

신뢰성 기반 쉴드터널의 경계조건 변화에 따른 파괴확률 특성에 관한 연구

이규필^{1*} · 박영빈²

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

²비회원, 우성디앤씨 부사장

A study on failure probability characteristic based on the reliability analysis according to the variation of boundary conditions

Gyu-Phil Lee^{1*} · Young-Bin Park²

¹Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, KICT

²Vice-President, Woosung D&C

*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

Abstract

In this study, a comparison model considering the stochastic characteristics of the load and member resistance of the shield tunnel segment lining as well as the variability of the boundary condition was selected and reliability analysis was performed, and the adequacy of the limit state design was analyzed by calculating the probability of failure and reviewing the structural safety. For the analysis considering the probability characteristics of these ground constants, the ground spring coefficient was considered as the mean value by calculating the quantitative value by applying the Muirwood formula, and the coefficient of variation was selected based on the existing research data to review the models according to the change of ground boundary conditions. Through the structural analysis of these models and the reliability analysis using MCS technique, the failure probability and reliability index were calculated to examine the changes in the failure probability due to changes in ground boundary conditions.

Keywords: Segment lining, Limit state design, Soil material probability, Boundary condition, Coefficient of variation

초 록

본 연구에서는 쉴드터널 세그먼트 라이닝의 하중과 부재저항의 확률적 특성뿐만 아니라 경계조건 변동성을 고려한 비교모델을 선정하고 신뢰성해석을 수행하였으며, 파괴 확률 산정 및 구조안전성 검토를 통해 한계상태설계의 적정성에 대해 분석을 수행하였다. 이러한 지반 정수의 확률특성치를 고려한 해석을 위해 지반스프링계수는 Muirwood

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(6)447-458(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.6.447>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 6, 2023

Revised October 30, 2023

Accepted October 30, 2023



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 © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

식을 적용하여 정량적 값을 산정하여 Mean값으로 고려하였고, 변동계수는 기존 연구자료를 토대로 지반 경계조건 변화에 따른 검토대상 모델들을 선정하였다. 이러한 모델들에 대한 구조해석과 MCS기법을 적용한 신뢰성분석을 통해 파괴 확률과 신뢰성지수를 산정하여 지반경계조건 변화에 따른 파괴확률의 변화를 검토하였다.

주요어: 세그먼트 라이닝, 한계상태설계, 확률특성치, 경계조건, 변동계수

1. 서론

국내외 건설분야 설계시 신뢰성 이론 기반의 한계상태설계법을 적용하고 있으며, 국내 교량 구조물 및 항만구조물의 설계에서는 한계상태설계법의 적용이 일반화되어 있다. 한계상태설계는 신뢰성 이론을 기반으로 하중 및 저항의 확률적 특성치를 고려한 설계가 될 수 있도록 기준을 제정하여 안전성 및 경제성을 확보할 수 있도록 하고 있다. 일반적으로 교량구조물의 경우에는 경계조건이 고정, 힌지, 롤러조건 등으로 정량적으로 구분하여 고려할 수 있으나, 지중구조물의 경우에는 지중구조물과 지반의 상호작용을 모사하기 위한 지반스프링의 경계조건이 교량구조물에 비해 상대적으로 불명확한 특성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

따라서 지중구조물의 경우 일반 구조물의 한계상태설계시 고려되는 하중 및 저항의 설계변수에 대한 확률특성치를 고려한 신뢰성 해석뿐만 아니라 경계조건 변화에 따른 비교모델에 대한 신뢰성분석 수행이 필요하다. 또한 파괴확률 및 신뢰도지수를 산정하여 기존 국내설계의 결과와의 분석을 통한 구조안전성에 대한 검토가 요구된다.

이를 위하여 본 연구에서는 지반 정수에 대한 확률특성치에 대한 국내외 연구결과를 토대로 쉘드터널 세그먼트 라이닝을 고려한 비교·검토모델을 선정하였다. 스프링계수 산정식과 지반 경계조건 변화에 따른 구조해석, 신뢰성해석 및 해석결과를 토대로 검토모델의 파괴확률 및 신뢰성지수를 산정하고 민감도 분석을 수행하였다.

2. 쉘드터널 세그먼트 라이닝 설계변수 및 확률특성치 고찰

쉘드터널 세그먼트 라이닝의 하중 및 저항특성과 더불어 경계조건 변화에 따른 변동성을 고려한 분석을 위해 하중 및 저항특성에 대해서 기존 연구자료를 조사하였다.

Byun et al. (2019)은 Terzaghi 이론식과 관계된 변수인 토피고, 이완영역의 폭, 축압계수, 터널의 높이, 터널의 폭, 단위중량, 내부마찰각, 점착력 중에서 하중조건과 관련된 단위중량, 내부마찰각, 점착력을 확률변수로 결정하고, 쉘드터널 세그먼트 라이닝의 설계변수인 이완하중에 대해 MCS (Monte Carlo Simulation)기법을 활용하여 확률 특성치 결정에 대해 연구를 수행한바 있다. 이와 함께 부재 저항에 대한 확률특성치는 고려 대상모델의 단면강도와 기존에 국내외에서 철근콘크리트 부재 저항관련 확률특성치에 대한 많은 연구가 수행되어 온 바 있으므로 본 연구에서는 이를 고려하였다.

Kim et al. (2020)은 한계상태설계법 지반정수 산정을 위한 풍화대 강도특성 측정장치의 개발 및 현장적용에 관한 연구를 통해 국내 38개 사례조사를 토대로 지반 물성에 대한 확률특성치를 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 지반 경계조건 변동성 검토를 위한 자료로 활용하였다. 또한, 이러한 지반 확률특성치 자료와 함께 경계조건을 주요 변수인 스프링상수 적용을 위해 지반스프링은 Muirwood식, 전단스프링은 일본 토목구조물 설계표준·동해설식, 회전스프링은 일본 토목구조물 설계표준·동해설식, Leonhardt식, Jansen식을 비교·검토하였다.

2.1 하중

본 연구에서는 하중조건과 관련된 단위중량, 내부마찰각, 점착력을 확률변수로 결정하고, 쉴드터널 세그먼트 라이닝의 설계변수인 이완하중에 대해 MCS기법을 활용하여 확률 특성치를 결정한 Byun et al. (2019)의 4가지 케이스의 연구결과 중에서 다음 Table 1과 같은 터널 직경, 심도 및 구조물 형상 등 본 연구의 검토대상 쉴드터널 특성에 적합한 Case IV에 대해 고찰하고 이완하중에 대한 확률특성치를 고려하였다.

Table 1. Soil material probability variables

(a) Review case

Case	Tunnel diameter (m)	Tunnel depth (m)
Case IV	7.2	20.0

(b) Calculated results COV of load acting on the tunnel

	Soil type	Mean (kPa)	SD	COV (%)
Case IV	Weathered soil 1 ($N \leq 15$)	238.89	19.21	0.080
	Weathered soil 2 ($15 < N \leq 30$)	232.30	18.01	0.078
	Weathered soil 3 ($N > 30$)	229.51	17.12	0.075
	Weathered rock	215.77	17.16	0.080

2.2 부재 저항 확률특성치

철근콘크리트의 부재저항에 대한 확률특성치에 대한 연구 가운데 Nowak and Collins (2013)은 Revised load and resistance factors for the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications에서 철근콘크리트부재의 모멘트와 전단에 대해 각 0.13과 0.155의 변동계수를 제안한 바 있으며, 국내에서는 Kim and Kim (2011)이 철근콘크리트 부재 저항능력의 통계적 모델 개발에 대한 연구를 통해 휨과 압축을 받는 부재의 콘크리트와 철근의 강도 변화에 따라 Table 2와 같이 분석하였다. Nowak and Collins (2013)에 의한 결과와 비교해 국내 연구결과의 변동계수가 작은 것으로 나타났으나, 본 연구의 검토대상 부재가 프리캐스트로 제작되고 휨과 함께 축력을 동시에 받는 부재임을 감안하여 본 연구에서는 Kim and Kim (2011)이 제안한 저항특성치를 고려하였다.

Table 2. Statistical models for resistance of RC concrete member

Index		Compressive strength			
		OPC		High-strength concrete	
		Bias coefficient	Coefficient of variation	Bias coefficient	Coefficient of variation
Rebar f_y (MPa)	300	1.128~1.215	0.073~1.109	1.092~1.122	0.073~0.097
	500	1.048~1.183	0.066~0.108	1.072~1.107	0.073~0.094

2.3 지중구조물 경계조건 변화를 고려하기 위한 지반 물성 확률특성치

Kim et al. (2020)은 한계상태설계법 지반정수 산정을 위한 풍화대 강도특성에 대한 연구를 통해 국내지반 물성에 대한 확률특성치를 다음 Table 3과 같이 제시하였다. 지반변형계수의 변동계수가 다른 지반 물성치에 비해 크게 분석된 것을 확인할 수 있으며 점착력, 마찰계수 및 단위중량의 순으로 변동계수가 작은 것으로 분석되었다.

Table 3. Summary of measured parameters

Index	Layer	Range of measured value	Average	Standard deviation	Coefficients of variation	Number of data
Unit weight (kN/m ³)	Weathered soil	18.0~19.8	19.0	0.502	0.026	20
	Weathered rock	19.4~22.0	20.7	0.841	0.036	27
Deformation modulus (MPa)	Weathered soil	30.0~91.5	50.7	17.289	0.341	17
	Weathered rock	68.7~794.0	351.3	150.978	0.430	58
Cohesion (kPa)	Weathered soil	11.0~31.4	22.1	4.892	0.221	51
	Weathered rock	19.5~37.0	30.3	3.781	0.125	48
Frictional angle (degree)	Weathered soil	22.4~34.0	28.4	2.646	0.093	68
	Weathered rock	24.0~37.2	32.0	2.513	0.078	48

2.4 쉘드터널 세그먼트 라이닝의 지반경계조건을 위한 지반스프링

쉘드터널 세그먼트 라이닝의 경계조건 결정을 위한 지반스프링과 세그먼트 연결부의 회전스프링과 전단스프링은 다음 Table 4와 같이 산정하였으며, 정량적으로 산정된 지반스프링을 평균값(Mean Value)로 고려하고 Table 3에서 고찰된 지반물성 확률특성치로부터 지반스프링의 변동계수로 고려하였다.

Table 4. Springs coefficient for boundary conditions

Classification	Formula		Applied value
Soil spring	Muirwood	$k_r = \frac{3E_0}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c}$	Upper: 1,689 kN/m Bottom: 2,927 kN/m

Table 4. Springs coefficient for boundary conditions (continued)

Classification	Formula		Applied value
Rotational spring	Japan standard specification	$k_m = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h-2x)bE_c}{24}$	244,234 kN · m/θ
	Leonhardt	$k_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{9a^2bE_0}{8}m(1-2m)^2$	460,954 kN · m/θ
	Janssen	$k_r = \frac{bl_t^2E}{12} \left(M \leq \frac{Nl_t}{6} \right)$	460,954 kN · m/θ
Shear spring	Japan standard specification	Radial: $k_{sr} = \frac{192EI}{(2b)^3}$ Circumferential: $k_{st} = \frac{L_jhE}{b(1+\nu)}$	Radial: 378,794 kN/joint Circumferential: 2,898,933 kN/joint

3. 지반 경계조건 변화를 고려한 검토 대상 모델 선정

3.1 지반 경계조건 변화 고려 방안

본 연구를 위한 대상모델은 다음 Fig. 1에 제시한 검토단면과 제원을 고려하였으며, 대상모델에서 지반 경계조건은 상하부를 구분하여 지반스프링을 고려하였다. 지반조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 지표면에서 쉘드터널 천단부까지의 토피고는 약 19 m로 매립층과 점토층으로 구성되어 있으며, 지하수위는 G.L. -8 m이다. 현장계측 대상 쉘드터널은 퇴적모래층을 관통하여 시공되었으며 쉘드터널 하부는 풍화토로 구성되어 있다.

또한 세그먼트 제원은 외경 7,770 mm, 내경 7,070 mm, 두께 350 mm, 길이 1,500 mm이며, 콘크리트 강도 45 MPa, 철근 강도 400 MPa로 설계되었다. 세그먼트 1개 링은 4개의 A-type 세그먼트, 2개의 B-type 세그먼트 및 1개의 key 세그먼트로 구성되어 있다.

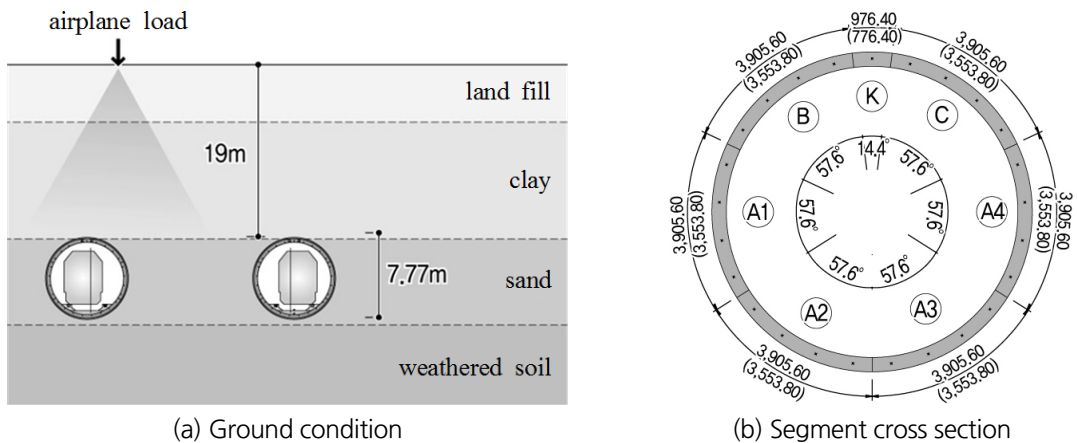


Fig. 1. Ground condition and segment cross section for models to be reviewed

지중구조물의 경계조건인 지반스프링을 고려한 해석모델은 다음 Fig. 2에서와 같이 모델링하였으며, 이때 수직 및 수평방향의 하중에 따른 2축의 변형을 고려하여 지반스프링은 원형부재의 법선방향 압축전담스프링으로 고려할 수 있도록 모델링하였다. 또한 지반스프링은 지층구성에 따라 상하부를 구분하여 적용하였다.

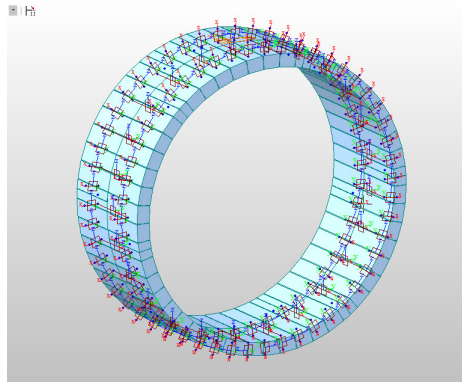
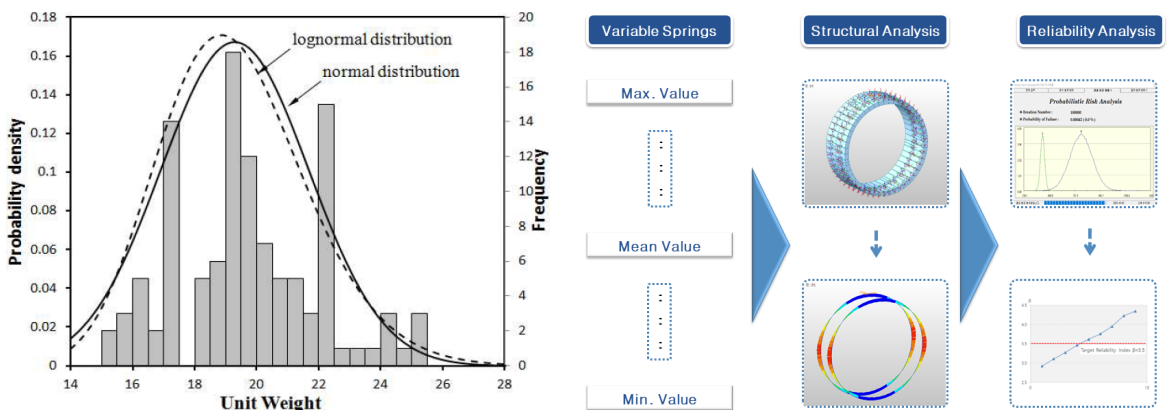


Fig. 2. Boundary condition and segment lining modeling

3.2 지반 경계조건을 고려한 검토모델

교량 등과 같은 상부구조물의 경우 지지조건을 일반적으로 확정적 경계조건으로 고려해도 무방한 것과는 달리 지중구조물의 경우 지반스프링은 토사층 및 암석층 등과 같이 지반특성에 따라 경계조건의 변동성이 발생할 수 있다.

지반스프링은 기존 연구, 현장사례 및 실험 등을 통해 정량화한 경험적 제안식은 단위중량, 변형계수, 내부마찰각 등이 지반조건에 불확실성과 변동성에 따라 다음 Fig. 3(a)와 같이 확률분포특성을 가지고 있는 것으로 볼



(a) Probability properties of unit weight (MOLIT, 2014) (b) Analysis considering ground probability characteristics

Fig. 3. Analysis with probability characteristic of boundary condition

수 있으므로, Fig. 3(b)와 같이 경계조건의 확률특성을 고려한 구조해석과 신뢰성분석이 필요할 것으로 판단된다.

경계조건의 확률특성에 따른 스프링상수의 변화를 고려한 검토대상모델을 선정하기 위해 Table 5에서 보이는 바와 같이 스프링계수 변화는 중앙값(Mean)과 변동계수 0.341를 적용한 최빈치인 최소값(Min)과 최대값(Max)을 기본으로 산정하였으며, 추세변화를 고찰하기 위해 중앙값을 기준으로 최소 및 최대구간에서 표준편차 내에서 세분화하여 각각 3개의 중간값들을 추가로 산정하여 총 9개의 대상모델에 대해 적용·검토하였다. 또한, Table 5에서 정리된 스프링계수를 적용한 각각의 모델들을 통해 지반스프링의 변화에 따른 휨모멘트와 축력의 부재력에 대한 영향을 고찰하기 위해 9개의 대상모델에 대한 구조해석을 각각 수행하였다.

Table 5. Considering spring coefficient of models

Index	Min	Between of Min. to Mean			Mean	Between of Mean to Max.			Max
		1/4	2/4	3/4		1/4	2/4	3/4	
Upper	1,113	1,257	1,401	1,545	1,689	1,833	1,977	2,121	2,265
Bottom	1,929	2,179	2,428	2,678	2,927	3,177	3,426	3,676	3,925

4. 구조해석 및 부재력 검토

4.1 대상 모델의 구조해석

검토대상 모델들에 대한 구조해석은 Fig. 4(a)와 같이 구조물 자중과 연직방향 토압 및 항공기 활하중과 수평방향 토압 및 수압을 고려하였다. 이때 연직방향 하중, 지반반력에 의한 하중, 수평토압 및 수압에 의한 하중 그리고 조합된 하중에 대한 하중재하도는 Fig. 4(b)와 같다.

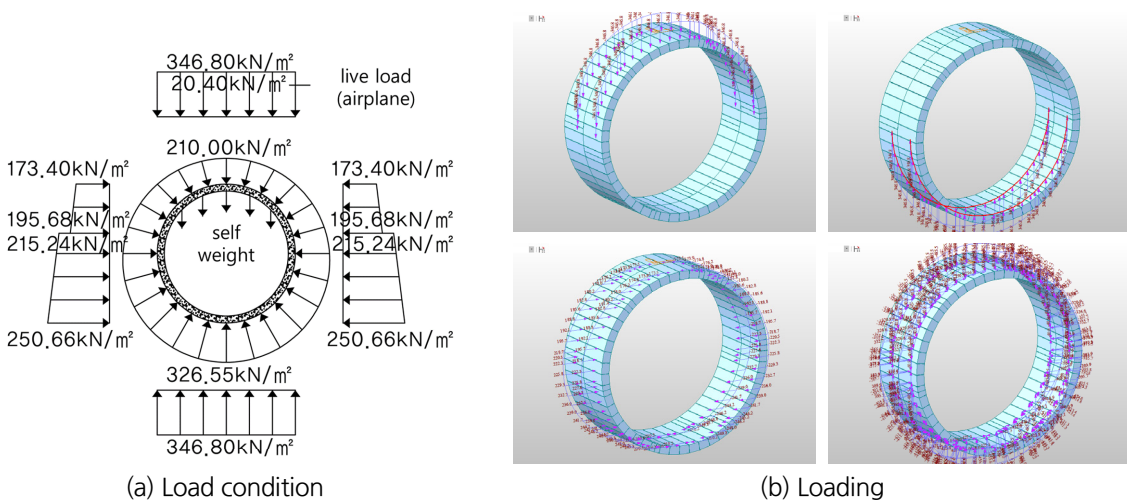


Fig. 4. Loads condition and loading for analysis

지중구조물은 토층 및 암반층의 저항범위와 이완범위가 하중의 종류와 방향에 따라 달라지는 지반경계조건의 특성을 고려하여 압축전담스프링을 적용하였으며, 개별하중의 재하에 따른 단면력을 조합하는 중첩의 원리를 지중구조물에 적용하는 것은 적합하지 않으므로 하중조합에 따른 전체 하중을 동시에 재하하여 부재력을 산정하였다. 즉 Fig. 4(b)의 조합된 하중에서와 같이 하중조합별로 개별하중들을 조합한 하중을 모두 적용한 모델로 구조 해석을 수행하였으며, 이때 고려된 하중조합은 자중, 토압, 수압 및 활하중을 고려한 3가지 하중조합으로 다음 Table 6과 같다.

Table 6. Load combinations

Index	Load combinations
LC1	Self weight + Earth pressure
LC2	Self weight + Earth pressure + Hydrostatic pressure
LC3	Self weight + Earth pressure + Hydrostatic pressure + Live load

4.2 지반스프링 변화에 따른 구조해석 결과

대상모델들에 대한 구조해석을 수행하여 다음 Fig. 5에서와 같이 하중조합별 천정부(U)와 측벽부(S)에 발생하는 휨모멘트와 축력을 분석하였다. 해석결과 검토를 통해 스프링계수 변화에 따른 단면력의 변화는 다음 Fig. 6에서와 같이 휨모멘트의 경우에는 유의미한 차이가 발생하는 반면에 축력은 미소한 변화만 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과로부터 스프링계수 변화에 따른 작용모멘트의 변화에 따른 안전성에 대한 검토와 고찰이 필요한 것으로 판단된다(Table 7 참조).

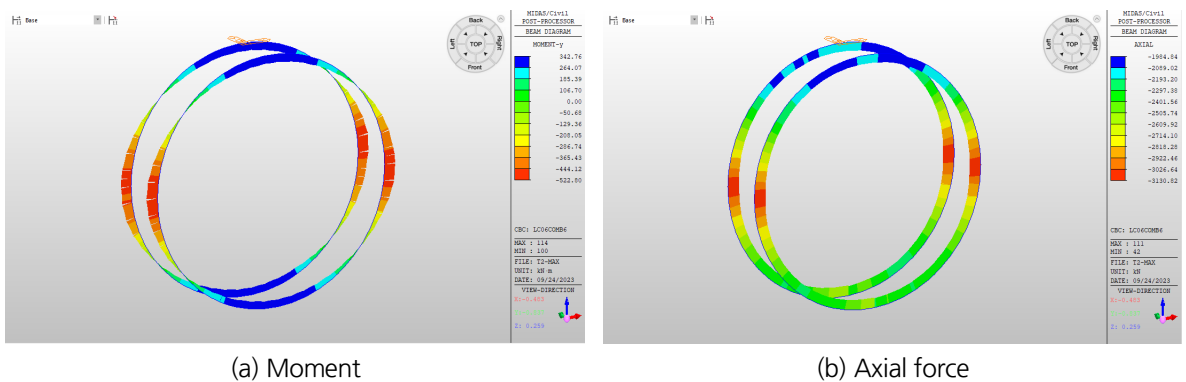


Fig. 5. Diagrams of moments and axial forces

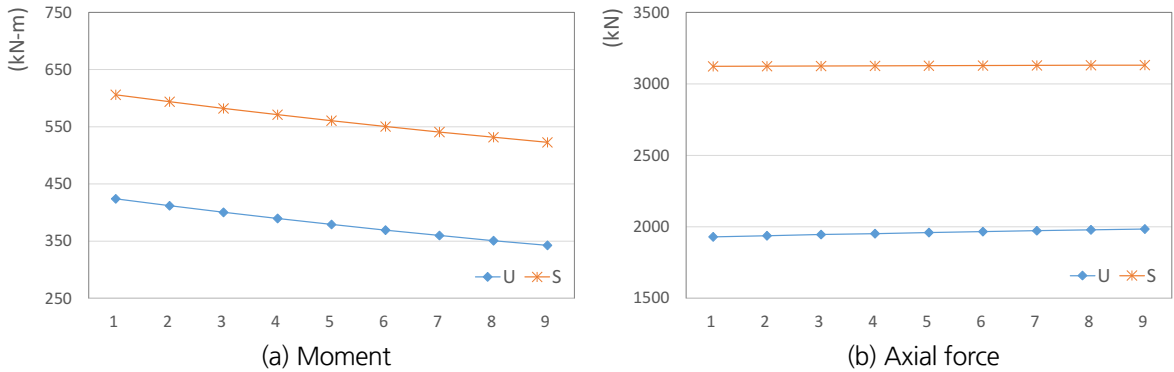


Fig. 6. Results of member forces due to applied load combination

Table 7. Analysis result with spring coefficient

Index	Min	Between of Min. to Mean			Mean	Between of Mean to Max.			Max	
		1/4	2/4	3/4		1/4	2/4	3/4		
M (kN · m)	U	423.99	411.95	400.5	389.60	379.21	369.30	359.83	350.86	342.76
		1.118	1.086	1.056	1.027	1.000	0.974	0.949	0.925	0.904
	S	606.03	593.83	582.23	571.15	560.60	550.50	540.85	531.61	522.80
		1.081	1.059	1.039	1.019	1.000	0.982	0.965	0.948	0.933
P (kN)	U	1,929.42	1,937.57	1,945.32	1,952.72	1,959.76	1,966.50	1,972.93	1,979.00	1,984.84
		0.985	0.989	0.993	0.996	1.000	1.003	1.007	1.010	1.013
	S	3,122.13	3,123.39	3,124.59	3,125.74	3,126.83	3,127.88	3,128.88	3,129.86	3,130.82
		0.998	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001

5. 신뢰성분석 및 고찰

5.1 신뢰성분석

구조해석결과로부터 경계조건의 변화에 따른 작용모멘트의 크기가 유의미하게 변화함을 확인하였으며, 이를 토대로 지중구조물의 구조안전성에 대해 고찰이 필요한 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 신뢰성분석을 통해 지반스프링 변화모델들의 하중과 저항에 따른 파괴확률을 산정하고 파괴확률에 따른 신뢰성지수를 산정하여 목표신뢰성지수와 비교분석을 통해 지반경계조건의 불확실성에 대한 고려와 지반스프링의 변화에 따른 구조안전성 확보에 대한 고찰을 수행하였다. 또한, 이러한 파괴확률 산정을 위해서 Fig. 7(a)와 같은 MCS (Monte Carlo Simulation) 기법을 활용하였으며, Fig. 7(b)와 같은 MCS 기법 소프트웨어를 이용하여 모델별/부재위치별 파괴확률을 추정하였으며 반복 회수는 산정값의 신뢰성 확보를 위해 100만회 수행하였다.

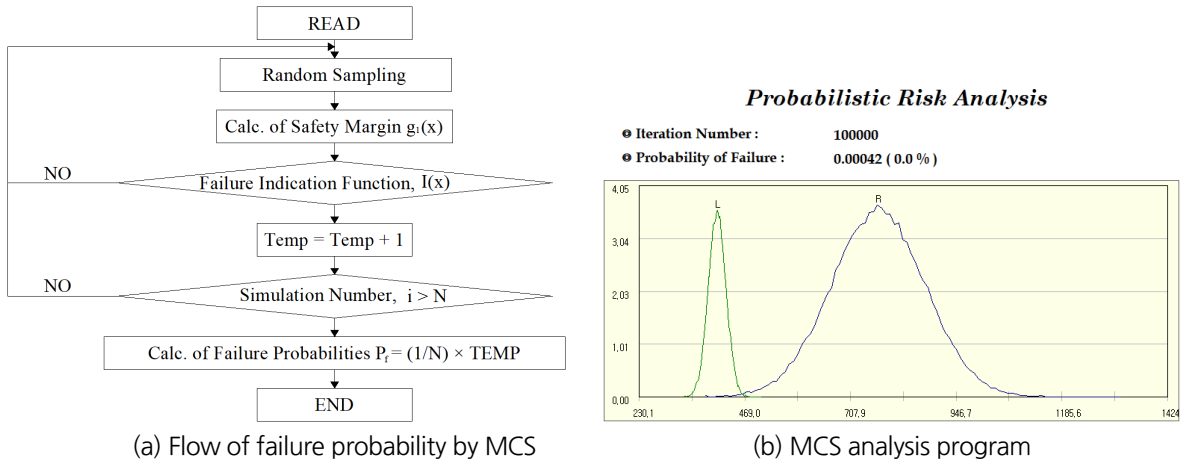


Fig. 7. MCS and analysis program

신뢰성분석을 위한 하중 및 저항의 확률특성치는 축력을 받는 프리캐스트 부재임을 고려하여 다음 Table 8에 서와 같이 적용하였으며, 검토 대상모델의 작용력은 다음 Fig. 6에서 CASE별로 정리된 값을 고려하였다.

Table 8. Probabilistic variables of loads and resistances

Index	Review conditions	Mean	COV (coefficient of variation)
Load	2 members Each other 9 models	Var. for models	0.075
Resistance	$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$ H16@150	826.47 kN · m	0.073

5.2 신뢰성분석 결과

지반 경계조건의 변동성을 고려한 모델의 파괴확률을 MCS기법을 이용하여 산정하였고 다음 Table 9 및 Fig. 8에 정리하였으며, 천단부(U)에서는 저항강도 대비 작용력이 작아 경계조건의 변화와는 무관하게 모두 파괴확률(P_f)은 0으로 분석되었으며, 측벽부(S)에서는 경계조건의 변화에 따라 파괴확률(P_f)이 변동하고 있는 것으로 검토되었다.

Table 9. Probabilities of failures considering members of model

	Min.	Between of Min. to Mean			Mean	Between of Mean to Max.			Max.
		1/4	2/4	3/4		1/4	2/4	3/4	
S	0.001732	0.000937	0.000530	0.000267	0.000148	0.000086	0.000039	0.000012	0.000007
U	0.000000								

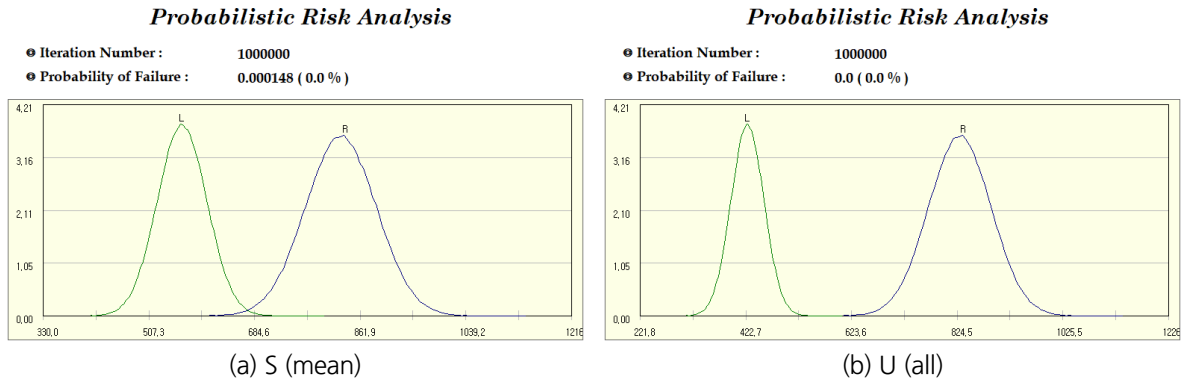
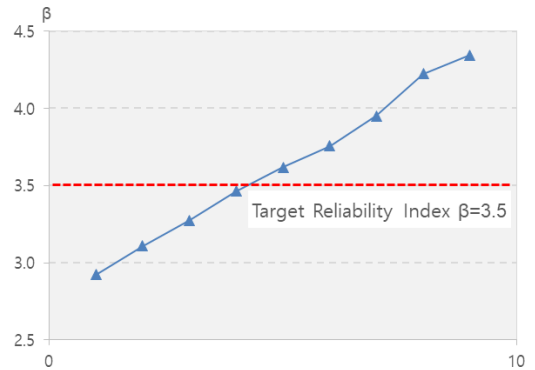


Fig. 8. Failure probability by member position according to spring coefficient

스프링상수 변화에 따른 측벽부의 파괴확률과 신뢰성지수는 Table 10과 같으며, 이를 목표신뢰성지수와 비교하여 구조물의 안전성에 대해 고찰하였다. 목표신뢰성지수는 NCHRP Report 368에서 제안한 상시 목표신뢰성지수 3.5를 기준으로 하였으며, Fig. 8의 그래프에서 확인된 바와 같이 경계조건의 변화에 따라 목표신뢰성지수에 미치지 못하는 경우가 발생할 수도 있는 것으로 분석되었다.

Table 10. Failure probability and reliability index

Index	Probability of failure (P_f)	Reliability index (β)
Min	0.001732	2.92
min-1/4	0.000937	3.11
min-2/4	0.000530	3.27
min-3/4	0.000267	3.46
Mean	0.000148	3.62
max-1/4	0.000086	3.76
max-2/4	0.000039	3.95
max-3/4	0.000012	4.22
Max	0.000007	4.34



6. 결론

본 연구에서는 쉘드터널 세그먼트 라이닝의 하중 및 저항특성과 더불어 지반경계조건의 변동성에 따른 모델들을 선정하고 구조해석을 수행하여 부재단면력의 변화를 확인하였으며, 신뢰성분석을 통해 파괴확률을 추정하고 신뢰성지수를 산정하여 목표신뢰성지수와 비교분석을 수행하였다. 이러한 분석결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 검토대상 모델들에 대한 구조해석을 수행하여 하중조합별 조합하중에 따른 선단부와 측벽부에 대한 모멘트와 축력에 대해 고찰한 결과 스프링상수 변화에 따른 단면력의 변화에 있어 모멘트는 유의미한 차이가 발생하는 반면 축력은 미소한 변화만 발생하는 것으로 분석되었다.
2. 스프링상수 변화에 따른 측벽부의 파괴확률과 신뢰성지수에 대해 검토하고 목표신뢰성지수 3.5를 기준으로 비교하여 구조물의 안전성에 대해 고찰한 결과, 지반경계조건이 Min. 측에 가까이 갈수록 목표신뢰성지수에 미치지 못하는 경우가 발생할 수도 있는 것으로 분석되었다.
3. 본 연구에서는 지중구조물의 경계조건인 지반스프링을 고려한 해석모델로 지반 경계조건의 변동성을 확률특성에 따른 Mean값과 변동계수를 고려한 지반스프링지지 조건의 모델과 분석방향을 제안하였으며, 이를 토대로 지반조건의 변화를 고려한 쉴드터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계를 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제: 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

저자 기여도

이규필은 연구 개념 및 자료조사, 구조해석, 원고 작성을 하였고, 박영빈은 개념설계 및 신뢰성분석, 원고 작성을 하였다.

References

1. Byun, Y., Kim, D., Lee, S. (2019), “Determination of the coefficient of variation of parameters for the reliability design of shield tunnel segment lining”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 6, pp. 875-885.
2. Kim, J.S., Kim, J.H. (2011), “Development of statistical models for resistance of reinforced concrete members”, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 31, No. 4A, pp. 323-329.
3. Kim, K.S., Kim, J.H., Choi, S.O. (2020), “Development and field application of apparatus for determination of limit state design strength characteristics in weathered ground”, Tunnel and Underground Space, Vol. 32, No. 2, pp. 164-179.
4. MOLIT (2014), Research on modifying design criteria of structure foundation for standardization, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, pp. 329-333.
5. Nowak, A.S., Collins, K.R. (2013), Reliability of Structures, CRC Press, London, pp. 278-292.