

침투수력을 고려한 전면접착형 록볼트의 거동연구 Behavior of Grouted Bolts in Consideration of Seepage Forces

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 김경화²⁾, Kyung-Hwa Kim, 신중호³⁾, Jong-Ho Shin, ⁴⁾박종관, Park, Jong-Kwan

- 1) 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
- 2) 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
- 3) 건국대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.
- 4) 서울산업대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National Univ. of Technology

SYNOPSIS : In a NATM tunnel, fully grouted bolts are widely used as part of supporting system. Grouted bolts play an important role not as to take some parts of load acting on a tunnel lining but as to reinforce the ground adjacent the tunnel. In conjunction with tunnel construction, the presence of groundwater may pose a number of difficulties. With respect to tunnel design, influences of groundwater on tunnel behavior have been considered in many aspects. However, the effect on grouted bolts has been rarely investigated. In this study, the behavior of grouted bolts, which are affected by the seepage forces, was examined. To investigate the effects of seepage forces, the theoretical solutions for a drained condition were also found. Based on the theoretical solutions, ground reaction curves considering seepage forces were obtained. By comparing the ground reaction curves supported by grouted bolts with those for the unsupported cases, the effect of reinforcement was evaluated. Finally, through comparison between supported ground reaction curves in the drained condition and those in the case of groundwater flow, it was found that the grouted bolts are more structurely beneficial when the seepage occurs towards the tunnel than when there is no groundwater flow.

Key words : grouted bolt, seepage force, ground reaction curve

1. 서 론

전면접착형 록볼트는 NATM 터널의 지보재로서 널리 사용되어 왔다. 전면접착형 록볼트는 터널에 작용하는 응력을 분담하는 역할로서보다 터널 주변의 지반을 보강해주는 지보재로서 효과를 발휘한다. 이러한 지반보강효과 때문에 Oreste나 Stille 등 많은 연구자들에 의해 지하수 흐름이 없는 지반에 설치된 전면접착형 록볼트의 거동에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 침투수력이 작용할 경우에 전면접착형 록볼트의 거동 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. 실제 터널의 시공에 있어서 침투수력은 무시할 수 없는 중요한 요인이다. 따라서 본 논문에서는 터널주변에 침투수력이 작용하는 경우에 대해서 록볼트 거동 변화를 살펴보고, 록볼트로 보강된 지반의 지반반응곡선을 평가함으로서 침투수력이 록볼트의 지반보강효과에 미치는 영향을 분석하였다. 이로써 록볼트의 축력을 이론적으로 유도하여 침투수력에 의한 영향을 미리 평가하고, 침투수력에 의한 록볼트의 거동변화를 고찰하고자 한다.

2. 터널에 작용하는 침투력의 산정

전면접착형 록볼트의 축력을 이론식으로 유도하기 위해서 우선 터널 주변에 작용하는 침투수력의 크기를 먼저 결정해야한다. Darcy의 법칙,

$$v = ki \tag{1}$$

여기서 v 는 유속, k 는 투수계수, i 는 동수경사이므로, 식에서 유속과 투수계수는 비례함을 알 수 있다. 침투력 산정을 위해 i 값이 필요하고 i 값은 터널 주변의 흐름장에 따라 변화하므로 적정 i 값을 산정하기 위해서 반경방향흐름(radial flow)의 가정을 전제로 수치해석적 근사법이 고려되었다. 미시적 관점에서 침투력은 입자를 흐름방향으로 잡아당기는 힘(drag force)이므로 동수경사가 작은 경우 이의 영향은 무시할만하며, 또한 터널에서 충분히 멀리 떨어진 영역에서 발생하므로 이에 따른 지반의 아칭영향등을 고려하여 근사적으로 동수경사가 1보다 큰 구역을 터널에 영향을 미치는 침투력을 계산하기 위한 영역으로 설정하였다. 그림 1은 투수계수가 $7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 인 지반에 설치된 터널 주변의 수압분포를 나타내는 것으로서 지표에서부터 터널 방향으로 수압이 증가하다가 어느 지점부터 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 여기서 수압이 감소하기 시작하는 지점은 동수경사가 1보다 커지는 지점으로 수압이 감소하기 시작하는 영역에서 지하수의 흐름이 급격히 증가하여 이러한 힘이 터널의 거동에 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있다. 그림 2는 터널 주변의 동수경사 분포를 나타낸다.

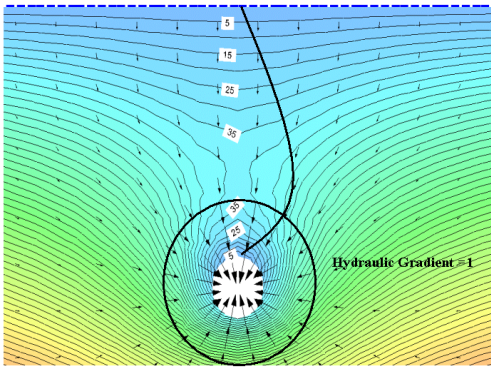


그림 1. 터널주변의 수압 분포

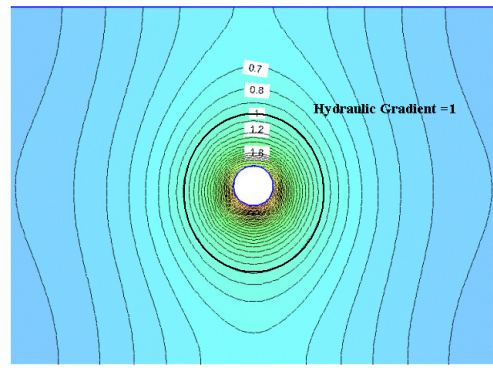


그림 2. 터널 주변의 동수경사 변화

위에서 설정한 영역에서의 침투력을 산정하면 그림 3, 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 D 는 터널의 직경, C 는 터널 천단에서부터 지표면까지의 거리, H 는 터널 천단에서부터 지하수위까지의 거리를 나타낸다.

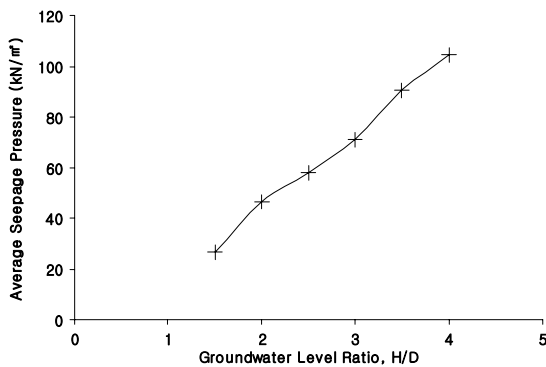


그림 3. 터널에 작용하는 침투력

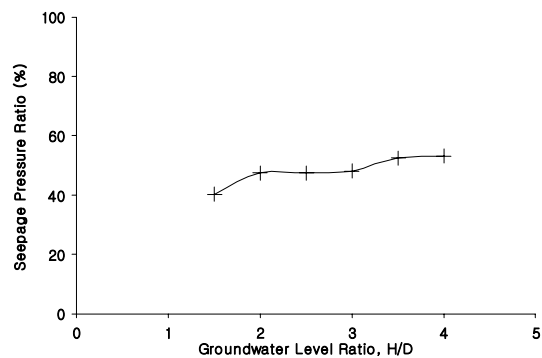


그림 4. 터널에 작용하는 침투력비

그림 3은 지하수위의 변화에 따른 침투수력의 크기를 나타낸 것으로, 지하수위가 상승함에 따라 침투수력이 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 위와 같은 방법으로 구한 침투수력을 정수압과의 비로 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 터널에 작용하는 침투수력은 정수압의 약 40~50% 정도의 값을 갖는다.

3. 이론식에 의한 록볼트의 축력 산정

3.1 축력 산정을 위한 가정

록볼트의 축력을 이론식으로 전개하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 1) Mohr-Coulomb 파괴기준을 따른다.
- 2) 록볼트와 지반의 변형율은 같다.
- 3) 록볼트로 보강된 구역은 균일한 물성치를 갖는다.
- 4) 침투수력은 터널 중심을 향해서 반경방향으로만 작용한다.

3.2 이론식의 전개

원형터널 주변 지반에 작용하는 응력은 그림 5와 같다. 여기에 침투수력이 터널 중심을 향해서 반경 방향으로 작용하는 것을 고려하여 각각의 요소에 작용하는 반경방향의 응력이 평형상태를 유지하기 위해서는 식 (2)를 만족시켜야 한다.

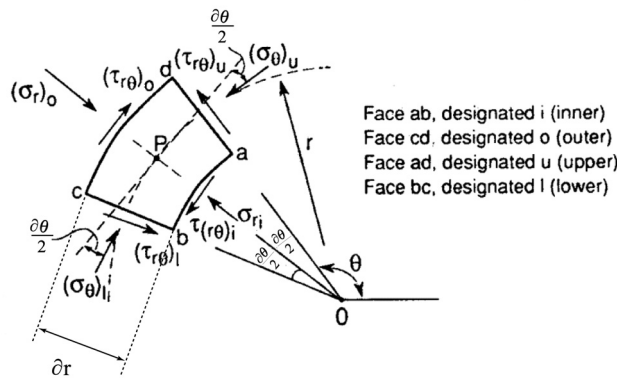


그림 5. 원형터널 주위의 요소에 작용하는 응력

$$\begin{aligned}
 & (\sigma_r)_o \left(r + \frac{\partial r}{2} \right) \partial \theta - (\sigma_r)_i \left(r - \frac{\partial r}{2} \right) \partial \theta - (\sigma_\theta)_l \partial r \sin \frac{\partial \theta}{2} - (\sigma_\theta)_u \partial r \sin \frac{\partial \theta}{2} \\
 & + (\tau_{r\theta})_l \partial r \cos \frac{\partial \theta}{2} - (\tau_{r\theta})_u \partial r \cos \frac{\partial \theta}{2} + Rr \partial r \partial \theta + i\gamma_w r \partial r \partial \theta = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 R은 단위부피당 물체력으로 개별 요소의 크기가 매우 작으므로 물체력은 무시할 수 있다. 축대칭 조건을 이용하여 식 (2)를 간단히 정리하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + i\gamma_w = 0 \tag{3}$$

침투수력은 터널 중심을 향해서 반경방향으로 작용한다고 가정하였으므로 접선방향 응력과, 반경방향 응력은 기존의 해를 이용하여 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\theta} = p_0 - (\sigma_{re} - p_0) \left[\frac{r_e}{r} \right]^2 \quad (4)$$

$$\sigma_r = p_0 + \sigma_i + (\sigma_{re} - p_0) \left[\frac{r_e}{r} \right]^2 \quad (5)$$

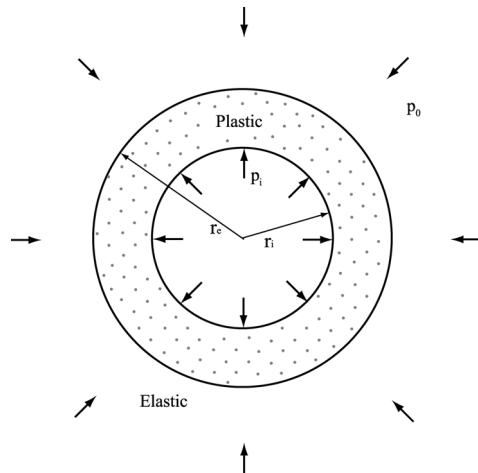


그림 6. 원형 터널의 탄소성 영역 분포

여기서 σ_i 는 침투력에 의해 추가되는 응력으로서 통상 동수경사와 반경거리의 적분형태로 표시되는데 여기서는 근사적으로 동수경사가 1이 되는 반경거리까지의 영역을 고려하였다.

$$\sigma_r + \sigma_{\theta} = 2p_0 + \sigma_i \quad (6)$$

탄성영역과 소성영역의 경계에서, 식 (6)은 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 만족시켜야하므로 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_{re} = \frac{2p_0 + \sigma_i - \sigma_c}{k+1} = \frac{2}{1+k} \left(p_0 + \frac{1}{2} \sigma_i + a \right) - a \quad (7)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad a = \frac{c}{\tan \phi}$$

여기서 p_0 는 초기 응력을 나타내고(그림 6), 터널 중심에서 반경방향으로 발생하는 변위와 변형율은 식 (8), (9)과 같다.

$$u_r = -\frac{rA_{SF}}{k_{\psi} + 1} \left[2 \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_{\psi} + 1} + (k_{\psi} - 1) \right] \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{-2k_\psi A_{SF}}{k_\psi + 1} \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_\psi + 1} + \frac{k_\psi - 1}{k_\psi + 1} A_{SF} \quad (9)$$

$$A_{SF} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) (p_0 + \sigma_i - \sigma_{re}), \quad k_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

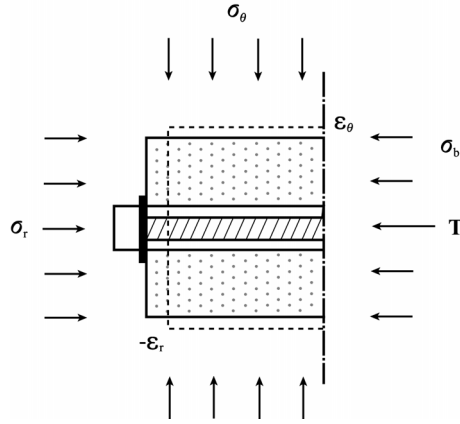


그림 7. 지반과 록볼트의 상호작용

록볼트와 지반의 변형율이 같다고 가정하였으므로 록볼트는 그림 7과 같은 거동을 보이게 된다. 그러므로 지반에 작용하는 응력 σ_b 와 단면적이 Y 인 록볼트에 작용하는 축력 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_b = \sigma_r - \frac{T}{S_c S_L} \quad (10)$$

$$T = E_s \cdot \varepsilon_r \cdot Y \quad (11)$$

터널에 작용하는 응력의 일부분이 록볼트로 전달되므로 Mohr-Coulomb 상수 k_r 은 다음과 같다.

$$k_r = \frac{\sigma_\theta + a_r}{\sigma_b + a_r} \quad (12)$$

$$a_r = \frac{c_r}{\tan \phi_r}$$

식 (3), (9), (10), (11), (12)을 연립하여 미분방정식을 풀면 식 (13)과 같다.

$$\sigma_r = \left[p_i + \frac{K_3}{k_\psi + k_r} \left(\frac{r_e}{r_i} \right)^{k_\psi + 1} + \frac{K_4}{1 - k_r} + \frac{z\sigma_i}{2 - k_r} \cdot r_i \right] \left(\frac{r}{r_i} \right)^{k_r - 1} - \left[\frac{K_4}{1 - k_r} + \frac{K_3}{k_\psi + k_r} \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_\psi + 1} + \frac{z\sigma_i}{2 - k_r} \cdot r \right] \quad (13)$$

$$K_3 = \frac{k_r}{S_c S_L} \frac{2k_\psi A_{SF}}{k_\psi + 1} E_s Y, \quad K_4 = \frac{k_r}{S_c S_L} \frac{k_\psi - 1}{k_\psi + 1} E_s Y \cdot A_{SF} + a_r (1 - k_r)$$

탄소성 영역의 경계에서 응력의 연속을 만족시켜야하므로 식 (7)과 식 (13)은 같은 해를 가지게 된다. 2장에서 계산한 침투수력 값을 위의 식에 대입하여 시행착오법에 의해 록볼트로 보강된 터널 주변의 소성영역의 반경을 구하고, 식 (9)와 식 (11)을 통해 다음과 같이 록볼트의 축력식을 얻을 수 있다.

$$T = E_s Y \left[\frac{-2k_\psi A_{SF}}{k_\psi + 1} \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_\psi + 1} + \frac{k_\psi - 1}{k_\psi + 1} A_{SF} \right] \quad (14)$$

식 (14)는 각 위치에서의 축력을 나타내므로 위의 식을 적분하면 전체 록볼트의 축력 분포를 얻을 수 있다.

4. 침투수력 변화에 따른 록볼트 축력변화 산정

침투수력이 변화함에 따라 록볼트의 축력이 어떻게 달라지는지 평가하기 위해서 풍화암 지반에 직경 5m의 터널을 굴착한다고 설정하고 록볼트의 축력을 살펴보았다. 록볼트는 터널 벽면에 30°간격으로 설치되었다고 하였고, 아칭효과(Arching Effect)에 의해 막장 전방으로 전이되었던 하중의 30%가 되돌아와 터널에 내공변위를 일으킨 후에 록볼트가 설치되었다고 가정하고 록볼트에 작용하는 축력을 비교하여 침투수력이 록볼트에 미치는 영향을 살펴보았다. 해석대상 지반과 록볼트의 물성치는 표 1, 2와 같다.

표 1. 해석지반의 물성치

건조단위중량 (kN/m ³)	수중단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각(°)
17.65	10.79	34.33	33

표 2. 록볼트의 물성치

직경 (mm)	길이 (m)	탄성계수 (kN/m ²)	둘레방향 설치간격(m)	종방향 설치간격(m)
32	2.5	2.06×10 ⁸	1.309	1

4.1 지하수위가 지표면보다 높은 경우 (H>C)

지하수위가 지표면보다 높은 경우에 대해 침투수력의 영향을 평가하기 위해서, H/D의 값을 변화시키면서 록볼트의 축력을 비교하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 H/D가 0.5 증가할 때마다 록볼트의 축력은 5~10kN정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 지하수위가 지표면보다 높아지면 지하수 흐름이 없는 지반에 설치된 록볼트에 비해 더 큰 축력이 작용하게 되는 것을 알 수 있다.

4.2 지하수위가 지표면보다 낮은 경우 (H<C)

그림 9는 C/D=4인 경우에 대해 H/D를 0.5에서 4.0까지 변화시키면서 축력의 변화를 살펴본 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위가 상승한다 하더라도 록볼트에 걸리는 축력은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 지하수위가 상승하면 침투수력이 증가하는 것이 사실이지만 터널에 작용하는 유효응력이 감소하기 때문에 록볼트에 작용하는 응력은 거의 변화하지 않는다. 결과적으로 지하수위의 상승이 지표아래에서 일어나는 경우에는 침투수력에 의해 록볼트에 작용하는 응력증가를 심각하게 고려할 필요가 없게 된다.

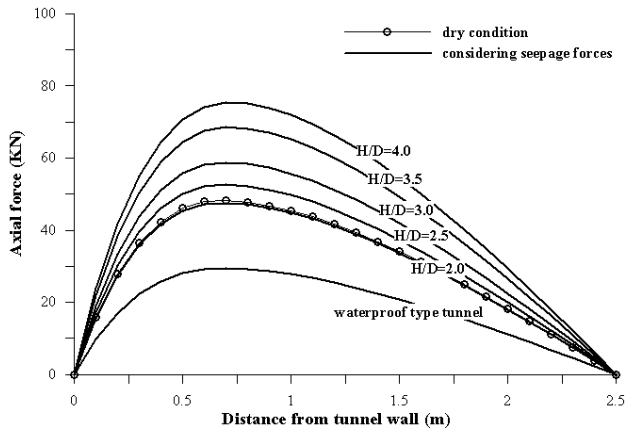


그림 8. 록볼트의 축력 변화 ($H > C$, $C/D = 2$)

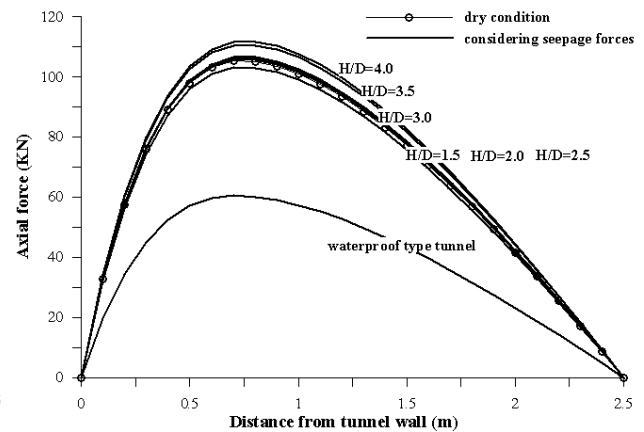


그림 9. 록볼트의 축력 변화 ($H < C$, $C/D = 4$)

5. 침투수력에 의한 지반반응곡선의 변화

그림 10과 그림 11은 각각 침투수력이 작용하지 않는 경우와 작용하는 경우의 지반반응곡선을 나타낸 것이다. 여기서 록볼트로 보강되지 않은 지반의 지반반응곡선은 Jung, J. W. (2004)에서 인용하였고, 록볼트로 보강된 지반의 내공변위는 식 (8)을 통해 계산하였다. 아래의 두 그림을 비교해보면 전면접착형 록볼트의 설치에 침투수력이 작용하는 경우에 더 큰 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. 록볼트를 설치하게 되면, 전면접착형 록볼트의 지반보강효과로 인하여 터널 주변의 지반이 거의 탄성 거동을 보이게 된다. 록볼트로 보강되지 않은 경우에는 침투수력이 작용하는 지반과 그렇지 않은 지반의 변위는 상당한 차이를 나타낸다. 그러나 록볼트로 보강하게 되면 침투수력이 작용하더라도 최종 변위가 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서 침투수력이 작용하는 경우, 록볼트의 설치로 인한 최종 변위량은 침투수력이 작용하지 않는 경우에 비해 상당히 감소한다. 침투수력이 작용할 경우 록볼트의 지반보강효과가 크다고 해도 침투수력에 의해 발생하는 초기 변위는 록볼트로 제어하기 힘들다는 것 또한 알 수 있다. 즉 그림 11을 보면, 록볼트 설치로 인해 최종 변위가 현저하게 감소하였지만 록볼트 설치 전에 이미 침투수력에 의해 상당한 변위가 발생한 것을 확인할 수 있다.

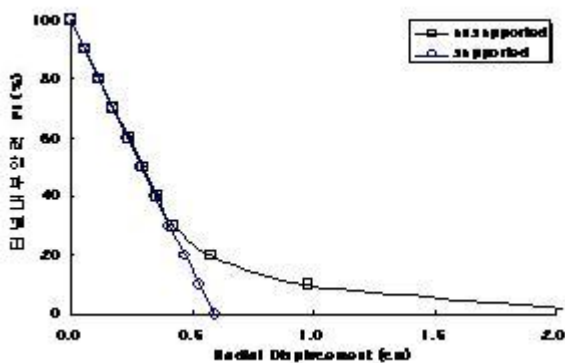


그림 10. 침투수력이 작용하지 않는 경우의 지반반응곡선 비교 ($C/D = 3.0$)

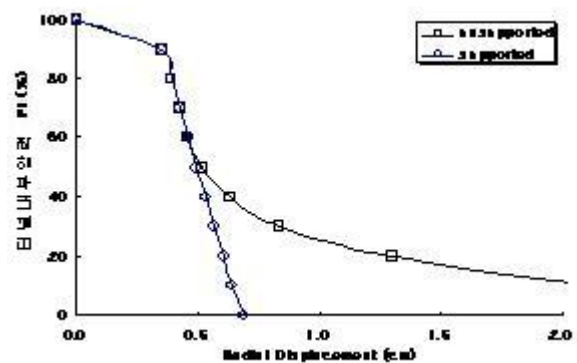


그림 11. 침투수력이 작용하는 경우의 지반반응곡선 비교 ($C/D = 3.0$, $H/D = 3.0$)

그림 12는 록볼트로 보강된 지반과 그렇지 않은 지반의 최종변위의 비율을 침투수력의 변화에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서는 C/D 에 상관없이 침투수력이 상승함에 따라 록볼트의 지반보강효과가 증가하는 경향을 보여주고 있다.

$$\text{Final Displacement Ratio} = \frac{\text{Final Displacement on Unsupported Ground}}{\text{Final Displacement on Supported Ground}}$$

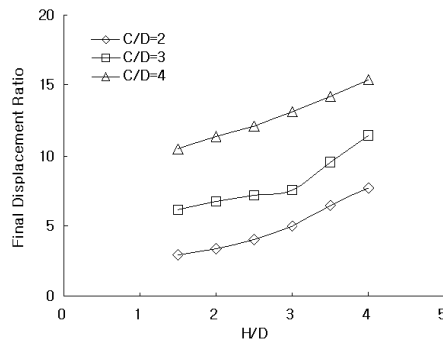


그림 12. 록볼트 보강에 의한 최종변위비

6. 결론

침투수력이 작용하는 경우의 록볼트의 축력을 이론식으로 전개하고, 침투수력의 변화에 따라 록볼트의 축력변화를 지하수위의 조건에 따라 비교하였다. 또한 침투수력의 변화에 따라 록볼트로 보강된 지반의 지반반응곡선을 비교하여 지반보강효과의 변화를 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 지하수위가 지표면보다 높은 경우, 침투수력의 증가는 곧바로 록볼트의 축력으로 이어진다. 반면에 지하수위가 지표 아래 있는 경우에는 지하수위가 상승함에 따라 침투수력이 증가하지만 그에 따라 터널에 작용하는 유효응력이 감소하므로 록볼트 축력은 거의 변화하지 않게 된다. 그러므로 지하수위의 변화가 지표아래서 일어나는 경우에는 침투수력에 의해 록볼트에 가해지는 응력 변화를 심각하게 고려할 필요가 없다.
2. 록볼트가 설치되지 않은 경우에는 침투수력이 작용하는 지반의 변위가 침투수력이 없는 지반에 비해 상당히 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 록볼트로 터널 주변의 지반을 보강하게 되면 침투수력이 작용한다 하더라도 보강된 지반이 거의 탄성거동을 하여 최종변위는 크게 감소하여 수렴한다. 다시말해서 침투수력이 작용하는 지반에 록볼트를 설치할 경우 지반보강효과가 더 크게 나타난다. 이와 같은 지반보강효과는 침투수력이 증가할수록 더 잘 나타난다.
3. 침투수력이 작용하는 지반이라 하더라도 록볼트의 설치로 터널의 내공변위를 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 이러한 변위제어효과는 록볼트가 설치된 후에 나타나므로 침투수력에 의해 발생하는 초기 변위를 감소시키는 데에는 기여하기 어렵다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C01)의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Jung, J. W. (2004), Ground Reaction Curve of a Tunnel with the Consideration of Seepage Forces, Thesis for Degree of Master of Science, Department of Civil Engineering, Korea University.
2. Oreste, P. P. (1995), "Axisymmetric of Ground Reinforcing in Tunnelling Design", *Computers and Geotechnics*, Vol. 17, 253-274.
3. Stille, H., Holmberg, M. and Nord, G. (1989), "Support of Weak Rock with Grouted Bolts and Shotcrete", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 26, No. 1, pp. 99-113.