

PCC Segment Lining의 설계(II)



정혁일

Arup, London
Tunnelling Team

1. 개요

최근 국내에서도 TBM을 이용한 기계화 시공이 활발히 진행되고 있기에, 국내 터널기술자들이 쉴드 TBM을 설계 하는데 조금이나마 도움이 되었으면 하여 해외의 PCC (Precast Concrete) 세그먼트 라이닝 설계방법에 대해 2회에 걸쳐 소개하고 있으며 이번 호에서는 아래사항들에 대해 소개하고자 한다.

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

2. Grout Loading에 대한 안정검토

PCC 세그먼트 라이닝은 쉴드 TBM 내부에서 조립과정

을 거쳐 시공되기 때문에 시공단계별로 PCC세그먼트 라이닝에 작용되는 하중의 종류/크기가 현장타설 콘크리트 라이닝과는 매우 상이하다. 그 중 PCC세그먼트 라이닝의 설계에 있어서 필수적으로 검토되어야 하는 몇 가지 임시 하중들이 있는데, 대표적인 것이 Grout Load와 Ram Load이다. 이 중 본 절에서는 interaction diagram에 의한 안정검토항목에 해당하는 Grout Load에 대해서만 언급하고, Ram Load에 대한 설명은 segment joint설계에서 살펴보도록 하겠다.

세그먼트 시공 중 수행되는 그라우팅은 크게 Primary Grouting과 Secondary Grouting으로 구분할 수 있으며, PCC 세그먼트 라이닝 설계 시 각각에 대한 검토 세부사항은 다음과 같다.

2.1 Primary Grouting

PCC세그먼트 라이닝이 쉴드 TBM 내부에서 조립되고 나면, tail skin 끝부분을 통해서 지반굴착면과 세그먼트

라이닝 사이의 공간을 그라우팅 하게 된다. 이를 Primary Grouting이라고 부르며, Primary Grouting의 주된 목적은 터널굴착으로 인한 지반침하/변형을 최소화 하는 것과 동시에, 지반과 라이닝의 접촉면을 일체화 하여 지반으로부터 전달되는 하중을 라이닝 면에 균일하게 분포시키도록 하는 것이다.

Primary Grouting은 PCC세그먼트 라이닝이 쉴드 TBM 본체 후방에서 조립된 직후 tail skin을 통해서 주입되기 때문에, 지반에 의한 하중이 라이닝에 전달되기 이전에 독립적으로 작용되는 하중으로 가정하여 설계하는 것이 통상적이다.

Primary Grouting은 라이닝 전체 주변(perimeter)을 따라 정수압처럼 작용하게 되므로 Primary Grouting에 의해 라이닝에 발생하는 모멘트는 이론적으로 항상 0(zero)이 된다. 즉, Primary Grouting 하중에 의한 라이닝 안정 검토 시에는, 그라우팅으로 인해 발생하는 라이닝 내부의 hoop thrust(압축력)가 라이닝 콘크리트의 ULS설계압축 강도를 벗어나지 않도록 하는 것이라고 할 수 있겠다.

Primary Grouting에 의해 라이닝에 발생하는 hoop thrust level은 이전 호에서 소개한 Duddeck & Erdmann의 이론해 공식을 활용하여 쉽게 구할 수 있고, 이 값을 interaction diagram상에 그리게 되면, 항상 interaction diagram의 Y축상에 놓이게 되는데(모멘트가 0(zero)이므로), 이 점(point)이 interaction diagram 포락선 내부에 놓이게 되면 ULS 설계를 만족하게 된다.

설계를 위한 Primary Grouting 하중의 범위를 특정하게 이야기 하기는 어려우나, TBM 제원이 아직 결정되지 않았거나 발주처/TBM specification에 특정하게 제시되어 있는 그리우팅 압력기준이 없는 경우라면 “현장지하수위 + 1~2 bar”를 설계 초기값으로 활용하면 크게 무리가 없을 것이다.

2.2 Secondary Grouting

Primary Grouting 이후에도 완전하게 충전되지 않은

라이닝 배면 공동에 대해서는 TBM back-up train이 완전히 통과한 뒤에 Secondary Grouting을 수행하여 배면 공동을 채우게 된다. 다시 말해, Secondary Grouting이 수행되는 시점은 지반의 하중이 라이닝에 전달된 이후라고 볼 수 있다. 이처럼, Secondary Grouting은 지반 하중이 라이닝에 전달된 이후에 국부적으로 수행되기 때문에, 설계대표단면에 작용되는 지반하중에 추가적으로 Secondary Grouting 하중을 일종의 집중하중 형태로 고려하여 라이닝의 안정성을 검토하여야 한다.

Secondary Grouting에 의한 파괴모드는 크게 전단파괴와 휨 파괴로 구분할 수 있으나, 국부적인 그라우팅에 의한 라이닝의 punching shear파괴는 매우 드문 현상으로 알려져 있으며, 세그먼트 패널의 radial joint면을 따라 발생할 수 있는 shear failure역시 매우 드문 현상으로 알려져 있다.

Secondary Grouting에 의한 집중하중은 라이닝의 hoop thrust에는 큰 영향을 미치지 않으나, 라이닝에 추가적인 모멘트를 발생시키게 되므로 Secondary Grouting에 의한 Hoop Thrust - Moment 포인트가 interaction diagram의 포락선 내에 위치하는지 설계단계에서 확인할 필요가 있다.

Secondary Grouting에 의해 라이닝에 추가적으로 발생하는 모멘트는 간단한 정역학적 평형공식에 의해 계산하거나, beam-spring model을 활용 해 계산할 수 있다.

하지만, Secondary Grouting에 의한 압력은 그라우팅 주입 중 라이닝에 이상 징후가 발견되면 즉각적으로 제어가 가능한 하중이고 설계단계에서는 라이닝 배면의 공동 면적을 예측하기 힘들기 때문에, Secondary Grouting에 대한 검토 결과는 라이닝의 두께/철근량을 결정하는 검토라기 보다는 시공중 발생가능한 위험(risk)에 대한 사전 검토항목에 가까우며, 검토 결과에 대한 설계자의 기술적인 판단이 필요한 설계검토항목이라고 볼 수 있다.

3. 라이닝의 장기 변형에 의한 하중 (Distortion Induced Loading)

원형 PCC 세그먼트 라이닝이 비등방의 하중을 받게 되면 모멘트를 라이닝에 유발시키게 되고 이 모멘트는 라이닝을 타원(Oval)형태로 변형시키게 된다.(만약 라이닝에 모멘트 없이 hoop thrust만 존재한다면 라이닝은 반경방향의 압축변형만 발생될 것이다.)

결과적으로, 터널에 발생하는 변위(구조설계를 위해 실질적으로 의미를 갖는 변위)는 라이닝의 모멘트와 직접적인 상관관계를 가지고 있기 때문에, 터널의 변형에 대한 한계 값을 정량적 지표로 표현할 수 있다면 원형터널의 구조적 용량을 매우 직관적으로 표현할 수 있음을 의미한다.

이를 위해, 터널의 반경방향 변위(squat)를 터널의 반경으로 정규화 한 값을 ovalization이라고 정의하여 실무에서 널리 사용하며, 이에 대한 정의를 그림 1에 보였다.

Morgan(1961)은 원형 터널의 라이닝에 발생하는 모멘트와 반경방향의 변위(squat)에 대한 상관관계 이론 해를 식 1과 같이 제시하였다.

$$M_{\text{omax}} = 3u_{\text{max}} \frac{EI}{r^2} \quad (1)$$

일반적으로 알려져 있는 원형 터널에 대한 ovalization 범위값을 표 1에 참고자료로 수록하였다.(표 1 상의 R과 δ R은 각각 r과 u_{max}에 상응한다.)

터널 설계 실무에서는 통상적으로 터널소유자(발주처)가 “내 터널은 00%의 변형에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다”는 기준을 Design Standard에 제시하는 것이 보통이다. 터널 소유자의 입장에서는 터널의 변형원인이 수압이던, 토압이던, 장래의 구조물 하중이던 상관없이 자신들의 구조물에 대한 최종적인 변형 한계를 제시하는 개념이라고 볼 수 있다.

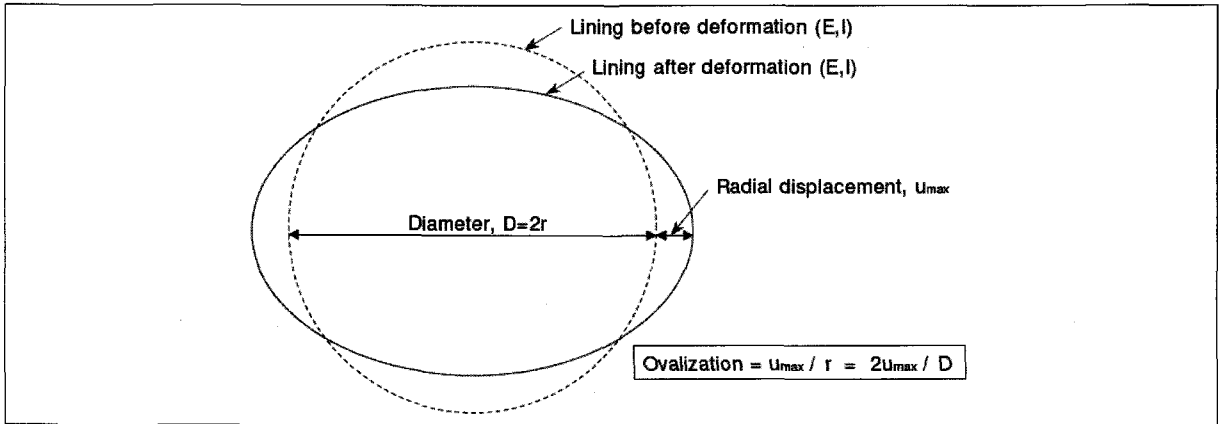


그림 1. Ovalization의 정의

표 1. 원형 토사터널에 대한 일반적인 ovalization 범위(BTS, 2004)

Soil Type	δR/R
Stiff to hard clays, overconsolidation ratio > 2.5-3.0	0.15-0.40%
Soft clays or silts, overconsolidation ratio < 2.5-3.0	0.25-0.75%
Dense or cohesive sands, most residual soils	0.05-0.25%
Loose sands	0.10-0.30%

세그먼트 라이닝 설계시 ovalization limit가 라이닝의 두께, 철근량 등을 결정하는 결정적인 요인으로 작용하는 경우가 빈번하게 발생되기 때문에, ovalization limit값은 터널 소유자(발주처)와의 협의에 의해 터널구조물의 특성 및 사용 목적에 맞도록 현실적/합리적으로 결정되어야 하는 값이다. 설계에 적용되는 ovalization 값을 정량적으로 이야기 하기는 어려우나, 통상적으로 PCC 세그먼트 라이닝의 경우 0.5%~1.0%범위의 값을 일반적으로 설계에 적용하는 것이 일반적이다. 일례로, PCC 세그먼트 라이닝으로 시공된 영국의 CTRL(Channel Tunnel Rail Link)의 경우 1%의 ovalization에 견딜 수 있도록 세그먼트 라이닝을 설계한 것으로 알려져 있다.

실제적인 계산에 있어서는, 주어진 설계 대표단면에 대해 지난 호에 설명한 Duddeck & Erdmann의 이론해에 의해 최대 및 최소 hoop thrust를 계산한 후에, Morgan의 공식을 활용하여 설계 목표 ovalization에 대응하는 모멘트값을 계산하여 interaction diagram에 그리고(plot) 구조적으로 안정한지를 판단하는 것이 일반적인 설계 절차이다.

4. Segment Joint에 대한 검토

PCC 세그먼트 라이닝은 공장에서 양생이 완료된 콘크리트 패널을 현장에서 조립하기 때문에, 시공 완료 후 물리적으로 세그먼트 패널사이에 joint가 존재할 수 밖에 없고, 이러한 특성으로 인해 대부분의 누수, 라이닝 균열 등의 문제는 Segment Joint에서 발생하는 경우가 많다. 또한, PCC 세그먼트 라이닝은 별도의 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 PCC콘크리트 라이닝 자체가 영구지보재로 사용되는 것이 통상적이기 때문에 세그먼트 라이닝의 joint가 시공중/운영중 구조적으로 손상되지 않도록 설계하는 것은 매우 중요하다.

Segment joint의 종합적인 설계는 joint 접촉 형식

(convex-convex, convex-concave, plane contact, bossed plane 등), 볼트 연결 방식(curved bolt, straight bolt, inclined bolt, plastic dowel, no bolt 등), 방수 gasket 형식 등이 지반조건, TBM 형식, 터널의 사용 목적 등과 함께 복합적으로 고려되어야 하기 때문에 joint 설계의 모든 사항을 일반화 하여 지면상에 소개하기에는 어려움이 있다.

이에 여기에서는 segment joint의 구조적인 안정성 검토 중 가장 중요하다고 할 수 있는 joint bursting을 중심으로 joint 설계 관련 사항을 소개하기로 하겠다.

4.1 Joint Bursting에 대한 이론적 배경

세그먼트 joint의 구조적인 설계를 위해 실무에서 널리 사용되고 있는 이론은 프리스트레스드 빔(prestressed beam)의 end block에 대한 bursting 관련 이론들이다.

이는, 세그먼트 라이닝은 통상적으로 joint에서의 접촉면적이 세그먼트 중앙부의 두께 보다 작기 때문인데, 그림 2에 보인 바와 같이, 폭 d, 두께 b인 콘크리트 세그먼트 joint에 폭 a만큼의 한정된 구역에만 하중 V가 작용한다고 가정하면, joint표면으로부터의 깊이 x가 증가하면서 압축응력은 그림 2의 가운데 모식도에 보인 바와 같이 분산되게 된다. 깊이 x=d인 위치에서는 통상적으로 압축응력이 전체 세그먼트 폭 d에 대해 균등하게 분산되는 것으로 가정하게 되는데, 문제는 $x < d$ 인 영역에서는 압축하중이 분산되면서 콘크리트요소 내에 인장응력이 발생된다는 점이다.

그림 2의 가운데 그림을 다시 보면, 압축응력이 1~6번 line을 따라 분산되면서 Poisson's ratio에 대응하는 만큼의 변위 u_x 를 좌상표 방향으로 발생시키고, 이 변위 u_x 는 곧 콘크리트 요소내에 인장응력(σ_x)을 발생시키게 된다. 이 인장응력이 콘크리트의 설계 허용 인장응력을 초과하게 되면 압축응력이 전파되지 않는 영역(그림 2의 1번과 6번 line의 바깥 영역)의 콘크리트 블록이 떨어져 나가게

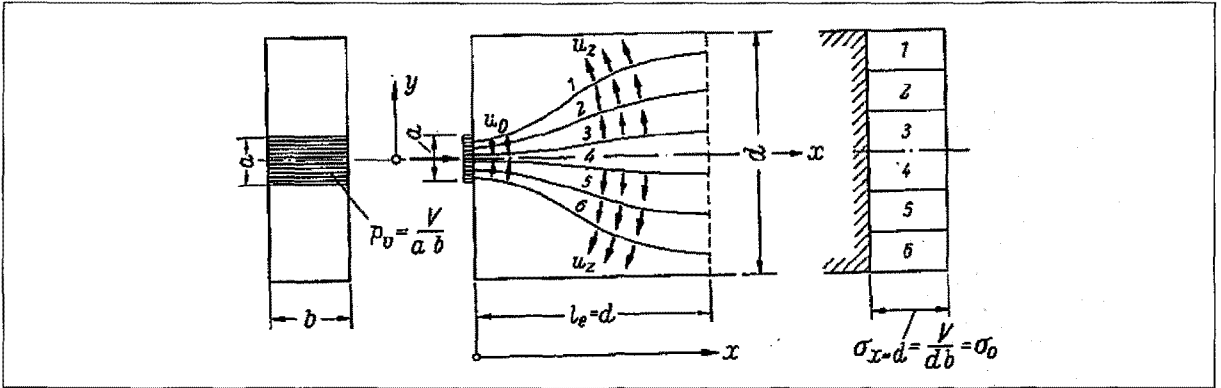


그림 2. End block loading에 의한 압축응력 분산 및 인장변위 u_z 발생 개념도(Leonhardt, 1964)

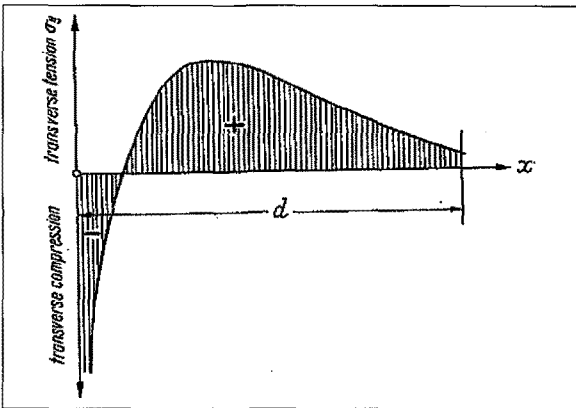


그림 3. End block loading에 의한 인장응력 분포(Leonhardt, 1964)

되는데 이를 통상적으로 bursting failure라고 부른다.

End block loading에 의해 콘크리트에 발생하는 인장력의 크기는 joint 표면으로부터의 깊이 x 에 따라 크게 변화하는데, 이에 대한 일반적인 개념도를 그림 3에 보였다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 최대 인장응력은 joint 표면이 아니라 세그먼트 내부에서 발생된다는 점을 알 수 있다. Segment joint의 구조 설계시 joint에 대한 철근 배근 설계는 최대 인장응력 발생 위치를 고려하여 bursting stress에 대해 충분한 인장 저항력을 갖도록 설계해야한다.

Bursting stress에 대한 최대 크기 및 깊이에 따른 분포는 end block loading의 작용 위치 및 면적, 세그먼트

표 2. Design bursting tensile force(rearranged from BS 8110-1:1997, Table 4.7)

y_{po}/y_o	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
F_{bst}/P_o	0.23	0.23	0.20	0.17	0.14	0.11

NOTE Intermediate values may be interpolated.

y_o is half the side of the end block;
 y_{po} is half the side of the loaded area;
 P_o is the tendon jacking force.

Circular bearing plates should be treated as square plates of equivalent area.

의 두께에 따라 변화하게 되며, 이에 대한 제안식은 design code, 학자에 따라 서로 상이하다.

BS code에서 제안하는 design bursting stress에 대한 내용을 표 2에 보였다.

Design code 외에 통상적으로 널리 쓰이는 이론은 Leonhardt(1964)와 Guyon(1957)의 제안식이며, Leonhardt(1964)와 Guyon(1957)에 의해 제안된 bursting stress에 대한 분포 diagram을 그림 4와 5에 각각 보였다.

이 중 Guyon(1957)의 제안식에 사용된 변수들에 대한 정의를 그림 6의 모식도에 보였다. 원전의 symbol을 그대로 수록한 관계로 동일한 물리량이 제안자, code에 따라 서로 상이한 symbol로 표현되어 있음에 주의하기 바란다.

세그먼트 라이닝의 bursting failure에 대한 검토는, bursting failure가 세그먼트 joint에서 발생했더라도 세

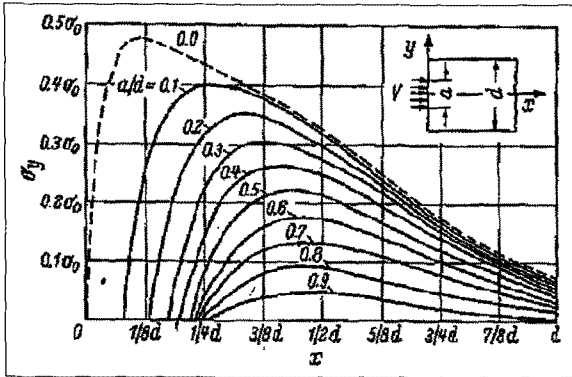


그림 4. Leonhardt(1964)가 제안한 bursting stress 분포

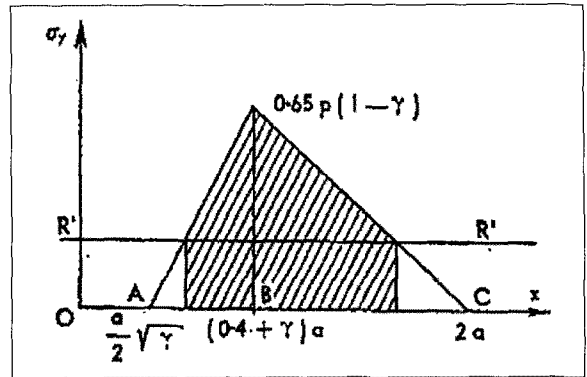


그림 5. Guyon(1957)이 제안한 bursting stress 분포

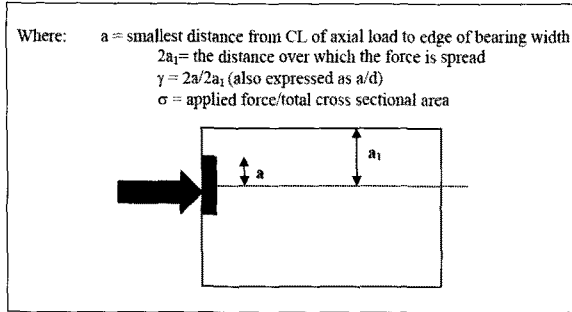


그림 6. Guyon(1957)의 수식에 사용된 symbol에 대한 정의($\sigma = p$)

그먼트 라이닝 구조물이 붕괴되는 것을 의미하지는 않으므로, 통상적으로 Serviceability Limit State(SLS) 설계로 보는 것이 일반적이다.

4.2 Ram Loading에 대한 검토(Circumferential Joint)

Gripper를 이용하여 암반지반으로부터 추진반력을 얻어내는 TBM 형식을 제외한다면, 대부분의 TBM들은 후방에 조립되는 있는 세그먼트 ring을 추진반력체로 사용하게 된다. Ram Loading은 Ram의 끝부분에 부착되어 있는 Shoe를 통해 세그먼트 라이닝의 circumferential joint면에 직접적으로 하중을 전달하게 되며, 세그먼트 라이닝의 강도가 충분하지 않은 경우, Ram loading에 의해

bursting failure가 발생될 수 있다.(세그먼트 joint의 일반적인 명칭에 대한 정의를 그림 7에 보았다.)

Ram load의 크기와 ram shoe의 위치, hoe의 면적을 알고 있다면, 앞서 설명한 bursting 이론을 활용하여 세그먼트 joint가 시공중 ram loading에 의해 파괴되지 않도록 joint에 대한 구조적인 설계를 수행할 수 있다.

Ram Load의 크기는 TBM type, TBM 직경, 굴착지반 조건, 수압 등 현장조건에 따라 다양하게 변화하므로, 설계단계에서 정확한 Ram Load값을 결정하는 것은 매우 어렵다. TBM의 specification이 작성되기 이전의 기본설계 단계에서는 유사프로젝트의 사례값을 초기 설계값으로 활용하는 것이 보통이다. Ram load는 영구하중이 아니므로 Load factor는 임시하중에 준하는 값을 통상 적용하게 되며, 만약 Ram Loading이 라이닝의 두께를 결정하는 주된 하중이 되는 경우에는 joint 부근에 추가적인 인장철근을 배치하는 것이 일반적이다.

4.3 Hoop Thrust에 대한 검토(Radial Joint)

세그먼트 링(ring)에 발생하는 hoop thrust는 세그먼트의 radial joint를 통해 인접한 세그먼트로 전달되게 되는데, 세그먼트 joint에서 세그먼트간의 접촉면적(하중 전달 면적)은 통상적으로 세그먼트의 두께보다 작기 때문에

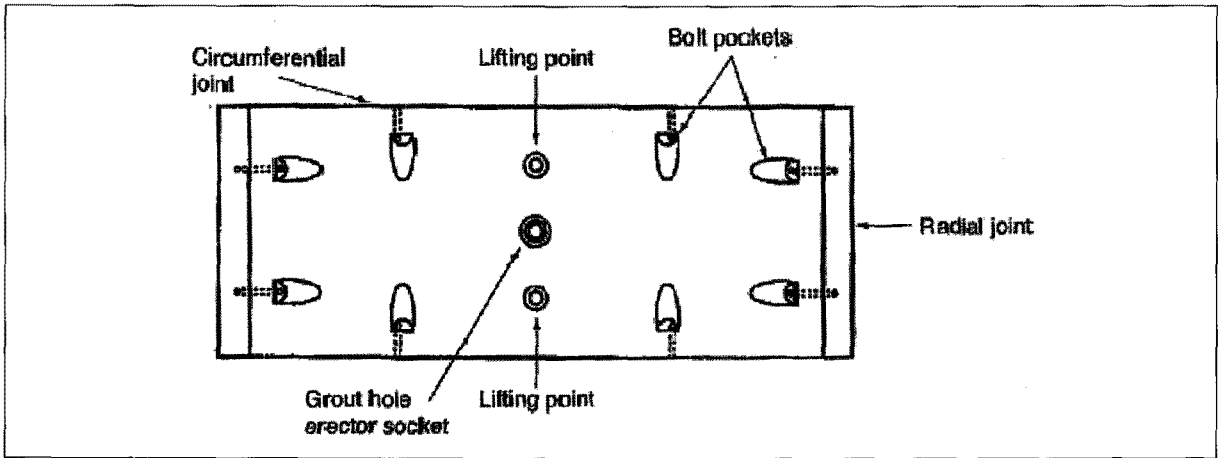


그림 7. Segment joint 및 부위별 일반 명칭(modified from BTS, 2004)

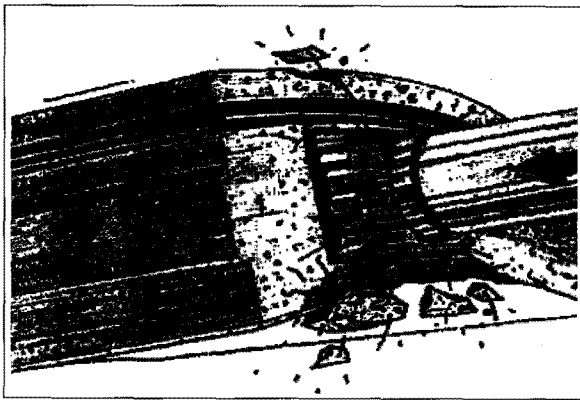


그림 8. Ram Loading에 의한 Joint Failure(AFTES, 1998)

Radial joint에 대한 안정검토시 한가지 염두에 두어야 할 점은 세그먼트의 시공오차 인데, 세그먼트의 시공오차는 직접적으로 radial joint의 접촉면적을 감소시키기 때문에, 해당 프로젝트에서 허용하는 세그먼트의 시공오차를 고려하여 감소된 joint 접촉 면적을 적용하여 radial joint에 대한 bursting 안정검토를 수행하는 것이 일반적이다.

5. Erecting, Stacking에 대한 검토

에 hoop thrust에 의한 bursting stress가 세그먼트의 인장 저항력 보다 커지게 되면 radial joint에 bursting failure가 발생되게 된다.

최근 가장 널리 사용되는 joint의 형태는 plane contact 형태라고 볼 수 있는데, 이 경우 gasket groove와 caulking groove를 차감한 면적이 joint의 순 접촉면적이 된다. Gasket Groove와 Caulking Groove의 제원이 결정되고, Duddeck & Erdmann의 이론해에 의해 계산된 최대 Hoop thrust값을 알고 있다면 이전에 설명한 bursting이론에 의해 radial joint에 대한 구조적인 안정검토를 수행할 수 있다.

세그먼트가 시공(erecting), 적재(stacking)중에 손상되었다면, 해당 세그먼트는 손상되지 않은 세그먼트로 쉽게 대체될 수 있기 때문에, 세그먼트 라이닝의 운반, 시공(erecting), 적재(stacking)에 대한 안정검토는 ULS 또는 SLS 검토라고 보기는 힘들다.

하지만, 세그먼트 라이닝은 영구하중 뿐만 아니라 운반/시공/적재중에 받을 수 있는 임시하중에 대해서도 충분한 구조적인 용량을 가지고 있어야 하기 때문에, 운반/시공/적재중 임시 하중에 대한 안정검토가 세그먼트 설계과정에서 수행되어야 한다.

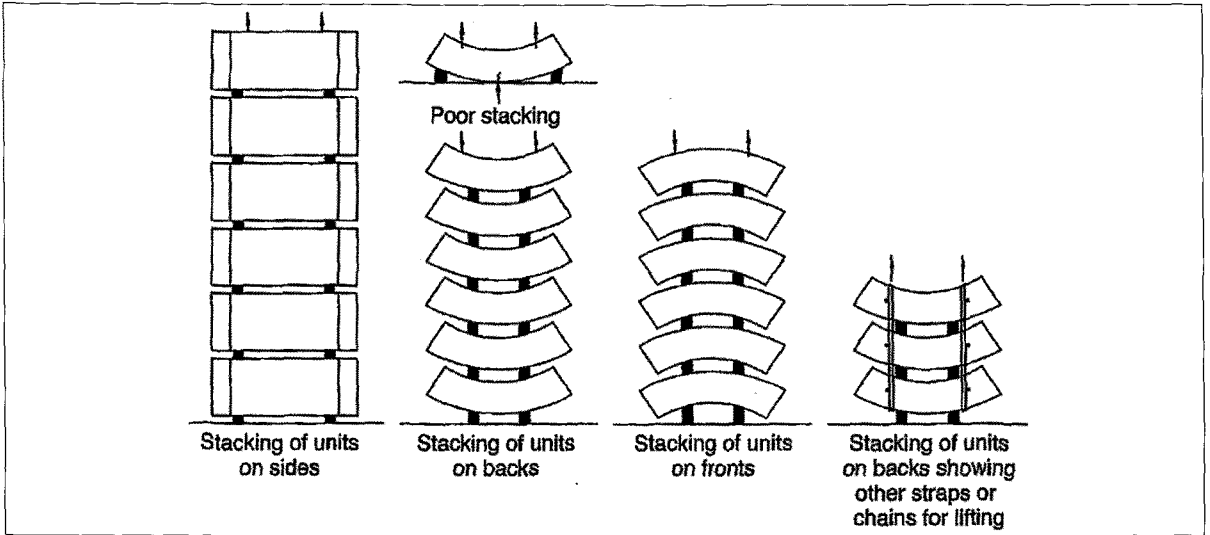


그림 9. Segment stacking의 종류(BTS, 2004)

세그먼트의 적재에 대한 안정검토는 세그먼트의 적재 방식에 따라 세부적인 계산 방법이 달라지게 된다. 세그먼트 적재방식은 갱구부 작업장(work site)의 현장 상황에 따라 결정되게 되며, 측면적재(side stacking)와 배면적재(back stacking)가 가장 일반적이라고 볼 수 있다(그림 9).

세그먼트 적재에 대한 안정검토는 통상적으로 세그먼트의 적재 지지점이 2개소 이기 때문에 세그먼트 라이닝을 2지점에 의해 지지되는 단순보로 가정하여 최대 적재 가능한 세그먼트 개수를 검토하게 된다(1개의 ring을 구성하는 세그먼트들이 통상 1열로 적재되어야 한다.)

세그먼트의 erecting에 대한 안정검토는 TBM내부의 segment erector 방식에 따라 세부사항이 틀려지게 된다. 최근에는 vacuum erector가 일반적으로 사용되기 때문에 세그먼트가 erecting중에 손상되는 경우는 드물지만, 세그먼트가 erector socket에 의해 handling되는 경우에는 세그먼트 erector socket이 세그먼트의 자중에 대해 전단/인발등에 대해 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

세그먼트의 erecting에 대한 안정검토시에는, 세그먼트에 작용되는 impact loading, erecting중의 세그먼트 자중에 대한 관성력 등 정량화 하기 힘든 하중들을 고려하여야 하기 때문에 BTS(2004)에서는 최소 설계 안전율 3 이상을 적용할 것을 권장하고 있다.

6. 맺음말

이상으로 2회에 걸쳐 PCC 세그먼트 라이닝에 대한 설계 실무를 소개 하였다. 수록 내용이 구조적인 안정검토에 한정되어 있어 PCC 세그먼트 라이닝의 설계에 대한 세부사항 전부를 소개 해 드렸다고 말씀드리기는 어렵지만, PCC 세그먼트라이닝의 구조설계 개념을 이해하는 데 조금이나마 도움이 되었으면 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. British Tunnelling Society and Institution of Civil Engineers (2004). Tunnel Lining Design Guide. Thomas Telford Publishing, London.
3. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1982). Structural design models for tunnels. Proc. Tunnelling '82 Conf., IMM, London, pp. 197-204.
4. Curtis, D.J. (1976). Discussions on Muir Wood: The circular tunnel in elastic ground. Geotechnique 26, Issue 1. Thomas Telford, London, pp. 231-237.
5. Muir Wood, A.M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. Geotechnique 25, Issue 1, Thomas Telford, London, pp. 115-127.
6. Morgan, H.D. (1961). A contribution to the analysis of stress in a circular tunnel. Geotechnique 11, Issue 1. Thomas Telford, London, pp. 37-46.
7. Szechy, K. (1973). The Art of Tunnelling. Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
8. Fritz Leonhardt (1964). Prestressed Concrete Design and Construction, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, pp. 270-285.
9. Y. Guyon (1957). Limit-State Design of Prestressed Concrete : The Design of the Member (Vol. 2). Applied Science Publishers Ltd, London, pp. 343-386.