

콘크리트 라이닝의 설계방법 및 최근 해석 기법



김시격
다산컨설턴트
지반공학부



박성식
다산컨설턴트
지반공학부

1. 서언

NATM에서는 슛크리트 및 록볼트 등 1차 지보재 시공 단계에서 터널주변 지반변위를 완전히 수렴시킨후 콘크리트 라이닝을 시공하게 됨으로써, 콘크리트 라이닝이 개념상 구조적 기능을 담당하고 있지 않음에 따라 그 필요성 여부에 대한 논란이 지속되어 왔다.

실제로 북유럽 노르웨이나 스웨덴에서는 절리가 적고 양호한 암반은 터널마감을 슛크리트로 처리하고 콘크리트 라이닝을 생략하는 경우가 종종 있다. 이러한 콘크리트 라이닝의 필요성 여부에 대한 논란은 이론상 수압을 받지 않는 배수식 터널에서 발생하는데, 우리나라의 대부분 터널은 배수식 터널로 설계 및 시공되어 있으므로 콘크리트 라이닝의 구조적 필요성 여부에 관한 개념적 정립이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

이론상 콘크리트 라이닝의 구조적 기능이 명확히 정립되어 있지 않음에도 불구하고 일부 양호한 암반을 제외하

고는 대부분의 터널기술자들은 콘크리트 라이닝의 필요성에 동의하고 있다.

이러한 동의의 배경으로 1차 지보재인 슛크리트와 록볼트의 내구년한의 예측이 불가능하다는 설과 장기적으로는 1차 지보재에 의해 전이되는 지반하중을 콘크리트 라이닝이 부담해야 한다는 설도 있다.

또한 연약지반에 건설되는 얇은 지하철 터널의 경우, 건설후 지반 변위에 영향을 주는 추가 지반하중이나 배수시설의 기능저하에 따른 잔류수압 발생 가능성 등을 이유로 콘크리트 라이닝의 구조적 기능에 대한 필요성을 주장하는 이도 있다.

이러한 사유로 인하여 지금까지도 콘크리트 라이닝에 적용되는 설계하중의 산정방법이 명쾌하게 정립되어 있지 않아 설계자들이 많은 혼선이 빚어지고 있는 것이다.

본고에서는 기존의 설계방법 및 설계하중을 간략하게 언급한 후 새로운 모델과 설계기법을 소개하여 향후 이 분야에 대한 연구와 설계적용에 도움을 주고자 한다.

2. 콘크리트 라이닝의 설계방법

콘크리트 라이닝 설계방법은 지반과 구조에 따른 하중-변형 거동을 표현할 수 있어야 하고, 지반-라이닝 상호작용을 정확히 모사해야 한다. 이러한 방법은 아래와 같은 몇 가지 방법이 있다.

2.1 경험적인 방법

경험적인 방법은 과거 시공시 계측 등을 이용하는 방법으로써 가정된 또는 경험적인 토압분포를 이용하여 유도된 공식을 적용하여 축력과 휨모멘트를 계산하는 방법으로 라이닝 설치전 지반 응력 재분배를 고려하지 못하고, 토압이 지반변위와 무관하므로 지반-라이닝의 상호작용이 무시되는 단점이 있다.

Morgan(1961)은 탄성보 이론을 이용하여 라이닝변형으로 발생하는 최대휨 모멘트 산정식을 식 (1)과 같이 제안했다.

$$M_{\max} = 3EI \frac{\Delta R}{R^2} \quad (1)$$

여기서, EI : 휨강성,

R : 터널반경,

ΔR : 라이닝의 상대변위

Peck 등(1972)은 토사터널에서 라이닝은 터널직경 0.5% 이하로 변형한다고 하였다.

이 방법은 라이닝에 균등한 압축력이 작용한다고 가정하고 전 상재하중을 고려하므로 너무 보수적이고, 라이닝 변형으로 인해 발생하는 모멘트를 고려하지 못하는 문제점이 있어 잘 사용되지 않는다.

2.2 Ring & Plate 모델

이 방법은 지반을 Plate로 라이닝은 연속 Ring으로

모델링 한다. 연속체 역학에 기초한 탄성해(closed form solution)를 제공하며, 그 해는 지중응력의 균등여부에 따라 균등 응력장에서의 해와 비균등 응력장에서의 해로 나눈다. 탄성모델의 장점이자 단점인 단순성으로 인하여 현장조건을 직접 고려하기 어렵고, 그 결과를 적용하기 위해서는 신중한 판단이 요구된다. 그럼에도 불구하고 각종 매개변수가 설계에 미치는 영향을 검토하는 경우에는 유용하게 이용될 수 있다.

2.3 지중골조 모델(Beam & Spring Model), 보요소법

이 방법은 지반을 평면 변형률 조건의 스프링으로, 라이닝은 보(beam)요소로 표현하며 지반과 터널 구조물과의 상호작용은 탄성스프링으로 시뮬레이션 한다. 조건에 따라 법선방향과 접선방향 탄성 스프링을 사용하고, 보통은 라이닝의 압축력에만 유효하고 인장력에는 유효하지 않는 법선방향 스프링만 설치하고 접선방향 스프링은 설치하지 않는데 이는 지반강성을 약하게 하여 안전측 설계가 되는 경향이 있다. 이 방법은 라이닝에 임의방향의 하중을 가할 수 있는 장점이 있는 반면에, 지반거동을 선형 탄성 거동으로 가정하여 지반응력 이완 후에 라이닝이 설치되는 것을 고려할 수 없는 단점이 있으며 미리 예측된 외부하중값을 직접 라이닝에 작용시켜야 한다.

현재 라이닝 구조해석과 단면결정에 주로 적용되고 있는 방법이다.

보요소법은 일반적으로 강성계수(β)가 200이하인 경우에 적용하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.

$$\beta = \frac{EsR^3}{EI} < 200 \quad (2)$$

여기서, Es = 지반의 탄성계수,

R = 터널반경,

EI = 라이닝의 휨 강성

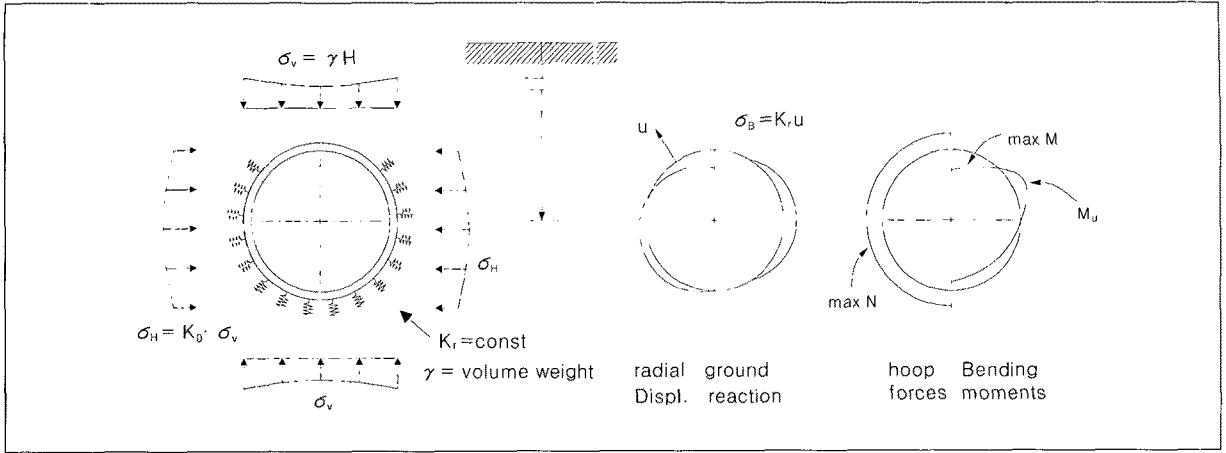


그림 1. 보 요소법 모식도

2.4 수치해석 방법(Beam - Continuum Model)

이 방법은 라이닝의 거동 예측을 위해 주변지반을 연속체요소로 모델링하는 유한요소법(FEM) 또는 유한차분법(FDM)등을 이용하는 방법으로 지반 및 라이닝은 연속체로 취급한다.

수치해석법의 주된 장점은 라이닝 하중과 지반변위가 동시에 얻어질 수 있다는 것이다.

또한, 임의의 터널 형상, 지표면조건, 지질학적 불연속면 그리고 비선형재료 등 다양한 요소를 고려할 수 있는 장점이 있다. Paul 등(1983)은 비선형 요소를 사용하여 라이닝을 모델링하고 지반은 등방요소로, 지반과 라이닝 사이는 인터페이스 요소로 모델링하여 해석하기도 했다.

이 방법은 쉘드터널과 같이 지반이완하중을 세그먼트 라이닝이 모두 지지하는 경우에는 적용가능하나, NATM에서와 같이 1차 지보재인 슛크리트와 록볼트가 모든 하중을 지지하는 개념으로 설계하는 경우, 하중분담율을 라이닝에 얼마를 적용시킬 것인가 하는 것이 관건이 된다.

3. 콘크리트 라이닝의 설계하중

3.1 콘크리트 라이닝 설계시 고려해야 할 하중

일반적으로 콘크리트 라이닝의 설계는 구조해석을 위한 해석모델, 작용하중의 크기 및 조합, 입력 특성치의 결정 등 공학적 판단에 의해 영향을 받으므로 특정한 구조 해석 자체가 명쾌한 수단이 될 수 없는 경우가 많다. 콘크리트 라이닝 설계시 고려해야 할 하중들은 다음과 같다.

- ① 콘크리트 라이닝의 자중(사하중)
- ② 도로, 철도 및 기타 터널에 영향을 미치는 모든 차량 하중(활하중)
- ③ 토압 하중(암반 이완하중)
터널의 지반조건 및 시공법 등에 따라 지반자체의 지보능력을 고려하여 토압하중을 산정하는 경우와 전 토피하중(최고와 최저 지하수위를 고려한)에 해당하는 토압하중을 고려하는 경우가 있다.
- ④ 수압
비배수형 터널의 경우 최고와 최저 지하수위를 고려한 정수압을 산정한다.

- ⑤ 잔류수압
배수형 터널이 배수기능이 저하되어 라이닝에 하중으로 작용하는 경우
- ⑥ 온도하중 및 건조수축
- ⑦ 건물하중 등
이중 가장 크게 논란이 되고 있는 지반이완하중과 잔류수압 등에 대해 살펴보기로 한다.

3.2 지반이완하중

NATM에서는 슛크리트와 록볼트 등 1차지보재가 터널의 내구년한 동안 충분한 지보역할을 한다면 콘크리트 라이닝에는 지반이완하중이 작용하지 않을 수 있다. 그러나 지반조건이 열악하거나 슛크리트의 부식 등 1차 지보재가 지보능력을 상실할 경우나 변위가 수렴되지 않는 상태에서 라이닝을 타설 할 경우에는 이를 고려해야 하는데, 대표적인 지반이완하중 산정방법은 Terzaghi의 암반하중분류표, Bierbaumer 이론식, RMR 및 Q를 이용한 경험식, 수치해석에 의한 방법 및 발파영향에 의한 방법 등이 있다. 이를 간단하게 요약한 것이 표 1이다.

표 1. 지반이완하중 산정방법

산정방법	주요내용	특징
Terzaghi의 암반하중 분류표	- 무결암에서 팽창성 암반까지 암반상태에 따른 RQD를 9단계로 구분하여 암반이완하중 높이를 결정하는 경험적인 방법(1982년 ROSE가 수정함)	절리상태 등에 따라 9등급으로 구분되었으나 너무 개괄적이어서 암질의 객관적인 평가가 곤란함.
Bierbaumer의 이론식	- 암반하중과 토피, 암반하중과 내부마찰각과의 관계를 토피에 따라 3가지 식을 제안함 - 암반이완영역이 포물선 형태로 발생하는 것으로 가정	약 50m까지는 토피의 증가에 따라 암반하중이 계속 증가하는 식으로 지반조건에 영향반영곤란
RMR방법 또는 Q방법	- RMR방법 : RMR값을 이용한 경험식(Unal와 Venkateswarlu) - Q방법 : 절리군수 3을 경계로 Q값에 의한 경험식(Grimstad와 Barton)	현장에서 적용되고 있는 RMR 및 Q값을 이용한 경험식으로 다소 과다한 경향이 있음.
수치해석에 의한 방법	- 1차 지보재의 기능저하에 따른 소성영역을 이완하중으로 간주하고 수치해석을 통해 지반거동을 분석하는 방법	일반적으로 기존 이론식 및 경험식보다 다소 작은 부재력이 발생됨
발파영향에 의한 방법	- 터널 경계선에서 제어 발파를 실시하는 경우 굴착시 발파공 인접암반의 동적손상을 평가하여 손상영역을 이완하중으로 간주하여 분석하는 방법	지반조건 굴진장, 장약량 등에 따라 다소 차이가 있으나 전반적으로는 기존 이론식 및 경험식 보다 작은 부재력이 발생됨

표 1에 기술된 것 이외에도 여러 가지 방법이 있으나 대부분 이론식 또는 경험식으로서 이들을 실무에 그대로 적용하기 어려운 면이 있는 것은 암질이 약간만 나쁘면 배수형 터널인 경우 철근보강이 필요하기 때문일 것이다. 실무적용에 있어서는 그 한계를 명확히 규명할 수는 없지만 NATM 개념에서 시공중 변위가 완전히 수렴된 터널에 있어서는 이론식 또는 경험식보다 다소 작은 값을 적용하는 것이 경제성 및 시공성을 향상시키는 방안이 될 것으로 판단된다.

3.3 잔류수압

비배수형 터널의 경우 정수압을 고려하면 되기 때문에 문제가 발생되지 않으나, 배수형 터널에서 장기적인 배수기능 저하가 우려될 경우에는 잔류수압을 고려하여 설계하게 된다.

T.D.O'Rourke(1984)는 암반터널에서 라이닝에 작용하는 수압은 지하수위 아래에 있다 하더라도 수압과 접촉하는 영역이 감소되므로 전체 외부 정수압을 지지할 필요가 없다고 제안하였다. 배수형 터널에서 잔류수압의 형태

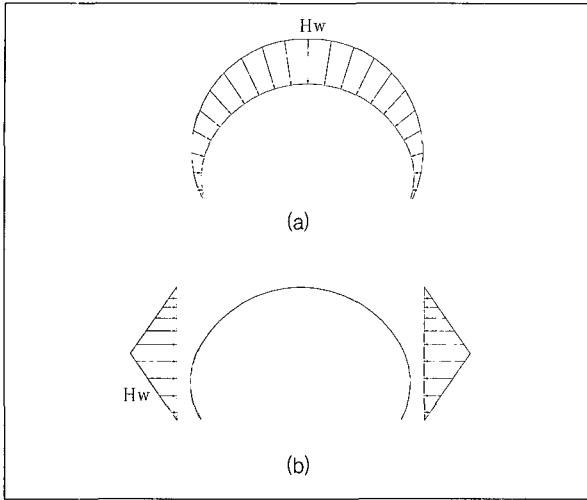


그림 2. 잔류수압 하중도

는 크게 그림과 같은 2가지 형태이다, (a)는 침투류해석에 의해 산정된 경험적인 형태이고, (b)는 얕은 터널에서 지하수위가 터널 천단부에 위치하고 측면배수기능이 원활할 때를 가정하여 산정된 수압모델이다. 이때 수압의 크기는 토사지반일 경우 최대수두를 터널높이의 1/2, 암반터널일 경우 최대수두를 터널높이의 1/3로 가정하여 설계하고 있다.

3.4 온도하중 및 건조수축하중

콘크리트 구조설계 기준 해설(2007) 제 19장 구조용 무근콘크리트 편에서는 아치작용에 의해 압축력이 유발되는 부재는 건조수축, 온도영향에 의해 발생하는 구속조건에서 인장응력을 고려하여야 한다고 기술되어 있으나, 구체적인 적용값에 대한 내용은 표현되어 있지 않고 도로교 설계기준(2008)에서는 수중 또는 토중에 있는 구조물에 대해서는 온도변화의 영향을 고려하지 않는다고 규정되어 있다. 터널의 콘크리트 라이닝과 같은 토중구조물은 교량과 같이 계절별 온도의 변화량 및 부재 상하면 온도의 변화량을 정량적으로 규명하기가 곤란할 뿐 아니라 그

표 2. 콘크리트의 건조수축률

콘크리트 재령	4~7일	28일	90일	365일
건조수축률	27×10^{-5}	20×10^{-5}	14×10^{-5}	7×10^{-5}

값이 미미하므로 터널 갱구부 구간 이외에는 온도하중을 고려할 필요가 없을 것으로 판단되며 정량적인 값은 앞으로 실험 등을 통해 규명해야 할 것이다.

한편, 콘크리트 구조물의 재료특성상 시간의 경과에 따라 크리프와 건조수축이 필연적으로 발생하게 되는데, 콘크리트 라이닝과 같이 일체시공하면서 시공전후 구조계의 변화가 없는 경우에는 크리프의 영향은 고려하지 않아도 좋다. 콘크리트 건조수축률은 보통 표 2를 기준으로 하는데, 이는 상대습도 70~73%, 증기양생, 등가부재두께 13cm 등의 표준조건에 해당되는 옥외의 경우에 대해 나타낸 값으로 터널에 직접 적용하는 데는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

특히, 터널 콘크리트 라이닝과 같이 양생기간이 짧은 콘크리트 건조수축 변형률은 $\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sh0} \beta_s (t - t_s)$ 식에 의해 구해지며 이 식에 의해 산정된 값은 표 2의 값보다 작을 것으로 추정되고 있다. 결론적으로, 콘크리트 라이닝 계산시 이원하중 또는 잔류수압을 적용할 경우에는 콘크리트 재령이 오래된 시점이므로 건조수축률을 재령 365일의 값을 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. 앞으로는 이러한 값들도 실험 등을 통해 규명해야 할 것이다.

4. 최근 수치해석 이론 소개

4.1 개념적 모델을 이용한 지반-1차지보재-2차 라이닝 상호거동 특성

1) 질량-스프링 모델

그림 3은 터널 2차라이닝의 구조적 거동을 간단한 질

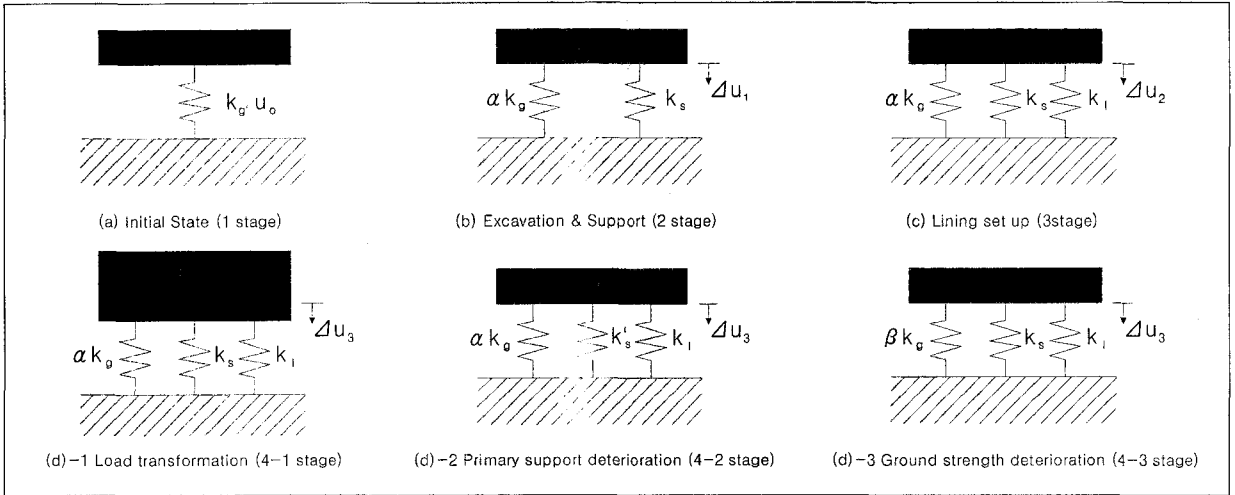


그림 3. Structural behaviour of concrete lining as mass-spring model

량-스프링 모델을 이용하여 굴착, 1차지보재 설치, 2차 라이닝 타설, 추가하중 발생의 순차적 과정을 도시한 것이다.

터널굴착전의 초기지반은 그림 3(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 u_o 에 대하여 $k_g \cdot u_o$ 와 평형을 이루고 있으며 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 모든 지반하중은 지반 자체의 지지력(F_g)에 의하여 지지되고 있다.

$$mg = k_g \cdot u_o = F_g \quad (3)$$

터널굴착과 1차지보재가 설치되면 그림 3(b)와 같이 추가변위(Δu_1)에 대하여 감소된 지반강성($\alpha k_g, \alpha < 1$)과 추가된 지보재강성(k_s)에 대하여 새로운 평형상태에 도달하게 된다. 지반하중은 지반지지력(F'_g)과 1차지보재의 지지력($F_s = k_s \cdot \Delta u_1$)에 의하여 분담되어 지지된다.

$$mg = \alpha k_g \cdot u_o + (\alpha k_g + k_s) \cdot \Delta u_1$$

$$\begin{aligned} &= \alpha k_g (u_o + \Delta u_1) + k_s \cdot \Delta u_1 \\ &= F'_g + F_s \end{aligned} \quad (4)$$

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

2차라이닝이 설치되면 그림 3(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($m1 \ll m$). 따라서, 이 단계에서는 지반하중에 대한 지반과 1차지보재의 지지력 평형관계는 유지되고 지반하중에 대한 2차라이닝의 구조적 역할은 거의 없다.

$$\begin{aligned} mg &= \alpha k_g \cdot u_o + (\alpha k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + (\alpha k_g + k_s + k_l) \cdot \Delta u_2 \\ &= \alpha k_g (u_o + \Delta u_1) + k_s \cdot \Delta u_1 \quad (\because \Delta u_2 \approx 0) \\ &= F'_g + F_s \end{aligned} \quad (5)$$

터널의 2차라이닝에 하중에 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 슛크리트의 알칼리골재반응 등의 요인을 들 수 있으며, 지반강성저하는 공사중 지반개량체의 강성저하나 기타요인에 의한 지반의 역학적 특성의 저하를 들 수 있다.

지반하중이 변하는 경우 그림 3(d)-1과 같이 추가하중 ($\Delta m \cdot g$)에 대한 추가변위 (Δu_3)에 대하여 지반, 1차지보재, 2차라이닝은 각 강성의 크기에 따라 하중을 분담하게 된다.

그림 4는 증가된 지반하중에 대하여 각 요소의 지지력이 증가하는 하중경로를 보여준다.

$$\begin{aligned}
 (m + \Delta m)g &= ak_g \cdot u_o + (ak_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + \\
 &\quad (ak_g + k_s + k_1) \cdot \Delta u_3 \\
 &= ak_g(u_o + \Delta u_1 + \Delta u_3) + \\
 &\quad k_s(\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \\
 &= F_{g''} + F_s' + F_1 \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서, $F_{g''} = ak_g(u_o + \Delta u_1 + \Delta u_3)$

그림 3(d)-2의 단계는 1차지보재가 열화되어 강성이 $k_s'(k_s k_s)$ 로 저하되는 경우로서 1차지보재가 부담하는 지

지력의 일부가 지반과 2차라이닝으로 전이되게 된다. 그림 4(b)에 의하면, 1차지보재의 강성저하로 인하여 1차지보재의 지지력은 감소하나 지반과 2차라이닝의 지지력이 증가하여 새로운 평형상태가 이루어짐을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 mg &= ak_g \cdot u_o + (ak_g + k_s') \cdot \Delta u_1 + (ak_g + k_s' + k_1) \\
 &\quad \cdot \Delta u_3 \\
 &= ak_g(u_o + \Delta u_1 + \Delta u_3) + \\
 &\quad k_s'(\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \\
 &= F_{g''} + F_s' + F_1 \quad (7)
 \end{aligned}$$

그림 3(d)-3의 단계는 지반강성이 저하되는 경우로 4-2단계와 유사하여 1차지보재 대신에 지반의 지지력이 저하되어 이를 1차지보재와 2차라이닝이 부담하게 된다.

그림 4(c)와 같이 지반은 총변위량 ($u_o + \Delta u_1 + \Delta u_3$)과 저하된 강성 ($\beta k_g, \beta < a$)의 위치 ($F_{g''}$)에 도달하게 된다.

$$\begin{aligned}
 mg &= \beta k_g \cdot u_o + (\beta k_g + k_s) \cdot \Delta u_1 + \\
 &\quad (\beta k_g + k_s + k_1) \cdot \Delta u_3 \\
 &= \beta k_g(u_o + \Delta u_1 + \Delta u_3) + \\
 &\quad k_s(\Delta u_1 + \Delta u_3) + k_1 \cdot \Delta u_3 \\
 &= F_{g''} + F_s' + F_1 \quad (8)
 \end{aligned}$$

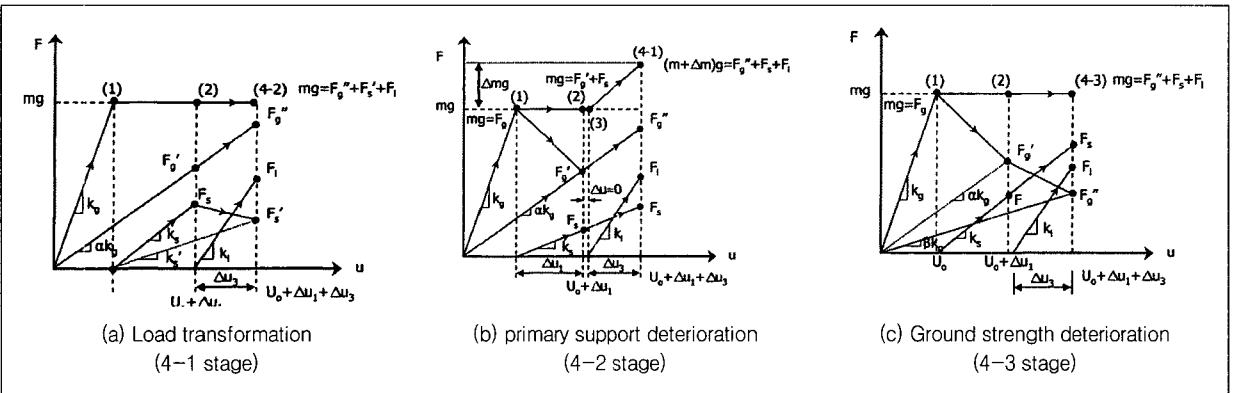


그림 4. Ground reaction curve since then set up of a concrete lining

2) 지반-1차지보재-2차라이닝 상호작용 모델

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

터널 2차라이닝에 작용하는 하중의 크기 및 양상은 근본적으로는 1차지보재와 지반의 평형조건에 의하여 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 지보단계까지만 이루어지고 있으나, 순차적 해석이 가능한 수치해석 특성상 2차라이닝 타설과 1차지보재 지내력 상실단계까지의 확장이 가능하다. 즉, 굴착과 지보 완료 후에 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 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.

4.2 콘크리트 라이닝의 탄소성 해석법

1) 해석모델의 정의

정수압 상태의 초기지압(p_o)이 작용하고 있는 Mohr-Coulomb 암반에 그림 5와 같이 반경 d 인 원형터널이 굴착된 후 내경이 a 인 콘크리트 라이닝이 설치된다는 가정 하에 라이닝 구조체 내부의 응력 및 변위 분포를 계산하였다. 콘크리트라이닝 벽면에는 내부압(p_{iL})이 작용하고 있으며 암반과 콘크리트 라이닝 영역에 대한 탄성정수(E, ν)와 강도정수(c, ϕ)의 크기는 각각 다르게 설정하였다.

평면변형률조건을 가정할 경우 해석대상 모델은 축대칭성을 고려하면 일차원 문제로 단순화 시킬 수 있으며 암반 및 콘크리트 라이닝 항복은 다음과 같은 Mohr-Coulomb 조건식에 의해 판단할 수 있는 것으로 가정하였다.

$$\sigma_\theta = N\sigma_r + Y \tag{9}$$

$$\text{여기서, } N = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}; \quad Y = \frac{2c\cos\phi}{1 - \sin\phi}$$

이다. σ_θ 와 σ_r 은 각각 원주방향 및 반경방향 수직응력을 나타내며, 이 연구에서는 σ_θ 가 최대주응력이고 σ_r 이 최소주응력이 되는 경우만 고려하였다. 강도정수 c, ϕ 는 각각 점착력, 내부마찰각을 나타낸다.

암반과 콘크리트 라이닝에서 발생하는 소성변형률을 계산하기 위해 식 (9)와 유사한 형태의 선형 소성포텐셜 함수를 가정하였으며, 이 경우 반경방향 소성변형률 증분(de_r^p)과 원주방향 소성변형률 증분(de_θ^p)의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$de_r^p = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} de_\theta^p \tag{10}$$

2) 라이닝 구조체 해석을 위한 경계면 압력

라이닝 구조체에 발생하는 응력과 변위를 계산하기 위

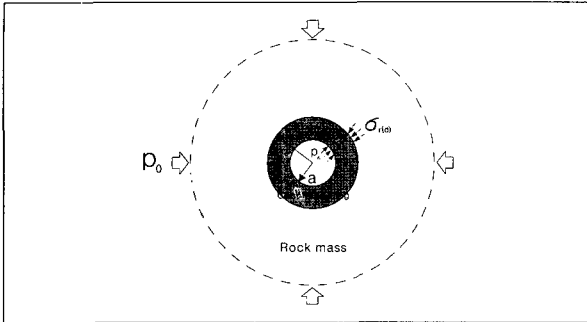


그림 5. Circular tunnel supported by concrete lining

해서는 그림 5에 나타난 바와 같이 라이닝의 안쪽 및 바깥쪽 경계면에 작용하는 압력 p_{iL} 과 $\sigma_{r(d)}$ 가 응력 경계조건으로 주어져야 한다. p_{iL} 은 일반터널의 경우 0이지만 수압터널이나 압축공기 저장터널의 경우 운전압력이 된다. 반면에 $\sigma_{r(d)}$ 는 라이닝의 설치 지연시간과 암반의 역학적 거동특성에 영향을 받기 때문에 정확한 값을 결정하는 것이 용이하지 않다.

터널의 2차원 해석에서 막장거리의 영향은 그림 6과 같은 개념적 모델(Sulem, et al., 1987)에 근거하여 근사적으로 해석에 반영시킬 수 있다. 굴착면에서 초기응력이 완전히 이완되었을 때 ($\sigma_r = 0, \lambda = 1$) 내공변위는 최대값 ($u_{max}, \beta = 1$)이 된다. 그림에서 λ 는 2차원 굴착면에서 막장의 진행효과를 근사하기 위해 적용하는 초기응력 개방률을 의미한다. 그러나 굴착면의 응력이 완전히 이완되기 이전에 콘크리트 라이닝이 설치된다면 내공변위 증가량 $(1-\beta)u_{max}$ 에 대응되는 크기의 지압 $\sigma_{r(d)}$ 가 콘크리트 라이닝의 배면에 작용하는 것으로 가정할 수 있다.

이 연구에서는 Sulem et al.의 개념적 모델을 바탕으로 라이닝 설치 지역에 따라 변화하는 라이닝 외부경계에 작용하는 압력 $\sigma_{r(d),\beta}$ 를 계산할 수 있는 간단한 수치해석 절차를 제안하였다.

그림 7과 같이 라이닝과 터널을 가상적으로 분리한다면 $\sigma_{r(d),\beta}$ 는 반경 d 인 무치보터널에서 내공변위 βu_{max} 를 발생시키는 지보압에 해당한다. 현장 계측을 통해 라이닝

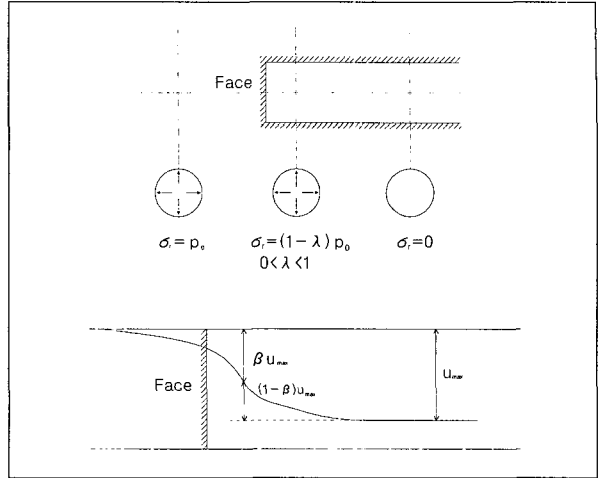


그림 6. Two-dimensional approximation of tunnel excavation

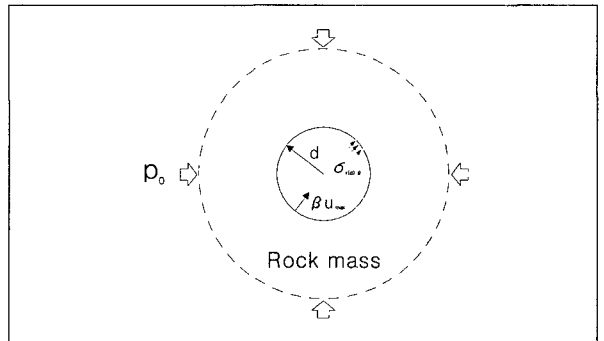


그림 7. Outer boundary pressure acting on the concrete lining

설치시점에 해당하는 β 값이 결정된다면 $\sigma_{r(d),\beta}$ 가 라이닝의 바깥쪽 면에 작용하는 응력경계조건이 된다.

3) 라이닝의 응력 및 변위분포 계산

앞에서 설명한 절차에 따라 콘크리트 라이닝의 응력경계조건이 결정되면, 다음 단계로 그림 8과 같은 콘크리트 라이닝 구조체에 대해 탄소성 해석이 실시된다.

이 연구에서는 $\sigma_{r(d),\beta} > p_{iL}$ 을 가정하여 라이닝 내부에서 발생하는 원주방향의 수직응력이 최대주응력인 경우만을 고려하였다.

해석조건에 따라 콘크리트 라이닝 영역에서는 그림 8

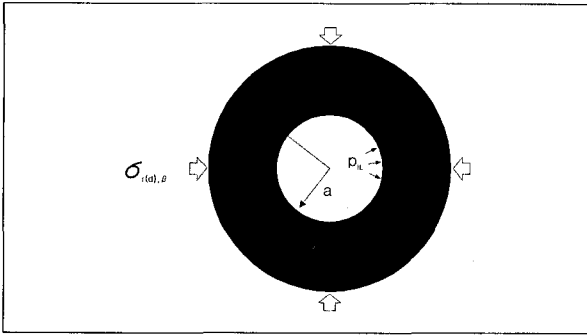


그림 8. concrete lining model for elasto-plastic analysis

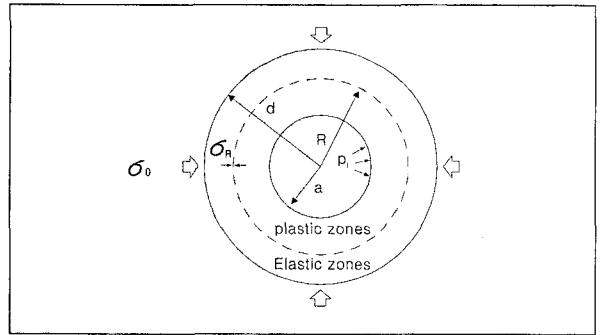


그림 9. Elastic and plastic zones formed in concrete lining

과 같이 소성반경 R 을 경계로 탄성영역과 소성영역이 동시에 존재할 수 있다. 바깥쪽 경계면에 작용하는 응력 σ_0 는 $\sigma_{r(d),\beta}$ 에 해당하며, 내부압력 p_i 는 p_{iL} 에 해당된다. 이 두 영역에 대한 응력 및 변위해석은 일종의 탄소성 thick wall cylinder 문제로 귀착된다.

라이닝 탄성영역의 응력 및 변위 분포는 Lamé's solution(Timoshenko & Goodier, 1982)을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 탄성영역이 $R < r < d$ 일 때 반경방향 및 원주방향 응력과 변위를 다음 식 (11)~(13)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r(r) = \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} - \frac{R^2 d^2 (\sigma_0 - \sigma_R)}{(d^2 - R^2)^2} \frac{1}{r^2} \quad (11)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} + \frac{R^2 d^2 (\sigma_0 - \sigma_R)}{(d^2 - R^2)^2} \frac{1}{r^2} \quad (12)$$

$$u_r(r) = \frac{1-2\nu}{2G} \frac{\sigma_0 d^2 - \sigma_R R^2}{d^2 - R^2} \frac{1}{r} - \frac{(\sigma_0 - \sigma_R) R^2 d^2}{2G(d^2 - R^2)^2} \frac{1}{r^3} \quad (13)$$

여기서 ν 는 포아송비, G 는 전단탄성계수, R 은 소성반경, σ_R 은 탄성-소성 경계에 작용하는 반경방향 응력을 나타낸다.

라이닝의 소성영역 응력 및 변위분포는 항복조건식과 평형조건식을 활용하여 구할 수 있다. 항복조건식 (10)을 다음과 같은 평형조건식 (14)에

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_0}{r} = 0 \quad (14)$$

대입하여 얻은 다음 미분방정식

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1-N}{r} \sigma_r - \frac{1}{r} Y = 0 \quad (15)$$

적분을 통해 영역 $a < r < R$ 의 반경방향 및 원주방향 응력분포는 다음 식 (16)~(17)과 같이 구해진다.

$$\sigma_r(r) = -a + (a + p_i) \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^{(N-1)} \quad (16)$$

$$\sigma_r(r) = -a + (a + p_i)N \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^{(N-1)} \quad (17)$$

여기서, $a = Y/(N-1)$ 이다.

탄성-소성 경계에 작용하는 원주방향 응력 σ_0 는 탄성영역과 소성영역에서의 해석결과 값이 같다는 다음 조건식을 이용하면

$$\frac{2\sigma_0 d^2 - \sigma_R (R^2 + d^2)}{d^2 - R^2} = N \cdot \sigma_r + Y \quad (18)$$

탄성-소성 경계에 작용하는 반경방향응력 σ_R 을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{d^2 (2\sigma_0 - Y) + R^2 Y}{R^2 (1-N) + d^2 (1+N)} \quad (19)$$

식 (19)를 이용하여 σ_R 을 구하기 위해서는 소성반경 R 이 선형적으로 결정되어야 함을 알 수 있다. 그러나 유한 두께를 갖는 실린더 해석모델에서 소성반경 R 은 해석적으로 구하는 것이 어렵다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 탄성-소성 경계에 작용하는 반경응력 σ_R 은 식 (16)와 식 (19)로부터 계산한 결과 값이 같다는 조건을 이용하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

$$-a + (a + p_i) \left(\frac{R}{a} \right)^{(N-1)} = \frac{d^2 (2\sigma_0 - Y) + R^2 Y}{R^2 (1-N) + d^2 (1+N)} \quad (20)$$

결국 식 (20)은 소성반경 R 과 라이닝이 안쪽 경계압력 p_i 의 관계를 나타내므로 소성반경 R 을 가정하면 이에 대응되는 p_i 값을 계산할 수 있게 해준다.

5. 향후 해야 할 일

콘크리트 라이닝의 거동은 라이닝의 설치시기, 지하수 압의 존재유무, 암반의 팽창성 등의 영향을 받으므로 정확한 추정은 매우 어려운 것이 사실이다.

기존의 Beam & Spring 해석 모델은 이완하중과 수압을 설계자의 주관에 따라 다양한 형태로 적용되고 있으며 그 크기도 일반적으로 과다한 경향을 나타낸다.

또한, 수치 해석적 접근 방법 중 질량-스프링 모델은 2차라이닝이 타설 되는 지반조건과 1차 지보재 설치조건을 합리적으로 고려할 수 있는 장점이 있는 반면 1차 지보재

의 열화정도 즉 하중전이 분담률과 슛크리트와 콘크리트 라이닝의 계면(interface)처리 문제 등을 해결해야 하여, 유한 차분 탄소성 해석방법을 응용한 원형터널의 이완응력-내공변위 관계를 계산하는 방법은 라이닝 외측 경계면에 작용하는 지압의 크기를 라이닝 설치지연을 고려하여 결정할 수 있는 장점이 있으나 라이닝 내부의 특정지점에 미리 탄성-소성 경계를 가정해야만 이에 대응되는 내부 경계 압력을 산정할 수 있는 한계가 있다. 이 두 방법은 학위 논문이나 연구논문으로 기 발표된 것으로서 설계에 직접 적용하기에는 어려운 면이 있으나, 향후 보다 합리적인 해석방법을 도출하는데 큰 보탬이 될 수 있을 것으로 판단되며 이와 같은 연구들이 활성화 되어 우리나라의 터널 기술 발전에 일익을 담당하도록 할 것이다.

참고문헌

1. 콘크리트 구조 설계 기준 해설(2007), 대한콘크리트학회.
2. 도로교 구조 설계 기준 해설(2008), 대한토목학회.
3. 터널의 이론과 실무, 한국터널공학회.
4. 지반-1차지보재-2차라이닝의 상호작용을 고려한 터널 2차 라이닝 해석모델(2002), 터널과 지하공간, 제12, 제2호, pp. 107-114.
5. 심부 원형터널에 시공된 콘크리트 라이닝의 새로운 탄소성 해석법(2009), 터널과 지하공간, 제19권 제4호, pp. 355-365.
6. Guidelines for Tunnel Lining Design, T.D. O'Rourke.
7. Tunnels with In-situ Pressed Concrete Lining, Ya, I. Marenyi.