

철도터널 굴착에 의한 암반과 지보재의 거동에 관한 연구

A study on the rock-support behavior due to railway tunnel excavation

김선곤*
Kim, Sun-Kon

박종관**
Park, Jong-Kwan

정인철***
Jung, In-Chul

이승도****
Lee, Seung-Do

ABSTRACT

With increasing the number of tunnel constructions, more reliable analysis methods for tunnel excavation is needed to accomplish technically sound design, and stable and economical constructions. For this purpose, a series of construction procedures, which include excavation and support stages of tunneling, need to be considered. In this study, therefore, rock-support response behavior due to railway tunnel construction has been examined by using analytic methods and numerical calculations. For examining rock-support response behavior, the effects of shotcrete, thickness and time of installation have been considered. Through analytic and numerical calculations, it is shown that support pressure becomes higher with increasing the shotcrete thickness and stiffness, and hence the tunnel deformation tends to be stable. It is also important to notice that there is a significant effect of shotcrete installation time on the tunnel deformation, although no significant change in support pressure is observed.

1. 서 론

우리나라와 같이 국토의 면적이 좁고 인구가 밀집되어 있는 나라에서의 사회기반시설 확충을 위해 건설 분야에 있어서 다양한 용도의 지하 공간 개발의 필요성과 수요가 점차 증가하고 있다. 특히, 이용공간의 확보와 효율적인 이동경로를 구축하기 위한 철도 터널 및 도로 터널의 분야에 많은 관심과 함께 활발한 연구가 진행되어 왔다. 특히, 철도터널과 같이 비교적 규모가 지하 공간 개발에 있어서 기술적으로 타당한 설계와 안전하고 경제적인 시공을 달성하기 위해서는 터널해석의 신뢰성이 우선적으로 확보되어야 한다. 이를 위해서는 터널의 굴착 및 보강작업으로 이루어진 일련의 시공과정을 해석적으로 이해하기 위한 역학적 의미를 명확하게 파악할 필요가 있다.

합리적인 터널해석을 위해서는 공학적 설계기술을 전제로 하여 역학이론으로부터 유도된 해석해 및 전산해석을 병행할 필요가 있으며, 이러한 연구를 수행함에 있어서 기술적인 타당성을 확보하기 위해서는 터널의 굴착에 의해 발생하는 지반 및 지보재의 거동에 관한 연구가 필요할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 터널 굴착 시 암반의 변형거동에 관한 기본적 메커니즘에 대해 고찰하고, 지보재의 반응거동에 대한 해석해와 유한요소법을 이용한 전산해석 결과를 비교함으로써 암반-지보 복합 반응거동을 분석하였다.

* 삼성물산(주)건설부분, 부장, 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원
** 서울산업대학교 교수, 정회원
*** 삼성물산(주)건설부분, 상무, 정회원
**** 삼성물산(주)건설부분 과장, 정회원

2. 암반-지보재의 상호 관계

2.1 터널의 변형 거동

일반적으로 터널의 굴착이 이루어진 후 록볼트나 슛크리트 등의 지보재가 설치되기 전까지 터널 팽장면은 암반에 의해 자립이 가능하다. 이때 발생하는 터널의 내공변위는 팽장면에서 터널의 반경거리만큼의 전방에서부터 시작되어 터널직경의 1.5배 후방에서 최대변위에 도달하는 경향을 보인다. 이 때, 팽장면에서의 내공변위는 터널 최대변위의 약 1/3정도가 된다(1, 2).

암반이 탄성거동에 지배되면 내공변위는 그림 1의 점선을 따르지만 소성파괴가 발생하면 소성 변형이 발생하여 전체변위는 실선과 같이 나타난다. 이 때 소성영역이 공동의 반경에 비해 작다면 암반의 강도는 유지되어 미소한 균열 또는 국부적인 파괴나 교란이 나타날 수 있다. 그러나, 광역의 소성영역이 형성되어 큰 내공변위가 발생한다면 암반은 느슨해지고 지보재 설치에 의한 변형 억제효과가 미미하여 공동의 붕괴를 초래할 수 있다. 따라서 록볼트와 슛크리트와 같은 지보재의 설치에 암반의 파괴를 방지할 뿐만 아니라, 터널의 내공변위를 억제하는 역할을 한다(그림 2).

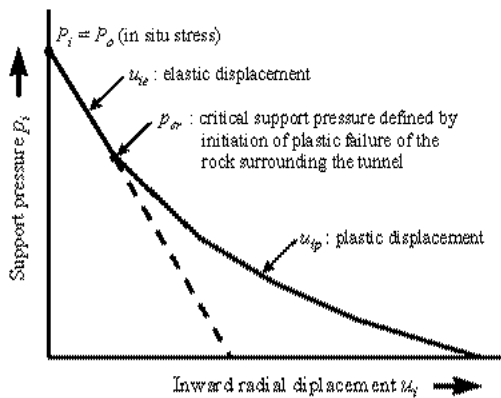


그림 1. 터널의 내공변위와 지보압의 관계

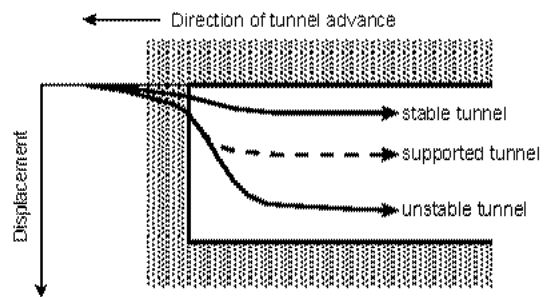


그림 2. 안정 조건에 따른 터널의 내공변위

2.2 슛크리트의 지보효과

터널의 보강이란 굴착주변 암반의 내하능력을 유지하고 안정성을 향상시키기 위한 목적을 위한 과정과 재료를 포함하는 용어로 사용되며 보강의 근본적인 목적은 암반 자체의 강도를 발휘·유지시키도록 하는 것이다(3, 4). 현재 터널의 기초적인 지보재로 활용되고 있는 슛크리트는 암반의 굴착 특성상 조기에 얇게 타설되어도 효율적으로 강도가 유지된다는 장점 때문에 널리 사용되면 터널의 필수 지보재로 인식되고 있다.

스�크리트는 암반의 절리와 균열이나 굴착면의 불규칙한 요철에 채워져서 석축에서의 이음과 같은 집합작용을 하며, 절리로부터의 누수를 억제하고 굴착면의 풍화를 방지한다. 또한 암반과 슛크리트 사이의 부착력과 슛크리트 자체의 전단력은 터널 천정에서 발생된 키블록의 움직임에 대하여 상당한 저항력을 가지며, 약 10cm ~ 20cm 두께의 슛크리트는 폐합된 원이나 고정된 아치형 부재로서 구조적인 지보능력을 가지는 것으로 알려져 있다(1, 5).

2.3 지보재의 변형특성

전술한 바와 같이 팽장면에서는 변형은 총 변형의 약 1/3이며 팽장면과 가장 근접한 지보재와 일정한 거리를 두고 굴착공정이 이루어지기 때문에 변형의 회복은 불가능하다. 지보재가 변형 억제효과를 발휘하기 전에 발생한 암반의 변형을 u_{00} 라 할 때, 터널에 설치된 지보재는 그림 3에서

와 같이 선형적으로 변형을 일으킨다. 여기서 u_{sm} 은 지보재의 최대 탄성변위이고 P_{sm} 은 최대 지보압으로 지보재의 항복점에 해당한다.

터널의 내공변위에 반응하는 지보재의 변형은 지보재와 터널 주변암반의 특성 및 초기 현장응력에 의존한다. 그림 3과 같이 지보반응곡선이 암반반응곡선과 만나면 평형을 이루지만, 지보재가 설치기 지연되면(u_{so} 가 크다면) 과도한 내공변형에 의한 암반의 소성화를 억제할 수 없다. 반면, 지보재의 저항능력이 부족하면(P_{sm} 이 작다면) 암반반응곡선과 교차하기 전에 지보재의 항복상태가 발생할 수 있다. 지보재의 변형특성을 결정하기 위해서는 여러 가지 변수의 영향을 받으므로 초기 현장응력 수준, 암반의 강도, 지보재 특성 등이 조합된 매개변수 연구에 의해 지보재 선택이 결정될 필요가 있다

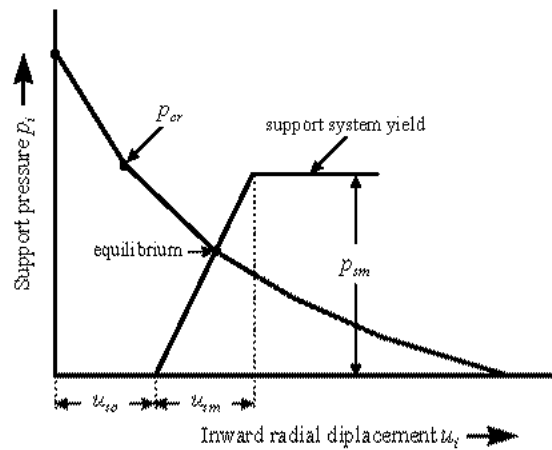


그림 3. 터널의 변형에 따른 암반과 지보재의 거동

3. 암반-지보재 거동의 이론적 고찰

3.1 이론적 배경

암반에 터널과 같은 공동이 굴착될 때 굴착 전 지반응력은 굴착에 의해 재분배되어 새로운 평형상태로 조정된다. 이런 응력의 변화는 변위와 수반하므로 굴착된 지반의 변위는 굴착대상 암반의 물성, 굴착방법 그리고 공동의 크기 등에 영향을 받는다. 암반-지보재의 거동은 여러 인자들의 영향 요소가 있기 때문에 이론적으로 복잡한 과정이 필요하다. 암반-지보재 거동을 분석하기 위하여 Hoek and Brown(1980)은 다음과 같은 이론을 제시하였다(1). 즉, 정수압 P_o 가 작용하는 원형공동에서의 공동의 내공변위를 산정하였다. 여기서 암반의 초기 물성치는 선형탄성으로 취급하였고 다음과 같은 파괴기준을 적용하였다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

여기서, σ_1 은 최대주응력, σ_3 는 최소주응력, σ_c 는 일축압축강도이며 m 과 s 는 암반의 파괴특성계수이다. 파괴 후 암반을 완전소성으로 취급하면 식 (1)에서 m 과 s 를 소성 파괴특성계수인 m_s 과 s_s 로 대체할 수 있다. 터널 주변에 발생하는 소성대와 탄성영역의 경계에 평형조건을 적용하면 소성영역의 범위 및 터널의 변위량을 계산할 수 있다. 이 일련의 과정을 요약하면 다음과 같다.

먼저, 터널 주변의 변형이 탄성적일 경우 변위의 식은 아래와 같다.

$$\frac{u_i}{r_i} = -\frac{(1+\nu)}{E} (P_o - P_i) \quad (2)$$

여기서, u_i 는 반경방향변위, r_i 는 공동의 반경, ν 는 포아송비, E 는 탄성계수이며 P_i 는 지보압이다.

또한, 터널 주변에 소성파괴가 발생할 때의 변위 식은 다음과 같다.

$$\frac{-u_e}{r_e} = \frac{(1+\nu)}{E} M \sigma_c, \quad \frac{r_e}{r_i} = e^{N-2\left(\frac{\mu_i}{m, \sigma_c} + \frac{s_i}{m_i}\right)^2} \quad (3)$$

여기서, R_e 는 탄성영역의 반경이고 L_e 는 탄성경계에서의 반경방향 변위이다.

$$\frac{-u_i}{r_i} = 1 - \left[\frac{1 - e^{-\alpha}}{1 + A} \right]^2 \quad (4)$$

여기서, c_{av} 와 Λ 는 아래 식과 같이 구해지며 식 (5)의 R 은 $\frac{r_e}{r_i} < \sqrt{3}$ 일 경우는 $2D \ln \frac{r_e}{r_i}$ 이고

$\frac{r_e}{r_i} > \sqrt{3}$ 일 경우는 $1.1D$ 이다.

$$e^{-\alpha} = \frac{2\left(\frac{-u_e}{r_e}\right)\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2}{\left(\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2 - 1\right)\left(1 + \frac{1}{R}\right)}, \quad A = \left(2\frac{-u_e}{r_e} - e^{-\alpha}\right)\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2 \quad (5)$$

따라서, 식 (2)와 (4)에 의해 지보압에 따른 터널 주변의 암반거동이 계산되어 진다. 그리고 슛크리트 지보재에 대해서는 슛크리트의 강성도와 최대지보압을 아래 식에 의해 결정할 후 식 (7)에 의해 지보압에 대한 변위를 계산한다.

$$k_c = \frac{E_c \{r_i^2 - (r_i - t_c)^2\}}{(1 + \nu_c) \{ (1 - 2\nu_c) r_i^2 + (r_i - t_c)^2 \}}, \quad P_{sm} = \frac{1}{2} \sigma_{c,sc} \left[1 - \frac{r_i^2}{(r_i + t_c)^2} \right] \quad (6)$$

$$u_i = u_{so} + \frac{r_i}{k} P_i \quad (7)$$

여기서 E_c 는 슛크리트의 탄성계수, t_c 는 슛크리트의 두께이고 ν_c 는 슛크리트의 포아송비 그리고 $\sigma_{c,sc}$ 는 슛크리트의 일축압축강도를 나타내며 u_{so} 는 지보 설치전의 초기변형이다.

3.2 지보재의 두께와 설치시기의 영향

전술한 이론식을 이용하여 100m 심도의 터널 굴착에 있어 슛크리트의 두께 및 설치시기를 변화시키며 암반-지보재 거동을 분석하였다. 표 1은 해석에 사용된 암반의 물성과 보강요소인 슛크리트의 물성을 나타낸다.

표 1. 해석에 사용된 물성치

	Parameter	Value
Rock mass	Uniaxial compressive strength	64.9 MPa
	Material constants m, s	$m = 1.261, s = 0.00089$
	Modulus of elasticity (E)	12.0 GPa
	Material constants for broken rock mass m_b, s_b	$m_b = 0.013, s_b = 0.00001$
	Poisson's ratio	0.2
Shotcrete	Unit weight of broken rock mass (γ)	0.02 MN/m ³
	Modulus of elasticity (E_s)	20.7 GPa
	Poisson's ratio	0.25
	Uniaxial compressive strength	34.5 MPa
Tunnel radius (r_i) = 5 m, In situ stress (P_0) = 2.7 MPa		

그런 4는 가장 변위가 크게 발생하는 천정부의 암반반응곡선에 대해 터널의 초기변형이 탄성거동을 나타내는 1.23mm인 시점에서 슛크리트 두께가 각각 1.5cm, 5cm, 10cm로 타설되는 것으

로 가정하였다. 10cm의 슛크리트를 타설한 경우, 터널의 변위가 약 3.1mm 발생한 후 평형상태에 도달하였으며 슛크리트의 최대지보압 0.670MPa에 대해 0.167MPa의 지보압이 작용하여 약 25%의 지보압 비율을 나타낸다. 슛크리트를 5 cm로 타설한 경우, 터널의 변위가 약 4.58mm에서 평형에 도달하였으며 슛크리트의 최대지보압과 작용 지보압은 각각 0.340MPa, 0.150MPa로 약 44 %의 지보압 비율을 보였다. 슛크리트를 1.5cm로 타설하는 경우에는 슛크리트의 강성도가 저하되어 평형상태에 도달하지 못하여 효과적인 지보의 역할을 수행하지 못할 것으로 예상된다.

그림 5는 슛크리트를 5cm 타설한 경우에 대한 설치시기에 따른 암반-지보재 거동으로써, 초기변형이 1.23mm, 5mm, 10mm 발생 후 슛크리트가 타설되는 경우를 가정하였다. 이 때, 슛크리트에 작용하는 지보압은 각각 0.150MPa, 0.133MPa, 0.122MPa으로써 지보압 비율은 각각 44%, 39%, 36%로 유사하게 나타났다. 이는 지보재의 설치시기의 결정에 있어서 초기변형이 상당히 발생한 후 슛크리트의 타설이 효율적임을 의미하지만 지보효과 발휘수준에 대해 터널의 내공변위를 지나치게 허용하고 있다.

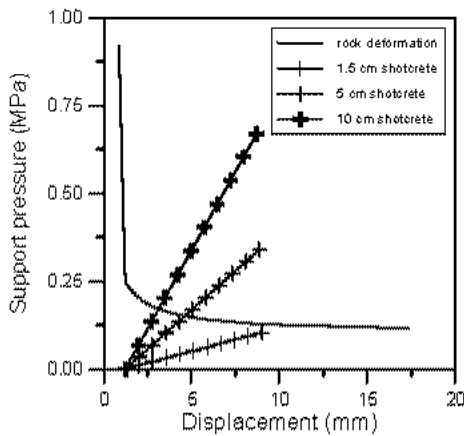


그림 4. 지보재 두께에 따른 암반-지보재 거동

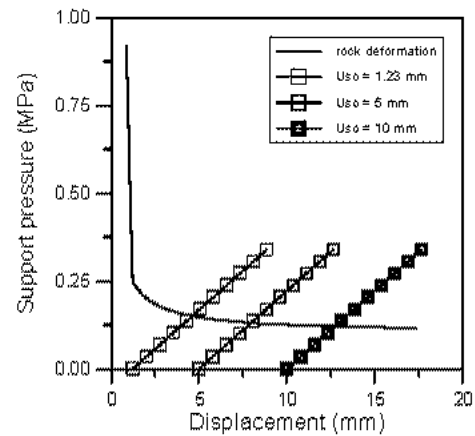


그림 5. 지보재 설치시기에 따른 암반-지보재 거동

3.3 수치해석적 방법과의 비교

전술한 바와 같이 지보의 합리적인 설계는 암반과 지보재의 상호작용을 고려하여 결정할 필요가 있으므로, 굴착 대상암반의 강도한도 내에서 변위를 허용하여 이제 적절한 지보재를 제시하는 것이 바람직하다. 터널해석에 일반적으로 적용되는 수치해석 방법으로 지보재의 강성에 따른 암반-지보재 거동을 분석하여 이론해와 비교하였다. 터널의 직경은 10m, 지표에서 터널중심까지의 거리를 50m로 설정하였으며 해석에 사용된 암반과 슛크리트의 물성은 표 2와 같다.

표 2. 수치해석에 사용된 물성치

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Shear modulus (GPa)
Rock mass	5	0.25	2
Shotcrete	15	0.2	6.25

스�크리트는 굴착과 동시에 설치되어 초기변형이 발생하지 않는다고 가정하였다. 탄성계수에 대한 분석은 슛크리트의 두께 20cm를 기준으로 하여 10GPa에서 30GPa까지 5GPa씩 증가시키며 수행하였으며, 탄성계수 15GPa를 기준으로 슛크리트 두께를 10cm, 20cm, 30cm의 경우에 대해 터널의 천정 변위를 기준으로 비교·분석하였다. 그림 6은 지보재의 변형계수에 대한 암반-지보

재 거동으로써, 탄성계수가 클수록 슛크리트의 강성이 증가하여 높은 응력상태에서 평형을 이루고 변위의 억제효과가 크게 나타나고 있다. 이 때, 수치해석의 결과는 이론식에 비해 높은 응력과 적은 변위를 나타내며, 이는 수치해석의 경우 이론식과 달리 무지보 굴착시도 내공변위에 대해 73.81kPa의 응력에서 평형을 이루기 때문으로 사료된다. 그림 7은 슛크리트의 탄성계수 15GPa에 대해 슛크리트 두께를 변화시켰을 때의 암반-지보재 거동으로 그림 6의 결과와 마찬가지로 수치해석의 경우가 이론식의 경우보다 높은 지보압에서 평형을 이루고 변위도 적게 발생하였다.

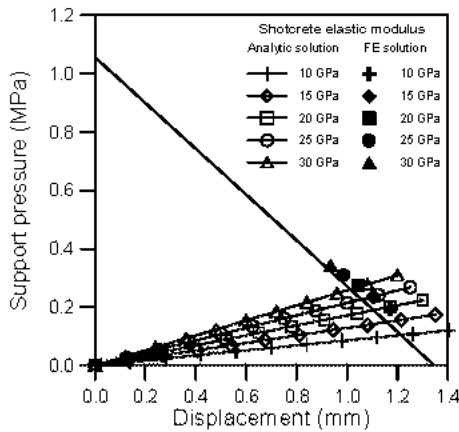


그림 6. 지보재 변형계수에 따른 암반-지보재 거동

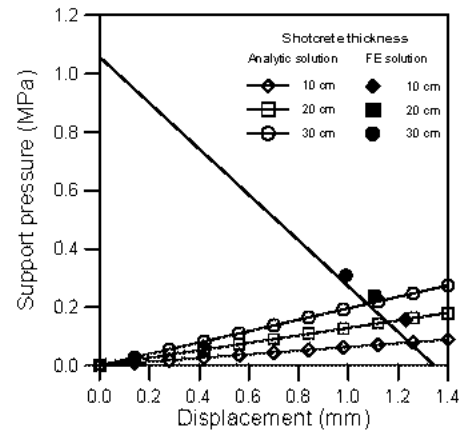


그림 7. 지보재 두께에 따른 암반-지보재 거동

4. 결 론

철도터널의 건설에 있어 효율적인 지보재의 설계를 위한 기본적인 이해과제인 암반-지보재의 거동 분석을 통해 나타난 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 슛크리트 두께를 효율적으로 결정하기 위해서는 슛크리트의 두께에 따른 최대 지보압 및 터널의 내공변위가 평형상태에 도달한 시점에서 슛크리트에 작용하는 지보압을 결정할 필요가 있다. 이를 통해 결정된 지보압 비율에 필요시 안전을 개념을 도입하여 안정적이고 경제적인 슛크리트의 두께를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 암반-지보재의 거동의 분석 결과, 슛크리트의 설치시기에 따른 지보압의 변화는 크게 나타나지 않았다. 그러나 슛크리트의 설치시기가 지연될 경우 지보효과 발휘 수준에 비해 터널의 내공 변위를 비해 지나치게 허용할 수 있는 것으로 나타났다.

(3) 터널 굴착에 대해 효과적인 지보재를 설계하기 위해서는 지보시스템의 강성과 설치시기를 통합하여 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 보다 정량적인 결과를 도출하기 위해서는 3차원 수치해석을 비롯한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), "Underground Excavation in Rock", Inst. Mining & Metallurgy.
2. Baudendistel, M. (1985), "Significance of the Unsupported Span in Tunnelling", Tunnelling 85, pp. 103-109.
3. Hoek, E. and Wood, D. (1992) "Rock Support", World Tunnelling, pp. 137-142.
4. Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1985), "Rock Mechanics for Underground Mining", George Allen & Unwin.
5. Sinha, R.S. (1989), "Underground Structure - Design and Instrumentation", Elsevier Science.