

# 기 개발된 굴착식 터널의 지진취약도 모델 적용성 평가

양승훈<sup>1</sup> · 곽동엽<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 부교수

## Evaluation of pre-developed seismic fragility models of bored tunnels

Seunghoon Yang<sup>1</sup> · Dongyoun Kwak<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and System Engineering, Hanyang University

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

\*Corresponding Author : Dongyoun Kwak, [dkwak@hanyang.ac.kr](mailto:dkwak@hanyang.ac.kr)

### Abstract

This study analyzed the seismic fragility of bored tunnels based on their surrounding conditions and suggested a representative seismic fragility model. By analyzing the existed seismic fragility models developed for bored tunnels, we developed weighted combination models for each surrounding conditions, such as ground conditions and depth of the tunnel. The seismic fragility curves use the peak ground acceleration (PGA) as a parameter. When the PGA was 0.3 g, the probability of damage exceeding minor or slight damage was 20% for depth of 50 m or less, 10% for depth between 50 m and 100 m, and 3% for depth of 100 m or more. It was also found that the probability of damage was higher for the same PGA and depth when the surrounding ground was rock rather than soil. The probability of damage decreases as the depth increase. This study is expected to be used for developing a comprehensive seismic fragility function for tunnels in the future.

**Keywords:** Seismic fragility model, Bored tunnel, Weighted combination, PGA, Probability of damage

### 초 록

본 연구에서는 주변 환경에 따른 굴착식 터널의 지진취약도 변화에 대한 분석을 진행하고 대표 지진취약도 모델을 제시하였다. 기 개발된 굴착식 터널의 지진취약도 모델들에 대한 분석을 진행한 후 각 모델들에 가중치를 부여하여 주변 환경에 맞게 새로 가중조합한 모델을 개발하였다. 주변 환경은 굴착식 터널 주변의 지반조건과 매설 깊이를 고려하

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
25(3)187-200(2023)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.3.187>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 7, 2023

Revised May 24, 2023

Accepted May 24, 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

였다. 지진취약도 곡선의 피해 발생 확률은 최대지반가속도(PGA)를 매개변수로 하여 결정된다. PGA가 0.3 g일 때 매설 깊이가 50 m이하의 조건에서는 경미한 손상을 초과하는 피해 확률이 20%, 매설 깊이가 50 m 이상 100 m 이하의 조건에서는 피해 확률이 10%, 매설 깊이 100 m 이상의 조건에서는 피해 확률이 3% 이하로 매설 깊이에 따라 피해 확률이 점차 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 주변 지반이 토양으로 되어있을 때보다 암반으로 되어있을 때 동일한 지표의 PGA에 대해 같은 매설 깊이에서 피해 확률이 크게 나타나며, 매설 깊이가 깊어질수록 피해 확률이 작아진다. 이 연구는 향후 터널의 종합적 지진취약도 함수 개발에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

**주요어:** 지진취약도 모델, 굴착식 터널, 가중조합, 최대지반가속도, 피해 확률

## 1. 서론

시간 비중이 높은 국내의 교통 체계에서 현재 도로터널의 개수는 2022년 기준 약 3,000여개소, 철도 터널의 경우 약 800여개소로 상당한 수가 운용되고 있다(MOLIT, 2022). 터널의 손상은 터널과 이어져 있는 직렬 교통 체계의 중단을 초래한다. 이러한 교통 체계의 중단은 도시간의 이동 및 물류를 마비시켜 사회에 직간접적으로 큰 악영향을 끼치게 된다.

국내에서 터널의 지진취약도에 의한 연구는 주로 개착식 터널에 대해 이루어졌다(Park et al., 2018; Yang and Kwak, 2022). 터널은 크게 개착식 터널과 굴착식 터널로 구분되는데, 개착식 터널은 토층 상부에 위치하는 경우가 많아 지반 변위가 크게 발생하여 지진으로 인한 피해가 자주 보고되며(Zhong et al., 2020), 굴착식 터널은 지중에 위치하고 주로 암반 속에 위치하므로 지진 시 지반 변위의 크기가 크지 않아 상대적으로 안전한 것으로 인식되어 왔다(Kamemura, 2019). 하지만 굴착식 터널 또한 터널 입출구부, 터널 내 지질이 변하는 부분, 단층운동, 터널 단면의 타원변형 등에 의한 피해가 보고되고 있어 굴착식 터널의 지진취약에 대한 연구가 필요하다(Jaramillo, 2017).

국외의 경우 다양한 굴착식 터널의 지진 피해에 대한 연구가 수행되어 왔다. Sharma and Judd (1991)는 132건의 지진 피해 사례에 대한 조사 및 통계를 통해 깊이가 50 m 미만인 지하 구조물이 손상에 더 취약하다는 것을 확인했다. Gao et al. (2015)은 매설 깊이가 서로 다른 다수의 터널에 대해 진동대를 활용한 모형 실험을 수행하고 매설 깊이에 따른 터널 라이닝 응력의 변동 규칙을 제시했다. Roy and Sarkar (2017)는 지진으로 인한 산악터널의 피해 사례를 검토하고 고유주파수, 최대지반가속도와 같은 다양한 지진 매개변수들을 이용하여 산악터널의 지진 시 파괴 매커니즘에 대해 분석하였다. Chen et al. (2012)은 동적 수치해석을 통해 매설 깊이가 지진 피해에 미치는 영향을 조사하였으며, 지진파의 응력은 입사파의 깊이와 파장 간에 상관관계가 있다고 분석하였다. Oh and Moon (2018)은 지진 하중에 의한 암석 및 충적층을 지나가는 굴착식 터널 라이닝의 종방향 변형을 분석하였으며, 복합된 지반 조건에서의 축 변형 및 곡률변형 평가를 통해 터널의 안전성을 평가하였다. 이와 같이 다양한 조건의 굴착식 터널에 발생하는 지진 피해에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 특히 터널 매설 깊이는 터널의 지진취약

성에 영향을 미치는 중요한 요소로 고려되어 왔다.

본 연구에서는 기존에 개발된 굴착식 터널 지진취약도 모델들을 수집하여 터널의 형태와 매설 깊이 별로 분류한 후 각 분류의 취약도 곡선 변화에 대해 분석하고자 한다. 수집된 모델들의 취약도 개발 방법, 터널을 모델링하여 수치해석적 및 경험적으로 접근한 방법, 피해 확률을 계산하기 위한 입력지진파와 손상 지수 설정에 대한 분석을 진행하고, 분류된 각 모델들을 가중 조합하여 각 분류의 대표 취약도 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 굴착식 터널의 기존 지진취약도 모델

### 2.1 기존 굴착식 터널 지진취약도 연구

본 연구에서는 기존에 개발된 5개의 굴착식 터널 지진취약도 모델을 분석하였다. 고려된 5개 모델 모두 지표면에서 예상되는 PGA에 대해 굴착식 터널에서 발생할 수 있는 초과 피해 확률을 제시한다. 5개의 지진취약도 모델의 대상 터널 및 모델 개발 방법에 대한 개요는 다음과 같다.

- Model 1 (Hu et al., 2020): Hu et al. (2020)은 상용 중인 상하이 지하철 터널을 프로토타입으로 2차원 유한요소 동적수치해석을 수행하였으며, 분석결과로 원형 쌍둥이 터널의 매설 깊이 별 지진취약도 모델을 제시하였다. 대상 터널은 직경 6.2 m, 라이닝 두께 0.35 m, 양 터널간 13 m 거리에 떨어져 있는 원형 터널 2개이며, 280 m 깊이의 퇴적토 내에서 10~35 m 사이의 깊이에 위치한 터널의 취약도를 분석하였다. 손상 상태는 손상 없음, 경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상, 붕괴의 5단계로 구분하였다.
- Model 2 (Huang et al., 2020): Huang et al. (2020)은 Model 1과 마찬가지로 상하이 지하철 터널을 대상으로 하여 수치해석을 수행한 후 매설 깊이 별 지진취약도 모델을 제시하였다. Model 1은 쌍둥이 원형 터널을 해석한 반면, Model 2에서는 1개의 원형 터널에 대해 해석을 수행하였다. 터널의 제원 및 지반 물성 등의 주요 가정은 Model 1과 같이 설정하였으며, 터널의 매설 깊이를 9~30 m로 설정하였다. Model 1과 Model 2는 같은 구조물에 대해 분석을 하지만 해석을 위해 선정된 터널의 길이, 입력지진파 선정, 지반주상도 선정, 손상 지수를 선정하기 위해 사용되는 요소 등에 차이가 존재한다. Model 2 또한 수치해석 결과를 바탕으로 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA) 및 최대지반속도(Peak ground velocity, PGV)에 기반한 취약도 곡선을 도출하였다. 손상 상태는 경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상의 3단계로 구분하였다.
- Model 3 (Andreotti and Lai, 2019): Andreotti and Lai (2019)는 프랑스와 이탈리아를 이어주는 고속철도의 산악터널을 대상으로 큰 규모의 지진과 활동 단층에 근접한 터널의 지진피해를 검토하여 터널의 유형과 암반의 종류, 터널 매설 깊이에 따른 지진취약도 모델을 개발하였다. 취약성 평가는 2D 비선형 동적수치해석을 활용하였다. 대상 터널의 매설 깊이는 80~400 m 사이이며, 라이닝은 슛크리트와 강철로 구성된 철근 콘크리트이다. 암석의 거동은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며, 비선형 응답해석을 위해 지진 피해가 발생하기 쉬운 라이닝의 위치에 힌지를 모델링 하였다. 수치모델링 요소로는 지반 진동시 라이닝에 대한 축 방향 하중의

변화 영향을 고려하고 균열과 항복에 의한 라이닝의 강성 및 강도 감소 시뮬레이션이 가능한 요소를 사용하였다. 손상 상태는 손상 없음, 경미/중간 손상, 광범위한 손상의 3단계로 정의하였다.

- Model 4 (ALA, 2001): ALA (2001)는 미국, 일본, 터키 등 중규모 이상의 지진이 발생한 지역에서 굴착식 터널의 실제 지진 피해를 수집하여 터널의 경험적 지진취약도 모델을 개발하였다. 층적토 또는 암석의 손상된 터널 데이터를 사용하여 PGA를 기반으로 한 경험적 취약도 곡선을 제시하였다. 터널의 시공 품질과 시공 방법이 고려되었으며, PGA는 지반 표층에서의 수치를 사용하였다. 손상 상태는 경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상 3단계로 정의하였다.
- Model 5 (FEMA, 2004): HAZUS (FEMA, 2004)는 미국연방재난관리청에서 개발한 다양한 구조물에 대한 지진 피해 손실 추정 방법론과 지진취약도 함수를 제공한다. 지진 재해 발생 후 복구 및 복구 계획 수립에 대한 방법론을 포함하여, 지진에 의한 전반적인 잠재적 손실을 추정하기 위해 개발되었다. HAZUS는 Model 4와 마찬가지로 기술적 판단과 경험적 데이터를 기반으로 굴착식 터널의 PGA기반 취약도 곡선을 제시하였다. 손상 상태는 터널의 라이닝 및 입출구의 손상에 대해 경미한 손상, 중간 손상, 심각한 손상, 붕괴의 총 4단계를 사용하였다.

## 2.2 선행연구의 취약도 모델 개발 절차

지진취약도는 지진 크기를 나타내는 계기진도(예: 최대가속도, 최대속도)에 따른 구조물의 초과 손상 확률을 나타낸다. 여기서 초과 손상 확률은 특정한 손상 상태를 초과하는 손상에 대한 확률을 의미한다. 따라서 지진취약도 모델개발을 위해서는 계기진도의 크기에 상응하는 초과 손상 확률의 계산이 선행되어야 한다. 손상 확률을 구하는 방법에는 경험적 방법과 수치적 방법이 존재한다. 경험적 방법은 과거 지진피해사례로부터 계기진도에 따른 손상 확률을 계산하는 것이며(Straub and Der Kiureghian, 2008), 수치적 방법은 수치해석모델링을 통해 지진파의 크기 증가에 따른 모델터널의 손상정도로 손상 확률을 계산하는 것이다(Ghosh et al., 2021). 본 연구에서 참고하는 5개의 모델 중 3개는 수치적 방법으로, 2개의 모델은 경험적 방법으로 지진취약도 모델을 개발하였다. 수치적 방법의 모델 개발 절차는 다음 7단계와 같다(Hu et al., 2020).

- 1) 현장에 적합한 수치해석에 적용할 입력지진파 선택
- 2) 다양한 크기의 입력지진파를 사용하여 전단파속도주상도에 대한 일차원 지반응답해석 수행
- 3) 유한요소 수치모델링 및 동적 시간이력 수치해석
- 4) 취약도 곡선 개발에 활용할 계기진도 종류 선택
- 5) 터널 라이닝 손상을 판단하기 위한 손상 지수 정의
- 6) 손상 확률과 계기진도의 관계에 대해 누적로그정규분포 모델을 활용하여 회귀분석 진행
- 7) 각 취약도 곡선의 변동성을 설명하는 로그정규표준편차 추정

이러한 절차는 수치해석으로 개발된 3개 모델에서 공통적으로 사용되었다. Fig. 1은 수치해석으로 개발된 취약도 모델의 개발절차를 개략적으로 나타낸다.

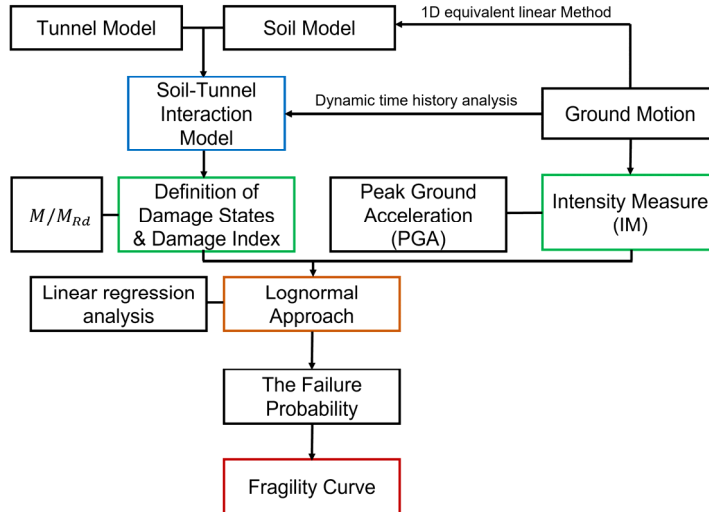


Fig. 1. Flowchart of the seismic fragility analysis procedure using numerical simulation

경험적 모델은 피해 사례를 수집하고 피해를 일으켰던 지진 강도를 예측하여 취약도 분석을 진행한다. 수집된 피해 사례들을 복원 기간, 피해 크기 등 각 피해 유형별로 분류하고 손상 상태 별로 분류를 진행한 후, 손상 상태와 지진 강도를 이용하여 지진취약도 곡선을 도출해 낸다.

### 2.3 선행연구의 입력지진파

입력지진파는 수치해석 기반 취약도 모델 개발에서 손상 확률의 불확실성을 결정하는 중요한 인자이다. 일반적으로 10~20개의 실제 기록은 지진파의 불확실성을 적절하게 포착할 수 있는 것으로 알려져 있다(Cornell and Shome, 1999). 수치해석 기반으로 취약도 모델을 개발한 Model 1~3에서 선택한 입력지진파의 개요는 다음과 같다.

- Model 1: 해당 국가(중국)의 내진설계 코드를 참조하여 30 m 깊이까지의 시간 기반 평균전단파속도( $V_{S30}$ )가 200 m/s 미만인 관측소를 대상으로 하였으며, 근거리 지진의 영향을 줄이기 위해 진앙 거리 10 km 이상 기록을 선정하였다. 규모가 큰 지진파를 우선적으로 선정 후 구조적 안전에 영향이 낮은 지진을 제거하여 총 15개의 서로 다른 지진파를 선정하였다. 사용한 입력지진파의 규모는 5.3~7.62, PGA는 0.11~0.68 g, 진앙지로부터의 거리는 10.39~69.62 km,  $V_{S30}$  값의 범위는 133~196 m/s이다.

- Model 2: Model 1과 마찬가지로 내진설계 코드와 지반분류에 기초한 지반운동을 선정하였다. 수치모델에서 입력지진파의 위치가 100 m 깊이이고, 그 위치에서의  $V_s$ 값을 500 m/s로 설정하였기 때문에 지반등급A 또는 B ( $V_{s30} \geq 760$  m/s)의 기록을 선택하였다. 입력지진파는 총 12개를 선정하였다. 지진의 규모는 5.01~7.36, PGA 범위는 0.13~0.62 g로 선정하였다. 진앙지로부터의 거리는 1.63~77.32 km로 근거리지진부터 원거리지진까지 모두 포함하였다.
- Model 3: 모멘트규모 6이상, 진앙거리 20 km 미만의 기록을 선정하였다. 이에 따라 PGA의 범위 0.1~1.4 g의 지진파 기록을 선정하였다. 수치해석 시 암반의 강도 지수(Geological Strength Index)를 15, 25, 35로 변화시키며 해석을 진행하였다.

실제 지진사례를 활용하는 경험적 모델인 Model 4의 경우 미국, 일본 등 규모 6.6~8.4의 지진에서 관측된 총 217개의 피해 데이터를 수집하여 모델이 개발되었다. 수집된 데이터 중에서 1994 Northridge와 1989 Loma Prieta 지진은 각 31개와 22개의 케이스를 가지고 있으며 대부분의 데이터는 1995 Kobe 지진에서 발생된 피해로 구성되어 있다. Model 5의 경우는 사용한 구체적인 지진 정보가 포함되어 있지 않다.

## 2.4 손상 상태 및 손상 지수의 정의

손상 상태는 실제 구조물의 지진 응답과 관련된 한계 상태를 의미하며, 일반적으로 DS (Damage State)로 표현한다. DS는 손상 없음(None), 경미한 손상(Minor/Slight), 중간 손상(Moderate), 심각한 손상(Extensive), 붕괴(Collapse)의 5단계로 분류할 수 있으나, 손상 없음과 붕괴는 거의 발생하지 않으므로 주로 경미한 손상부터 심각한 손상까지의 3단계를 사용한다. DS의 각 단계에 상응하는 지표를 손상 지수(DI, Damage Index)라 한다. 취약도 모델은 목표하는 DS를 초과하는 손상 확률을 결정하는 것이므로, DS의 정성적 정의와 DI의 정의는 취약성 평가에 매우 중요하다.

본 절에서는 각 연구에서 사용한 굴착식 터널의 DS와 DI의 정의에 대해 검토하였다. 건물 및 교량에서는 최대 변위와 층간 변위비율 및 응력 등을 DI로 하나, 굴착식 터널과 같은 원형터널에서는 휨모멘트 비율을 주로 DI로 사용한다. Model 1과 2 모두 DI로 터널 단면의 휨모멘트 강도( $M_{RD}$ )와 휨모멘트( $M$ )의 비율( $M/M_{RD}$ )을 사용하였다. 휨모멘트는 동적 시간이력 분석으로 계산하였으며, 휨모멘트 강도는 터널의 기하학적 특성을 고려하여 계산하였다. Table 1은 Model 1과 2에서 사용한 DS 단계에 따른 DI를 나타낸다.

**Table 1.** Definition of damage state and damage index for tunnel lining (Hu et al., 2020; Huang et al., 2020)

Damage state	Damage index ( $M/M_{RD}$ )
Minor/slight	$1.0 < DI \leq 1.5$
Moderate	$1.5 < DI \leq 2.5$
Extensive	$2.5 < DI \leq 3.5$

Model 3은 터널 프레임에 발생하는 소성 힌지의 개수를 DI로 사용하였다. 경미한 손상부터 중간 손상까지의 DS에 해당하는 DI로 소성 힌지의 개수 1~3을 초과하는 값으로 제시하였으며, 심각한 손상으로서는 소성 힌지 개수 4이상을 DI로 제시하였다. Model 3의 DS, DI, 그리고 해당하는 정성적 손상 표현이 Table 2에 정리되어 있다.

**Table 2.** Damage state and damage index of the tunnel lining (Andreotti and Lai, 2019)

Damage state	Damage index (number of plastic hinges)	Description
Minor/Slight, Moderate	1~3	Damage detectable by visual inspection; possible cracking, spalling and water leaking
Extensive	≥4	Large cracking, spalling, uplift and water leaking

Model 4는 경험적 데이터로 DI의 정의가 따로 없으며, 터널 라이너의 피해 정도에 따라 DS를 정의하였다. 사용된 DS는 Model 3에 기술된 정의와 같으며, 터널 라이너의 피해 통계를 정립하여 피해 개수에 따라 손상 상태를 정의하였다.

Model 5는 경미한 손상, 중간 손상, 광범위한 손상을 터널 라이너 및 갱구부에서 발생하는 구성 요소의 손상 수준으로 정의하였다. DS는 직접적인 경제적 손실을 대변할 수 있는 복원기간으로 정의할 수 있다. 복원기간이 0.5 일 이하일 때 경미한 수준의 손상, 7일 이하일 때 중간정도의 손상, 30일 이하일 때 심각한 수준의 손상으로 정립하였다. 각 손상 상태에 대한 손상 표현과 복구기간 기준이 Table 3에 정리해 있다.

**Table 3.** Definition of damage state and damage index for tunnel lining

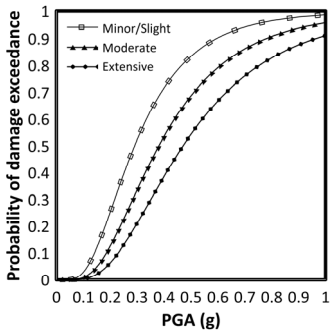
Damage state	Recovery period (day)	Damage description
Minor/Slight	≤ 0.5	Minor cracking of the tunnel liner (damage requires no more than cosmetic repair) and some rock falling, or by slight settlement of the ground at a tunnel portal.
Moderate	0.5~7	Moderate cracking of the tunnel liner and rock falling.
Extensive	7~30	Major ground settlement at a tunnel portal and extensive cracking of the tunnel liner.

### 3. 굴착식 터널의 대표 지진취약도 모델

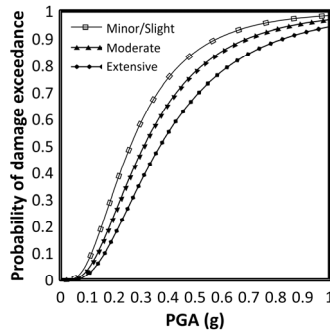
#### 3.1 매설 깊이에 따른 지진취약도 모델

Model 1은 토층 내 매설 깊이 10~35 m, Model 2는 토층 내 매설 깊이 9~30 m, Model 3은 암반 내 매설 깊이 80~400 m의 터널을 대상으로 취약도 함수를 제안하였다. 모든 연구에서 터널의 취약도는 터널의 매설 깊이가 깊어질수록 낮아진다. 각 모델의 주어진 매설 깊이 범위에서 같은 PGA에 대해 깊이가 얕을수록 손상 확률이 높으며,

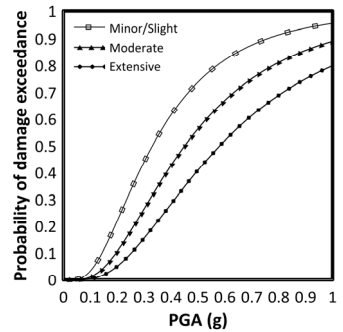
깊이가 깊을수록 손상 확률이 낮게 나타난다(Fig. 2). 이는 각 모델의 PGA의 기준이 지표면이므로 깊이가 깊어질수록 상대 변위의 크기가 낮아지는 것에 기인한다. 경험적 취약도 모델인 Model 4와 Model 5는 터널의 유형이나 형태, 매설 깊이별로 취약도 모델이 개발되어 있지 않으나, 국내외에서 터널 구조물의 지진취약도 분석을 진행할 때 대표적으로 비교되는 문헌으로 사용된다.



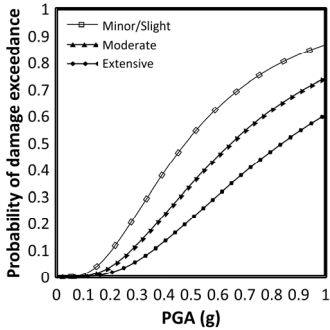
(a) Model 1 (depth 10 m)



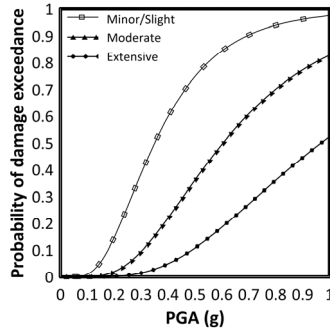
(b) Model 1 (depth 15 m)



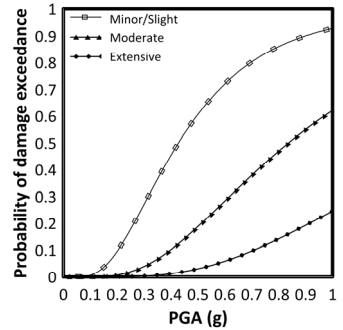
(c) Model 1 (depth 20 m)



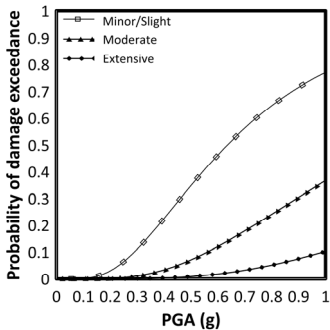
(d) Model 1 (depth 35 m)



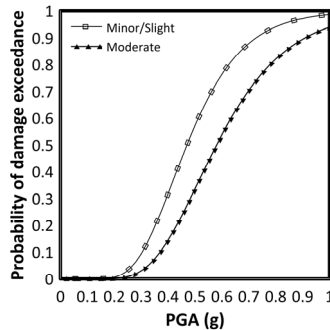
(e) Model 2 (depth 9 m)



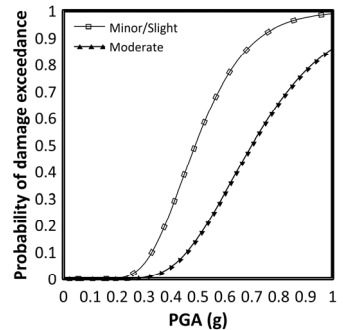
(f) Model 2 (depth 20 m)



(g) Model 2 (depth 30 m)



(h) Model 3 (depth 80 m)



(i) Model 3 (depth 200 m)

Fig. 2. Seismic fragility curve of bored tunnels by damage state for (a-d) Model 1, (e-j) Model 2, (h-k) Model 3, (l) Model 4, (m) Model 5



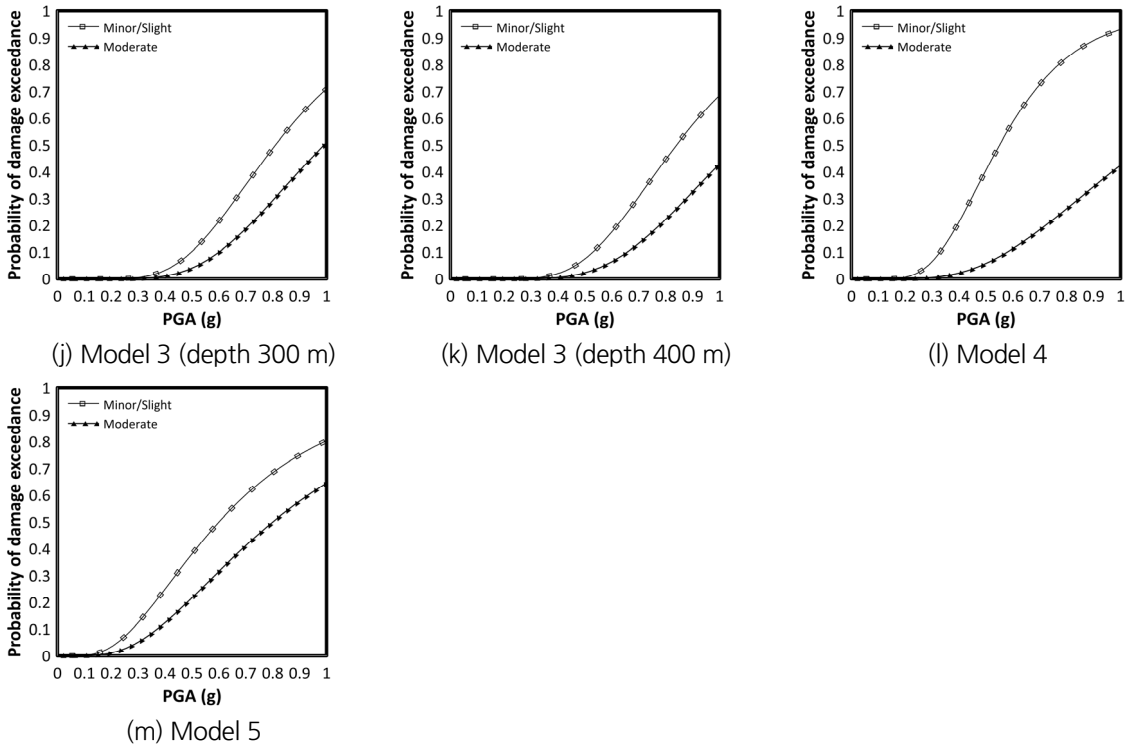


Fig. 2. Seismic fragility curve of bored tunnels by damage state for (a-d) Model 1, (e-j) Model 2, (h-k) Model 3, (l) Model 4, (m) Model 5 (continued)

Model 1과 Model 2는 토층에 매립된 터널의 지진취약도 분석을 진행하였다. Model 1의 경우 10 m가 가장 얇은 매설 깊이이나, 다음으로 얇은 깊이인 15 m에서 가장 취약도가 높은 것으로 나타났다. 이는 15 m 깊이에서 낮은 전단계수와 높은 감쇠비율의 토층이 존재하여 과도한 변형이 발생한 것으로 기인한다. Model 2 또한 얇은 깊이에서 가장 취약도가 높은 것으로 나타나, Model 1과 비교하여 DS가 높아질수록 취약도의 감소가 빠른 것을 확인할 수 있다. Model 3는 암반층에 매립된 터널의 지진취약도로 매설 깊이가 깊어 토층에 매립된 모델들보다 취약도가 낮다. 동일한 지표면에서의 PGA에 대해 구속압이 높은 암반층과 구속압이 낮은 토층에서 터널 구조물에 작용하는 상대 변위, 터널과 주변 토층/암반과의 상호작용, 깊이에 따른 상대 변위의 변화 등 그 원인에 대해 더욱 면밀한 분석이 필요하다. Model 4는 암반터널 피해사례에 기반한 취약도 모델로 매설 깊이에 따른 분류는 되어 있지 않으며, 동일한 암반 대상 취약도 모델인 Model 3의 평균과 비슷하다. Model 5는 토층과 암반층을 구분하지 않는 일반적인 모델로, 낮은 손상 상태일 경우 Model 4보다 낮은 취약도를 보이나, 높은 손상 상태일 경우 Model 4보다 높은 취약도를 나타낸다.

### 3.2 가중 조합된 대표 지진취약도 모델

각 모델들의 상관성이 낮다면 모델들을 가중조합하여 불확실성이 감소된 최적화된 모델을 도출할 수 있다 (Kwak et al., 2018). 가중조합이란 모델의 예측값에 전체의 합이 1인 가중치를 각각 부여 후 합산하여 새로운 예측값을 찾는 것을 의미한다. 이번 연구에서 고려한 5개의 모델들은 모델 개발 방법, 매설 깊이, 지반 종류 등의 조건이 각각 다르다. 각 모델을 1) 모든 조건, 2) 깊이별로 분류한 토층, 3) 깊이별로 분류하지 않은 토층, 4) 깊이별로

**Table 4.** Description of model groups and weights assigned per model for each group

Group	Description	Weights		Damage state	$\mu$	$\beta$	
1	Combination of all models	Model 1	20% (5% per sub-model)	2	0.55	0.5	
		Model 2	20% (6.7% per sub-model)				
		Model 3	20% (5% per sub-model)				
		Model 4	20%	3	0.88	0.524	
		Model 5	20%				
2	Soil layer with different buried depth	0~10 m	Model 1 (10 m)	50%	2	0.32	0.546
			Model 2 (9 m)	50%	3	0.492	0.546
					4	0.719	0.546
		10~25 m	Model 1 (15 m, 20 m)	50% (25% per sub-model)	2	0.361	0.61
			Model 2 (20 m)	50%	3	0.61	0.61
					4	0.98	0.61
		25~35 m	Model 1 (35 m)	50%	2	0.557	0.637
			Model 2 (30 m)	50%	3	0.94	0.637
					4	1.51	0.637
		3	Soil layer without depth variation	Model 1	50% (12.5% per sub-model)	2	0.46
Model 2	50% (16.7% per sub-model)			3	0.84	0.58	
				4	1.45	0.58	
4	Rock layer with different buried depth	80 m	Model 3	100%	2	0.47	0.34
					3	0.58	0.35
		200 m	Model 3	100%	2	0.49	0.31
					3	0.7	0.33
		300 m	Model 3	100%	2	0.81	0.38
					3	0.99	0.39
		400 m	Model 3	100%	2	0.84	0.36
					3	1.07	0.38
5	Rock layer without depth variation	Model 3	50% (12.5% per sub-model)	2	0.60	0.37	
		Model 4	50%	3	0.97	0.43	

분류한 암반층, 5) 깊이별로 분류하지 않은 암반층의 총 5개 그룹으로 분류하였다. 첫 번째 그룹인 모든 조건의 경우 Model 1부터 Model 5까지 각각 20%의 가중치를 부여하였다. 매설 깊이 별로 구분되어지는 모델(Model 1, Model 2, Model 3)의 경우 하위 모델의 개수에 따라 부여된 20%를 세분하여 할당하였다. 예를 들어 Model 1의 경우 4개의 하위모델이 존재하므로 각 하위모델이 5%의 가중치를 갖게 된다. 두 번째 그룹인 깊이별로 분류한 토층 조건의 경우 Model 1 및 Model 2의 하위 모델을 얕은 깊이(0~10 m), 중간 깊이(10~25 m), 깊은 깊이(25~35 m)로 구분한 후, Model 1에 50%, Model 2에 50%의 가중치를 주어 조합하였다. 중간 깊이의 경우 Model 1의 하위 모델이 2개가 존재하여 각각 25%를 할당하였다. 세 번째 그룹은 깊이별로 분류하지 않은 토층인 경우로, Model 1과 Model 2에 각각 50%를 할당하였으며, 각 모델의 가중치 내에서 하위 모델에 동등하게 가중치를 부여하였다. 네 번째 그룹은 깊이별로 분류한 암반층인 경우로 Model 3만이 해당하기에 조합없이 Model 3의 하위모델에 각 깊이별로 100%의 가중치를 부여하였다. 다섯 번째 그룹은 깊이별로 분류하지 않은 암반층의 경우로 Model 3과 Model 4에 각각 50%의 가중치를 부여하였으며, Model 3 가중치 내에서 각 하위모델에 동등하게 가중치를 부여하였다. 각 그룹별 조건과 조합 모델, 모델별 가중치, 조합된 모델의 매개변수(로그누적정규분포의 중간값,  $\mu$ , 및 표준편차,  $\beta$ )가 Table 4에 정리되어 있다.

선행연구(Yang and Kwak, 2022)는 개착식 터널에서의 모델들을 수집하고 분석하여 선형가중조합으로 새로운 개착식 터널의 지진취약도 함수를 제안하였다. 각 그룹별 조합된 지진취약도 함수 및 Yang and Kwak (2022)의 개착식 터널 지진취약도 함수가 Fig. 3에 표현되어 있다. 모든 모델들에 동등한 가중치를 부여하여 조합한 Group 1과 개착식 터널을 비교하였을 때, DS 2에서는 비슷한 지진취약도 경향을 보여주나, DS가 올라갈수록 개착식 터널의 피해 확률이 굴착식 터널보다 더 큰 것으로 나타난다. Group 2와 비교하였을 때, 얕은 토층(0~10 m)에 매설된 굴착식 터널의 경우 일반 개착식 터널의 지진취약도 모델보다 더 취약하나, 매설 깊이가 깊어질수록 굴착식 터널의 피해 확률이 더 낮아진다. 깊이 의존성이 없는 토층에 매설된 굴착식 터널의 Group 3은 DS 3에서 개착식 터널과 굴착식 터널의 피해 확률이 유사하여 비슷한 지진취약도를 나타낸다. Group 4는 암반의 굴착식 터널로, 매설 깊이가 깊어질수록 피해 확률이 줄어든다. Group 4의 매설 깊이는 개착식 터널과 상이하므로 Fig. 3(f)~3(i)에 개착식 터널의 지진취약도 모델과의 비교를 생략하였다. Group 5는 매설 깊이와 관련없는 암반 굴착식 터널에 대한 지진취약도 모델로, 굴착식 터널이 개착식 터널보다 피해 확률이 낮은 것으로 나타난다.

각 지진취약도 모델의 PGA는 지표면에서의 PGA를 의미한다. 규모 5이상의 국내 지진에서 진앙거리가 짧은 경우 PGA = 0.3 g 이상의 기록이 존재한다(KMA, 2017). 가중조합한 모델에서 PGA가 0.3 g일 때의 매설 깊이 별 정량적 DS 2 초과 피해 확률은 다음과 같다.

- 매설 깊이 50 m 이하: 20%
- 매설 깊이가 50 m 이상 100 m 이하: 10%
- 매설 깊이 100 m 이상: 3% 이하

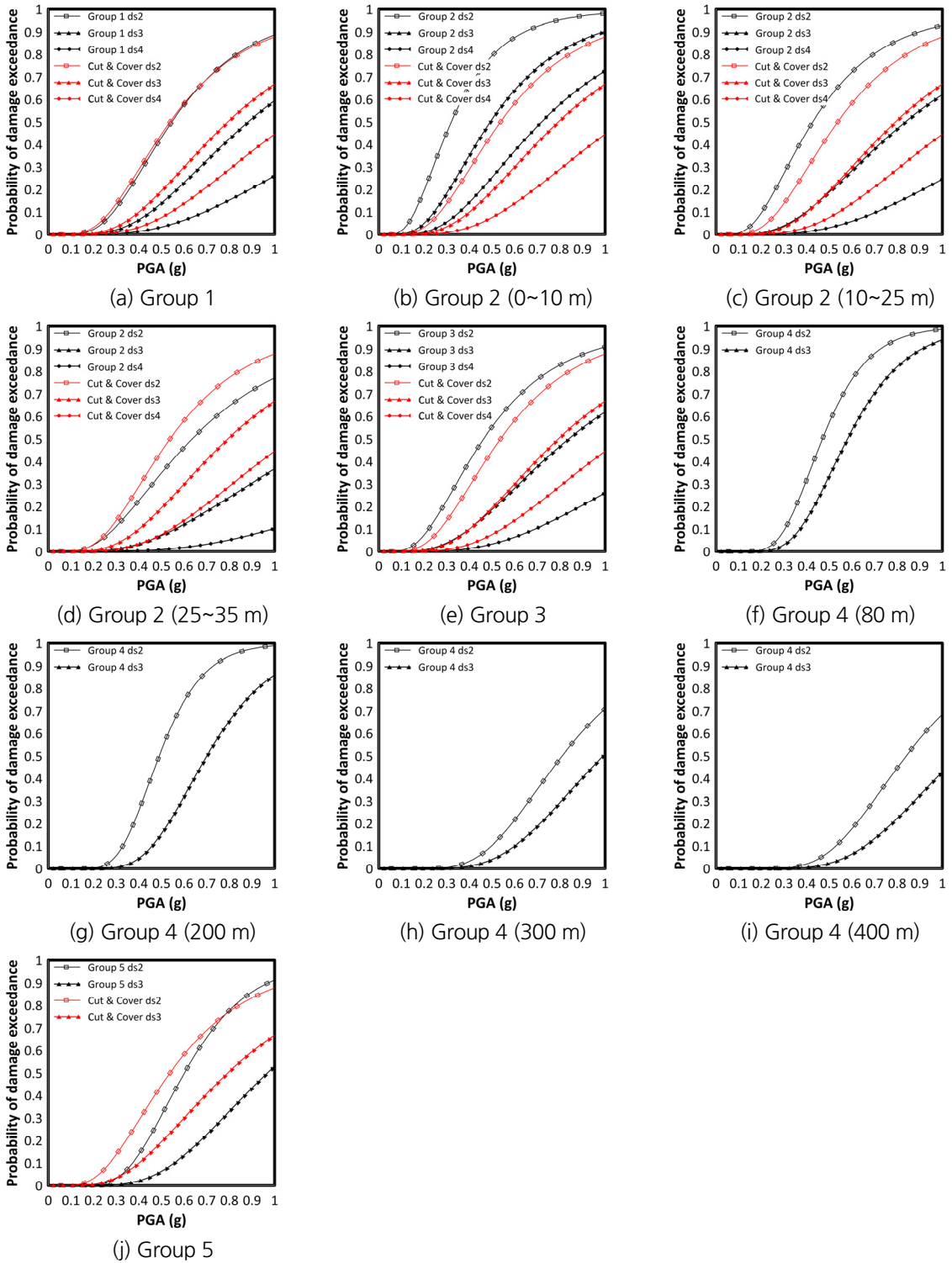


Fig. 3. Seismic fragility curve of bored tunnels by damage state for 5 combined models

## 4. 결론

본 연구에서는 굴착식 터널에 대한 선행 지진취약도 모델들을 분석하고 주변 환경에 따라 분류하여 가중조합된 새로운 지진취약도 함수를 제안하였다. 그 후 새롭게 개발한 모델들을 각 터널의 유형 별로 개착식 터널의 지진취약도 함수와 비교하였다. 개착식 터널은 대부분 얇은 층에 건설되나, 굴착식 터널은 얇은 깊이에서 깊은 깊이 까지 존재한다. 개착식 터널이 주로 건설되는 얇은 깊이의 토층에 대한 조건에서는 굴착식 터널의 지진취약도가 개착식 터널보다 크게 나타났다. 하지만 매설 깊이가 깊어질수록 굴착식 터널의 취약도가 더 낮아지는 것을 확인하였다. 암반에 설치되는 굴착식 터널의 경우 매설 깊이가 깊어 개착식 터널보다 지표면에서의 동일한 PGA에 대해 비교적 낮은 취약도를 나타낸다. 매설 깊이가 깊어질수록 동일한 PGA라도 터널에 직접적으로 가해지는 상대변위가 작으므로 낮은 취약도가 나타나는 것으로 판단된다. 선행 연구 결과로부터 매설 깊이에 따라서 피해 확률이 낮아진다는 것을 확인할 수 있지만, 대상이 한정적이기에 구속압, 터널-지반 상호작용 등을 고려한 추가적인 연구가 더 필요하다. 새로 개발된 모델의 검증 및 국내 굴착식 터널의 최적 지진취약도 결정을 위해 국내 지반조건에 맞는 굴착식 터널에 대한 수치해석을 진행하여 모델에 대한 신뢰성 및 적용성을 높일 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 21CTAP-C152247-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 저자 기여도

양승훈은 데이터 수집 및 분석과 원고 작성을 하였고, 곽동엽은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 하였다.

## References

1. ALA (American Lifelines Alliance) (2001), Seismic fragility formulations for water systems: Part 1 - Guideline, ASCE-FEMA, Reston, VA2001, pp. 85-89.
2. Andreotti, G., Lai, C.G. (2019), "Use of fragility curves to assess the seismic vulnerability in the risk analysis of mountain tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 91, 103008.
3. Chen, Z., Shi, C., Li, T., Yuan, Y. (2012), "Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes", Natural Hazards, Vol. 61, pp. 387-401.
4. Cornell, C.A., Shome, N. (1999), Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, Report No. RMS-35, RMS Program, pp. 232-239.
5. FEMA (2004), HAZUS-MH technical manual, Federal Emergency Management Agency, pp. 7-1-24.
6. Gao, F., Sun, C.X., Tan, X.K., Zhu, Y., Li, H. (2015), "Shaking table tests for seismic response of tunnels

- with different depths”, *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 36, No. 9, pp. 2517-2522.
7. Ghosh, S., Ghosh, S., Chakraborty, S. (2021), “Seismic fragility analysis in the probabilistic performance-based earthquake engineering framework: an overview”, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 122-135.
  8. Hu, X., Zhou, Z., Chen, H., Ren, Y. (2020), “Seismic fragility analysis of tunnels with different buried depths in a soft soil”, *Sustainability*, Vol. 12, No. 3, 892.
  9. Huang, Z.K., Pitilakis, K., Tsinidis, G., Argyroudis, S., Zhang, D.M. (2020), “Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 98, 103341.
  10. Jaramillo, C.A. (2017), “Impact of seismic design on tunnels in rock-case histories”, *Underground Space*, Vol. 2, No. 2, pp. 106-114.
  11. Kamemura, K. (2019), “Seismic response and stability of rock tunnels—Its history and problems today”, *Proceedings of the ISRM Rock Dynamics Summit, Okinawa, Japan*, pp. 52-62.
  12. KMA (2017), *Seismological annual report 2016*, No. 11-1360000-0000104-10, Korea Meteorological Administration.
  13. Kwak, D.Y., Seyhan, E., Kishida, T. (2018), “A method of linear combination of multiple models for epistemic uncertainty minimization”, *Proceedings of the Eleventh US National Conference on Earthquake Engineering, Los Angeles, California*, pp. 1-10.
  14. MOLIT (2022), *Yearbook of road bridge and tunnel statistics*, No. 11-1613000-000108-10, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
  15. Oh, J., Moon, T. (2018), “Seismic design of a single bored tunnel: longitudinal deformations and seismic joints”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 893-910.
  16. Park, D., Nguyen, D.D., Lee, T.H., Nguyen, V.Q. (2018), “Seismic fragility evaluation of cut-and-cover tunnel”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 11, pp. 71-80.
  17. Roy, N., Sarkar, R. (2017), “A review of seismic damage of mountain tunnels and probable failure mechanisms”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, pp. 1-28.
  18. Sharma, S., Judd, W.R. (1991), “Underground opening damage from earthquakes”, *Engineering Geology*, Vol. 30, No. 3-4, pp. 263-276.
  19. Straub, D., Der Kiureghian, A. (2008), “Improved seismic fragility modeling from empirical data”, *Structural Safety*, Vol. 30, No. 4, pp. 320-336.
  20. Yang, S., Kwak, D. (2022), “Evaluation of seismic fragility models for cut-and-cover railway tunnels”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-13.
  21. Zhong, Z., Shen, Y., Zhao, M., Li, L., Du, X., Hao, H. (2020), “Seismic fragility assessment of the Daikai subway station in layered soil”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 132, 106044.