

침투력이 터널 막장의 안정성에 미치는 영향 연구

- 모형실험을 중심으로 -

Effect of Seepage Forces on the Tunnel Face Stability

- Assessing through Model Tests -

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 안재훈²⁾, Jae-Hun Ahn, 남석우³⁾, Seok-Woo Nam,

¹⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사수료, M.A., Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

SYNOPSIS : 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. Also it could be found that the average seepage pressure acting on the tunnel face is proportional to the hydrostatic pressure at the same elevation and the magnitude is about 22% of the hydrostatic pressure for the drainage type tunnel and about 28% for the water-proof type tunnel. The model tests performed with a tunnel model had a similar trend with the seepage pressure calculated by numerical analysis. From the model tests it could be also found that the collapse at the tunnel face occurs suddenly and leads to unlimited displacement.

Key words : upper bound solution, face stability, seepage force, model test

1. 서론

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. 점성토 지반에 굴착되는 터널의 막장에 대한 안정성 문제가 Broms와 Bennermark(1967)에 의해 평가되어 온 이래로 몇몇 학자들에 의해 터널 막장의 안정성에 대한 연구가 있었으며, 최근에 Leca와 Dormieux(1990)에 의해 극한해석을 통한 막장의 안정성에 대한 체계적인 연구가 수행되었다. 그들은 점착력이 없는 재료에 굴착되는 얇은 터널에 대한 막장의 안정성을 평가하기 위하여 한계상태 해석개념을 적용하였으며, 그 결과 산출된 upper bound solution이 막장의 실제거동을 대표할 수 있음을 보였다. 또한, 터널이 지하 수위 아래에서 굴착되는 경우에, 지하수는 시공중 터널 막장을 통해 침투하게 되며, 이에 따라 터널 막장에 작용하는 침투력은 막장의 안정성을 심각하게 저해하는 요인이 된다. 터널 설계시 지하수 고려방안에 대해서는 지금까지 많은 연구가 이루어져 오고 있으나 여전히 지하수 관련 문제는 터널 설계 및 시공시 어려운 부분중의 하나로 남아있다. 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 평가하는 기법을 제시하고 이를 실내모형실험을 통하여 비교 및 검토하고자 한다.

2. 극한해석을 통한 막장의 지보력 산정

2.1 침투력을 고려한 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 loading parameter가 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 콘모양의 solid block의 이동현상으로 가정되었다. 이에 따르면, 터널 막장면의 붕괴는 하나 혹은 두 개의 conical block의 붕괴에 기인하는데, 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 터널 막장의 대표적인 붕괴 메카니즘인 두 개의 콘 블록의 붕괴 메카니즘에 침투수압의 항을 첨가하여 침투력을 고려하였다.

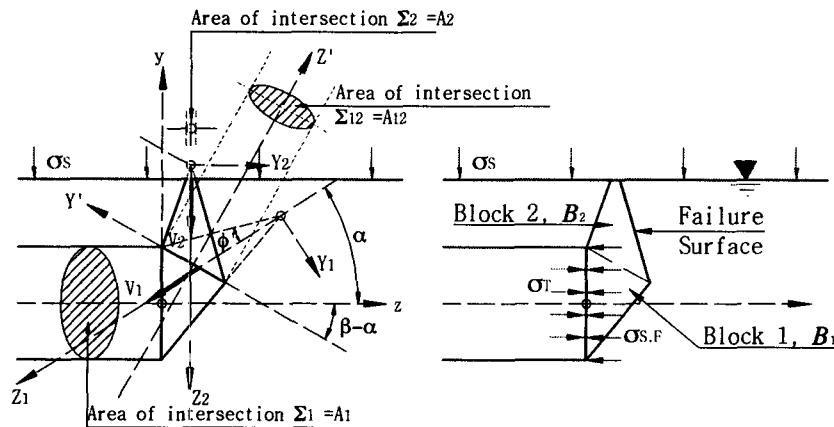


그림 1. 두 개의 콘 블록에 의한 막장붕괴 메커니즘

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 생략하기로 하며, 결론적으로 두 개의 콘 블록에 의한 upper bound solution은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T}{\sigma_c} + 1 \quad (2)$$

이 때, N_s 와 N_γ 는 하중계수로서 기초지반의 지지력 산출시 적용되는 지지력계수와 거의 유사한 의미를 지니고 있다. 식(2)에 나타난 upper bound solution은 지하수가 존재하지 않는 경우 혹은 지하수 흐름을 고려하지 않은 경우의 터널에 한해 적용되는 식이다. 따라서, 터널이 지하수위 하에서 시공되어, 지하수가 터널 막장으로 유입되고 막장에 침투력이 작용할 경우에는 이를 고려한 upper bound solution이 요구된다. 이에 따라, 본 고에서는 정상류 상태에서 터널 막장에 작용하는 침투력을 upper bound solution

에 적용하였다. 일반적으로 터널 막장에서 침투력의 수평분력이 수직분력보다 안정성에 더 큰 영향을 미치므로, 본 고에서는 침투력의 수평분력만을 고려하였다. 따라서, 터널 막장에서의 침투압의 수평방향 요소 $\sigma_{s,F}$ 는 막장지보압 σ_T 에 반대방향으로 작용하는 외력의 향으로 고려될 수 있으며 결론적으로 터널 막장에서의 침투력을 고려한 upper bound solution은 다음의 식으로 도출된다.

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_r (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{s,F}}{\sigma_c} + 1 \quad (3)$$

식(3)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, 수치 해석을 통해서 전수두의 분포를 구해내고, 이로부터 파괴블록 내의 수두차로부터 막장에 작용하는 침투압이 구해지게 된다.

2.2 유효지보압

본 절에서는 앞 절에서 언급된 upper bound solution을 이용하여 토사터널의 막장의 안정에 필요한 지보압을 산정하였다. 해석대상지반은 사질토 지반으로서 다음의 표 1에서 보인 바와 같은 물성을 갖는다.

표 1. 해석대상지반의 물성치

지반종류	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kN/m^2)	마찰각 (deg.)	탄성계수 (kN/m^2)	포아슨비	비고
사질토	15.2	0.0	35.0	9,800	0.30	

그림 2에 나타난 것처럼, 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 토피고가 막장의 지보압과 붕괴형태에 영향을 미치지 않으며, 이것은 막장의 붕괴형태가 깊이비나 흙의 밀도에 큰 영향을 받지 않는다는 Chambon 등(1994)에 의한 원심모형실험결과와도 일치한다. 이에 따라, 해석은 C/D 값이 0.6을 넘는 지반에 대하여 수행되었다.

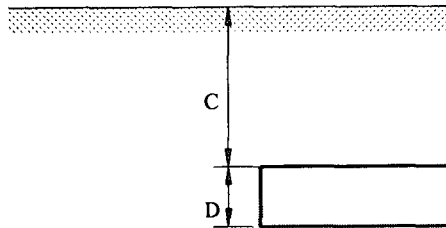


그림 2. 극한해석을 위한 해석대상지반

직경 $D=5.0\text{m}$ 인 터널에 대하여 계산된 막장의 지보압이 표 2에 나타나있다. 이 때, 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.

표 2. Upper bound solution으로부터 산정된 막장 지보압

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

3. 터널 막장에 작용하는 침투력

3.1 침투해석 (Seepage Analysis)

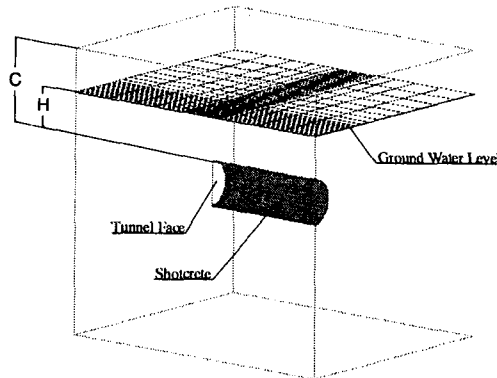


그림 3. 침투해석에 사용된 3차원 해석요소망

정상류 상태의 지하수조건에서 막장에 작용하는 침투력을 지하수위별로 해석하기 위하여 그림 3에서 보인 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 방수형 터널의 두 가지 경우에 대하여 모두 해석이 수행되었다. 지반은 사질토로서 해석에 사용된 지반정수는 표 1에서 보인 바와 같다.

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 11	Case 12	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16	Case 17
	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 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.

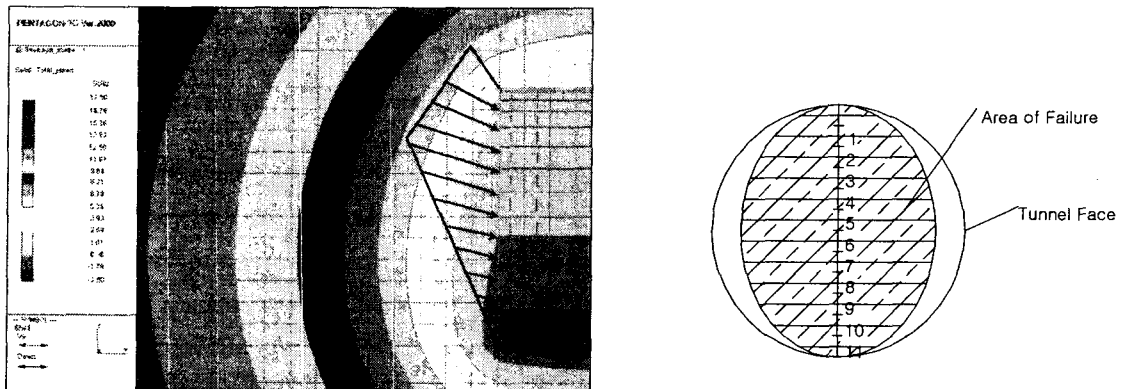


그림 4. 터널 막장에 작용하는 침투압 분포 (C/D=H/D=3.0인 경우, 배수형 터널)

3.2 결과검토

앞에서 제시된 침투압 산정방법으로부터 H/D비의 변화에 따라 터널 막장에 작용하는 평균침투압의 값을 산정하였으며 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. 방수형 터널의 경우가 배수형 터널보다 큰 평균침투압을 가지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 방수형 터널의 경우 터널 막장에서의 전수두분포가 배수형 터널의 경우보다 조밀하게 나타나기 때문이다. 평균침투압과 H/D비의 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%, 방수형 터널의 경우 약 28%의 결과를 나타낸다.

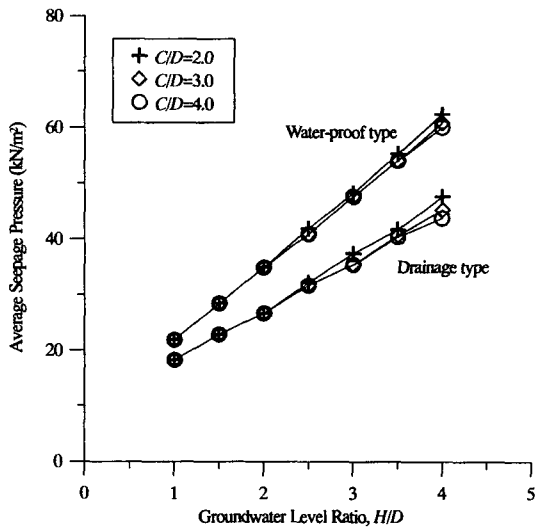


그림 5. 지하수위에 따른 평균 침투압

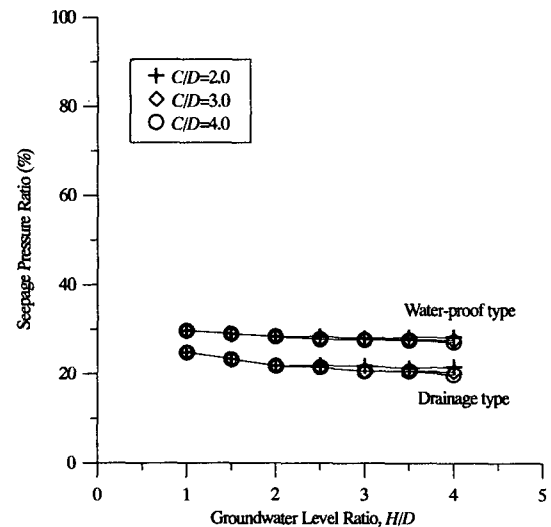


그림 6. 지하수위에 따른 침투압비

3.3 침투력을 고려한 막장의 지보력 산출

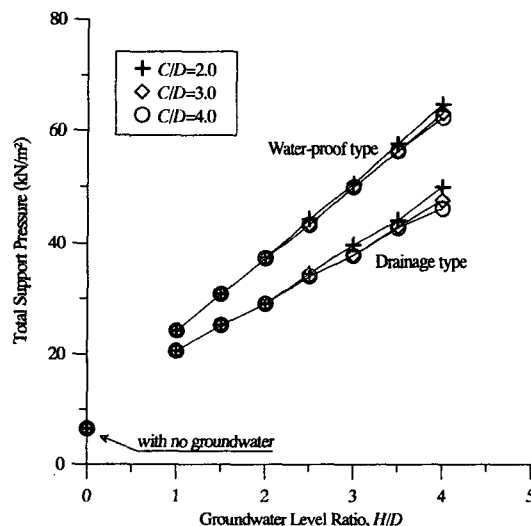


그림 7. 지하수위에 따른 막장 지보압

그림 5의 평균침투압의 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 총지

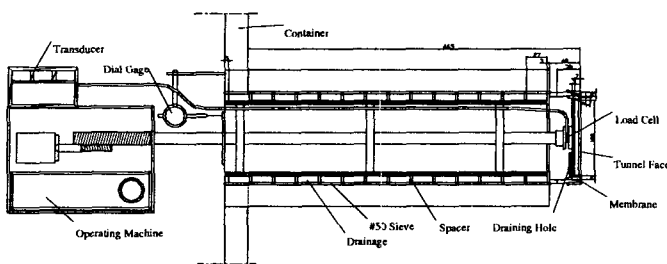
보압과 지하수위의 관계가 지하수가 존재하지 않는 경우의 지보압과 함께 도시되어있다. 그림에 보인 바와 같이, 배수형 터널의 경우 $H/D=1.0$ 일 때, 막장 지보압은 지하수위가 없을 때의 3배, $H/D=4.0$ 일 때는 8배에 이르며, 방수형 터널의 경우에는 각각의 경우에 4배, 10배에 이른다. 본 결과로부터, 지하수가 시공중인 터널의 막장에 미치는 영향은 대단히 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 굴착에 따른 유효응력의 영향은 아칭효과로 감소되는 반면, 침투력의 영향은 줄지 않기 때문이다.

4. 터널모형실험

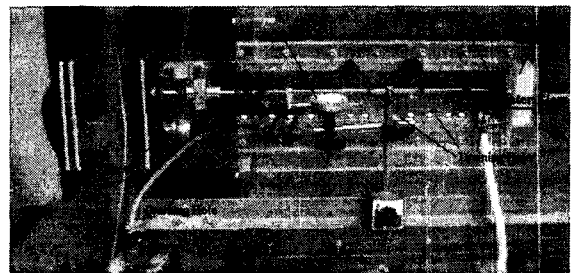
본 장에서는 정상류 흐름 조건에서 침투력이 터널 라이닝 및 막장에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고 이를 기 실시한 수치해석 결과와 비교 및 검토하기 위하여 터널모형실험을 실시하여 그 결과를 제시하였다.

4.1 실험장치

모형터널은 직경 10.0cm의 원형 반단면으로 제작되었다. 모형터널의 상세도가 그림 8에 제시되어있다. 그림에 보인 바와 같이, 터널의 몸체는 두께 5mm의 아크릴판과 50번체로 구성되어있으며, 체과 아크릴 판 사이에는 지하수의 원만한 배수를 위하여 빈 공간을 두었다. 배수형 터널을 모사하는 경우에는 벽면에 부착된 막개를 제거하여 벽면으로의 배수가 가능하고 하고, 방수형 터널을 모사하는 경우에는 막개를 막아서 배수를 막는다. 터널 막장면의 경우도 마찬가지로 아크릴판과 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.



(a)



(b)

그림 8. 모형터널

4.2 실험결과의 정리 및 검토

모형실험은 토조내에 주어진 토피고와 지하수위를 조성한 후, 정수압과 침투압이 구현된 상태에서 각각의 경우에 로드셀에 지시되는 값을 측정하는 것으로 이루어진다. 이 두 값으로부터 침투압이 계산된다. 실험은 표 4에 나타난 것처럼 음영처리된 6가지 경우에 대하여 해석이 수행되었으며, 수치해석의 경우와 같이 배수형 터널과 방수형 터널의 두 가지 경우에 대하여 모두 해석되었다.

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

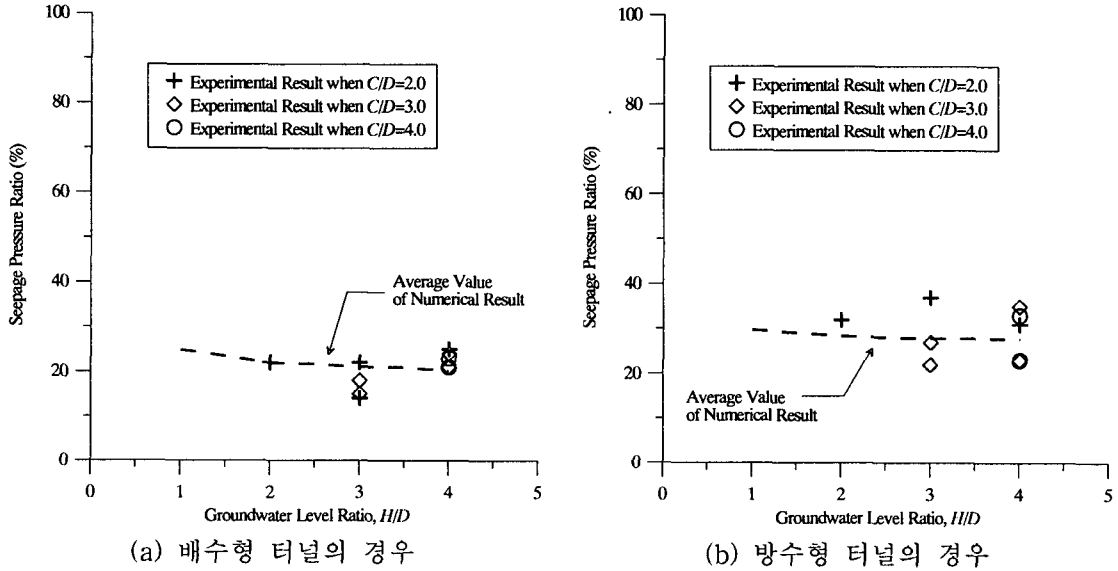


그림 9. 모형실험에 의해 산정된 침투압비

모형실험으로부터 산정된 침투압비의 결과가 수치해석결과와 함께 그림 9에 도시되어있다. 그림 9(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. 반면, 그림 9(b)에 제시된 방수형 터널의 실험결과와 비교하여, 산정된 침투압의 값이 수치해석의 결과와 유사한 경향을 나타내기는 하지만, 몇몇의 과도하게 큰 값들 때문에 배수형 터널의 경우보다 심한 편차를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 막장으로 유입되는 유량이 지나치게 많아서 생기는 잔류수압의 영향으로 판단되며 이러한 사실은 터널내부로 유입되는 침투수의 배수처리가 원활하지 못할 경우, 침투력 뿐만 아니라 경우에 따라서는 잔류수압도 작용할 수 있음을 보여준다.

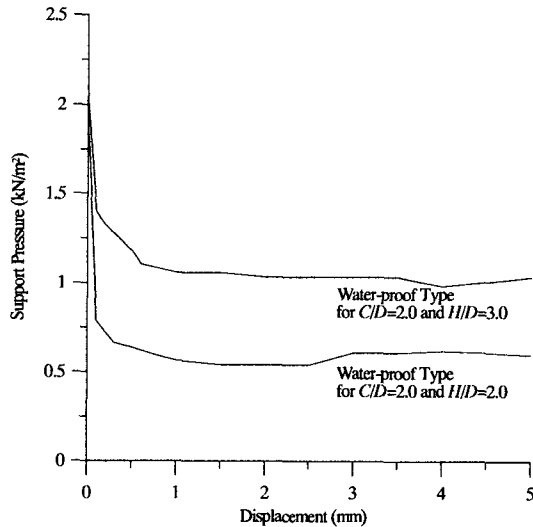


그림 10. 막장변위에 따른 지보압의 변화

막장에 연결된 구동장치를 통해서 막장붕괴의 과정이 모사되었으며, 그림 10은 막장의 변위에 따른 지보압을 변화값을 보여준다. 막장변형 초기에는, 소량의 변형에 의해 지보압이 갑작스럽게 떨어지는 현상을 볼 수 있으며, 터널직경에 1%에 해당하는 1mm의 변위에 이르면 지보압이 더 이상 떨어지지 않고 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 상태의 지보압을 최소지보압이라고 하며, 막장에서 최소지보압으로 막장을 유지시키면 경제적인 시공이 가능하다.

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 최소지보압을 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. 터널 굴착시 터널 막장에서 발생하는 침투류는 막장의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이것은 유효하중의 영향은 아칭효과로 감소되는 반면, 침투력의 영향은 줄지 않기 때문이다. 지하수위가 터널위로 터널직경만큼 위에 존재할 경우, 배수형 터널의 경우 지하수가 존재하지 않는 때의 약 3배, 방수형 터널의 경우는 약 4배의 막장 지보압이 요구된다.
2. 막장에 작용하는 침투압은, 배수형 터널의 경우에 동일한 지하수위일 때의 정수압의 22%, 방수형 터널일 경우에는 정수압의 28%에 이른다. 또한, 터널내부로의 배수가 원활하게 이루어지지 않을 경우, 잔류수압의 발생으로 더 큰 지보압이 요구될 수 있다.
3. 터널 막장면의 붕괴는 갑작스럽게 이루어지며, 일정 변형량이상이면 지보압이 특정한 값으로 수렴하게 되는데, 이것이 막장의 안정성을 확보하는데 필요한 최소지보압이다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2000-041-E00592), 이의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

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.