

# 개정된 내진설계기준에 기반한 기존 도로 터널의 내진 성능 평가

이규필<sup>1</sup> · 박두희<sup>2\*</sup> · 강지은<sup>3</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 정교수

<sup>3</sup>비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석박통합과정

## Seismic performance evaluation of existing road tunnels based on revised seismic design code

Gyu-Phil Lee<sup>1</sup> · Du-Hee Park<sup>2\*</sup> · Ji-Eun Kang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, KICT

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

\*Corresponding Author : Du-Hee Park, [dpark@hanyang.ac.kr](mailto:dpark@hanyang.ac.kr)

### Abstract

Because of a new seismic design code has been enacted in 2023, there is a need to evaluate whether the road tunnels in operation satisfies the requirements of the new code. Four tunnels that are considered to be most susceptible to damage. Time history analyses are performed to quantify their seismic performances. The input ground motions generated to fit both 2007 and 2023 codes are used to evaluate the effect of the motions on the calculated responses. The analyses show that all tunnels perform favorably and satisfies the requirements successfully. Therefore, retrofit or reinforcement are deemed as unnecessary.

**Keywords:** Tunnel, Seismic design, P-M-V curve, Spectrum, Time history analysis

### 초 록

2023년에 터널내진설계기준이 개정됨에 따라 운영 중인 터널의 성능의 요구 수준 만족 여부가 필요하게 되었다. 본 연구에서는 지진에 대한 안전성이 취약하다고 판단되는 4 개의 터널에 대한 시간이력해석을 수행하여 이들의 내진성능을 평가하였다. 나아가 2007년 기준과 2023년 기준에 부합하는 지진파 적용 시 응답의 차이를 규명하였다. 평가 결과, 2023년 기준을 적용하는 경우 터널의 응답이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 개정된 기준 적용 시에도 모든 터널은 소요 내진성능을 확보한 것으로 나타났다. 따라서 개정된 기준을 적용 시에도 보수 또는 보강은 불필요할 것으로 판단된다.

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
25(6)525-540(2023)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.6.525>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 27, 2023

Revised November 9, 2023

Accepted November 14, 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

**주요어:** 터널, 내진설계기준, P-M-V 상관도, 스펙트럼, 시간이력해석

## 1. 서론

터널 내진설계에 대한 세부내용은 1999년 터널설계기준에 처음으로 제정되었다(MOLIT, 1999). 반면 1999년 이전에 시공·설계된 터널에는 내진설계가 적용되지 않았으며 이들의 안전성은 아직 평가된 사례가 전무하다(Ahn et al., 2013). 1999년 기준에는 굴착 터널에 대해서는 내진설계를 수행하지 않는 것을 원칙으로 하되 1) 토파가 작고 지반이 연약한 갱구부, 2) 갱구부 사면의 불안정에 따른 편도압 발생구간, 3) 지반의 지내력이 감소할 수 있는 구간에서는 내진설계를 수행할 수 있다고 제시되었다. 2007년 터널설계기준에서는 터널 갱구부 및 주요 접속부, 천층터널 및 비대칭 지형구간, 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간, 액상화가 우려되는 연약지반 내 터널 구간으로 대상 지반이 확대되었다(MOLIT, 2007). 1999년 그리고 2007년 기준 모두 지진하중은 내진설계기준 연구(II)의 표준설계응답스펙트럼으로 결정된다. 2023년에는 일반 내진설계기준이 개정되었다. KDS 17 10 00에서는 표준설계스펙트럼이 개정되었으며 지반운동 시간이력 산정에 대한 내용이 포함되었다. 실지진 기록을 사용하는 경우 하부 지반이  $S_1$  지반 또는 이에 준하는 보통암 지반에서 계측된 지진기록을 선정해야 하며 스펙트럼 보정할 수 있다고 제시되었다. 터널내진설계기준도 2023년에 개정되었다(MOLIT, 2018; MOLIT, 2023). 터널 내진설계 내용에는 큰 변화가 없으며 지진하중은 KDS 17 10 00의 표준설계스펙트럼을 사용하는 것으로 변경되었다(MOLIT, 2018).

일반적으로 지하 구조물은 지상 구조물에 비해 지진에 의한 피해에 상대적으로 안전하다고 알려져 있으나 지진하중이 조정됨에 따라 기존 내진설계기준에 대해서 성능이 이미 검토된 도로 터널의 재평가가 필요하게 되었다(Dowding and Rozan, 1978; Park et al., 2016). 또한 국내 실정에 맞는 터널의 내진설계의 연구를 통해 현실적인 내진설계의 제안이 활발하게 진행되고 있다(Park and Yoo, 2010; Ahn et al., 2013). 터널설계기준 적합성 여부가 확인된 터널들을 선정하여 2023년 KDS 27 17 00 표준설계스펙트럼을 적용하여 내진성능을 재평가하였다. 성능평가에는 설계지반운동 시간이력을 이용하며 지하구조물과 지반과의 동적 상호작용을 고려하는 가장 사실적인 기법으로 인정받는 시간이력해석법이 사용되었다. 시간이력해석법에는 일반적으로 평면변형률 조건을 적용한 2차원 해석이 사용된다(Yang et al., 2004; Amorosi and Boldini, 2009). 최근에는 머신러닝을 적용하여 터널의 내진성능을 평가한 사례도 발표되고 있다(Nguyen et al., 2022). 본 연구에서는 유한차분해석 프로그램을 사용하여 비선형 해석을 수행하였으며 터널 라이닝에 작용하는 축력, 전단력과 모멘트를 계산하여 손상을 평가하였다. 나아가 2007년 기준 지진하중을 적용한 결과와 차이를 분석하였다. 해석 결과를 토대로 기준의 개정에 따른 터널 응답 영향 정도를 분석하였다.

## 2. 대상터널 목록 및 물성

본 연구에서는 운영 중인 도로 터널 4개를 선정하여 내진성능을 평가하였다. 선정된 터널에 대한 상세 정보는 Table 1에 정리하였으며, 각 터널의 시점부, 종점부에 해당 지역의 깊이에 따른 전단파속도( $V_s$ )는 Fig. 1에 정리하였다. Case 1~4는 1999년 이전에 설계 준공된 터널들이며 내진설계가 도입되지 않은 터널 중 편토압이 작용하는 사례이다.

Table 1. Selected tunnel list

No.	National highway	Tunnel's name	Design completion date
1	Chungju national highway (Sangmo-Sooanbo)	Sooanbo Oncheon 1,2 tunnel	1992
2	Yeongju national highway (Yecheon-Poongsan)	Gopyeong tunnel	1994
3	Yeongju national highway (Bongwha-Beobjeon)	Changpyeong tunnel	1996
4	Gangneung national highway (Bookmyeon-Yongdae (2st))	Yongdae tunnel	2000

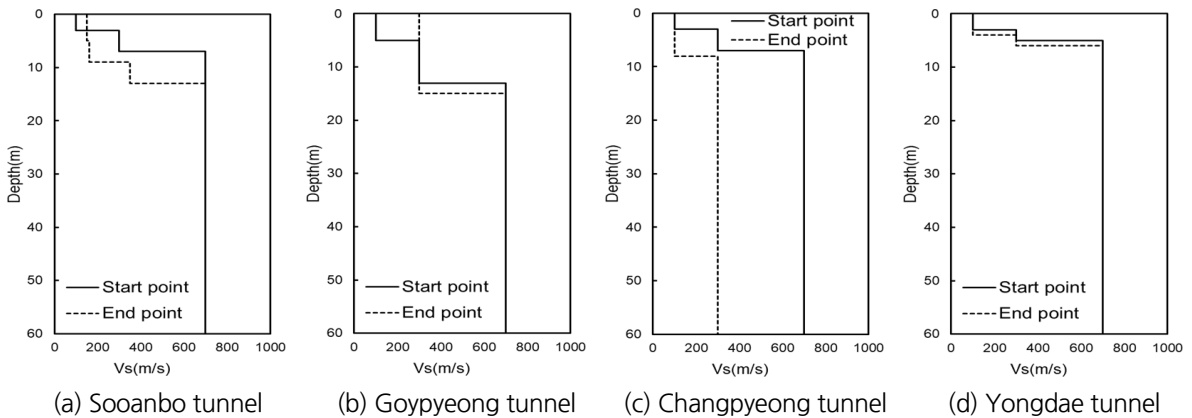


Fig. 1. Shear velocity of each tunnel for start point and end point

수안보온천 터널 시점부(STA. 2+720)는 시추정보 TB-3에 의거하여 토사층 1.5 m, 풍화암층 7.2 m, 그 하부는 연암층으로 모델링하였다. 터널 종점부(STA. 3+180)의 TB-6지역으로 토사층 1.5 m, 풍화토층 5 m, 풍화암층 4.4 m, 그 하부는 연암층으로 모델링하였으며 해당 터널의 횡단면도를 Fig. 2에 도시하였다.

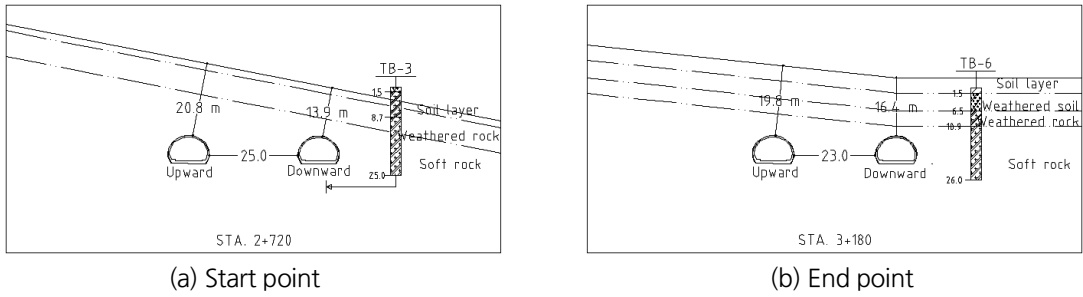


Fig. 2. Cross sections of Soosanbo tunnel

고평터널 시점부(STA. 7+480)는 시추정보 TB-1에 의하여 토사층 1 m, 풍화암층 7.5 m, 하부는 연암으로 모델링하였다. 고평터널 종점부(STA. 7+800)는 TB-2 시추 주상도에 의거하여 풍화암층 4 m, 그 하부는 연암으로 모델링하였다. 해당 터널의 해당 터널의 횡단면도를 Fig. 3에 나타내었다.

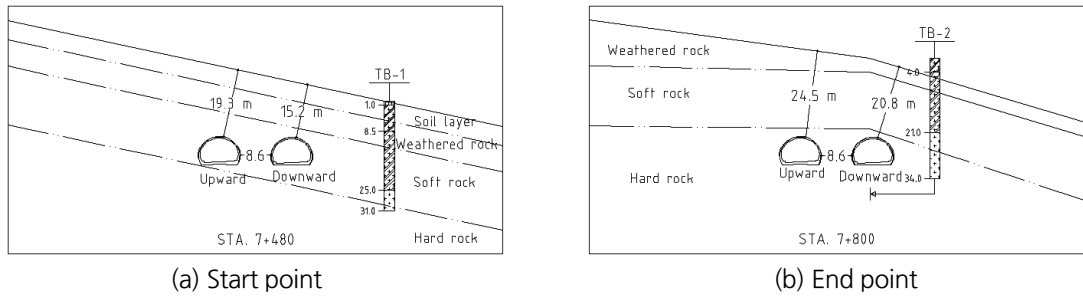


Fig. 3. Cross sections of Gopyeong tunnel

창평터널 시점부(STA. 15+700)는 시추정보 TB-1에 의하여 풍화암층 8.6 m, 하부는 연암으로 모델링하였다. 종점부(STA. 15+920)는 TB-3 시추공 정보에 의하여 표토층 0.5 m, 그 하부는 풍화암으로 모델링하였다. 해당 터널의 횡단면도를 Fig. 4에 나타내었다.

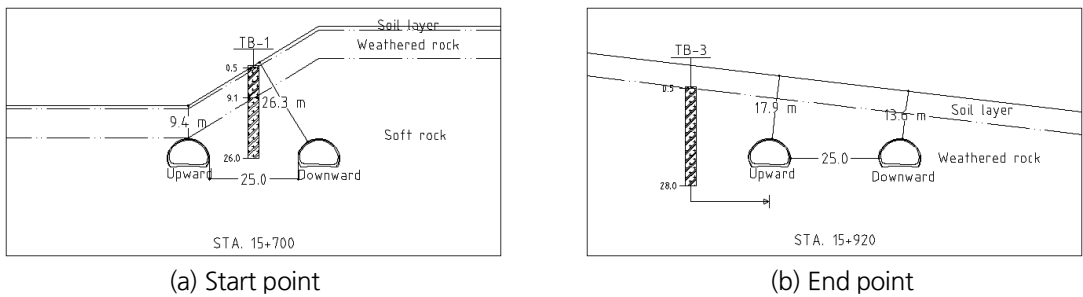


Fig. 4. Cross sections of Changpyeong tunnel

용대터널 시점부(STA. 3+320)는 기존 설계의 지층단면도 분석을 통하여 풍화토층, 풍화암층, 하부는 연암으로 모델링하였다. 종점(STA. 4+160)는 TB-3 시추공 정보에 의하여 풍화토층 2.3 m, 풍화암층 1 m, 하부는 연암으로 모델링하였다. 해당 터널의 횡단면도를 Fig. 5에 나타내었다.

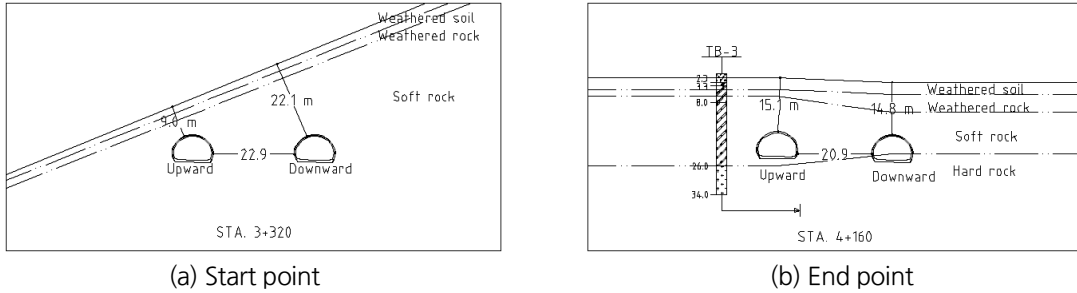


Fig. 5. Cross sections of Yongdae tunnel

### 3. 표준설계응답스펙트럼과 입력 지진파

Fig. 6에는 2023년 이전에 가장 널리 사용된 PGA에 대해서 진폭 조정된 Ofunato와 Hachinohe 지진파 스펙트럼을 도시하였다. Ofunato 지진파는 단주기에서는 전반적으로 설계스펙트럼과 비교적 맞는 결과를 확인할 수 있으나, 중장주기에서는 일치도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 반면 Hachinohe 지진파는 단주기에서는 설계스펙트럼 대비 작은 응답을 보이지만 중장주기에서는 응답이 큰 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 2007년 기준을 대표하는 지진파로 진폭 조정된 Ofunato와 Hachinohe 시간이력을 해석에 사용하였다.

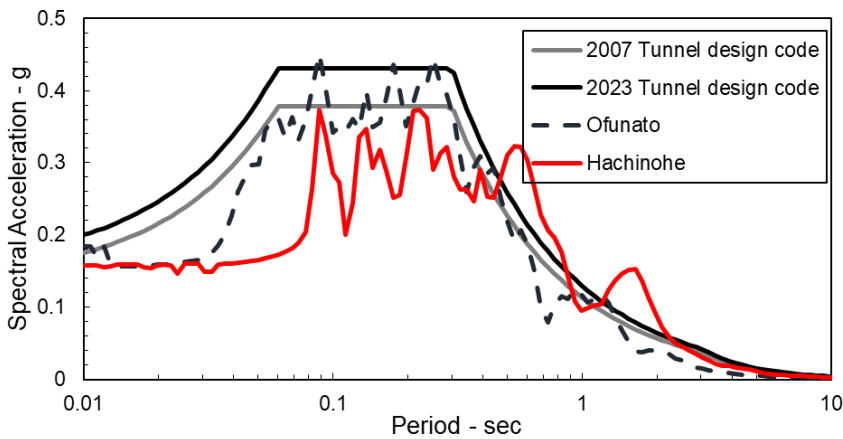


Fig. 6. Comparison of rock outcrop design spectra defined in 2007 and 2023 tunnel design codes representative of an earthquake with a return period of 1000 years. Also shown are Ofunato and Hachinohe motions amplitude matched to the design spectra

2023년 기준을 대표하는 지진파로는 스펙트럼 조정된 시간이력을 사용하였으며 이는 Fig. 7에 도시하였다. 사용된 기록은 진폭 조정에도 적용된 Ofunato 지진파와 각각 2016년 경주와 2017년 포항지진에서 계측된 기록들이다. 3개의 지진파에 대한 상세 정보는 Table 2에 정리하였다. Fig. 7에는 원기록 가속도 시간이력과 응답스펙트럼을 도시하였다. 선정된 계측 지진 기록의 주파수 특성은 원형과 유사하게 보존하되, 가속도 응답스펙트럼은 KDS 17 10 00 표준설계응답스펙트럼과 일치하도록 스펙트럼 매칭을 적용 하였다. 조정에 사용된 시간영역에서 웨이브레트를 이용하여 조정을 적용하는 프로그램 RspMatch09 (2010)이다(Al Atik and Abrahamson, 2010). 전술한 바와 같이 KDS 17 10 00에서 내진설계기준연구(II)의 표준설계응답스펙트럼 형상이 변경되었으며 이들은 Fig. 7에 비교하였다. 두 스펙트럼은 모두 재현주기 1000년 지진의 최대지반가속도(PGA)인 0.154 g을 적용하였다. 비교 결과, 단주기는 KDS 17 10 00이 큰 반면 중장주기는 내진설계기준연구(II)의 스펙트럼이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 2007년과 2023년 기준은 설계스펙트럼 형상뿐만 아니라 입력 지진파 시간이력 조정 방법에서도 차이를 보인다. 2023년 기준 제정 이전에는 PGA만을 맞추는 진폭 조정이 적용된 반면 2023년 이후에는 전주기에서 설계스펙트럼에 부합되도록 스펙트럼 매칭을 적용하게 되었다.

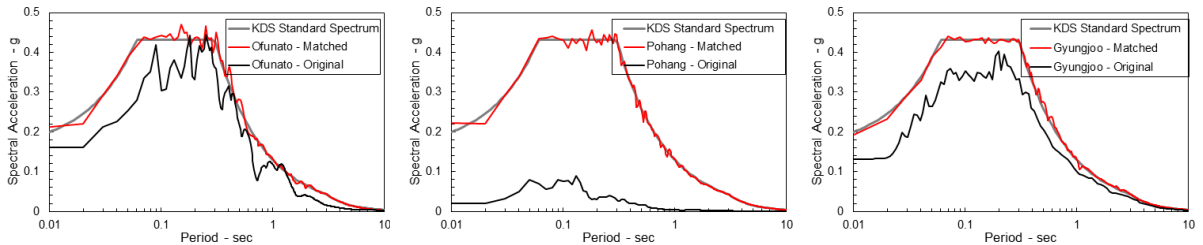


Fig. 7. Response spectra of original and spectrum matched input motions fitted to 1000 year return period rock outcrop motion response spectrum defined in KDS 17 10 00

Table 2. Details of ground motion selected for spectrum matching

No.	Earthquake	Year	Station name	Moment magnitude	Fault type	Rrup
1	Ofunato	1978	Miyagi-oki	7.5	Strike slip	-
2	Pohang	2017	CHS	5.4	Reverse	26
3	Gyeongjoo	2016	MKL	5.5	Strike slip	16

#### 4. 수치해석 모델과 검증

터널의 2차원 시간이력해석은 상용 유한차분법해석 프로그램인 FLAC2D (Itasca, 2005)을 사용하여 수행하였다. 선정된 4개의 터널 중 수안보 1,2터널에 대한 수치 모델 그림을 도시하였다(Fig. 8).

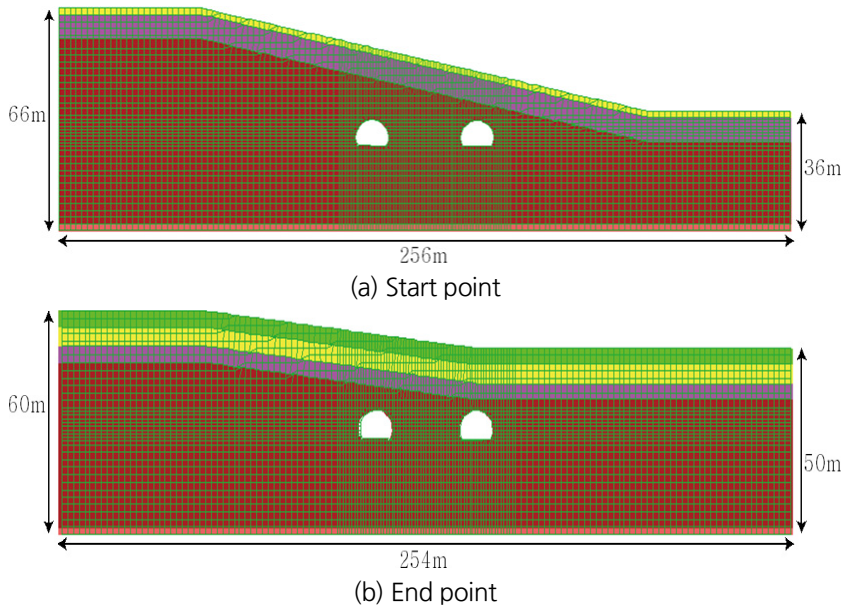


Fig. 8. Soosanbo tunnel numerical model

Case 1~4에 해당하는 터널의 해석 영역의 폭은 198~256 m이며 높이는 15~80 m를 적용하였다. 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 측면 경계를 좌우 각각 50 m를 적용하였다. 요소의 종류와 크기는 해석에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서 사용된 2차원 요소는 Constrain Strain Triangular (CST)이며 Hour Glass 효과를 방지하기 위하여 2개를 중첩하여 사용하였다. 연직방향으로 전파되는 전단파의 경우, 요소의 높이가 H일 때 전파할 수 있는 최대 주파수는  $f_{max} = V_s/4$ 이다. 즉, 요소의 크기가 과도하게 크다면  $f_{max}$  이상의 주파수를 모두 필터링할 수 있기에 크기는 보수적으로 1 m를 적용하였다. 터널의 라이닝은 Beam 요소로 모델링하였다. 라이닝 물성치는 Table 3에 정리하였다. 터널에 작용하는 응력은 모두 지보재가 받는다고 가정하였으므로 수치모델에 응력은 적용하지 않았으며 강성만 적용하였다. 지진 시 지보재는 터널에 전단거동에 영향을 주지 않는다고 보수적으로 가정하였다.

Table 3. Tunnel lining properties

Type	Poisson's ratio	Thickness (m)	Moment (m4)	Elastic modulus (kPa)	Element
Lining	0.2	0.3	0.00225	22,788,595	2 nodes Beam

하부 경계조건에는 점성댐퍼를 적용하였다. 이를 Quiet 경계 또는 무한경계라고도 하며 이 조건 적용 시 Deconvolution이 자동으로 이루어지며 하향파의 반사로 방지할 수 있으므로 해석 시 권장 된다(Park and Yoo, 2010). 측면경계조건은 1차원 지반응답해석의 경우 마찬가지로 연직방향운동은 구속하며 수평방향 운동만을 허

용하며 동시에 경계에 입사하는 반사파를 흡수할 수 있도록 자유장 경계(Free Field)를 적용하였다. 해석에는 이는 다음과 같이 정의된 비선형 구성모델인 Sig3 모델을 적용하였다.

$$G_{\tan} = \frac{a}{1 + \exp((x_0 - \log(\gamma))/b)} \tag{1}$$

여기서,  $G_{\tan}$ 은 접선전단탄성계수,  $\gamma$ 는 전단변형률,  $x_0, a, b$ 는 커브 피팅 계수이다. 비선형 곡선은 목표 전단탄성계수 감소와 감쇠비 곡선을 평균적으로 맞추도록 피팅 계수를 산정하였다. 토사층의 경우 Fig. 9와 같이 Seed (1970) 평균곡선을 목표곡선으로 활용하였으며 이에 대한 피팅 계수는  $a = 1.003, b = -0.6, x_0 = -1.5$ 이다. 암반의 경우 Fig. 10에 도시한 바와 같이 Schnabel (1972) 곡선을 목표곡선으로 적용하였다. 이때 적용된 피팅 계수는  $a = 1.03, b = -1, x_0 = 0.01$ 이다.

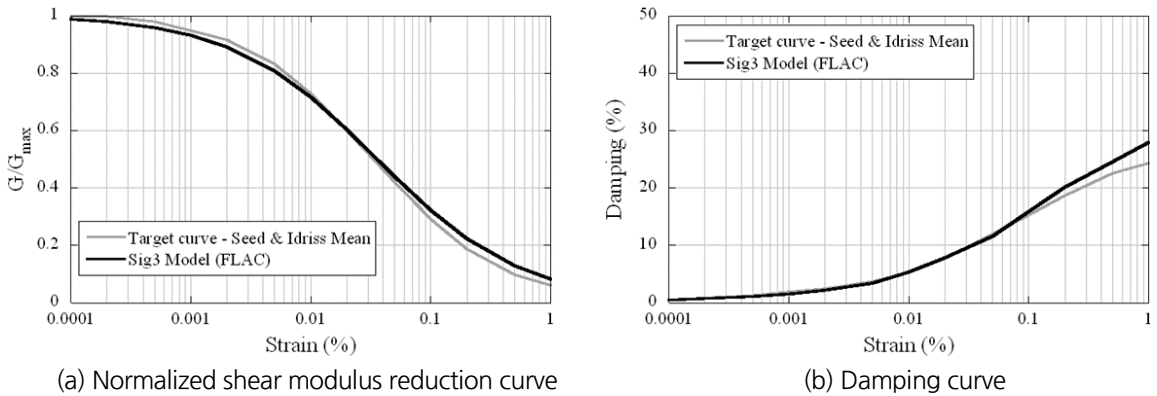


Fig. 9. Sig3 model (Seed, 1970)

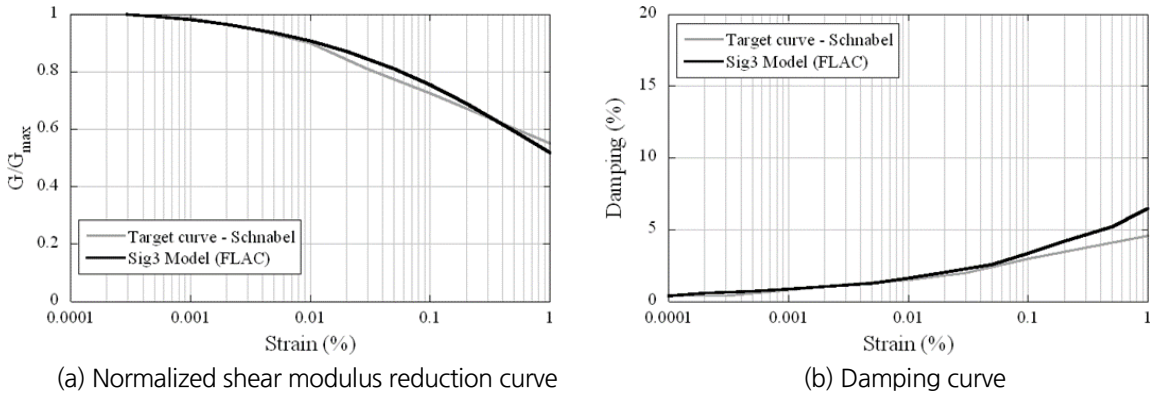


Fig. 10. Comparison of rock curves of Schnabel (1972) matched with Sig3 model



지반의 미소변형률 감쇠특성을 모사하기 위하여 아래의 Rayleigh Formulation (Rayleigh, 1945)을 사용하였다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \tag{2}$$

여기서,  $[C]$  = 감쇠행렬,  $[M]$  = 질량행렬,  $[K]$  = 강성행렬이며  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 다음 식 (3) 및 (4)와 같이 계산되는 계수이다.

$$\alpha = 4\pi\zeta \frac{f_m f_n}{f_m + f_n} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{\zeta}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n} \tag{4}$$

해석 시 정적 상태에서 라이닝에 작용하는 응력 값을 산정하기 위해 하중분담율을 적용한 터널 굴착해석을 수행하였다(Sedarat et al., 2009). 시간이력해석은 위와 같이 해석 결과에 영향을 미치는 요소가 다양하기에 반드시 검증은 해야 한다. 검증하는 가장 일반적인 방법은 해석에서 오류가 발생할 가능성이 상대적으로 낮은 1차원 지반응답해석과 비교하는 것이다. 이를 위하여 2차원 해석에서 자유장 조건이라고 볼 수 있는 터널 사이의 중앙에서 지표면 가속도 응답스펙트럼을 추출하였으며 결과를 1차원 해석과 비교하였다. 1차원 해석에서는 등가선형 해석법이 적용되었으며 Deepsoil v. 7 (Hashash et al., 2020)가 사용되었다. 수안보 터널 시점부에서의 검증 결과는 Fig. 11에 도시하였다. FLAC2D와 Deepsoil의 결과가 유사한 것을 확인할 수 있으며 이와 같은 절차를 모든 터널의 시점과 종점부에 적용하여 수치모델을 검증하였다.

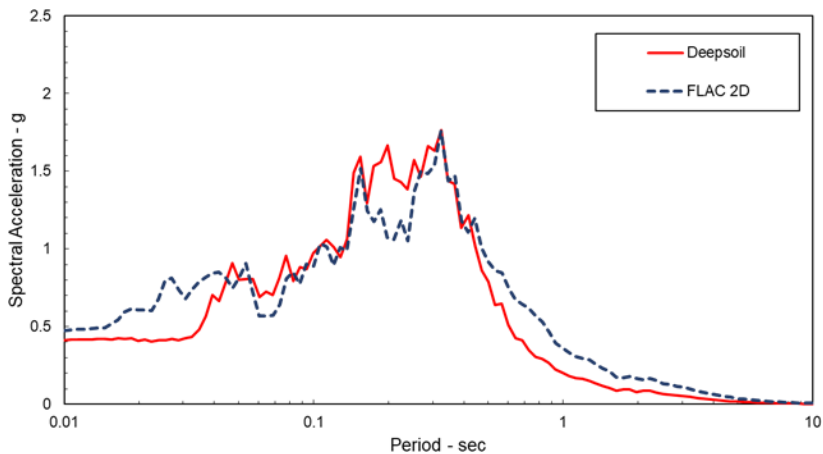


Fig. 11. Comparison of surface response spectra calculated from Deepsoil and FLAC2D for Soanbo tunnel site

### 4. 내진성능 평가방법 및 해석 결과

전술한 바와 같이 4개의 터널에는 2007년 기준에 부합하는 2개의 진폭 조정 지진파 Ofunato와 Hachinohe 지진파 그리고 2023년 기준에 부합하는 3개의 스펙트럼 조정된 기록을 사용하였으며 각각에 대한 터널 라이닝의 최대 축력(P), 모멘트(M), 그리고 전단력(V)을 계산하였다. 시점부와 종점부 결과는 Figs. 12~15에 비교하였다. 진폭 조정 Ofunato 지진파는 스펙트럼 조정 지진파 대비 전반적으로 응답이 작게 계산되는 것을 확인할 수 있다. 진폭 Ofunato 지진파는 단주기는 스펙트럼 조정 지진파와 유사하지만 중장주기에서의 성분이 상대적으로 작아 최대 응답이 작게 계산된 것으로 추정된다. 반면 진폭 조정 Hachinohe 파형은 사례별로 해석결과의 경향성이 다른 것으로 나타났다. 수안보 터널 시점부에서는 가장 응답이 크게 계산된 반면 창평 터널에서는 가장 작게 계산되었다. 전반적으로 응답의 차이는 P, M, V 모두 15% 이내인 것으로 확인되었다. 터널의 응답은 당연한 결과이지만 V<sub>s</sub> 그리고 토피고가 작을수록 크게 계산되었다. 추후 가장 취약한 터널 단면 선정 시 이를 참고할 것을 권장한다.

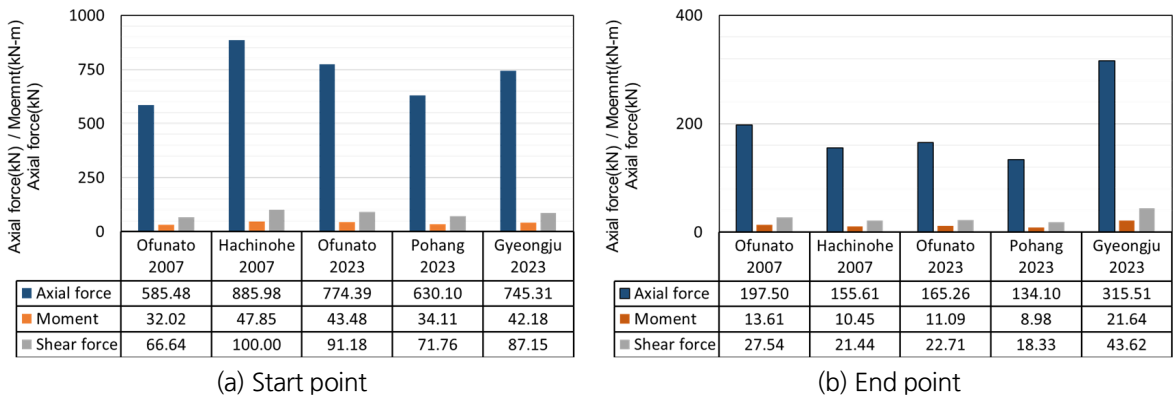


Fig. 12. Sooranbo Tunnel result comparison between 2007's 2023's

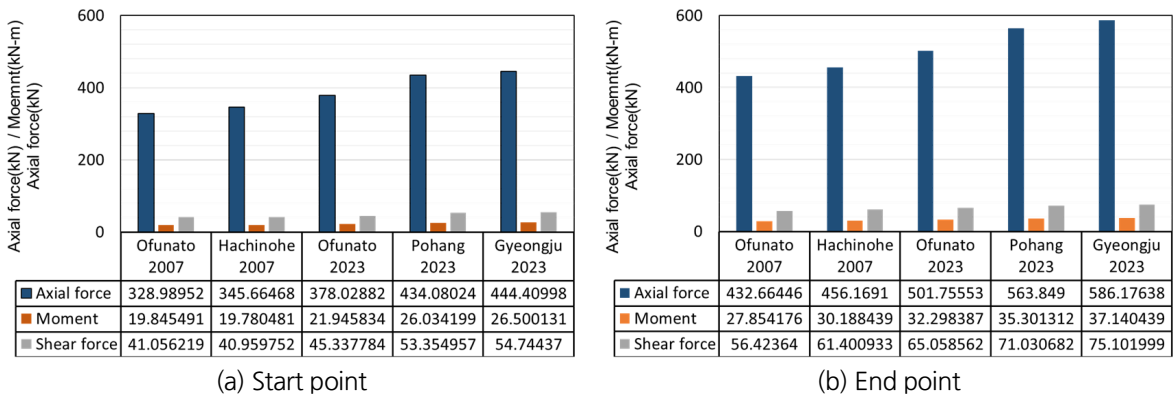


Fig. 13. Gopyeong tunnel result comparison between 2007's 2023's

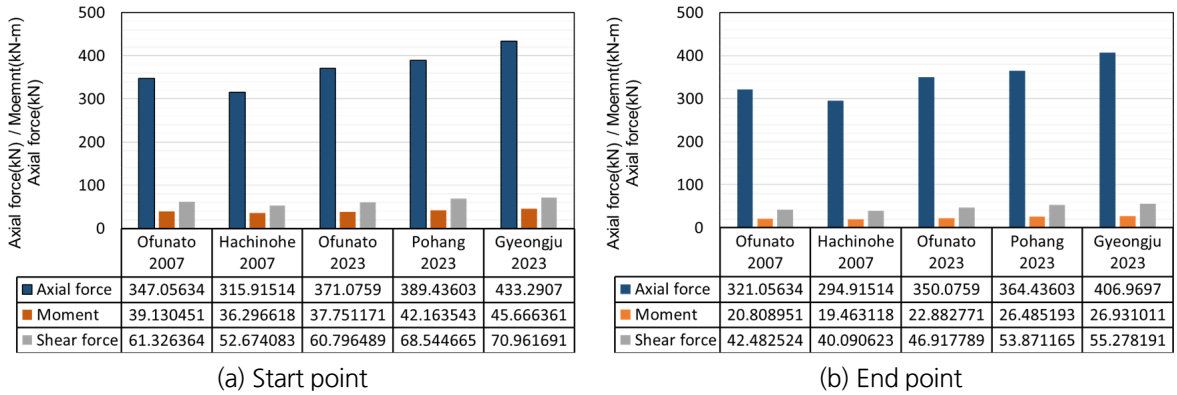


Fig. 14. Changpyeong tunnel result comparison between 2007's 2023's

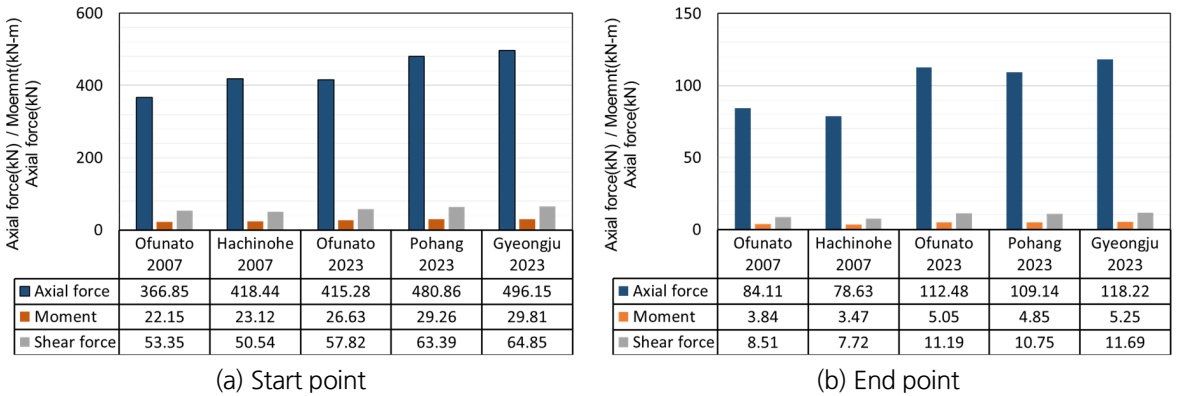


Fig. 15. Yongdae tunnel result comparison between 2007's 2023's

터널 라이닝의 손상은 P, M, V만이 아니라 이들의 상호작용으로 인하여 유발된다. 이를 위하여 터널 라이닝 단면에 대한 P-M, P-V, M-V 상관도를 Response2000으로 단면해석으로 계산하였으며 응답 결과가 포락선 이내에 위치하는 지를 확인하였다. 터널 별로 시점부와 종점부 중에 응답이 큰 결과만을 비교하였다(Figs. 16~19). 비교 결과, 2023년에 부합하는 스펙트럼 조정 지진파를 적용하는 경우에도 터널 라이닝의 안전성에는 문제가 없으며 소요 내진성능을 확보한 것으로 판단된다.

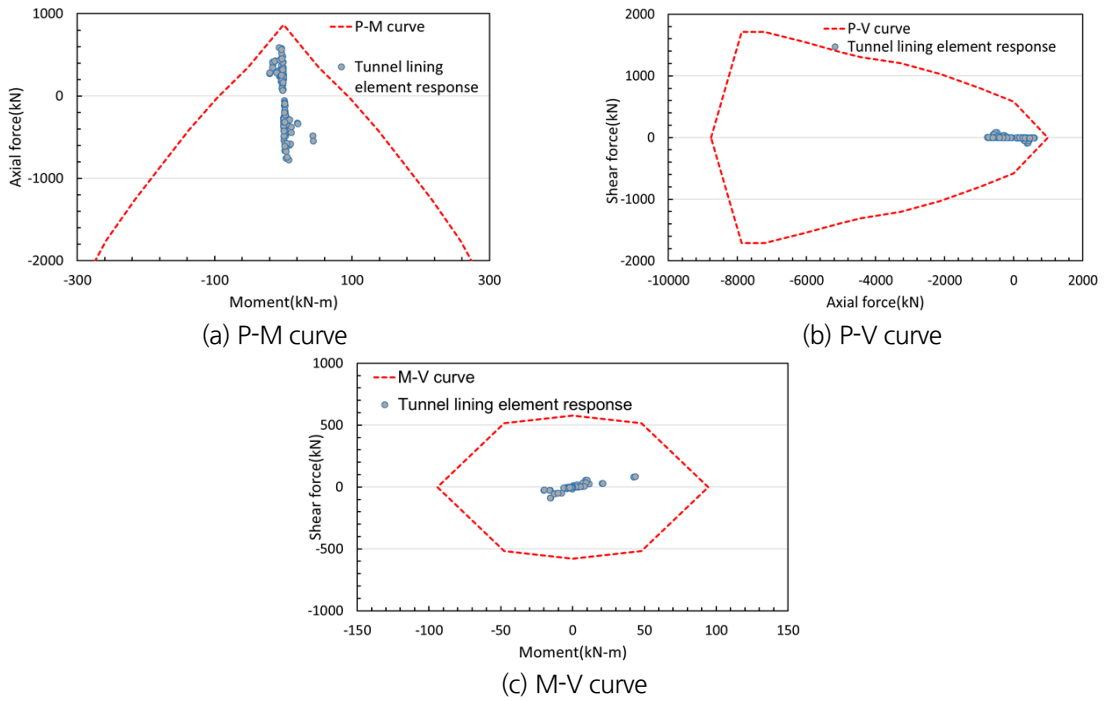


Fig. 16. Soosan start point tunnel result

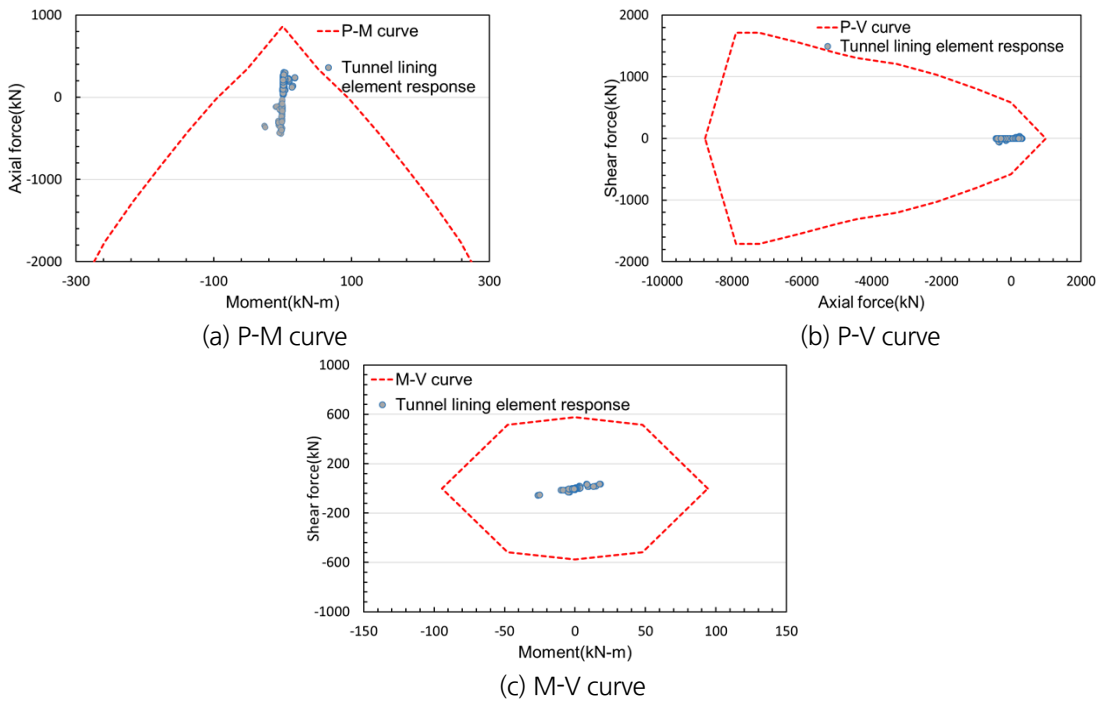


Fig. 17. Gopyeong start point tunnel result

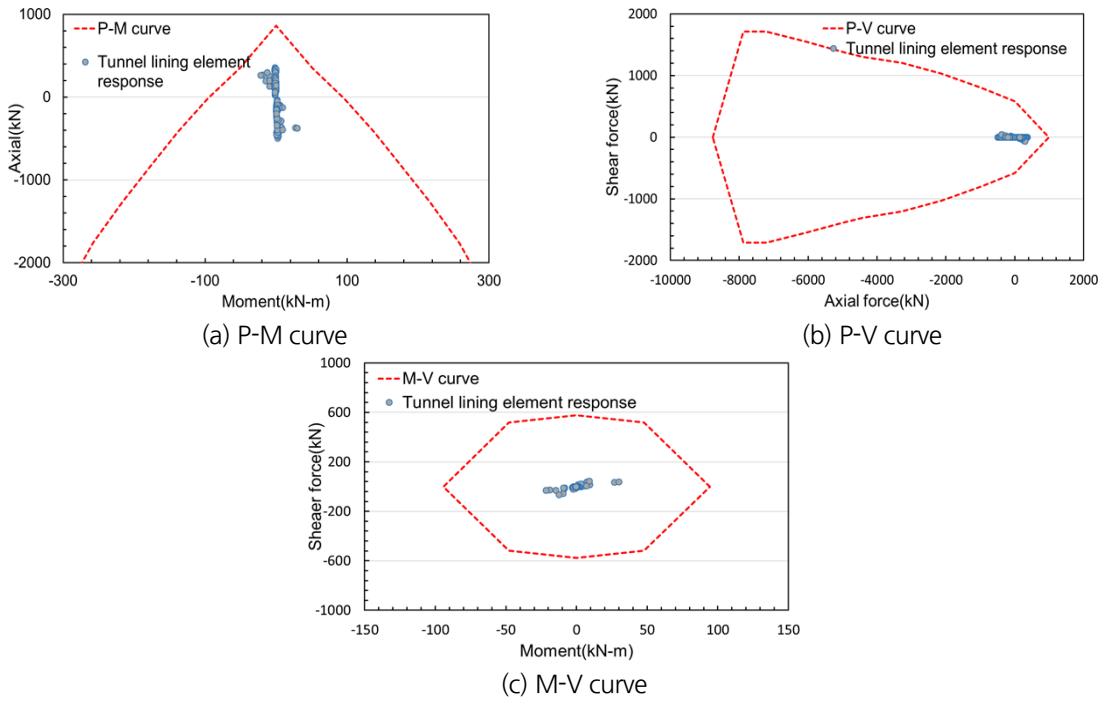


Fig. 18. Changpyeong start point tunnel result

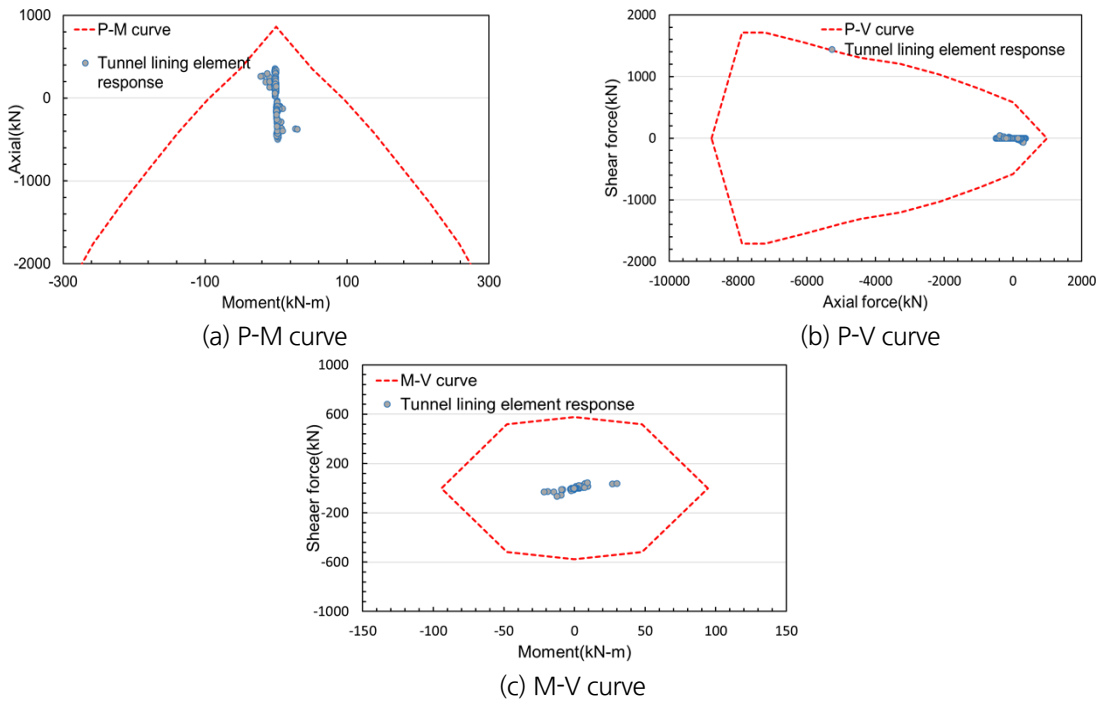


Fig. 19. Yongdae start point tunnel result

## 6. 결론

본 과업에서는 운영 중인 도로 터널이 개정된 내진설계기준의 소요 내진성능 확보 여부를 평가하였다. 지진에 대해서 취약한 것으로 분석된 국내 운영 중인 도로 터널과  $M > 4.5$  진원지와 인접한 터널 총 11개의 내진성능을 2차원 시간이력해석으로 평가하였다. 터널 라이닝의 안정성은 축력, 전단력, 모멘트를 허용치와 비교하여 평가하였으며 나아가 P-M 상관도와도 비교하여 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 4개의 터널 본선 구간에 대한 내진성능을 2007년 터널설계기준에 부합하는 진폭 조정 지진파와 KDS 27 17 00 기준에 부합하는 스펙트럼 조정 지진파를 적용하여 평가한 결과, 응답의 차이는 15% 이내인 것으로 나타났다. 전반적으로 스펙트럼 조정 지진파를 사용하는 경우 응답이 크게 계산되었지만 중장주기 요소가 큰 진폭 조정 Hachinohe 지진파 사용 시 응답이 가장 크게 계산된 경우도 발생하는 것을 확인하였다.
2. 취약하다고 판단된 4개의 터널에 대한 내진성능을 단면해석에 기초한 P-M, P-V, M-V 상관도로 평가한 결과, 모두 소요 성능을 확보한 것으로 확인되었다. 전반적으로 표준설계스펙트럼의 단주기 상향조정과 스펙트럼 매칭 적용으로 인하여 발생하는 차이가 크지는 않은 것으로 나타났기에 대부분의 도로 터널 내진성능 재평가 또는 내진보강은 불필요할 것으로 판단된다. 단, 이는 본 연구에서 평가된 터널에 국한된 결과이며 터널 노후화, 지반 조건이 극히 불량한 경우 등 예외 조건은 있을 것으로 판단된다.
3. 취약하다고 판단된 4개의 터널에 대한 내진성능을 단면해석에 기초한 P-M, P-V, M-V 상관도로 평가한 결과, 모두 소요 성능을 확보한 것으로 확인되었다. 전반적으로 표준설계스펙트럼의 단주기 상향조정과 스펙트럼 매칭 적용으로 인하여 발생하는 차이가 크지는 않은 것으로 나타났기에 대부분의 도로 터널 내진성능 재평가 또는 내진보강은 불필요할 것으로 판단된다. 단, 이는 본 연구에서 평가된 터널에 국한된 결과이며 터널 노후화, 지반 조건이 극히 불량한 경우 등 예외 조건은 있을 것으로 판단된다.

## 저자 기여도

이규필은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 하였고, 박두희는 원고 작성을 하였고, 강지은은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업 중견연구(No. 2022R1A2C3003245)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. Ahn, J.K., Park, D.H., Kim, D.K., Kim, K.Y. (2013), "Evaluation of seismic performance of road tunnels in operation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 2, pp. 69-80.
2. Al Atik, L., Abrahamson, N. (2010), "An improved method for nonstationary spectral matching", *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp. 601-617.
3. Amorosi, A., Boldini, D. (2009), "Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 1059-1072.
4. Dowding, C.H., Rozan, A., (1978), "Damage to rock tunnels from earthquake shaking", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 104, No. 2, pp. 175-191.
5. Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D. (2020), DEEPSOIL 7.0, user manual, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign (2020), Urbana, IL, pp. 1-170.
6. Itasca, H. (2005), FLAC (fast lagrangian analysis of continua) V. 5.0., Itasca Consulting Group, Ontario, Canada.
7. MOLIT (1999), Manual on tunnel design (KDS 27 00 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
8. MOLIT (2007), Manual on tunnel design (KDS 27 00 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
9. MOLIT (2018), General seismic design standard (KDS 17 10 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
10. MOLIT (2023), Manual on tunnel seismic design (KDS 27 17 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
11. Nguyen, V.Q., Tran, V.L., Nguyen, D.D., Sadiq, S., Park, D. (2022), "Novel hybrid MFO-XGBoost model for predicting the racking ratio of the rectangular tunnels subjected to seismic loading", *Transportation Geotechnics*, Vol. 37, 100878.
12. Park, D., Lee, T.H., Kim, H., Park, J.S. (2016), "Identification of damage states and damage indices of single box tunnel from inelastic seismic analysis", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 2, pp. 119-128.
13. Park, I.J., Yoo, J.H. (2010), "Aseismic design concept for underground space based on site response analysis", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 3, pp. 257-264.
14. Rayleigh, J.W.S. (1945), *The Theory of Sound*, Dover Publications, New York, Vol. 4, pp. 23.
15. Schnabel, P.B. (1972), SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley.
16. Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y.M.A., Shamsabadi, A., Krimotat, A. (2009), "Contact interface in seismic analysis of circular tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 482-490.

17. Seed, H.B. (1970), Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report: Earthquake Engineering Research Center, pp. 70-10.
18. Yang, D., Naesgaard, E., Byrne, P.M., Adalier, K., Abdoun, T. (2004), "Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 5, pp. 921-942.