투수압의 항을 첨가하여 침투력을 고려하였다. Upper bound theorem으로부터, 터널 막장이 안정하기 위한 조건은 식 (1)과 같다.

$$P_e \leq P_v \quad (1)$$

이 때, P_e 는 외부하중(σ_s/σ_c , σ_T/σ_c , $\gamma D/\sigma_c$)에 의한 힘을 나타내며 P_v 는 내부소산력을 나타낸다. 본 고에서는 각 항에 대한 자세한 유도과정은 생략되었다. 두 개의 콘 블록에 의한 upper bound solution의 파괴 메카니즘은 아래의 과정에 유도되었다. 먼저, 외력(P_e)의 산정과정은 다음과 같다.

$$P_e = P_T + P_s + P_r \quad (2)$$

$$P_T = \int \int_{\Sigma_1} (\sigma_T e_z) \cdot (V_1 e_z) d\Sigma \\ = -\frac{\pi D^2}{4} \sigma_T V_2 \frac{R_A}{R_c^2} \frac{\cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \quad (3)$$

$$P_s = \int \int_{\Sigma_2} (-\sigma_s e_y) \cdot (V_2 e_y) d\Sigma = \\ \frac{\pi D^2}{4} \frac{\sin^2 \phi'}{\cos^2 \phi'} \left(R_c^2 \frac{\cos^2 \phi'}{\sin \phi'} \frac{1}{\cos(\alpha + \phi')} - 2 \frac{C}{D} \right)^2 \sigma_s V_2 \quad (4)$$

$$P_r = \int \int \int_{B_1} (-\gamma e_y) \cdot (V_1 e_z) dV \\ + \int \int \int_{B_2} (-\gamma e_y) \cdot (V_2 e_z) dV \\ = \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{3} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \\ \times \left[\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_c^2} + \cos \alpha \times \frac{\cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_c \right. \\ \left. - \frac{\left(\frac{\cos^2 \phi'}{\cos(\alpha + \phi')} R_c^2 - 2 \frac{C}{D} \sin \phi' \right)^3}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right] \gamma D V_2 \quad (5)$$

이 때, B_1 과 B_2 는 막장에 형성된 두 개의 파괴블록을 나타낸 것이다. V_1 및 V_2 는 각 블록의 속도장(velocity field)에서의 속도에 대한 스칼라 양이며, e 는 아래첨자에 명기된 축에 대한 단위벡터를 의미한다. 또한 C 는 터널의 토피고이며, D 는 터널의 직경이다. 따라서, 외부 하중에 의한 힘은 다음과 같이 유도된다.

$$P_e = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\frac{R_E^2}{\cos^2(\alpha + \phi')} \sigma_s - \frac{\cos \alpha}{R_c^2} R_A \sigma_T + \left(\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_c^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_c - \frac{R_E^3}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right) \frac{\gamma D}{3} \right] V_2 \quad (6)$$

이 때,

$$R_A = \frac{\sqrt{[\cos(\alpha - \phi') \cos(\alpha + \phi')]}{\cos \phi'} \quad (7)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \phi') \cos(\alpha + \phi')}{\sin 2\phi'} \quad (8)$$

$$R_C = \frac{\cos(\alpha + \phi')}{\cos \phi'} \left[\frac{\sin(\beta - \phi')}{\sin(\beta + \phi')} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$R_D = \frac{\sin \beta}{\sin \phi' \sin(\beta + \phi')} \quad (10)$$

$$R_E = \frac{\cos^2 \phi'}{\cos(\alpha + \phi')} R_C - \frac{2C}{D} \sin \phi' \quad (11)$$

한편, 소산력의 항은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$P_v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \phi'} \frac{R_A}{R_c^2} - \frac{R_E^2}{\sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right] \times c' \cos \phi' V_2 \quad (12)$$

식(1), (6) 그리고 (12)로부터, upper bound solution은 다음과 같이 구해진다.

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T}{\sigma_c} + 1 \quad (13)$$

이 때, K_p 는 수동토압계수이며, N_s 와 N_γ 는 하중계수로써 다음의 식으로 나타내어진다.

$$N_s = \frac{1}{\cos \alpha \cos^2 \phi' \sin(\beta + \phi')} \frac{R_E^2}{R_A} \quad (14)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{3} \left[\tan \alpha R_B + \frac{\cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} \frac{R_c^3}{R_A} - \frac{1}{2 \sin \phi' \cos \alpha \cos^2 \phi'} \times \frac{\sin(\beta - \phi')}{\sin(\beta + \phi')} \frac{R_E^3}{R_A} \right] \quad (15)$$

2.2 침투력을 고려한 극한해석

터널이 지하수위 하에서 시공되어, 지하수가 터널 막장으로 유입되고 막장에 침투력이 작용할 경우에는 상기 식 (13)의 upper bound solution에 추가로 외부하중의 향으로 침투력을 고려하여야 한다. 일반적으로 터널 막장에 작용하는 침투력은 수평분력이 수직분력보다 막장의 안정성에 더 큰 영향을 미치므로, 본 고에서는 침투력의 수평분력만을 고려하였다. 따라서, 터널 막장에서의 침투압의 수평방향요소 $\sigma_{s,F}$ 는 막장지보압 σ_T 에 반대방향으로 작용하는 외력의 향으로 고려될 수 있으며 그 과정은 다음과 같다.

$$P_e = P_T + P_S + P_\gamma + P_{S,F} \quad (16)$$

$$P_{S,F} = \int \int_{\Sigma_1} (-\sigma_{s,F} e_z) \cdot (V_1 e_{z1}) d\Sigma = \sigma_{s,F} V_2 \frac{\pi D^2}{4} \frac{R_A}{R_c^2} \frac{\cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \quad (17)$$

$$P_e = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\frac{R_E^2}{\cos^2(\alpha + \phi')} \sigma_s - \frac{\cos \alpha}{R_c^2} R_A \sigma_T + \frac{\cos \alpha}{R_c^2} R_A \sigma_{s,F} + \left(\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_c^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_c - \frac{R_E^3}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right) \frac{\gamma D}{3} \right] V_2 \quad (18)$$

여기서 파괴블록의 자중에 의한 외력의 항인 P_γ 를 고려시에는 유효단위중량을 적용하여야 한다. 결과적으로, 터널 막장에서의 침투력을 고려한 upper bound solution은 다음의 식으로 도출된다.

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{s,F}}{\sigma_c} + 1 \quad (19)$$

식(13)에서 침투압 $\sigma_{s,F}$ 를 제외한 모든 parameter들은 지반의 물성치로부터 산정할 수 있다. 막장에서의 침투압을 구하기 위해서는 그림 1에 보인 바와 같이 파괴면이 먼저 설정되어야 한다. 그 후에, 수치해석을 통해

서 전수두의 분포를 구해내고, 이로부터 파괴블록 내의 수두차로부터 막장에 작용하는 침투압이 구해지게 된다.

3. 지보압의 산정

지하수위하에서 터널 굴착이 수행되는 경우, 침투수의 영향을 받아, 지중응력상태는 유효응력과 침투압의 조합으로 이루어지게 된다. 따라서, 지하수위하의 터널 설계시 침투력의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 본 고에서는 터널 막장면에 작용하는 유효응력의 경우에는 upper bound solution을 이용하고, 침투압의 경우에는 수치해석을 통한 계산법으로 산정하여, 이 결과로부터 지하수위하에서 굴착 중인 터널에 대한 막장 지보압을 평가하였다.

3.1 유효지보압

본 절에서는 앞에서 언급된 upper bound solution을 이용하여 토사터널의 막장의 안정에 필요한 지보압을 산정하였다. 해석대상지반은 사질토 지반으로서 표 1에서 보인 바와 같은 물성을 가지며, 지표로부터 깊이 C 아래에서 굴착중인 직경 D인 터널을 해석대상으로 설정하였다. 제안된 upper bound solution에 의하면 터널의 깊이비(depth ratio) C/D 값이 0.6을 넘는 경우에는 상재하중이나 토피코가 막장의 지보압과 붕괴형태에 영향을 미치지 않으며, 이것은 막장의 붕괴형태가 깊이비나 흙의 밀도에 큰 영향을 받지 않는다는 Chambon 등(1994)에 의한 원심모형실험결과와도 일치한다. 이

표 1. 해석대상지반의 물성치

지반종류	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	마찰각 (deg.)
사질토	15.2	0.0	35.0

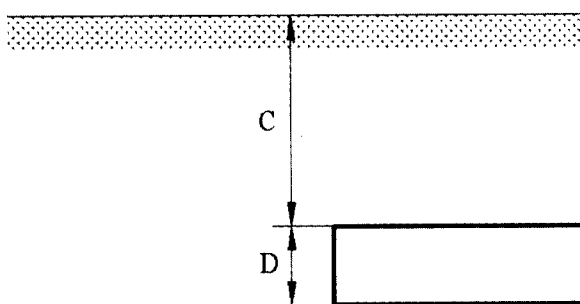


그림 2. 극한해석을 위한 해석대상지반

표 2. Upper bound solution으로부터 산정된 막장 지보압(C/D>0.6)

터널직경, D (m)	막장지보압 σ_T (kN/m ²)	
	$\gamma_d=15.2$ kN/m ³	$\gamma'=5.4$ kN/m ³
5.0	6.49	2.31

에 따라, 해석은 C/D 값이 0.6을 넘는 지반에 대하여 수행되었다. 표 2는 직경 D=5.0m인 터널에 대하여 계산된 막장의 지보압을 보인 것이다. 이때, 건조단위중량으로부터 산정된 막장의 지보압은 지하수가 존재하지 않는 조건에서의 지보압을 나타내며, 수중단위중량을 사용한 경우의 결과는 유효지보압으로서, 수치해석으로부터 산정된 침투압과 더해져 지하수가 존재하는 경우의 막장 지보압을 산정하는데 사용된다.

3.2 터널 막장에 작용하는 침투력의 산정

3.2.1 개요

강 하부를 통과하는 하저터널이나 지하수가 풍부한 지반에서 터널을 시공하는 경우, 터널 주변은 전수두 차에 의한 지하수 흐름이 발생하게 된다. 전수두차에 의한 지하수 흐름으로 인하여 흙 입자에 가해지는 힘이 침투력이며, 작용방향은 지하수 흐름의 방향과 동일하다. 이러한 경우에 침투력은 지반내 유효응력과 더불어 터널 지보재 또는 막장의 안정성에 영향을 미치는 또 하나의 요소가 된다. 흙의 단위체적 내에서 작용하는 침투력은 $i\gamma_w$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 γ_w 는 지하수의 단위중량이며, i 는 동수경사(hydraulic gradient)이다. 결과적으로 터널 굴착에 따른 막장에서의 침투력을 산정하기 위해서는 지하수 흐름 방정식으로부터 터널 주변의 전수두 분포를 산출하여야 한다. 포화된 지반에서 정상류 조건(steady-state condition)의 지하수 흐름방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (20)$$

여기서, K_x, K_y, K_z 는 각각 x, y, z 방향으로의 투수계수를 나타낸다. 지반이 등방성($K_x=K_y=K_z$)이고 균일($K(x, y, z)=\text{constant}$)한 조건을 가지는 경우, 흐름 방정식은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

주어진 방정식으로부터 침투류 해석을 수행할 수 있으며, 본 장에서는 3차원 유한요소해석을 이용한 침투류 해석으로부터 정상류 흐름에 의해 막장에 발생하는 침투력을 지하수위 별로 산정하였으며, 이를 극한해석 결과와 종합하여 정상류 상태의 지하수 조건에서 막장의 안정성을 확보하기 위한 최소지보력을 산출하였다.

3.2.2 침투류 해석 (Seepage Analysis)

정상류 상태의 지하수조건에서 막장에 작용하는 침투력을 지하수위별로 해석하기 위하여 그림 3에서 보인

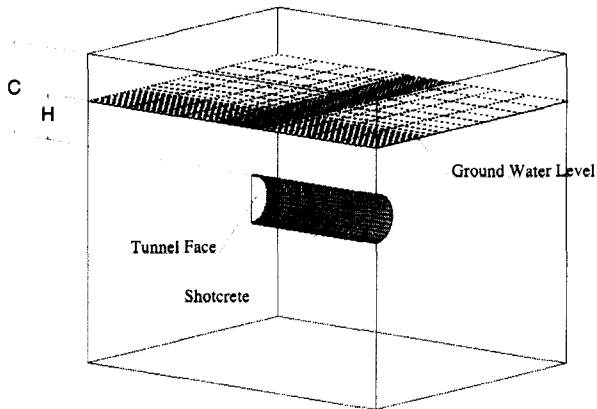


그림 3. 침투류 해석에 사용된 3차원 해석요소망

바와 같은 해석대상요소망을 설정하였다. 터널은 직경 (D) 5.0m의 원형터널을 해석대상으로 하였으며, 터널 천단으로부터 지표면까지의 길이를 C, 터널 천단부에서 지하수표면까지의 길이를 H라고 할 경우, 표 3에서 보인 바와 같이 각각의 조건변화에 따른 21가지 경우에 대해 수치해석이 수행되었으며, 이들은 음영처리된 13가지 경우를 해석하는 것으로서 대표될 수 있다. 또한 각각의 해석 경우는 터널벽면에서 배수가 허용되는 배수형 터널과 터널벽면에서 배수가 허용되지 않는 비배수형 터널의 두 가지 경우에 대하여 모두 해석이 수행되었다. 지반은 사질토로서 해석에 사용된 지반정수는 표 1에서 보인 바와 같다.

그림 4는 C/D=3.0, H/D=3.0인 배수형 터널의 경우에 대해 터널 막장에서의 파괴면 및 전수두분포를 보여주고 있다. 침투압의 산정을 위해서는, 그림에 나타난 것처럼 파괴영역을 11개로 나눈 후, 터널 중앙단면의 전수두분포로부터 파괴블럭내의 전수두차를 구한다. 이로부터 11개의 단면에 작용하는 침투압을 구한 후, 이것을 평균하여 평균침투압을 산정할 수 있다.

3.2.3 결과검토

앞에서 제시된 침투압 산정방법으로부터 H/D비의 변화에 따라 터널 막장에 작용하는 평균침투압의 값을 산

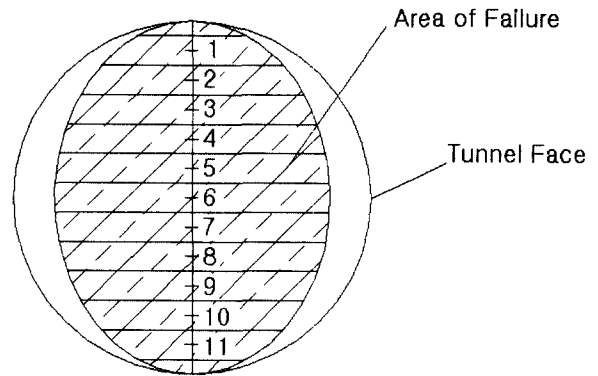
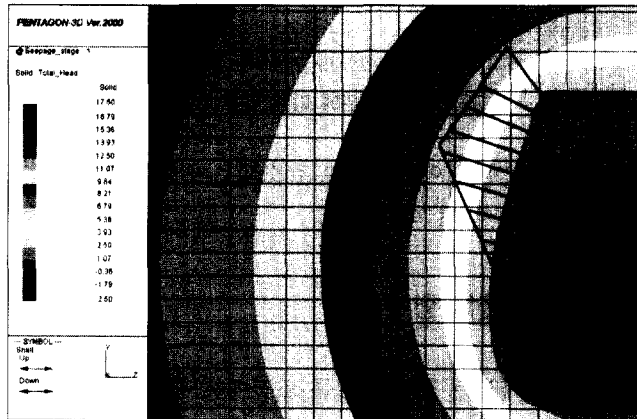


그림 4. 터널 막장에 작용하는 침투압 분포 (C/D=H/D=3.0인 경우, 배수형 터널)

표 3. 침투력 산정을 위한 수치해석 조건

		H/D						
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
C/D	2.0	Case 19	Case 20	Case 21	Case 22	Case 23	Case 24	Case 25
	3.0	Case 21	Case 22	Case 23	Case 24	Case 25	Case 26	Case 27
	4.0	Case 31	Case 32	Case 33	Case 34	Case 35	Case 36	Case 37

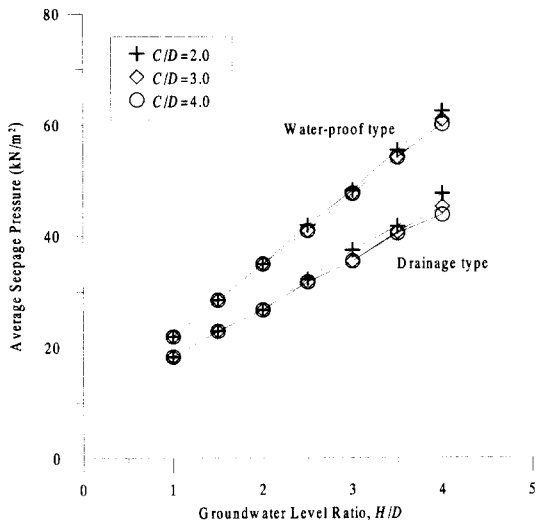


그림 5. 지하수위에 따른 평균 침투압

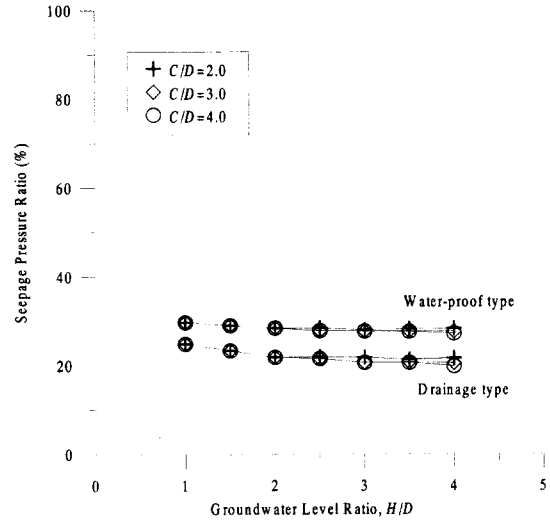


그림 6. 지하수위에 따른 침투압비

정하였으며 그림 5는 이를 정리하여 나타낸 것이다. 그림 5에 보인 바와 같이, C/D비의 변화에 따라 약간의 편차가 있지만, 대체적으로 평균침투압은 H/D비와 선형적인 관계를 갖는다. 비배수형 터널의 경우가 배수형 터널보다 큰 평균침투압을 가지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 비배수형 터널의 경우 터널 막장에서의 전수두분포가 배수형 터널의 경우보다 조밀하게 나타나기 때문이다.

평균침투압과 H/D비와의 관계가 선형적인 분포를 보이므로, 평균침투압을 동일한 지하수위에서의 정수압으로 나누면, H/D비에 따라 크게 변하지 않는 값이 되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이를 '침투압비(seepage pressure ratio)'라 정의하였으며 그림 6은 이를 지하수위에 따른 값으로 정리한 것이다. 침투압비는 지하수위가 높아짐에 따라 조금씩 줄어드는 경향을 보이나, 지하수의 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있으며, 배수형 터널의 경우 약 22%, 비배수형 터널의 경우 약 28%의 결과를 나타낸다. 그림 5의 평균 침투압의 산출결과에 표 2에 나타난 $\gamma' = 5.4 \text{ kN/m}^3$ 인 경우의 유효지보압을 더하게 되면, 지하수가 존재하는 경우의 막장에서의 총지보압이 산정된다. 그림 7에 지하수가 존재하는 경우의 총지보압과 지하수위와의 관계가 지하수가 존재하지 않는 경우의 지보압과 함께 도시되어 있다. 그림에 보인 바와 같이, 배수형 터널의 경우 H/D=1.0일 때, 막장 지보압은 지하수위가 없을 때의 3배, H/D=4.0일 때는 8배에 이르며, 비배수형 터널의 경우에는 각각의 경우에 4배, 10배에 이른다. 본 결과로부터, 지하수가 시공중인 터널의 막장에 미치는 영향은 대단히 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 굴착에 따른 유효

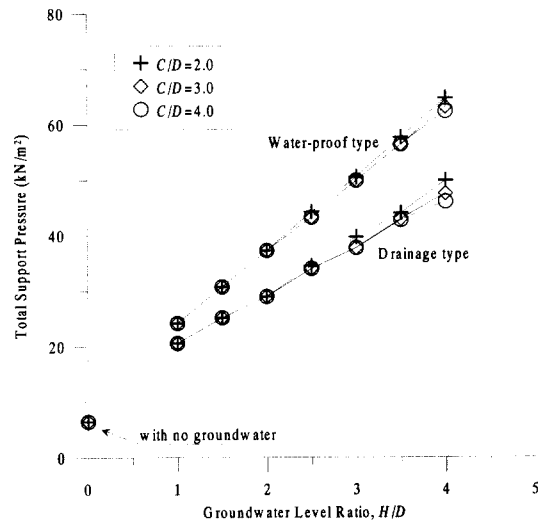


그림 7. 지하수위에 따른 막장 지보압

응력의 영향은 아칭효과로 감소되는 반면, 침투력의 영향은 줄지 않기 때문이다.

4. 터널모형실험

본 장에서는 정상류 흐름 조건에서 침투력이 터널 라이닝 및 막장에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고 이를 기 실시한 수치해석 결과와 비교 및 검토하기 위하여 터널모형실험을 실시하여 그 결과를 제시하였다.

4.1 실험장치

모형터널은 직경 10.0cm의 원형 반단면으로 제작되었다. 그림에 보인 바와 같이, 터널의 몸체는 두께 5mm

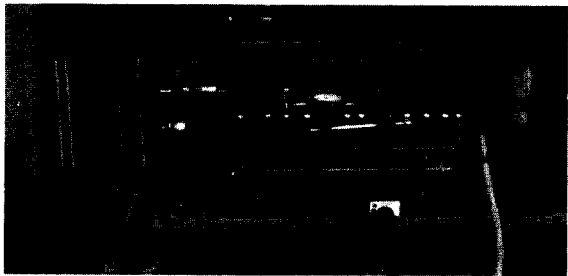
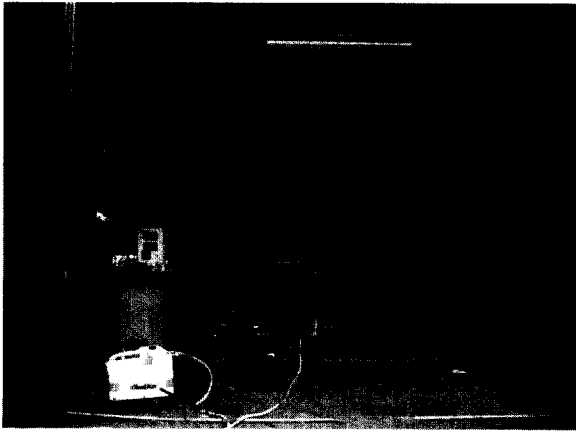
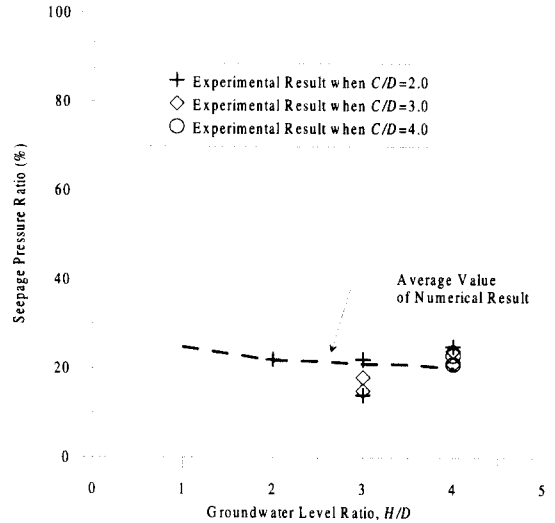


사진 1. 터널모형 실험장치

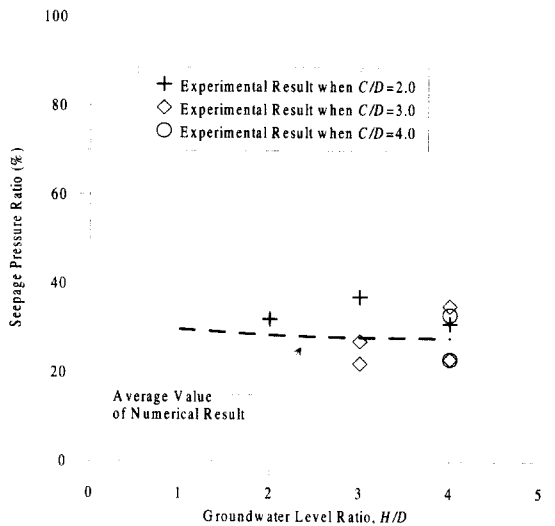
의 아크릴판과 50번체로 구성되어있으며, 체과 아크릴 판 사이에는 지하수의 원만한 배수를 위하여 빈 공간을 두었다. 배수형 터널을 모사하는 경우에는 벽면에 부착된 마개를 제거하여 벽면으로의 배수가 가능하고 하고, 비배수형 터널을 모사하는 경우에는 마개를 막아서 배수를 막는다. 터널 막장면의 경우도 마찬가지로 아크릴 판과 50번체로 구성되어있다. 체를 통해서 터널 막장으로 유입된 침투수는 배면에 연결된 호스를 통해서 배수가 가능하게하고, 호스의 개폐를 통해서 정수압 상태와 침투압 상태를 모사할 수 있다. 호스의 끝에는 펌프를 설치하여 충분한 통수능을 구현하도록 했다. 또한, 물의 배수가 막장면의 체를 통해서만 이루어지고, 막장면과 벽면이 만나는 곳의 틈새로 물이 침투하지 못하도록, 그 틈새에는 얇은 고무막이 설치되어있다. 막장의 뒷면에는 로드셀이 부착되어있으며, 이것으로부터 막장에 걸리는 압력이 측정되고, 로드셀은 다시 bar를 통해서 구동장치와 연결되어 막장의 수평변형에 따른 파괴를 유도할 수 있도록 설계되었다. 토조의 재질 역시 아크릴판이며, 토조 내 지반조성 및 포화시 수압에 의한 변형이 없도록 충분한 두께($t=30\text{mm}$)를 확보하였다. 토조의 크기는 순공간 $500\text{mm} \times 850\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 으로 터널 굴착 및 지하수 흐름에 의한 영향이 토조 경계에 미치지 않도록 충분한 여유를 확보하였다.

표 4. 침투압 산정을 위한 모형실험 조건

		H/D		
		2.0	3.0	4.0
C/D	2.0	Case 13	Case 15	Case 17
	3.0	Case 23	Case 25	Case 27
	4.0	Case 33	Case 35	Case 37



(a) 배수형 터널의 경우



(b) 비배수형 터널의 경우

그림 8. 모형실험에 의해 산정된 침투압비

4.2 실험결과와 정리 및 검토

모형실험은 토조내에 주어진 토피고와 지하수위를 조성한 후, 정수압과 침투압이 구현된 상태에서 각각의 경우에 로드셀에 지시되는 값을 측정하는 것으로 이루어

어진다. 이 두 값으로부터 침투압이 계산된다. 실험은 표 4에 나타난 것처럼 음영처리된 6가지 경우에 대하여 해석이 수행되었으며, 수치해석의 경우와 같이 배수형 터널과 비배수형 터널의 두 가지 경우에 대하여 모두 해석되었다.

모형실험으로부터 산정된 침투압비의 결과가 수치해석결과와 함께 그림 8에 도시되어있다. 그림 8(a)에 나타난 배수형 터널의 결과의 경우, 모형실험의 결과는 수치해석의 결과와 상당히 유사한 경향을 보인다. 따라서, 수치해석을 통한 침투압의 산정이 합리적인 결과를 도출해낸다는 사실을 유추할 수 있다. 그림 8(b)에 제시된 비배수형 터널의 실험결과와 경우에도 산정된 침투압의 값이 수치해석의 결과와 유사한 경향을 나타내기는 하지만, 몇몇의 과도하게 큰 값들 때문에 배수형 터널의 경우보다 다소 큰 편차를 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 막장으로 유입되는 유량이 지나치게 많아서 생기는 잔류수압의 영향이 일부분적으로 작용한 것으로 판단된다. 이러한 사실은, 터널내부로 유입되는 침투수의 배수처리가 원활하지 못할 경우, 침투력 뿐만 아니라 경우에 따라서는 잔류수압도 작용할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

지하수의 정상류 흐름조건에서 터널 막장에는 외력으로서 유효응력과 아울러 침투력이 작용하게 된다. 본 연구에서는 극한해석 중 upper bound solution을 이용하여 터널 막장에 작용하는 유효응력을 산출하였으며, 이와 더불어 수치해석을 실시하여 터널 막장에 작용하는 평균침투압을 산출하였다. 따라서 사질지반에서 정상류 상태의 지하수 조건 하에서 시공되는 터널의 막장 안정성을 확보하기 위한 최소 지보력을 산출할 수 있었다. 또한 실내모형실험을 통하여 지하수의 정상류 흐름조건에서 터널 주변에 작용하는 침투력을 측정하였으며, 이는 수치해석 결과와 비교되었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 정상류 조건의 지하수위 하에서 터널굴착이 이루어질 경우 터널 막장은 굴착에 따른 유효이완토압에 추가로 지하수 흐름에 따른 침투압이 작용하게 된다.
- (2) 터널 굴착시 터널 막장에서 발생하는 침투류는 막장의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이것은 유효하중의 영향은 아칭효과로 감소되는 반면, 침투력의 영향은 줄지 않기 때문이다.
- (3) 터널 막장에 작용하는 침투압은, 배수형 터널의 경우에 동일한 지하수위일 때의 정수압의 22%, 비배수형 터널일 경우에는 정수압의 28%에 이른다. 또한, 터널 내부로의 배수가 원활하게 이루어지지 않을 경우, 잔류수압의 발생으로 더 큰 지보압이 요구될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2000-041-E00592), 이의 지원에 감사드립니다. 또한 본 연구는 첫번째 저자가 고려대학교로부터 2001년도 연구년을 부여받아 집중적으로 연구할 수 있었으므로 고려대학교에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Broms, B. B. and Bennermark, H. (1967), "Stability of clay at vertical openings", J. Soil Mech. Fndn Div., ASCE, Vol.93, No.SM1, pp.71~94.
2. Chambon, P., Corte, J.-F. and Garnier J. (1991), "Face stability of shallow tunnels in granular soils", Proc., Int. Conf. Centrifuge 1991, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.99~106.
3. Chambon, P. and Corte, J.-F. (1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil : Stability of tunnel face", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.120, No.7, pp.1148~1165.
4. Leca, E. and Dormieux, L. (1990), "Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material", Geotechnique, London, England, 40(4), pp.581~606.

(접수일자 2001. 7. 26)