

PCC Segment Lining의 설계(I)



정혁일

Arup, Tunnelling
Team in London

1. 서론

최근 TBM(Tunnel Boring Machine)을 이용한 기계화 시공에 대한 관심이 국내에서도 높아지고 있으며, 해외 대형 TBM 터널 프로젝트에 참여하는 국내 설계사들이 하나 둘 씩 등장하고 있다.

하지만, 국내의 터널기술은 대부분 NATM공법에 기초하여 발전되어 왔기 때문에, 국내 터널 기술자들이 세그먼트 라이닝 설계 관련 실무자료들을 접하기가 쉽지 않은 것이 현실이다. 또한, 세그먼트라이닝 두께, 철근량 등은 TBM의 직경 및 터널 공사비에 직접적인 영향을 미치는 중요 설계항목임에도 불구하고, 현재 국내에서는 Machine Type을 결정하는 것에 대해서만 기술적 관심이 지나치게 집중되어 있다. 이로 인해 세그먼트 라이닝의 설계기술에 대한 체계적 정리가 다소 미흡하여 많은 터널 기술자들이 세그먼트 라이닝 설계에 대한 막연한 두려움을 가지고 있다.

국내 NATM 터널의 라이닝 설계는 1) RMR, Q system 설계 chart에 의한 초기지보패턴 선정 및 2) Beam-spring 모델/FEM 수치해석을 통한 영구라이닝(대부분 현장타설 콘크리트) 설계에 바탕을 두고 설계실무가 현재까지 발전되어 왔다. 반면, TBM을 적용한 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 라이닝(이하 PCC 세그먼트 라이닝) 설계는 원형 굴착단면이라는 이점으로 인해 수치해석 보다는 closed-form solution에 의한 구조적인 안정 계산이 널리 사용되고 있으며, 세그먼트사이에 구조적으로 존재할 수 밖에 없는 조인트(joint)에 대한 구조적 안정검토가 수반된다.

또한, 세그먼트 라이닝에 작용되는 하중의 크기 및 종류가 시공단계에 따라 지속적으로 변화하기 때문에, 지반/수압에 의한 영구하중 이외에도 다양한 시공중 하중을 고려해야 하는 특징을 가지고 있다.

이에, 해외의 PCC 세그먼트 라이닝 설계실무를 구조적인 안정검토에 초점을 맞추어 터널 기술자들에게 2회에 걸쳐 해외에서의 터널설계 실무를 간략하게나마 소개하려고 한다.

이번호에서는 아래 주제에 대해 중점적으로 소개하고자 한다.

- Limit State Design
- Interaction Diagram
- 지반 하중에 의한 Hoop thrust/Moment계산
- Lining의 등가 stiffness

이어서 다음 호에서는 아래 사항들에 대해 소개하려고 한다.

- Grout loading에 대한 안정 검토
- Ovalization(squat)에 대한 검토
- Ram loading에 대한 안정 검토
- Segment Joint 설계(bursting)
- Handling & Stacking

2. 이해를 돕기 위한 사전 지식

PCC 세그먼트 라이닝 설계의 기술적인 내용설명을 시작하기에 앞서, 해외의 설계 실무를 좀 더 쉽게 이해하기 위해 필요한 사전 지식으로 Limit State Design, Interaction Diagram에 대해 간단하게 설명하도록 하겠다.

2.1 Limit State Design¹⁾

터널라이닝의 설계와 거동은 지반과의 복잡한 interaction이 고려되어 야 하지만, 궁극적으로는 터널 라이닝도 콘크리트 구조물이기 때문에 콘크리트 구조물의 설계 기준을 만족해야 하는 것은 당연하다. 현재 전 세계에는 콘크리트 구조물을 대상으로 하는 다양한 설계기준(BS code,

Euro code, DIN code, ACI code, JCS code 등)이 존재하고 있으며, 터널라이닝은 발주처와 사전에 동의된 design code를 충족하도록 설계되어야 한다. 이들 design code들이 사용하는 용어와 표현은 서로 차이가 있으나, 기본적으로는 Limit State Design 이라는 설계개념이 보편화되어 있다.

Limit State Design의 ‘Limit State’는 크게 Ultimate Limit State(ULS) 와 Serviceability Limit State(SLS) 두 가지로 구분된다. 간략하게 설명 하면, Ultimate Limit State는 구조물의 역학적 평형상태를 만족시키는 설계라고 볼 수 있으며, Serviceability Limit State는 구조물의 운용 기준을 만족시키는 설계라고 말할 수 있다.

현재 국내에서의 터널 라이닝 설계실무는 구조물의 역학적 평형상태를 계산하는 것에 주안점을 두고 있기 때문에, 일종의 Ultimate Limit State 설계라고 할 수 있겠다. 이로 인해 국내 터널기술자 들은 상대적으로 Serviceability Limit State의 개념을 정확하게 이해하지 못하는 경우가 있을 수 있다. 이해를 돕기 위해 Serviceability Limit State 설계의 예를 들어보도록 하겠다. 하저터널의 경우 터널 운용중 라이닝을 통한 침투유량이 매우 중요한 설계기준 중의 하나이다. 아무리 터널라이닝이 Ultimate Limit State를 만족하도록 설계되어 구조물의 내구연한 이내에 붕괴우려가 없다고 하더라도, 미세균열(미세균열이 곧 구조물의 붕괴를 의미하지는 않으므로)을 통한 침투유량이 하저터널의 운용기준을 만족하지 못할 수 있다. 이러한 경우, 라이닝의 crack width control 설계 등 해당 운용 기준을 만족시키기 위한 Serviceability Limit State 설계가 병행되어야 한다.

이처럼, 터널 라이닝은(여타의 토목/건축구조물과 마찬가지로) Ultimate Limit State와 Serviceability Limit State를 모두 충족시키도록 설계되어야 한다.

Limit State Design에 대한 상세한 정보를 원하는 사람들은 BS code와 Euro code를 참고하기 바란다.

1) Limit State Design은 한국어로 “한계상태설계” 정도로 번역할 수 있지만, 본 강좌에서는 토질역학 등 다른 영역에서 이미 사용되고 있는 용어와의 혼선을 피하기 위해 영문표현을 그대로 사용하도록 하겠다.

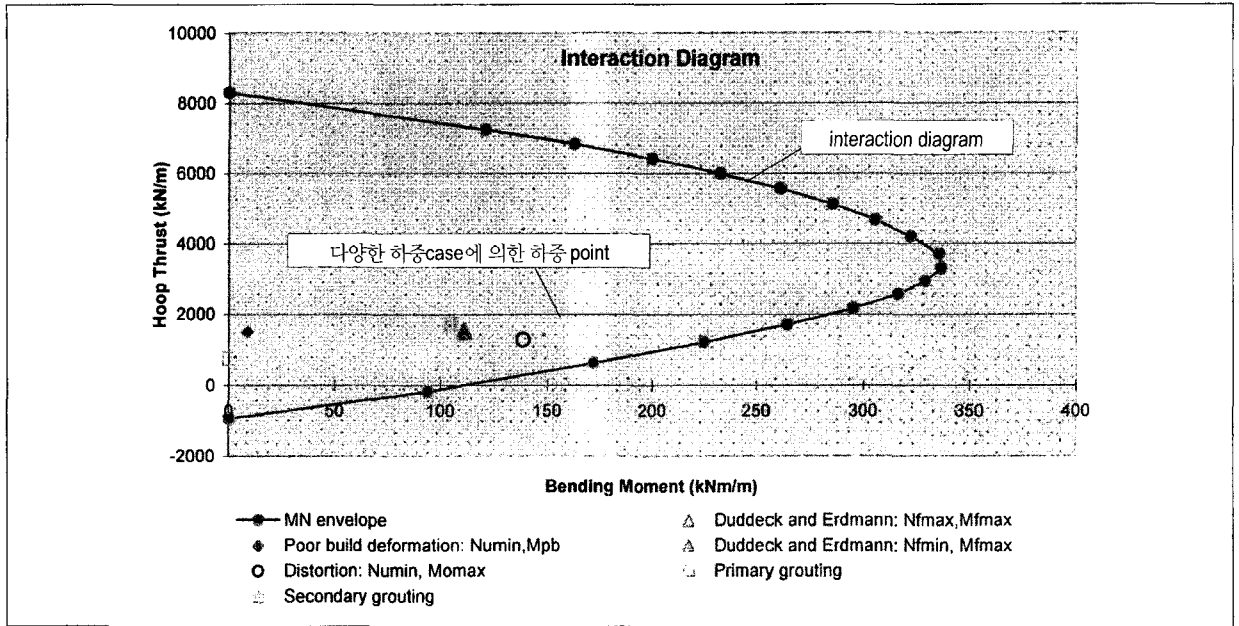


그림 1. Interaction Diagram을 활용한 설계 예시

2.2 Interaction Diagram(M-N diagram)

터널 라이닝의 설계는 지반과의 복잡한 상호작용에 대한 이해를 요구하기 때문에 현재 국내의 터널 기술자들은 지반공학을 이론적 백그라운드로 하고 있는 기술자들이 대부분이다. 이러한 사유로 국내 터널 기술자들은 구조해석에 대한 기본지식이 다소 체계적이지 못할 수도 있다. 라이닝의 거동을 이해하기 위해서는 지반과의 상호작용을 이해하는 것이 중요한 것 처럼, 라이닝의 구조설계를 위해서는 구조해석(structural analyses)에 대한 기본지식이 필수적인 것은 당연하다. 그 중 Interaction Diagram²⁾에 대한 이해는 PCC 세그먼트 라이닝의 설계의 기초가 되는 사항이라고 말할 수 있다.

PCC 세그먼트 라이닝 설계는 “축력(axial force 또는 hoop thrust)과 모멘트(moment)를 받는 빔(Beam)”으로

2) 한국의 라이닝 구조설계 실무에서는 Interaction Diagram을 사용하지 않는 것이 보통이지만, 해외의 터널 라이닝 구조설계 실무에서는 대부분 Interaction Diagram을 사용한다.

가정하여 설계하는 것이 일반적이며, 어떤 부재가 구조적으로 견딜 수 있는 축력과 모멘트 조합의 Ultimate Limit State 한계를 나타내는 도표가 Interaction Diagram이다. 국내에서는 “P-M상관도”라는 이름이 보편적으로 사용되고 있다.

원형터널 라이닝에 등방의 수압이 작용한다고 가정해 보면, 터널 라이닝에는 균일한 축력(이후 hoop thrust라고 부르겠다)이 라이닝을 따라 발생되고, 이론적으로 모멘트는 0(zero)이 된다. 하지만, 실제의 경우 라이닝의 측벽과 천단, 인버트 라이닝에 작용되는 하중은 서로 크기가 다르며, 이로 인해 라이닝에는 모멘트가 발생된다. 즉, 측벽과 천단, 인버트의 하중의 차이가 커질수록 라이닝에 발생하는 모멘트가 커지게 된다.

PCC 세그먼트 라이닝의 Ultimate Limit Design은 Hoop Thrust - 모멘트 조합에 의한 하중 포인트가 interaction diagram의 포락선(envelope) 이내에 존재하도록 하는 것이 기본이다.(그림 1 참조).

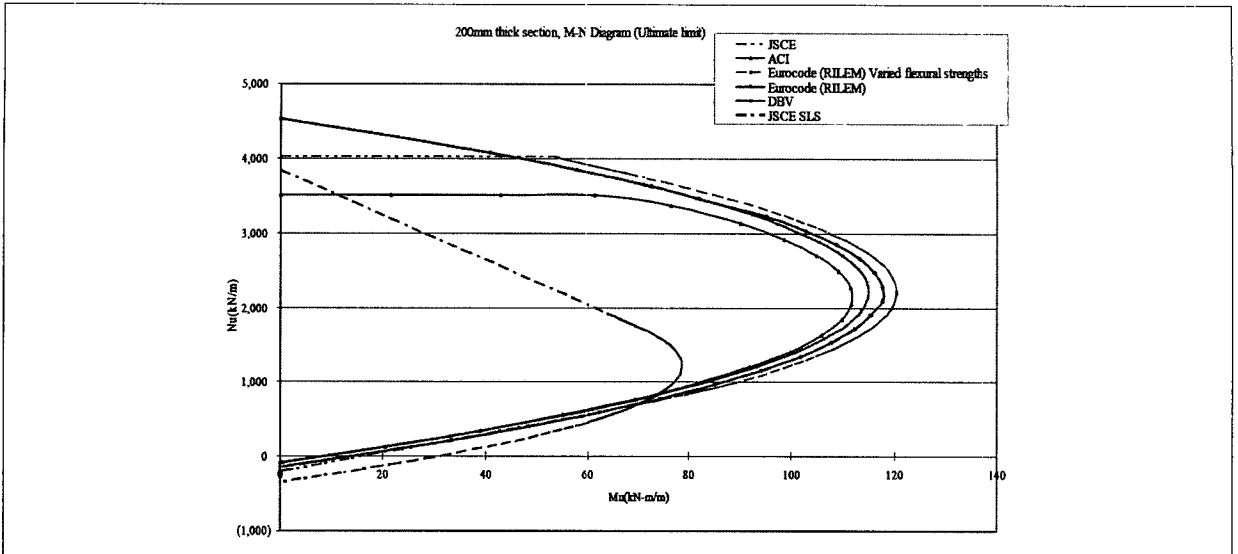


그림 2. 다양한 설계기준에 따른 Interaction Diagram의 차이 예시

Interaction Diagram의 작도를 위해서는 어떠한 design code를 설계에 적용할 것인지 결정하여야 하는데, 이때 주의해야 할 점은, 어떠한 design code가 해당 구조물이 건설될 해당 지역 특성에 가장 적합한 code인지 신중하게 결정하여야 한다는 점이다. 해외의 터널설계실무에 사용되는 design code들(Euro code, ACI code 등)은 일반적인 “concrete structure”에 대한 범용 design code로서 해당 지역(혹은 국가)의 기후/지리/산업 특성이 반영된 것들이다. 예를 들면, BS code는 내진설계에 대한 기준이 매우 취약하지만 Euro code, JS code는 내진에 대해 매우 세부적인 기준을 제시하고 있는 것 처럼 말이다.

국내에서의 설계실무는 아직까지 code에 준한 설계시스템이 활성화 되어 있지 않기 때문에 터널 기술자들이 다양한 설계 code를 실무적으로 접할 기회가 많지 않은 것이 현실이며, 이로 인해 설계 기준 code의 선정이 설계에 매우 중요한 요인임을 간과하기 쉽다. 동일한 부재라고 하더라도 설계에 적용하는 설계 기준(code)의 종류에 따라서 Interaction Diagram의 포락선의 크기가 서로 달라지고, load factor 역시 달라지므로 해당 프로젝트에

적합한 design code를 project 초기에 선정하는 것은 매우 중요하다.

동일한 PCC 세그먼트 라이닝부재에 대해 서로 다른 설계기준으로 계산된 Interaction Diagram 포락선의 예시를 그림 2에 보였다.

Interaction Diagram의 계산 방법 등 축력과 모멘트를 받는 빔에 대한 구조적인 기초 이론은 본 고에서는 다루지 않도록 하겠다. Interaction Diagram에 대한 기초적인 이론은 많은 재료역학 혹은 구조역학 이론서에 수록되어 있으니 이를 참고하기 바란다.

3. 지반하중에 대한 검토

3.1 지반하중의 산정

국내 터널 기술자들에게 친숙한 현장타설콘크리트 라이닝의 설계에서와 마찬가지로, PCC세그먼트 라이닝역시 아칭효과(Ground Arching Effect)이론을 적용하여

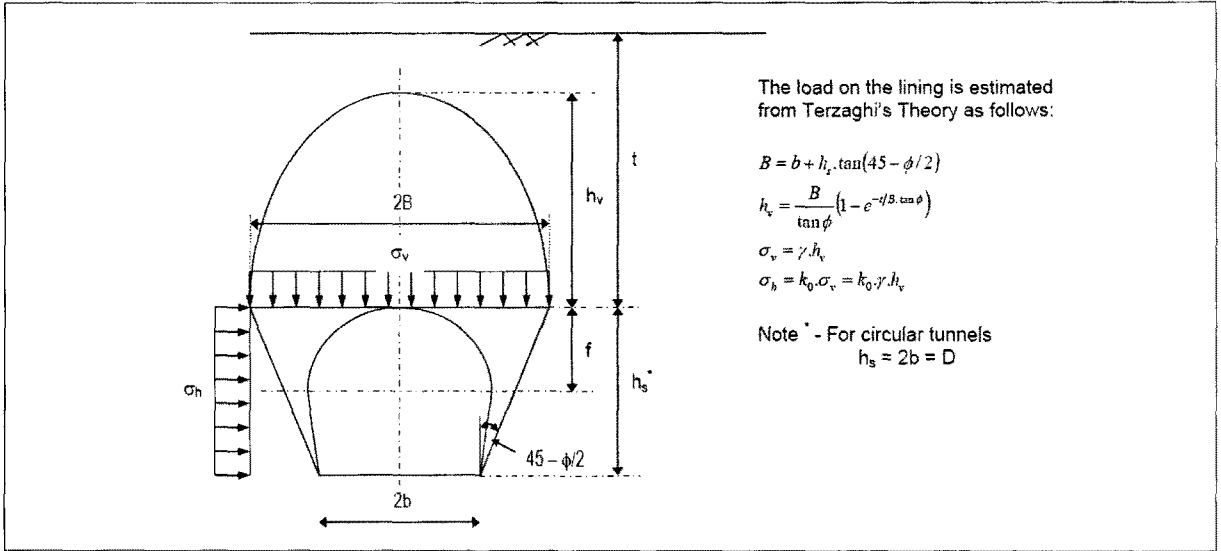


그림 3. Terzaghi의 Arching 이론에 의한 이완하중 영역

토피고, 단면적, 지반조건 등의 입력변수에 따라 터널 라이닝에 작용하는 이완하중을 산정하는 것이 보통이다 (그림 3 참조).

하지만, 이 때 주의해야 할 점은 지반 조건과 토피고에 따라 Arching Effect가 발생된다고 보기 힘든 경우가 존재한다는 점이다.

토사지반 또는 불량한 암질의 지반에서는 Arching Effect를 고려할 수 있겠으나, 토피고가 낮은 경우에는 Arching 효과의 발생을 고려하기 어려우므로 통상 지표까지의 모든 하중을 라이닝이 받는 것으로 가정하여 설계한다.

깊은 심도의 신선한 암반의 경우 암반이 스스로 자립하는 경우가 많고, TBM 굴착은 발파를 수반하지 않으므로, 이러한 경우 영구하중으로 작용되는 설계이완하중은 0(zero)이며, 이럴 때는 수압(지하수위가 터널위치보다 높다면)만을 라이닝에 작용하는 영구하중으로 적용하게 된다.

지반 하중에 의해 라이닝에 발생하는 Hoop thrust와 Moment의 크기를 산정하는 방법은 여러 가지가 있으나,

실무적으로 가장 널리 활용되고 있는 방법은 Duddeck & Erdmann의 closed form solution이다. 이에 대한 상세한 소개는 3.3절에서 소개하도록 하겠다.

3.2 설계검토단면의 선정

PCC세그먼트 라이닝 터널의 경우, 하나의 터널 안에서 서로 다른 두께의 라이닝을 사용하는 것이 불가능하기 때문에 터널 전체 구간 중에서 가장 불리한 하중조건을 가지는 설계검토단면을 선정하는 것은 라이닝 두께를 결정하는 데 있어서 매우 중요하다.

대부분의 터널기술자들은 아마도 라이닝에 작용되는 하중이 가장 큰 곳(예를 들면 최대심도 단면)을 설계검토 단면으로 선정하고, 해당 단면에서의 계산결과를 토대로 라이닝 두께를 결정하면 될 것으로 생각하기 쉽다. 하지만, 실제로는 토피고가 낮은 대표단면에 의해 라이닝 두께와 철근 보강량을 결정하는 경우가 종종 발생한다.

앞서 설명했던 Interaction Diagram을 잘 살펴보면, 라이닝에 발현되는 Hoop thrust가 zero로부터 점점 커질

수목 라이닝이 견딜 수 있는 moment 용량이 점점 증가하다가 일정수준이상의 Hoop thrust를 지나면 moment 용량이 첨두점을 지나 다시 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, 라이닝에 발휘되는 Hoop Thrust는 지반으로부터 라이닝에 작용되는 하중이 커질 수록 커지는 것이 일반적이며, 모멘트는 연직하중과 수평하중의 차이가 커짐에 따라 증가하게 된다.

이를 종합해서 생각해 보면, 지반하중의 크기가 작아 Hoop Thrust level이 낮은 경우, 라이닝이 견딜 수 있는 모멘트 용량이 낮아지기 때문에 지반의 연직-수평하중 차이에 의해 발생하는 모멘트가 해당 Hoop thrust level에서의 모멘트 용량을 초과하는 경우가 종종 발생되며, 이 때문에 라이닝의 모멘트 용량을 늘리기 위해서 철근보강이 필요하게 된다. 반대로, 대심도에서 높은 수압을 받는 터널의 경우에는 Hoop Thrust level 자체가 매우 높아져 라이닝이 휨파괴가 아닌 압축파괴에 취약한 경우가 발생하며, 이러한 경우 역시 철근 보강 또는 고강도 콘크리트 등 라이닝의 구조적 용량을 늘리는 설계가 수반되어야 한다.

또 한 가지 유의해야 할 점은 지하수위인데, 지하수는 터널라이닝에 정수압을 제공하게 되므로 지하수에 의한 수압만으로 라이닝에 발생하는 모멘트는 매우 작다는 점이다. 이 때문에, 높은 지하수위는 때로는 터널라이닝에 적당한 Hoop thrust level을 발휘시켜주는 긍정적인 역할을 하기도 한다는 점이다.

이처럼, 라이닝설계를 위한 대표설계단면의 선정은 토피고, 지하수위 등을 복합적으로 고려하여야 하며, (이에 대한 정확한 기준이 있다고 말하기는 어려우나) 아래의 항목을 참조하여 다양한 대표단면을 선정, 라이닝 설계를 진행하는 것을 추천한다.

- 최대/최저 토피고 단면
- 최대/최저 지하수위 단면(가급적이면 토피고와 조합)
- 한쪽으로 치우친 상재하중 존재 단면

- 현재 터널이 존재하거나, 장래 굴착이 예정된 단면
- 상이한 지반조건을 가진 단면

3.3 지반하중에 의한 Hoop thrust와 Moment의 계산

TBM에 의해 시공되는 라이닝은 원형단면이라는 특징을 가지고 있으며, 이로 인해 수학적으로 유도된 closed form solution을 활용하여 라이닝에 발생하는 Hoop Thrust와 Moment를 계산할 수 있다.

원형터널에 대한 라이닝 설계 모델은 그림 4에 보인 바와 같이 연속체(continuum)이론을 바탕으로 발전되어 왔으며, 기본적으로 설계자가 필히 숙지하고 있어야 할 가정조건들은 아래와 같다.

- 지반을 반 무한 연속체로 가정 - 실무적으로 터널직경의 약 2배 이상 깊이의 터널에 대해 적용 가능
- Plane Strain 조건
- 터널 단면은 원형이며, 라이닝의 변형은 타원형에 준한다.
- 라이닝과 지반은 모두 탄성범위 내에서 변형한다.
- 라이닝의 stiffness는 라이닝 주면을 따라 일정하다.

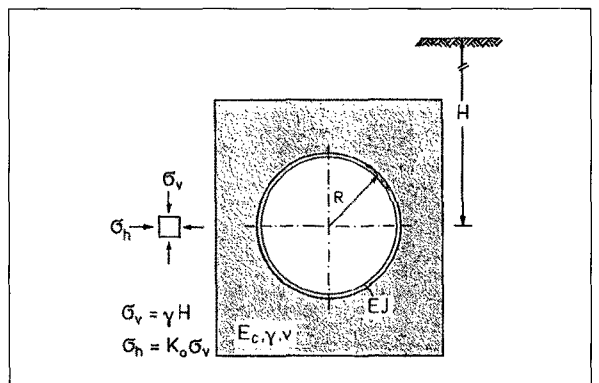


그림 4. Continuum analytical model(Duddeck & Erdmann, 1982)

그림 5에 보인 바와 같이 Hoop Thrust(N)와 Moment(M)는 라이닝의 천단과 측벽부에서 최대 또는 최소값을 가지게 되며, 현재 실무적으로 널리 쓰이고 있는 이론 해는 Duddeck&Erdmann이 기존의 이론 해를 종합/분석하여 80년대 초반에 제시한 공식들이다(표 1 참조).

표 1에 보인 수식은 Moment의 최대값과 Hoop thrust의 최대/최소값을 직접 계산할 수 있게 해 주며, 이들 값을

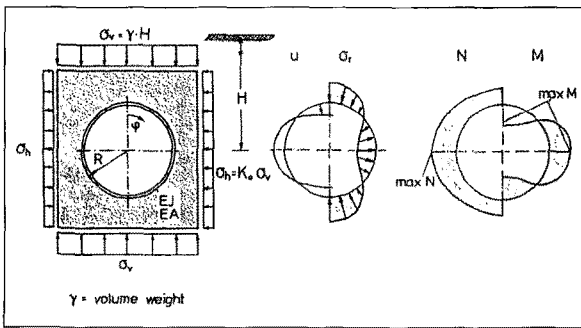


그림 5. Plane Strain Continuum analytical model과 라이닝의 변위, Hoop thrust, Moment 분포 특성(Duddeck & Erdmann, 1982)

Interaction Diagram상에 plot하여 해당 세그먼트의 ULS 포락선 내부에 응력포인트가 놓이게 되면 지반하중에 의한 ULS 설계를 만족하게 된다고 할 수 있다. 이때, 주의할 점은 Hoop thrust level에 따라 라이닝의 moment capacity가 달라지므로(Max hoop thrust, Max Moment)와 (Min Hoop thrust, Max moment) 두 가지 조합을 모두 검토하여야 한다. Hoop thrust의 최대값은 $N_0 + \max(N-N_0)$, 최소 값은 $N_0 - \max(N-N_0)$ 에 의해 계산될 수 있다.

Duddeck&Erdmann의 표에 표시되어 있는 Full bond와 Tangential slip은 라이닝과 지반 사이의 interaction에 대한 고려 여부를 나타내는 것으로, full bond의 경우 지반과 라이닝사이에서 전단마찰에 의한 interface를 고려한 이론 해이며, tangential slip은 지반과 라이닝사이의 전단마찰을 무시한 이론 해이다. Full Bond와 Tangential Slip의 적용은 시공단계, 방수쉬트의 존재 여부 등을 고려하여 결정하여야 하며, 통상적으로 single shell 개념으로 시공되는 PCC세그먼트라이닝의 경우에는 full bond로 가정하여 안정검토를 수행하는 것이 통상적이다.

표 1. Hoop thrust, Moment, Radial displacement의 이론해(Duddeck & Erdmann, 1982)

	FULL BOND	TANGENTIAL SLIP
bending moment max M =	$\sigma_v(1-K_0)R^2 \frac{1}{4 + \frac{3-2\nu}{3(1+\nu)(3-4\nu)} \cdot \frac{E_c R^3}{EJ}}$	$\sigma_v(1-K_0)R^2 \frac{1}{\frac{10-12\nu}{3-4\nu} + \frac{2}{3(1+\nu)(3-4\nu)} \cdot \frac{E_c R^3}{EJ}}$
hoop forces $N_0 = \text{const.} =$	$\sigma_v(1+K_0)R \frac{1}{2 + (1-K_0) \frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \frac{E_c R}{EA}}$	
max N - $N_0 =$	$\sigma_v(1-K_0)R \frac{1}{2 + \frac{4\nu E_c R^3/EJ}{(3-4\nu)(12(1+\nu) + E_c R^3/EJ)}}$	$\sigma_v(1-K_0)R \frac{1}{\frac{10-12\nu}{3-4\nu} + \frac{2}{3(1+\nu)(3-4\nu)} \cdot \frac{E_c R^3}{EJ}}$
radial displacements $u_0 = \text{const.} =$	$\sigma_v(1+K_0) \frac{0.5R^4/EJ}{\frac{1}{1+\nu} \frac{E_c R^3}{EJ} + \frac{EA}{EJ} R^2 + 1}$	
max $u_{2\varphi} =$	$\sigma_v(1-K_0) \frac{R^4/EJ}{12 + \frac{3-2\nu}{(1+\nu)(3-4\nu)} \frac{E_c R^3}{EJ}}$	$\sigma_v(1-K_0) \frac{R^4/EJ}{\frac{6(5-6\nu)}{3-4\nu} + \frac{2}{(1+\nu)(3-4\nu)} \frac{E_c R^3}{EJ}}$

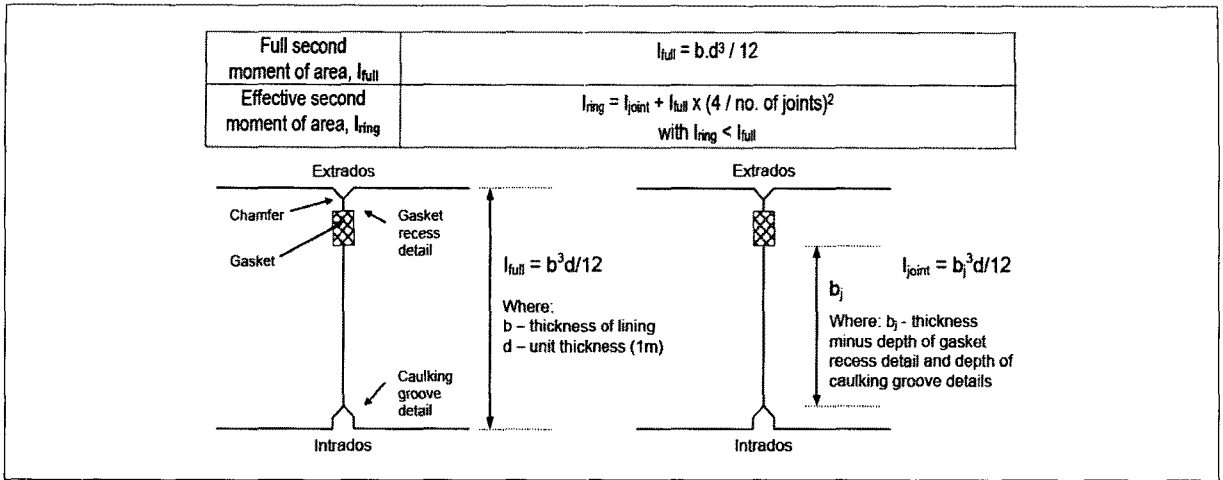


그림 6. Segment Lining의 등가 stiffness

3.4 라이닝의 stiffness

표 1의 수식에 사용된 입력변수들을 다시 정리해 보면 연직하중(σ_v), 토압계수(K_0), 지반의 포아송계수(ν), 지반의 탄성계수(E_c), 라이닝의 탄성계수(E), 터널반경(R), 라이닝의 단면2차모멘트(J)인데, 이들 변수 중 가장 주의해야 할 것은 라이닝의 단면2차모멘트(J)이다.

만약, 라이닝이 일정한 두께를 갖고 joint가 없는 일체형의 원형구조물이라고 하면, 세그먼트 링의 단면2차모멘트는 라이닝의 어떤 위치에서도 일정한 값을 갖는다. 하지만, 실제 PCC세그먼트 링은 세그먼트 사이에 물리적인 joint가 존재하기 때문에 세그먼트 링의 전체적인 등가 Stiffness는 일체형의 원형 링의 경우 보다 작아지게 되며, 이를 고려하여 세그먼트 링의 등가 stiffness를 설계에 적용하여야 현실적인 라이닝 설계가 이루어 질 수 있다.

만약 Duddeck&Erdmann의 제안식에 의해 라이닝에 발생하는 moment를 계산할 때 라이닝의 전체 stiffness (I_{full})값을 사용하게 되면, 라이닝에 발생하는 moment값은 비현실적으로 크게 계산되어 라이닝의 두께가 필요이상으로 두꺼워 지거나 과도한 철근보강을 필요로 하는 계산결과를 가져오게 된다.

세그먼트 링의 등가 stiffness에 대해서는 Muir Wood (1975)가 제안한 경험식이 현재 터널 설계 실무에서 널리 사용되고 있으며, 이를 그림 6에 정리하여 보았다.

Muir Wood에 의해 제안된 이 수식은 joint의 개수가 4개 이하 일 때에는 joint의 존재가 라이닝의 stiffness에 영향을 주지 않고, 세그먼트 링의 등가 stiffness는 joint갯수에 따라 포물선 형태로 감소한다는 가정조건 하에서 제안된 수식이다.

이 중 I_{joint} 값은 세그먼트사이의 볼트결합력, 라이닝 변형시 joint면에서의 개구각(birds mouthing angle)정도에 따라 크게 변화하기 때문에, 어떤 설계사는 I_{ring} 산정시 I_{full} 의 50%를, 어떤 설계사는 I_{joint} 를 0으로 가정하는 등 기관마다 학자마다 실무에 적용하는 가정조건과 방식이 상이하며, 이로 인해 I_{joint} 계산에 적용할 수 있는 일반식을 소개하기에는 다소 어려움이 있다. 그림 7에 joint에서의 최대 접촉면을 기준으로 산정한 I_{joint} 값을 소개했으나 실무에 참고하시기를 바란다.

다만, 그림 6에 소개한 개념의 I_{joint} 값을 사용할 경우에는 라이닝에 발생하는 moment의 값이($I_j=0$ 인 경우 보다는) 상대적으로 크게 계산되게 된다는 점을 염두에 두시기 바라며, 그림 6에 보인 I_{joint} 값이 세그먼트 링의

stiffness를 계산하는데 있어서 항상 적용 가능한 수식이
라고 말할 수 없으며, I_{joint} (혹은 I_{ring})값은 세그먼트 joint
의 형태, 라이닝의 예상되는 거동 등에 준하여 설계자의
판단에 따라 크게 변화할 수 있음을 염두에 두시기 바란다.

이상으로 지반하중에 의해 라이닝에 발생하는 hoop
thrust와 moment를 산정하는 방법에 대한 소개를 마치고,
다음 호에서는 시공중 하중에 대한 검토와 joint설계에
대해서 소개하고자 한다.

참고문헌

1. AFTES (1998). The design, sizing and construction of precast segments installed at the rear of a Tunnel Boring Machine (TBM). Association Francaise des Travaux en Souterrain, Paris.
2. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1982). Structural design models for tunnels. Proc. Tunnelling '82 Conf., IMM, London, pp. 197-204.
3. Muir Wood, A.M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. Geotechnique 25, Issue 1. Thomas Telford, London, pp. 115-127.
4. Szechy, K. (1973). The Art of Tunnelling. Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.