

셸드터널 라이닝 세그먼트의 해석과 거동 특성

Analysis and Structural Behavior of Shield Tunnel Lining Segment

이 환우* · 김관수** · 김광양*** · 강대희****

Lee, Hwan-Woo · Kim, Gwan-Soo · Kim, Gwang-Yang · Kang, Dae-Hui

ABSTRACT

The lining segment which is the main structure of the shield tunnel consists of joints, not continua. Past international and domestic design data have been commonly used for design practices without specific verification about the structural analysis model, design load, and affection of the soil constant of the lining segment. In this study, the propriety is estimated through the comparison between analytical solution and numerical solution for segment analysis and design models of the shield tunnel which is being used internationally and domestically. As a result, the full circumferential beam jointed spring model (1R-S0) is suggested by considering aspects of convenient use, application to field condition, and accuracy of analysis result. With suggested model, the parameter analysis was conducted for joint stiffness, ground rigidity, joint distribution, and joint number.

Keywords: *shield tunneling method, lining segment, structural analysis model, joint stiffness, ground rigidity, joint distribution, joint number.*

1. 서 론

도심은 일반적으로 하천을 중심으로 발달하거나 하천과 해안 주변에 형성된다. 지층구성은 암반층이 아닌 연약지반을 포함하고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 도심지에서의 터널공법으로서는 연약지반에서부터 암반층까지 다양한 지반조건에 적용이 가능하고 환경훼손 및 주기 과밀지역의 민원을 최소화할 수 있는 셸드터널공법이 최적의 대안이라 할 수 있다. 국내에서는 부산 광복동 전력구 공사를 시초로 소구경의 전력구 공사에서부터 대형·대단면 지하공간 건설에까지 그 적용범위가 점차 확대되고 있다.

국내의 설계경향은 구조해석 모델이나 설계하중 및 지반정수의 영향 등에 별다른 검증평가 없이 과거의 국내·외 설계 자료에 관행적으로 의존하여 과다설계하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 국내·외에서 현재 사용하고 있는 셸드터널의 세그먼트 해석 및 설계모델들을 분석하여 현장 조건별 적용성을 평가하고자 한다. 그리고 라이닝 세그먼트의 거동에 직접적인 영향을 주는 이음부의 강성과 지반강성, 이음부의 분할 등에

* 정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수 Email: hwanwoo@pknu.ac.kr
** (주)지아이에프 기술개발부 사원 Email: tropis@hanmail.net
*** 부경대학교 건설공학부 박사과정 Email: kky6708@hanmail.net
**** 부경대학교 건설공학부 석사과정 Email: alpinist99@hanmail.net

대한 매개변수 해석을 수행 한다.

2. 쉘터널 라이닝의 이론해

본 연구에서는 쉘터널 라이닝 세그먼트용 구조해석 모델들의 적용성을 분석하기 위하여 세그먼트간 이음부와 지반반력을 고려할 수 있고 현장 계측과 모형실험을 통하여 그 결과가 검증된 이론해(Lee, 2001a ; Lee, 2001b)를 이용한다.

쉘터널의 라이닝은 일반적으로 콘크리트 세그먼트를 조합·체결하여 시공하므로 그림 1과 같이 세그먼트와 링간 이음부를 가진다. 조립된 세그먼트의 이음부에서는 휨모멘트, 축력 및 전단력이 발생하고, 응력-변형률은 선형탄성 범위에 있다고 본 연구에서는 가정한다. 따라서, 이음부를 탄성연결요소로 이상화하여 이음부 강성(K_θ)을 정의한다. 또한, 식 (1)과 같이 세그먼트와 세그먼트간 연결이음부의 상대적인 강성비를 이음부 강성비(λ)로 정의한다.

$$\lambda = \frac{K_\theta l}{EI} \quad (1)$$

여기서, 이음부 강성(K_θ)은 이음부에 단위 회전각을 발생시키는데 필요한 단위 길이당 휨모멘트이고, 라이닝 세그먼트의 길이(l)는 단위길이를 사용하며, 세그먼트의 강성(EI)은 세그먼트의 탄성계수와 단면2차모멘트의 곱으로 정의한다.

2.1. 하중계 모델

연약지반에 시공되는 대부분의 콘크리트 라이닝 세그먼트는 이음부에 방수용 가스켓을 사용하기 때문에 라이닝 구조물은 토압과 수압을 동시에 받게 된다. 그러므로 라이닝 세그먼트에는 그림 1과 같이 전토압이 작용한다고 가정한다. 라이닝 세그먼트에 연직토수압, 연직 반력, 상부 측벽 토수압, 하부 측벽 토수압, 라이닝 자중 및 수평지반반력이 작용하고 있는 양상이다. 그리고 라이닝 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압은 다음 식 (2) ~ 식 (7)과 같이 계산된다.

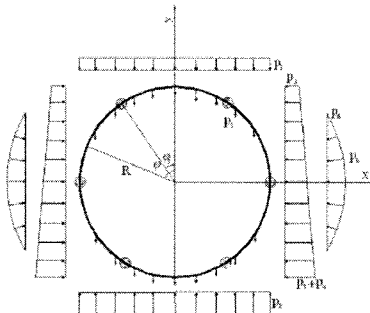


그림 1 라이닝 세그먼트의 하중모델 단면도 (Lee, 2001a)

$$p_1 = q_1 + q_2, \quad q_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{2 \left(1 - \frac{\pi}{4} R^2 \gamma_{oa} \right)}{2R} = 0.215 R \gamma_{oa} \quad (3)$$

$$p_2 = p_1 + \frac{2\pi R l \gamma_c}{2R} = p_1 + \pi t \gamma_c \quad (4)$$

$$p_3 = K_o \gamma' h + \gamma_w h, \quad p_4 = 2K_o \gamma' R + 2\gamma_w R \quad (5)$$

$$p_5 = \gamma t \quad (6)$$

$$p_6 = p_b (1 - 2\cos^2 \varphi) \left(\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{4} \right), \quad p_b = K_s \Delta_h \quad (7)$$

3. 구조해석 모델의 적정성 평가

현재 라이닝 세그먼트의 설계에서 실용목적으로 사용되고 있는 구조해석 모델은 일정강성링 모델, 다원지계 링 모델, 빔스프링 모델(1R, 2R), 전주면스프링 모델(1R-S0, 1R-SS), 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0, 1R-SS) 등이 있다. 여기서, 1R은 터널 진행방향으로 1개의 링만을 고려함을 의미하고, 2R은 서로 엇갈려 조립·체결되는 라이닝 세그먼트를 2개의 링으로 모델링하여 해석하는 것을 의미한다. S0는 지반반력을 고려하기 위해 압축스프링을 법선방향으로만 연결한 것이고, SS는 법선방향과 접선방향으로 동시에 연결시킨 것을 의미한다.

현재 국내에서 건설되는 쉘터터널의 이음부 강성비는 보통 0.126~1.37(삼보, 2003; 서울지하철, 2003; 에스코, 2003)의 분포를 가지고 있다. 본 연구의 해석 예들에서는 강성비를 강성이 아주 작은 경우에 해당되는 0.01과 일반적으로 국내에 적용되고 있는 범위를 감안하여 0.1과 1.0을 적용한다.

표 1 해석조건

적용 물성치	경우 1	경우 2	경우 3	경우 4	경우 5
터널반경, $R_{out}(m)$	2.5	3.1	5.50	3.1	5.50
세그먼트 두께, $t(m)$	0.3	0.35	0.55	0.35	0.55
도실진 반경, $R_{in}(m)$	2.35	2.925	5.225	2.925	5.225
탄성계수, $E(kN/m^2)$	$3.5e+7$	$3.5e+7$	$3.43e+7$	$3.5e+7$	$3.43e+7$
단면 2차모멘트, $I(m^4)$	$2.25e-3$	$3.57e-3$	$1.386e-2$	$3.57e-3$	$1.386e-2$
터널심도 (m)	8.7	14.0	18.7	14.0	18.7
지반수위면 (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
흙의 종류	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay
흙의 단위중량 $\gamma(kN/m^3)$	17.2	18.3	18.3	18.3	18.3
지반반력계수, $K_s(kN/m^3)$	5,000	10,000	15,000	10,000	15,000
이음부 개수	6	6	8	6	6
이음부 위치, $\varphi(^\circ)$	30, 90, 150	8, 73, 138	22.5, 67.5, 112.5, 167.5	30, 90, 150	30, 90, 150
적용 로압 (kN/m^2)	$p_1 = 165.8$	$p_1 = 274.0$	$p_1 = 373.0$	$p_1 = 274.0$	$p_1 = 373.0$
	$p_2 = 187.9$	$p_2 = 301.0$	$p_2 = 415.1$	$p_2 = 301.0$	$p_2 = 415.1$
	$p_3 = 116.1$	$p_3 = 191.0$	$p_3 = 257.1$	$p_3 = 191.0$	$p_3 = 257.1$
	$p_4 = 69.2$	$p_4 = 86.8$	$p_4 = 137.2$	$p_4 = 86.8$	$p_4 = 137.2$
	$p_5 = 7.5$	$p_5 = 8.6$	$p_5 = 13.48$	$p_5 = 8.6$	$p_5 = 13.48$

본 논문에서는 실용적으로 사용되고 있는 대표적인 모델들에 대해 수치해석을 수행하였고, 해석결과는 이론 해에 잘 일치하는 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 수록하였다. 그림 2와 3은 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 적용한 경우의 라이닝 세그먼트에 발생한 휨모멘트와 변위를 보여주고 있다.

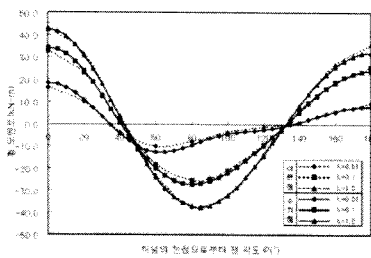


그림 2 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 휨모멘트

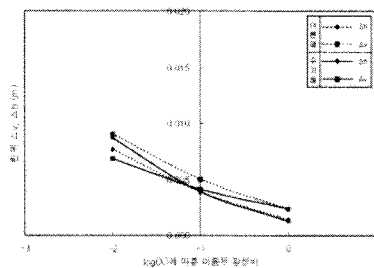


그림 3 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 수평·수직변위

휨모멘트와 변위 모두 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 이음부 강성비가 0.1이하인 경우에는 수치해와 이론해가 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 차이 값의 절대적인 크기는 공학적인 의미를 부여하기는 어렵다고 판단한다.

한편, 현재 우리나라에서 건설 중에 있거나 건설이 완료된 쉘터널 라이닝 세그먼트의 이음부 강성크기는 대부분 0.1이상에서 1.0 내외의 값으로 설계되어져 있다. 따라서 이러한 크기의 강성을 갖는 라이닝 세그먼트의 해석 및 설계에서는 전주면범이음스프링 모델(1R-S0)이 설계실무에 매우 적합할 것으로 판단된다.

4. 이음부 강성과 지반강성 및 이음부 분할의 영향

전술한 결과로부터 이음부는 쉘터널 라이닝 세그먼트의 거동에 큰 영향을 주는 변수임을 알 수 있었다. 이번 장에서는 전주면범이음스프링 모델(1R-S0)을 이용하여 이음부 강성과 지반강성, 이음부 분할 분포 및 분할개수의 영향에 관하여 분석하고자 한다.

4.1. 이음부 강성과 지반강성

해석 예에 지반강성을 나타내는 지반반력계수의 해석범위는 지반반력을 기대할 수 없을 정도로 아주 연약한 지반($K_s = 0$)에서부터 지반이 아주 견고한 상태($K_s = 30,000 \text{ kN/m}^3$)까지 고려한다. 이음부 강성비는 아주 작은 값인 0.01과 실무해석에 적용되고 있는 범위인 0.1과 1.0을 적용하여 해석하였다.

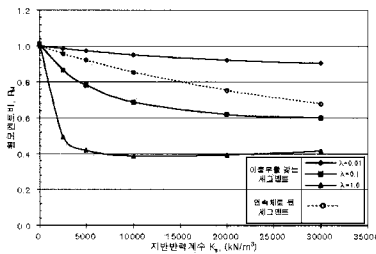


그림 4 지반조건에 따른 이음부 강성비에 따른 정 휨모멘트비

$$R_M = \frac{\text{이음부를 갖는 세그먼트의 최대 정 휨모멘트}}{\text{연속체로 된 세그먼트의 최대 정 휨모멘트}} \quad (8)$$

$$R_M = \frac{\text{지반강성별 연속체 세그먼트의 최대 정 휨모멘트}}{\text{K}_s = 0 \text{에서의 연속체 세그먼트의 최대 정 휨모멘트}} \quad (9)$$

그림 4는 지반강성에 따라 이음부 강성비별 라이닝 세그먼트의 천정부에 발생된 최대 정 휨모멘트비(R_M)를 보여주고 있다. 실선으로 나타낸 휨모멘트비는 식 (8)과 같이 두께 30cm로 이음부없이 연속된 라이닝 세그먼트와 이음부($\lambda = 0.01, 0.1, 1.0$)를 갖는 경우에서의 값을 비교한 것이다. 그림 4에서 점선은 식(9)와 같이 지반반력계수가 $K_s = 0$ 인 경우에 연속체로 가정된 라이닝 세그먼트의 천정부에 발생된 최대 정 휨모멘트에 대한 지반강성의 변화에 따른 휨모멘트비를 나타내고 있다.

4.2. 이음부 분할 분포의 영향

표 2의 경우 2와 경우 4의 조건을 가지고 이음부 분할 분포가 라이닝 세그먼트의 거동에 미치는 영향에 대하여 분석한다. 경우 2는 라이닝의 단단면에서 수직축을 기준으로 $\varphi = 8^\circ, 73^\circ, 138^\circ$ 의 위치에 이음부가 있고, 경

우 4의 이음부는 $\varphi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 에 위치한다고 가정한 것이다. 그 이외의 해석조건은 경우 2, 4와 동일하다.

그림 5와 6은 이음부 분할 분포의 변화에 따라 이음부 강성비별 라이닝 세그먼트에 발생한 휨모멘트와 변위를 보여주고 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 측벽부의 휨모멘트는 이음부의 강성이 작은 $\lambda = 0.01$ 인 경우를 제외하고는 이음부 분할 분포에 관계없이 서로 근사한 크기로 나타났다.

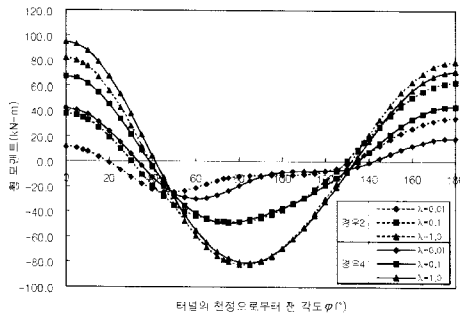


그림 5 이음부 분할 분포 변화에 따른 휨모멘트

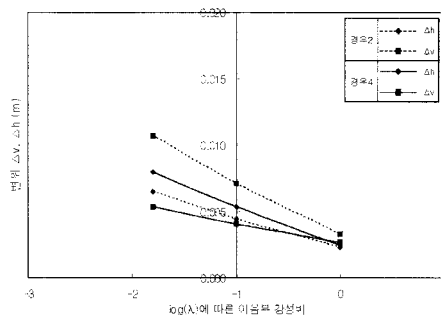


그림 6 이음부 분할 분포 변화에 따른 수평·수직변위

그림 6에서 보는 바와 같이 수평변위는 수직변위에 비하여 이음부의 분할 분포에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 천정부와 바닥부의 휨모멘트 및 천정부 수직변위는 이음부의 분할 분포에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4.3 이음부 분할 개수의 영향

이음부 분할 개수가 라이닝 세그먼트의 휨모멘트와 변위에 미치는 영향은 표 2의 경우 3과 경우 5의 해석조건을 적용하여 알아본다. 경우 3은 라이닝의 반단면을 기준으로 $\varphi = 22.5^\circ, 67.5^\circ, 112.5^\circ, 157.5^\circ$ 에 4개의 이음부를 배치된 경우이고, 경우 5는 3개의 이음부가 $\varphi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 에 있다고 가정된 경우이다.

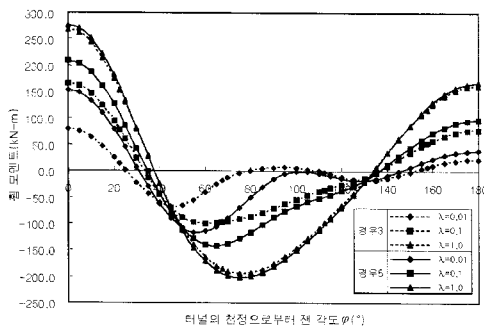


그림 7 이음부 분할 개수에 따른 휨모멘트

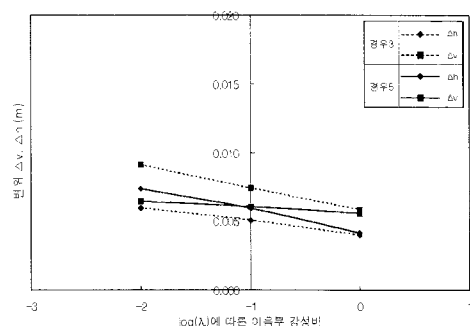


그림 8 이음부 분할 개수에 따른 수평·수직변위

그림 7과 8은 이음부 강성비와 이음부 분할 개수에 따른 라이닝 세그먼트에 발생된 휨모멘트와 변위를 보여 주고 있다.

그림 7에서 보는 바와 같이 휨모멘트는 전체 단면에서 이음부의 강성이 큰 $\lambda=1.0$ 의 경우를 제외하고는 이음부 분할 개수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이음부의 개수가 많을수록 라이닝 세그먼트 강성의 저하로 휨모멘트의 크기가 작게 나타났다. 수직 변위의 경우는 그림 8에서와 같이 이음부의 개수가 많을수록 커졌다. 그러나 이음부 강성이 큰 $\lambda=1.0$ 의 경우는 이음부의 개수에 관계없이 휨모멘트와 변위의 크기가 전체 단면에서 서로 근사한 값을 보이고 있다.

5. 결 론

- 1) 현재 설계실무에서 쉘드터널 라이닝 세그먼트에 적용하고 있는 구조해석 모델들의 적용성 평가를 통해 전주면이음스프링 모델(IR-S0)이 사용의 편이성, 현장조건의 적용성, 해석결과의 정확성 측면에서 현재의 실무여건에서 매우 적절한 모델일 것으로 판단한다.
- 2) 이음부를 갖는 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트는 일정한 크기 이상의 지반강성에서 이음부가 없는 연속체의 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트의 크기에 일정한 비율로 수렴한다.
- 3) 측벽부에 비하여 천정부와 바닥부의 휨모멘트 및 천정부 수직변위는 이음부의 분할분포에 따라 큰 영향을 받는다. 특히, 이음부의 강성이 작을수록 그 영향은 더욱 커진다.
- 4) 이음부 강성이 클수록 전체 단면의 휨모멘트와 변위에 미치는 이음부 개수에 영향은 크지 않다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술 C01)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 삼보 (2003) 분당선 연장선 구조계산서, pp.248.
서울지하철 (2003) 서울지하철 7호선 연장(온수~부평구청) 703공구 구조계산서, pp.193.
에스코 (2003) 분당선 연장선 구조계산서, pp.250.
(주)마이다스아이티 (2005) MIDAS/CIVIL, (주)마이다스아이티.
Lee, K.M., X.Y., Hou, X.W., Ge., Y., Tang. (2001a) An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 25, No. 4, pp.365~390.
Lee, K.M., X.W., Ge. (2001b) The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure, *Can. Geotech. J.*, Vol. 38, No. 3, pp.461~483.