

개착식 철도 터널 구조물의 기존 지진취약도 모델 적합성 평가

양승훈¹ · 곽동엽^{2*}

¹학생회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

²정회원, 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 조교수

Evaluation of seismic fragility models for cut-and-cover railway tunnels

Seunghoon Yang¹ · Dongyoun Kwak^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and System Engineering, Hanyang University

²Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University ERICA

*Corresponding Author : Dongyoun Kwak, dkwak@hanyang.ac.kr

Abstract

A weighted linear combination of seismic fragility models previously developed for cut-and-cover railway tunnels was presented and the appropriateness of the combined model was evaluated. The seismic fragility function is expressed in the form of a cumulative probability function of the lognormal distribution based on the peak ground acceleration. The model uncertainty can be reduced by combining models independently developed. Equal weight is applied to four models. The new seismic fragility function was developed for each damage level by determining the median and standard deviation, which are model metrics. Comparing fragility curves developed for other bored tunnels, cut-and-cover tunnels for high-speed railway system have a similar level of fragility. We postulated that this is due to the high seismic design standard for high-speed railway tunnel.

Keywords: Cut-and-cover railway tunnel, Weighted linear combination, Empirical method, Probability of damage occurrence, Seismic fragility function

초 록

본 연구에서는 기존에 개발된 개착식 철도 터널의 지진취약도 모델들을 가중 조합하여 새로운 모델을 제시하고 제시한 모델의 적정성을 평가하였다. 지진취약도 함수의 형태는 최대지반가속도의 대수정규분포형태로, 누적확률분포로 표현된다. 독립적으로 개발된 각 모델을 선형 가중 조합하는 것으로 모델의 불확실성을 줄일 수 있기에 4개의 모델에 대하여 25%씩 동등하게 선형가중을 부여하였다. 조합된 지진취약도 곡선에 최대

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(1)1-13(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.1.001>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 3, 2021

Revised December 22, 2021

Accepted December 22, 2021



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

지반가속도에 대한 피해발생확률을 이용하여 지진취약도 곡선의 중앙값과 표준편차를 결정하여 새로운 지진취약도 함수를 개발하였다. 개발된 지진취약도 함수의 적합성을 평가하기 위하여 다양한 터널의 지진취약도 곡선과 비교 분석을 진행하였다. 개발된 곡선은 상대적으로 지진피해에 안전한 굴착식 터널의 지진취약도 함수와 비슷한 취약도를 갖는 것으로 나타나는데, 대상 터널은 국내 고속철도 개착식 터널로 높은 내진설계 기준에 의해 기인하는 것으로 판단된다.

주요어: 개착식 철도 터널, 선형 가중 조합, 경험적 방법, 피해발생확률, 지진취약도 함수

1. 서론

국내에서는 2016년 및 2017년 연속적인 큰 규모의 지진(2016 M_L 5.8 경주지진, 2017 M_L 5.4 포항지진)으로 인해 경제적, 사회적으로 큰 피해를 입었다. 이는 더 이상 한반도는 지진 안전지대가 아니며, 지진에 대한 대비가 필요하다는 것을 역설한다. 이에 따라 도로 및 철도와 같은 국내 교통시스템의 구조물들 또한 지진취약도를 재검토할 필요가 있다. 국내 교통시스템은 주로 토공, 터널, 교량 등의 구조물로 구성되어 있다. 이러한 주요 구조물들에 대한 지진취약도는 지진성능 평가, 내진설계, 지진 시 피해 절감을 위한 노력 등의 필요 인자로 정확한 평가가 필요하다(Argyroudis and Pitilakis, 2012; Argyroudis and Kaynia, 2015).

지진취약도 분석은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA) 등과 같은 지진의 정량적인 크기에 대한 주어진 한계상태의 초과확률을 의미한다(Kyung et al., 2016). 지진취약도 함수는 확률론적 지진재해분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)의 결과와 통합하여 대상 구조물의 확률론적 위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA), 즉 지진재해로 인하여 초래되는 다양한 규모의 한계상태 초과확률을 계산하는데 사용된다.

국내 교통시스템의 구조물 중 터널은 개착식 터널과 비개착식 터널로 구분된다. 비개착식 터널은 주로 산을 통과하는 데 사용되며, 그에 따라 대부분 암반 속에 위치한다. 따라서 지진 발생 시 지진동의 크기가 지표면 위에 위치한 구조물보다 상대적으로 약하다. 하지만, 개착식 터널은 지반 상부면 토층에 설치되어 지진동의 크기가 비개착식 터널보다 크고 지반이 상대적으로 연약하여 피해가 발생할 확률이 높다(Park et al., 2006). 따라서 안전한 차량 및 철도 운행을 위해서는 개착식 터널의 확률론적 지진 피해 분석에 사용되는 지진취약도 모델의 정확도를 재고할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존에 개발된 개착식 철도 터널 지진취약도 모델들을 수집하고 분석하여 터널의 피해 상황 별 취약도 곡선의 경향을 살펴보았으며, 여러 유효모델들을 가중 조합하여 불확실성이 감소된 취약도 모델을 제시하였다. 최종적으로 타 구조물 터널의 취약도 모델과 비교하여 제시된 모델의 적합성을 판단하였다.

2. 개착식 터널 구조물의 기존 지진취약도 함수 비교

2.1 대상 기존 지진취약도 모델

본 연구에서는 기 개발된 4개의 개착식 철도 터널 구조물의 지진취약도 모델을 분석하고자 한다. Kim et al. (2014) (Model 1)은 실제 공용 중인 고속철도 터널을 대상으로 내진성능상세평가를 수행하여 지진취약도 모델을 개발하였다. Huh et al. (2017) (Model 2)은 복선 철근콘크리트 박스터널을 대상으로 하여 모래, 풍화토, 암반 세 가지 층 내에 터널을 위치시켜가며 터널 위치 레이어의 속성에 따른 취약도 모델을 제시하였다. Park et al. (2018) (Model 3)은 단선 개착식 철근콘크리트 철도 터널을 대상으로 모델을 개발하였다. 마지막으로 Nguyen et al. (2019) (Model 4)는 Park et al. (2018)의 연구를 연장하여 단선, 복선, 삼선의 개착식 철근콘크리트 박스터널을 대상으로 모델을 개발하였다.

2.2 지진취약도 곡선 개발 절차

지진취약도는 지진 크기에 따른 구조물의 손상확률을 나타낸다. 따라서 지진취약도 함수 개발을 위해서는 지진 크기에 따른 손상확률의 계산이 선행되어야 한다. 손상확률을 구하는 방법에는 경험적 방법과 수치적 방법이 존재한다. 본 연구에서 취합한 국내 개착식 터널 대상 4개의 모델들은 수치적 방법으로 터널 취약도 곡선을 개발하였으나, ALA (2001)와 같이 지진 발생 후 터널 피해 구간 및 지진의 크기를 조사하여 경험적으로 취약도 곡선을 제시한 연구도 존재한다.

수치적 방법으로 터널의 손상확률을 구하는 절차는 다음과 같다(Park et al., 2018). 이러한 절차는 고려된 4개 모델에서 공통적으로 사용되었다.

- 1) 기반암 지반 운동을 입력으로 일차원 등가선형 지반응답해석 실시
- 2) 지반-터널 상호작용을 고려한 탄성 프레임 해석 모델 구축
- 3) 1)의 해석결과로 획득한 지반응답 변위를 2)의 터널 구조 모델에 적용하여 요구 모멘트 계산
- 4) 손상지수(damage index, DI)를 기준으로 터널의 손상상태(damage level, D_L) 정의
- 5) 지반 운동을 변경하며 1)에서 4)까지의 절차를 반복
- 6) 해석결과를 취합하여 기반암 기준 PGA에서 D_L 초과발생확률(손상확률) 계산

이번연구에서 고려한 4개 모델 모두 위의 절차로 얻은 PGA-손상확률 데이터를 이용하여 다음 식과 같은 PGA에 대한 대수정규분포의 누적확률밀도함수로 지진취약도 함수를 정의하였다(Shinozuka et al., 2000).

$$F(a_i; \theta; \delta) = \Phi \left[\frac{\ln(a_i/\theta)}{\delta} \right] \quad (1)$$

여기서, a_i 는 지반운동의 PGA, $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규분포함수의 누적확률분포, θ 는 각 손상수준에 따른 대수정규분포함수의 중앙값, δ 는 대수정규분포함수 표준편차를 뜻한다. θ 와 δ 는 지진취약도 함수를 표현하는 파라메타로 회귀분석으로부터 결정된다.

각 모델에서 사용한 입력지진파, 터널 구조 해석, 손상상태 정의, 그리고 제시된 지진취약도 함수의 비교가 다음 장부터 기술되어 있다.

2.3 입력지진파 비교

지반운동은 구조물의 확률론적 분석에서 불확실성의 중요 인자이다. 입력지진파는 지진파의 강도 및 주파수 특성의 가변성을 고려하기 위해 다양한 파형이 선택된다. 각 모델에서 선택한 입력지진파의 개요는 다음과 같다.

- Model 1 : 설계기준가속도에 부합하는 인공지진파 1개를 생성하고, 2개의 실지진파기록을 설계기준가속도 (0.154 g)에 부합되도록 비례 조정하여 총 3개의 지진파를 사용
- Model 2 : 국내 지진기록만으로는 적절한 지진파형이 부족하므로, 내진설계기준의 설계스펙트럼과 유사한 스펙트럼을 갖는 550개의 시간이력가속도를 인공지진 생성프로그램(QuakeGem)을 이용하여 생성
- Model 3 & 4 : 규모 5 이상의 20개의 국외 실지진파 계측기록을 사용

각 모델 별 사용된 입력지진파의 규모, 개수, 유형이 Table 1에 요약되어 있으며, 사용된 실지진파는 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Summary of input motion characteristics used in previous models

	Model 1	Model 2	Model 3 & 4
Magnitude range	-	-	5.7-7.6
Numbers	3	550	20
Type	Empirical + Synthetic	Synthetic	Empirical

Table 2. Selected ground motion records used in Model 1 and Model 3 & 4

Model	Event	Station	Year	Magnitude	PGA (g)
Model 1	Hachinohe, Japan	Tokachi-oki	1968	7.9	0.170
	Ofunato, Japan	Miyagi-ken-oki	1978	7.4	0.161
Model 3 & 4	Cape Town, S. Africa	Capetown	1969	6.3	0.384
	Chichi, Taiwan	CHY-101	1999	7.6	0.183

Table 2. Selected ground motion records used in Model 1 and Model 3 & 4 (continued)

Model	Event	Station	Year	Magnitude	PGA (g)
Model 3 & 4	Coyote, USA	San Juan Bautista	1979	5.7	0.124
	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	0.727
	El-Centro, USA	Imperial Valley Distr.	1940	6.9	0.400
	Hector, USA	North Palm Spr.	1999	7.1	0.265
	Imperial Valley, USA	Elcentro array#1	1979	6.5	0.169
	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	0.509
	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.4	0.218
	Landers, USA	Yermo Fire	1992	7.3	0.244
	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#2	1989	6.9	0.170
	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#3	1989	6.9	0.357
	Mammoth Lakes, USA	Long Valley Dam	1980	6.3	0.430
	Nahanni, Canada	Nahanni-Station #3	1985	6.8	0.148
	Northridge, USA	Beverly Hills	1994	6.7	0.217
	Northridge, USA	Canyon Country	1994	6.7	0.098
	Parkfield, USA	Parkfield-Cholame 5 w	1966	6.1	0.357
	San Fernando, USA	Pacoima Dam	1971	6.6	0.209
	Tabas, Iran	MHUD-Bajestan	1978	7.8	0.899
	Whittier Narrows, USA	Rancho Palos Verdes	1987	6.0	0.186

2.4 터널 구조 해석 비교

개착식 터널의 지진응답을 계산하기 위해 Model 2-4에서는 프레임 해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였으며, Model 1에서는 사용한 프로그램이 명기되어 있지 않다. 각 모델에서 사용한 해석의 개요는 다음과 같으며, Table 3에서 각 모델 별 구조해석에 사용된 변수의 값을 요약하였다.

- Model 1 : 정부고속철도 터널의 내진성능 예비 평가 결과로부터 ‘내진보강 핵심’ 및 ‘내진보강 중요’로 판단된 터널과 점검결과 천장부에서 종방향 균열이 발생한 터널을 포함하여 총 27개소를 내진성능 상세평가 대상 구조물로 선정하였다. 해석에 사용된 터널의 단면도는 본문에서 언급되지 않았다. 내진성능 상세평가는 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하였으며, 박스터널과 같은 개착식 구조물에 대해서는 응답변위법을 적용하였다.
- Model 2 : 지진 하중을 받는 지하 구조물의 지반-구조 상호작용 거동을 다룰 수 있는 유사정적 해석 지침(Iai, 2005)을 참고하여 철근 콘크리트 터널에 대해 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 터널의 단면도는 Fig. 1(a)와 같이 박스형 복선 터널이다. 터널 높이와 너비는 각각 7.8 m와 29.3 m이다. 터널의 상부 슬래브와 하부 슬래브의 두께는 각각 1.2 m, 1.3 m이며, 갑판 슬래브는 두께 1 m의 두 측면 벽과 0.6 m × 0.7 m인 중앙 직사각형 기둥으로 지지되어 있다. 지반조건은 모래, 풍화토, 암반의 세 층으로 이루어져 있으며, 터널의 위치를 변화

시켜가며 해석을 수행하였다.

- Model 3 & 4 : 이 두 모델 또한 Iai (2005)의 유사정적 해석 지침을 참고하여 해석을 수행하였다. 터널 주변 지반은 지반-터널 간의 상호 작용을 고려하기 위해 일련의 수직, 전단 스프링으로 모형화 하였으며, 각각의 스프링 계수는 도시철도 내진설계 기준(MLTM, 2009)의 절차를 따라 계산하였다. 지반응답해석으로부터 계산된 자유장 지반 변위를 전단 스프링에 적용하였고, 지하수위는 고려하지 않았으며, 흙의 단위중량과 정지 토압계수(K_0)는 17 kN/m^3 과 0.5 를 사용하였다. 지반의 비선형성을 고려하기 위해 터널 중심 심도에서의 등가선형 전단탄성계수를 해석에 적용하였다. 포아송비는 0.3 을 적용하였다. 터널의 단면은 Fig. 1(b)와 같이 단선형 박스 터널이다. 구조 단면의 항복 모멘트를 평가하기 위해 터널 라이닝의 콘크리트와 철근 모두에 비선형 재료 모델을 적용하였다.

Table 3. Values of numerical analysis properties per model

Model	Elastic modulus of concrete (GPa)	Poisson's ratio of soil	Compressive strength of concrete (MPa)	Yield strength of reinforcement (MPa)
Model 1	-	-	-	-
Model 2	30	0.17	28	400
Model 3	-	0.3	-	-
Model 4	24.8	0.3	27.5	413

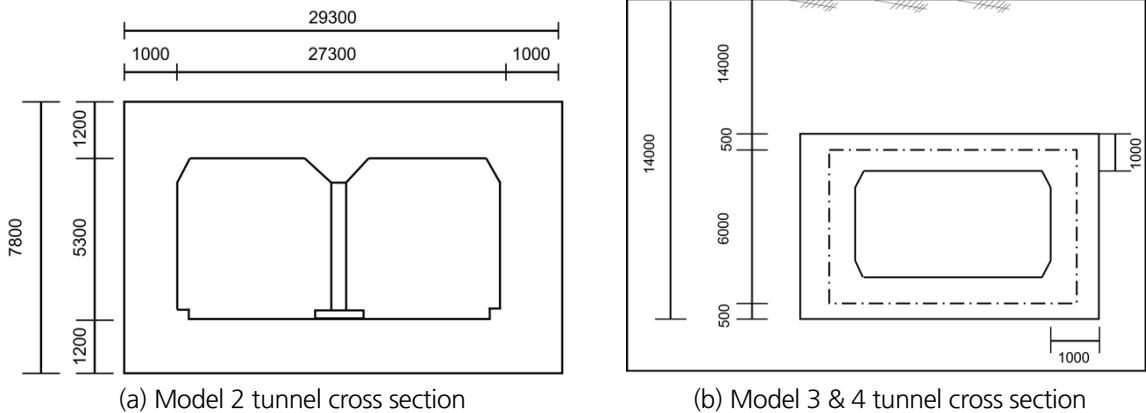


Fig. 1. Cross section of tunnels: (a) Huh et al. (2017), (b) Park et al. (2018) and Nguyen et al. (2019)

2.5 각 모델의 손상상태 기준

터널 구조물의 지진취약도 함수를 개발하기 위해서는 손상상태(D_L)의 기준이 필요하다. 각 모델의 D_L 은 라이닝 콘크리트의 구조적 손상 발생에 따른 평가를 기준으로 각각 다음과 같이 정의되었다.

- Model 1은 부재가 가지고 있는 구조물 보유성능과 지진요구량의 비인 안전율(factor of safety, F_S)에 의거하여 D_L 을 정의하였다.
- Model 2는 D_L 평가를 구조물의 처짐에 기초하여 분석하였다. Fig. 2와 같이 터널을 프레임 구조로 간주하고 프레임 끝에서 항복점이 발생하는 것으로 가정하였고, 터널의 수평 변위와 PGA의 관계성은 Push-over 방식으로 계산하였다. Push-over 해석법은 구조물 내진성능 분석에 사용되는 방법으로 지진하중 작용시의 관성력 분포를 정적으로 적용하여 구조물의 비선형 응답을 추정하는 실용적인 방법이다(Kim et al., 2006). 깊은 터널에 대한 단순 모델과 얕은 터널에 대한 분산 하중 모델로 구분하여 각 20개 Case에 대해 분석을 수행하였다. 그 후 분석을 통해 얻어진 평균 값의 수평변위율과 터널 높이비로 손상지수(DI)를 규정하여 D_L 기준을 개발하였다.
- Model 3 & 4는 터널 프레임에 발생하는 소성 힌지의 개수로 D_L 를 정의하였으며, Lee et al. (2016)이 개발한 손상수준의 기준을 참고하였다. D_L 2, 3, 4는 각각 소성 힌지의 개수가 1, 2, 3을 초과하는 값이며, 이에 상응하는 DI를 제시하였다. DI는 탄성모멘트와 항복모멘트의 비율로 정의되며 비탄성해석과 탄성해석을 병행하여 계산되었다.

Table 4는 각 모델 별 D_L 정의에 사용된 F_S 와 DI의 범위를 나타낸다.

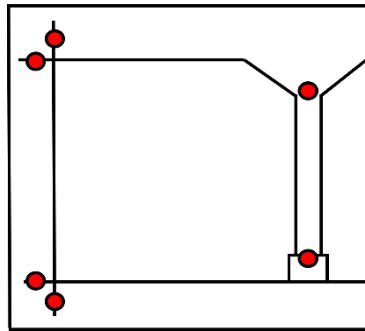


Fig. 2. Inspection point for the hinge model

Table 4. Definition of damage level and corresponding damage index

Damage level (D_L)	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
D_L 2 (minor)	$F_S \geq 1.6$	$0.9 < DI \leq 1.7$	$1.0 \leq DI < 1.2$	$1.0 \leq DI < 1.2$
D_L 3 (moderate)	$F_S \leq 1.0$	$1.7 < DI \leq 2.1$	$1.2 \leq DI < 2.0$	$1.2 \leq DI < 2.0$
D_L 4 (extensive)	$F_S \leq 0.67$	$2.1 < DI$	$2.0 \leq DI$	$2.0 \leq DI$

2.6 지진취약도 함수

취약도 곡선은 PGA의 증가에 따른 손상확률의 증가를 보여준다. Model 1, 3, 4는 PGA가 약 0.07 g 이상에서부터 1% 이상의 파괴확률이 발생하여 점차적으로 증가하는 반면에, Model 2의 경우는 PGA가 0.5 g일 때부터 급격하게 파괴확률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 짧은 PGA의 변화에서 급격한 파괴확률의 증가는 모델의 불확실성이 낮다는 것을 의미한다. 예를 들어, 상대적으로 불확실성이 높은 Model 1과 불확실성이 작은 Model 2를 비교해 보면, Model 1의 경우 PGA = 0.3 g 및 0.9 g일 때 손상확률이 20% 및 85%로 각각의 PGA에 대한 손상여부에 불확실성이 존재하나, Model 2의 경우 손상확률이 각각 0%와 100%로 동일한 PGA의 변화에서 Model 1보다 더 확실한 손상여부를 나타낸다. 따라서 지진취약도에서 급격한 파괴확률의 증가는 손상여부에 대한 낮은 불확실성을

Table 5. Fragility function parameters

Fragility model	Damage level (D_L)	Median (θ)	Standard deviation (δ)	Weight (%)
Model 1	2	0.3	0.71	25
	3	0.61		
	4	0.74		
Model 2	2	0.3	0.09	25
	3	0.61	0.09	
	4	0.74	0.1	
Model 3	2	0.58	0.63	25
	3	0.67		
	4	0.83		
Model 4	2	0.73	0.74	25
	3	1.23		
	4	1.92		

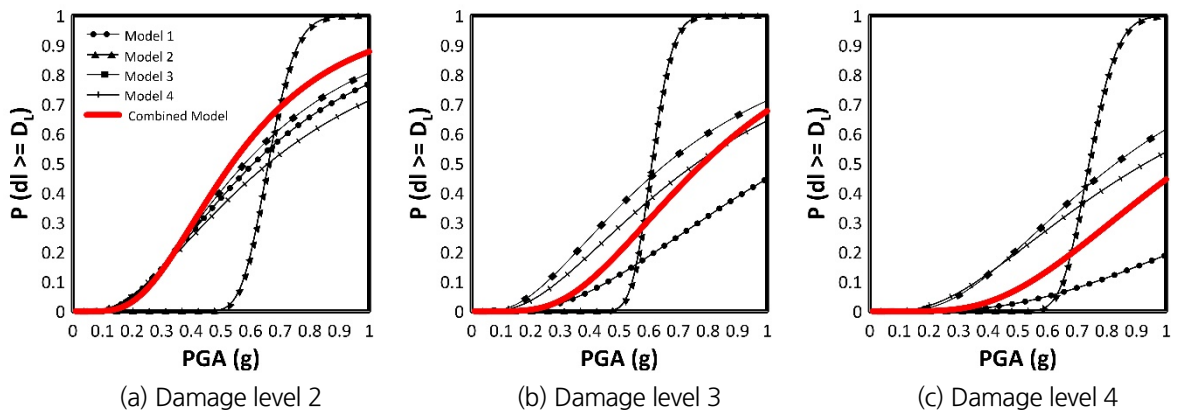


Fig. 3. Seismic fragility curve by damage level for Model 1 (Kim et al., 2014), Model 2 (Huh et al., 2017), Model 3 (Park et al., 2018), and Model 4 (Nguyen et al., 2019); Combined model is also shown

나타낸다. Model 2의 경우 550개의 인공지진파를 사용하였지만 실제 지진파가 갖고 있는 시간별 주파수 특성, 지진파의 길이 등과 같은 지진파의 다양성이 제대로 반영되지 않아 불확실성이 낮게 나타난 것으로 보인다. Table 5는 각 모델별로 제시되어 있는 D_L 에 따른 θ 및 δ 를 나타내며, Fig. 3은 D_L 2-4 이상의 피해를 입을 확률에 대한 각 모델의 지진취약도 함수를 나타낸다.

3. 지진취약도 함수 선형가중조합

선형가중조합은 각 모델 별 중요성에 따라 가중치를 할당하여 합산하는 것을 의미한다. 각 모델의 표준편차 및 모델 간의 상관성 정보가 존재한다면 가중 조합된 모델의 표준편차를 최소화할 수 있다(Kwak et al., 2018). 선형가중조합법에는 역분산 가중치, 최적 가중치 그리고 동일 가중치가 존재한다. 역분산 가중법은 일반적으로 각 모델에 대한 분산정보가 존재할 경우 사용하며, 최적 가중법은 다중 모델 간의 분산정도와 상관 관계가 존재할 경우 사용하는 것으로 조합된 모델의 분산을 최소화 할 수 있다. 하지만 이런 모델 간의 상관관계와 분산 정보를 사용한 방법은 데이터가 존재하지 않을 경우 사용하는데 한계가 있다. 각 모델이 서로 독립적이라면 상관관계 및 분산 정보에 상관없이 등가 가중치를 할당하여 조합하여도 모델의 정확성이 높아진다(Kwak et al., 2018). 이번 연구에서 취합한 4개의 모델은 따로 표준편차 및 모델 간의 상관성이 존재하지 않는다. 따라서 각 모델이 독립적으로 개발되었으며 개발 상의 오류가 존재하지 않고, 각 모델들 모두 오차를 최소화하는 방향으로 개발되었다고 가정하여 모든 모델에 동등하게 가중치를 부여하였다.

Table 6은 조합된 지진취약도 함수의 각 손상수준 별 θ 및 δ 를 나타낸다. θ 및 δ 모두 각 모델들의 중간값 및 표준편차에 대하여 동등한 가중치를 할당하여 재조합 하였다. δ 가 D_L 별 일정하다면 PGA가 낮을 경우에도 D_L 에 따른 피해확률의 역전현상이 발생하지 않는다. 따라서 δ 는 D_L 의 변화에 상관없이 단일값으로 제시하였다. 조합된 지진취약도 함수는 앞서 언급한 Fig. 3에 표현되어 있다.

Table 6. Fragility function parameter of new model

Damage level (D_L)	Median (θ)	Standard deviation (δ)
2	0.5375	0.5325
3	0.7925	
4	1.075	

4. 지진취약도 함수 적합성 평가

위에서 언급한 지진취약도 함수는 국내 개착식 박스형 철도 터널이 대상이다. 지진취약도 함수의 적절성 평가는 대상 터널에 대한 실제 피해사례와의 비교로부터 수행될 수 있으나, 현재까지 국내에서 지진에 의한 터널의 피해는 보고된 적이 없다. 이번 연구에서는 실제 사례와의 비교가 아닌 굴착식 터널 또는 국외 개착식 터널 대상 지

진취약도 함수와의 비교를 진행하여 제시한 국내 개착식 터널의 지진취약도 함수의 적절성을 평가하고자 한다.

Fig. 4는 제안된 지진취약도 함수와 Kim et al. (2014), FEMA (2020)에서 제시한 HAZUS, Avnaki et al. (2018), Andreotti and Lai (2019), 그리고 Hu et al. (2020)의 지진취약도 함수를 비교하고 있다. Kim et al. (2014)은 경부고속철도의 굴착식 터널에 대해 수치적 방법을 통해 지진취약도 함수를 개발하였다. 원형 또는 타원형 형상을 가지고 있는 굴착식 터널의 지진취약도 함수는 상대적으로 동일한 크기의 지반운동에서 개착식 박스 터널에 비해 피해확률이 낮다. 굴착식 터널의 주변지반은 주로 강성이 큰 암반이며 개착식 터널의 주변지반은 주로 강성이 작은 퇴적물 토사이다. Kim et al. (2014)의 모델이 가장 낮은 확률을 보이는데, 지진발생 시 암반지역에서의 변위가 작아 굴착식 터널부재에 발생하는 응력이 작은 것으로 기인한다. HAZUS의 굴착식 터널에 대한 지진취약도 함수의 경우 경부고속철도의 지진취약도 함수 보다 높다. HAZUS는 2001년 이전에 건설된 터널을 대상으로 지진취약도 함수를 제안한 것으로, 현재의 고속철도터널보다 내진설계가 높지 않아 피해확률이 높은 것으로 판단된다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 HAZUS 모델은 $D_L \geq 2$ 에서는 제안된 개착식 모델과 비슷한 피해확률을 가지고 있으나, $D_L \geq 3$ 에서는 제안된 모델보다 더 높은 피해확률을 나타낸다. Avnaki et al. (2018)은 세그먼트 라이닝 터널에 대해 기존 철근콘크리트 라이닝 재료와 무근콘크리트 라이닝 재료의 경우를 비교하며 손상확률을 분석하였다. 무근콘크리트 라이닝 터널은 일반적으로 철근 및 섬유 보강 사례에 비해 손상 확률이 높다. Fig. 4는 분석 Case 중 가장 취약한 성능을 나타내는 Macro steel 0.5% 경우의 취약도 함수를 표현하고 있다. Andreotti and Lai (2019)는 암석으로 이루어진 산악터널에 대한 지진취약도 함수를 나타내는데, 깊이가 깊어질수록, 두께가 두꺼울수록 지진에 대한 피해 확률이 낮아진다. 이번연구에서는 비교대상으로 0.7 m의 두께와 깊이 80 m에 위치한 터널의 지진취약도 함수를 Fig. 4에 도시하였다. Hu et al. (2020)은 원형터널을 대상으로 취약도 분석을 진행하였으며, 매설 깊이와 터널의 피해확률은 상관성이 낮은 것으로 분석하였다. Hu et al. (2020)에 나타난 지진취약도 중 지진에 가장 취약했던 15 m에서의 지진취약도 함수를 추출하여 Fig. 4에 도시하였다. Hu et al. (2020)의 취약도 함수는 전 구간에서 비교된 함수들 중 가장 높은 피해확률을 나타내고 있다.

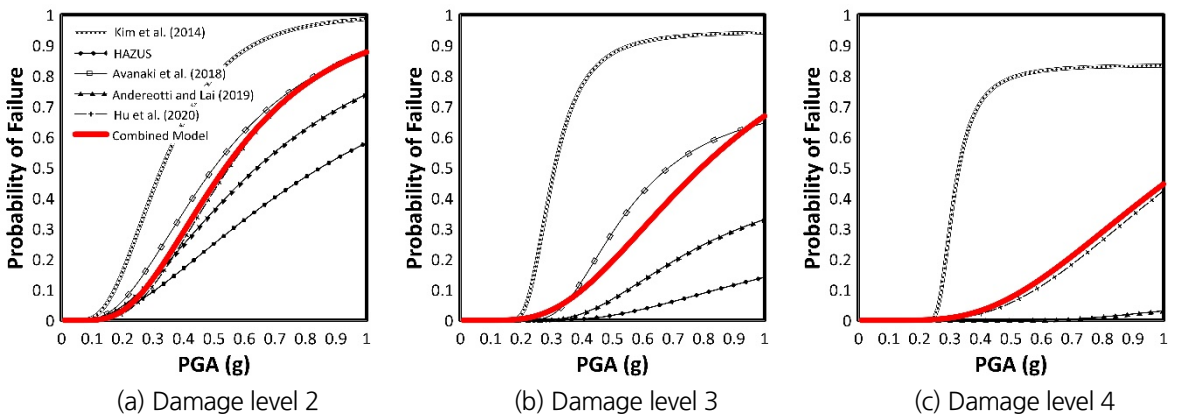


Fig. 4. Comparison of seismic fragility curves by tunnel type

Fig. 4와 같이 개착식 터널에 대해 가중조합된 지진취약도 함수는 취약도가 비교적 높은 굴착식 터널의 지진취약도 함수 범위 사이에서 낮은 편에 위치한다. 굴착식 터널에 비해 개착식 터널이 낮은 취약도를 나타내는데, 이는 고려된 4개의 개착식 터널 대상이 주로 고속철도 구조물로, 터널 내진설계기준이 상대적으로 높기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

피해사례가 존재하지 않을 경우 지진취약도의 정확성을 검증하기는 쉽지 않다. 이럴 경우 독립적으로 개발된 각 모델을 선형 조합하는 것으로 모델의 불확실성을 줄일 수 있다. 이번 연구는 국내 고속철도 개착식 터널의 지진취약도 함수를 재정립하기 위해 기 개발된 4개 모델들의 구조해석 방법, 입력지진파, 손상수준 정의 등에 대해 비교하였고, 각 손상수준 별 지진취약도 함수를 선형 조합하여 새롭게 조합된 지진취약도 함수를 제시하였다. 또한, 조합된 지진취약도 함수의 적절성 평가를 위해 굴착식 터널의 지진취약도 함수와 비교를 진행하였다.

타 지진취약도 함수와 비교 결과, 국내 고속철도 대상 개착식 터널의 지진취약도 함수는 취약도가 높은 기타 굴착식 터널의 지진취약도 함수보다 낮은 취약도를 나타내었다. 일반적으로 얇은 토층에 건설되는 개착식 터널의 지진취약도는 산속을 횡단하는 굴착식 터널의 지진취약도보다 구속조건의 차이에 의해 주어진 기반암 PGA에서 더 큰 피해확률을 나타내지만, 국내 고속철도 개착식 터널의 경우 높은 내진설계 기준에 의해 국외 기타 굴착식 터널의 지진취약도 함수와 비슷하거나 낮은 취약도를 갖는 것으로 판단된다. 조합된 모델의 추가적 검증을 위해, 터널 단면, 재료 물성, 입력지진파 등 다양한 조건을 기반으로 수치해석을 수행하여 각 조건에 따른 타 모델과의 비교 등으로부터 모델에 대한 신뢰성을 더욱 확보할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 21CTAP-C152247-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

저자 기여도

양승훈은 데이터 수집 및 해석, 원고작성을 하였고, 광동엽은 연구개념 및 설계, 원고검토를 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, pp. 103008.
3. Argyroudis, S., Kaynia, A.M. (2015), “Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44, No. 11, pp. 1863-1879.
 4. Argyroudis, S.A., Ptilakis, K.D. (2012), “Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 35, pp. 1-12.
 5. Avanaki, M.J., Hoseini, A., Vahdani, S., de Santos, C., de la Fuente, A. (2018), “Seismic fragility curves for vulnerability assessment of steel fiber reinforced concrete segmental tunnel linings”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 78, pp. 259-274.
 6. FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2020), HAZUS-MH technical manual, pp. 7-1-27.
 7. 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, pp. 892.
 8. Huh, J.W., Le, T.S., Kang, C.H., Kwak, K.S., Park, I.J. (2017), “A probabilistic fragility evaluation method of a RC box tunnel subjected to earthquake loadings”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 2, pp. 143-159.
 9. Iai, S. (2005), “International standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works - an overview”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 605-615.
 10. Kim, G.W., Song, J.G., Lee, C.H. (2006), “Lateral load distribution factor for pushover analysis including higher mode effects”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 10, No. 3, pp. 203-210.
 11. Kim, H.K., Shin, C.S., Lee, T.H., Lee, J.G., Park, D.H. (2014), “A study on the development of the seismic fragility functions of the high speed railway tunnels in use”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 11, pp. 67-75.
 12. 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.
 13. Kyung, J.B., Kim, M.J., Lee, S.J., Kim, J.K. (2016), “An analysis of probabilistic seismic hazard in the Korean Peninsula - probabilistic peak ground acceleration (PGA)”, *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 52-61.
 14. Lee, T.H., Park, D.H., Nguyen, D.D., Park, J.S. (2016), “Damage analysis of cut-and-cover tunnel structures under seismic loading”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 413-431.
 15. MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009), *Earthquake resistance design regulations for subway structures*, pp. 60.
 16. Nguyen, D.D., Park, D.H., Shamsher, S., Nguyen, V.Q., Lee, T.H. (2019), “Seismic vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 86, pp. 247-261.
 17. Park, D.H., 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.
 18. Park, S.Y., Yoon, H.J., Oh, Y.S., Sin, Y.S. (2006), “A case study of damages on tunnel structure due to

chuetsu earthquake”, Proceedings of the KSR (Korean Society for Railway) Conference, Daejeon, pp. 478-492.

19. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J.H., Naganuma, T. (2000), “Statistical analysis of fragility curves”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1224-1231.