

상한치 이론에 근거한 터널 막장의 안정성 연구

Evaluation of tunnel face stability based on upper bound theorem

이인모*¹, 이재성*², 남석우*³

Lee, In-Mo · Lee, Jae-Sung · Nam, Seok-Woo

Abstract

Face stability of a tunnel is a main concern during tunnel excavation. However, there has been only a few studies on this problem while a lot of researches on the support systems have been carried out. In addition, when tunneling is performed below the groundwater level, the groundwater flows into the tunnel so that the seepage forces generated on the tunnel face might give rise to a serious potential for the face instability. In this study, the face stability was evaluated by simultaneously considering two factors: one is the effective stress calculated by upper bound theorem; the other is the seepage forces acting on the tunnel face obtained by numerical analysis under the condition of steady-state groundwater flow. Tunneling in difficult geological conditions often requires auxiliary techniques to guarantee safe tunnel excavations and/or to prevent damage to structures and services around the tunnel. The steel pipe-reinforced multistep grouting has been recently applied to tunnel sites in Korea. Face stability of a tunnel with the steel pipe-reinforced multistep grouting was also analyzed in this study.

Keywords : Face stability, upper bound theorem, seepage force, steel pipe-reinforced multistep grouting

요 지

터널 시공 시 막장의 안정은 주요 관심사이다. 그러나, 터널 지보재에 비해 상대적으로 터널 막장의 안정성 문제는 그리 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 또한 지하수위 하에서 터널 시공 시 터널 내로 지하수 흐름에 의해 발생된 침투수력은 막장의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 두 가지 요소를 고려하여 터널 막장의 안정성을 평가하였다. 하나는 극한이론 중 상한치 이론으로 산출된 유효응력이며, 다른 하나는 정상류 흐름조건에서 수치해석으로부터 산출된 침투수력이다. 열악한 지반조건에서 터널 시공 시 터널의 안정과 인접 구조물의 손상을 방지하기 위해 보조공법이 적용된다. 강관 다단 그라우팅 공법은 근래 국내에서 적용되고 있는 보조공법 중의 하나이다. 본 논문에서는 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정성도 함께 평가되었다.

주요어 : 막장 안정성, 상한치 이론, 침투수력, 강관다단 그라우팅

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

*3 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사후 과정

1. 서론

터널 막장의 안정성은 Broms와 Bennermark (1967)의 실내압출시험 (laboratory extrusion test)과 현장 자료에 의해 평가되어 온 이래로 몇몇 학자들에 의해 연구가 진행되었다. 이중 Leca와 Pannet (1988)은 극한 이론 (limit theorem) 중 안정 이론 (safe theorem)인 하한치 이론 (lower bound theorem)으로 터널 막장의 안정에 필요한 지보압을 산정하였다. 또한 Leca와 Dormieux (1990)는 극한이론 중 불안정 이론 (unsafe theorem)인 상한치 이론 (upper bound theorem)으로 터널 막장의 지보압을 산정하였으며, Chambon과 Corté (1994)는 원심모형실험을 통해 Leca와 Dormieux (1990)가 산정한 터널 막장의 파괴면과 막장 지보압의 타당성을 입증하였다. 이 등 (2001)은 Leca와 Dormieux (1990)가 제안한 상한치 이론에 의한 막장 지보압에 추가로 지하수위 하에서 터널 막장에 작용하는 침투수력을 수치해석 및 실내시험으로 산출하였다. 본 논문에서는 이에 추가로 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정을 위한 지보압을 상한치 이론으로 산출하여 강관 다단 그라우팅의 터널 막장의 안정성에 미치는 효과를 검토하였다.

2. 상한치 이론을 통한 터널 막장의 지보압

극한이론은 1950년대에 확립된 소성론이며 지반안정 문제에 광범위하게 적용되어 왔다. 이 해법은 지반 거동이 강체-완전소성이며 파괴상태에서 특별한 변형율장 및 응력장이 존재하는 것을 전제로 한다. 극한이론에는 불안정 이론과 안정 이론이 있는데 이들 두 이론이 각각 실제 파괴하중에 대한 상한치 (upper bound value)와 하한치 (lower bound value)를 주므로 불안정 이론을 상한치 이론, 안정이론을 하한치 이론이라고 한다.

상한치 이론은 외부하중에 의한 일과 지반 내부에서 소산된 에너지가 같게 되는 동적허용속도장 (dynamic admissible velocity field)이라고 하는 파괴순간의 운동학적 파괴 메카니즘을 가정한다. 이 파괴 메카니즘에 대한 에너지 평형조건으로부터 산출된 파괴하중은 실

제 파괴를 야기할 수 있는 파괴하중보다 크다는 것이다. 반면에 하한치 이론은 지반내에서 외부하중과 평형을 이루고 어디에서도 지반의 파괴규준을 위반하지 않는 정적 허용응력장 (statically admissible stress field)을 가정하고 이 응력장에서 파괴직전 응력의 평형조건으로부터 산출된 파괴하중은 실제 파괴하중보다는 크지 않다. 그러므로 파괴하중의 정해는 하한치 이론과 상한치 이론에 의한 값들 사이에 존재하게 된다. 본 고에서는 Leca와 Dormieux (1990)가 제안한 상한치 이론 중 두 개의 콘 블록에 의한 파괴 메카니즘을 수정하여 지하수 흐름을 고려한 터널 막장의 안정에 필요한 지보압을 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 경우와 보강이 없는 경우에 대해 각각 산출하였다.

2.1 보강이 없는 터널

상한치 이론에 근거한 터널 막장의 안정성 해석에서는 σ_s/σ_c , σ_T/σ_c , 그리고 v/σ_c 등 세 개의 하중계수 (loading parameter)가 사용된다. 또한 지하수위 하에서는 터널의 막장에 작용하는 침투수압 ($\sigma_{S,F}$)을 고려하여 $\sigma_{S,F}/\sigma_c$ 이 포함된다. 이 때, σ_s 는 지표면에 가해지는 상재압력, σ_c 는 지반의 일축압축강도, 그리고 σ_T 는 터널 내부에서 가해지는 막장 지보압이며, D 는 터널직경을 나타낸다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 두 개의 콘 블록에 의한 파괴 메카니즘에 침투수압의 항을 첨가하였다. 상한치 이론에 의한 터널 막장의 안정은 식 (1)을 만족시켜야 한다.

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

여기서, P_v 는 내부소산력을 나타내고 P_e 는 외부하중에 의한 힘으로 터널 막장에 작용하는 침투수압에 의한 힘 $P_{S,F}$ 를 포함하여 지표면에 가해진 상재압력에 의한 P_S , 막장 지보압에 의한 P_T , 그리고 두 개의 콘 블록의 무게에 의한 힘 F_v 으로 이루어져 있다.

$$P_e = P_T + P_S + P_v + P_{S,F} \quad (2)$$

식 (2)의 각 항들은 아래의 식들과 같이 각각의 힘이

작용하는 면적이거나 부피에 대해 적분하여 얻어진다.

$$P_T = \iint_{\Sigma_1} (-\sigma_T e_z) \cdot (V_1 e_{z1}) d\Sigma$$

$$= -\frac{\pi D^2 \cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \frac{R_A}{R_C^2} \sigma_T V_2 \quad (3)$$

$$P_S = \iint_{\Sigma_2} (-\sigma_S e_y) \cdot (V_2 e_{z2}) d\Sigma$$

$$= \frac{\pi D^2 \sin^2 \phi'}{4 \cos^2 \phi'} \left(R_C^2 \frac{\cos^2 \phi'}{\sin \phi'} \frac{1}{\cos(\alpha + \phi')} - 2 \frac{C}{D} \right)^2 \sigma_S V_2 \quad (4)$$

$$P_v = \iiint_{B_1} (-\gamma e_y) \cdot (V_1 e_{z1}) dV + \iiint_{B_2} (-\gamma e_y) \cdot (V_2 e_{z2}) dV$$

$$= \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{3} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \cos^2(\beta + \phi')} R_C - \frac{\left(\frac{\cos^2 \phi'}{\cos(\alpha + \phi')} R_C^2 - 2 \frac{C}{D} \sin \phi' \right)^3}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} R_C^2 \right] \gamma D V_2 \quad (5)$$

$$P_{S.F.} = \iint_{\Sigma_1} (\sigma_{S.F.} e_z) \cdot (V_1 e_{z1}) d\Sigma$$

$$= \frac{\pi D^2 \cos \alpha \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \frac{R_A}{R_C^2} \sigma_{S.F.} V_2 \quad (6)$$

이 때, B_1 과 B_2 는 막장에 형성된 두 개의 파괴블록을 나타낸 것이다. V_1 및 V_2 는 각 블록의 속도장에서의 속도에 대한 스칼라 양이며, e_n 는 아래첨자에 명기된 축에 대한 단위벡터를 의미한다. 또한 C 는 터널 천단에서부터 지표면까지의 거리이다. 막장에 작용하는 침투수압을 산정함에 있어, 일반적으로 터널 막장에 작용하는 침투수력은 수평분력이 수직분력보다 막장의 안정성에 더 큰 영향을 미치므로, 본 고에서는 침투수력의 수평분력만을 고려하였다. 식 (2)에 의해 외부하중에 의한 힘은 다음 식과 같다.

$$P_e = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\frac{R_E^2}{\cos^2(\alpha + \phi')} \sigma_S - \frac{\cos \alpha}{R_C^2} R_A \sigma_T \right. \\ \left. + \left(\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_C - \frac{R_E^3}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right) \frac{\gamma D}{3} \right] \quad (7)$$

여기서,

$$R_A = \frac{\sqrt{\cos(\alpha - \phi') \cos(\alpha + \phi')}}{\cos \phi'} \quad (8)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \phi') \cos(\alpha + \phi')}{\sin 2\phi'} \quad (9)$$

$$R_C = \frac{\cos(\alpha + \phi') \left[\frac{\sin(\beta - \phi')}{\sin(\beta + \phi')} \right]^{1/2}}{\cos \phi'} \quad (10)$$

$$R_D = \frac{\sin \beta}{\sin \phi' \sin(\beta + \phi')} \quad (11)$$

$$R_E = \frac{\cos^2 \phi'}{\cos(\alpha + \phi')} R_C - \frac{2C}{D} \sin \phi' \quad (12)$$

에너지는 이동블록 B_1 , B_2 의 걸 표면적과 불연속면 Σ_{12} 를 따라 소산된다.

$$P_v = P_{1v} + P_{2v} + P_{12v} \quad (13)$$

각 표면에서의 소산된 에너지는 다음 식들과 같다.

$$P_{1v} = \iint_{B_1} \frac{dP_v}{d\Sigma} d\Sigma$$

$$= \frac{\pi D^2 \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \phi'} \frac{R_A}{R_C^2} - \cos(\alpha + \phi') \frac{R_C}{R_D} \right] c' \cos \phi' V_2 \quad (14)$$

$$P_{2v} = \iint_{B_2} \frac{dP_v}{d\Sigma} d\Sigma$$

$$= \frac{\pi D^2 \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \left[\frac{\cos^2 \phi'}{\cos^2(\alpha + \phi')} R_C R_D - \frac{R_E^2}{\sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right] c' \cos \phi' V_2 \quad (15)$$

$$P_{12v} = \iint_{\Sigma_{12}} \frac{dP_v}{d\Sigma} d\Sigma$$

$$= \frac{\pi D^2 \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \left[\frac{2 \cos \beta \sin^2 \phi' \cos(\alpha + \phi')}{\sin \beta} \frac{R_D^2}{R_C} \right] c' \cos \phi' V_2 \quad (16)$$

식 (13)에 의해 가정된 파괴 메커니즘에 대한 내부소산력은 결과적으로 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_v = \frac{\pi D^2 \cos^2(\alpha + \phi')}{4 \cos^2 \phi'} \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \phi'} \frac{R_A}{R_C^2} - \frac{R_E^2}{\sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right] c' \cos \phi' V_2 \quad (17)$$

식 (7)과 (17)을 식 (1)에 대입하면 터널 막장의 안정을

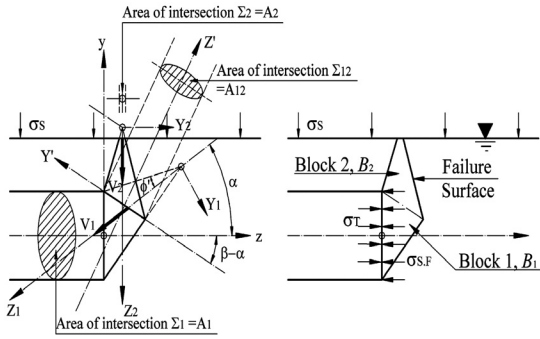


그림 1. 보강이 없는 터널의 막장 파괴 메카니즘

상한치 이론의 해가 얻어진다.

$$N_S \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\mathcal{M}}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{S.F.}}{\sigma_c} + 1 \quad (18)$$

여기서, K_p 는 수동토압계수이며, N_S , N_γ 는 하중계수 (weighting coefficient)로써, 다음 식들과 같이 표현된다.

$$N_S = \frac{1}{\cos \alpha \cos^2 \phi'} \frac{\sin(\beta - \phi') R_E^2}{\sin(\beta + \phi') R_A} \quad (19)$$

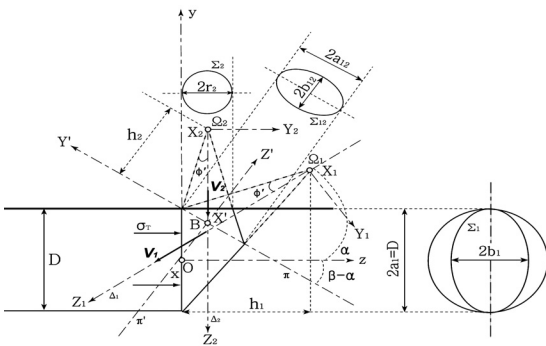


그림 2. 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 파괴 메카니즘

$$N_\gamma = \frac{1}{3} \left[\tan \alpha R_B + \frac{\cos \phi' \cos(\beta + \phi') R_C^3}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi') R_A} - \frac{1}{2 \sin \phi' \cos \alpha \cos^2 \phi' \sin(\beta + \phi') R_A} \frac{\sin(\beta - \phi') R_E^3}{\sin(\beta + \phi') R_A} \right] \quad (20)$$

N_S , N_γ 는 α, β, ϕ' 값에 따른 상수로, 주어진 지반에서 다음 조건일 때 상한치를 나타낸다.

$$\alpha \approx 49^\circ - \frac{\phi'}{2} \quad (21)$$

2.2 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널

강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널 막장의 파괴 메카니즘은 그림 2에서 보인 바와 같다. 해석의 간편성을 위해 강관과 그라우팅은 그림 3에서와 같이 터널 굴진방향과 평행하고 그라우팅 상부의 토압은 그라우팅에 의해 형성된 지반과 강관이 지지한다고 가정하였다.

강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 경우 외부하중에 의한 힘은 지표면에 가해진 상재압력의 영향이 없으므로 다음 식과 같이 3가지 성분으로 구성된다.

$$P_e = P_T + P_\gamma + P_{S.F.} \quad (22)$$

식 (22)의 P_T 와 $P_{S.F.}$ 은 각각 식 (3), (6)과 동일하나 강관 다단 그라우팅으로 인해 이동블록 중 B_2 의 체적의

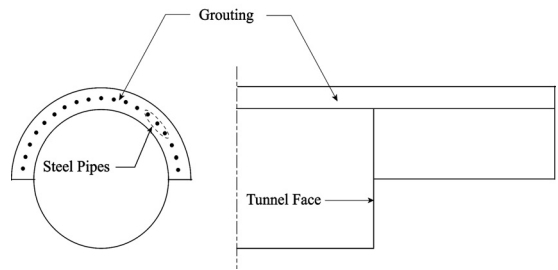


그림 3. 가정된 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널

변화에 의해 큰 블록의 무게에 의한 힘 F_V 는 아래의 식과 같다.

$$P_r = \iiint_{V_1} (-\gamma e_y) (V_1 e_{z1}) dV + \iiint_{V_2} (-\gamma e_y) (V_2 e_{z2}) dV$$

$$= \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{3} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \cos^2(\beta + \phi')} R_C - \frac{1}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} R_E^2 \right] \gamma D V_2 \quad (23)$$

강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정성에서 계수 R_A , R_B , R_C , R_D 는 식 (8)~(11)과 동일하나 계수 R_E 는 다음 식으로 주어진다.

$$R_E = \frac{\sin(\beta - \phi') \cos(\alpha + \phi')}{\sin(\beta + \phi')} \quad (24)$$

외부하중에 의한 힘은 식 (3), (6), 그리고 (23)을 식 (22)에 대입하여 얻어지게 된다.

$$P_c = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \times \left[-\frac{\cos \alpha}{R_C^2} R_A (\sigma_T - \sigma_{S.F.}) + \left(\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_C^2} + \frac{\cos \alpha \cos \phi' \cos(\beta + \phi')}{2 \sin \phi' \sin(\beta + \phi')} R_C - \frac{R_E^2}{2 \sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right) \frac{\gamma D}{3} \right] V_2 \quad (25)$$

내부에너지는 식 (13)과 같이 이동블록 B_1 , B_2 의 겹 표면적과 불연속면 Σ_{12} 를 따라 소산된다. 이동블록 B_2 의 겹 표면적의 감소로 내부소산력은 감소하게 된다. 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장에 대해 내부소산력은 아래의 식과 같다.

$$P_v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \phi')}{\cos^2 \phi'} \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \phi' R_C^2} - \frac{R_E^2}{\sin \phi' \cos^2(\alpha + \phi')} \right] c' \cos \phi' V_2 \quad (26)$$

식 (27)은 보강이 없는 경우 식 (17)과 동일하나 계수 R_E 의 값이 식 (24)로 주어짐을 유의하여야 한다. 식 (25), (26), 그리고 상한치 이론으로부터 터널 막장의 안정을 위한 조건 식 (1)에 의해 막장의 지보압은 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

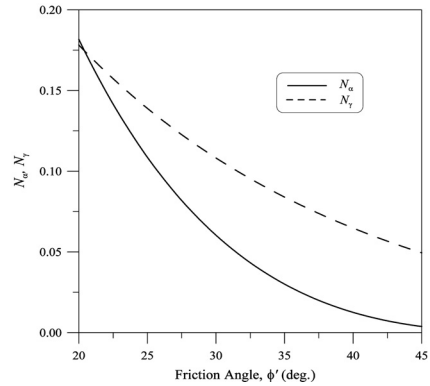


그림 4. 내부 마찰각에 따른 N_α , N_γ

$$N_\alpha + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T - \sigma_{S.F.}}{\sigma_c} + 1 \quad (27)$$

여기서, N_α 와 N_γ 는 각각 보강이 없는 터널의 막장 안정에 대한 N_S 의 식 (19), N_V 의 식 (20)과 동일하나 계수 R_E 의 값은 위에서 언급한 바와 같이 식 (24)에 의해 산정되며, 내부마찰각의 함수로 그림 4에서 보인 바와 같다.

3. 지보압의 산정

본 장에서는 터널 막장의 안정에 필요한 지보압을 2장에서 제안한 상한치 이론의 해로 산정하여, 강관 다단 그라우팅이 터널 막장의 안정에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 터널 막장에 작용하는 침투수력은 지하수의 정상류 흐름조건에서 수치해석으로부터 산출하였다. 해석 대상지반은 사질토 지반으로서 다음의 표 1에서 보인 바와 같은 물성을 갖는다. 터널은 직경 5.0m의 원형터널을 대상으로 하였다.

표 1. 해석대상지반의 물성치

지반종류	사질토
단위중량 (kN/m ³)	$\gamma_d=15.2$
	$\gamma'=9.47$
점착력 (kN/m ²)	0.0
내부 마찰각 (deg.)	35.0

3.1 유효 지보압

강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 경우 터널 막장의 안정을 위한 지보압은 지표면에서 터널 천단까지의 깊이 C 에 영향을 받지 않으나 보강이 없는 터널의 경우 터널의 깊이비 (depth ratio) C/D 값이 0.6이상이면 지표면에 가해진 surcharge나 토피고의 영향이 막장의 지보압과 붕괴형태에 영향을 미치지 않는다. 본 고에서는 C/D 값이 0.6을 넘는 지반에 대해 수행되었다. 표 2는 계산된 터널의 지보압을 나타내고 있는데 건조단위 중량으로부터 산정된 막장의 지보압은 지하수가 존재하지 않는 건조한 지반에서의 지보압을 나타내며, 수증단 위중량을 사용한 경우의 결과는 유효지보압으로 수치해석으로부터 산출된 터널 막장에 작용하는 침투수압과 더해져 지하수가 존재하는 경우의 막장 지보압을 산정하는데 사용된다.

표 2. 상한치 이론의 해로부터 산정된 막장 지보압 (D=5.0m)

	막장지보압 σ_T (kN/m ²)	
	$\gamma_d=15.2$ kN/m ³	$\gamma'=9.47$ kN/m ³
보강이 없는 터널	6.49	4.05
강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널	6.38	3.97

표 2의 결과에서 강관 다단 그라우팅으로 인해 막장 지보압의 감소는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 그림 1과 2에서 보인 바와 같이 강관 다단 그라우팅에 의해 이동블록 B_2 의 체적과 겉 표면적이 모두 감소하여 외부하중에 의한 힘과 내부소산력이 모두 감소하는데, 외부하중에 의한 힘의 감소가 내부소산력의 감소보다 약간 크기 때문이라고 판단된다. 그러나 강관 다단 그라우팅에 의해 막장 상부에서 지표면으로 점진적으로 발전하는 진행성 파괴 (progressive failure)는 크게 방지할 수 있음을 주지하여야 한다.

3.2 터널 막장에 작용하는 침투수압

지하수가 풍부한 지반에서 터널을 시공하는 경우, 터널 주변은 전수두 차에 의해 지하수 흐름이 발생한다.

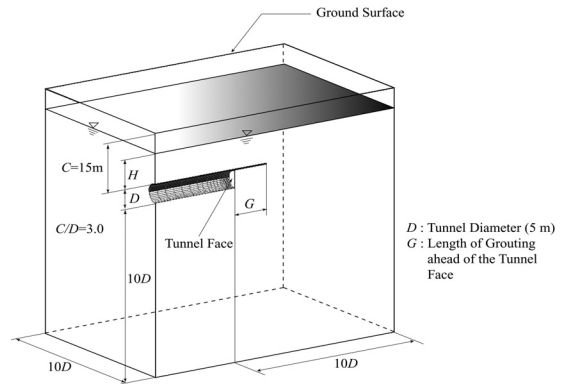
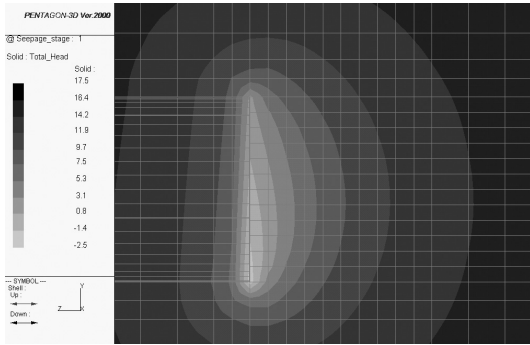


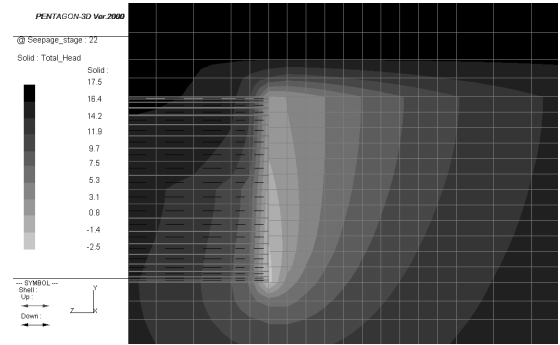
그림 5. 지하수 흐름해석을 위한 3차원 모델링

전수두 차에 의한 지하수 흐름으로 인하여 흙 입자에 가해지는 힘이 침투수력이며, 방향은 등방 투수계수의 지반에서는 지하수 흐름의 방향과 동일하다. 본 해석에서는 터널 굴착으로 인한 터널 막장 주위의 전수두 분포를 수치해석으로 산정해 터널 막장과 파괴면의 전수두 차에 의해 터널 막장에 작용하는 침투수압을 산정하였다. 해석경계조건으로는 초기조건에 동일한 전수두를 해석영역에 주었으며 터널 굴착 후에는 터널 막장에서 수압을 '0'으로 하였다. 본 논문에서는 터널 막장을 통해 지하수의 흐름을 허용한 경우에만 해석을 수행하였음을 밝혀둔다. 그림 5에서와 같이 직경이 5.0m이고 지표면에서 터널 천단까지의 깊이는 15.0m인, 즉 $C/D=3.0$ 인 터널에 대해 지하수위의 높이를 변화시키면서 해석을 수행하여 지하수위의 영향을 검토하였다. 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널의 해석에서는 해석의 간편함을 위해 그라우팅은 불투수층으로 간주하였으며, 터널 막장에서부터 그라우팅의 길이 G 는 10.0m로 가정하였다. 이는 일반적으로 터널 현장에서 G/D 의 값이 2.0을 채택하는 사실에 기인한 것이다.

그림 6은 지하수 흐름 해석으로부터 산출된 터널 막장 주변의 전수두 분포를 보여주고 있다. 침투수의 산정을 위해서는 그림 7에서와 같이 파괴영역을 몇 개의 slice로 나누는 후, 터널 중앙단면의 전수두로부터 각 slice내의 파괴면과 터널 막장의 전수두 차를 구한다. 이로부터 각 slice에 작용하는 침투수압을 구한 후, 그 결과 막장에서 파괴면 전체에 작용하는 평균침투수압을 산정하게 된다.



(a) 보강이 없는 터널



(b) 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널

그림 6. 터널 막장 주위의 전수두 분포 ($H/D=3.0$ 인 경우)

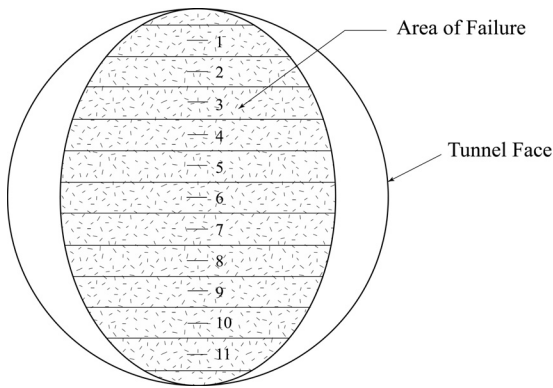


그림 7. 터널 막장에 작용하는 침투수압의 산정

H/D 비의 변화에 따른 터널 막장에 작용하는 평균 침투수압과 수중단위중량으로부터 산정된 유효지보압을 더한 막장 지보압은 그림 8에 표시하였다. 보강이 없는 터널의 경우, 이 등 (2001)이 해석한 결과를 인용하였다. 건조한 지반에서 막장 지보압과 비교해서 터널 막장에 작용하는 침투수압이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 또한 터널 막장에 작용하는 침투수압은 H/D 비에 대해 선형적인 관계를 보여주고 있는데, 터널 깊이에서의 정수압에 대한 침투수압의 비로 정의되는 침투압비 (seepage pressure ratio)로 H/D 비에 따라 침투수압을 표현하면 그림 9에서 보인 바와 같다. 침투압비는 H/D 비에 따라 크게 변하지 않고 거의 일정한 값을 보여주고 있다. 보강

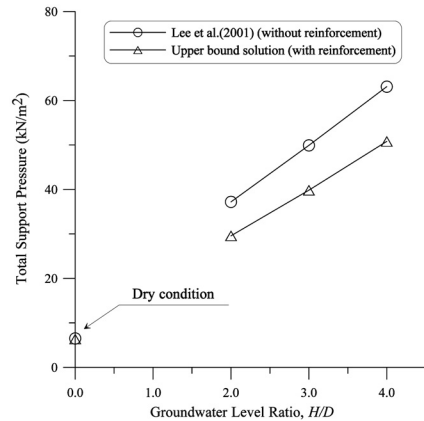


그림 8. 지하수위에 따른 막장 지보압

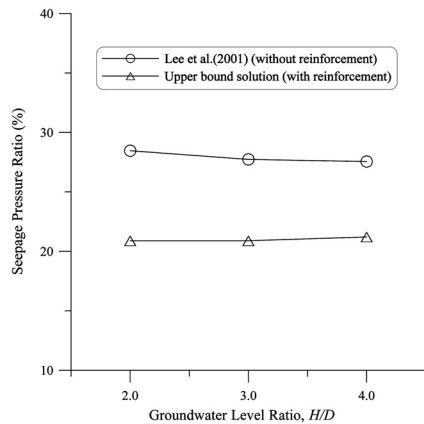


그림 9. 지하수위에 따른 막장 침투압비

이 없는 터널에서는 28%, 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널에서는 약 21%를 보여주고 있는데, 건조한 지반에서와는 달리 터널 막장에 작용하는 침투수압은 강관 다단 그라우팅으로 인해 크게 감소됨을 알 수 있다.

4. 결론

극한이론 중 가정된 파괴 메카니즘에 대한 에너지 평형으로 파괴하중을 산정하는 상한치 이론에 근거해서 강관 다단 그라우팅으로 보강된 터널과 보강이 없는 터널에 대해 터널 막장의 안정을 위한 지보압을 산정하는 방법을 제시하였다. 지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우, 유효 지보압에 더해 터널 막장에 침투수압이 작용하게 되는데, 본 고에서는 지하수의 정상류 흐름조건하에서 수치해석을 실시하여 산정하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 강관 다단 그라우팅의 보강으로 인해 건조한 지반에서는 터널 막장의 안정을 위한 지보압은 크게 감소하지 않았으나 막장상부에서 지표면으로 점진적으로 발전하는 진행성 파괴 (progressive failure)를 방지하는 효과는 크다.
2. 지하수위 하에서 터널 굴착 시 터널 내로의 지하수 유입은 터널 안정에 큰 영향을 미칠 수 있다. 유효

지보압과 비교해 터널 막장에 작용하는 침투수압은 상대적으로 큰 값을 보여 주었다.

3. 강관 다단 그라우팅으로 인해 터널 막장에 작용하는 침투수압은 보강이 없는 경우에 비하여 크게 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

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. Leca, E. and Panet, M. (1988), “Application du Calcul la Rupture la Stabilité du Front de Taille d’un Tunnel”, *Revue Francaise de Geotechnique*, Vol.40, No.4, pp.581-606.



이인모

고려대학교 공과대학 토목환경공학과
교수
inmolee@korea.ac.kr



이재성

고려대학교 토목환경공학과
석사과정
jslee-ko@hanmail.net



남석우

고려대학교 토목환경공학과
박사후 과정
namong88@freechal.com