

강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정성 평가 Evaluation of Face Stability of Tunnel with Steel Pipe-Reinforced Multi-step Grouting

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 이재성²⁾, Jae-Sung Lee, 남석우³⁾, Seok-Woo Nam

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea University

²⁾ (주)에스코컨설턴트 사원, Engineer, ESCO Engineering & Consultant Company

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사후과정, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil Eng., Korea University

SYNOPSIS : Tunneling in difficult geological conditions is often inevitable especially in urban areas. Ground improvement and reinforcement techniques are often required to guarantee safe tunnel excavations and/or to prevent damage to adjacent structures. The steel pipe-reinforced multi-step grouting method has been recently applied to tunnel sites in Korea as an auxiliary technique. In this study, the face stability with steel pipe-reinforced multi-step grouting was evaluated by simultaneously considering two factors: one is the effective stress acting on the tunnel face calculated by limit theorem and limit equilibrium method; the other is the seepage force obtained by means of numerical analysis. The study revealed that the influence of the steel pipe-reinforced multi-step grouting on the support pressure in dry condition is not significant while there is relatively a large amount of reduction in seepage forces by adopting the technique in saturated condition. The effect of the anisotropy of permeability on the seepage force acting on the tunnel face was also estimated by conducting the coupled analysis. It was found that a higher horizontal permeability compared with the vertical one causes reduction in the seepage force acting on the tunnel face.

Key words : face stability, seepage force, steel pipe-reinforced multi-step grouting, tunnel

1. 서 론

열악한 지반 조건에서 터널 시공 시 터널의 안정성을 확보하고 인접 구조물의 손상을 예방하기 위해 보조공법이 사용된다. 국내에서는 지반의 변위를 제어하고 차수효과를 얻을 수 있는 강관다단 그라우팅 공법(steel pipe-reinforced multi-step grouting)이 근래에 적용되고 있다. 이 공법은 기존의 파이프루프 공법을 주 공법으로 이용하나 파이프루프를 이루는 파이프들을 단지 지반 보강재로만 이용치 않고 그 속에 인위적인 구멍들을 내어 파이프를 통한 그라우팅을 수행, 차수와 보강효과를 1개의 공종으로 얻어 공기지연의 문제를 크게 해결할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정에 필요한 지보압을 산정하는 방법을 제시하고, 아울러 지반의 투수계수의 이방성이 터널 막장에 작용하는 침투력에 미치는 영향을 정략적으로 분석하고자 한다. 지보압의 산정은 극한이론(limit theorem) 중 상한치이론(upper bound theorem)과 한계평형법(limit equilibrium method)을 적용하였으며, 지하수위 하에서 터널 시공 시 막장에 작용하는 침투력은 수치해석을 통하여 산정되었다. 또한 보강을

하지 않은 터널의 경우에 대해 건조한 지반에서는 Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치 이론의 해와, 정상류 상태의 지하수 흐름 조건에서는 이 등(2001)이 산정한 터널 막장에 작용하는 침투력을 비교하여 강관 다단 그라우팅이 터널 막장의 안정에 미치는 효과를 제시하고자 한다.

2. 상한치이론에 의한 막장의 지보압 산정

본 연구에서 상한치 이론에 의한 터널 막장에서의 지보압 산정시 Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치이론의 해 중에서 두 개의 콘 블록에 의한 붕괴 메카니즘(MII)을 수정하여 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 지보압을 산정하였다. 가정된 막장 붕괴 메카니즘은 그림 1에서 보인 바와 같다. 본 연구에서는 해석의 간편성을 위해 강관과 그라우팅은 터널 굴진방향과 평행하고 그라우팅 상부의 토압은 그라우팅이 지지한다고 가정하였다.

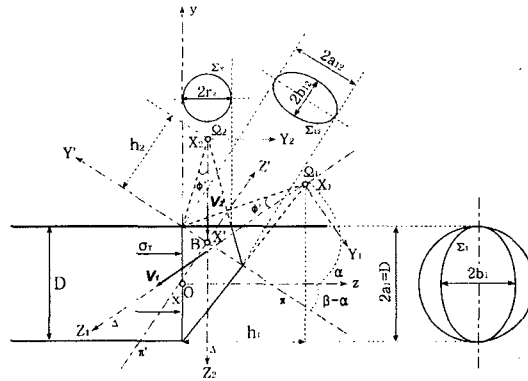


그림 1. 상한치 이론에 의한 파괴 메카니즘

상한치 이론으로부터 터널 막장이 안정하기 위한 조건은 식 (1)과 같다.

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

여기서, P_e 는 외부하중에 의한 힘을 나타내며 P_v 는 내부소산력을 나타낸다. 외력(P_e)은 터널이 지하수위 하에서 시공되는 경우, 터널 막장에 작용하는 침투압($\sigma_{S.F.}$)에 의한 힘($P_{S.F.}$)을 포함하여 다음과 같이 3 가지 성분으로 이루어져 있다.

$$P_e = P_T + P_Y + P_{S.F.} \quad (2)$$

여기서, P_T 와 P_Y 는 각각 터널 막장에서의 지보압(σ_T)과 두 개의 콘 블록의 무게에 의한 힘을 의미하며, 결론적으로 외부하중에 의한 힘, P_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, R_A , R_B , R_C , R_D 및 R_E 는 각도 α , β 및 ϕ' 와 관계된 함수이다 (Leca & Dormieux, 1990).

그림 1에서 이동블록 B_1 및 B_2 는 각 블록의 표면과 불연속면 Σ_{12} 를 따라 에너지가 소산되며, 내부소산력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (3)과 (4)를 식 (1)에 대입하면 터널 막장의 안정을 위한 상한치 이론의 해가 얻어지게 된다.

$$N_\alpha + N_\gamma (K_P - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_P - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{S.F.}}{\sigma_c} + 1 \quad (5)$$

여기서, K_P 는 수동토압계수, σ_c 는 비구속 압축강도(unconfined compression strength)이며, N_α 와 N_γ 는 하중계수(weighting coefficient)로서 내부 마찰각에 따라 비선형적인 관계를 가진다.

3. 한계평형법에 의한 막장의 지보압 산정

본 연구에서는 터널 막장의 지보압 산정에 있어서 앞 절에서 언급한 상한치이론과 아울러 한계평형법, 즉 3차원 썰기해석(wedge analysis) 및 두 가지 방법의 2차원적 절편법을 이용하여 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 지보압을 산정하였다. 절편법 1(slice method 1)은 파괴면을 logarithmic spiral로 가정하고, 절편법 2(slice method 2)는 파괴면을 직선으로 가정하였다.

3.1 썰기해석 (Wedge Analysis)

본 해석에서는 터널의 원형단면을 그림 2에서와 같이 동일한 면적의 정사각형으로 모델링하였으며, 터널 막장 전방의 썰기에 작용하는 힘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 궁극적으로 터널 막장의 지보압은 식 (6)에 의해서 산출할 수 있다.

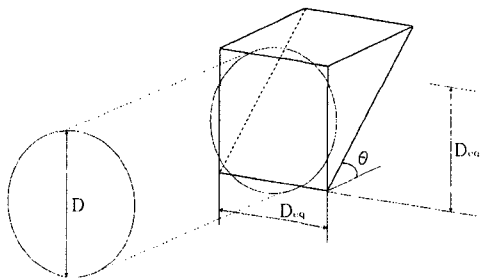


그림 2. 썰기해석에 의한 파괴 메카니즘

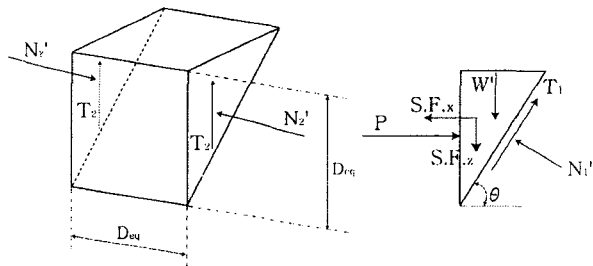


그림 3. 썰기에 작용하는 힘

$$\sigma_T = \left[\frac{N_1'}{\cos \phi'} \sin(\theta - \phi') - C_1' \cos \theta + S.F._x \right] / D_{eq}^2 \quad (6)$$

3.2 절편법 1 (Slice Method 1)

절편법 1은 그림 4에서 보인 바와 같이 파괴면을 logarithmic spiral로 가정하여 터널 막장의 지보압을 산정하였다. 'O'점으로부터 파괴면까지의 거리는 식 (7)과 같이 정의되고 하나의 절편에 작용하는 힘은 그림 5에서 보인 바와 같다.

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi'} \quad (7)$$

여기서, r_0 는 θ 가 '0'일 때의 spiral의 반경이며 θ 는 라디안(radian)으로 표시된다.

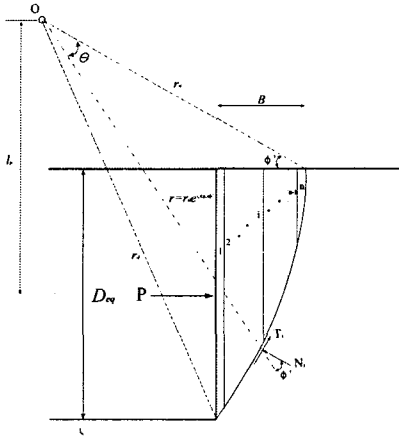


그림 4. 절편법 1에 의한 파괴 메카니즘

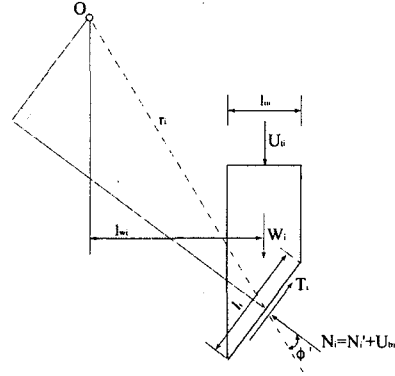


그림 5. 절편법 1에서 절편 i 에 작용하는 힘

미끄러짐 면에서 유발전단강도가 전부 발휘된다고 가정하면 절편 i 에 작용하는 전단력(T_i)은 다음과 같다.

$$T_i = c'l_i + (N_i - U_{bi})\tan\phi' = N_i \tan\phi' + (c' - u_{bi} \tan\phi')_i \quad (8)$$

이 때, u_{bi} 와 u_{wi} 는 각각 절편 i 의 저면과 상부면에 작용하는 수압으로 수치해석으로부터 구해진다. 막장의 지보력(P)은 'O'점에 대하여 모멘트 평형으로 구해질 수 있으며 이 절편법은 2차원 해석이므로 지보압은 지보력을 등가 터널직경으로 나누어 구해진다.

$$\sigma_T = \left[\frac{l}{l_p} \left\{ \sum (W_i + u_{wi} l_{wi})_{wi} + \sum u_{bi} l_i r_i \tan\phi' \cos\phi' - \frac{c' \cos\phi'}{2 \tan\phi'} (r_d^2 - r_o^2) \right\} \right] / D_{eq} \quad (9)$$

3.3 절편법 2 (Slice Method 2)

절편법 2에서는 그림 6에서와 같이 파괴면을 직선으로 가정하여 터널 막장의 지보압을 산정하였다. 하나의 절편에 작용하는 힘은 그림 7에서 보인 바와 같다. 수평방향으로 힘의 평형을 고려하여 지보력(P)을 얻을 수 있으며 지보압은 절편법 1에서와 같이 등가 터널직경으로 나누어 얻어지게 된다.

$$\sigma_T = \sum [N_i \sin\theta - \{c'l_i + (N_i - u_{bi} l_i) \tan\phi'\} \cos\theta] / D_{eq} \quad (10)$$

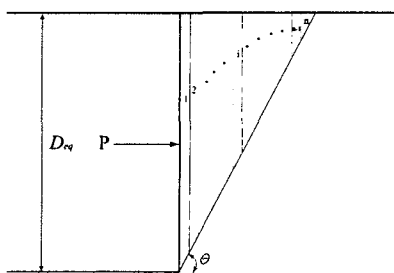


그림 6. 절편법 2에 의한 파괴 메카니즘

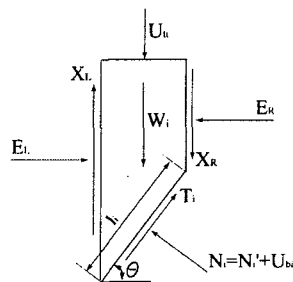


그림 7. 절편법 2에서 절편 i 에 작용하는 힘

4. 지보압의 산정

본 장에서는 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 지보압을 2장과 3장에서 제안한 방법으로 산정하였다. 지하수위 하에서 물체력은 유효중량에 침투력을 고려하거나 전중량에 경계면에서의 수압을 고려하는 방법으로 산출된다. 상한치 이론과 썬기해석에 의한 지보압 산정은 전자의 방법으로, 절편법 1과 절편법 2에 의한 지보압 산정은 후자의 방법이 사용되었다. 해석대상지반은 사질토 지반을 사용하였으며, 본 해석에 사용된 물성치는 표 1에서 보인 바와 같다. 해석은 직경 5.0m인 원형 터널을 대상으로 하였고, 강관 다단 그라우팅의 시공범위는 상부 반단면으로 하였으며, 터널 라이닝 및 강관다단 그라우팅 영역은 불투수 경계면으로 설정하였다.

표 1. 해석에 사용된 물성치

	지 반	그라우팅	강 관	숏크리트
탄성계수 (kN/m^2)	49,000	1,960,000	20,600,000	14,700,000
포아송비	0.35	0.25	0.167	0.167
단위중량 (kN/m^3)	$\gamma_d=15.2$	22.56	77.01	22.56
	$\gamma_{sat}=19.3$			
	$\gamma'=9.5$			
점착력 (kN/m^2)	0.0	98.1	-	-
마찰각 (deg.)	35.0	35.0	-	-
투수계수 (m/sec)	1.0×10^{-9}	-	-	-

4.1 건조한 지반에서의 막장 지보압

표 1에서 지반의 건조단위중량(γ_d)으로 산출한 각각의 방법에 의한 터널 막장의 지보압은 그림 8에서 보인 바와 같다. 강관다단 그라우팅에 의한 보강이 실시되지 않은 경우, Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치 이론에 의한 결과도 함께 도시되어 있다. 그림 8에 보인 바와 같이 절편법 1과 절편법 2에 의한 지보압이 상대적으로 큰 값을 보이는데, 이는 이들 방법이 3차원적인 효과를 고려하지 못했기 때문이라고 판단된다. 또한 상한치이론에 의한 결과가 가장 작은 지보압을 보이고 있는데, 이는 상한치 이론이 파괴순간의 에너지 평형조건으로 파괴하중을 산출하는 불안정 이론이기 때문이다.

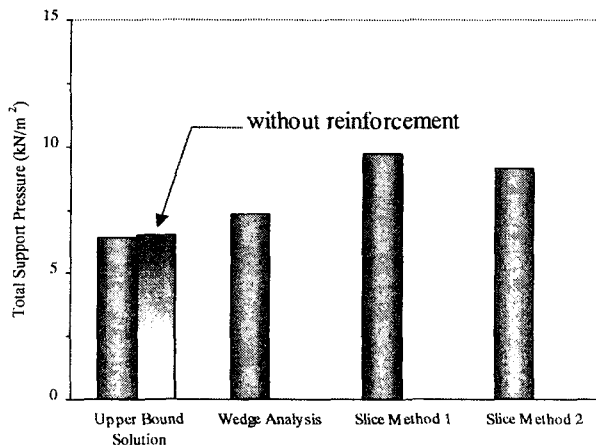


그림 8. 건조한 지반에서 막장 지보압

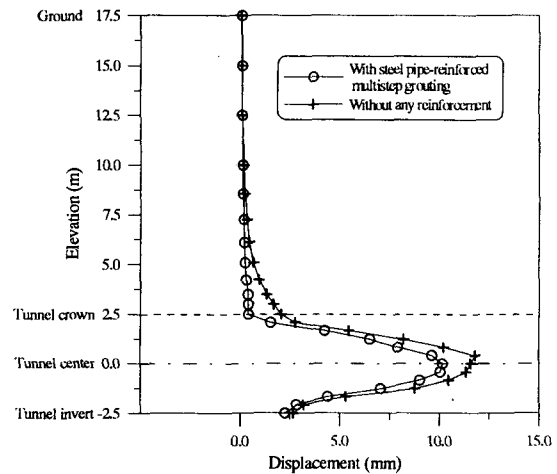


그림 9. 터널 막장 전방 1.0m에서 변위

강관다단 그라우팅의 효용성을 검증하기 위해 건조한 지반에 대해 유한요소해석을 실시하여 터널 굴착에 의해 막장 전방 1.0m에서 발생한 변위를 그림 9에 도시하였다. 강관다단 그라우팅으로 보강된 경우 터널 천단부에서 변위가 급격히 감소함을 알 수 있으며, 본 결과로부터 강관다단 그라우팅에 의한 보강은 터널 상방향으로의 점진적 파괴(progressive failure)를 크게 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

4.2 정상류 흐름시의 막장 지보압

본 연구에서는 정상류 상태의 지하수조건에서 그림 10 및 표 2와 같이 각각의 조건변화에 따라 9개의 경우에 대해서 지하수 흐름해석을 실시하였다. 그라우팅이 해석대상지반에 비해 상대적으로 투수계수가 매우 작으므로 터널 라이닝 및 그라우팅 영역은 불투수 경계면을 적용하였으며, 터널 막장으로만 지하수 흐름을 허용하였다. 터널 막장에 작용하는 침투압은 막장면과 파괴면과의 전수두의 차에 의해서 산출된다.

표 2. 침투력 산정을 위한 지하수 흐름해석의 경우

		H/D		
		2.0	3.0	4.0
G/D	1.0	Case 11	Case 12	Case 13
	2.0	Case 21	Case 22	Case 23
	3.0	Case 31	Case 32	Case 33

그림 11은 Case 22에 대하여 계산된 터널 막장에 작용하는 평균 침투압과 막장의 안정을 위한 지보압을 나타낸 것으로 막장의 안정에 필요한 지보압의 대부분이 평균 침투압임을 보이고 있다. 따라서 터널 막장으로의 지하수 흐름은 막장의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

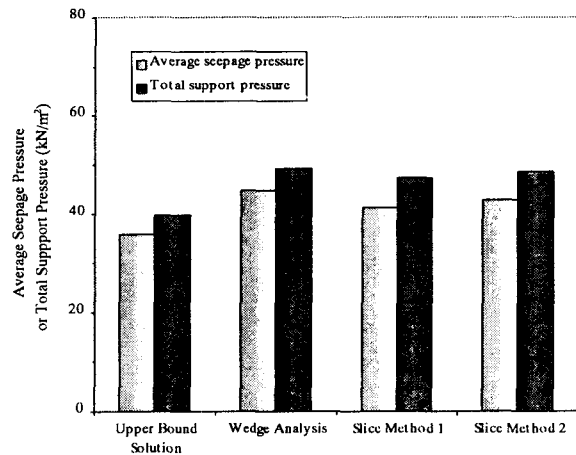
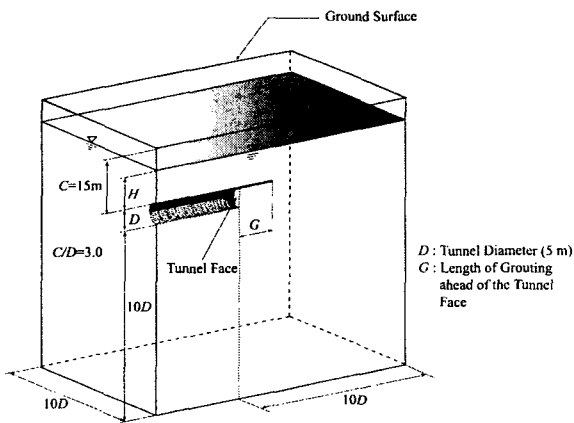


그림 10. 지하수 흐름해석을 위한 3차원 모델링

그림 11. 평균 침투수압과 막장 지보압 (Case 22)

그림 13은 그라우팅 길이(즉, G/D의 변화)에 따른 터널 막장에 작용하는 평균 침투수압을 나타내고 있는데, G/D비가 2.0이상이면 터널 막장에 작용하는 평균 침투수압의 감소는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 그림 14는 강관다단 그라우팅에 의한 보강 여부에 따른 터널 막장에 작용하는 평균 침투압비를 보인 것으로 무보강시의 연구결과는 이 등(2001)에 의하여 산출된 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 막장에 작용하는 침투압비는 무보강시 약 28% 정도이며, 보강이 실시된 경우에는 약 21% 정도로 강관다단 그라우팅에 의해 터널 막장에 작용하는 침투력을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

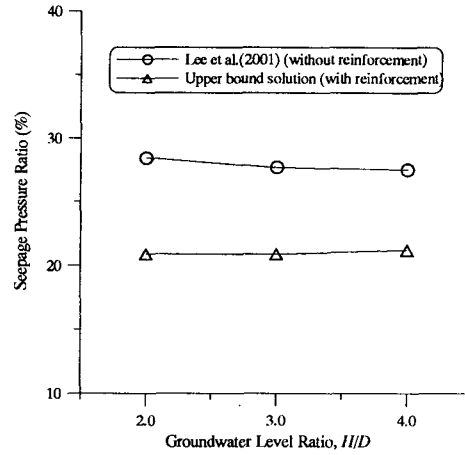
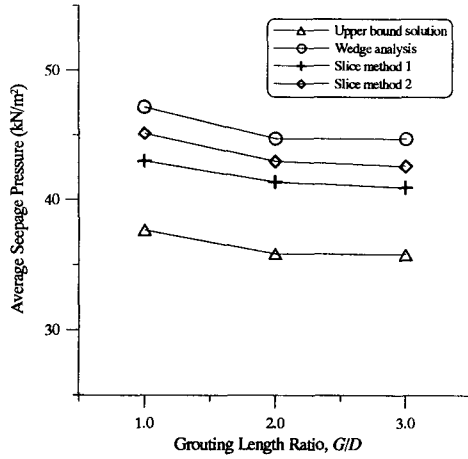


그림 13. 그라우팅 길이에 따른 평균 침투수압 (H/D=3.0) 그림 14. 강관다단 그라우팅이 침투압비에 미치는 영향

5. 연계해석에 의한 막장 지보압

본 장에서는 역학해석과 지하수 흐름해석을 동시에 고려할 수 있는 연계해석(coupled analysis)을 통해 4.2절에서 얻은 막장 지보압 값의 타당성과 투수계수의 이방성이 막장 지보압에 미치는 영향을 검토하였다. 해석은 터널의 1회 굴진장을 1.0m로 가정하여 20.0m까지의 굴착을 수행하였다. 강관은 약 0.5m 간격으로 배열하였으며 beam요소로 모델링을 하였다. 슛크리트는 0.15m의 두께로 설치하였다. 그림 15는 해석에 사용된 유한 요소망과 변위 경계조건을 도시하고 있다. 터널 막장의 안정을 평가하기 위해 최종 굴착 단계 전에 변위를 초기화하고 최종 단계의 굴착을 시행한 후 터널 막장면에 단계별로 지보압을 감소시키며 터널 막장 중앙점의 터널 축방향 변위를 검토하였다.

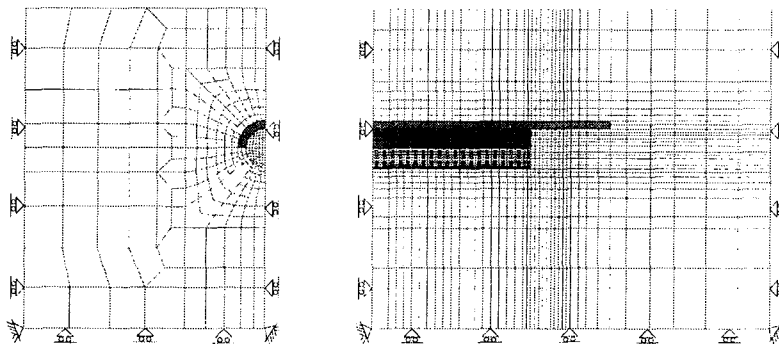


그림 15. 연계해석에 이용된 유한 요소망과 변위 경계조건

그림 16은 연계해석을 통해 얻은 터널 막장 중앙에서의 터널 축방향 변위와 4.2절에서 각각의 방법으로 얻은 막장 지보압을 도시하였다. 터널 막장의 안정을 위한 최소 지보압은 변위가 급격히 증가하기 시작할 때의 지보압으로 간주하면, 상한치 이론에 의한 막장 지보압을 제외한 췌기해석 및 절편법에 의한 막장 지보압은 연계해석의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 횡방향 투수계수(k_h)가 종방향 투수계수(k_v)보다 큰 것으로 알려져 있다. 종방향 투수계수에 대한 횡방향 투수계수의 비(k_h/k_v)에 따라 연계해석으로 산정된 터널 막장의 지보압은 그림 17에서 보인 바와 같다. 횡방향 투수계수가 종방향 투수계수에 비해 상대적으로 클수록 터널 막장의 안정을 위한 지보압은 감소하는데, 이는 k_h/k_v 비가 클수록 터널 막장 전방에서 수두 감소가 완화되고 결과적으로 터널 막장에 작용하는 침투력이 감소하기 때문이다.

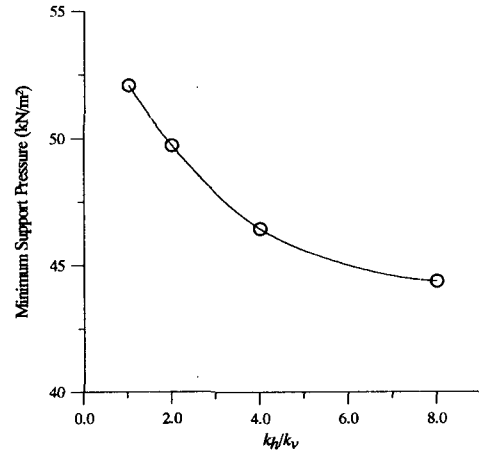
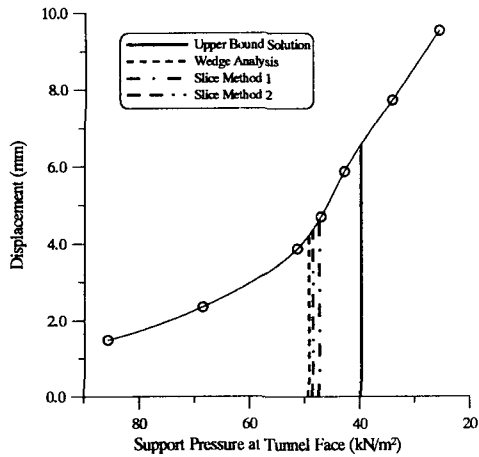


그림 16. 지보압에 따른 터널축방향 변위(Case 22)

그림 17. 투수계수 이방성(k_h/k_v)에 따른 지보압 (Case 22)

5. 결 론

상한치이론과 한계평형법으로 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널 막장의 안정을 위한 지보압을 산출하였으며, 정상류 상태의 지하수 흐름조건에서는 수치해석을 실시하여 터널 막장에 작용하는 침투압을 산출하였다. 또한 연계해석을 통하여 각각의 방법들로 산출된 지보압과 비교하고 투수계수의 이방성이 터널 막장에서의 침투력 및 터널 막장의 지보압에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 건조한 지반에서 강관 다단 그라우팅으로 인한 지보압의 감소는 크지 않았다. 그러나 강관 다단 그라우팅으로 인해 터널 막장의 상방향으로 파괴가 진행되는 것을 방지할 수 있다.
2. 지하수위 하에서 터널 굴착시 터널 막장에 작용하는 침투압은 막장의 안정성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 강관다단 그라우팅으로 보강된 경우, 한계 평형법에 근거하여 산출된 터널 막장에 작용하는 침투압은 동일한 지하수위일 때 정수압의 약 25%에 이른다.
3. 강관다단 그라우팅에 의한 보강은 터널 막장에 작용하는 침투압을 무보강시에 비해 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.
4. 연계해석을 통해 본 연구에서 제안된 터널 막장에서의 지보압 산출방법의 타당성을 입증하였다. 또한 횡방향 투수계수가 종방향 투수계수보다 상대적으로 클수록 막장 지보압은 감소함을 보였다.

참고문헌

1. 이인모, 남석우, 안재훈.(2001), "침투력이 터널 막장의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호, pp.165~172.
2. Broms, B. B. and Bennermark, H.(1967), "Stability of Clay at Vertical Openings", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, No.SM1, pp.71~94.
3. Chambon, P. and Corté, 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, Vol. 40, No. 4, pp.581~606.
5. Schofield, A. N.(1980), "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations", *Geotechnique*, Vol. 30, No. 3, pp. 227~288.