신뢰성 기반 쉴드 터널의 한계상태설계를 위한 지진하중 효과의 변동계수에 관한 연구

박영빈[1] · 김 도[2] · 변요셉[3] · 이규필[3*]

[1]정회원, 우성디앤씨 부사장
[2]비회원, 우성디앤씨 이사
[3]정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

A study on the coefficients of variation of seismic load effect for the limit state design of shield tunnel based on the reliability analysis

Young-Bin Park[1] · Do Kim[2] · Yosep Byun[3] · Gyu-Phil Lee[3*]

[1]Vice President, Woosung D&C
[2]Director, Woosung D&C
[3]Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

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

Abstract

In this study, coefficient of variation for the seismic load effect on the segment lining was calculated. The statistical characteristics of the soil property were analyzed for the probability characteristics of domestic soil. In order to calculate the coefficient of variation for the seismic load effect, the MCS technique was applied, and the closed-form equation was applied to calculate the seismic load effect. As a result of calculating the coefficient of variation, the coefficient of variation of the seismic load effect on the weathered soil was analyzed in the range of 0.06~0.15, and the coefficient of variation was judged to be used as basic data for designing the limit state of the shield tunnel on seismic condition.

Keywords: Shield tunnel, Segment lining, Limit state design, Seismic load effect, Coefficient of variation

초 록

본 연구에서는 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계 시 세그먼트 라이닝에 작용하는 지진하중에 대한 변동계수를 산정하였다. 지반 정수의 통계적 특성치는 국내 지반의 확률특성치를 분석하여 단위중량에 대한 통계적 특성치를 산정하였으며, 전단탄성파 속도를 산정하기 위해 N값과 확률 특성치를 이용하였다. 지진하중 효과에 대한 변동

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
22(3)311-321(2020)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.3.311

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received April 2, 2020
Revised April 28, 2020
Accepted May 12, 2020

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 ⓒ 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

계수를 산정하기 위하여 MCS기법을 적용하였으며, 지진하중 효과 산정에는 closed-form식을 적용하였다. 변동계수 산정결과, 풍화토 지반에서 지진하중 효과의 변동계수는 0.06~0.15의 범위로 분석되었고, 변동계수는 지진을 고려한 쉴드 터널의 한계상태설계 시 기본자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 쉴드 터널, 세그먼트 라이닝, 한계상태설계법, 지진하중, 변동계수

1. 서 론

현재 토목분야 설계에 있어서 해외 선진국들은 신뢰성 이론을 기반으로 한 한계상태설계법을 적용하고 있으며, 또한, 국내에서도 교량 구조물 등이 신뢰성 이론을 기반으로 한 한계상태설계법을 적용하고 있다. 신뢰성 이론을 기반으로 한 한계상태설계에서는 하중 및 저항의 통계적 특성치를 설계에 반영하여 안전성 및 경제성을 확보할 수 있는 기준을 제시할 수 있다. 한계상태설계법을 적용한 설계에서는 하중, 저항 등 설계변수의 확률특성치를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하여 파괴확률 및 신뢰도지수를 산정한다. 이때 설계변수의 확률 특성치는 구조물의 안전성과 경제성에 큰 영향을 미치게 되며 특히 설계변수의 변동계수(Coefficient of Variation, COV)는 설계의 신뢰성을 좌우하게 된다. 이는 과대 또는 과소설계의 주요 원인이 되므로 합리적이고 경제적인 설계를 위해서는 설계변수의 불확실성, 즉 설계변수의 확률 특성치의 결정이 매우 중요하다.

쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계를 위해서는 하중에 영향을 미치는 지반 정수의 확률분포 특성치를 결정하는 것이 중요하다. 지반 정수에 대한 확률특성치는 국외에서는 Phoon and Kulhawy (1999)에 의해 연구가 수행되었고, 국내에서는 Yoon et al. (2008)에 의해 연구가 활발히 수행되고 있으나 이는 시험에 의한 지반 정수들의 확률특성치의 평가에 관한 것이다. Park et al. (2012)은 도시철도 개착터널의 내진성능 평가에서 지진하중 산정 시 표준관입시험에 의한 N값을 이용하여 지진하중을 분석하였다.

쉴드 터널분야에서 신뢰성해석 연구는 Han and Cho (2016)는 쉴드 TBM 터널 굴착 시 지표 침하에 대하여 지반물성치의 불확실성을 평가하고 신뢰성해석을 수행하고 지표 침하에 이용되는 설계정수의 신뢰도지수 및 파괴확률에 대한 민감도 분석을 수행하였다. Byun et al. (2019)은 쉴드 터널 세그먼트 라이닝에서 국내지반물성치의 확률분포특성치를 적용한 토압과 총 하중에 대한 변동계수를 제시하였다.

구조물 설계에서는 지반정수의 변동성뿐만 아니라 구조물에 작용하는 하중의 변동성이 중요하기 때문에 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계법에 의한 설계 시 지진하중에 대한 변동계수를 제시하였다.

2. 지진하중 해석

쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 지진하중 효과에 대한 확률적 특성치를 산정하기 위해서는 지반 및 지진하중에 대한 확률특성치를 이용하여 내진해석을 수행한다. 내진해석결과를 분석하여 지진하중효과에 대한 확률특성치를 산정하고 이를 이용하여 신뢰도 지수를 산정하게 된다. 그러나 지진하중 효과에 대한 확률특성치를 산정하기

www.kci.go.kr

위해 MCS를 50,000회 수행한다고 했을 때 50,000개의 해석모델을 만들어야 하고 구조해석을 수행하게 되므로 많은 시간이 소요되므로 간략한 closed-form식을 적용하여 쉴드 터널 세그먼트의 지진하중 시 변위와 단면력을 산정하였다.

본 연구에서는 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 지진 시 하중효과를 산정하기 위하여 지진 시 전단파에 의한 자유장의 변형 모델을 사용하여 지중구조물의 횡방향 지진 해석해를 제안한 Penzien and Wu (1998)의 closed-form 식을 적용하였다.

Penzien and Wu (1998)는 지진 시 원형 터널의 횡방향 타원변형과 래킹 변형으로 라이닝의 변위와 내력 계산식을 제안하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 지진 시 하중효과를 산정하는 식이다.

Table 1. Closed-form solution (Penzien and Wu, 1998)

	Equations (no-slip condition)
Variables	$G_m = \rho_m C_s^2$ $E_m = 2G_m(1+\nu_m)$ $V_s = R_{velo\,acce}\, a_s$ $\gamma_{\max} = V_s / C_s$
Parameters	$\alpha = \frac{24E_l I(3-4\upsilon_m)}{d^3 G_m(1-\upsilon_l^2)}$ $R = \frac{4(1-\nu_m)}{\alpha+1}$ $\triangle d_{lining} = \pm R\frac{\gamma_{\max} d}{2}$
Internal force	$T_{\max} = \frac{24E_l I \triangle d_{lining}}{d^3(1-\upsilon_l^2)}\cos 2(\theta+\frac{\pi}{4})(\theta=45°)$ $M_{\max} = \frac{6E_l I \triangle d_{lining}}{d^2(1-\upsilon_l^2)}\cos 2(\theta+\frac{\pi}{4})(\theta=45°)$

ρ_m, G_m, E_m : density, shear modulus, elastic modulus of ground
C_s : apparent velocity of S-wave propagation
a_s : the peak particle acceleration associated with S-wave
$R_{velo\,acce}$: the ratio of the peak velocity to the peak acceleration at the surface
$\gamma_{\max}$: maximum free-field shear strain
d, t, I and E_l : diameter, thickness, inertia moment and elastic modulus of the tunnel lining
$T_{\max}$, $M_{\max}$: maximum thrust force and bending moment for no-slip conditions

Hashash et al. (2001)에 의하면 Slip condition은 부드러운 토질에서만 적용가능하며 대부분의 터널에서는 full-slip과 no-slip의 사이의 값을 나타지만 full-slip조건에서는 최대 축력을 저평가하기 때문에 no-slip 조건을 적용하는 것을 권고하였으며 본 연구에서도 no-slip조건을 이용하여 지진 시 하중효과를 분석하였다.

www.kci.go.kr

3. 지진하중의 통계적 특성치 제시

Penzien and Wu (1998)의 closed-form식에 관계되는 변수는 지반의 단위중량, 포아송비, 탄성계수, 전단탄성계수, 전단파속도, 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 물성치 등이 있는데 Park et al. (2012)은 도시철도 개착터널의 내진성능평가에서 지반의 동적특성의 불확실성을 고려하기 위해 N값의 불확실성을 이용하였으며 표준관입시험에 의한 N값을 이용하여 전단파 속도(= 0.85 × ($80N^{1/3}$))를 산정하였다. 본 연구에서는 N값을 이용한 전단파속도와 국내지반물성특성치를 반영할 수 있는 단위중량을 변수로 고려하였다.

지반의 단위중량과 N치의 확률분포 특성치는 국내 도심지의 45개 현장의 지반조사 자료를 토대로 풍화토 구간에 대한 확률분포 특성치를 산정하였으며, 변수에 대한 확률분포 특성치는 Table 2에 나타내었다. 지반 물성치 중 N치의 변동계수는 Phoon and Kulhawy (1999)의 연구결과를 적용하여 지진하중에 대한 확률특성치를 산정하였다.

Table 2. Soil material probability variables

		Weathered soil 1 (N ≤ 15)	Weathered soil 2 (15 < N ≤ 30)	Weathered soil 3 (N > 30)
Sample		13	14	79
Unit weight (kN/m^3)	Mean	18.6	18.9	19.1
	SD	0.105	0.109	0.061
	COV	0.056	0.058	0.032
N	Mean	8	23	40
	COV	0.25~0.50		

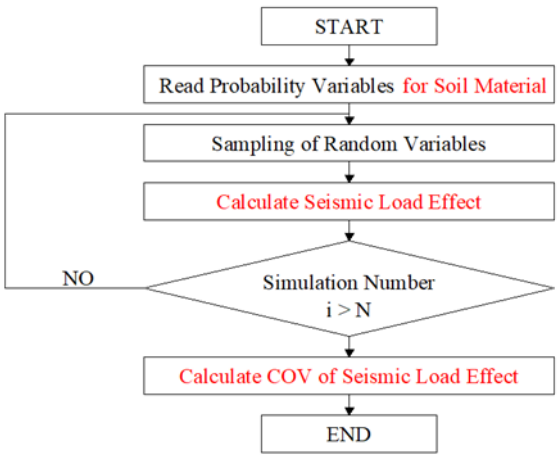


Fig. 1. Procedure of calculating COV (seismic load effect)

www.kci.go.kr

국내 지반의 확률특성치를 고려한 지진하중 효과에 관한 확률분포 특성 중 지진하중효과에 대한 변동계수는 Fig. 1의 MCS기법을 이용하여 산정하였으며, 지진하중 효과 산정은 Penzien and Wu (1998)의 closed-form식을 이용하였다. 도심지 소단면 터널식 공동구 단면 포함 기존 설계단면을 대상으로 지진하중 효과에 대한 확률 특성치를 산정하였으며, 검토 대상 단면은 Table 3과 같다. 검토 대상의 단면은 직경 3.40 m인 전력구 단면부터 7.90 m인 철도 터널 단면까지 검토 대상으로 하였다.

Table 3. Review cases

	Dia. of tunnel, D (m)	Lining thickness, T (m)	T/D (%)
Case 1	7.45	0.30	4.03
Case 2	7.22	0.30	4.16
Case 3	7.13	0.30	4.21
Case 4	7.90	0.35	4.43
Case 5	5.60	0.25	4.46
Case 6	7.30	0.35	4.79
Case 7	3.60	0.20	5.56
Case 8	3.50	0.20	5.71
Case 9	3.40	0.20	5.88

확률변수에 대해 난수들을 반복적으로 추출하여 지진하중에 대한 하중효과를 계산하였다. 시뮬레이션 횟수는 많이 수행할수록 정해가 가까운 값을 구할 수 있으나 많은 시간이 필요하므로 적정한 시행횟수를 산정하기 위한 예비 검토를 수행하였다. Case 8인 직경 3.5 m, 심도 20 m의 공동구 터널 조건으로 예비 검토를 수행한 결과 지진하중에 대한 하중효과의 평균값과 변동계수는 30,000회 이상 시 수렴하는 것으로 분석되었으며 본 연구에서의 50,000회 수행하여 결과를 분석하였다. Figs. 2, 3에서 수렴성 검토를 위한 예비 수행 결과이다.

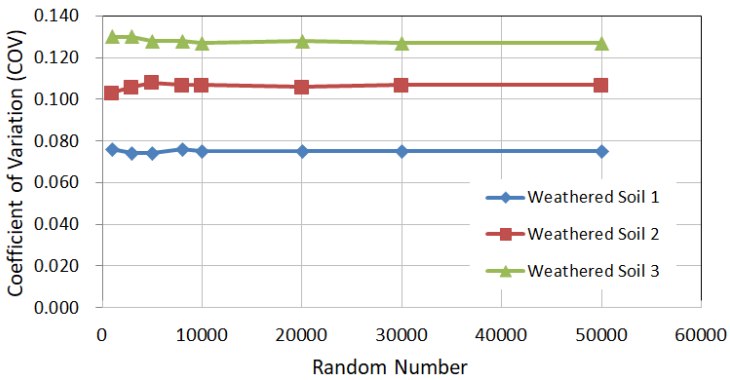


Fig. 2. Bending moment

www.kci.go.kr

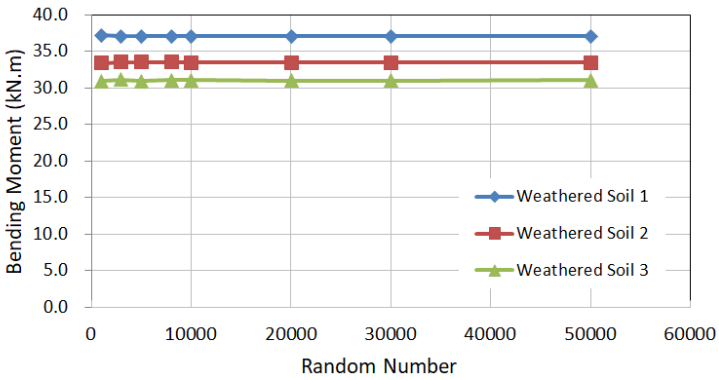


Fig. 3. COV of bending moment

도심지 소단면 터널식 공동구 단면 포함 기존 설계단면을 대상으로 지진하중효과에 대한 확률특성치 산정은 N치를 기준으로 3가지 토질조건에 대해 산정하였으며, N치에 대한 변동계수는 그 범위가 25%에서 50%로 매우 넓어 25%, 37.5%, 50%의 3가지 경우를 적용하여 분석을 수행하였다.

각 토질조건별, N치의 변동계수별 시뮬레이션 결과 그래프를 Figs. 4~7에 나타내었으며 N치가 증가하면 휨모멘트가 감소하고 휨모멘트에 대한 변동계수는 두께 대 직경비가 감소할수록, N치가 증가할수록 커지는 것으로 분석되었다.

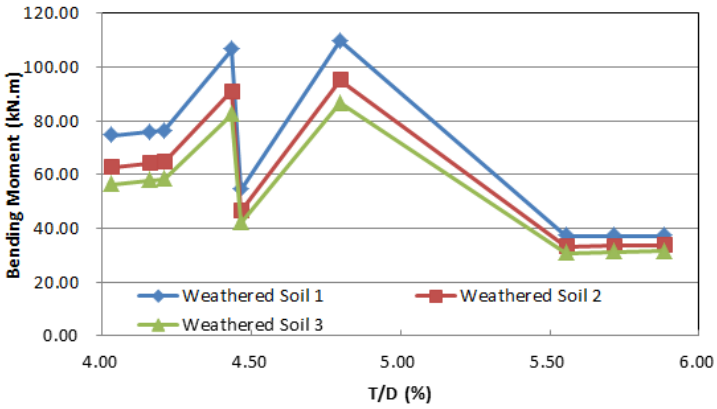


Fig. 4. Bending moment

www.kci.go.kr

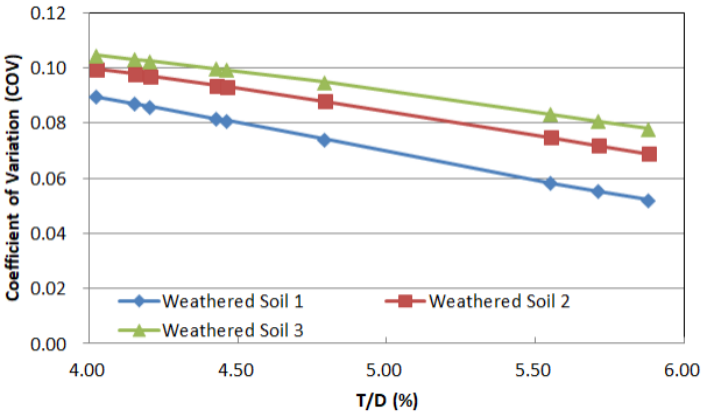


Fig. 5. COV of bending moment (COV of N-value = 25%)

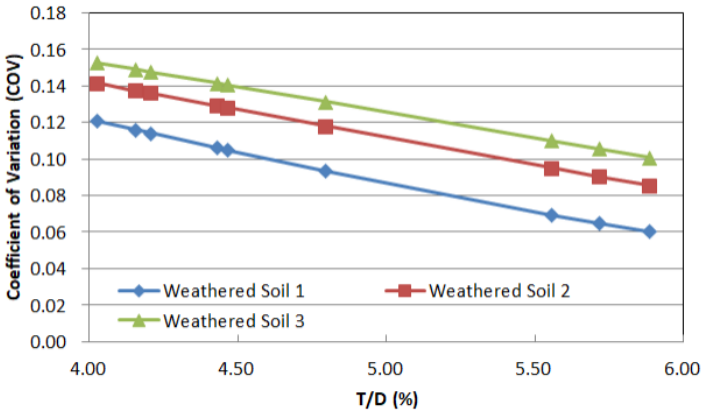


Fig. 6. COV of bending moment (COV of N-value = 37%)

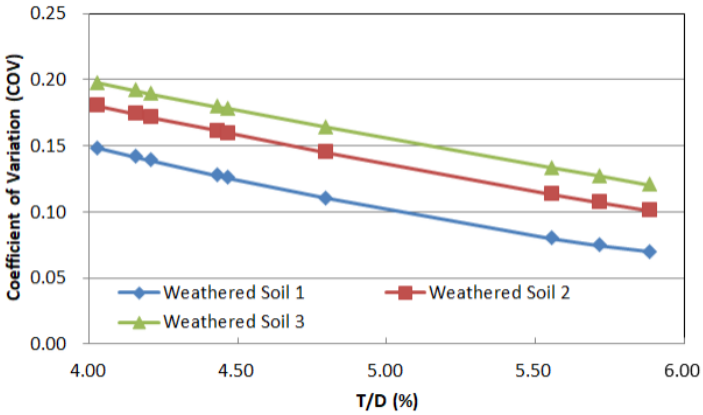


Fig. 7. COV of bending moment (COV of N-value = 50%)

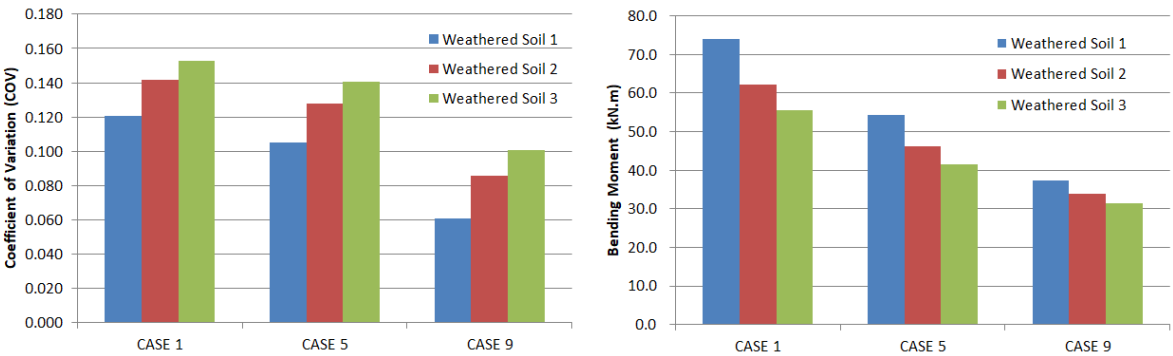
www.kci.go.kr

Table 4에는 N치의 변동계수는 37% 적용하였을 때 각 토질 조건별 지진하중에 효과에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Table 4. Results of COV and bending moment by variation of N-value (Case 1, Case 5, Case 9, COV of N-value = 37%)

Bending moment	T/D (%)	Weathered soil 1 (N < 15)		Weathered soil 2 (15 < N < 30)		Weathered soil 3 (N > 30)	
		Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV
Case 1	4.027	74.019	0.121	62.137	0.141	55.525	0.153
Case 5	4.464	54.250	0.105	46.276	0.128	41.653	0.141
Case 9	5.882	37.288	0.061	33.811	0.086	31.335	0.101

터널의 두께 대 직경비를 기준으로 Case 1, Case 5, Case 9에 대하여 지진하중 효과(휨모멘트)에 대한 평균 및 변동계수 산정결과 평균은 풍화토 1 (N ≦ 15)에서 각각 74.019 kN · m, 54.250 kN · m, 37.288 kN · m이며, 변동계수는 각각 0.121, 0.105, 0.061로 분석되었다. 풍화토 2 (15 < N ≦ 30)의 경우 평균은 각각 62.137 kN · m, 46.276 kN · m, 33.811 kN · m이며, 변동계수는 각각 0.141, 0.128, 0.086으로 나타났다(Fig. 8(a) 참조). 풍화토 3 (N > 30)에서의 산정결과 평균은 각각 55.525 kN · m, 41.653 kN · m, 31.335 kN · m이며, 변동계수는 각각 0.153, 0.141, 0.101로 산정되었다. N치가 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수 값이 증가하는 경향을 보였으며, 두께 대 직경비가 감소할수록 즉 단면 크기가 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수가 증가하는 것으로 확인할 수 있었다(Fig. 8(b) 참조).



(a) COV (b) Bending moment

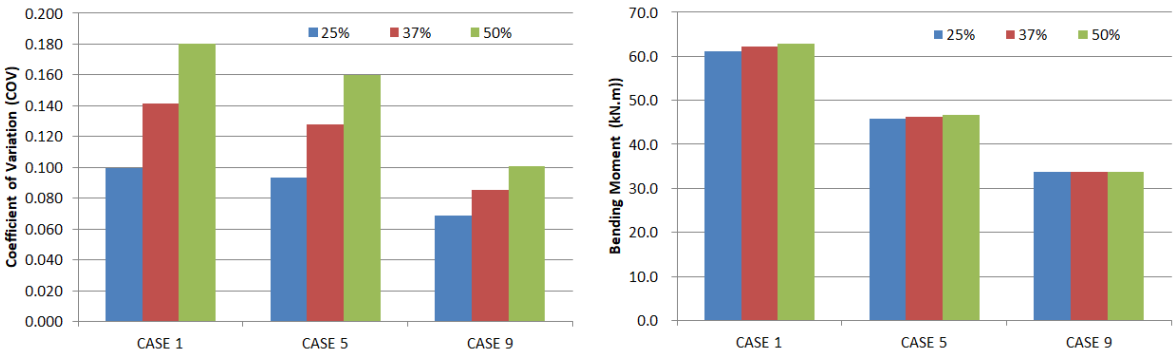
Fig. 8. The COV and bending moment by variation of N-value (Case 1, Case 5, Case 9, COV of N-value = 37%)

Table 5와 Fig. 9에는 풍화토 2 조건에서 N치의 변동계수 변화에 따른 지진하중 효과(휨모멘트)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. N치의 변동계수가 증가함에 따라 지진하중 효과에 대한 변동계수가 증가하는 것으로 분석되었으며, 지진하중 효과의 평균에는 영향이 없는 것으로 검토되었다.

www.kci.go.kr

Table 5. Results of COV and bending moment by COV of N (weathered soil 2)

Bending moment	T/D (%)	COV of N = 0.25		COV of N = 0.37		COV of N = 0.50	
		Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV
Case 1	4.027	61.191	0.100	62.137	0.141	62.783	0.180
Case 5	4.464	45.691	0.093	46.276	0.128	46.618	0.160
Case 9	5.882	33.661	0.069	33.811	0.086	33.779	0.101



(a) COV (b) Bending moment

Fig. 9. The COV and bending moment by variation of COV of N-value (Case 1, Case 5, Case 9, 15 < N < 30)

각 조건별 COV 검토 결과를 Table 6에 정리하였으며 국내 지반특성을 적용한 지진하중에 대한 하중효과의 변동계수는 0.06~0.15의 범위로 산정되었다. N치가 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수값이 증가하고, 두께 대 직경비가 감소할수록 즉 단면 크기가 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수가 증가하는 것으로 나타났으며 N치의 변동계수값이 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수가 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 6. COV of bending moment (COV of N-value = 37%)

	Soil type	Mean (kN · m)	SD	COV
Case 1	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	74.019	8.935	0.121
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	62.137	8.788	0.141
	Weathered soil 3 (N > 30)	55.525	8.472	0.153
Case 2	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	75.339	8.746	0.116
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	63.53	8.736	0.138
	Weathered soil 3 (N > 30)	56.885	8.480	0.149
Case 3	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	75.85	8.653	0.114
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	64.082	8.709	0.136
	Weathered soil 3 (N > 30)	57.429	8.478	0.148

www.kci.go.kr

Table 6. COV of bending moment (COV of N-value = 37%) (continue)

	Soil type	Mean (kN · m)	SD	COV
Case 4	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	105.952	11.258	0.106
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	90.261	11.648	0.129
	Weathered soil 3 (N > 30)	81.196	11.485	0.141
Case 5	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	54.25	5.699	0.105
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	46.276	5.923	0.128
	Weathered soil 3 (N > 30)	41.653	5.853	0.141
Case 6	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	109.525	10.247	0.094
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	94.665	11.156	0.118
	Weathered soil 3 (N > 30)	85.729	11.254	0.131
Case 7	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	37.119	2.575	0.069
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	33.159	3.148	0.095
	Weathered soil 3 (N > 30)	30.506	3.352	0.110
Case 8	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	37.23	2.418	0.065
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	33.499	3.027	0.090
	Weathered soil 3 (N > 30)	30.927	3.262	0.105
Case 9	Weathered soil 1 (N ≦ 15)	37.288	2.259	0.061
	Weathered soil 2 (15 < N ≦ 30)	33.811	2.894	0.086
	Weathered soil 3 (N > 30)	31.335	3.16	0.101

4. 결 론

한계상태설계 기반으로 지진 시 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 설계를 하는데 필요한 하중인 지진하중 효과에 대한 변동계수를 제시하였다. 이를 위해 MCS 기법을 적용하여 Penzien and Wu (1998)의 closed-form식을 바탕으로 지진하중 효과의 변동계수를 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지진하중 산정 시 적용하는 지반 물성치에 대한 확률분포 특성인 평균, 표준편차, 변동계수는 국내 도심지 구간에 해당하는 지반조사자료를 분석하여 풍화토에 대한 확률 특성치를 산정하였다.
2. 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 지진하중 효과는 Penzien and Wu (1998)의 closed-form 식을 이용하여 산정하였으며, MCS 기법을 적용하여 쉴드 터널 세그먼트 라이닝의 지진하중 효과에 대한 변동계수를 산정한 결과, 국내 지반 특성을 적용한 풍화토 지반에서의 지진하중 효과에 대한 변동계수는 0.06~0.15 범위로 나타났다.
3. MCS 기법을 적용하여 쉴드 터널의 지진하중 효과에 대한 확률 특성치를 분석한 결과 N치가 증가할수록, 터널의 직경대 두께비가 감소할수록(단면크기가 증가할수록), N치의 변동계수값이 증가할수록 지진하중 효과에 대한 변동계수가 증가하는 것으로 나타났다.

www.kci.go.kr

4. 본 연구에서 제시된 변동계수를 적용하면 지진하중에 대한 파괴확률 및 신뢰도 지수를 산정하여 목표신뢰도 지수에 부합하는 설계가 가능하며 또한 지진 시 쉴드터널 세그먼트 라이닝의 한계상태설계를 위한 신뢰성분석 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 '도심지 소단면(φ3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술개발(20SCIP-B105148-06)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

저자 기여도

박영빈은 연구 개념 및 설계, 원고 작성을 하였고, 김도는 데이터 분석 및 원고 작성을 변요셉은 개념 설계, 데이터 수집 및 데이터 분석을 이규필은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였다.

References

1. Byun, Y.S., Kim, D., Lee, S.W. (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. Han, M.S., Cho, K.H. (2016), "Reliability analysis of surface settlement during shield TBM tunneling", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 3, pp. 305-318.
3. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., I-Chiang Yao, J. (2001), "Seismic design and analysis of underground structures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 4, pp. 247-293.
4. Park, J.H., Kang, Y.S., Lee, T.H. (2012), "Probabilistic seismic performance evaluation of open-cut tunnels for subway systems", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 3, pp. 41-48.
5. Penzien, J., Wu, C.L. (1998), "Stresses in linings of bored tunnels", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, No. 3, pp. 283-300.
6. Phoon, K.K., Kulhawy, F.H. (1999), "Characterization of geotechnical variability", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No. 4, pp. 612-624.
7. Yoon, G.L., Yoon, Y.W., Kim, H.Y. (2008), "Characteristic values of design parameters for geotechnical reliability design", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 24, No. 5, pp. 27-35.

www.kci.go.kr