

터널 한계상태설계법 관련 연구 및 적용 동향

김홍문^{1*} · 김동국² · 이상덕³

¹정회원, (주)평화엔지니어링 상무

²정회원, (주)평화엔지니어링 대리

³정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수

Limit states design for tunnels: related researches and present state of application

Hong-Moon Kim^{1*}, Dong-Kook Kim², Sang-Duk Lee³

¹Managing Director, Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

²Assistant Manager, Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

³Professor, Department of Civil Engineering, Ajou University

ABSTRACT: The representative Limit State Design(LSD) codes, AASHTO LRFD and Eurocodes, are widely being applied when designing civil structures. However, these codes are only applying tunnel lining design and segments design for shield tunnels. Recently in Europe, the Eurocode 7 committee was trying to create a research group called EG12, but they reluctantly decided not to create EG12 since it could have an impact on some of the other Eurocodes(including Eurocodes 2 and 3). Still there is an effort to continue researching LSD for tunnelling. LSD method will become the norm for the field of civil structural design in the near future. Therefore, it is important to fully understand Eurocode7:Geotechnical design in connection with Eurocode 2 and Eurocode 3. In addition, it is essential to follow international research trends and also to research for application to tunnelling.

Keywords: Limit State Design(LSD), AASHTO LRFD, Eurocode

초 록: 대표적인 한계상태설계법은 AASHTO LRFD와 Eurocodes가 있으며, 토목구조물 설계에 폭넓게 적용되고 있다. 그러나 이러한 설계법이 터널설계에 적용될 경우에는 NATM 터널의 라이닝설계와 쉴드터널의 세그먼트 설계에만 제한적으로 적용되고 있다. 최근 유럽에서는 유로코드를 터널설계 분야에 적용하기 위하여 기존개정(EG12)을 추진하였으나 다른 유로코드(EC2 및 EC3)에 미치는 영향 등을 고려하여 불가피하게 구성하지 않는 것으로 결정되었다. 그러나 여전히 한계상태설계법을 터널설계에 적용하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있다. 한계상태설계법은 가까운 장래에 터널을 포함한 토목구조물 설계법의 주류가 될 것이다. 그러므로 Eurocode 7 등 국외 한계상태설계법에 대한 충분한 이해가 중요하며, 국제적인 연구동향을 파악하고 터널설계에 적용하기 위한 연구가 필요하다.

주요어: 한계상태설계법, AASHTO LRFD, 유로코드

1. 서론

한계상태설계법은 재료가 가지는 내구성이나 최종적인 저항능력(resistance)을 구조물에 작용하는 하중(actions)과의 관계로 평가하여 토목구조물을 설계하

는 방법이다. 대표적인 설계기준으로는 AASHTO LRFD 기준과 Eurocode, 일본의 JSCE 기준이 있다. 한계상태설계법은 새로운 기술의 발전과 수치해석 기법의 진보에 맞추어 토목구조물 설계의 주류로 자리를 잡아가고 있다. 다만, 터널설계에서는 필요한 기준이 충분히 정립되지 못하고 있어 터널라이닝과 세그먼트 설계 등에 제한적으로 적용되고 있다. 토목구조물 설계에 한계상태 설계법을 일관되게 적용하기 위해서는 터널설계에 대한 적용방법 연구와 기준화가 필요하다.

*Corresponding author: Hong-Moon Kim

E-mail: iguakim@naver.com

Received April 4, 2014; Revised April 22, 2014;

Accepted May 13, 2014

*본 논문은 2014 봄 학술발표회 우수논문으로 선정된 논문입니다.

2. 한계상태설계법

2.1 기본 개념

한계상태설계법은 콘크리트 구조물의 내구성이나 최종적인 내하능력을 구조물에 작용하는 하중과의 관계를 이용하여 구조물을 설계하는 방법으로 사용한계상태(Serviceability Limit State, SLS)와 극한한계상태(Ultimate Limit State, ULS)로 나뉘어 진다. 사용한계상태는 구조물의 국부적인 손상이나, 기능장애를 초래하는 한계(침하, 변형, 균열)이고, 극한한계상태는 구조물의 붕괴나 주요 손상을 초래하는 한계이다.

2.2 설계기준별 한계상태 정의

전통적인 개념의 한계상태설계법(유럽)은 극한한계상태에 근간을 둔 설계법이며, 근래에 일반적으로 통용되는 의미의 한계상태설계법(미국)은 검증이 필요한 한계상태를 여러 단계로 구분하여 각 한계상태에서 요구조건을 만족하는지 검증하며 설계를 수행하는 설계법이다. 설계기준별 한계상태를 분류하면 AASHTO LRFD는 강도한계 상태(strength limit state)를 근간으로 하면서 극한한계상태(ultimate limit state)를 부분적으로 고려하는 설계법이다. Eurocode

는 극한한계상태를 근간으로 하면서 강도한계상태를 부분적으로 고려한 설계법이며, Eurocode 7에서 3가지 설계접근법(design approach), DA1 (load and material factor method), DA2 (load and resistance factor method), DA3 (simplified DA1)를 제시하고 있다(Fig. 1). 일본 JSCE기준은 극한한계상태와 강도한계상태를 복합적으로 고려하여 설계법을 제시였다. AASHTO LRFD 및 Eurocode, 일본 JSCE는 신뢰도 기반의 부분 안전계수(partial safety factor)를 반영하여 한계상태 설계법을 정립하였다(Table 1).

3. 터널에서의 한계상태설계법 적용성

터널 설계에 한계상태설계법을 적용하기 위해서는 터널 구조물의 한계상태부터 정의하여야 한다. 터널에서의 극한한계상태는 터널이 붕괴하는 것, 즉 터널이 큰 변형을 일으켜 구조물의 안정을 상실하는 것을 의미하며, 사용한계상태는 도로, 철도 등에서 터널의 용도인 교통이라는 사용성이 손상되어 그 기능을 유지하지 못하는 상태로 정의하였다(JSCE, 2001).

그러나 실질적으로 이러한 터널의 한계상태를 정의하기는 어려운 실정이다. 지중 구조물과 주변 지반의 상호작용과 같이 고려하기 힘든 문제와 붕괴상태나 거기에 도달하는 과정, 터널에 용도에 맞춘 사용성의

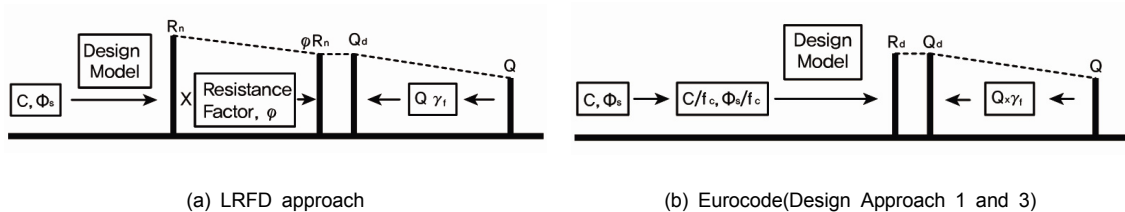


Fig. 1. Approaches to address level of safety needs in design

Table 1. Considering limit state of the each design code

Design code	Serviceability limit State	Strength limit state	Ultimate limit state
ACI, AASHTO	◎	◎	× (△)
Eurocode	◎	× (△)	◎
JSCE	◎	○	○

정의 등을 규정하기 어렵다. 그리고 재료적인 측면에서 재료의 경과년도에 의한 열화가 부재의 내하성능이나 변형성능에 끼치는 영향 등 지반과 재료와의 불명확한 거동으로 인하여 한계상태를 정의하기가 힘들다. 따라서 터널의 한계상태설계법 적용은 구조물과 지반을 모두 고려한 부분안전계수(Partial safety factor)에 대한 확립이 어려워 아직 연구단계에서 머물고 있다.

터널구조물에서는 크게 지보와 라이닝설계가 한계상태설계법 적용 대상이 된다. 터널의 지보재는 지반 반력을 포함한 하중의 불확실성과 주변지반의 극한한계상태의 도달여부의 불확실성 때문에 한계상태설계법을 적용하기에 어려움이 많다. 특히 1차 지보재는 터널 굴착에 따른 지반과 지보재의 상호작용 효과 등 한계상태를 규정하기에 지반의 복잡한 메커니즘을 파악해야 된다. 그러나 2차 지보재 라이닝은 1차 지보재에 비해 이완하중과 재료로서의 콘크리트에 대한 부분안전계수의 정량적인 정립이 비교적 용이하여 터널의 한계상태설계법 적용은 라이닝 설계에 국한되어 적용되고 있다.

4. 터널 한계상태설계법 적용 동향

토목구조물 설계의 주류로 자리를 잡아가고 있는 한계상태설계법의 터널에서의 세계적인 적용 동향을 살펴보면 미국에서는 라이닝 구조설계에만 LRFD를 따르고 있고, initial support에는 LRFD를 적용하지 않고 있다. 그리고 Eurocode는 2018년부터 적용할 2세대 Eurocode 7에 터널분야를 포함시키기 위하여 Eurocode 7 위원회 산하에 “Evolution Groups (EG12 : Tunnelling)”조직하여 관련 지침을 마련할 계획이었으나, 최근에 터널분야는 지침 마련을 위한 제반여건이 성립되지 않았고, Eurocode 2 및 Eurocode 3에 미치는 영향을 감안하여 불가피하게 EG12를 구성하지 않는 것으로 결정되었다. 영국에서는 Sprayed Concrete Lined (SCL) 터널설계에 유로코드를 적용하

고 있으며, 독일 등은 개별국가 차원에서 활발한 연구가 진행 중이다. 일본에서는 1997년부터 한계상태설계법의 터널로의 적용 연구를 시작하여 2001년에 한계상태설계지침(안)을 제시하였다. 일본 터널표준시방서(실드 터널, 2006)의 세그먼트설계에 한계상태설계법이 반영되어 있고, 허용응력설계법과 비교한 해설서가 발간되었다. 국내에는 아직 터널설계에 적용하는 한계상태설계법이 없으며, 관련연구 또한 미흡한 실정이다.

5. 한계상태설계법에 의한 터널 라이닝 단면력 비교

도심지 NATM터널의 라이닝 설계를 위하여 한계상태설계법(LSD)을 적용하여 구조검토를 수행하였다. 또한, 현업에서 사용되고 있는 강도설계법(USD)으로 라이닝을 검토하여 단면력의 차이를 비교하였다. 강도설계법(USD)은 국내 콘크리트 설계기준(2012년)을 적용하였으며, 한계상태설계법(LSD)은 일본 JSCE (2001)에 의한 설계방법(Table 4)을 적용하여 검토하였다.

5.1 라이닝 구조해석 조건

도심지 NATM 터널의 대표단면으로 국내지하철 터널단면(폭 11.1 m, 높이 8.4 m, 라이닝 두께 0.4 m)을 해석단면(Fig. 2)으로 선정하였고, 일반적인

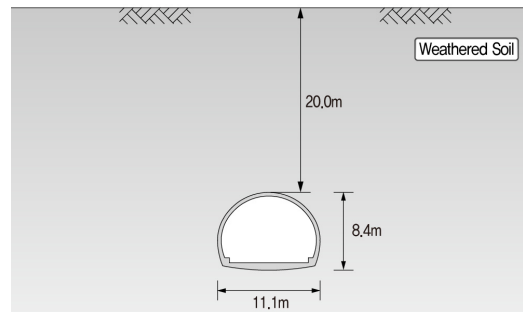


Fig. 2. Computation section for structural analysis

도심지 하부 통과구간에 맞는 지반조건 및 해석변수를 Table 2 및 Table 3과 같이 적용하여 라이닝 구조해석을 수행하였다.

5.2 터널 라이닝 구조해석 결과

도심지 터널의 지반조건을 고려한 지반반력 및 하

중조건(자중, 이완하중, 수압, 온도하중)을 이용하여 2차원 라이닝 구조계산을 수행하였다. 한계상태설계법(LSD)과 강도설계법(USD)으로 라이닝을 계산한 결과, 라이닝 위치에 따른 단면력은 Table 5 및 Fig. 3과 같이 산정되었다.

한계상태설계법(LSD)이 터널 위치에 상관없이 강도설계법(USD)보다 모멘트는 감소하고 축력, 전단력

Table 2. Properties of the Tunnel structure

Variables	Strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Unit weight (kN/m ³)
Concrete	24	25,800	25.0
Steel	300	200,000	-

Table 3. Properties of the Ground

Variables	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Poisson's ratio (ν)
Weathered Soil	19.0	50.0	20.0	31	0.34

Table 4. Partial factors of limit state

Variables		Ultimate limit state		Strength limit state
Material factor γ_m	Concrete γ_c	1.30		1.00
	Steel reinforcement γ_s	1.00		1.00
Load factor γ_f	Dead load	1.05		1.00
	Earth pressure	Vertical	1.20	1.00
		Horizontal	1.00	
	Water pressure	1.10		1.00
Other Loads	1.10		1.00	
Structure analysis factor γ_a		1.00		1.00
Member factor γ_b	Bending	1.15		1.00
	Compressive	1.30		1.00
Structure factor γ_i		1.00		1.00

Table 5. Member forces in relation with each design case

Parts of the Lining	Moment (kN·m)		Axial force (kN)		Shear force (kN)	
	LSD	USD	LSD	USD	LSD	USD
Arch	387.83	421.17	1641.16	1482.59	286.77	271.15
Wall	431.30	477.89	1744.11	1579.30	367.51	353.95
Invert	880.87	967.2	565.58	490.10	1124.49	1042.74

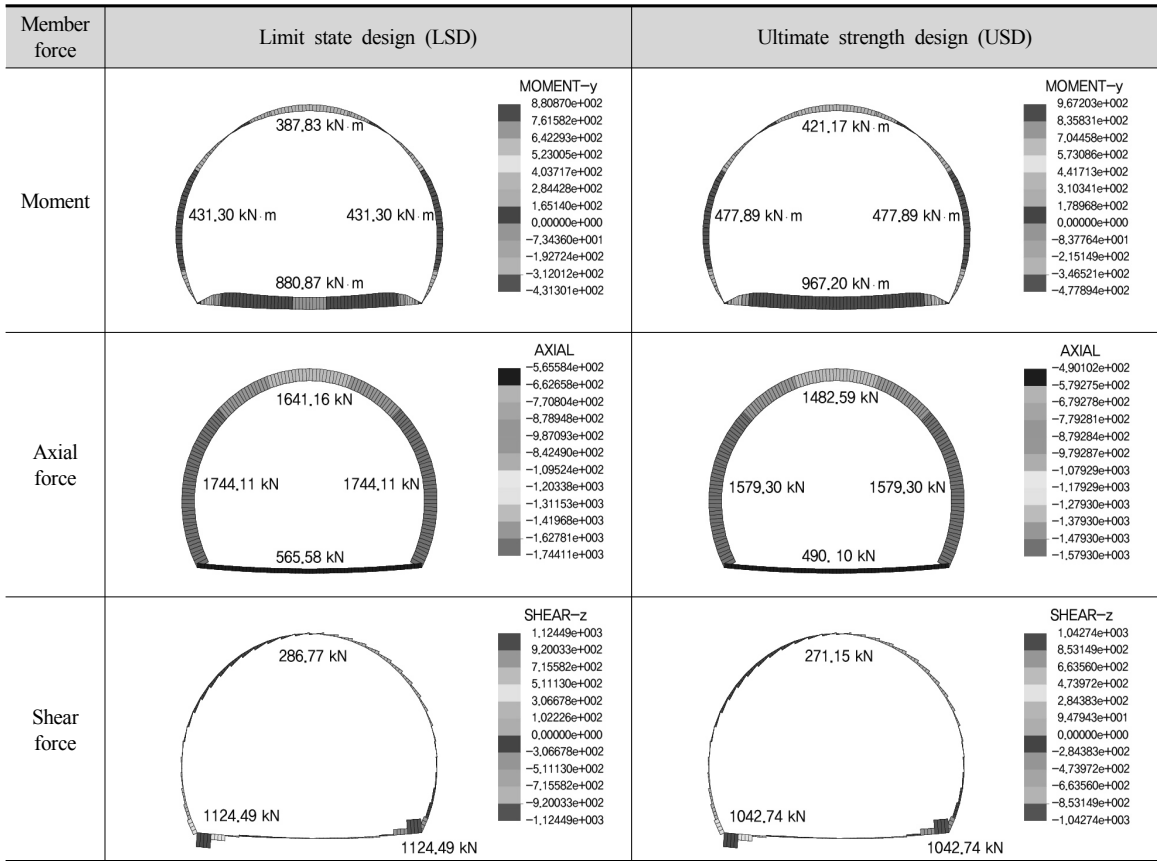


Fig. 3. Member force Diagram

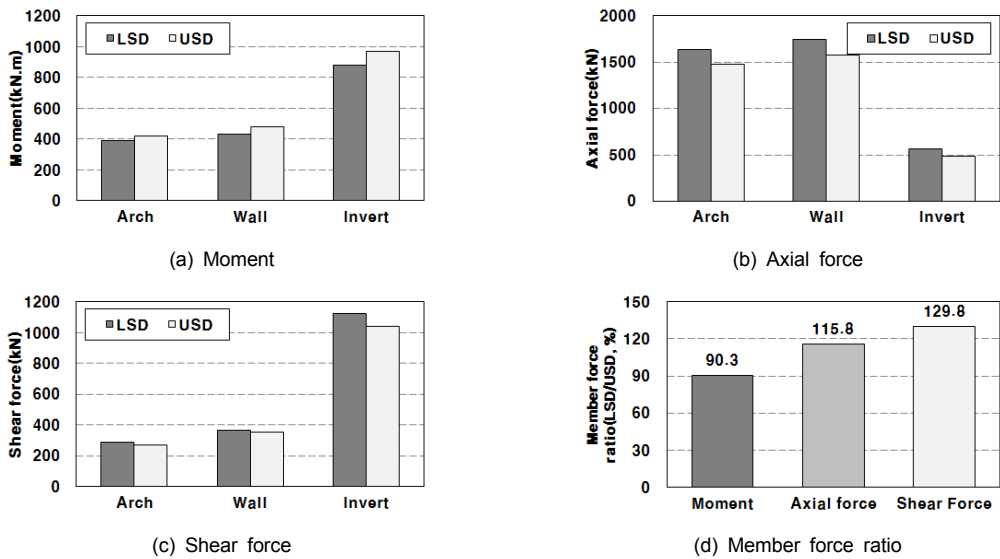


Fig. 4. Results of structural analysis of the tunnel lining

Table 6. Reinforcement of the tunnel lining with the design cases

Parts of the Lining	Ultimate strength design (USD)		Limit state design (LSD)	
	main steel	shear steel	main steel	shear steel
Arch	D25@125	D13@300	D22@125	D13@300
Wall	D25@125	D13@300	D22@125	D13@300
Invert	D29@125	D13@150	D25@125	D13@150

은 크게 나타나는 경향을 보였다(Fig 4). 모멘트는 측벽부에서 최대 90.3% 감소하였으며, 축력과 전단력은 최대 129.8% 증가하였다. 라이닝에서 발생된 단면력은 작용하중과 지반반력에 의해 영향을 크게 받으므로 한계상태설계법(LSD)의 부분 안전계수를 고려한 해석변수에 의해 차이를 보이는 것으로 판단된다.

구조해석 결과를 바탕으로 라이닝 철근 배근을 검토하여 각 설계법에 의해 산정된 단면력으로 배근한 라이닝 철근은 Table 6과 같다. 강도설계법(USD)의 철근보강 규격(D25~29)에 비해 한계상태설계법(LSD)은 D22~25 규격으로 배근되어 철근량 감소로 인한 경제적인 설계가 가능한 것으로 검토되었다.

6. 결론

국외 선진국을 중심으로 한계상태설계법은 토목구조물 설계의 주류로 자리 잡아 가고 있다. 현재에는 터널구조물이 어떠한 상황에서 극한한계상태에 도달하는가라는 한계상태정립과, 작용력(actions) 적용의 복잡성 등으로 한계상태설계법을 터널설계에 적용하는 필요성 자체에 대한 부정적인 의견도 있다.

터널 한계상태설계법이 적용되기 위해서는 다양한 터널단면과 하중 및 경계조건에서의 설계검증이 필요하며, 한계상태설계법의 부분안전계수에 따라 검토결과와의 차이가 나타나므로 신뢰성 분석을 통한 부분안전계수 확립에 보다 많은 연구가 필요하다. 국외선진

국을 중심으로 터널적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으므로 가까운 장래에 터널설계에도 도입이 예상된다. 국내에서도 준비하는데 많은 시간과 시행착오가 예상되지만 한계상태 터널설계라는 진전된 생각을 가지고 기초부터 차근차근 연구하여 대비가 필요하다.

References

1. American Association of state Highway and transportation Officials (2007), "AASHTO LRFD bridge design specification(4th Edition)".
2. Andrew Bond (2013), "Implementation and evolution of eurocode 7", Modern Geotechnical design Codes of Practice pp. 3-14.
3. European Standards Organization (2004), "Eurocode 7 : beotechnical design (2004) Part 1: general rules".
4. Japan Society of Civil Engineers (2010), "Design of segment for shield tunnel".
5. Japan Society of Civil Engineers (2006), "Standard specifications for tunneling-2006 : shield tunnels" pp. 213-257.
6. Japan Society of Civil Engineers (2001), "Application of the limit state design method to tunnel linings".
7. Tony M. Allen, (2013), "AASHTO geotechnical design specification development in the USA", Modern Geotechnical design Codes of Practice, pp. 243-260.