

한계상태설계법-AASHTO LRFD를 적용한 실드터널 세그먼트 라이닝의 구조해석 영향인자 평가

김양운¹ · 김홍문^{2*} · 김현수³ · 이성원⁴

¹정회원, (주)평화엔지니어링 지반부 부장

²정회원, (주)평화엔지니어링 지반부 전무

³비회원, (주)평화엔지니어링 지반부 이사

⁴정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구위원

An evaluation of influence factors based on the limit state design-AASHTO LRFD for structural analysis of shield tunnel segment lining

Yang-Woon Kim¹ · Hong-Moon Kim^{2*} · Hyun-Su Kim³ · Seong-Won Lee⁴

¹General Manager, Dept. of Geotechnical Engr., Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

²Executive Director, Dept. of Geotechnical Engr., Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

³Director, Dept. of Geotechnical Engr., Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

⁴Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Hong-Moon Kim, iguakim@naver.com

Abstract

Recently, the limit state design method in the design of the structure is in global trend, but it is limited to a few structures in Korea. Since the introduction of the limit state design method has recently been attempted for tunnels, which are the main underground structures, it is surely necessary to understand the latest limit state design method. Therefore, based on the recently published AASHTO LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specification (2017), structural load factors and load combinations were reviewed, and various factors which should be applied for the review of structures have been analyzed. In this study, utility tunnel section and subway tunnel sections used in Korea were analyzed by the limit state design method, and we have analyzed the direction of application of limit state design method through studying the tendency of member force by various influential factors such as ground conditions, load modifier and joint stiffness.

Keywords: Limit state design, AASHTO LRFD, Segment lining, TBM

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(1)99-118(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.099>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 1, 2017

Revised December 18, 2017

Accepted December 26, 2017



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

www.kci.go.kr

초 록

최근 토목구조물의 설계에 있어 한계상태설계법 적용이 세계적인 추세이나, 국내에서는 소수의 구조물에 국한되어 사용되고 있다. 주요 지중구조물인 터널에 대해서는 한계상태설계법의 도입이 근래에 시도되고 있으므로, 최신의 한계상태설계법에 대한 이해가 반드시 필요하다. 본 연구는 최근 발간된 AASHTO LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specification (2017)을 토대로 세그먼트 터널라이닝 설계 시 구조물 하중계수, 하중조합 등을 고찰하고 이외에 구조 검토 시 반영되어야 할 다양한 영향인자에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 국내에 적용되고 있는 전력구, 지하철 터널 단면을 대상으로 한 세그먼트 라이닝의 구조해석을 통하여, 지반조건과 하중수정계수, 이음부 강성조건 등 다양한 영향인자들이 부재력에 미치는 영향을 분석·평가하였다.

주요어: 한계상태설계법, AASHTO LRFD, 세그먼트 라이닝, TBM

1. 서론

최근 국내의 토목기술은 비약적으로 발전해 왔으며, 글로벌 시장에서 세계 유수의 엔지니어들과 경쟁하고 있다. 이에 발맞추어 국내 토목구조물의 설계도 세계적인 추세인 한계상태설계법이 정립되어가고 있다. 하지만 지반 구조물에서는 기초분야에 국한되어 있고, 중요한 지중구조물인 터널은 세그먼트 라이닝에 대해 비로소 도입을 시도하고 있는 실정이다. 해외에서는 AASHTO LRFD, Eurocode, JSCE 등의 기준을 통해 터널 라이닝에 한계상태설계법을 적용(Kim et al., 2014)하고 보완해 나가고 있으며, 이 기준들은 국내 터널 구조물의 한계상태설계법 도입의 참고자료로 활용되고 있다. 최근 발간된 AASHTO LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specification (2017, 이하 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification이라 한다.)은 한계상태설계법을 터널설계에 적용한 첫 기준이며, 이를 상세히 분석하여 활용하면 국내 터널구조물의 한계상태설계법 정착에 많은 참고가 될 것으로 기대된다.

TBM터널에서 세그먼트라이닝의 구조설계모델로는 빔-스프링 모델이 대표적으로 사용되고 있으며, 세그먼트의 이음에 대해서는 회전강성과 환산강성 조건을 이용하여 해석한다. 국내에서는 주로 회전강성을 고려하는 방법을 사용하지만, AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서는 발주자의 요구이외의 조건에서는 환산강성을 고려한 이음부 조건으로 구조 검토할 것을 제시하고 있고, 최근 국내연구(Kim et al., 2017)의 연구에서는 이음부의 회전강성과 환산강성을 고려한 1-링 모델의 구조해석 결과에 큰 차이가 없어 환산강성과 회전강성 조건 모두 사용이 가능한 것으로 분석되었다. 환산강성의 적용은 수치해석과 이론해에 적용이 가능하고 간편하지만, 환산강성에 이용되는 유효관성 모멘트(Muir Wood, 1975)는 조인트의 관성 모멘트 고려 여부와 이음부의 개수에 영향을 받게 되므로 설계자의 판단이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 국내 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계법을 도입하기 위한 연구의 일환으로 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 이음부의 회전강성을 고려한 단면과 환산강성을 고려한 단면에 대해 한계상

태설계법을 적용한 수치 해석을 수행하여 비교·분석하였다. 해석조건은 터널의 크기, 지층조건을 변수로 하고 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에 기초한 하중조합, 하중수정계수를 적용한 구조검토를 수행하여 각 단면에 대한 부재력 비교를 통해 환산강성 적용방법을 제시하고, 더 나아가 한계상태설계법 적용방향을 고찰하고자 한다.

2. AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)의 세그먼트 라이닝 구조검토

최근 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)이 새롭게 발간되면서 기존의 FHWA Technical Manual (2009)을 보완하여 터널 구조물의 한계상태설계법이 정립화되는 시발점이 되었다. 본 장에서는 위 기준의 주요내용을 분석하고 연구의 기본 배경이론에 대해 요약하였다.

2.1 한계상태 방정식

AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에 따르면 터널구조물의 각 구성 요소와 연결부는 별도의 명시가 없는 한 각 한계상태에 대해 식 (1)을 만족해야 하며, LRFD 방법론의 기초가 되는 방정식은 크게 하중수정계수, 하중계수, 하중효과로 구성된 좌항보다 우항의 계수저항이 크도록 설계가 되어야 한다. 사용한계상태(Service Limit State)와 극단한계상태(Extreme Limit State)에서는 저항계수(Resistance Factors) 1.0을 적용한다.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1)$$

여기서, γ_i : 하중계수(Load factor, a multiplier applied to force effects)

ϕ : 저항계수(Resistance factor: a multiplier applied to nominal resistance, as specified herein)

η_i : 하중수정계수(Load modifier, a factor relating to ductility, redundancy, operational classification)

Q_i : 하중 효과(Force effect)

R_n : 공칭저항(Nominal resistance)

R_r : 계수저항(Factored resistance, ϕR_n)

식 (1)의 하중수정계수(η_i)는 연성(Ductility), 여유성(Redundancy)과 운영 분류(Operational classification)로 구성되며, 연성과 여유성은 재료의 물리적인 강도와 관련이 있지만 운영분류 즉, 운영의 중요도는 터널의 폐쇄에 연관되므로 식 (1)은 임의적일 수가 있다. 운영의 중요도의 경우, 국내에서는 고속도로 교량에서 1.00을 적용하도록 하는 논의가 있었으며, AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서는 도로터널의 운

영에 필요한 사항을 잘 알고 있는 담당자가 판단하여 정하도록 제시되어있다. 이는 터널의 운영주체가 정하는 바에 따라 중요도를 선택적으로 반영해야 한다는 의미로 풀이된다.

한편, AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서는 식 (1)의 좌항 즉, 구조물에 작용하는 전체 작용력 효과(Total factored force effect)에 대해서 하중수정계수, 하중계수, 하중효과가 고려되도록 정의하고 있다. 여기서 하중효과는 터널구조물에 작용하는 작용력의 종류로 임시, 영구하중, 상재하중 등이 있으며 상황에 따라 다양하게 변화할 수 있다. 또한 하중계수는 작용력의 종류(작용력의 효과)에 따라 다르게 적용되는 계수로 각각의 극한상태(Limit state)에 따라 다른 계수를 적용하며, AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서 제시한 하중계수와 하중조합은 Table 1과 같다.

Table 1. Load combinations and load factors (AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification, 2017)

Load combination limit state	CR, DC DW, EH ES, EV PI, PS SE, SH	BR, CE IA, IM LL, LS PL	WA Wt	AP	TG	TU	CS	EQ	Use one of these at a time	
									AD FI BL SS	WA _f WA _{tsu}
Strength T-I	γ_p	1.75	1.0	1.0	γ_{TG}	0.5/1.2	-	-	-	-
Strength T-II	γ_p	-	1.0	-	-	-	1.3	-	-	-
Extreme Event T-I	γ_p	0.5	1.0	0.5	-	-	-	1.0	-	-
Extreme Event T-II	γ_p	0.5	1.0	0.5	-	-	-	-	1.0	-
Extreme Event T-III	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1
Service T-I	1.0	1.0	1.0	1.0	γ_{TG}	1.0/1.2	-	-	-	-
Service T-IA	γ_p	-	1.1	-	-	-	-	-	-	-
Service T-II	1.0	-	1.0	-	-	-	1.0	-	-	-
Fatigue T-I LL, IM&IAonly	-	1.5	-	1.1	-	-	-	-	-	-

AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)은 기존의 FHWA Technical Manual (2009)에 제시된 한계상태 보다 구체적으로 한계상태(Strength 2case, Service 3case, Extreme Event 3case, Fatigue 1case)를 분류하였고, 굴착(Mined), TBM (Bored), 침매(Immersed), 개착(Cut-and-cover)등 다양한 터널의 하중상태를 고려하여 각각의 조건에 적합한 하중계수와 하중조합을 제시하고 있다. Table 1에서 1번째열은 터널의 한계상태에 대한 것으로, Strength Limit State (운영중, 공사중), Extreme Event Limit State (홍수, 쓰나미, 화재 등), Service Limit State (일상적인 운영중, 공사중), Fatigue and Fracture Limit State (기계, 환기등의 반복하중)으로 구분된다. 2번째 열은 영구하중(Permanent Loads)이고, 나머지 열은 활하중, 수압, 공기압, 온도하중 등으로 변동하중으로 구성되어 있으며 상세한 사항은 동일 기준서 3장에 설명되어 있다.

2.2 쉴드 세그먼트 라이닝 이음부의 모델링

국내에서 터널 세그먼트 라이닝의 구조검토 시 적용되는 세그먼트 라이닝 모델은 대표적으로 빔-스프링 모델이 사용되고 있으며, 세그먼트의 이음에 대해서는 일본철도종합기술연구소에서 발행한 Design Standard for Railway Structures (Shield tunnel, 2003)의 이음부 강성고려 방법이 주로 사용되고 있다. 이 외에도 이음을 고려하지 않고 동일한 휨강성으로 계산하는 관용법과 이음의 휨강성 저하를 고려한 수정 관용법 등이 제안되거나 사용되어 왔다. 쉴드 터널의 세그먼트 라이닝은 구조해석 시 이음부의 강성 조건의 설정에 따라 라이닝 단면력의 평가가 크게 달라질 수 있다. AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)은 발주자의 요구외에는 터널 세그먼트 라이닝의 구조검토 시 유효관성 모멘트(Effective moment of inertia)의 이용을 제시하고 있으며, 이는 세그먼트 라이닝의 조인트에 의한 라이닝의 강도저하를 고려한 환산강성을 단면검토에 반영하는 것을 의미한다. 유효관성 모멘트는 Muir Wood (1975)의 식으로 산정되며 식 (2)와 같다.

$$I_e = I_j + I_g \left(\frac{4}{n} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, I_e : 유효 관성모멘트(Effective moment of inertia, in^4)

I_j : 조인트 관성모멘트(Movement of inertia of the joint, in^4)

I_g : 라이닝 단면의 총 관성모멘트(Gross moment of inertia of the lining section, in^4)

n: 라이닝 링의 조인트 수(Number of joint in the lining ring)

식 (2)에서 유효 관성모멘트는 조인트의 수와 조인트 관성모멘트의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 조인트의 수는 터널의 크기에 따라 달라지는 변수이며, 조인트 관성모멘트는 보수적인 설계 시 0 (zero)을 취하거나(FHWA-Technical Manual, 2009) 설계자의 판단을 요구하기도 한다. 이를 통해 구해진 유효관성 모멘트는 동일한 두께를 갖는 환산링으로 표현되는데, 조인트 수와 조인트 관성모멘트의 고려여부에 따라 환산링의 두께가 달라진다. 세그먼트 라이닝의 조인트 개수는 터널의 크기에 따라 다르지만, 3.4 m 이하의 경우 5개, 3.5~6.0 m 6개, ..., 7.3~8.3 m 8개 등 비교적 규격화 되어있는 반면, 조인트 관성 모멘트의 고려여부는 설계자의 판단에 따르므로 합리적인 적용방법 제시가 필요하다.

3. 한계상태 설계법-AASHTO LRFD를 적용한 세그먼트 라이닝의 수치해석

본 연구에서는 국내의 쉴드 터널 세그먼트라이닝 설계에 한계상태 설계법을 도입하기 위한 연구의 일환으로 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)을 참조하여 터널 세그먼트 라이닝에 적용할 수 있는 하중조합과 하중계수, 하중수정계수를 반영한 수치해석을 수행하였다. 또한, 선행연구(Kim et al., 2017)에서 이

음부 강성조건에 대해 회전강성과 환산강성 모두 적용 가능한 것으로 분석되었으나, 환산강성은 식 (2)의 관련설 명과 같이 세그먼트 라이닝의 분할수와 조인트 관성모멘트에 영향을 받으므로 환산강성의 적용여부 평가를 위한 추가적인 검토를 수행하였다.

3.1 해석조건

셸드 터널 세그먼트라이닝의 해석은 상용프로그램인 Midas Civil 2017 (v1.6)을 사용하고, 빔-스프링 모델을 이용한 1-링빔을 적용하였다. 지반반력은 탄성 스프링으로 구성된 지반반력 스프링으로 묘사하였으며, 세그먼트 라이닝의 주변지반과 뒤채움 효과를 고려할 수 있는 Muir Wood (1975)의 식을 사용하였다. 1-링빔의 경계조건 과 하중작용에 대한 모델링은 Kim et al. (2017)의 연구를 참조하였다. 또한 터널의 크기에 따라 세그먼트 라이닝 의 분할수가 달라지므로 국내에서 사용되고 있는 크기가 다른 터널 세 가지(Fig. 1)를 변수로 하였다. 세그먼트 이 음부의 강성적용방법은 회전강성(Fig. 2(a))과 환산강성(Fig. 2(b))을 적용하였다.

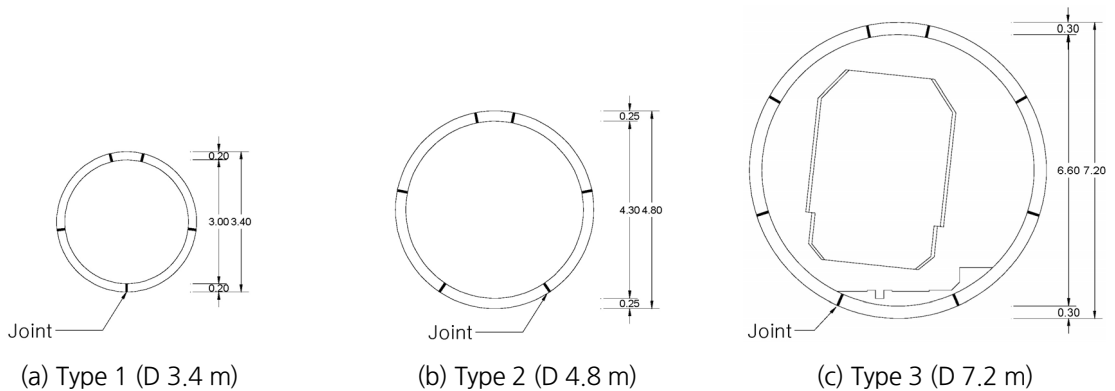


Fig. 1. Dimension of tunnel sections and number of segment joint

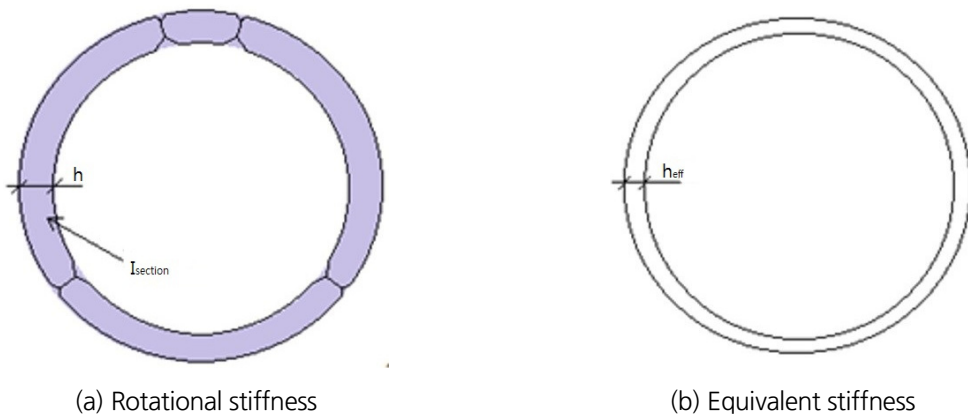


Fig. 2. Consideration of Joint stiffness conditions of segment joint

3.1.1 지반조건

수치해석을 위한 지반조건은 세그먼트 라이닝의 지반반력, 터널 세그먼트 라이닝에 작용하는 토압과 밀접한 관련이 있는데, 특히 토압은 지반 아칭의 고려여부, 암반조건 등에 따라 이완하중을 선택하는 방법도 매우 다양하며 기술자의 판단에 따라 적절히 적용하도록 하고 있다(AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification, 2017). 단, 토피고가 2.0D (D: Tunnel diameter) 이하의 조건인 경우에는 전토피 하중을 적용하는 것을 추천하고 있어, 본 연구에서는 이완하중 산정의 다양성을 피하기 위해 터널 직경의 2.0D에 해당하는 단일지층의 전토피 하중이 적용되도록 하였다. 지하수 조건은 지하수의 유, 무로 분류하고 지하수를 고려해야 하는 경우는 최대 수위가 지표에 작용하는 것으로 가정하였다(Fig. 3). 수치해석에 적용된 각 지반의 물성은 Table 2와 같다.

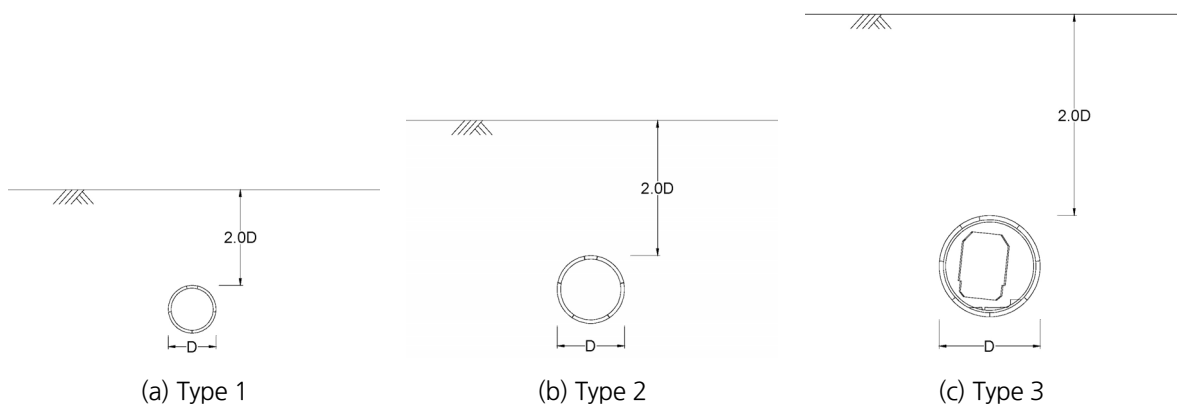


Fig. 3. Geometric condition of each section

Table 2. Material properties of ground

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Poisson's ratio	Elastic modulus (MPa)
Soil	19	20	30	0.33	33
Weathered rock	21	30	30	0.33	100
Weak rock	23	180	34	0.27	350

3.1.2 이음부 강성조건

일반적인 빔-스프링 모델에서 세그먼트간 이음은 회전강성을 적용하거나 환산강성을 적용한다. 이음부의 강성조건을 회전강성으로 할 때 Choi et al. (2014)은 5종류의 회전강성 산정법을 통한 구조해석 시 세그먼트 라이닝의 안정성은 문제가 없는 것으로 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 사용되는 Design Standard for Railway Structures (Shield tunnel, 2003)에서 제안한 방법을 이용하였고, 환산강성의 적용은 Muir Wood (1975)의 식 (2)를 이용하여 적용한다. Table 3과 4는 수치해석에 사용된 단면제원과 이음부 강성을 나타낸다. 이

음부의 강성을 환산강성을 적용할 때에는 세그먼트의 분할, 라이닝의 두께, 이음부의 접촉단면적이 고려되는데, 조인트 관성모멘트 고려여부에 따라 환산되는 단면의 두께가 달라진다(Table 4).

Table 3. Dimensions and mechanical parameters for segment lining

Classification	Diameter (m)	Width (m)	Thickness (m)	Number of joints	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
Type 1	3.4	1.2	0.20	5	42.0	30,500
Type 2	4.8	1.2	0.25	6		
Type 3	7.2	1.2	0.30	8		

Table 4. Results of application of joint stiffness

Classification	Rotational stiffness (kN · m/rad)	Equivalent stiffness (Section thickness, m)	
		$I_j \neq 0$	$I_j = 0$
Type 1	22,959	0.18 (0.20)	0.17 (0.20)
Type 2	32,933	0.21 (0.25)	0.19 (0.25)
Type 3	44,141	0.26 (0.30)	0.19 (0.30)

환산강성 적용 시 조인트 관성모멘트 적용여부에 따라 환산단면의 두께는 직경이 가장 작고 분할수가 적은 Type 1에서 10~14%, 직경이 가장 크고 분할 수가 많은 Type 3은 15~37%의 단면두께 감소가 발생하였다(Table 4). 동일한 Section type에서도 I_j 의 고려여부에 따라 환산단면의 두께는 5.5~27%의 차이를 나타냈다.

3.2 하중계수 및 하중조합

각 터널 단면에 작용하는 하중의 종류는 자중(DC), 연직토압(EV), 수평토압(EH), 수압(WA)로 설정하고, 하중계수 및 하중조합은 Table 1을 이용하였다. 수치해석에 적용한 한계상태는 극한 한계상태(Strength limit state)와 사용 한계상태(Service limit state)의 하중조합을 사용하였으며, 일시적인 하중상태인 Strength T-II, Service T-IA, II를 배제하고 운영중 조건인 Service T-I, Strength T-I를 선정하여 검토하였다. 하중조합을 구성하는 다양한 하중에 대해, 하중계수는 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)의 지침을 따르고 각 하중요소의 최소와 최대값을 모두 고려한 하중조합에 대해 검토하여야 하며, 영구하중인 자중, 토압의 경우도 동일 지침 내에서 선택하여 적용하여야 한다. 이를 조합하면 Table 5와 같은 9가지의 하중조합이 발생하게 된다. 한편, 터널의 중요도가 높고, 기능상실 시 경제적, 사회적 파장이 크고, 대체수단이 없는 경우나 운영자의 결정에 따라서 하중수정계수가 달라지므로 하중계수의 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 일반적인 경우인 1.00과 1.05의 경우를 변수로 하였다. 하중수정계수는 Table 5의 하중조합에 각각 가산하여 계산한다.

Table 5. Load combinations (Load Modifier x1.05)

Load combination		DC	EH	EV	WA
Strength T-I	Comb. 1	1.25 (1.31)	1.35 (1.42)	1.35 (1.42)	1.0 (1.05)
	Comb. 2	1.25 (1.31)	1.35 (1.42)	0.75	1.0 (1.05)
	Comb. 3	1.25 (1.31)	0.9	1.35 (1.42)	1.0 (1.05)
	Comb. 4	1.25 (1.31)	0.9	0.75	1.0 (1.05)
	Comb. 5	0.9	1.35 (1.42)	1.35 (1.42)	1.0 (1.05)
	Comb. 6	0.9	1.35 (1.42)	0.75	1.0 (1.05)
	Comb. 7	0.9	0.9	1.35 (1.42)	1.0 (1.05)
	Comb. 8	0.9	0.9	0.75	1.0 (1.05)
Service T-I	Comb. 9	1.0	1.0	1.0	1.0

3.3 해석 CASE

본 연구에서는 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)을 적용한 쉴드 터널 세그먼트라이닝의 구조해석시, 구조물에 영향을 미치는 영향인자들에 대한 평가를 위해 다양한 조건에 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 세부내용은 3.1~3.2를 참조하고, 해석CASE는 다음 Table 6과 같다.

Table 6. Cases of structural numerical analysis

Classification	Tunnel section	Joint stiffness	Ground condition	Ground water condition	Load combination
CASES	3	3	3	2	16

4. AASHTO LRFD를 적용한 세그먼트 라이닝의 구조해석 결과분석

쉴드 터널 세그먼트라이닝의 구조검토 시 고려해야할 영향인자들에 대한 분석을 위해 최근 발간된 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)을 참조하여 수치해석적 분석을 수행하였다. 수치해석은 상용 프로그램인 Midas Civil 2017을 사용하고 1링뎀 스프링 모델을 적용하였으며, 3.3절의 해석 CASE별 부재력을 비교분석하였다.

4.1 하중조합에 따른 부재력 분석

수치해석 CASE중 터널의 중요도가 일반적인 경우를 가정하여 하중수정계수(η_i) 1.00을 적용하고, 세그먼트 간 이음은 국내에서 많이 사용되고 있는 회전강성 조건에 대해 정리하였다. Fig. 4-6은 터널 주변지반이 토사일 때 터널크기에 따른 하중조합(Load combination)별 최대 부재력을 나타낸 것이다.

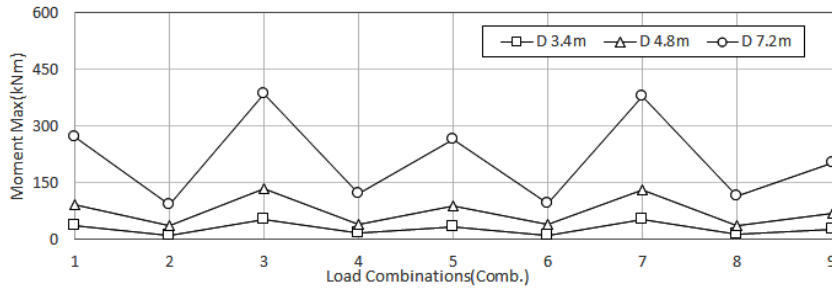


Fig. 4. Bending moment

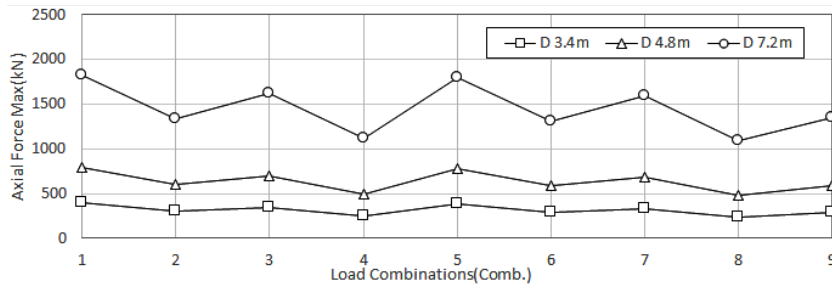


Fig. 5. Axial force

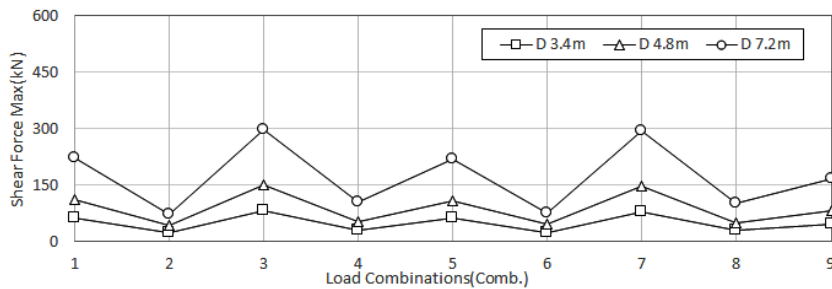


Fig. 6. Shear force

하중조합에 따른 세그먼트 라이닝에 발생하는 최대 모멘트는 모든 단면조건(D 3.4 m, D 4.8 m, D 7.2 m)에서 하중조합 Comb. 3일 때 발생하였다. Comb. 3은 연직토압이 최대(EV max)이고, 수평토압이 최소(EH min)인 하중조합으로, 전반적으로 연직토압이 최대일 때 모멘트가 크고, 연직토압이 최소인 하중조합에서 모멘트가 작게 발생하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 터널 크기별로 최대 모멘트의 발생위치는 D 3.4 m, D 4.8 m는 측벽부, D 7.2 m는 천단부에서 발생하는데, 이 같은 경향은 세그먼트 이음부에서 모멘트가 작아지고, Fig. 3과 같이 단면 크기에 따라 세그먼트 이음부의 위치가 달라지기 때문으로 판단된다.

축력 또한, 모든 단면에서 동일한 하중조합에서 발생하였고, 모멘트와는 달리 Comb. 1에서 가장 큰 축력이 발생되었다. 하중조합 Comb. 1은 연직토압과 수평토압 모두 최대일 때이며, 터널의 수직, 수평 방향으로 충분한 구

속압이 작용되는 조건이므로 축력이 가장 큰 것으로 분석되었다(Fig. 5). 최대 축력의 발생위치는 세그먼트 이음부의 위치와는 관계없이 모두 바닥부에서 발생하였다.

전단력의 경우, 모멘트 발생경향과 같이 모든 단면에서 연직토압이 최대이고, 수평토압이 최소인 하중조합 Comb. 3에서 크게 발생하였다(Fig. 6). 최대 전단력의 발생위치는 어깨부에서 발생하였다. 세그먼트라이닝의 하중조합에 따른 부재력 분석결과, 지반조건에 따라 발생 부재력이 달라지며, 터널 직경이 커질수록 부재력 변화폭이 커지는 경향을 나타냈다(Fig. 7). 터널 직경 D 3.4 m에서는 토사지반을 기준으로 모멘트 12~25%, 축력 13~26%, 전단력 3~8%가 변화하고, 터널 크기가 가장 큰 D 7.2 m는 모멘트 21~39%, 축력 13~26%, 전단력 11~20%가 감소 또는 증가하였다.

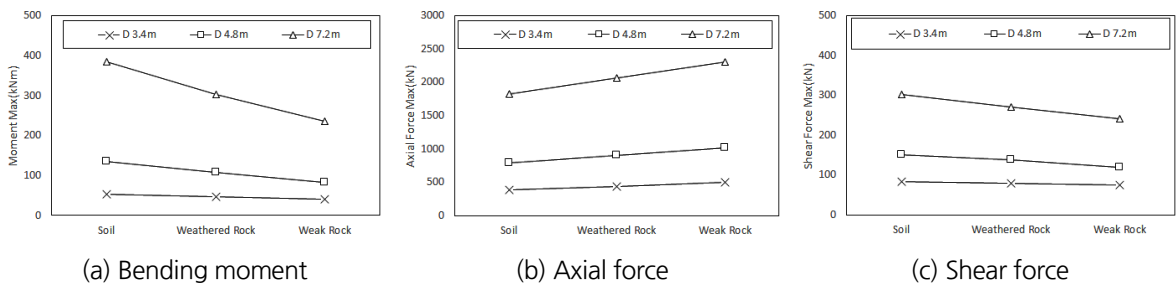


Fig. 7. Section forces according to tunnel size and ground conditions

이를 통해 터널 직경이 클수록 지반조건에 따른 부재력의 변화가 커지고 특히, 모멘트와 전단력이 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 풍화암과 연암 조건에서도 최대 모멘트와 전단력은 연직토압이 최대이고, 수평토압이 최소인 하중조합 Comb. 3에서 크고, 최대 축력은 하중조합 Comb. 1에서 발생되었다.

4.2 하중수정계수(η_i)의 영향분석

AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)은 극한한계상태(Strength limit state)에서 하중수정계수의 각 항목(연성, 여유성, 중요도)을 조합하여 1.0 이상을 취하고 이를 하중효과(식 (1)의 좌항)에 고려하도록 하였다. 여기서, 중요도는 터널의 운영 여부에 영향을 미치고 운영자 측면에서 고려되어야 하므로, 터널의 종류와 목적에 따라 달라진다. 일반적으로 위 지침에서 하중수정계수는 1.00~1.05의 값을 사용하므로, 본 연구에서는 하중수정계수가 1.00과 1.05인 경우에서 하중효과를 고려하여 수치해석하고, 해석조건별 부재력을 비교 분석하였다. 이음부 강성조건은 회전강성일 때로 설정하였다.

4.2.1 D 3.4 m의 경우

터널 크기가 D 3.4 m에서 하중수정계수의 변화에 따른 세그먼트 라이닝의 최대 단면력은 하중수정계수 1.05에서 발생되었다. 최대 축력의 변화는 주변지반조건이 달라지더라도 5.2%의 동일한 증가량을 보였고, 최대 모멘

트는 토사지반 8.5%, 풍화암 8.0%, 연암 7.4%가 증가하였다. 최대전단력은 지반조건에 따라 6.8~7.7%의 증가를 나타냈다. 최대 모멘트와 전단력은 Comb. 3, 최대 축력은 Comb. 1의 하중조합에서 발생되어, 하중수정계수의 변화 여부에 영향을 받지 않고 동일한 하중조합에서 발생하였다(Fig. 8).

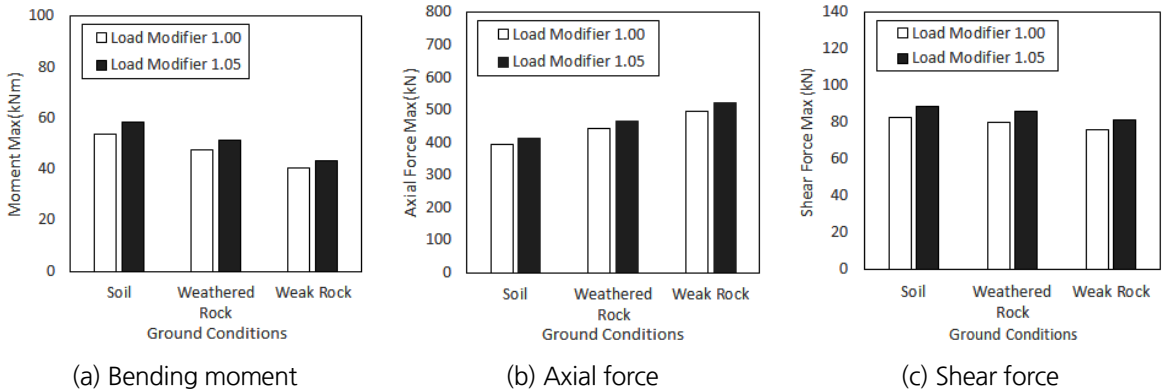


Fig. 8. Tunnel design force according to load modifier at each ground conditions (D 3.4 m)

4.2.2 D 4.8 m의 경우

터널 직경 D 4.8 m일 때 하중수정계수의 변화에 의한 세그먼트 라이닝의 발생 부재력을 비교하였다. 터널 직경 D 3.4 m의 경우와 같이 하중수정계수가 커지면 세그먼트 라이닝의 부재력이 증가하였고, 부재력 증가 경향도 유사하였다. 부재력 별로 축력 5.2%, 모멘트 7.3~8.3%, 전단력 6.9~7.7%가 변화하고, 축력을 제외하고 모멘트와 전단력은 지반조건에 따라 다른 비율로 증가하였다. 최대 모멘트와 전단력은 Comb. 3, 최대 축력은 Comb. 1의 하중조합에서 발생되어, 터널 직경이 증가하여도, 동일한 하중조합조건에서 최대 부재력이 발생되었다(Fig. 9).

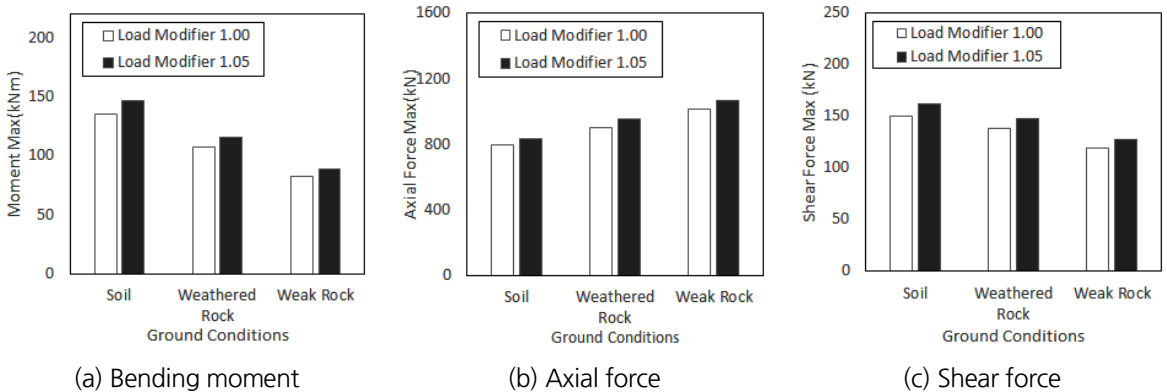


Fig. 9. Tunnel design force according to load modifier at each ground conditions (D 4.8 m)

4.2.3 D 7.2 m의 경우

해석조건 중 단면이 가장 큰 D 7.2 m는 발생 부재력이 가장 크지만, 하중수정계수의 변화에는 다른 단면의 경우와 같은 부재력 증가 경향을 나타냈다. 하중수정계수가 1.00에서 1.05로 증가하면 축력 5.2%, 모멘트 7.3~8.3%, 전단력 6.9~7.7%가 증가하였고, 모멘트와 전단력은 지반조건에 따라 증가량이 달라졌다. D 7.2 m에서도 최대 모멘트와 전단력은 Comb. 3, 최대 축력은 Comb. 1의 하중조합에서 발생되어, 직경이 작은 터널과 동일한 하중조합에서 최대 부재력이 발생되었다(Fig. 10).

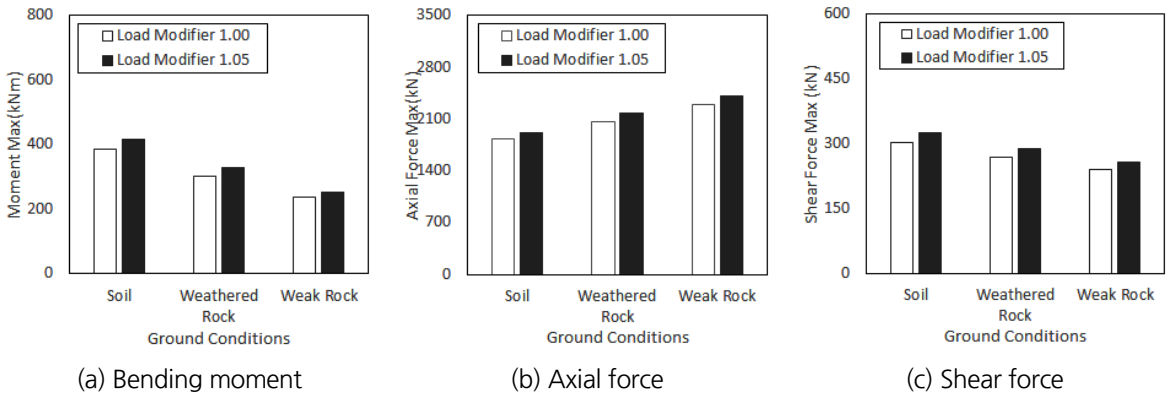


Fig. 10. Tunnel design force according to load modifier at each ground conditions (D 7.2 m)

하중수정계수가 1.00에서 1.05로 변화하면 구조물에 작용하는 하중효과가 전체적으로 5% 증가되는 효과를 나타내지만, 세그먼트 라이닝에 작용하는 휨압축응력의 크기에 큰 영향을 미치는 모멘트의 변화는 지반조건에 따라 달라지며 최대 8.5%까지 증가하는 효과가 발생되었다. 또한, 하중수정계수가 변화하더라도 최대 부재력의 발생은 하중조합에 영향을 받고, 하중수정계수는 부재에 유발되는 작용력의 크기에만 영향을 주었다. 이를 통해 하중수정계수는 쉴드 터널 세그먼트라이닝에 작용하는 외력의 절대적인 크기 변화에만 관계가 있고, 부재에 불리하게 작용하는 최대 작용력의 조합에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

4.3 이음부 강성조건에 따른 부재력 변화

쉴드터널 세그먼트 라이닝의 구조해석 시 이음부에 대한 고려는 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에 따라 유효관성 모멘트를 이용한 환산강성과 발주자의 요구 시 회전강성을 적용할 수 있다. 선행 연구(Kim et al., 2017)에서는 터널 직경 D 3.4 m이고 1-링빔인 경우 이음부 강성조건에 따른 영향검토 결과 회전강성과 환산강성의 발생 부재력이 유사하므로 두 가지 방법 모두 사용 가능한 것으로 분석하였다. 하지만 4.1의 분석과 같이 터널의 크기와 지반조건에 따라 터널 부재력의 변화폭이 커지고, 특히 터널 크기의 변화는 Table 4, 5와 같이 세그먼트 이음부의 개수와 환산강성 산정값에 영향을 주므로 이음부의 강성조건 고려시에는 설계자

의 판단이 중요하다. 또한 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서 유효 관성모멘트 산정 시 FHWA Technical Manual (2009)에서는 보수적인 조건일 때 Joint Stiffness를 0 (Zero)로 취하던 항목이 삭제되어 발견되어, 이에 대한 고찰도 필요할 것으로 판단된다. 따라서 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에 의한 한계상태 설계법을 적용하여 이음부의 강성조건이 회전강성과 환산강성($I_j = 0, I_j \neq 0$)일 때 터널 크기, 지반조건에 따른 구조해석을 수행하고 터널 부재력을 비교하여 이음부의 강성조건이 단면력에 미치는 영향을 분석하였다.

4.3.1 Axial force

세그먼트 이음부의 강성조건에 따른 최대 축력은 하중조합 Comb. 1에서 공통적으로 발생되었고, 발생위치는 터널 바닥부이다. 축력의 발생은 토압이 크게 작용하고, 터널직경이 클수록 급격히 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 11). 세그먼트 이음부 강성조건에 대해 비교하면, 회전강성을 기준으로 D 3.4 m일 때 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 0.1%, $I_j = 0$ 은 0.4%의 차이를 보이고, 가장 큰 단면인 D 7.2 m는 $I_j \neq 0$ 에서 0.2%, $I_j = 0$ 은 2.5%의 차이로 I_j 의 고려여부에 관계없이 유사한 결과를 나타냈다(Table 7). 풍화암과 연암지반에서도 회전강성과 환산강성 조건의 축력 차이가 최대 2.4%로 이음부의 강성조건이 축력에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

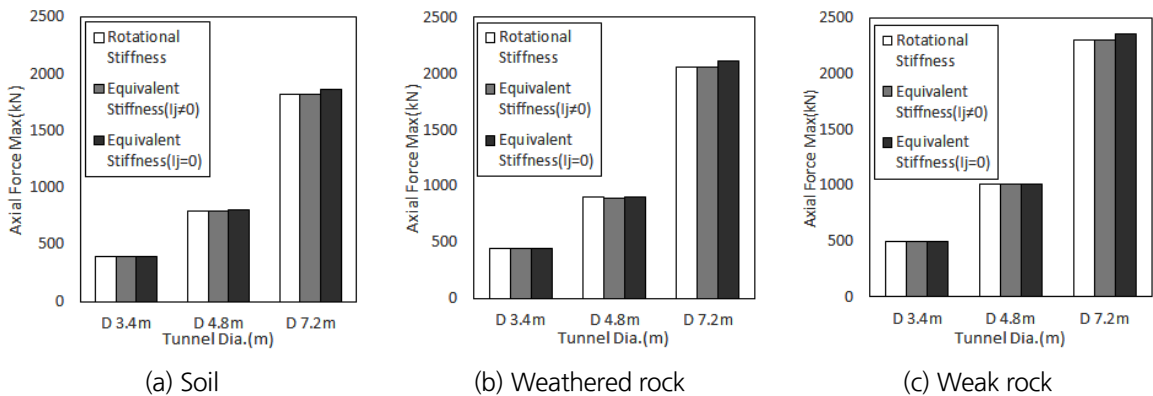


Fig. 11. Design force of tunnel member according to joint stiffness conditions (axial force)

Table 7. Axial force ratio of tunnel member according to joint stiffness conditions, (%)

Ground condition	Soil			Weathered rock			Weak rock			
	Tunnel dia. (m)	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Rotational stiffness		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Equivalent stiffness ($I_j \neq 0$)		100.1	100.0	99.8	99.9	99.4	99.8	100.0	99.1	100.2
Equivalent stiffness ($I_j = 0$)		100.4	100.9	102.5	100.2	100.3	102.1	100.4	99.9	102.4

4.3.2 Bending moment

세그먼트 이음부의 강성조건에 따른 모멘트 발생은 축력의 경우와는 다른 경향을 나타냈다. 최대 모멘트는 하중조합 Comb. 3에서 공통적으로 발생하고, 발생위치는 이음부 강성조건에 따라 달라졌다.

회전강성에서는 천단 또는 측벽에서 최대치가 발생되는데 이음부의 위치에 따라 변화하였고, 환산강성에서는 천단부에서 가장 크게 발생하였으나 측벽부 역시 근사치로 크게 발생하였다. 모멘트 발생은 터널 직경이 작을 때 이음부 강성조건별로 큰 차이가 없으나, 터널 직경이 클수록 크게 달라졌다. 이음부의 강성조건이 회전강성과 $I_j \neq 0$ 인 환산강성에서는 터널 직경과 지반조건이 변화하여도 유사한 경향을 나타냈고, $I_j = 0$ 인 환산강성 조건에서는 터널 직경이 커지면 다른 조건에 비해 모멘트의 크기가 작아지는 경향을 보였다(Fig. 12). 회전강성과 비교하면 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 터널 직경 D 3.4 m에서 0.2~4.0%, D 4.8 m에서 5.0~13.0%, D 7.2 m는 0.2~10.8%가 크게 산출되었고, $I_j = 0$ 인 환산강성은 터널 직경 D 3.4 m에서 0.0~5.20%, D 4.8 m에서 1.7~2.5%, D 7.2 m는 19.4~32.3%가 작게 산출되었다(Table 8). 이를 통해 환산강성 적용 시 $I_j \neq 0$ 인 경우 모멘트가 다소 크게 발생하고, $I_j = 0$ 인 환산강성 조건에서는 모멘트가 과소평가되는 것을 알 수 있다. 특히 터널 직경이 작은 경우에는 회전강성과 유사한 부재력이 산출되지만, 터널 직경이 크고 환산강성이 작은 경우 즉, 이음부의 개수(n)가 많은 경우는 모멘트의 차가 크게 발생되므로 환산강성 적용시에는 주의가 필요한 것으로 검토되었다.

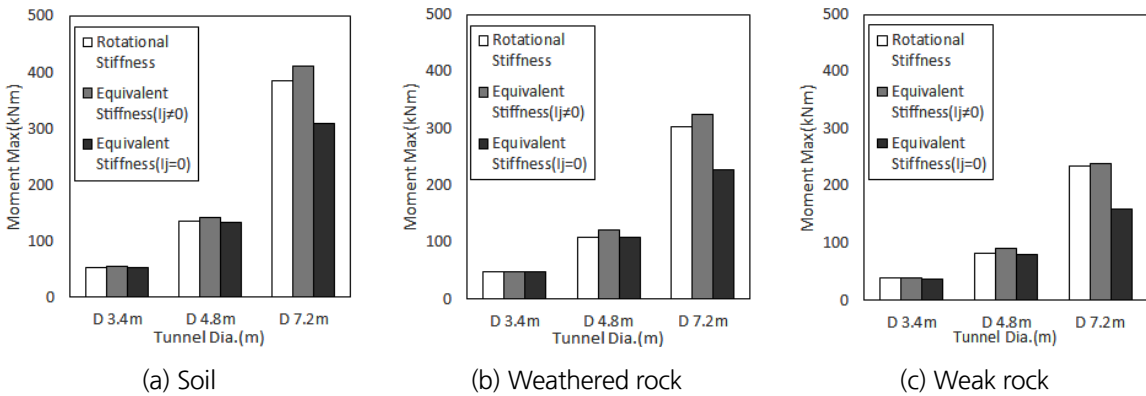


Fig. 12. Design force of tunnel member according to joint stiffness conditions (bending moment)

Table 8. Bending moment ratio of tunnel member according to joint stiffness conditions, (%)

Ground condition	Soil			Weathered rock			Weak rock			
	Tunnel dia. (m)	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Rotational stiffness		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Equivalent stiffness ($I_j \neq 0$)		101.7	105.0	107.2	104.0	113.0	107.1	100.2	110.8	102.2
Equivalent stiffness ($I_j = 0$)		100.0	97.8	80.6	100.0	101.7	75.1	94.8	97.5	67.7

4.3.3 Shear force

세그먼트 이음부의 강성조건에 따른 전단력 발생은 모멘트와 유사한 경향을 나타냈다. 최대 전단력은 하중조합 Comb. 3에서 공통적으로 발생하고, 발생위치는 터널의 어깨부에서 발생하였다. 전단력은 지반조건과 터널 직경에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 터널 직경에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 회전강성과 $I_j \neq 0$ 인 환산강성에서는 터널 직경과 지반조건이 달라져도 유사한 경향과 크기를 나타냈고, $I_j = 0$ 인 환산강성 조건에서는 터널 직경이 커지면 전단력의 크기가 과소평가되는 경향을 보였다(Fig. 13).

회전강성과 비교하면 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 터널 직경 D 3.4 m에서 6.6~8.2%, D 4.8 m에서 4.9~8.8%, D 7.2 m는 풍화암 이하에서 1.7%, 연암에서는 2.7%가 작게 산출되었다. $I_j = 0$ 인 환산강성은 터널 직경 D 3.4 m에서 4.0~6.8%, D 4.8 m에서 0.0~1.4%가 증가하고 터널 직경이 가장 큰 D 7.2 m는 15.6~22.9%가 감소하였다(Table 9). 이를 통해 환산강성 적용 시 $I_j \neq 0$ 인 경우 전단력은 다소 크고, $I_j = 0$ 인 환산강성 조건에서는 터널 직경이 클 때 전단력이 과소평가되는 것으로 나타났다.

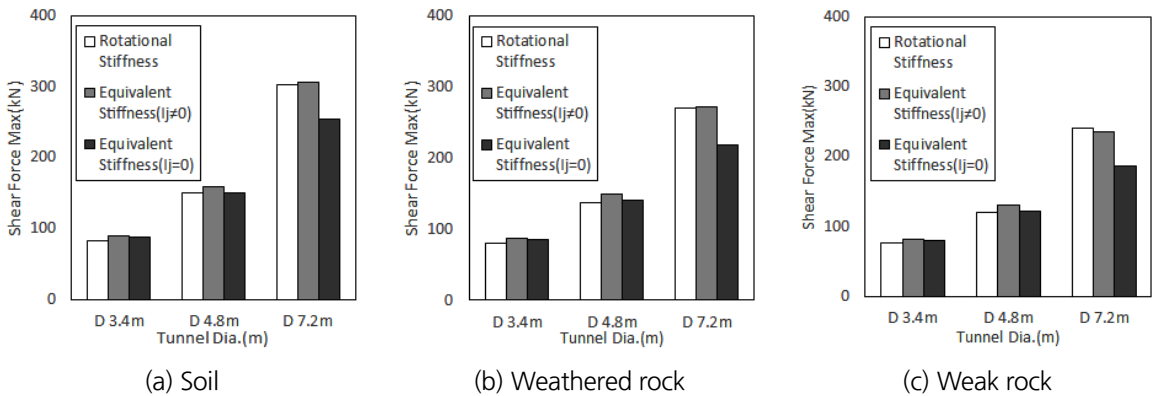


Fig. 13. Design force of tunnel member according to joint stiffness conditions (shear force)

Table 9. Shear force ratio of tunnel member according to joint stiffness conditions, (%)

Ground condition	Soil			Weathered rock			Weak rock		
	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Tunnel dia. (m)	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Rotational stiffness	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Equivalent stiffness ($I_j \neq 0$)	108.1	104.9	101.7	108.2	108.1	100.9	106.6	108.8	97.3
Equivalent stiffness ($I_j = 0$)	106.8	100.0	84.4	106.2	101.3	81.2	104.0	101.4	77.1

이음부의 강성조건에 따른 터널 부재력을 분석한 결과, 터널 직경이 작은 경우에는 회전강성과 환산강성 모두 유사한 부재력이 산출되어 어느 방법을 쓰더라도 무방할 것으로 판단되지만, 직경이 커지고 환산강성이 작게 산출되거나 $I_j = 0$ 인 경우는 모멘트와 전단력이 과소평가 되었다. 따라서, 유효관성 모멘트 산정 시 FHWA (2009)

에서 보수적인 조건일 때 Joint Stiffness를 0 (Zero)로 취하던 항목이 최근 발간된 AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서 삭제된 것은 이음부 강성조건을 고려한 부재력 산정이 필요함을 의미하는 것으로 판단된다.

4.4 이음부 강성조건에 따른 세그먼트 라이닝의 거동특성 분석

셸드터널 세그먼트라이닝의 이음부 강성조건에 따른 최대 부재력을 비교한 결과 회전강성에 비해 $I_j \neq 0$ 인 환강성 조건에서 부재력이 다소 크게 발생하고, $I_j = 0$ 일 때는 작은 부재력이 발생하였으며, 작용 위치는 각 부재력에 따라 다른 위치에서 발생하였다. 터널구조물에 발생하는 응력의 크기는 터널의 안정성에 영향을 주므로 터널에 발생하는 응력분포를 확인하여 부재 설계 시 고려하여야 할 필요가 있고, 터널의 응력은 축력과 모멘트에 의해 좌우되므로 두 가지의 부재력을 조합한 휨압축응력의 분포를 분석할 필요가 있다. Fig. 14~16은 토사지반에서 이음부 강성조건에 따른 응력발생을 나타낸 것이다.

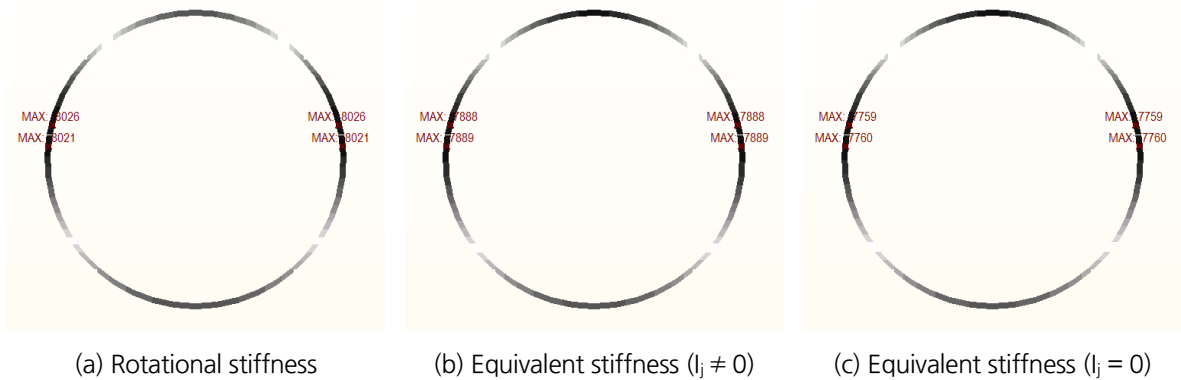


Fig. 14. Stress of tunnel member according to joint stiffness conditions (D 3.4 m)

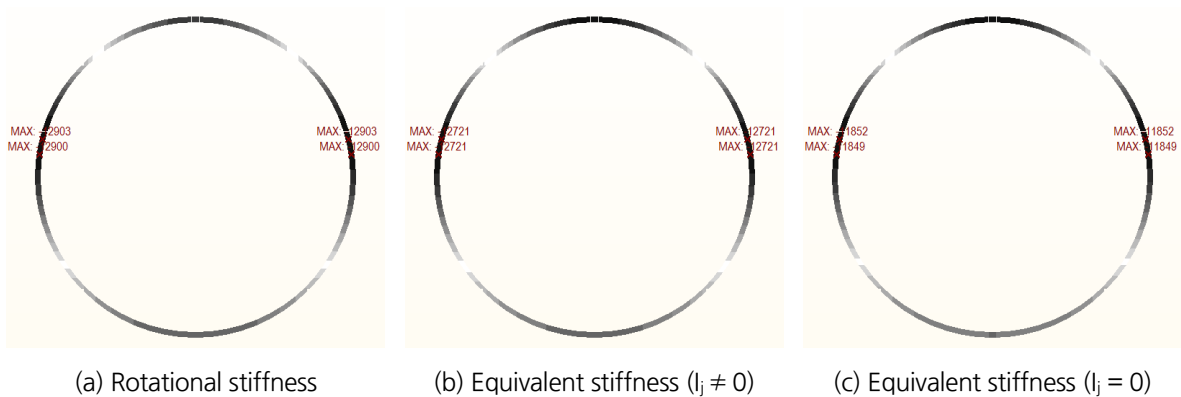


Fig. 15. Stress of tunnel member according to joint stiffness conditions (D 4.8 m)

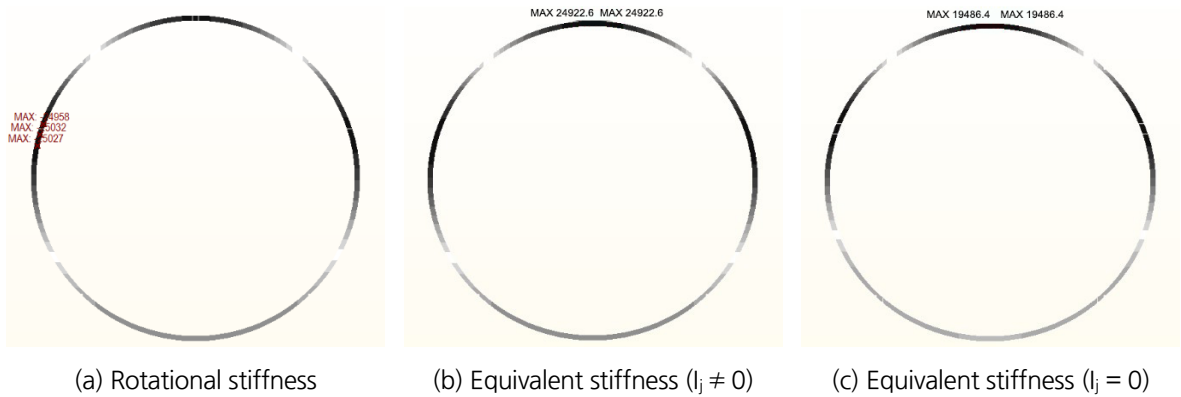


Fig. 16. Stress of tunnel member according to joint stiffness conditions (D 7.2 m)

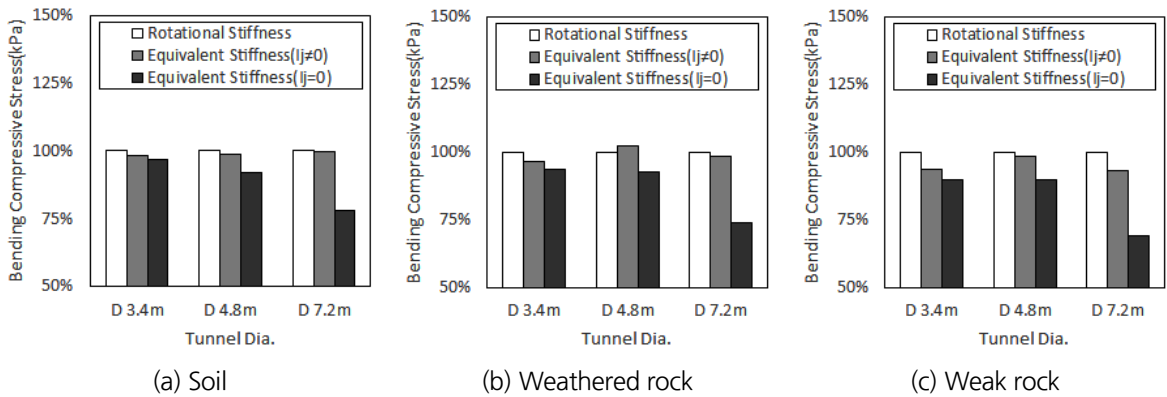


Fig. 17. Stress of tunnel member according to joint stiffness conditions and tunnel size

터널 직경 D 3.4 m과 D 4.8 m에서 최대 응력은 측벽부에서 발생되며 회전강성 조건일 때 가장 크고, $I_j = 0$ 인 환산강성 조건이 가장 작은 응력분포를 나타냈다(Fig. 14, 15). Fig. 17의 비교와 같이 회전강성을 기준으로 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 응력이 각각 1.4%, 1.7% 작고, $I_j = 0$ 일 때는 3.4%, 8.1% 작게 발생하였다. 터널 직경 D = 7.2 m에서 최대 응력은 회전강성일 때 측벽부, 환산강성은 천단부에서 발생되었다. 환산강성의 경우 이음부를 고려하여 터널의 강성을 감소시키며, 터널 직경이 커지면 모멘트의 영향을 지배적으로 받기 때문에 모멘트가 크게 발생되는 천단부에서 최대 응력이 발생하였고, 회전강성의 경우 부재의 강성은 유지되지만 이음부의 위치로 인해 최대 응력 발생위치가 측벽부 또는 천단부에서 발생되었다(Fig. 16).

회전강성을 기준으로 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 응력이 0.4% 작고, $I_j = 0$ 일 때는 22.1%가 작게 발생되어 앞의 분석과 같이 직경이 큰 단면에서 $I_j = 0$ 인 환산강성의 적용은 다소 무리가 있는 것으로 분석된다.

이음부 강성조건과 터널 크기에 따른 터널구조물의 최대 응력을 분석하면, 전반적으로 회전강성과 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 비슷한 응력값을 갖고 $I_j \neq 0$ 인 환산강성은 터널 직경이 커질수록 응력이 현저히 작아지는 경향을 나타냈다(Table 10).

Table 10. Stress of tunnel member according to joint stiffness conditions and tunnel size, (%)

Ground condition	Soil			Weathered rock			Weak rock		
	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Tunnel dia. (m)	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2	3.4	4.8	7.2
Rotational stiffness	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Equivalent stiffness ($I_j \neq 0$)	98.3	98.6	99.6	96.6	102.3	98.3	93.5	98.5	93.4
Equivalent stiffness ($I_j = 0$)	96.6	91.9	77.9	93.7	92.9	73.8	89.7	89.9	69.3

5. 결론

본 연구는 쉴드터널 세그먼트 라이닝 설계에 한계상태 설계법을 도입하기 위한 연구의 일환으로 AASHTO LRFD Road tunnel design Specification (2017)에 기초한 하중계수, 하중조합 및 하중수정계수를 적용한 구조검토를 수행하여 한계상태설계법 적용방향을 고찰하였다. 또한, 쉴드 터널의 이음부 강성조건과 터널 크기에 대한 상관관계를 분석하여 한계상태 설계법 적용 시 세그먼트 라이닝의 구조해석 영향인자에 대하여 평가하였다.

1. 한계상태설계법을 적용한 쉴드터널 세그먼트라이닝의 구조해석 결과 극한한계상태에서 구속압이 가장 큰 하중조합 Comb. 1 (All Max)일 때 축력이 가장 크고, 연직토압이 최대이고 수평토압이 최소인 Comb. 3 (EV Max)에서 최대 모멘트와 전단력이 발생하였다. 부재력의 크기는 터널 크기가 작으면 지반조건에 따른 부재력의 변화가 작지만, 터널 크기가 커질수록 큰 폭으로 변화하였다.
2. AASHTO LRFD Road Tunnel Design Specification (2017)에서는 터널의 사업주체가 터널의 중요도를 정하도록 하였고, 이는 하중수정계수의 선정에 영향을 주게 된다. 하중수정계수의 설정에 따른 구조해석결과 부재력의 증감이 발생되는데, 이 중 모멘트의 변화가 가장 크게 발생되었다. 모멘트의 변화는 터널 구조물의 안정성과 경제성에 연관이 크므로, 중요도 결정 시 사업주체와 전문가의 의견을 종합적으로 고려할 필요가 있다.
3. 구조물의 중요도에 따른 하중수정계수의 변화는 구조물에 작용하는 하중효과의 변화를 가져오며, 이 때 발생 부재력은 하중수정계수 이상의 변화가 발생된다. 하중수정계수는 부재에 작용하는 부재력의 변화에 영향을 주지만 최대 부재력이 발생하는 하중조합에는 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.
4. 이음부의 강성조건에 따른 터널의 부재력 분석결과, 터널 직경이 작은 경우에는 회전강성과 환산강성 모두 유사한 부재력이 산출되어 어느 방법을 적용하더라도 무방할 것으로 판단된다. 하지만, 터널의 직경이 커지고 환산강성이 작게 산출되거나 $I_j = 0$ 인 경우는 모멘트와 전단력이 과소평가 되므로 세그먼트 이음부의 강성조건을 환산강성으로 할 때에는 유효관성 모멘트의 산정 시 보수적인 계산보다는 이음부의 접촉면적을 고려한 계산방법이 유효할 것으로 판단된다.
5. 세그먼트라이닝의 응력은 이음부의 강성조건에 따라 다르며, 모멘트 발생 경향과 유사하였다. 터널 직경 5.0 m 이내에서는 회전강성과 환산강성 모두 유사한 응력이 발생되고, 터널의 직경이 커지면 이음부 강성조건에

따라 응력발생 경향이 달라졌다. 직경이 크고 환산강성이 작으면 발생응력이 과소평가 되므로, 환산강성 적용 시에는 계산인자인 이음부 개수와 I_p 산정에 주의하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “도심지 소단면($\phi 3.5$ m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(과제번호: 17SCIP-B105148-03)-한계상태설계법에 의한 터널식 공동구 라이닝 설계기술개발”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

1. American Association of state Highway and transportation Officials (2017), “AASHTO LRFD road tunnel design and construction guide specification (1th Edition)”.
2. Choi, W.Y., Park, J.D., Lee, S.W. (2014), “Influence of the joint stiffness on the segment design”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 1, pp. 63-74.
3. Japan Railway Technical Research Institute (2003), “Design Standard for Railway Structures (Shield tunnel)”, pp. 91-95.
4. Kim, H.M., Kim, D.K., Lee, S.D. (2014), “Limit states design for tunnels: related researches and present state of application”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 3, pp. 341-346.
5. Kim, H.M., Kim, H.S., Shim, K.M., Ahn, S.Y. (2017), “A Study on the factors influencing the segment lining design solved by beam-spring model in the shield tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 179-194.
6. Muir Wood, A.M., Ma, F. (1975), “The circular tunnel in elastic ground”, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.
7. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2009), “Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements”.