

이음부 강성계수가 세그먼트 설계에 미치는 영향

최우용¹ · 박종덕² · 이석원^{3*}

¹비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사

²비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사

³정회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 교수

Influence of the joint stiffness on the segment design

Woo-Yong Choi¹, Jong-Deok Park², Seok-Won Lee^{3*}

¹Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

²Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

³Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Professor

ABSTRACT: The lining of shield TBM tunnel is composed of segments, therefore segment joints are induced by connecting each segment. Segment joint is considered as joint stiffness in the design of TBM tunnel. Depending on the choice among the different stiffness equations, the joint stiffness values determined can be varied largely. Therefore, the influence of joint stiffness value on the design of segment lining should be verified. In this study, the joint stiffness values were determined firstly by using various equations and total change boundary was justified. Within the change boundary determined, the member forces were calculated by changing the joint stiffness through the numerical analysis and consequently the stability of segment lining was investigated by applying nominal strength. The results showed that the segment joint stiffness did not affect the design of segment lining largely.

Keywords: Joint stiffness, Segment joint, Shield TBM, Segment lining

초 록: 실드 TBM 터널의 라이닝은 세그먼트로 구성되므로, 각각의 세그먼트가 서로 연결되면서 세그먼트 이음부를 발생시킨다. 세그먼트 이음부는 실드 TBM 설계에 있어 강성계수로 적용되어지는데, 세그먼트 이음부 강성계수는 그 결정 방법에 따라 결과 값이 현저한 차이를 보인다. 따라서 서로 다른 강성계수를 설계에 적용하였을 경우 그 결과가 어떻게 다른지에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 세그먼트 이음부 강성계수를 이론식을 통해 결정한 후 일정한 범위를 선정하였다. 그 범위 내에서 강성계수를 변화해 가며 터널 단면 수치해석을 실시하여 세그먼트 라이닝 부재력을 도출하였고, 이에 강도설계법을 적용하여 세그먼트 라이닝 안정성 검토를 실시하였다. 그 결과 세그먼트 이음부 강성계수는 세그먼트 라이닝 설계에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

주요어: 이음부 강성계수, 세그먼트 이음부, 실드 TBM, 세그먼트 라이닝

1. 서 론

최근 국내에 도심지 터널 굴착 및 초장대 터널 굴착이 증가 하면서, 이러한 현장에 적합한 터널 굴착 공법으로 실드 TBM 공법을 선정하는 빈도가 잦아지고 있다. 또한 실드 TBM 관련 연구도 크게 증가하고

있다(Moon et al., 2013; Lee et al., 2013; Kim et al., 2013). 실드 TBM 터널의 경우 그 라이닝이 콘크리트 세그먼트로 이루어져 있고, 이를 각각 연결하여 터널 라이닝을 완성하게 되므로 반드시 이음부가 발생하게 된다. 이러한 세그먼트 이음부는 세그먼트 본체와 마찬가지로 실드 TBM 터널 구조물을 이루고 있는 요소이므로 역학적인 관점에서 외부 작용 하중에 대해 안정성을 띠어야 한다. 이를 해석하는 과정에서 세그먼트 이음부는 세그먼트 본체와는 다르게 취급되어야 할 것이며, 현재 국내의 실드 TBM 터널

*Corresponding author: Seok-Won Lee

E-mail: swlee@konkuk.ac.kr

Received January 6, 2014; Revised January 17, 2014;

Accepted January 23, 2014

설계에 있어서 세그먼트 이음부는 하나의 강성계수로써 나타내어진다.

이음부 강성계수의 종류에는 전단강성계수와 회전강성계수가 있다. 전단강성계수는 링 간 이음부를 모델링 할 때 사용되는 값이며 현재 국내에서는 이론식을 통해 산정하거나 일본에서 통용되는 관용값을 사용한다. 회전강성계수는 세그먼트 간 이음부를 모델링 할 때 사용되는 값이며 주로 이론식을 통해 산정된다. 이러한 이론식은 일반적으로 알려진 것만 세 가지이며, 실물 실험을 통해 회전강성을 얻어낸 연구 사례도 있다(Teachavorasinskun and Chub-uppakam, 2010). 이와 같이 이음부 강성계수는 그 결정 방법이 여러 가지이고 그에 따른 강성계수들의 값은 서로 다르며, 그 차이의 범위는 상당히 넓게 형성된다. 이는 어떤 강성계수 값을 사용하느냐에 따라 터널 설계가 정확히 이루어진 것인지 판단하기 어렵다 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정확한 세그먼트 이음부 강성계수의 결정과 함께 강성계수 변화에 따른 설계 검토가 필요하다.

본 연구에서는 여러 가지 이론적 방법을 통해 다수의 세그먼트 이음부 강성계수 값을 얻었고, 이를 토대로 그 변화 범위를 설정하였다. 이 변화 범위 안에서 세그먼트 이음부 강성계수를 변수로 하여 터널 단면 수치해석을 실시하였고, 이를 통해 세그먼트 이음부 강성계수의 변화가 세그먼트 라이닝 안정성에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 세그먼트 이음부 강성계수

2.1 이음부 강성계수의 종류

세그먼트 이음부는 Fig. 1에 나타나 있듯이 세그먼트 간 이음부와 링 간 이음부로 나뉜다. 쉴드 TBM 터널은 세그먼트로 이루어진 링이 종방향으로 연결되어 이루어지는데, 세그먼트끼리 링을 형성할 때 발생하는 이음부가 세그먼트 간 이음부이고 이 링들이 서로 연결될 때 발생하는 이음부가 링 간 이음부이다.

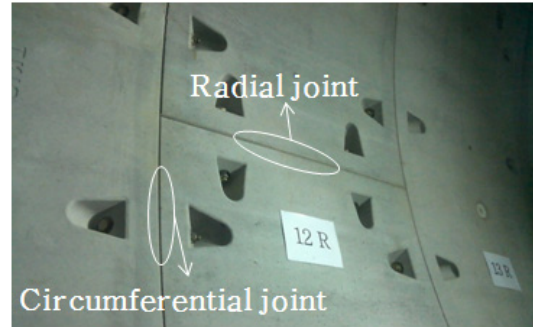


Fig. 1. Segment joints of the shield TBM tunnel

링 간 이음부에는 외부 하중 조건에 의해 주로 전단력이 발생하므로 링 간 이음부 강성계수는 전단강성계수로 나타내며 단위는 kN/m이다. 전단강성계수는 반경방향과 접선방향으로 나누어지며, 해석 방법에 따라 반경방향 전단강성계수만 사용되기도 하고 두 가지 모두 사용되기도 한다. 반경방향 전단강성계수는 식 (1)과 같이 산정된다.

$$K_s = \frac{P}{\delta} = \frac{P}{\frac{F_s(2b)^3}{192EI}} = \frac{192EI}{8b^3} = \frac{24EI}{b^3} \quad (1)$$

여기서, P : 전단하중(반경방향)
 δ : 수직변위
 b : 세그먼트 폭
 E : 콘크리트 탄성계수

I : $\frac{L_j h^3}{12}$ (L_j : 터널 축방향 이음간격)
 h : 세그먼트 높이)

접선방향 전단강성계수는 식 (2)와 같이 산정된다.

$$K_{st} = \frac{F_s}{\delta} = \frac{\tau L_j h}{\gamma b} = \frac{L_j h G}{b} = \frac{L_j h E_c}{2b(1+\nu)} \quad (2)$$

여기서, F_s : 전단하중(접선방향)
 δ : 전단변위

- τ : 접선방향 전단응력
- L_j : 터널 축방향이음간격
- h : 세그먼트 높이
- Υ : 전단 변형률
- b : 세그먼트 폭
- G : 전단탄성계수
- E_c : 콘크리트 탄성계수
- ν : 포아송비

① Closed 조건 ($M \leq \frac{N\ell_t}{6}$ 일 경우)

$$K_r = \frac{M}{\phi} = \frac{E_c b \ell_t^2}{12} \quad (3)$$

② Opened 조건 ($M > \frac{N\ell_t}{6}$ 일 경우)

$$K_r = \frac{M}{\phi} = \frac{9b\ell_t E_c M (\frac{2M}{N\ell_t} - 1)^2}{8N} \quad (4)$$

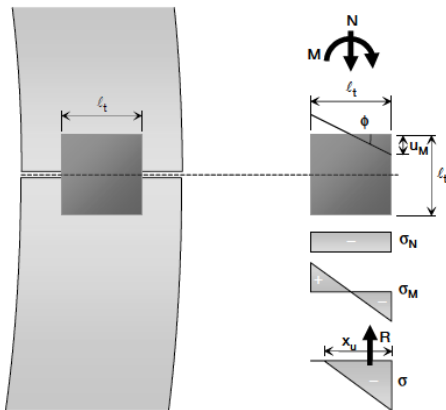
여기서 터널 축 방향 이음간격(L_j)은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 터널 단면 수치해석 모델에서의 링 간 이음부 끼리의 간격을 말한다.

세그먼트 간 이음부에는 주로 휨모멘트가 발생하며 이에 따라 회전강성계수로 나타내고, 그 단위는 kN·m/rad이다. 회전강성계수는 일반적으로 Janssen 식 (1983), Leonhardt 식, 토목구조물 설계 표준동해설식의 세 가지 중에서 한 개를 선택하여 산정하고 있다.

Janssen 식은 세그먼트 간 이음부는 선형 탄성 재료이며 이음부는 서로 완전히 맞닿아 있다고 가정한다. 맞닿아 있는 길이는 l 이며 이를 한 변으로 하는 정사각형을 Janssen joint로 정의하였다. Janssen 식은 이음부의 회전에 따라 식 (3)과 같은 Opened 조건과 식 (4)와 같은 Closed 조건으로 나뉜다. Janssen joint의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

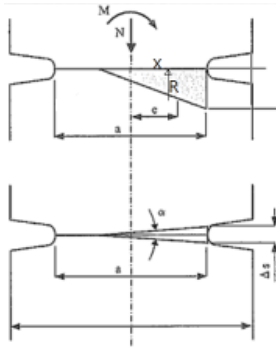
- 여기서, E_c : Modulus of elasticity
- b : Segment width

Leonhardt 식의 경우 Janssen joint를 기본으로 한다. 차이점은 이음부 접촉 길이를 세그먼트 장부 폭으로 보며, 이음부에 작용하는 축력과 휨모멘트로 인한 편심에 따라 회전강성 값이 변화한다. Leonhardt 이론식의 개념도를 Fig. 3에 나타내었고, 그 식은 식 (5)와 같다.



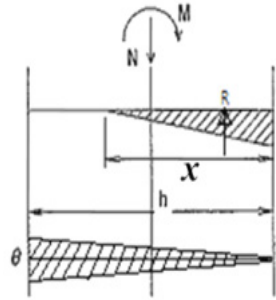
- l_t : Height and width of the contact area
- M : Bending moment
- N : Normal ring force
- R : Reaction force
- u_M : Displacement at edge of the Janssen beam by the bending moment
- x_u : Height of the contact area still subjected to a compressive stress
- σ_M : Stress by bending moment
- σ_N : Stress by normal force
- σ : $\sigma_M + \sigma_N$
- ϕ : Rotation in the Janssen joint

Fig. 2. Janssen joint (Groeneweg, 2007)



- M: Bending moment
- N: Axial force
- x: Height of the contact area still subjected to a compressive stress
- a: Segment contact height
- e: Eccentric distance
- α : Angle of rotation
- ΔS : Displacement
- R: Resultant force of stress

Fig. 3. Leonhardt equation (JSCE, 2010)



- M: Bending moment
- N: Axial force
- x: Height of the contact area still subjected to a compressive stress
- h: Segment height
- θ : Angle of rotation
- R: Resultant force of stress

Fig. 4. Civil structural design standards · commentary equation (JSCE, 2010)

$$K_{\theta} = \frac{9ba^2 E_c M \left(\frac{2M}{Na} - 1 \right)^2}{8Na} = \frac{9ba^2 E_c m (2m - 1)^2}{8} \quad (5)$$

$$= \left(9 \times \frac{a^2 b E_c}{8} \right) m (1 - 2m)^2$$

여기서, b : Segment width

E_c : Modulus of elasticity

$$m = \frac{M}{Na} = \frac{e}{a} \quad (\text{load eccentricity rate})$$

토목구조물 설계 표준동해설 식도 마찬가지로 Janssen joint와 기본 개념이 같다. 서로 다른 점은 t 대신 이음부 회전으로 인해 발생하는 압축영역을 직접 계산하여 적용한다. 그 개념도를 Fig 4에 나타내었고, 그 식은 식 (6)과 같다.

$$K_m = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h - 2x)bE_c}{24} \quad (6)$$

여기서, b : Segment width

E_c : Modulus of elasticity

$$x = \frac{nA_b}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{nA_b}} \right)$$

d : Effective depth

A_b : Bolt cross section

n : Young's modulus ratio

2.2 세그먼트 이음부 강성계수 산정

본 연구에서는 기존에 수행되었던 실제 실험 TBM 설계 자료들을 이용하여 앞서 소개한 이론식들을 통해 세그먼트 이음부 강성계수를 계산하였다. 계산에 사용된 자료들은 총 5가지이며, 각각의 제원은 Table 1과

Table 1. Segment properties

Properties	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Modulus of elasticity (kN/m ²)	3.60×10 ⁷	3.35×10 ⁷	3.50×10 ⁷	3.19×10 ⁷	3.62×10 ⁷
Segment height (m)	0.34	0.35	0.35	0.35	0.30
Segment width (m)	2.0	1.0	2.0	1.2	1.6
Geometrical moment of inertia (m ⁴)	0.0033	0.0036	0.0036	0.0036	0.0023
Poisson's ratio	0.180	0.180	0.180	0.180	0.167
Axial direction joint spacing, L _j (m)	1.000	1.000	1.000	1.000	0.931
Axial force (kN)	21,214	3,848	28,442	21,214	21,214
Bending moment (kN·m)	1,806	1,000	2,607	1,806	1,806
Segment contact height (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
load eccentricity rate	0.426	0.130	0.458	0.426	0.426
Height of the contact area still subjected to a compressive stress (m)	0.027	0.038	0.028	0.036	0.028

Table 2. Shear stiffness value

	Shear stiffness (kN/m)	
	Radial direction	Tangential direction
Case 1	353,736	2,593,220
Case 2	2,872,625	4,968,220
Case 3	375,156	2,595,339
Case 4	1,584,390	3,945,904
Case 5	447,246	2,707,439
Total range	350,000 ~ 2,900,000	2,500,000 ~ 5,000,000

Table 3. Rotation stiffness value

	Formula	Rotation stiffness (kN·m/rad)
Case 1	Janssen	584,420
	Leonhardt	30,543
	Civil structural design standards-commentary	77,772
Case 2	Janssen	806,340
	Leonhardt	107,301
	Civil structural design standards-commentary	52,181
Case 3	Janssen	572,910
	Leonhardt	10,025
	Civil structural design standards-commentary	80,097
Case 4	Janssen	338,740
	Leonhardt	16,253
	Civil structural design standards-commentary	56,508
Case 5	Janssen	311,310
	Leonhardt	24,570
	Civil structural design standards-commentary	56,366
Total range		10,000 ~ 810,000 kN·m/rad

같다.

Table 1과 같은 제원을 이용하여 이론식을 통해 계산된 전단강성계수 산정 값과 그 범위를 Table 2에 나타내었다.

Table 1과 같은 제원을 이용하여 이론식을 통해 계산된 회전강성계수 산정 값과 그 범위를 Table 3에 나타내었다.

3. 수치해석

본 연구에서는 이론적 방법으로 결정한 세그먼트 이음부 강성계수를 이용하여 터널 단면 수치해석을 실시하였다. 세그먼트 이음부 강성계수를 변수로 두어 앞서 제시한 세그먼트 이음부 강성계수 변화 범위 내에서 수치해석을 실시함으로써, 세그먼트 이음부 강성계수의 변화가 세그먼트 라이닝 안정성에 영향을 미치는지 알아보았다. 해석 프로그램은 SAP2000을 사용하였다.

3.1 수치해석 모델

해석 모델은 국내에서 주로 사용되고 있는 밤스프링 모델을 사용하였다. 밤스프링 모델은 빔 요소와 스프링 요소로 쉴드 TBM 터널 단면을 모델링 하는 방법으로 세그먼트 이음부를 모두 모델링 할 수 있는

장점이 있다. 링을 몇 개로 모델링 하느냐에 따라 1링 모델, 2링 모델로 나뉘는데, 본 연구에서는 링 간 이음부와 세그먼트 간 이음부 모두를 고려해야 하므로 2링 모델을 선택하였다. 2링 모델은 두개의 링을 모델링 하므로 실제 시공과 같은 링의 지그재그 조립 패턴을 모사할 수 있고, 모든 이음부 강성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 반면에 정확하지 못한 이음부 강성을 적용할 경우 오히려 해석 결과의 신뢰도가 떨어지므로 유의해야한다.

대상 터널 단면은 외경 7.77m, 내경 7.07m의 원형 단면이며 모델링은 그 평균값을 직경으로 하여 모델링 하였다. 세그먼트 간 이음부는 회전스프링으로, 링 간 이음부는 전단스프링으로 모델링 하였으며 세그먼트 본체는 빔 요소로, 지반반력은 지반스프링으로 모델링 하였다. 링은 6개의 세그먼트와 1개의 키 세그먼트로 구성하였다. 이 때 링을 구성하는 절점의 개수는 최대한 원을 표현하기 위하여 57개로 하였다. 여기서 각 절점의 터널 반경 방향 간격이 터널 축방향 이음간격(L_j)이 된다. 모델링 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

3.2 수치해석 조건

3.2.1 지반 조건

지반 조건은 점토 지반과 풍화토 지반에 대해 각각

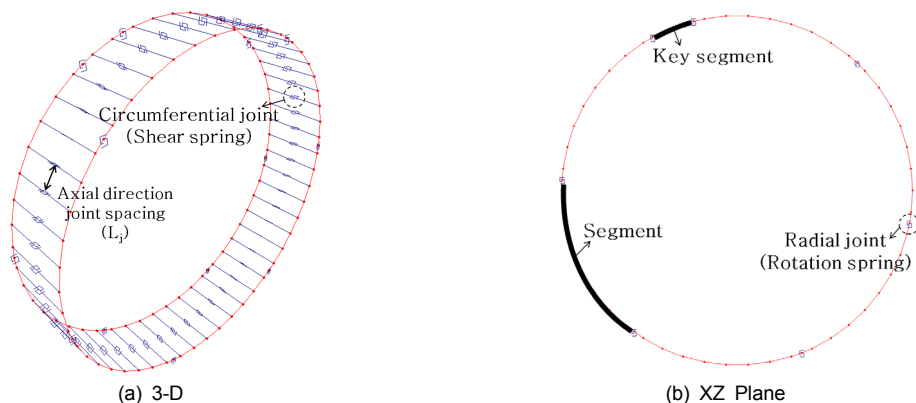


Fig. 5. Beam-Spring model (2 Ring)

Table 4. Soil properties

	N value	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (deg)	Poisson's ratio	Coefficient of lateral pressure
Clay	4	15	12	10	0.4	0.6
Weathered Soil	30	18	0	30	0.4	0.45

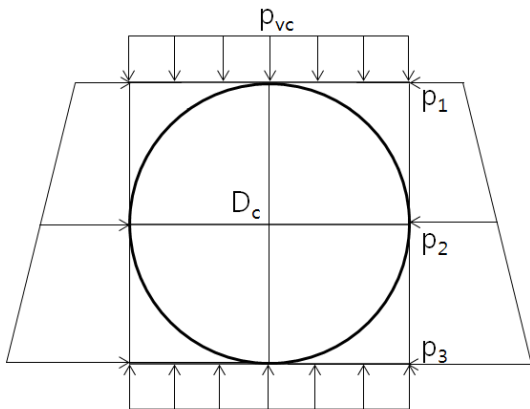


Fig. 6. Earth pressure mode

모델링 하였다. 각 지반 정수의 선정 근거는 여러 지반조사보고서와 토목구조물 설계 표준동해설 실드 터널편(2000)을 토대로 하였다. 최종 결정된 지반 정수를 Table 4에 나타내었다.

3.2.2 하중 조건

하중 산정의 근거는 토목구조물 설계 표준동해설 실드 터널편(2000)을 기준으로 하였다. 하중 종류는 상부연직토압, 하부연직토압, 수평토압, 지반반력, 자중으로 하였다. 세그먼트 이음부의 영향을 고려하는 것이 목적이므로 하중의 종류 및 형태는 최대한 단순화 하였다. 하부연직토압은 작용반작용의 법칙을 따른다고 가정하여 상부연직토압과 같게 하였다. 점토의 상부연직토압의 경우 N값이 4이기 때문에 전체 토피의 토압인 γH 으로 적용하였고, 풍화토의 경우는 Terzaghi의 이완 토압을 적용하였다. 수평토압의 기본 개념은 상부연직토압에 측압계수를 곱한 것이며 최상단(p_1), 스프링라인(p_2), 최하단(p_3)으로 나누어 사다리꼴을 이루게 하였다. 스프링라인의 수평토압은 이

곳에 가상의 이완토압이 연직방향으로 작용한다고 가정하여 계산한 후 측압계수를 곱해준 값이다. 최하단의 수평토압은 기하학적으로 사다리꼴을 만족하도록 계산하여 산정하였다. 측압계수는 Table 4의 값을 사용하였다. 적용 토압 모델을 Fig. 6에 나타내었다. 본 모델링에 적용된 토피고, H는 지표면으로부터 터널 천단부까지의 거리가 19m이다.

지반반력은 뒷채움 주입과 주변 지반의 2층 변형 특성을 고려한 Muir Wood (1975)의 이론해를 사용하였다. 자중은 프로그램 상에서 자동으로 고려 되도록 설정하였다. 하중 산정에 사용한 식들을 Table 5에 나타내었고, 이 식들을 이용한 지반 조건 별 하중 산정 결과를 Table 6에 나타내었다.

3.2.3 세그먼트 제원 및 이음부

본 수치해석에 모델링 된 세그먼트 라이닝의 단면은 본 연구에서 수집한 기존 설계서 및 자료를 바탕으로 선정하였으며, 세그먼트 폭 1.5m, 높이 0.35m이고 그 제원은 Table 7과 같다.

세그먼트 이음부의 경우 2절의 내용을 바탕으로 회전강성계수의 경우 10,000 ~ 900,000 kN·m/rad의 범위 안에서 변화해가며 해석을 실시하였고, 전단강성계수의 경우 10,000 ~ 5,000,000 kN/m의 범위로 변화시켜가며 해석을 실시하였다. 회전강성계수를 변화시킬 때에는 전단강성계수를 고정시켰으며 전단강성계수를 변화시킬 때에는 회전강성계수를 고정시켰다. 각각의 고정 값은 이론식을 통해 계산한 강성계수를 사용하였고, 그 값은 전단강성계수의 경우 378,794 kN/m (반경방향), 2,898,933 kN/m (접선방향)이며 회전강성계수의 경우 73,708 kN·m/rad이다.

Table 5. Formulas for load calculation

Vertical earth pressure (Upper=Lower)	
Clay	$\gamma \cdot H$
Weathered Soil	$p_{ve} = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}) + p_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}$ $B_1 = \frac{D_c}{2} \cot\left(\frac{45^\circ + \phi/2}{2}\right)$
Lateral earth pressure	
Clay	$p1 = \lambda \cdot p_{ve}, p2 = \lambda \cdot p_{vs}, p3 = 2 \lambda \cdot p_{vs} - \lambda \cdot p_{ve}$
Weathered Soil	$p_{vs} = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot R/B_1}) + p_{ve}$
Coefficient of subgrade reaction	
Clay	$K_r = \frac{3E_0}{(1 + \nu)(5 - 6\nu)R_c}$
Weathered Soil	
Self weight	
Clay	Automatically considered in the program
Weathered Soil	

p_{ve} : Relaxed earth pressure on upper side (kN/m²)

p_{vs} : Relaxed earth pressure on the spring line (kN/m²)

p_0 : Surface load (kN/m²)

K_0 : The ratio of horizontal earth pressure and vertical earth pressure

λ : Coefficient of lateral pressure

ϕ : Soil friction angle (°)

γ : Soil unit weight (kN/m³)

c : Soil Cohesion (kN/m²)

$2B_1$: Relaxation width of upper side (m)

H : Soil depth (m)

D_c : Diameter of segment center line (m)

R_c : Radius of segment center line (m)

E_0 : Converted modulus of deformation with considered backfill injection stiffness

ν : Poisson's ratio

Table 6. Applied loads

	Vertical earth pressure (Upper=Lower) (kN/m ²)	Lateral earth pressure (kN/m ²)			Coefficient of subgrade reaction (kN/joint)
		p1	p2	p3	
Clay	285	171.00	205.97	240.93	1,816
Weathered Soil	164	73.80	99.36	124.91	1,816

Table 7. Segment lining specification

	Con`c unit weight (kN/m ³)	Con`c modulus of elasticity (MPa)	Con`c poisson`s ratio	Con`c compressive Strength (MPa)	Steel yield strength (MPa)
Value	25	31,928	0.2	45	400

3.3 수치해석 결과

수치해석 결과를 각 강성계수 변화에 따른 세그먼트 라이닝 부재력 변화로 나타내었다. 세그먼트 라이닝 부재력은 축력, 전단력, 휨모멘트로 구분하여 Figs. 7~9에 각각 나타내었다.

전체적인 관점으로 볼 때 전단강성계수가 변화할

경우와 회전강성계수가 변화할 경우 그래프 양상이 서로 반대이다. 또한 풍화토 지반과 점토 지반에서 작용하중 차이로 인한 부재력 차이를 제외하면 그 경향은 거의 동일하게 나타났다. 변화하는 강성계수에 따라 세그먼트 라이닝 부재력의 변화 경향이 달라지는 이유는 링 간 이음부와 세그먼트 간 이음부의 차이로 인한 결과로 판단된다. 일반적으로 링 간 이음

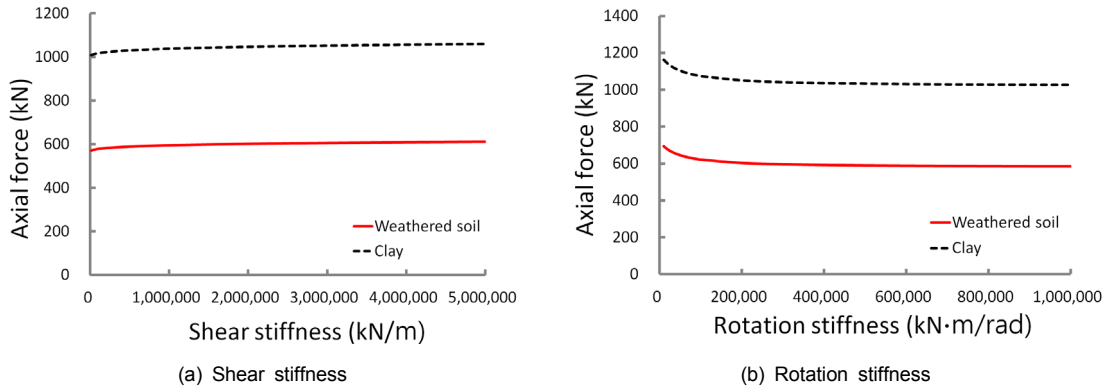


Fig. 7. Variation of the axial member force by the joint stiffness

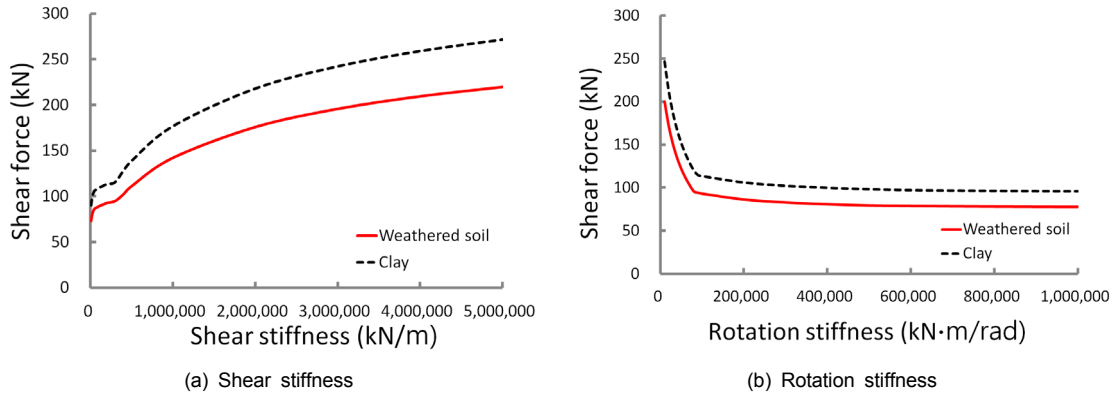


Fig. 8. Variation of the shear member force by the joint stiffness

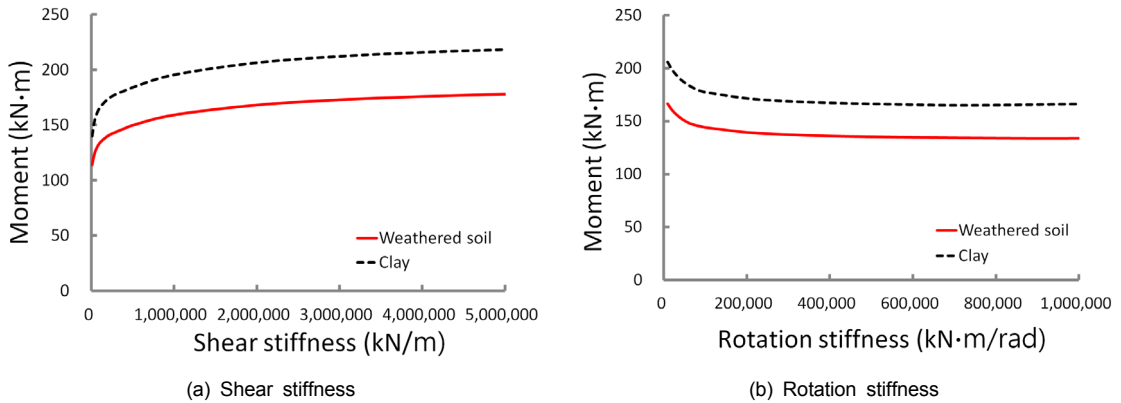


Fig. 9. Variation of the moment member force by the joint stiffness

부는 인접한 링에 응력을 전달하는 역할을 하고 세그먼트 간 이음부는 하나의 폐합된 링을 구성하는 역할로써 세그먼트 간 이음부가 응력을 직접 분담하는

것으로 알려져 있다. 이러한 사실에 근거하여, 전단강성계수가 증가 한다는 것은 링 간 이음부의 응력 전달 능력이 커지는 것이고 이로 인하여 세그먼트 라이닝

부재력이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 회전강성 계수가 증가 한다는 것은 세그먼트 간 이음부의 응력 분담 능력이 커지는 것이고 이로 인하여 세그먼트 라이닝 부재력이 감소하는 것으로 판단된다.

전단강성계수의 경우 부재력 종류에 상관없이 10,000 ~ 100,000 kN/m 영역에서 부재력이 증가하며 그 이후로는 일정하게 수렴하는 양상을 띤다. 이론식을 통해 전단강성계수를 산정할 경우 수렴한 영역에 해당하게 된다. 회전강성계수의 경우 부재력 종류에 상관없이 10,000 ~ 100,000 kNm/rad 영역에서 부재력이 감소하며 그 이후로는 일정하게 수렴하게 된다.

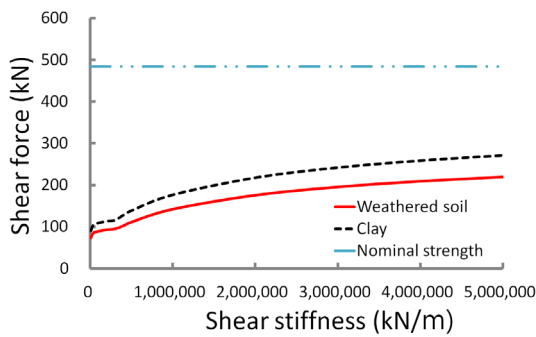
Leonhardt 식 및 토목구조물 설계 표준동해설 식을 통해 회전강성계수를 산정할 경우 이에 해당하고, Janssen 식을 통해 회전강성계수를 산정 할 경우 수렴한 이후 영역에 해당한다.

4. 세그먼트 라이닝 안정성 검토

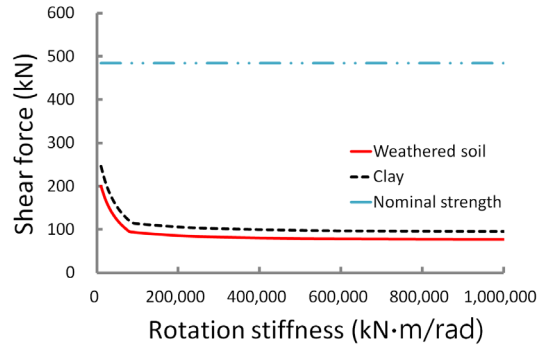
본 연구에서는 수치해석 결과를 강도설계법에 따른 공칭강도와 비교하여 각 강성계수의 변화 범위 내에서 세그먼트 라이닝의 안정성을 축력, 전단력, 휨모멘트에 대하여 검토하였다. 공칭강도 계산에 사용된 세

Table 8. Segment lining nominal strength

	ϕP_n	ϕV_n	ϕM_n
Value	14,127 kN	484 kN	292 kN·m

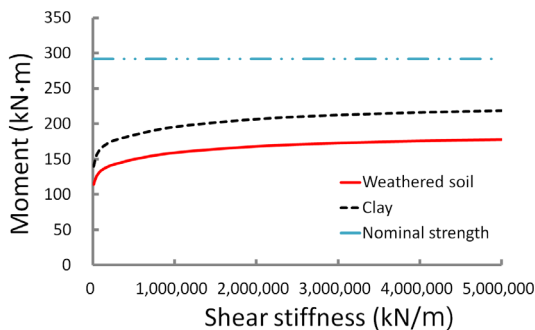


(a) Shear stiffness

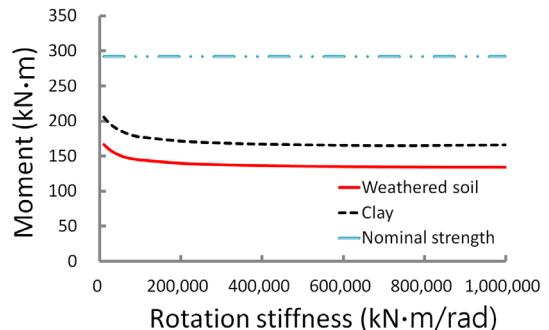


(b) Rotation stiffness

Fig. 10. Shear force of segment lining by the joint stiffness



(a) Shear stiffness



(b) Rotation stiffness

Fig. 11. Moment of segment lining by the joint stiffness

그먼트 단면은 3.2.3절에서 소개한 수치해석 모델에 사용된 콘크리트 재원을 이용하였고, 사용 철근량은 인장철근과 압축철근 모두 직경 19mm 철근을 10개씩 1단으로 배열하였고 전단철근의 경우 직경 16mm 철근을 450mm 간격으로 배근하였다. 강도감소계수는 축력의 경우 축방향 압축부재에 사용하는 0.65를 사용했고 휨모멘트의 경우는 일반적인 휨부재에 적용되는 0.85를 사용하였다. 전단의 경우 세그먼트의 전단 철근 간격이 최소 전단 철근 간격을 만족하지 못하는 것으로 나타나 일반적인 0.75 보다 좀 더 과소평가한 0.70을 사용하였다. 최종적인 세그먼트 라이닝 공칭 강도를 Table 8에 나타내었다.

전단력과 휨모멘트의 수치해석 결과와 공칭강도를 비교한 결과를 Figs. 10~11에 각각 나타내었다. 축력의 경우 공칭강도가 수치해석 결과에 비해 월등히 크므로 따로 제시하지 않았다.

각 강성계수의 검토 범위 내에서 세그먼트 라이닝의 부재력은 공칭강도 이내인 것으로 나타났다. 따라서 전단강성계수와 회전강성계수는 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 라이닝 안정성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 단, 본 논문의 연구결과는 가정된 2가지 지반조건 및 1가지 터널 단면에서 유도된 결과이다. 따라서 단면 조건 및 지반조건이 크게 변화할 경우에는 그 결과가 다를 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 쉴드 TBM 터널 설계 단계에서 세그먼트 이음부 강성계수의 산정 방법이 달라짐에 따라 세그먼트 라이닝 설계에 영향을 미치는지를 수치해석적 방법을 통해 알아보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 세그먼트 이음부 강성계수는 산정 방법에 따라 다양한 값이 산정되므로 그 사용에 주의가 필요하다고 판단된다.

2. 전단강성계수가 증가 할수록 세그먼트 라이닝 부재력은 증가하고, 회전강성계수가 증가 할수록 세그먼트 라이닝 부재력은 감소하는 경향을 나타냈다.
3. 전단강성계수의 경우 100,000 kN/m, 회전강성계수의 경우 100,000 kNm/rad 이상부터는 부재력이 더 이상 변화하지 않고 일정하게 수렴하는 양상을 띠었다.
4. 세그먼트 라이닝 부재력과 강도설계법에 의한 세그먼트 라이닝의 공칭강도를 비교해본 결과, 세그먼트 라이닝 안정성에 큰 문제가 없었고, 따라서 세그먼트 이음부 강성계수는 쉴드 TBM 터널 설계에 있어 크게 영향을 미치는 요소가 아닌 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 세그먼트 라이닝 이음부 성능평가 기법개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Groeneweg, T.W. (2007), “Shield driven tunnels in ultra high strength concrete”, Mater thesis, Delft University of Technology.
2. Janssen, P. (1983), “Tragverhalten von tunnelausbauten mit gelenktubbings”, Ph.D. Thesis, Technischen Universitat Carolo-Wilhelmina.
3. JSCE (2010), “Segment design(Revision)-To limit state design method from the allowable stress design method”, Maruzen.
4. Kim, S.H., Kim, W.K., Lee, H.Y. (2013), “Effect of segment thickness during shield TBM tunnelling in case study”, J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 311-320.

5. Lee, G.P., Bae, G.J., Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H. (2013), "Evaluation of steel fiber reinforcement effect in segment lining by full scale bending test", J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 215-223.
6. Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H., Lee G.P., Bae, G.J. (2013), "Flexural performance evaluation of SFRC with design strength of 60 MPa", J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 175-186.
7. Muir Wood, A.M. (1975), "The circular tunnel in elastic ground", Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.
8. RTRI, (2000), "Civil structural design standards-commentary", Sciencebook.
9. Teachavorasinskun, S., Chub-uppakarn T. (2010), "Influence of segmental joints on tunnel lining", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, No. 4, pp. 490-494.