

침투력을 고려한 토사터널 막장의 안정성 평가방법에 대한 고찰 Evaluation of Tunnel Face Stability with the Consideration of Seepage Forces

남석우¹⁾, Seok-Woo Nam, 이인모²⁾, In-Mo Lee

¹⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

SYNOPSIS : Since Broms and Bennermark(1967) suggested the face stability criterion based on laboratory extrusion tests and field observations, the face stability of a tunnel driven in cohesive material has been studied by several authors. And recently, more general solution for the tunnel front is given by Leca and Panet(1988). They adopted a limit state design concept to evaluate the face stability of a shallow tunnel driven into cohesionless material and showed that the calculated upper bound solution represented the actual behavior reasonably well.

In this study, two factors are simultaneously considered for assessing tunnel face stability: One is the effective stress acting on the tunnel front calculated by upper bound solution; and the other is the seepage force calculated by numerical analysis under the condition of steady state ground water flow. The model tests were performed to evaluate the seepage force acting on the tunnel front and these results were compared with results of numerical analysis. Consequently, the methodology to evaluate the stability of a tunnel face including limit analysis and seepage analysis is suggested under the condition of steady state ground water flow.

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

1. 서론

터널 설계시 지하수 고려방안에 대해서는 지금까지 많은 연구가 이루어져 오고 있으며, 터널 설계 및 시공시 가장 어려운 부분중의 하나가 지하수 관련문제이다. 터널 막장은 터널의 시공중 안정성에 가장 문제가 되는 부분 중의 하나이나, 터널 지보재나 주변지반의 안정성 문제에 비해 상대적으로 그리 많은 연구가 이루어지지 않은 상태이다. 그 이유는 터널 막장의 안정성에 관한 문제는 터널 지보재의 안정성 문제와는 달리 3차원적 요인이 매우 큰 비중을 차지하기 때문에 해석적 혹은 실험적 접근이 매우 어렵기 때문이다. 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 Panet(1988)에 의해 극한해석을 통한 막장의 안정성에 대한 체계적인 연구 및 실험이 실시되었다. 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. 본 연구에서는 상기 연구결과에서 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 작용하

는 침투력 산출 및 극한해석을 통하여 터널 막장의 안정성을 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 극한해석을 통한 막장의 지보력 산출

2.1 극한해석

극한해석의 목적은 재료의 성질에 따른 거동과 관계없이 어떤 물리적 체계의 안정성을 평가하는 것이다. 이 체계의 안정조건은 파괴를 유발하지 않고 가해질 수 있는 하중의 향으로 유도될 수 있다. Upper bound에서 이러한 하중은 어떤 체계 밖에서 가해지는 외력(P_e)이 체계 내부에서 변위와 더불어 소산되는 소산력(P_v)보다 클 때를 파괴하중으로 보고 산출할 수 있다(upper bound theorem). 반면에 응력계(stress field)에서 평형조건(equilibrium)과 재료의 항복규준을 만족하는 일련의 하중조합(lower bound solution)을 찾을 수 있다(lower bound theorem). 안정성은 supported load의 영역 K 에서 규정되어질 수 있는데 K 는 lower bound domain K^- 와 upper bound domain K^+ 에 둘러싸여 있다. 그림 1은 두 개의 하중 조합 Q_1 과 Q_2 가 가해진 체계를 보여주고 있다.

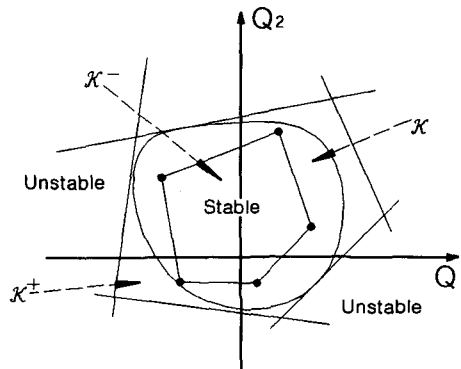


그림 1. 하중조합 Q_1 및 Q_2 에 의한 역계

터널 막장에 대한 극한해석에서는 σ_s/σ_c , σ_T/σ_c , 그리고 $\gamma D/\sigma_c$ 등 세 개의 loading parameter가 필요하다. 여기서 σ_s 는 지표면에 가해지는 surcharge, σ_c 는 지반의 일축압축강도, 그리고 σ_T 는 터널 내부에서 가해지는 내압이며, D 는 터널직경이다. 토사지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준에 의해 제어되므로 붕괴 메카니즘은 그림 2에서 보인 바와 같은 임의의 파괴면(Σ_d)을 따라 성립하며, 여기서 discontinuity velocity(V_d)와 Σ_d 사이의 각(θ_d)은 다음의 조건을 만족한다.

$$\phi' \leq \theta_d \leq \pi - \phi' \quad (1)$$

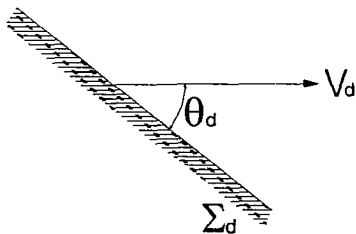


그림 2. 파괴면을 따른 블록의 속도벡터

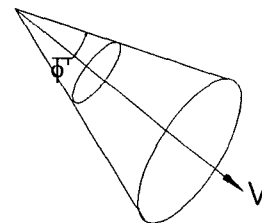


그림 3. 콘 블록의 kinematic condition

Upper bound solution에서는 세가지 파괴 메카니즘이 고려되며 이들은 모두 원형단면을 가진 콘모양의 solid block이 이동한다고 가정한다. 그림 3에서 보인 바와 같이 콘의 개각(開角)은 $2\phi'$ 이고 속도벡터의 방향은 콘의 축과 평행하다. 따라서 식 (1)의 조건은 움직이는 block과 남아있는 지반 간의 면(파괴면)을 따라서 만족하게 된다. 그림 4는 토사터널에 대한 막장의 대표적인 붕괴 메카니즘을 보이고 있다. 터널 막장면의 붕괴는 하나 혹은 두 개의 conical block의 붕괴에 기인하는데 본 연구에서는 보다 대표적인 붕괴 메카니즘인 두 개의 콘 블록의 붕괴에 대해서 다루기로 한다.

그림 4에서 보인 붕괴기전에서 첫 번째 콘(block 1)은 터널의 대칭면에 직각인 π -plane에 의해 잘리며 잘린면은 그림 4에서 Δ 로 나타난다. 두 번째 콘(block 2)은 plane π' 에 대한 첫 번째 콘의 mirror image이며, 여기서 plane π' 은 plane π 에 직각이고 plane π 와 block 1이 이루는 면(Σ_{12})의 중심을 지나는 면으로 그림 4에서 Δ' 으로 투영된다. 이로부터 plane π 는 두 block과 모두 같은 타원형의 면(Σ_{12})으로 만남을 알 수 있다. Plane π 는 두 번째 콘의 축이 수직이므로 구할 수 있다. 따라서 상기 붕괴기전은 단지 하나의 parameter, α (터널에 인접한 콘의 축과 터널 축의 교각)에 의해 특징지어질 수 있다. 여기서 주지할 사실은 터널과 인접한 콘과의 교차면은 그림 4에서 보인 바와 같이 타원이며(Σ_{01}), 본 타원의 주축의 반경은 $D/2$ 이라는 것이다. 이는 터널 막장의 붕괴는 막장의 일부가 떨어져 나옴을 의미한다.

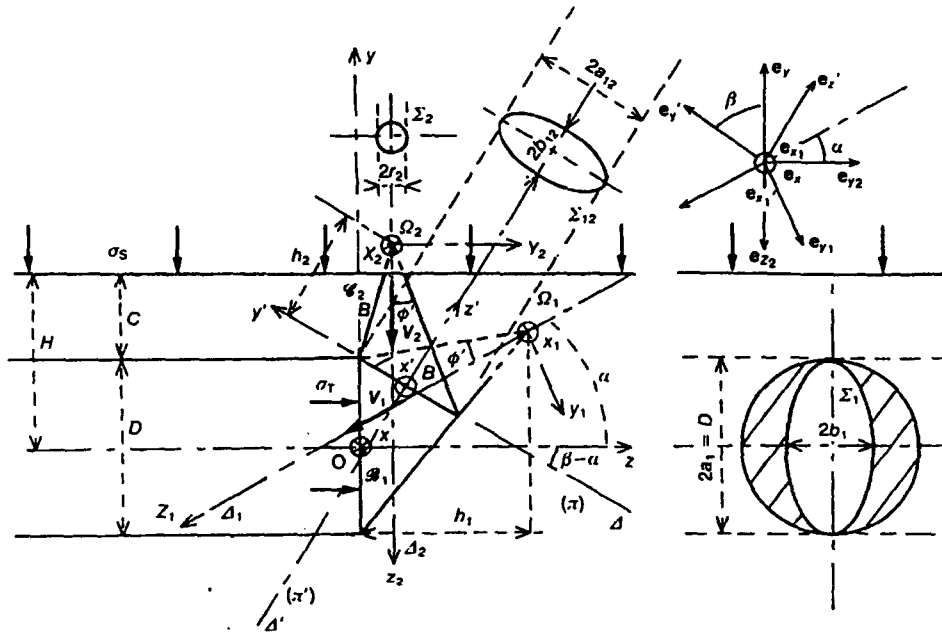


그림 4. 두 개의 콘 블록에 의한 터널 막장의 붕괴 메카니즘

상기 붕괴기전과 관련한 식의 유도과정은 본 고에서는 생략하기로 하며, 결론적으로 외부하중(σ_s/σ_c , σ_τ/σ_c , $\gamma D/\sigma_c$)에 의한 힘, P_e 와 소산력 P_v 가 계산된다. 그러면 하중의 조합 $\{\sigma_s/\sigma_c, \sigma_\tau/\sigma_c, \gamma D/\sigma_c\}$ 이 안정하기 위한 다음의 식(1)의 조건으로부터 upper bound solution이 찾아진다.

$$P_e \leq P_v \quad (2)$$

위 식(2)의 조건으로부터 upper bound solution을 구해보면 다음의 식(3)과 같다.

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\tau (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_\tau}{\sigma_c} + 1 \quad (3)$$

식(3)에서 N_s 및 N_τ 는 하중계수로서 기초지반의 지지력 산출시 적용되는 지지력계수와 거의 유사한 의미를 지니고 있다. 따라서 상기 식(3)으로부터 막장의 안정에 필요한 최소 지보력(σ_τ)을 산출할 수 있으며, 또한 붕괴된 콘의 기하학적 형상 또한 찾을 수 있다. Chambon 등(1994)은 모래지반에서의 터널 막장의 안정성을 연구하기 위하여 원심모형실험을 실시하였으며, 그 결과 산출된 막장의 안정에 필요한 지보력과 파괴면의 형상은 상기 극한해석 결과(upper bound solution)와 거의 일치하는 결과를 보였다.

2.2 예제해석

본 절에서는 앞 절에서 언급한 토사터널의 막장의 안정에 필요한 지보력 산출을 위한 극한해석을 이용하여 예제해석을 실시하였다. 해석대상지반은 사질토 지반으로서 다음의 표 1에서 보인 바와 같은 물성을 갖는다.

표 1. 해석대상지반의 물성치

지반종류	단위중량 (ton/m^3)	점착력 (ton/m^2)	마찰각 (deg.)	탄성계수 (ton/m^2)	포아손비	비고
사질토	1.550	0.01	35.0	1,000	0.30	

해석대상 터널은 직경(D) 5.0m의 원형터널로 하고, 터널 천단부에서 지표면까지의 거리(C)를 변화시키면서 터널 막장의 붕괴형태와 그 때 필요한 막장의 지보력을 산출하였다. 해석대상지반은 그림 5에서 보인 바와 같다.

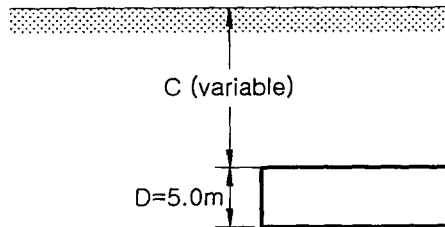


그림 5. 극한해석을 위한 해석대상지반

막장의 붕괴형태 및 막장의 안정에 필요한 지보력을 터널의 토피고에 따라서 산출하기 위해서 그림 5에서 보인 바와 같이 터널 천단부에서 지표면까지의 거리 C를 변화시키면서 upper bound solution을 구하였다. 그 결과 터널의 깊이비(depth ratio)가 0.15 이상인 경우에 대해서는 막장의 붕괴형태나 막장의 지보력은 터널의 깊이비와는 무관한 것으로 산출되었으며, 이는 막장의 붕괴형태는 깊이비나 흙의 밀도에 큰 영향을 받지 않는다는 Chambon 등(1994)에 의한 원심모형 실험결과와도 일치한다. 그림 6은 C/D가 각각 0.1 및 2.0인 경우에 대해서 해석결과를 보인 것이다.

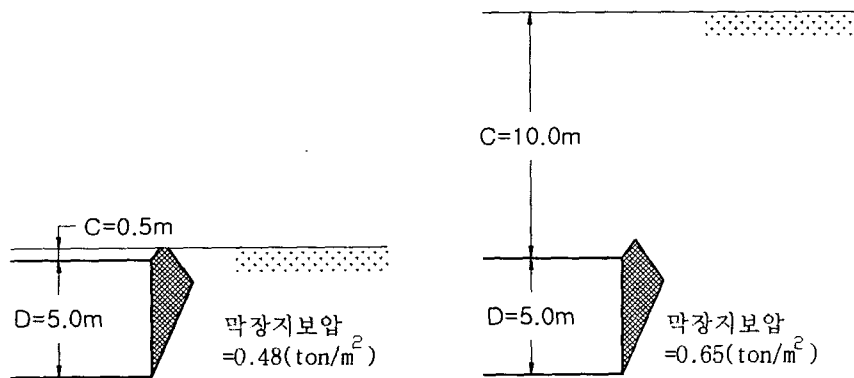


그림 6. 극한해석 결과에 의한 upper bound solution

3. 침투력을 고려한 막장의 지보력 산출

터널 막장은 굴착에 따른 응력이완 및 용수에 의한 침투력에 의해 안정성이 저하하게 된다. 특히 강하부를 통과하는 하저터널 혹은 풍부한 지하수원이 인접한 구간에서의 터널 시공시 막장으로 유입되는 지하수에 의한 침투력은 막장의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 장에서는 예제해석을 통하여 지하수의 정상류 흐름에 의해 막장에서 발생하는 침투력을 지하수위 별로 산정하고 유효응력개념에 의한 극한해석결과와 비교하고 이를 종합하여 고정 지하수위 하에서 막장의 안정성을 확보하기 위한 지보력을 산출하여 보도록 한다.

3.1 침투해석 (Seepage Analysis)

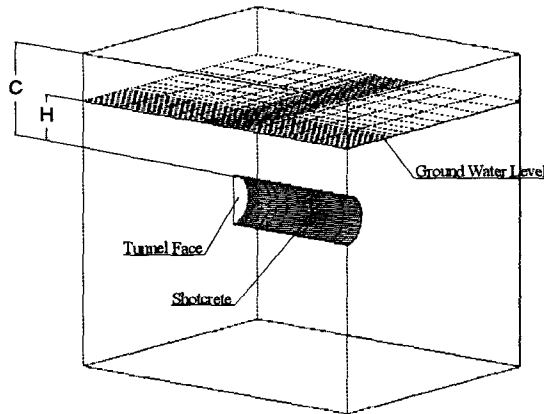


그림 7. 침투해석에 사용된 3차원 해석요소망

정상류 상태의 지하수조건에서 막장에 작용하는 침투력을 지하수위별로 해석하기 위하여 그림 7에서 보인 바와 같은 해석대상단면을 설정하였다. 터널은 직경(D) 5.0m의 원형터널이며, 터널심도(C)는 천단부로부터 지표면까지의 거리를 10.0m로 하였다($C/D=2.0$). 지반은 사질토로서 해석에 사용된 지반정수는 표 1에서 보인 바와 같다. 터널 천단부에서 지하수위까지의 거리(H)는 5.0m($H/D=1.0$)에서 2.5m 간격으로 17.5m($H/D=3.5$)까지 증가시켜 총 6가지의 경우에 대해서 침투해석을 실시하였다. 각 해석경우에 대해 침투력은 극한해석 결과 산출된 막장의 붕괴면에서 막장까지의 전수두차로부터 구할 수 있다. 그림 8은 $C/D=2.0$, $H/D=2.0$ 인 경우에 대해 터널 막장에서의 파괴면 및 전수두분포를 보여주고 있으며, 표 2는 본 침투해석으로부터 막장에 작용하는 침투압(seepage pressure)을 산출한 것이다.

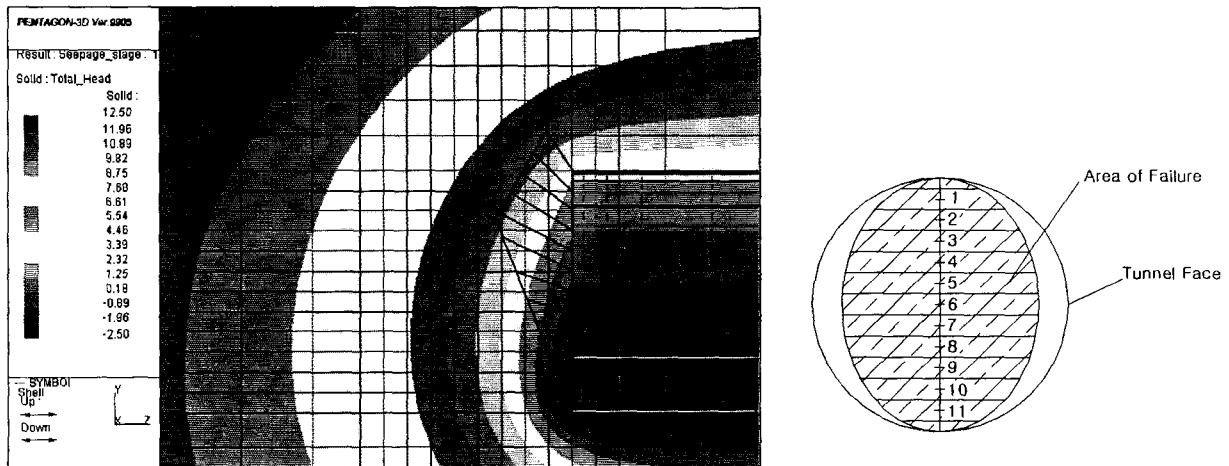


그림 8. 터널 막장에 작용하는 침투압 분포 ($C/D=H/D=2.0$ 인 경우)

표 2. 터널 막장면에 작용하는 침투압의 산정결과 (C/D=H/D=2.0인 경우).

slice no.	$\Delta h/L \times L$ =침투압(ton/m ²)	침투압의 수평성분 (ton/m ²)	작용면적 (m ²)	침투력 (ton)
1	2.79	2.55	1.0111	2.5783
2	3.17	2.99	1.1769	3.5189
3	3.76	3.59	1.3915	4.9955
4	4.12	3.93	1.5000	5.4300
5	3.74	3.60	1.5696	5.6506
6	3.36	3.21	1.6113	5.1723
7	2.98	2.85	1.5881	4.5261
8	2.54	2.41	1.4988	3.6121
9	2.07	1.97	1.3742	2.7072
10	1.46	1.35	1.1892	1.6054
11	0.83	0.83	0.9999	0.8299
SUM			14.9106	40.6263
막장면에 작용하는 평균 침투압 = 40.6263/14.9106 = 2.72 (ton/m ²)				

3.2 결과검토

표 3은 앞절에서 제시한 바와 같이 침투해석을 실시한 결과 산출된 터널 막장에서의 평균침투압을 정리한 것이며, 그림 9는 이를 그래프로 나타낸 것이다.

표 3. 지하수위에 따른 막장에서의 평균침투압 산출결과

Case	지하수위 (H/D)	평균침투압 (ton/m ²)	정수압 대비율 (%)
1	1.0	1.86	24.8
2	1.5	2.33	23.3
3	2.0	2.72	21.8
4	2.5	3.28	21.9
5	3.0	3.81	21.8
6	3.5	4.25	21.3

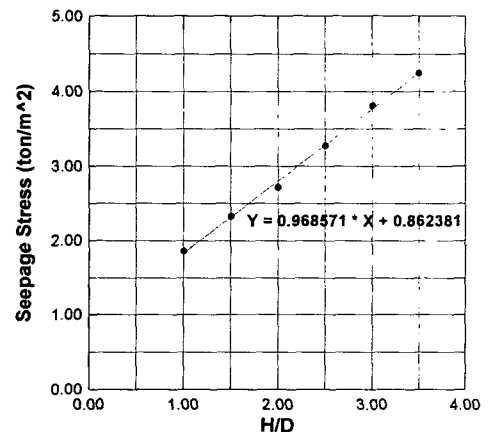


그림 9. 지하수위(H/D)와 막장에서의 평균침투압 관계곡선.

표 3에서 보인 바와 같이 지하수의 정상류 조건에서 터널 막장에 작용하는 평균침투압은 지하수위에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보인다. 이를 터널 중심에서의 정수압과 비교한 정수압 대비율은 평균적으로 약 22% 정도가 작용함을 알 수 있다. 터널의 깊이비(C/D)가 2.0인 상기의 조건에서 지하수 흐름을 고려하지 않은 극한해석 결과, 막장의 안정에 필요한 지보압은 0.22ton/m²이 산출되었으며, 따라서 침투력을 고려한 터널 막장의 안정에 필요한 지보력은 표 3에서와 같이 산출된 결과를 더 고려하여야 바람직할 것이다.

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

그림 10은 터널모형 실험장치를 보이고 있다. 토조 및 모형터널의 재질은 아크릴판이며, 토조 내 지반 조성 및 포화시 수압에 의한 변형이 없도록 충분한 두께($t=30\text{mm}$)를 확보하였다. 모형터널은 두께 5mm의 아크릴판을 사용하였으며, 직경 10.0cm의 반단면으로 제작하였다. 배수형 터널을 모사하기 위하여 배면에는 부직포(600g/m^2)를 부착하여 본 모형터널이 충분한 배수능을 확보하도록 하였으며, 터널 주변의 지하수는 부직포를 따라 터널 하부에 5cm 간격으로 천공된 배수공을 통하여 터널 내부로 배수되도록 하였다. 터널 막장은 두께 3mm의 아크릴판으로 제작되었으며, 막장으로 자유로운 배수가 되도록 하기 위하여 직경 약 2mm의 구멍을 다수 천공하였다. 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.

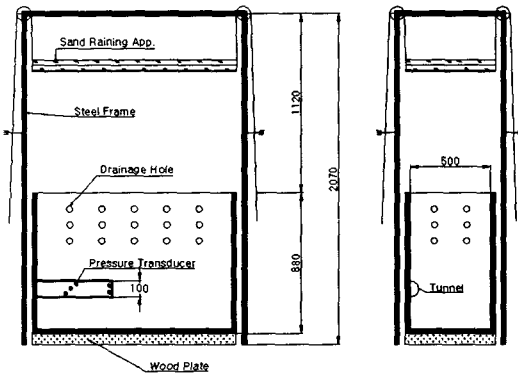


그림 10. 터널모형 실험장치

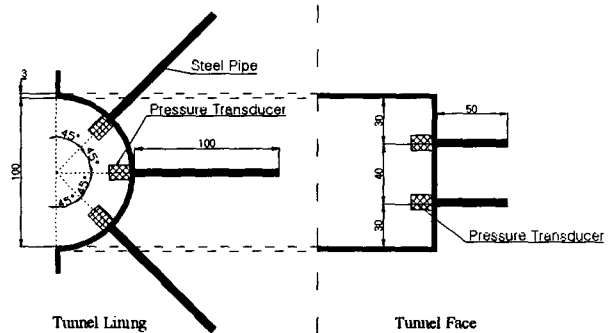


그림 11. 모형터널 및 pressure cell 상세도

4.2 실험결과의 정리 및 검토

본 터널모형 실험에서 적용한 지하수 조건 및 지반조건은 터널 천단부에서 지표면까지의 거리(C)는 터널 직경(D)의 2배인 20cm로 설정하였으며, 터널 천단부에서 지하수위까지의 거리(H)는 터널 직경의 2배, 3배 및 4배의 경우로 설정하였다. 이러한 지하수조건에서 터널라이닝 배면 및 막장으로의 배수에 의해 지하수의 정상류 흐름이 발생하였을 때, 그림 11에서 보인 바와 같이 터널 주변의 5개소에서 수압을 측정하고 이로부터 침투수압을 산정하였다. 계산결과는 표 4에서 보인 바와 같이 지하수위에 따라 터널 라이닝 및 막장에 작용하는 침투수압 및 동일 측정지점에서의 정수압에 대한 대비율을 나타내었다.

표 4. 터널모형실험 결과

지하수위 (H, m)	Pressure Cell No.	수압(p) (kg/cm^2)	압력수두 p/γ_w , m	위치수두 z, m	동수경사 i	침투수압 (ton/m^2)	정수압 (ton/m^2)	정수압대비율 (%)
2D	1	0.010	0.02	0.08	1.0	0.10	0.21	47.6
	2	0.017	0.17	0.00	1.7	0.17	0.25	68.0
	3	0.022	0.30	-0.08	2.2	0.22	0.29	75.9
	4	0.013	0.13	0.00	2.6	0.13	0.23	56.5
	5	0.020	0.20	0.00	4.0	0.20	0.27	74.1
3D	1	0.020	0.12	0.08	2.0	0.20	0.31	64.5
	2	0.024	0.24	0.00	2.4	0.24	0.35	68.6
	3	0.025	0.33	-0.08	2.5	0.25	0.39	64.1
	4	0.017	0.17	0.00	3.4	0.17	0.33	51.5
	5	0.025	0.25	0.00	5.0	0.25	0.37	67.6
4D	1	0.027	0.19	0.08	2.7	0.27	0.41	65.9
	2	0.029	0.29	0.00	2.9	0.29	0.45	64.4
	3	0.030	0.38	-0.08	3.0	0.30	0.49	61.2
	4	0.019	0.19	0.00	3.8	0.19	0.43	44.2
	5	0.031	0.31	0.00	6.2	0.31	0.47	66.0

실험결과, 배수형 터널에서 지하수의 정상류 흐름시 발생하는 침투수압은 해당지점에서의 정수압의 45%에서 최대 75%까지 작용하는 것으로 나타났으며, 터널 막장에서의 침투수압은 정수압 대비 평균 60% 정도로 발생하였다. 3장에서 실시한 수치해석 결과 터널 막장에 작용하는 침투수압이 정수압 대비로 평균 22%인 점을 감안하면 실험결과는 훨씬 큰 수치임을 알 수 있다. 그 이유는 터널모형실험시 지하수의 배수를 원활하게 하기 위하여 터널 라이닝 주변으로는 부직포를 부착하고 터널 막장은 다공판과 부직포로 모델링하였으나 본 실험조건하에서 터널 내로 유입되는 지하수가 충분히 처리되지 않음으로서 터널 주변에 잔류수압이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 배수형 터널의 막장 및 라이닝 배면에 작용하는 침투력을 정확하게 측정하기 위해서는 좀더 배수가 원활하게 이루어질 수 있는 배수처리가 모델링되어야 할 것이며, 반대로 생각하면 배수형 터널에서 배수처리가 필터재의 막힘 등에 의해 통수능력을 확보하지 못하면 침투력 뿐만 아니라 경우에 따라서는 매우 큰 잔류수압도 작용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

지하수의 정상류 흐름조건에서 터널 막장에는 외력으로서 유효응력과 아울러 침투력이 작용하게 된다. 본 연구에서는 극한해석 중 upper bound solution을 이용하여 터널막장에 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. 실내모형실험 결과, 산출된 침투력은 수치해석 결과보다 과다하게 측정되었으며, 이로부터 터널 배수재의 통수능력이 충분하지 않을 경우 발생하게 될 잔류수압의 영향도 간접적으로 추정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '96년도 건설교통연구과제의 지원사업(과제번호 96-0046)으로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

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. 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.
3. 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.
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.