

지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용을 고려한 터널 2차라이닝 해석모델

서성호¹⁾ · 장석부²⁾ · 이상덕³⁾

An Analysis Model of the Secondary Tunnel Lining Considering Ground-Primary Support-Secondary Lining Interaction

Seong-Ho Seo, Seok-Bue Chang and Sang-Duk Lee

Abstract. It is the common practice to over design the reinforcement for the secondary tunnel lining due to the lack of rational insight into the ground loosening loads, and due to the conservative application of the empirical design methods. The main loads of the secondary lining are the ground loosening loads and the ground water pressure, and the ground load is critical in the reinforcement design of the secondary lining in the case of drained tunnel. If the external load is absent around a tunnel, the reasons of the load for secondary tunnel lining are the deterioration of the primary supports such as shotcrete, steel rib, and rockbolts. Accordingly, the analysis method considering the ground-primary supports-secondary lining interaction should be required for the rational design of the secondary tunnel lining. In this paper, the interaction was conceptually described by the simple mass-spring model and the load transfer from the ground and primary supports to the secondary lining is showed by the ground-primary supports-secondary lining reaction curves for the theoretical solution of a circular tunnel. And also, the application of this proposed model to numerical analysis is verified in order to check the potential for the tunnel with the complex analysis conditions.

KeyWords: Ground Loosening Loads, Load-Transfer, Mass-spring Model, Secondary Tunnel Lining, Primary Support

초 록. 터널 2차라이닝은 지반하중의 합리적인 산정기준의 부재와 보수적 경향의 지반이완하중법이 적용되고 있기 때문에 과다한 경향으로 보강되고 있는 실정이다. 2차라이닝에 고려되는 주요하중으로는 지반이완하중과 수압을 들 수 있으며, 배수터널의 경우에는 지반하중이 가장 큰 하중이 된다. 터널 주변 지반에 별도의 외력이 작용하지 않는다면, 2차라이닝에 작용하는 하중의 직접적인 원인은 1차지보재의 지지력 저하이다. 따라서, 2차라이닝의 설계시에는 지반과 1차지보재와의 상호작용을 고려한 합리적인 해석방법이 요구된다. 본 논문에서는 단순한 질량-스프링 모델을 통하여 지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용을 개념적 모델로 설명하였으며, 이를 원형 터널에 대한 이론해석을 통하여 지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용에 대한 하중전이 특성을 입증하였다. 그리고, 복잡한 터널해석조건에 대한 본 모델의 적용성을 검토하기 위하여 수치해석법의 적용성을 검증하였다.

핵심어: 터널 2차라이닝, 1차지보재, 지반이완하중, 하중전이, 질량-스프링 모델

1. 서 론

국내 대부분의 터널구조물은 숏크리트, 록볼트, 강지

보재 등에 의한 굴착 중 지지를 위한 1차지보재와 콘크리트라이닝의 2차지보재(이하 2차라이닝)로 구성되어 있다. 국내에 NATM이 도입된 당시에는 2차라이닝의 역할이 극히 불량한 지반조건을 제외하면, 내부 시설물의 보호나 내장 기능 정도로 고려되어 구조적 역할에 대한 기대는 낮았다.^{1,2)} 그러나, 근래에는 2차라이닝에 대한 구조적 기능이 강조되어 일반 콘크리트 구조물과 동일한 방법으로 설계되고 있다. 터널의 2차

¹⁾정회원, (주)유신코퍼레이션 터널부 대리

²⁾정회원, (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소 부장

³⁾정회원, 아주대학교 환경도시공학부 교수

접수일: 2002년 5월 28일

심사 완료일: 2002년 6월 21일

라이닝에 고려되고 있는 하중은 크게 이완하중과 수압을 들 수 있으며, 배수터널의 경우에 수압은 잔류수압으로 고려되거나 무시되어 지반하중이 가장 주요한 하중이 된다. 이완하중의 원인으로는 슛크리트나 록볼트와 같은 1차지보재의 지지력 상실과 터널 주변의 근접시공에 의한 지반의 2차 변형을 들 수 있다.¹⁾

일반적으로 터널의 2차라이닝의 해석에는 라이닝을 썸, 전단, 축력에 저항하는 보요소(*beam element*)로, 지반은 축력에만 저항하는 스프링요소로 고려한 지중골조해석(*embedded frame analysis*)법이 적용되고 있다.^{1,4,6)} 이 방법은 터널 1차지보재 해석에 적용되는 수치해석법과 같이 지반과 구조체의 평형상태를 구할 수 없기 때문에 구조체에 작용시킬 지반하중을 산정하여야 한다.⁶⁾ 그러나, 터널 1차지보재의 지지력 저하나 근접시공에 의한 지반의 2차 변형에 대하여 2차라이닝에 작용할 하중을 산정하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 터널설계 실무에서는 경험적 방법으로 산정된 이완하중을 2차라이닝에 작용시켜 구조적 보강을 하고 있는 실정이다.

통상적으로 2차라이닝에 적용하는 하중은 Terzaghi의 수정이완하중이나 RMR에 의한 이완하중법이 적용되고 있다.⁴⁾ 이러한 하중은 과다한 경향이 있으며 축압산정이 모호하다는 것은 주지의 사실이나 정량적이고 합리적인 기준이 없기 때문에 터널관련 기술자 사이에도 많은 논쟁 요인이 되고 있다. 이는 터널설계를 위한 각종 설계기준이나 시방서에 콘크리트라이닝의 보강에 대한 당위성만이 제시되어 있고 구체적인 구조계산 방법 및 기준이 제시되어 있지 않기 때문이다.^{2,3)} 또한, 풍화도, 풍화암과 같이 연약한 암반 또는 토사에 가까운 지반조건에서는 이완하중의 적용이 불분명할 뿐 아니라 크기가 매우 커서 2차라이닝의 과도한 보강이 이루어지는 경우가 많다.

본 연구에서는 터널굴착 및 지보와 연계된 연장선상에서 콘크리트 라이닝의 구조적 기능을 이해하기 위하여, 질량-스프링모델을 통하여 지반, 1차지보재, 2차라이닝의 상호작용을 고려하여 각각을 단순한 스프링 모델로 표현하여 각 요소의 지반하중분담 개념을 설명하였고 변위와 하중 그래프를 통하여 각 요소의 하중이력 경로를 표현하였다. 이러한 개념을 토대로 지반, 1차지보재, 터널라이닝의 상호작용을 고려한 수치해석 기법을 제안하였다.

2. 개념적 모델을 이용한 2차라이닝 거동특성

Fig. 1은 터널 2차라이닝의 구조적 거동을 간단한 질량-스프링 모델을 이용하여 굴착, 1차지보재 설치, 2차

라이닝 타설, 추가하중 발생의 순차적 과정을 도시한 것이다.

터널굴착전의 초기지반은 Fig. 1(a)와 같이 평형상태에 있으며, 이는 가상의 터널 공간내에 지반이 채워져 평형상태를 유지하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 지반의 질량을 *m*, 지반스프링을 *k_g* 라 하면, 초기지반의 하중 *mg* (*g*는 중력가속도)는 원지반의 초기변위 *u₀* 에 대하여 *k_g · u₀* 와 평형을 이루고 있으며 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 모든 지반하중은 지반자체의 지지력(*F_g*)에 의하여 지지되고 있다.

$$mg = k_g \cdot u_0 = F_g \tag{1}$$

터널굴착과 1차지보재가 설치되면 Fig. 1(b)와 같이 추가변위(Δu_1)에 대하여 감소된 지반강성(αk_g , $\alpha < 1$)과 추가된 지보재강성(*k_s*)에 의하여 새로운 평형상태에 도달하게 된다. 지반하중은 지반지지력(*F'_g*)과 1차지보재의 지지력(*F_s*=*k_s · Δu₁*)에 의하여 분담되어 지지된다.

$$\begin{aligned} mg &= \alpha k_g \cdot u_0 + (\alpha k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 \\ &= \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1) + k_s \cdot \Delta u_1 \\ &= F'_g + F_s, \end{aligned} \tag{2}$$

where,

$$F'_g = \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1), F_s = k_s \cdot \Delta u_1$$

2차라이닝이 설치되면 Fig. 1(c)와 같이 1차지보재에 의해 굴착면의 변위가 완료된 후 시공하였을 때 원칙적으로 작용하중이 2차라이닝 자체의 자중만이 되며 이 하중은 지반하중에 비하여 극히 미소하기 때문에 무시될 수 있다 (*m₁ ≪ m*). 따라서, 이 단계에서는 지반하중에 대한 지반과 1차지보재의 지지력 평형관계는 유지되고 지반하중에 대한 2차라이닝의 구조적 역할은 거의 없다.

$$\begin{aligned} mg &= \alpha k_g \cdot u_0 + (\alpha k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + (\alpha k_g + k_s + k_1) \cdot \Delta u_2 \\ &\approx \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1) + k_s \cdot \Delta u_1 \quad (\because \Delta u_2 \approx 0) \end{aligned} \tag{3}$$

$$= F'_g + F_s$$

터널의 2차라이닝에 하중이 작용하는 원인은 지반하중이 변하거나 1차지보재 또는 지반강성이 저하되는 경우를 들 수 있다. 지반하중이 변하는 요인은 근접시공에 의한 굴착이나 성토, 수압변화 또는 지진하중 등을 들 수 있다. 1차지보재의 열화는 록볼트의 부식이나

숏크리트의 알칼리골재반응 등의 요인을 들 수 있으며, 지반강성저하는 공사중 지반개량체의 강성저하나 기타 요인에 의한 지반의 역학적 특성의 저하를 들 수 있다.

지반하중이 변하는 경우 Fig. 1(d)-1과 같이 추가하중($\Delta m \cdot g$)에 대한 추가변위(Δu_3)에 대하여 지반, 1차 지보재, 2차라이닝은 각 강성의 크기에 따라 하중을 분담하게 된다. Fig. 2(a)는 증가된 지반하중에 대하여 각 요소의 지지력이 증가하는 하중경로를 보여준다.

$$\begin{aligned}
 (m + \Delta m)g &= \alpha k_g \cdot u_0 + (\alpha k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + (\alpha k_g + k_s + k_1) \cdot \Delta u_3 \\
 &= \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_3) + k_s (\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \quad (4) \\
 &= F_g'' + F_s' + F_1
 \end{aligned}$$

where, $F_g'' = \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_3)$

Fig. 1(d)-2의 단계는 1차지보재가 열화되어 강성이 k_s' ($k_s' < k_s$)로 저하되는 경우로서 1차지보재가 부담하는 지지력의 일부가 지반과 2차라이닝으로 전이되게 된다. Fig. 2(b)에 의하면, 1차지보재의 강성저하로 인하여 1차지보재의 지지력은 감소하나 지반과 2차라이닝의 지지력이 증가하여 새로운 평형상태가 이루어짐을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 mg &= \alpha k_g \cdot u_0 + (\alpha k_g + k_s') \cdot \Delta u_1 + (\alpha k_g + k_s' + k_1) \cdot \Delta u_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \alpha k_g (u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_3) + k_s' (\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \quad (5) \\
 &= F_g'' + F_s' + F_1
 \end{aligned}$$

Fig. 1(d)-3의 단계는 지반강성이 저하되는 경우로 4-2 단계와 유사하여 1차지보재 대신에 지반의 지지력이 저하되어 이를 1차지보재와 2차라이닝이 부담하게 된다. Fig. 2(c)와 같이 지반은 총변위량($u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_3$)과 저하된 강성(βk_g , $\beta < \alpha$)의 위치(F_g'')에 도달하게 된다.

$$\begin{aligned}
 mg &= \beta k_g \cdot u_0 + (\beta k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + (\beta k_g + k_s + k_1) \cdot \Delta u_3 \\
 &= \beta k_g (u_0 + \Delta u_1 + \Delta u_3) + k_s (\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \quad (6) \\
 &= F_g'' + F_s' + F_1
 \end{aligned}$$

3. 지반-1차지보재-2차라이닝 상호작용 모델

본 논문에서 제안하는 2차라이닝 해석모델은 앞의 2장에서 개념적으로 설명된 조건중에서 4-2단계를 대상으로 한다. 본 모델의 의도는 기본적으로 1차지보재의 지지력 저하에 대하여 지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용 메커니즘을 구현하는 것이다.

터널 2차라이닝에 작용하는 하중의 크기 및 양상은 근본적으로는 1차지보재와 지반의 평형조건에 의하여

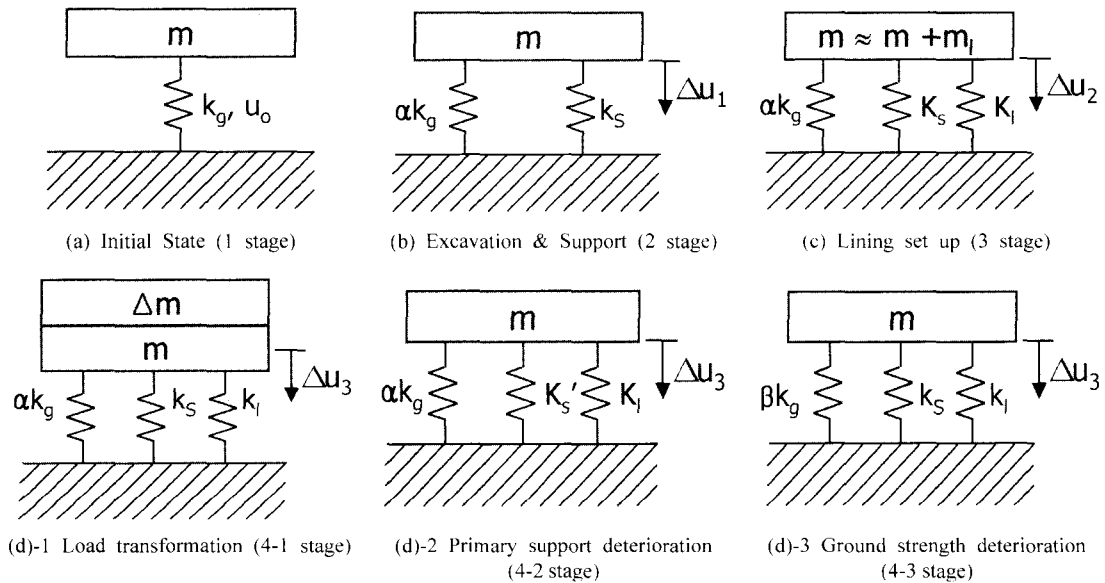


Fig. 1. Structural behaviour of concrete lining as mass-spring model.

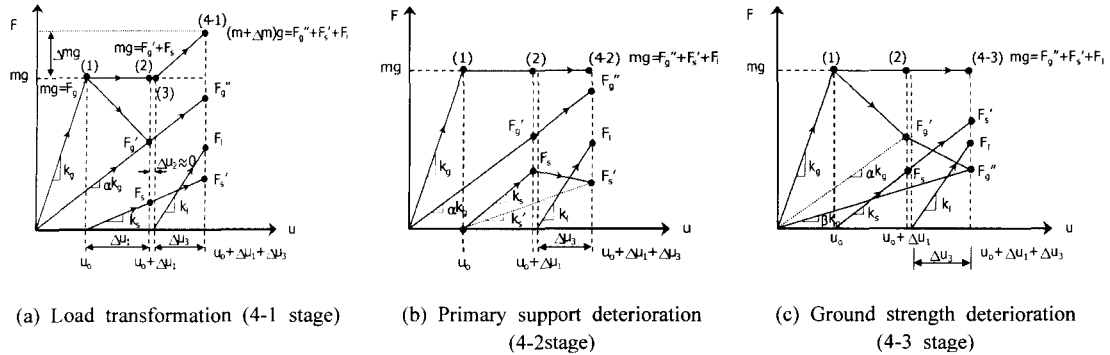


Fig. 2. Ground reaction curve since then set up of a concrete lining.

결정된다. 이러한 평형조건에서 1차지보재의 지내력이 상실되면, 지반과 2차라이닝은 각각의 상대적 변형특성에 따라 하중을 분담하게 된다. 2차라이닝의 강성(stiffness)이 지반에 비하여 상대적으로 높거나 지반의 변형특성 및 강도가 낮을수록 2차라이닝의 분담률은 높아진다. 또한, 1차지보재가 지지하고 있던 하중은 지반과 2차라이닝이 분담할 하중의 크기에 결정적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 관점을 고려하면, 2차라이닝의 해석에는 라이닝타설 전의 지반과 1차지보재의 평형조건이 반영되어야 하며, 이는 재래의 골조해석방법의 적용은 불가능하고 수치해석방법의 적용이 불가피하다.

현재 터널수치해석은 2차라이닝 타설 이전의 굴착과 지보단계를까지만 이루어지고 있으나, 순차적 해석이 가능한 수치해석 특성상 2차라이닝 타설과 1차지보재 지내력 상실단계까지의 확장이 가능하다. 즉, 굴착과 지보 완료후에 라이닝요소를 설치하고 1차지보재를 제거하면, 1차지보재가 공유했던 지반요소의 절점에는 불평형력(unbalanced force)이 발생하여 지반과 2차라이닝에 대한 새로운 평형조건을 구하게 된다. 이 방법은 2차라이닝 설치 이전의 지반과 1차지보재의 하중이력을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 기존의 해석방법 중 해석단계를 확장하였기 때문에 손쉽게 실무에 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 기존의 골조해석에서 요구되는 지반하중 산정과 지반반력계수 산정 등의 작업이 불필요한 장점이 있다.

본 제안모델의 이론적 적정성을 검토하기 위하여 원형공동에 대한 탄성 및 탄소성 이론해를 이용한 지반-1차지보재-2차라이닝 반응곡선 분석을 수행하였다(4장 참조). 또한, 수치해석에 대한 적용성을 검토하기 위하여 수치해석결과와 이론해의 비교분석을 수행하였다(5장 참조).

4. 이론해에 의한 2차라이닝 모델 검토

터널시공시 지보재의 하중분담효과와 1차지보재 열화시 2차라이닝의 하중분담효과를 분석하기 위해 간단한 원형공동 예제에 대한 이론해석을 수행하였다. 이론 해석에는 초기지중응력이 등방압력 P인 균일한 지반내 원형터널에 대하여 Kirsch와 Mohr-Coulomb의 이론해를 적용하였다.

4.1 탄성이론해

탄성론을 근거로 한 탄성체내의 원형공동 주변에 발생하는 응력, 변형 그리고 변위를 계산하는 이론은 이미 Kirsch's solution으로 잘 알려져 있다.⁷⁾ 압반내 굴착된 3차원적인 원형수평 터널의 경우 2차원 평면변형 혹은 평면응력 조건으로 생각하여 원형터널 주변의 응력분포를 구하면 다음의 Fig. 3 및 (7)과 (8)식으로 나타낼 수 있다.

Fig. 3에서 반경 a인 공동 주변에 극좌표(r, θ)에서의 응력 σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$ 는 다음의 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{p_1 + p_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
 \sigma_\theta &= \frac{p_1 + p_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\
 \tau_{r\theta} &= -\frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

평면변형을 조건을 가정하여 다음 식으로 변위를 구할 수 있다.

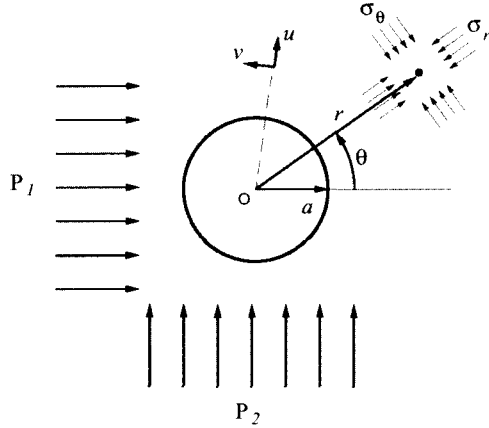


Fig. 3. Cylindrical hole in an infinite elastic medium.

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{p_1 + p_2}{4G} \frac{a^2}{r} + \frac{p_1 - p_2}{4G} \frac{a^2}{r} \left\{ 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \\
 v_\theta &= -\frac{p_1 - p_2}{4G} \frac{a^2}{r} + \left\{ 2(1 - 2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서, u_r : 반경방향 변위
 v_θ : 접선방향 변위
 G : 전단탄성계수
 ν : 포아송비

4.2 탄소성 이론해

Salencon의 해를 기초로 한 이론 모델을 분석하면 소성반경 R_o 는 다음식으로부터 계산된다.⁸⁾

$$R_o = a \left(\frac{2}{K_p + 1} \frac{P_o + \frac{a}{K_p - 1}}{P_i + \frac{a}{K_p - 1}} \right)^{\frac{1}{(K_p - 1)}}
 \tag{9}$$

여기서, a : 굴착 반경

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$q = 2c \tan(45 + \phi/2)$: 지반의 일축압축강도

P_o : 초기응력

P_i : 굴착면에서의 작용하는 반경방향 압력

한편, 응력이 소성영역내에 있으면 지반은 수동축압 계수 K_p 와 지반의 일축압축강도에 의해 지배된다. 소성영역내의 반경방향 및 접선방향응력은 다음의 식으로 나타난다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{a}{K_p - 1} - \left(P_i + \frac{a}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{K_p - 1} \\
 \sigma_\theta &= \frac{a}{K_p - 1} - K_p \left(P_i + \frac{a}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{K_p - 1}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

여기서, σ_r, σ_θ : 소성상태에서의 반경방향 및 접선 방향 응력

r : 공동 중심에서의 거리

탄소성 경계에서의 반경방향응력은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\sigma_{re} = -\frac{1}{K_p + 1} (2P_o - q)
 \tag{11}$$

탄성영역에서의 반경방향 및 접선방향응력은 다음의 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= -P_o + (P_o - \sigma_{re}) \left(\frac{R_o}{r} \right)^2 \\
 \sigma_\theta &= -P_o - (P_o - \sigma_{re}) \left(\frac{R_o}{r} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Salencon(1969)의 해에 의하면, 탄성영역과 소성영역에서의 변위는 각각 식 (13)과 식 (14)와 같다.

$$u_r = -\left\{ P_o - \left(\frac{2P_o - q}{K_p + 1} \right) \right\} \left(\frac{R_o}{2G} \right) \left(\frac{R_o}{r} \right)
 \tag{13}$$

$$u_r = -\frac{r}{2G} \chi
 \tag{14}$$

식 (14)에서 χ 는 다음 식으로 결정된다.

$$\begin{aligned}
 \chi &= (2 - \nu) \left(P_o + \frac{a}{K_p - 1} \right) \\
 &+ \left(\frac{(1 - \nu)(K_p^2 - 1)}{K_p + K_{ps}} \right) \left(P_i + \frac{a}{K_p - 1} \right) \left(\frac{R_o}{a} \right)^{(K_p - 1)} \left(\frac{R_o}{r} \right)^{(K_p + 1)} \\
 &+ \left((1 - \nu) \frac{(K_p K_{ps} + 1)}{K_p + K_{ps}} - \nu \right) \left(P_i + \frac{a}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\text{여기서, } K_{ps} = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

ψ : 팽창각(dilation angle)

G : 전단탄성계수

ν : 포아송비

4.3 예제를 통한 분석결과

등방압력 P인 균일한 지반에서 굴착반경 5 m인 원형

Table 1. Rock properties.

Young's Modulus (tf/m ²)	Cohesion (tf/m ²)	Poisson's Ratio	Friction Angle (°)	Density (tf/m ³)	Initial Stress (tf/m ²)
5.0 × 10 ⁴	50	0.2	30	2.68	800

Table 2. Lining properties.

Lining	Young's Modulus (tf/m ²)	Thickness (m)	Uniaxial Strength (tf/m ²)	Moment of Inertia (m ⁴)
Primary Lining	1.5 × 10 ⁶	0.2	3000	0.00667
Secondary Lining	2.1 × 10 ⁶	0.4	3500	0.00533

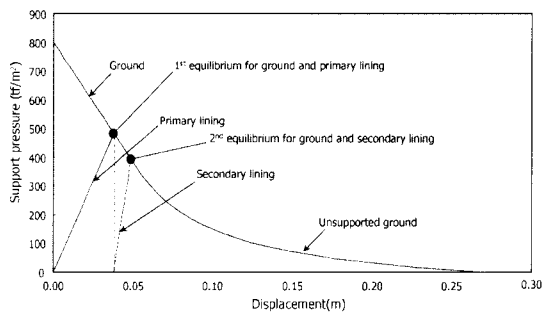


Fig. 4. Theoretical analysis of rock-support interaction.

터널에 대하여 이론해를 Table 1, 2와 같은 지반과 지보재의 물성치를 적용하여 암반과 지보의 상호작용을 분석해 보았다.

Fig. 4는 지반 굴착후 무지보 상태의 응력-변위 곡선과 지보재의 지보압력을 나타낸 그래프로서 응력이 수렴되어감에 따라 변형은 비탄성적으로 크게 발생되며

평형상태에 도달한다. 지반이 평형상태에 이르기 전에 지보재를 설치하면 지반의 응력과 지보압력이 일치할 때까지 변위가 발생하고 종국에는 1차평형상태에 이른다. 이 때에는 2차라이닝이 타설되어도 하중이 작용하지 않게 된다. 그러나, 1차라이닝이 열화되어 지지능이 상실되면, 1차평형조건이 깨어져 지반의 2차변위가 발생하여 수동지보재인 2차라이닝에 하중이 작용하게 된다. 지반변위는 2차라이닝과 2차평형상태에 도달할 때까지 발생하게 된다. 2차평형위치에서의 2차라이닝 하중은 1차라이닝의 하중보다 작으며 이는 지반의 2차변위로 인하여 지반하중이 일부 소산되었기 때문이다.

5. 수치해석에 대한 적용성 분석

탄성과 탄소성 조건에 대하여 Fig. 5와 Table 1, 2와 같은 조건에 대하여 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 사용하여 수치해석을 수행하였다.⁸⁾ 터널의 1차와 2차라이닝은 범요소로 모델링하였다.

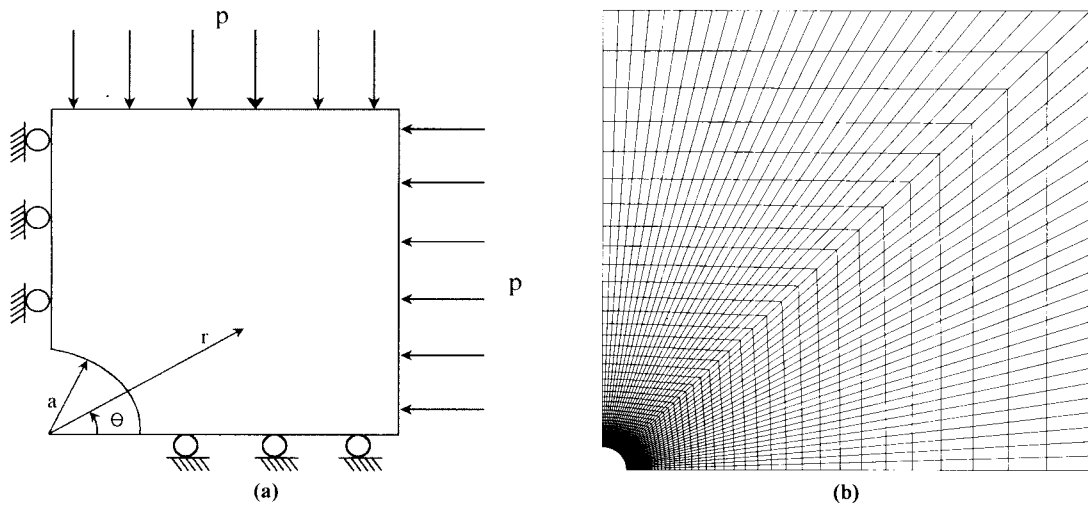


Fig. 5. Model and finite difference mesh for analysis.

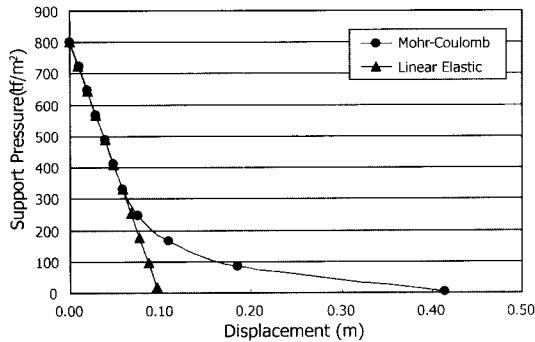


Fig. 6. Ground reaction curves for unlined tunnel.

먼저, 무지보 조건에서 터널굴착시에 굴착면에서의 응력수준에 따른 변위를 비교해 보았다. Fig. 6은 탄성 조건과 Mohr-Coulomb 소성조건에서의 지반거동을 보여주고 있다. 탄성조건 경우에는 변위와 지지압이 선형비례관계를 보이며 소성조건에서는 지반의 소성발생으로 의하여 변위가 비선형적으로 크게 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 동일조건에서의 지보재 설치시에 지보재에 의한 응력 분담효과를 보여주는 그래프이다. 지보재를 설치했을 때의 지반은 탄성거동내에 있기 때문에 지반 반응곡선은 선형을 보여주고 있다. 수치해석에 의한 지반-1차라이닝-2차라이닝 반응곡선은 이론해석 경향과 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 수치해석에서 적용한 범요소와 실제 두께의 라이닝과의 미소한 모델링 차이로 인하여 약간의 변위차이가 발생하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 터널굴착 및 지보와 연계된 터널의 2차라이닝의 거동특성을 이해하기 위하여 지반-1차지보재-2차라이닝 상호작용을 고려한 질량-스프링 모델을 통하여 각 요소의 지반하중분담 개념을 설명하였다. 또한, 원형공동에 대한 이론해석을 이용하여 모델링 방법의 역학적 적합성을 검토하였고 수치해석예제를 통하여 복잡한 터널해석조건에 대한 적용성을 평가해 보았다.

본 연구에서 제시한 2차라이닝 모델링은 기존의 골조해석모델에 비하여 2차라이닝이 타설되는 지반조건

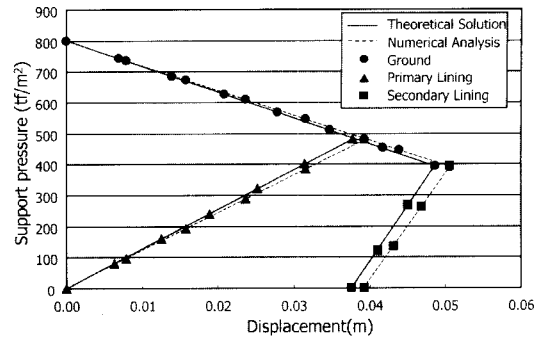


Fig. 7. Ground reaction curves for lined tunnel.

과 1차지보재 설치조건을 합리적으로 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한, 현재 터널공사중 안정성 평가단계에서 그치고 있는 수치해석기법을 2차라이닝 단계까지 확장하는 방법이기 때문에 기존의 해석기법에 손쉽게 적용될 수 있다. 따라서, 본 모델은 현재 국내외에서 논란이 되고 있는 2차라이닝 보강문제에 있어서 새로운 접근방법이 될 수 있을 것으로 생각된다.

향후 연구과제로는 본 모델의 실무적용 경험의 축적과 더불어 1차지보재의 열화정도를 고려하는 방법과 슛크리트와 같은 1차지보재와 2차라이닝의 계면(interface) 처리 문제를 들 수 있다.

참고문헌

1. 서울특별시 지하철본부, 1994, 제2기 서울지하철 터널설계 및 시공감리 종합보고서, 181-192.
2. 건설교통부, 1999, 터널설계기준, 구미서관, 서울, 38-41.
3. 건설교통부, 1999, 터널표준시방서, 구미서관, 서울, 55-57.
4. 천병식, 신영완, 2001, NATM 터널 콘크리트라이닝 설계 하중에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 11.2, 307-320.
5. Hoek, E. & Brown, E.T., 1980, Underground Excavation in Rock, IMM, London, 244-258.
6. O'Rourke, T.D., 1984, Guidelines for Tunnel Lining Design, ASCE, New York, 1-23.
7. Goodman R.E., 1980, Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 215-216.
8. Itasca Consulting Groups, 2000, FLAC Ver 4.0 Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.

서 성 호



1997년 아주대학교 공과대학 토목설계
공학과, 공학사
2002년 아주대학교 대학원 건설교통공
학과, 공학석사

Tel: 02-555-7132 (813)
E-mail: ssh0830@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 터널부 근무

장 석 부



1990년 한양대학교 공과대학 자원공학
과, 공학사
1992년 한양대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1997년 한양대학교 대학원 자원공학과,
공학박사

Tel: 02-555-7132 (802)
E-mail: sbchang@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 건설기술연
구소 근무

이 상 덕



1980년 서울대학교 공과대학 토목공학
과, 공학사
1982년 서울대학교 대학원 토목공학과,
공학석사

1987년 독일 Stuttgart대학교 대학원 토
목공학과, 공학박사
Tel: 031-219-2503
E-mail: lsangduk@madang.ajou.ac.kr
현재 아주대학교 공과대학 환경도시공학
부 교수