

강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 침투수력을 고려한 막장 안정성 검토

Seepage-induced Face Stability of a Tunnel with Steel Pipe-reinforced Multistep Grouting

이 인 모*¹ Lee, In-Mo 이 재 성*² Lee, Jae-Sung
남 석 우*³ Nam, Seok-Woo 이 형 주*⁴ Lee, Hyung-Joo

Abstract

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 multistep 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 multistep grouting was evaluated emphasizing the effect of seepage forces. The study revealed that the influence of the steel pipe-reinforced multistep 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.

요 지

도심지에서 열악한 지반조건에서의 터널 시공은 때때로 불가피 하다. 터널의 안정성 증대와 인접 구조물의 손상을 방지하기 위하여 지반 개량과 보강이 요구된다. 이러한 목적을 달성하기 위해 보조 공법으로 강관 다단 그라우팅은 근래에 국내의 터널 현장에 적용되고 있다. 본 연구에서는 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정성을 평가하였다. 건조한 지반에서는 지보압이 강관 다단 그라우팅으로 인해 크게 감소하지 않으나 지하수위 하에서 터널 시공 시 터널 막장에 발생하게 되는 침투수력은 상대적으로 크게 감소하였다. 투수계수의 이방성이 터널 막장에 작용하는 침투수력에 미치는 영향은 역학해석과 지하수 흐름해석의 연계해석을 통하여 검토되었다. 수직방향에 비해 수평 방향의 투수계수가 큰 경우 터널 막장에 작용하는 침투수력은 감소하였다.

Keywords : Face stability, Seepage force, Steel pipe-reinforced multistep grouting

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr)

*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

*3 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사후 과정 (Member, Post-Doctoral Researcher., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

*4 정회원, 삼성건설 토목영업팀 차장 (Member, Ph.D., Samsung Engrg. & Construction, General Manager)

1. 서론

열악한 지반 조건에서 터널 시공 시 터널의 안정성을 확보하고 인접 구조물의 손상을 예방하기 위해 보조공법이 사용된다. 국내에서는 지반의 변위를 제어하고 차수효과를 얻을 수 있는 강관 다단 그라우팅 공법(steel pipe-reinforced multistep grouting)이 근래에 적용되고 있다. 이 공법은 기존의 파이프로프 공법을 주공법으로 이용하나 파이프로프를 이루는 파이프로프를 단지 지반 보강재로만 이용치 않고 그 속에 인위적인 구멍들을 내어 파이프로프를 통한 그라우팅을 수행, 차수와 보강효과를 1개의 공종으로 얻어 공기지연의 문제를 크게 해결할 수 있다.

한편, 터널 막장의 안정성은 Broms와 Bennermark (1967)에 의해 평가되어 온 이래로 몇몇 학자들에 연구가 진행되었다. Schofield(1980)와 Chambon과 Corté(1994)는 원심모형실험을 수행하여 막장의 안정성을 연구하였으며, Leca와 Panet(1988)은 극한이론(limit theorem) 중 하한치 이론(lower bound theorem)으로, Leca와 Dormieux(1990)는 상한치 이론(upper bound theorem)으로 막장의 지보압을 산출하였다.

본 연구에서는 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정에 필요한 지보압을 산정하는 방법들을 제시하고자 한다. 3차원적 해석기법으로서 극한이론 중 상한치 이론과 한계평형법(limit equilibrium method)인 쐐기해석(wedge analysis)을, 그리고 2차원적 해석기법으로서 한계평형법인 절편법을 이용하여 지보압을 산정하며, 지하수위 하에서 터널 시공시 지보압 산정에 추가로 고려해야 하는 막장에 작용하는 침투수력은 수치해석 프로그램인 PENTAGON-3D(1998)의 3차원 침투류해석(seepage analysis)을 통하여 산정하기로 한다. 또한 보강을 하지 않은 터널의 경우에 대해 건조한 지반에서는 Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치 이론의 해와, 정상류 상태의 지하수 흐름 조건에서는 이등(2001)이 산정한 터널 막장에 작용하는 침투수력과 본 연구의 결과를 비교하여 강관 다단 그라우팅이 터널 막장의 안정에 미치는 효과를 검토하기로 한다. 아울러 지반의 투수계수의 이방성이 터널 막장에 작용하는 침투수력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기로 한다.

2. 상한치 이론에 의한 막장의 지보압 산정

극한이론에는 불안정 이론(unsafe theorem)과 안정 이론(safe theorem)이 있는데 이 두 이론이 실제 파괴하중에 대한 상한치와 하한치를 주므로 전자를 상한치 이론, 후자를 하한치 이론이라고 한다. 상한치 이론은 동적 허용속도장(kinematically admissible velocity field)이라고 하는 파괴순간의 운동학적인 파괴 메카니즘을 가정하여 이 메카니즘에 대한 에너지 평형조건을 이용하여 파괴하중을 구하게 된다.

Leca와 Dormieux(1990)는 상한치 이론에 근거하여 총 3가지 형태의 터널 막장에서의 붕괴 메카니즘을 제안하였으며, Chambon과 Corté(1994)는 이 중 두 개의 콘블록에 의한 붕괴 메카니즘이 원심모형실험결과와 잘 일치함을 보였다. 또한 이등(2001)은 두 개의 콘블록에 의한 붕괴 메카니즘을 고려하여 막장에서의 침투력을 수치해석을 통하여 예측하였으며, 실내시험을 통하여 이의 타당성을 검증하였다. 따라서 본 연구에서는 그림 1에서 보인 바와 같이 Leca와 Dormieux(1990)가 제시한 두 개의 콘블록에 의한 붕괴 메카니즘을 수정하여 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 지보압을 산정하였으며, 해석의 간편성을 위해 강관과 그라우팅은 터널 굴진방향과 평행하고 그라우팅 상부의 토압은 그라우팅이 지지한다고 가정하였다. 상한치 이론으로부터 터널 막장이 안정하기 위한 조건은 식 (1)과 같다.

$$P_e \leq P, \quad (1)$$

여기서, P_e 는 외부하중에 의한 힘을 나타내며 P_v 는 내부 소산력을 나타낸다. 본 고에서는 각 항에 대한 유도과정은 간략히 소개하였다. 먼저 외력(P_e)의 산정은 터널이 지하수위 하에서 시공되는 경우, 터널 막장에 작용하는 침투수압($\sigma_{S.F.}$)에 의한 힘($P_{S.F.}$)을 포함하여 다음과 같이 3가지 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 콘블록 B_1 및 B_2 의 무거운 무게에 의한 힘으로 다음과 같이 산정 된다.

$$P_T = \iint_{E_1} (-\sigma_T e_z) \cdot (V_1 e_{z1}) d\Omega \\ = -\frac{\pi D^2 \cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi') R_A}{4 \cos^2 \phi'} \frac{R_C}{R_C^2} \sigma_T V_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
P_r &= \iiint_{V_1} (-\gamma_e) \cdot (V_1 e_{z1}) dV + \iiint_{V_2} (-\gamma_e) \cdot (V_2 e_{z2}) dV \\
&= \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{3} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \\
&\times \left[\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \cos^2(\beta + \phi')} R_C - \frac{1}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} R_E^2 \right] \gamma D V_2
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
P_{S.F.} &= \iint_{\Sigma_1} (\sigma_{S.F.} e_z) \cdot (V_1 e_{z1}) d\Sigma \\
&= \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \frac{R_A}{R_C^2} \sigma_{S.F.} V_2
\end{aligned} \quad (5)$$

이 때, B_1 과 B_2 는 막장에 형성된 두 개의 파괴블록을 나타낸 것이며, α 및 β 는 그림 1에서 보인 바와 같이 큰 블록들에 의해 형성된 각이다. V_1 및 V_2 는 각 블록의 속도장에서의 속도에 대한 스칼라 양이며, e 는 아래첨자에 명기된 축에 대한 단위벡터를 의미한다.

막장에 작용하는 침투수압을 산정함에 있어, 일반적으로 터널 막장에 작용하는 침투수력은 수평분력이 수직분력보다 막장의 안정성에 더 큰 영향을 미치므로, 본 고에서는 침투수력의 수평분력만을 고려하였다. 외부하중에 의한 힘은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
P_e &= \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \\
&\times \left[-\frac{\cos \alpha}{R_C^2} R_A (\sigma_T - \sigma_{S.F.}) \right. \\
&\left. + \left(\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_C - \frac{R_E^2}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right) \frac{\gamma D}{3} \right] V_2
\end{aligned} \quad (6)$$

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

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

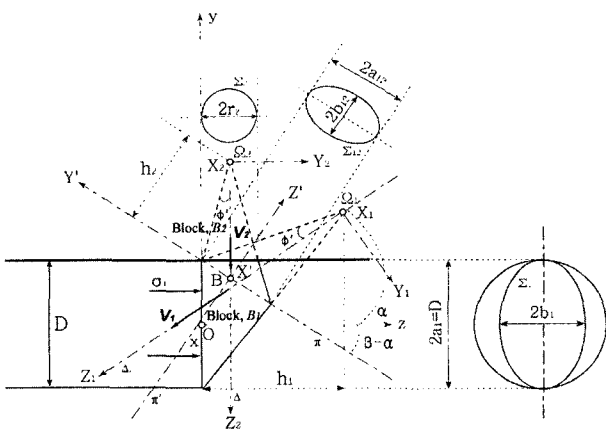


그림 1. 상한치 이론에 의한 파괴 메커니즘

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

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

$$R_E = \frac{\sin(\beta - \phi') \cos(\alpha + \phi')}{\sin(\beta + \phi')} \quad (11)$$

이동블록 B_1 , B_2 의 겉 표면적과 불연속면 Σ_{12} 를 따라 에너지는 소산된다. 따라서 내부 소산력은 다음과 같다.

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

식 (6)과 (12)를 식 (1)에 대입하면 터널 막장의 안정을 위한 상한치 이론의 해가 얻어지게 된다.

$$N_\alpha + N_\gamma (K_P - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_P - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{S.F.}}{\sigma_c} + 1 \quad (13)$$

여기서, K_P 는 수동토압계수, σ_c 는 일축압축강도(unconfined compression strength)이며, N_α 와 N_γ 는 하중계수(weighting coefficient)로 식 (14)와 (15)로 표현되며 내부 마찰각의 함수로 그림 2에서 보인 바와 같이 비선형적인 관계를 가진다.

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

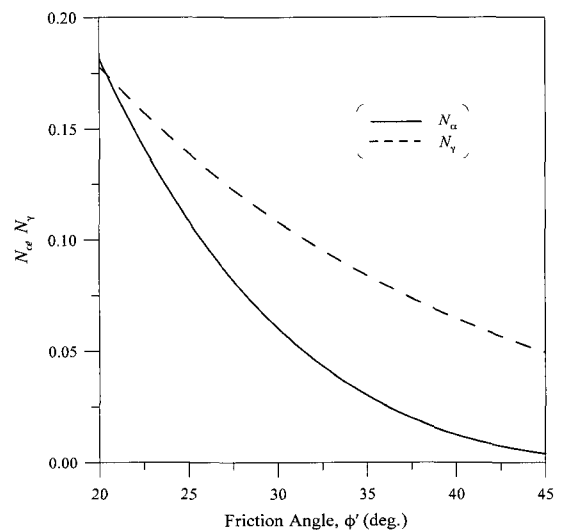


그림 2. 내부 마찰각에 따른 하중계수

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

3. 한계 평형법에 의한 막장의 지보압 산정

한계 평형법에서는 우선 파괴 메카니즘 즉, 파괴면의 형상과 위치를 가정하여야 한다. 파괴면이 결정되면 파괴면으로 둘러싸인 강체를 자유 물체화하고 그 물체에 작용하는 모든 힘들이 정적 평형상태에 있다고 가정하여 힘과 모멘트의 평형 방정식을 적용함으로써 가정된 파괴 메카니즘에 대한 파괴하중을 구한다. 일련의 유사형상의 파괴 메카니즘을 가정하여 얻어지는 최소 안전율에서의 파괴하중을 근사하중으로 본다. 본 고에서는 3차원으로 해석한 썩기해석(wedge analysis) 및 2차원으로 해석한 두 가지 방법의 절편법으로 강관 다단 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 썩기해석

본 해석에서는 터널의 원형단면을 같은 면적을 가진 정사각형으로 모델링 하였다(그림 3). 터널 막장 전방의 썩기에 작용하는 힘은 그림 4와 같다.

썩기의 경사면에 작용하는 전단력(T_1)과 수직면에 작용하는 전단력(T_2)은 다음 식과 같다.

$$T_1 = C_1' + N_1' \tan \phi' = c' \frac{D_{eq}^2}{\sin \theta} + N_1' \tan \phi' \quad (16)$$

$$T_2 = C_2' + N_2' \tan \phi' = c' \frac{D_{eq}^2}{2 \tan \theta} + \frac{K_0 \gamma' D_{eq}^3}{6 \tan \theta} \tan \phi' \quad (17)$$

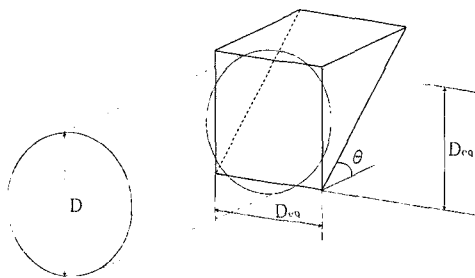


그림 3. 썩기해석에 의한 파괴 메카니즘

여기서, D_{eq} 는 등가 터널직경이고, K_0 는 정지토압계수로 본 고에서는 Jaky의 공식을 적용하였다.

$$D_{eq} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D \quad (18)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (19)$$

힘의 평형조건에 의해 썩기의 경사면에 작용하는 유효 수직력(N_1')과 터널 막장의 지보력(P)을 구할 수 있으며, 터널 막장의 지보압(σ_T)은 지보력을 터널 막장의 단면적으로 나누어 구할 수 있다.

$$N_1' = (W' - C_1' \sin \theta - 2T_2 + S.F._z) \frac{\cos \phi'}{\cos(\theta - \phi')} \quad (20)$$

$$\sigma_T = \left[\frac{N_1'}{\cos \phi'} \sin(\theta - \phi') - C_1' \cos \theta + S.F._x \right] / D_{eq}^2 \quad (21)$$

3.2 절편법 1(Slice Method 1)

절편법 1에서는 그림 5와 같이 파괴면을 logarithmic spiral로 가정하여 터널 막장의 지보압을 산정하였다. 'O' 점으로부터 파괴면까지의 거리는 식 (22)와 같이 정의되고 하나의 절편에 작용하는 힘은 그림 6에 보이는 바와 같다.

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi'} \quad (22)$$

여기서, r_0 는 θ 가 '0'일 때의 spiral의 반경이며 θ 는 라디안(radian)으로 표시된다. logarithmic spiral에서는 그림 5에서 보이는 바와 같이 radial line과 spiral line의 교점에서 곡선에 수직인 선과 radial line이 ' ϕ' '의 각도를 이룬다. 이 특성과 식 (22)에 의해서 그림 5에서의 'B' 값이 결정되면 주어진 지반조건에서 'O' 점의 위치 및 logarithmic spiral의 형상이 결정된다.

파괴면에서 유발전단강도가 전부 발휘된다고 가정하

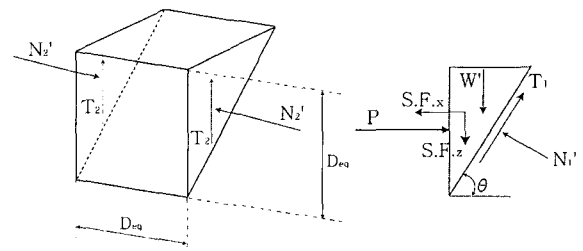


그림 4. 썩기에 작용하는 힘

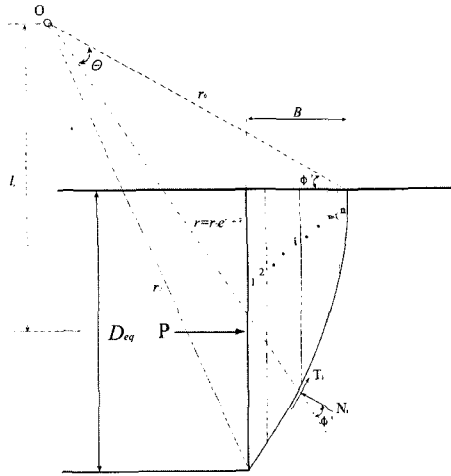


그림 5. 절편법 1에 의한 파괴 메카니즘

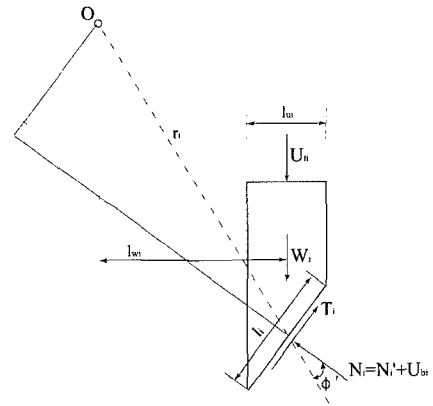


그림 6. 절편법 1에서 절편 i에 작용하는 힘

면 절편 i 에 작용하는 전단력(T_i)은 다음과 같다.

$$T_i = c'l_i + (N_i - U_{bi})\tan\phi' = N_i \tan\phi' + (c' - u_{bi} \tan\phi')l_i \quad (23)$$

이 때, u_{bi} 와 u_{ti} 는 각각 절편 i 의 저면과 상부면에 작용하는 수압으로서 막장의 안정에 필요한 지보압의 산정에 큰 영향을 미친다. 따라서 수치해석(침투류해석)을 통한 각 절편에서의 수압의 정확한 예측이 필요하다. 막장의 지보력(P)은 'O' 점에 대하여 모멘트 평형으로 구해질 수 있으며 이 절편법은 2차원 해석이므로 지보압은 지보력을 등가 터널직경으로 나누어 구해진다.

$$\sigma_T = \left[\frac{1}{l_p} \left\{ \sum (W_i + u_{ti}l_{wi})l_{wi} + \sum u_{bi}l_i r_i \tan\phi' \cos\phi' - \frac{c' \cos\phi'}{2 \tan\phi'} (r_d^2 - r_o^2) \right\} \right] / D_{eq} \quad (24)$$

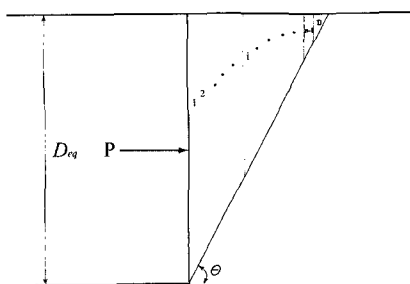


그림 7. 절편법 2에 의한 파괴 메카니즘

3.3 절편법 2(Slice Method 2)

절편법 2에서는 그림 7에서와 같이 파괴면을 직선으로 가정하여 터널 막장의 지보압을 산정하였다. 하나의 절편에 작용하는 힘은 그림 8에서 보인 바와 같다.

절편법 1에서와 같이 파괴면에서 유효전단강도가 전부 발휘된다고 가정하여 전단력(T_i)는 다음과 같다.

$$T_i = c'l_i + (N_i - u_{bi}l_i)\tan\phi' \quad (25)$$

또한 식 (26)과 같이 절편력의 합력의 방향은 수평이라고 가정하였다.

$$X_R - X_L = 0, E_R - E_L \neq 0 \quad (26)$$

수직방향으로 힘의 평형을 고려하고 정리하면 미끄러짐 면에 작용하는 수직력(N_i)은 다음과 같다.

$$N_i = \frac{[W_i + u_{ti}l_i \cos\theta - (c'l_i \sin\theta - u_{bi}l_i \sin\theta \tan\phi')]}{\cos\theta(1 + \tan\theta \tan\phi')} \quad (27)$$

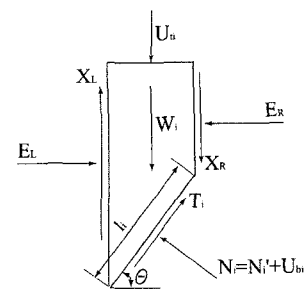


그림 8. 절편법 2에서 절편 i에 작용하는 힘

수평방향으로 힘의 평형을 고려하여 지보력(P)을 얻을 수 있으며 지보압은 절편법 1에서와 같이 등가 터널 직경으로 나누어 얻어지게 된다.

$$\sigma_T = \sum [N_i \sin \theta - \{c' l_i + (N_i - u_{bi} l_i) \tan \phi'\} \cos \theta] / D_{eq} \quad (28)$$

4. 지보압의 산정

본 장에서는 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 지보압을 2절과 3절에서 제안한 방법으로 산정하였다. 지하수위 하에서 물체력은 유효중량에 침투수력을 고려하거나 전중량에 경계면에서의 수압을 고려하는 방법으로 산출된다(이, 1999). 상한치 이론과 썸기해석에 의한 지보압 산정은 전자의 방법으로, 절편법 1과 절편법 2에 의한 지보압 산정은 후자의 방법이 사용되었다. 4.1절에서는 건조한 사질토 지반에 대해 지보압을 산정하였으며, 4.2절에서는 정상류 상태의 지하수조건에서 막장에 작용하는 침투수력을 고려하여 지보압을 산정하였다. 4.3절에서는 연계해석을 통해 4.2절에서 산정된 지보압을 검증하였고 투수계수의 이방성이 터널 막장에 작용하는 침투수압에 미치는 영향을 고려하였다. 해석대상지반은 사질토 지반을 사용하였으며, 본 해석에 사용된 물성치는 표 1에서 보인 바와 같다. 해석은 직경 5.0m(토피고=15.0m)인 원형 터널을 대상으로 하였고, 강관 다단 그라우팅의 시공범위는 상부 반단면으로 하였으며, 터널 라이닝 및 강관 다단 그라우팅 영역은 불투수 경계면으로 설정하였다.

4.1 건조한 지반에서의 막장 지보압

지반의 건조단위중량(γ_d)을 고려하여 산출한 각 방법별 터널 막장의 지보압은 그림 9에서 보인 바와 같다. 강관 다단 그라우팅에 의한 보강이 실시되지 않은 경우,

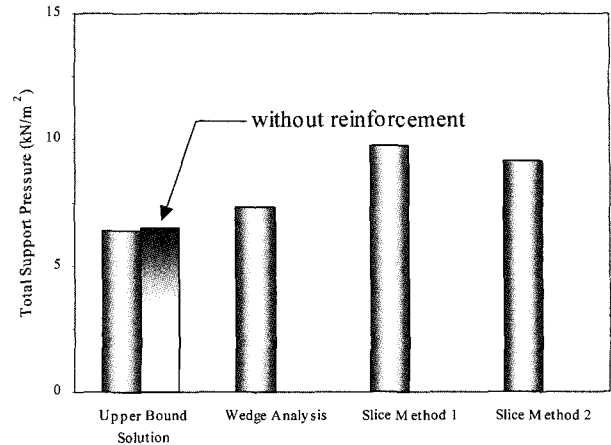


그림 9. 건조한 지반에서 막장 지보압

Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치 이론에 의한 결과도 함께 도시되어 있다. 그림 9에 보인 바와 같이 절편법 1과 절편법 2에 의한 지보압이 상대적으로 큰 값을 보이는데, 이는 이들 방법이 3차원적인 효과를 고려하지 못했기 때문이라고 사료된다. 또한 상한치 이론에 의한 결과가 가장 작은 지보압을 보이고 있는데, 이는 상한치 이론이 파괴순간의 에너지 평형조건으로 파괴하중을 산출하는 불안정 이론이기 때문이다. 이 상한치 이론에 의한 지보압을 보강이 없을 때 Leca와 Dormieux(1990)가 제안한 상한치 이론의 값과 비교하였을 때 지보압의 감소는 크지 않았다. 본 해석에서는 약 2%의 감소가 발생하였다. 이는 그림 10에서 보인 바와 같이 강관 다단 그라우팅에 의해 이동블록의 체적과 겉 표면적이 모두 감소하여 외부하중에 의한 힘과 내부소산력이 모두 감소하나 외부하중에 의한 힘의 감소가 내부소산력의 감소보다 약간 크기 때문이라고 사료된다. 강관 다단 그라우팅의 효용성을 검증하기 위해 건조한 지반에 대해 3차원 유한요소해석을 실시하여 터널 굴착에 의해 막장 전방 1.0m에서 발생한 변위를 그림 11에 도시하였다. 강

표 1. 해석에 사용된 물성치

	지 반	그라우팅	강관	숏크리트
탄성계수(kN/m^2)	49,000	1,960,000	20,600,000	14,700,000
포아송 비	0.35	0.25	0.167	0.167
단위중량(kN/m^3)	건조단위중량 (γ_d)=15.2	22.56	77.01	22.56
	포화단위중량 (γ_{sat})=19.3			
	수중단위중량 (γ')= 9.5			
점착력(kN/m^2)	0.0	98.1	-	-
마찰각(deg.)	35.0	35.0	-	-
투수계수(m/sec)	1.0×10^{-5}	-	-	-

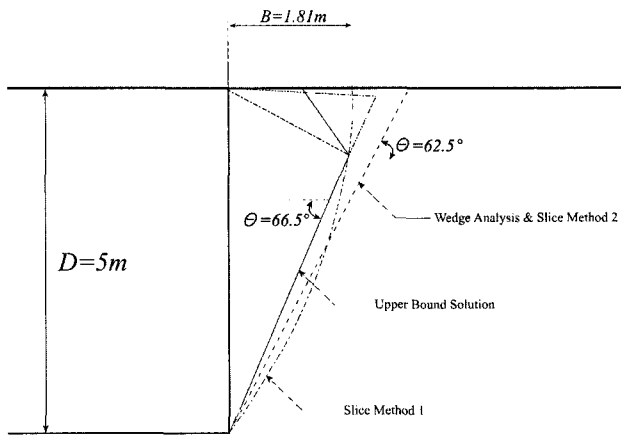


그림 10. 각각의 방법에 의한 파괴면

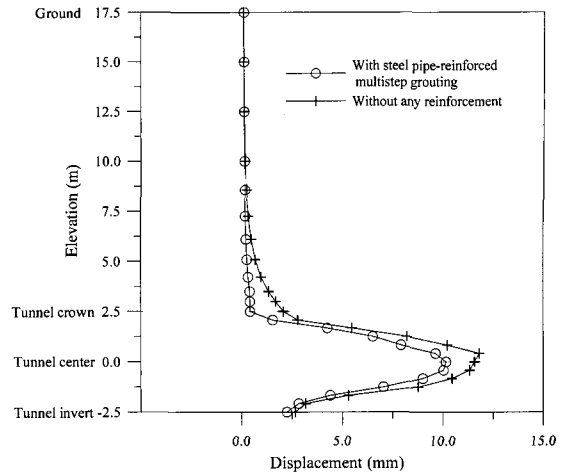


그림 11. 터널 막장 전방 1.0m에서 변위

관 다단 그라우팅으로 보강된 경우 터널 천단부에서 변위가 급격히 감소함을 알 수 있으며, 본 결과로부터 강관 다단 그라우팅에 의한 보강은 터널 상방향으로의 변형의 진행을 경감시킬 수 있음을 알 수 있다.

4.2 정상류 흐름시의 막장 지보압

본 논문에서는 정상류 상태의 지하수조건에서 그림 12 및 표 2와 같이 터널직경(D)에 대한 그라우팅 보강길

표 2. 침투수력 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

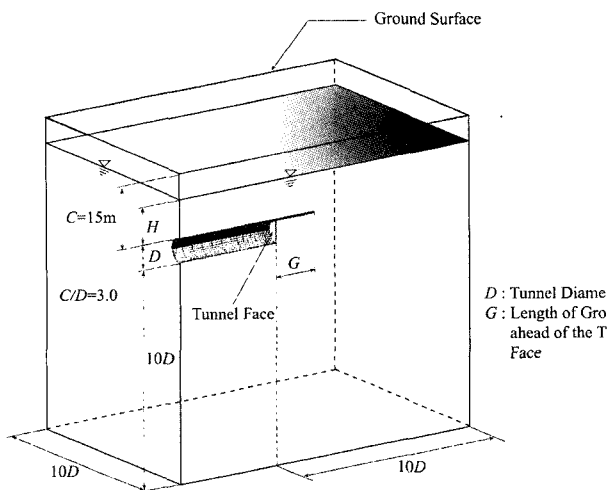
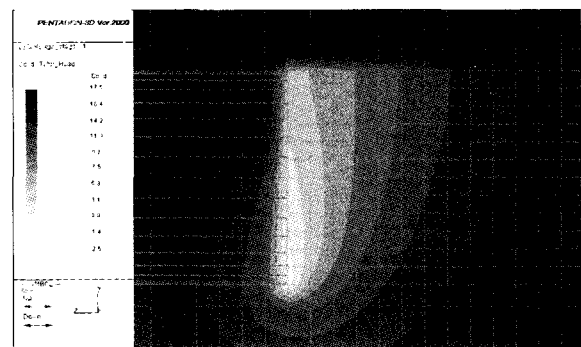
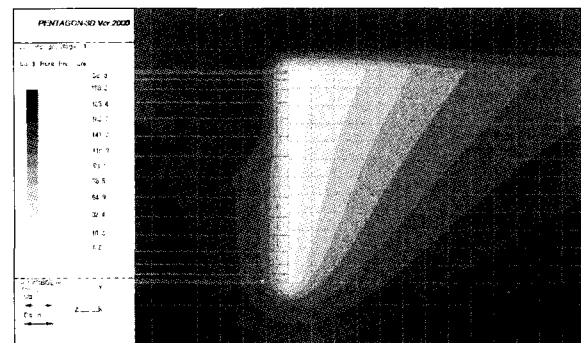


그림 12. 지하수 흐름해석을 위한 3차원 모델링

이(G)의 비(G/D) 및 터널직경에 대한 지하수위(H)의 비(H/D)를 각각의 조건변화에 따라 9개의 경우에 대해서 3차원 지하수 흐름해석을 실시하였으며, 적용 프로그램은 PENTAGON-3D(1998)이다. 본 지하수 흐름해석시 필요한 물성치는 지반의 투수계수이며, 경계조건으로는 그라우팅이 해석대상지반에 비해 상대적으로 투수계수가 매우 작으므로 터널 라이닝 및 그라우팅 영역은 불투수 경계면을 적용하였으며, 터널 막장으로만 지하수 흐



(a) 전수두(m)



(b) 수압(kN/m²)

그림 13. 터널 막장 주위의 전수두와 수압 분포 (Case 22)

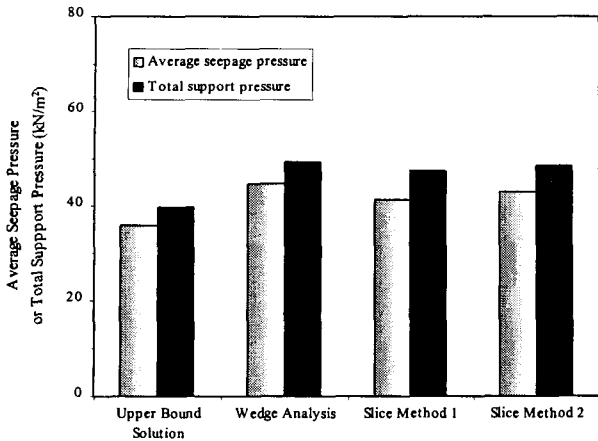


그림 14. 평균 침투수압과 막장 지보압 (Case 22)

를 허용하였다.

터널 막장에 작용하는 침투수압을 결정하기 위한 막장 주위의 전수두와 수압의 분포는 그림 13에서 보인 바와 같다. 침투수압은 이 등(2001)이 제시한 방법에 의해 막장면과 파괴면과의 전수두의 차로부터 동수경사를 구하여 침투력을 직접적으로 산출하거나(상한치 이론 및 썸기해석), 각 절편 경계면에서의 수압을 직접 측정(절편법 1 및 절편법 2)하여 고려하게 된다.

그림 14는 Case 22에 대하여 계산된 터널 막장에 작용하는 평균 침투수압과 막장의 안정을 위한 총 지보압을 나타낸 것으로서 포화된 지반에서 막장에 작용하는 침투수압이 총 지보압의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 이로부터 터널 막장으로의 침투수가 막장의 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, 상한치 이론에 의한 평균 침투수압이 가장 작은 값을 보이는데 이는 침투수압을 산정함에 있어 예상 파괴토체의 volume이 가장 작기 때문이라고 사료된다(그림 10 참조).

지하수위의 변화, 즉 H/D의 변화에 따른 터널 막장에 작용하는 평균 침투수압을 그림 15에 도시하였다. 막장에 작용하는 평균 침투수압은 H/D비에 대하여 선형적인 관계를 보여주고 있다. 터널 심도에서의 정수압에 대한 평균 침투수압의 비를 백분율로 표시한 것을 침투압비(seepage pressure ratio)로 정의하였으며, 본 침투압비는 그림 16에서 보인 바와 같이 각 방법 별로 일정한 값을 나타내고 있다. 그림 17은 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.

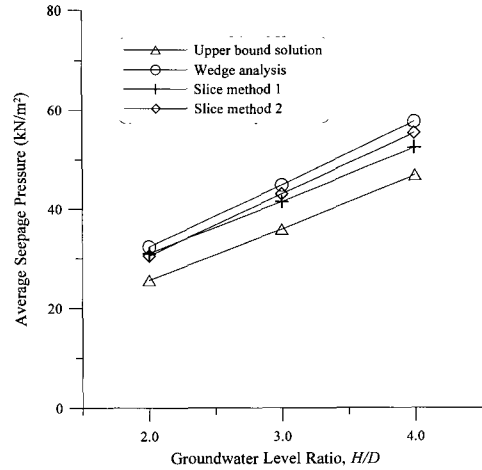


그림 15. 지하수위에 따른 평균 침투수압 (G/D=2.0)

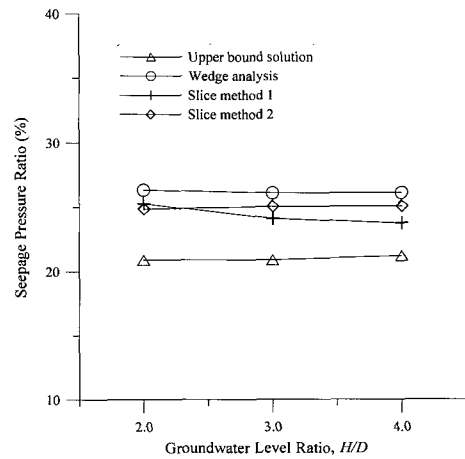


그림 16. 지하수위에 따른 침투압비 (G/D=2.0)

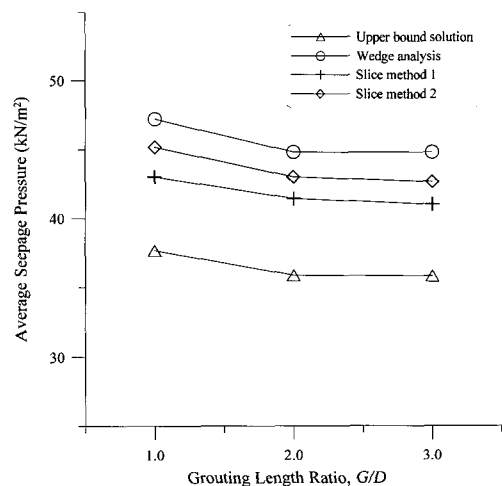


그림 17. 그라우팅 길이에 따른 평균 침투수압 (H/D=3.0)

그림 18은 강관 다단 그라우팅에 의한 보강 여부에 따른 터널 막장에 작용하는 평균 침투압비를 보인 것으로 무보강시의 연구결과는 이 등(2001)에 의하여 산출

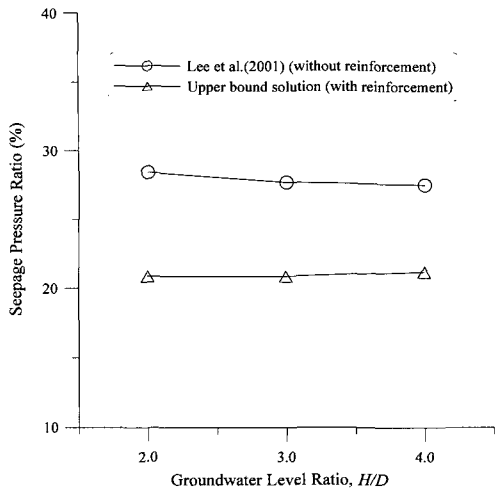


그림 18. 강관 다단 그라우팅이 침투압비에 미치는 영향

된 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 막장에 작용하는 침투압비는 무보강시 약 28% 정도이며, 보강이 실시된 경우에는 약 21% 정도로서 강관 다단 그라우팅에 의해 터널 막장에 작용하는 침투수력을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

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. 연계해석을 위해서 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 이용하였으며, 해석에 적용한 지반물성치 및 해석단면은 각각 표 1 및 그림 12에서와 같다. 해석은 터널의

1회 굴진장을 1.0m로 가정하여 20.0m까지의 굴착을 수행하였다. 강관은 약 0.5m 간격으로 배열하였으며 beam 요소로 모델링을 하였다. 슛크리트는 0.15m의 두께로 설치하였으며, 강관다단 그라우팅의 보강길이는 터널직경의 2배인 10m로 설정하였다. 그림 19는 해석에 사용된 유한 요소망과 변위 경계조건을 도시하고 있다. 터널막장의 안정을 평가하기 위해 최종 굴착 단계 전에 변위를 초기화하고 최종 단계의 굴착을 시행한 후 초기단계에서 정수압의 50%를 터널 막장면에 가하고 단계별로 지보압을 감소시키며 터널 막장 중앙점에서의 터널 축방향 변위를 검토하였다.

그림 20은 각각의 막장 지보압에 따른 터널 막장 전방의 소성영역을 나타내고 있다. 막장 지보압이 감소함에 따라 소성영역이 증가하고 있는데, 특히 지보압이 51.50 kN/m²이하에서 소성영역이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이로부터 터널 막장의 안정을 위해서는 51.50kN/m²이상의 막장 지보압이 필요함을 알 수 있다.

그림 21은 유한요소의 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 썩기해석 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 22에서 보인 바와 같

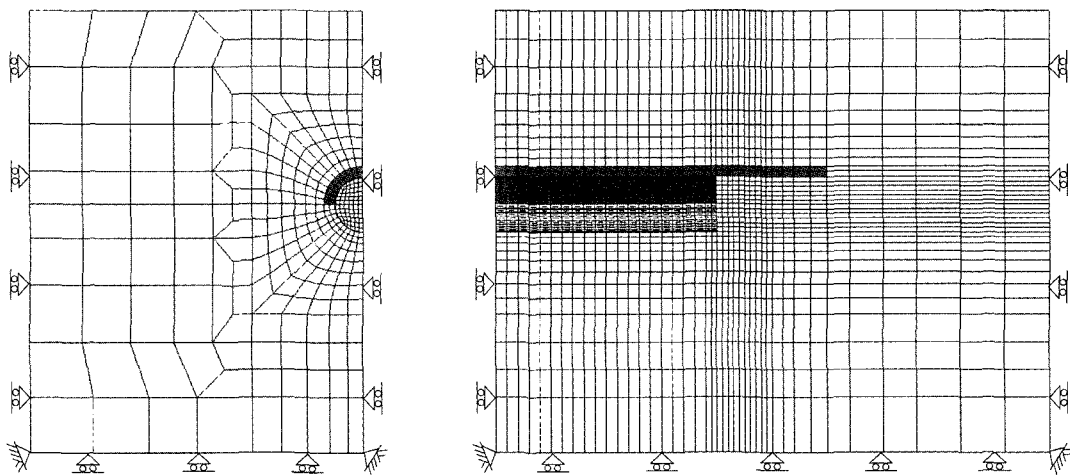
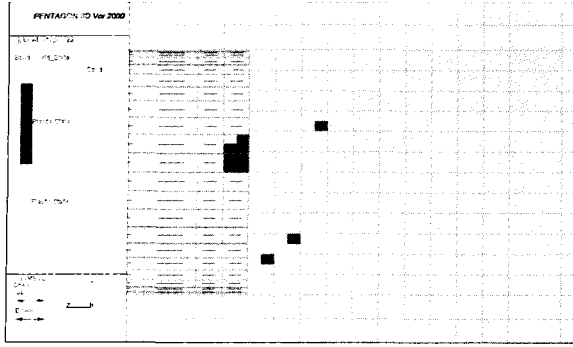
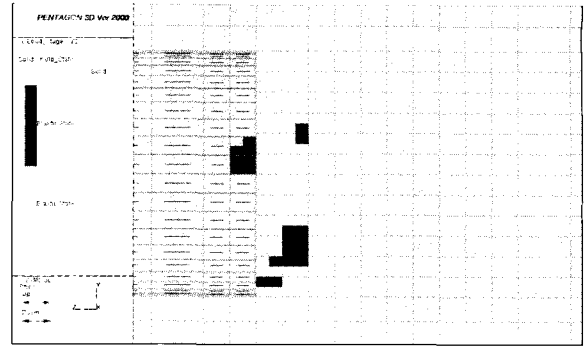


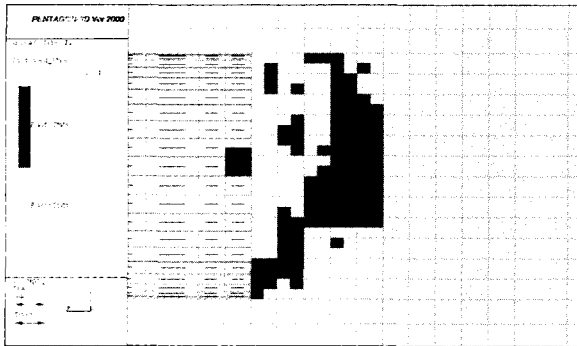
그림 19. 연계해석에 이용된 유한 요소망과 변위 경계조건



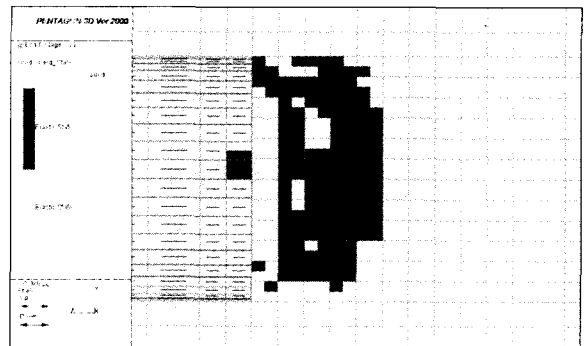
(a) 지보압: 85.84kN/m²



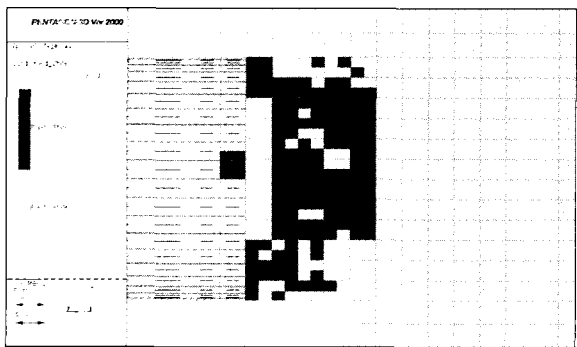
(b) 지보압: 68.67kN/m²



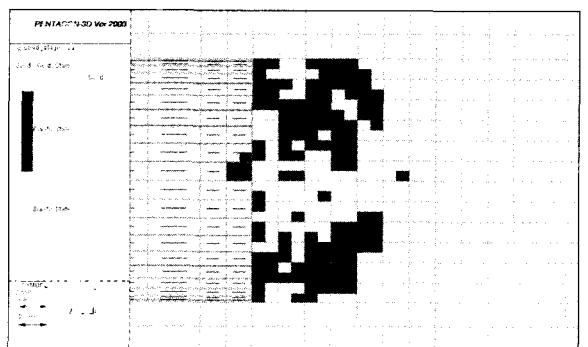
(c) 지보압: 51.50kN/m²



(d) 지보압: 47.21kN/m²



(e) 지보압: 42.92kN/m²



(f) 지보압: 34.34kN/m²

그림 20. 지보압에 따른 터널 막장 전방의 소성영역 (Case 22)

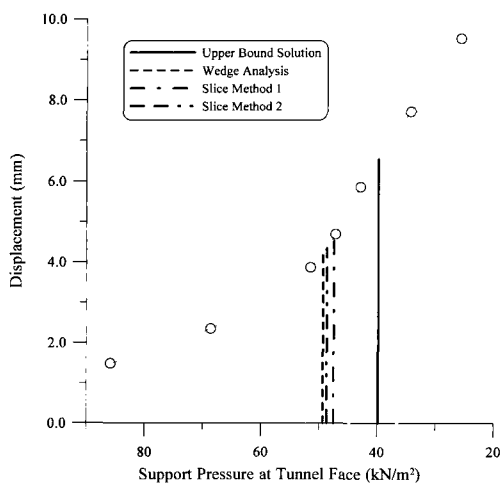


그림 21. 막장 지보압에 따른 터널 축방향 변위 (Case 22)

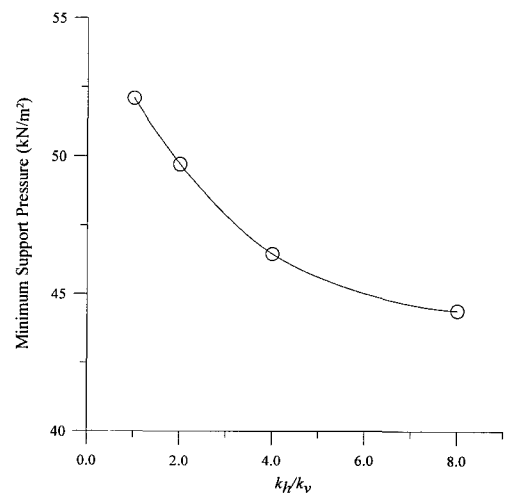


그림 22. 투수계수의 이방성(k_H/k_V)에 따른 막장 지보압 (Case 22)

다. 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 침투수력이 감소하기 때문이다.

6. 결론

상한치 이론과 한계 평형법의 개념으로 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널 막장의 안정을 위한 지보압을 산출하였으며, 정상류 상태의 지하수 흐름조건에서는 수치해석을 실시하여 터널 막장에 작용하는 침투수압을 산출하였다. 또한 역학해석과 지하수 흐름해석의 연계 해석을 통하여 각각의 방법들로 산출된 지보압과 비교하고 투수계수의 이방성이 터널 막장에서의 침투수력 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 침투수압은 막장의 안정성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 강관 다단 그라우팅으로 보강된 경우, 한계 평형법에 근거하여 산출된 터널 막장에 작용하는 침투수압은 동일한 지하수위일 때 정수압의 약 25%에 이른다.

- (3) 강관 다단 그라우팅에 의한 보강은 터널 막장에 작용하는 침투수압을 무보강시에 비해 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.
- (4) 연계해석을 통해 본 연구에서 제안된 터널 막장의 안정을 위한 지보압 산출방법의 타당성을 입증하였다. 또한 횡방향 투수계수가 종방향 투수계수보다 상대적으로 클수록 막장 지보압은 감소함을 보였다.

참고 문헌

1. 이인모, 남석우, 안재훈(2001), "침투력이 터널 막장의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호, pp.165-172.
2. 이인모(1999), 토질역학의 원리, 도서출판 새문
3. 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.
4. 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.
5. Emerald Soft Consulting Co. (1998), *PENTAGON-3D User Manual*, Seoul, Korea.
6. 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.
7. Leca, E. and Panet, M.(1988), "Application du Calcul à la Rupture à la Stabilité 여 Front de Taille d'un Tunnel", *Revue Francaise de Geotechnique*, Vol.40, No.4, pp.581-606.
8. Schofield, A. N.(1980), "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations", *Geotechnique*, Vol.30, No.3, pp.227-288.

(접수일자 2003. 1. 21, 심사완료일 2003. 5. 9)