

셸드 TBM 세그먼트의 축력을 고려한 설계방법 소개 - 균열검토 방법을 중심으로 -



추석연
(주)단우기술단
대표이사



고성일
(주)단우기술단
지반부 상무



황창희
(주)단우기술단
지반부 대리



배규진
한국건설기술연구원
선임연구위원



장수호
한국건설기술연구원
연구위원



이규필
한국건설기술연구원
수석연구원



문도영
경성대학교
토목공학과
조교수



강태성
삼표건설(주)
건설개발팀 팀장

1. 서론

셸드 TBM 공법에서 영구적인 라이닝 구조체 역할을 하는 세그먼트는 셸드 공사비의 25~40%를 차지하고 있으며, 세그먼트 제작비에서도 55% 이상의 재료비(콘크리트 및 철근)가 투입되기 때문에 경제적인 세그먼트 설계는 국내 셸드 TBM 활성화에 많은 역할을 할 수 있는 원동력이 된다.

국내에서 통상적으로 사용되어 온 세그먼트 재료는 콘

크리트의 경우 40~48MPa, 철근의 경우 400MPa이다. 그러나 1999년 콘크리트 구조설계기준 제정 및 2007년 10월 개정 발행에 이어, 2012년 Euro Code 및 국내 주요 연구결과 등을 반영한 2012년 콘크리트 구조기준이 발행되면서, 기존의 세그먼트 설계에도 영향을 미치게 되었다.

가장 큰 영향을 미치는 항목 중 하나가 철근의 강도기준이며, 당초 2007년 콘크리트 구조설계기준에서는 최대 550MPa를 사용하도록 규정하였으나, 2012년 콘크리트 구조기준에서는 600MPa까지 사용가능하도록 재료를 고

강도화 하였다. 세그먼트라이닝 재료의 고강도화로 세그먼트라이닝의 설계강도가 증가되어, 소요철근량 감소 및 세그먼트라이닝 두께 감소로 인한 경제적인 세그먼트 설계가 가능할 것으로 예상된다.

설계강도 증가로 기존 콘크리트구조설계기준 2007에 비해 철근량의 감소가 가능해졌지만, 콘크리트구조기준 2012 상의 균열에 대한 기준은 보 및 1방향 슬래브의 휨철근 배치에 관한 규정을 따르고 있다. 그림 1과 같이 보 및 1방향 슬래브에서는 작용하중에 대한 수평방향 구속력이 없기 때문에 단면에 작용하는 휨모멘트에 의해 처짐과 균열이 발생한다. 원형의 세그먼트라이닝에서는 원형 부재의 구조적 이점으로 외부하중이 부재에 축력과 휨모멘트를 유발한다. 양은익 등(1997)은 축방향 구속에 의해 발생하는 축력이 휨부재의 거동에 미치는 영향과 평균 균열간격에 미치는 영향을 검토하였으며, 축방향 구속을 받는 휨부재의 강성은 무구속 휨부재의 강성보다 크게 된다는 시험결과를 발표하였다. 원형 세그먼트라이닝은 축력과 연속적인 부재특성으로 인해 축방향 구속력이 작용하며, 균열검토시 축방향 구속력의 영향을 적용하여야 한다.

이에 이 기술기사에서 원형인 세그먼트라이닝의 형상을 고려하여 콘크리트 구조기준 상의 보 및 1방향 슬래브와 달리 축력과 모멘트가 함께 작용하는 구조물에 대한 균열검토 방법을 소개하고, 경제적인 세그먼트라이닝 설계에 도움이 되고자 한다.

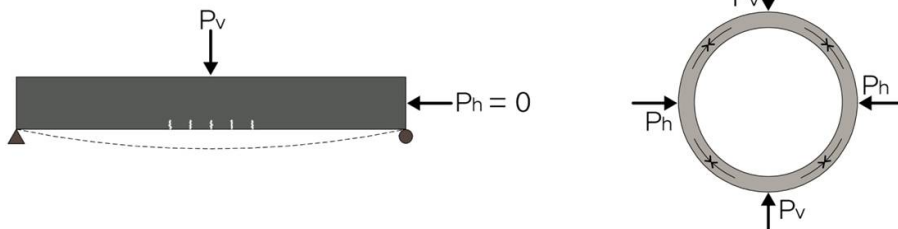


그림 1. 보 (또는 1방향 슬래브)와 터널 세그먼트라이닝의 작용하중 및 균열발생 양상

2. 기준 상의 균열검토법 및 세그먼트라이닝 특성을 고려한 균열검토법 제안

2.1 국내 실드TBM 세그먼트의 일반적인 균열검토 방법

콘크리트구조기준(2012)에서는 콘크리트 인장연단에 가장 가까이에 배치되는 철근의 간격을 검토함으로써 구조물에 발생하는 균열을 제어하도록 하고 있다. 철근의 중심간격 s 는 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 값 중에서 작은 값 이하로 한다.

$$s = 375 \left(\frac{\kappa_{cr}}{f_s} \right) - 2.5c_c \quad (1)$$

$$s = 300 \left(\frac{\kappa_{cr}}{f_s} \right) \quad (2)$$

여기서, κ_{cr} 은 건조환경에 노출되는 경우 280이고, 그 외 환경에 노출되는 경우는 210이므로 터널 조건에서는 보통 210을 사용하고 있다.

균열기준에서 주요 인자 중 하나인 f_s (사용하중 상태에서 인장연단에서 가장 가까이에 위치한 철근의 응력)는 기존 설계에서는 사용하중모멘트만을 고려한 식 (3)을 사용해왔다.

$$f_s = \frac{M}{\{A_s \times (d-x/3)\}} \quad (3)$$

그러나 실드TBM 공법의 특성상 토사 등 연약한 지반을 지나는 사례가 많기 때문에 사용하중모멘트(M_o)가 크게 발생하고, 큰 사용하중모멘트로 인해 균열을 방지하기 위한 철근량이 설계강도 만족시의 소요철근량보다 크게 필요한 경우가 발생하고 있다.

2.2 세그먼트라이닝에서 축력과 휨모멘트를 고려한 균열검토법의 필요성

주로 암반조건에 설계되는 기존의 NATM터널 콘크리트라이닝에서는 f_s 를 근사값으로 f_y 의 2/3를 사용하거나, 해석을 통해 구한 사용하중 모멘트(M_o)를 이용해 f_s 를 산정해왔다. $f_s=2f_y \div 3$ 철근응력 산정식은 부재 단면력(사용하중 모멘트)에 의한 응력을 사용하지 않는 경우에 적용하는 간략식이며, f_s 값은 어떠한 경우에도 철근 항복강도(f_y)의 2/3를 넘지 않는다는 조건을 내포하고 있다. 고강도 철근을 사용하지 않는 NATM터널에서는 f_y 의 2/3를 이용해 계산한 값으로 산정한 철근간격 또는, 사용하중 모멘트만을 이용해 계산한 균열조건에 철근 간격이 강도조건으로 검토한 철근량에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 토사지반이나 연약한 지반에 건설되는 경우가 많은 세그먼트라이닝은 고강도 철근을 사용하므로 f_y 의 2/3를 이용한 간략식을 적용할 수 없고, 사용하중 모멘트만을 고려한 식 (3)을 이용해 f_s 를 산정하면 세그먼트라이닝의 강도조건보다 균열검토에 의해 산정된 철근량이 크게 산정되어 세그먼트라이닝의 재료비가 증가하는 경우가 발생하였다. 콘크리트 구조기준 6.3.3절은 부재에 휨모멘트만 작용하는 보 및 1방향슬래브에 대한 규정이므로, 휨모멘트와 축력이 동시에 작용하는 세그먼트라이닝 구조물의 구조적 특성을 고려한 균열검토법의 도입이 필요하다. 양은익 등(1997)은 연구결과, 축 압축력을 받는

휨부재의 평균 균열간격은 축력의 영향을 받으며 축력이 증가할수록 평균 균열간격이 증대하여 일정값에 수렴하는 경향을 나타낸다고 발표하였다. 콘크리트구조기준 (2012)에서 제시하고 있는 균열검토법은 주철근의 중심간격을 균열간격 이내로 제한하는 것으로 축력의 영향을 고려하면 균열의 영향을 저감할 수 있기 때문에 세그먼트라이닝의 소요철근량을 감소시킬 수 있다.

2.3 축력을 고려한 세그먼트라이닝의 균열검토법

철근콘크리트 세그먼트라이닝 부재는 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 부재로서, 작용하중과 주변지반 조건에 따라 부재내의 응력은 달라진다. 축력과 휨모멘트를 고려한 세그먼트라이닝의 균열검토법은 세그먼트라이닝 부재의 축력이 지배되는 압축파괴 단면으로 설계되는 경우로 제한하며, 휨 지배 단면인 인장파괴 단면으로 설계되는 경우는 기존 설계법 대로 휨모멘트만을 고려한 균열검토 방법을 사용한다.

① 세그먼트라이닝 부재의 파괴상태 검토

작용하중과 주변지반 조건에 따른 세그먼트라이닝의 축하중 P 와 휨모멘트 M 및 구조조건(세그먼트라이닝 폭, 두께, 적용 철근량 등)으로부터 압축파괴 여부를 판단한다. 사용하중 P 가 균형축하중 P_b 를 초과하거나, $e = M/P$ 가 e_b 이하이면 압축파괴 단면으로 검토된다.

그림 2와 같은 세그먼트라이닝 단면이 균형상태에 있다면 변형률은 그림 2의 오른쪽 그림과 같이 될 것이므로, 중립축의 위치 c_b 와 콘크리트 응력 사각형의 깊이 a_b 는

$$c_b = \frac{0.003}{0.003 + f_y/E_s} \times d \quad (4)$$

$$a_b = \beta_1 c_b = \beta_1 \times \frac{0.003}{0.003 + f_y/E_s} \times d \quad (5)$$

작용하중의 합 $\sum V=0$ 이므로

$$P_b = 0.85f_{ck} a_b b + (f_y - 0.85f_{ck})A_s' - f_y A_s \quad (6)$$

소성중심(plastic centroid)에 대하여 $\sum M=0$ 을 적용하면 $M_b = P_b \times e_b$ 이므로 균형철근비 e_b 는

$$e_b = \frac{0.85f_{ck} a_b b (d - d'' - \frac{a_b}{2}) + (f_y - 0.85f_{ck})A_s' (d - d' - d'') + f_y A_s d''}{P_b} \quad (7)$$

세그먼트라이닝 부재의 편심비 $e < e_b$ 인 경우에 부재는 압축파괴 단면으로 거동하므로 균열검토시 축력과 휨모멘트를 동시에 고려할 수 있다.

② 축력과 휨모멘트를 고려한 세그먼트라이닝의 균열 검토법

단면의 폭을 b , 높이를 h , 철근 깊이를 d , 중립축 깊이를 x 라고 하면, 발생 압축력 C 는

$$C = \frac{1}{2} b x E_c \epsilon_c + A_s E_s \epsilon_c \times \frac{x - d'}{x} \quad (8)$$

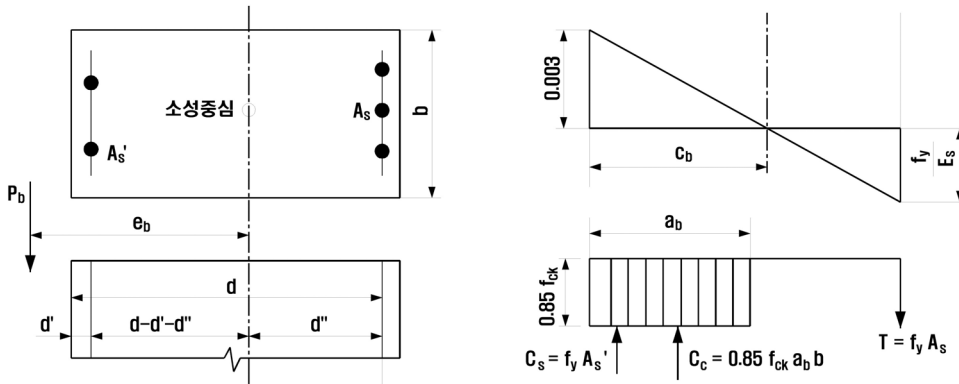


그림 2. 균형파괴 상태의 부재

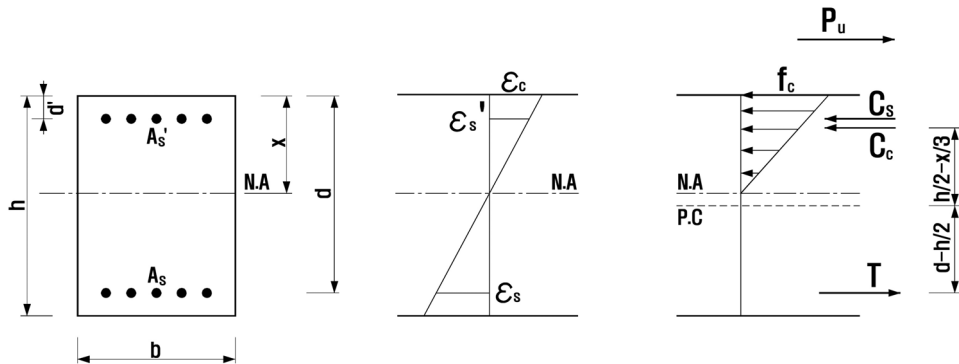


그림 3. 세그먼트라이닝의 변형률 및 작용하중

발생 인장력 T는

$$T = A_s E_s \epsilon_s \quad (9)$$

이다. 발생 압축력과 발생 인장력은 식 (10)의 평형방정식을 만족시켜야 한다.

$$P_u = C - T \quad (10)$$

$$M_u = \frac{1}{2} b x E_c \epsilon_c \times \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3} \right) + A_s E_s \epsilon_c \times \left(\frac{x - d'}{x} \right) \times \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T \times \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

식 (10)의 비선형 연립방정식의 해를 구하면 중립축 깊이가 x와 철근의 인장변형률 ϵ_s 를 구할 수 있고, Hooke 법칙을 이용하여 철근의 응력 f_s 를 구할 수 있다.

$$f_s = E_s \times \epsilon_s \quad (11)$$

식 (11)에서 구한 인장철근의 응력(f_s)을 식 (1)과 (2)에 적용해 구한 값이 균열검토에서 산정한 철근의 최대중심간격 s이고, 주철근의 간격은 s보다 좁은 간격으로 배근해야 한다. f_s 산정시 휨모멘트만 고려한 균열검토법과 축력과 휨모멘트를 고려한 균열검토법을 표 1에 비교하였다.

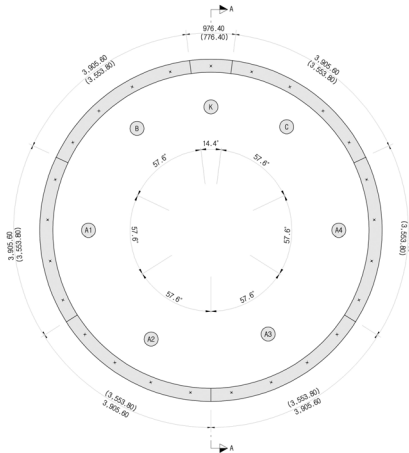
표 1. 휨모멘트 고려시와 축력과 휨모멘트 고려시의 균열검토법 비교

구 분	휨모멘트만 고려	축력과 휨모멘트 고려
단면 상태	인장파괴 단면 $e \geq e_b$	압축파괴 단면 $e < e_b$
인장철근의 응력 산정식	$f_s = \frac{M}{\{A_s \times (d - x/3)\}}$	힘의 평형과 모멘트 평형식을 이용한 연립방정식에서 ϵ_s 를 구한 후 $f_s = E_s \times \epsilon_s$
주철근 중심간격 s	$s = \min \left\{ 375 \left(\frac{\kappa_{cr}}{f_s} \right) - 2.5c_c, 300 \left(\frac{\kappa_{cr}}{f_s} \right) \right\}$ 이하로 배근	

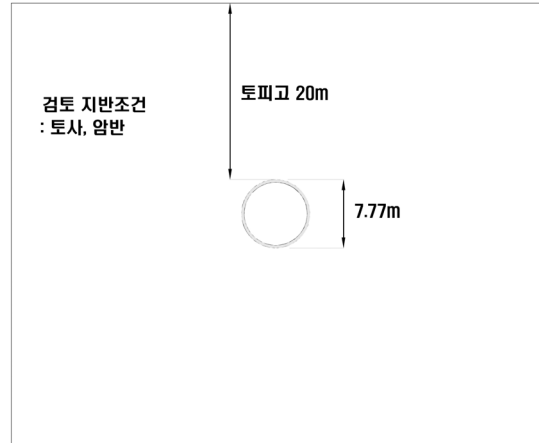
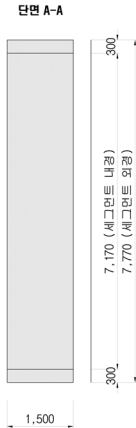
3. 축력과 휨모멘트를 고려한 균열검토법 적용 시 철근량 산정 및 비교

2절의 축력과 휨모멘트를 동시에 고려한 균열검토법을 적용한 경우와 휨모멘트만 고려하여 균열을 검토한 경우에 산정된 세그먼트라이닝의 주철근량을 비교해보았다. 비교를 위해 토피고 20m의 일반적인 지하철 터널을 가정하였다. 세그먼트라이닝 외경은 7.77m, 두께는 300mm (표 2)의 일반적인 단선 지하철 단면(그림 4)에 대해 주변지반이 암반인 경우와 토사인 경우의 대표 지반조건으로 검토를 수행하였다. 세그먼트라이닝 구조조건과 주변지반 조건은 표 2와 표 3과 같다.

토사와 암반 지반조건에 대해 휨모멘트만 고려한 균열검토식과 축력과 휨모멘트의 영향을 고려한 균열검토식을 비교한 결과는 표 4와 그림 5와 같다. 암반지반의 경우 양호한 지반조건으로 인해 균열보다는 강도조건과 최소철근량 조건에서 철근량이 산정되었고, 암반조건에서 축력과 휨모멘트를 고려한 CASE4는 검토 결과 전단면 압축상태이므로 균열은 발생하지 않는다. CASE3과 CASE4의 암반조건인 경우 균열검토시 축력고려 여부와 관계없이 동일한 철근량이 산정되었다. CASE1과 CASE2의 토사지반의 경우 휨모멘트만 고려한 CASE1의 균열검토에서 주철근량이 결정되었고, 축력과 휨모멘트를 동시에 고려한 균열검토(CASE2)에서는 강도조건 및 최소철근량 조건에서 주철근량이 산정되었다. 균열검토시 축력과 휨모멘트



(a) 검토 단면개요



(b) 검토 세그먼트라이닝

그림 4. 검토 단면 및 세그먼트라이닝 단면

표 2. 세그먼트라이닝 구조세목 및 토펬고 조건

세그먼트라이닝		콘크리트 강도	철근 강도	적용 토펬고
외경	두께			
7.77m	300mm	60MPa	600MPa	20m

표 3. 검토 지반조건

구 분	주변지반	단위중량	점착력	내부마찰각	포아송비	탄성계수
CASE1,2	토사(모래)	19kN/m ³	0	27°	0.35	20MPa
CASE3,4	암반(연암)	24kN/m ³	150kPa	37°	0.27	2,000MPa

표 4. 균열검토 방법에 따른 세그먼트라이닝 주철근량 검토

구 분	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
지반조건	토 사		암 반	
균열검토 방법	휨모멘트만 고려	축력과 휨모멘트 고려	휨모멘트만 고려	축력과 휨모멘트 고려
강도조건	H16@150	H16@150	H16@200	H16@200
균열조건	H25@125	H16@200	H16@200	전단면 압축
주철근량	H25@125	H16@150	H16@200	H16@200

※ 상기에 산정된 철근량은 최소철근량 만족 조건임.

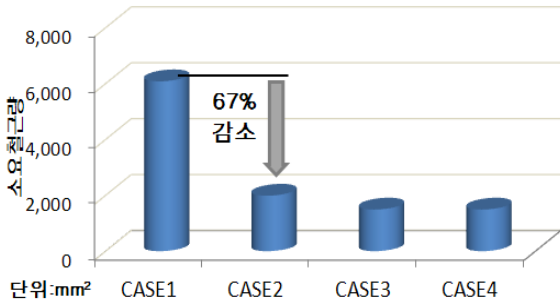


그림 5. 균열검토 방법에 따른 세그먼트라이닝 주철근량 비교

를 고려(CASE2)하면 균열이 아닌 강도조건 및 최소철근량 조건에서 철근량이 산정되어 휨모멘트만 고려한 CASE1에 비해 67% 소요철근량이 감소하였다.

축력고려 여부에 관계없이 동일한 철근량이 산정된 암반지반 조건에 비해 토사지반 조건에서 축력고려 여부에 따라 철근량이 크게 변하는 것은 주변지반이 터널의 변형에 반력으로 작용하여 변형을 억제하는 터널의 특성을 잘 나타낸 것이다. 암반지반에 비해 연약한 토사지반에서 터널의 변형이 상대적으로 크기 때문에 사용하중 모멘트가 크게 산정되고, 균열검토시 축력을 고려하지 않으면 큰 철근량이 산정되는 것을 표 4 및 그림 5를 통해 확인할 수 있다.

4. 맺음말

주로 토사나 풍화암 등 지반조건이 양호하지 않은 조건에서 시공되는 셸드TBM 공법의 세그먼트라이닝은 균열검토 시 기존 보 및 1방향 슬래브에서의 균열검토법에 따라 휨모멘트만 고려하는 경우 균열조건에 의해 철근량이 과다 산정될 수 있다. 그래서 이 기술기사에서는 원형인 터널 세그먼트라이닝의 특성을 고려해 축력과 휨모멘트가 함께 고려된 균열검토법을 소개하였다.

- ① 축력과 휨모멘트가 함께 작용하는 부재 중 편심비(e)가 균형편심비(e_b) 보다 작은 압축파괴 거동을 보이는 부재에 대해 축력과 휨모멘트를 함께 고려한 방법으로 균열검토를 수행할 수 있다.
- ② 축력과 휨모멘트가 함께 작용하는 부재에 대한 균열검토법으로 균열검토 결과 주변지반이 토사지반인 세그먼트라이닝의 소요철근량은 휨모멘트만 고려한 균열검토법에 비해 67% 감소하였다(H25@125 → H16@150).
- ③ 주변지반이 암반인 경우 축력과 휨모멘트를 함께 고려하면 전단면이 압축상태이므로, 균열이 발생하지 않기 때문에 균열에 안전한 것으로 검토되었다.
- ④ TBM 터널 세그먼트라이닝에서 축력과 휨모멘트를 함께 고려해 균열을 검토하는 방법을 적용한 결과 세그먼트라이닝의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 나타났다. 향후 셸드 TBM공법의 세그먼트라이닝 설계에서 축력을 고려한 균열검토 수행으로 경제적인 설계에 도움이 되었으면 한다.
- ⑤ 본 기술기사의 축력을 고려한 터널 세그먼트라이닝의 균열검토 방법은 (사)한국콘크리트 학회에 축력을 고려하는 방법의 타당성과 연립방정식에 의한 인장철근의 응력 산정방법의 적정성을 자문하였고, 자문결과 원형구조물 형상을 고려할 때 외력에 의한 축력과 모멘트를 모두 고려하여 산정된 철근의 응력으로 균열검토를 수행하여야 하고, 연립방정식에 의한 사용하중 상태의 철근응력을 산정하는 식은 적절한 방법이라는 자문을 받았다.

감사의 글

본 기술기사는 국토교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제 : 고성능 세그먼트라이닝의 안정성 및 적용성 평가 연구”의

일부 내용입니다. 또한 “TBM 터널 철근콘크리트 세그먼트의 균열검토시 축력 고려여부에 대한 자문”을 수행해 주신 (사)한국콘크리트학회 자문위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 양은익, 김진근, 이성태, Morita Shiro, 축력이 철근콘크리트 휨부재의 거동과 평균 균열간격에 미치는 영향, 콘크리트학회지, Vol. 9, No. 4, 1997, pp. 207~214.
2. 변동균 외, 철근콘크리트, 2003.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조기준 해설, 2012.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 2007