한국지반공학회논문집 제34권 11호 2018년 11월 pp. 71 ~ 80
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.34, No.11, November 2018 pp. 71 ~ 80

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.11.71

박스형 터널의 지진 취약도 평가

Seismic Fragility Evaluation of Cut-and-cover Tunnel

박 두 희[1] Park, Duhee 듀이-두안 응[2] Duy-Duan Nguyen
이 태 형[3] Lee, Tae-Hyung 반-쾅 응[4] Van-Quang Nguyen

Abstract

In this study, the seismic response of cut-and-cover box tunnels is evaluated from pseudo-static analyses and the fragility curves are derived. A series of site profiles were used to evaluate the effect of soil conditions. A total of 20 ground motions were used. The fragility curves were developed as functions of peak ground acceleration for three damage states, which are minor, moderate, and extensive states. The damage indices, defined as the ratio of the elastic moment to the yield moment, correlated to three damage states, were used. The curves are shown to greatly depend on the site profile. The curves are further compared to those derived in previous studies. The widely used empirically derived curves are shown not to account for the site effects, and therefore underestimate the response for soft sites.

요 지

본 연구에서는 박스형 개착식 철도 터널의 지진 응답을 유사정적 프레임 해석으로부터 평가하였으며 취약도 곡선을 도출하였다. 지반의 영향을 평가하기 위하여 다양한 이상화된 주상도를 사용하였으며 20개의 계측지진기록을 적용하였다. 기존 연구에서 제시된 탄성 모멘트와 항복 모멘트 비로 정의된 손상지수를 사용하여 Minor, Moderate, Extensive 손상상태에 대한 취약도 곡선을 각각 최대지반가속도의 함수로 적용하였다. 연구 결과, 지반 조건은 취약도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이를 고려하는 곡선의 개발이 중요한 것으로 나타났다. 개발된 취약도 곡선은 기존의 연구에서 도출된 곡선들과 비교하였다. 기존에 제시된 경험적 취약도 곡선은 지반조건의 영향을 고려할 수 없으며 특히 연약 지반에서는 취약도를 과소예측하는 것으로 나타났다.

Keywords : Cut-and-cover box tunnel, Seismic fragility curve, Damage state, Pseudo-static analysis, Inelastic frame model

1. 서 론

지하구조물은 도로터널, 철도 터널, 지하주차장, 매설관, 그리고 저장공간 등의 목적으로 사용되고 있는 인프라의 중요 구조물이다. 지하구조물은 지상 구조물에 비하여 안전한 것으로 알려졌으나 최근에 발생한 많은 지

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hangyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
2 정회원, 건국대학교 인프라시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D. student, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)
3 정회원, 건국대학교 인프라시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)
4 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2018 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

진에서 지하구조물도 큰 피해 그리고 경우에 따라서는 붕괴까지 발생할 수 있는 것으로 나타났다(Hashash et al., 2001; Pitilakis and Tsinidis, 2014). Roy and Sarkar (2017)는 도로 터널에 대한 취약도를 분석하였다. 조사 결과, 지하에 시공된 터널에도 다양한 손상이 발행한 것으로 나타났다.

지하구조물의 손상은 정성적인 그리고 정량적인 방법을 통하여 규명되었다. 정성적인 평가결과는 ALA(2001), Dowding and Rozan(1978), HAZUS(2004) 그리고 Werner et al.(2006) 등에 기술되었다. 암반에 시공된 굴착 터널의 취약도에 대해서는 균열 폭과 길이(Corigliano et al., 2007) 또는 구조요소의 회전각도(Andreotti and Carlo, 2014; Andreotti et al., 2013) 등을 통하여 평가하였다. Lee et al.(2016)은 손상지수를 탄성 모멘트와 항복 모멘트의 비율로 정의하였으며 Minor, Moderate, Extensive 손상상태에 대한 지수를 구조물에 발생하는 소성힌지의 갯수로 제안하였다.

취약도 곡선은 특정 지반진동변수의 강도에 따라서 사전 정의된 손상상태를 초과할 확률을 나타낸다. 취약도 곡선은 인프라나 건물의 지진에 대한 성능 평가에 사용되는 유용한 도구이다. 하지만 아직 철도 시설물에 대한 연구는 극히 제한적인 상황이다. 무엇보다 손상지수에 대한 연구가 선행되지 않았기에 기존에 제안된 일부 곡선의 적용성에도 재평가가 필요하다.

취약도 곡선은 상용된 자료에 따라서 경험적 곡선 그리고 수치적 곡선으로 분류할 수 있다. 기존 손상 자료에 기반하여 개발된 곡선으로는 American Lifelines Alliance (ALA, 2001)와 HAZUS(2004)가 있다. 경험적 곡선의 단점은 제한된 자료에 기반하여 도출되었으며 다양한 지반조건과 터널의 종류에 대한 평가가 불가능하다는 점이다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 수치해석 결과를 이용하여 취약도 곡선을 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다. Corigliano et al.(2007)은 대심도 암반 터널에 대한 취약도 곡선을 개발하였다. Argyroudis and Pitilakis (2012)는 저심도 굴착 터널에 대한 취약도 곡선을 도출하였다. 손상상태와 지수는 공학적 근거 없이 공학적 판단을 적용하여 결정하였다.

본 연구의 목적은 지반 조건의 영향을 고려하여 박스형 굴착 터널의 취약도 곡선을 도출하는 것이다. 이를 위하여 기반암 심도와 지반등급이 다른 16개의 주상도를 사용하였으며 20개의 계측지반운동을 사용하였다. 1차원 부지응답해석을 수행하여 지반 변위 주상도를 계산하였으며 이를 비탄성 프레임 해석 모델에 적용하여 터널의 취약도를 평가하였다. 본 연구에서 도출된 취약도 곡선은 기존에 제시된 경험적 곡선과 수치적으로 개발된 곡선들과 비교하여 적용성을 평가하였다.

2. 터널의 취약도 곡선 유도 절차

터널의 지진응답은 동적해석법 또는 유사정적해석법의 일종인 응답변위법으로 평가할 수 있다. 국내에서 가장 널리 사용되는 응답변위법의 경우, 터널과 지반의 운동학적 상호작용만이 고려되며 관성학적 상호작용은 고려되지 않는다. 이미 기존의 연구들에서 관성학적 상호작용은 지반에 둘러 쌓여 있는 지하구조물에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 보고되었다(Argyroudis and Pitilakis, 2012; Hashash et al., 2010; Hwang and Lu, 2007; Zou et al., 2017). 이와 같은 이유로 응답변위법이 실무 및 연구에서 널리 사용되고 있다(Park et al., 2009). 본 연구에서도 유사정적해석을 수행하여 개착 터널의 취약도를 평가하였다. 취약도를 평가하기 위한 단계는 아래와 같다.

1) 손상상태 및 손상지수 정의
2) 터널-지반 탄성 프레임 해석 모델 구축
3) 1차원 등가선행해석을 수행하여 지반변위 주상도 계산
4) 터널에 작용하는 요구 모멘트 계산
5) 해석 결과를 취합하여 평균과 표준편차 계산(Tang and Ang, 2007)
6) 취약도 곡선 도출

취약도 곡선은 로그 정규 로그 누적분포 함수를 이용하여 아래와 같이 정의되었다.

$$P[DS|IM = X] = \Phi\left(\frac{\ln X - \mu}{\beta}\right) \tag{1}$$

여기서 $P[DS|IM]$ = 지반운동 강도 (IM)에서 손상상태를 초과할 조건부 확률, $\Phi(\cdot)$ = 누적분포함수의 표준편차, X = 지반운동 강도, μ = $\ln X$ 의 평균, β = $\ln X$ 의 표준편차이다. 표준편차는 아래와 같이 터널의 손상지수(β_D)와 지반운동의 불확실성(β_M)을 고려하여 아래와 같이 계산되었다.

$$\beta = \sqrt{\beta_D^2 + \beta_M^2} \tag{2}$$

본 연구에서 적용한 손상지수의 불확실성을 고려하기 위하여(Argyroudis and Pitilakis, 2012)와 동일하게 0.3을 적용하였으며 지반운동의 불확실성을 고려하기 위한 β_M은 계산된 손상지수의 평균 표준편차를 적용하였다.

3. 지반변위 주상도 산정

확률론적 해석에서 지반운동은 불확실성을 결정하는 가장 큰 요소이다. 본 연구에서는 총 이를 고려하기 위하여 총 20개의 계측지지진기록을 사용하여 부지응답해석을 수행하였으며 이들에 대한 정보는 Table 1에 정리하였다. 지진파의 PGA는 0.1g부터 1.5g까지 조정하였다. Fig. 1에는 입력지진파의 5% 감쇠된 가속도 스펙트럼과 평균가속도 스펙트럼을 도시하였다.

지반변위를 산정하기 위하여 지반주상도 16개를 사용하였다(Fig. 2). 지반주상도는 Argyroudis and Pitilakis (2012)의 연구에서 발췌하였다. 적용된 기반암 깊이(H)는 30m, 50m, 100m와 150m이다. 지반주상도의 상세 내용은 Table 2에 정리하였다. 지반주상도는 KBC 2016 기준으로 S_B, S_C, and S_D 등급으로 분류되며 국민안전처 내진설계 공통적용사항(MPSS, 2017) 기준으로는 S_4와 S_5로 분류된다. 본 연구는 국내 지반에 국한된 것이 아니며 국내에서는 비율이 높은 S_2 지반이 포함되지 않았다. 또한 선정된 지반주상도는 강성이 깊이에 따라 일정하게 증가하는 이상화된 조건이 적용된 주상도이며 실

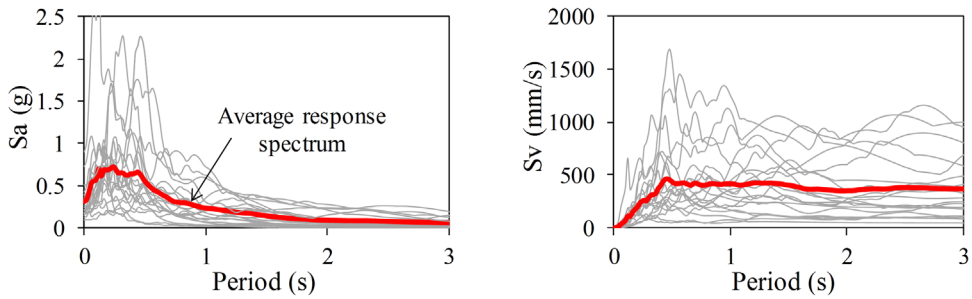


Fig. 1. Response spectra of 20 ground motions

Table 1. Selected ground motion records

No.	Earthquake event	Station	Year	Mag. (Mw)	Depth (Km)	PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Cape Town, S. Africa	Capetown	1969	6.3	15.0	0.384	21.9
2	Chichi, Taiwan	CHY-101	1999	7.6	8.0	0.183	39.3
3	Coyote, USA	San Juan Bautista	1979	5.7	10.0	0.124	7.6
4	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	13.7	0.727	56.4
5	El-Centro, USA	Imperial Valley Distr.	1940	6.9	8.8	0.400	37.8
6	Hector, USA	North Palm Spr.	1999	7.1	5.0	0.265	28.5
7	Imperial Valley, USA	Elcentro array#1	1979	6.5	10.0	0.169	11.6
8	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	17.9	0.509	37.3
9	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.4	15.0	0.218	17.7
10	Landers, USA	Yermo Fire	1992	7.3	7.0	0.244	25.7
11	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#2	1989	6.9	17.5	0.170	14.2
12	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#3	1989	6.9	17.5	0.357	28.6
13	Mammoth Lakes, USA	Long Valley Dam	1980	6.3	14.0	0.430	23.5
14	Nahanni, Canada	Nahanni-Station #3	1985	6.8	6.0	0.148	6.1
15	Northridge, USA	Beverly Hills	1994	6.7	17.5	0.217	9.8
16	Northridge, USA	Canyon Country	1994	6.7	17.5	0.098	8.9
17	Parkfield, USA	Parkfield-Cholame 5w	1966	6.1	10.0	0.357	21.5
18	San Fernando, USA	Pacoima Dam	1971	6.6	13.0	0.209	18.9
19	Tabas, Iran	MHUD-Bajestan	1978	7.8	5.8	0.899	55.0
20	Whittier Narrows, USA	Rancho Palos Verdes	1987	6.0	14.6	0.186	4.6

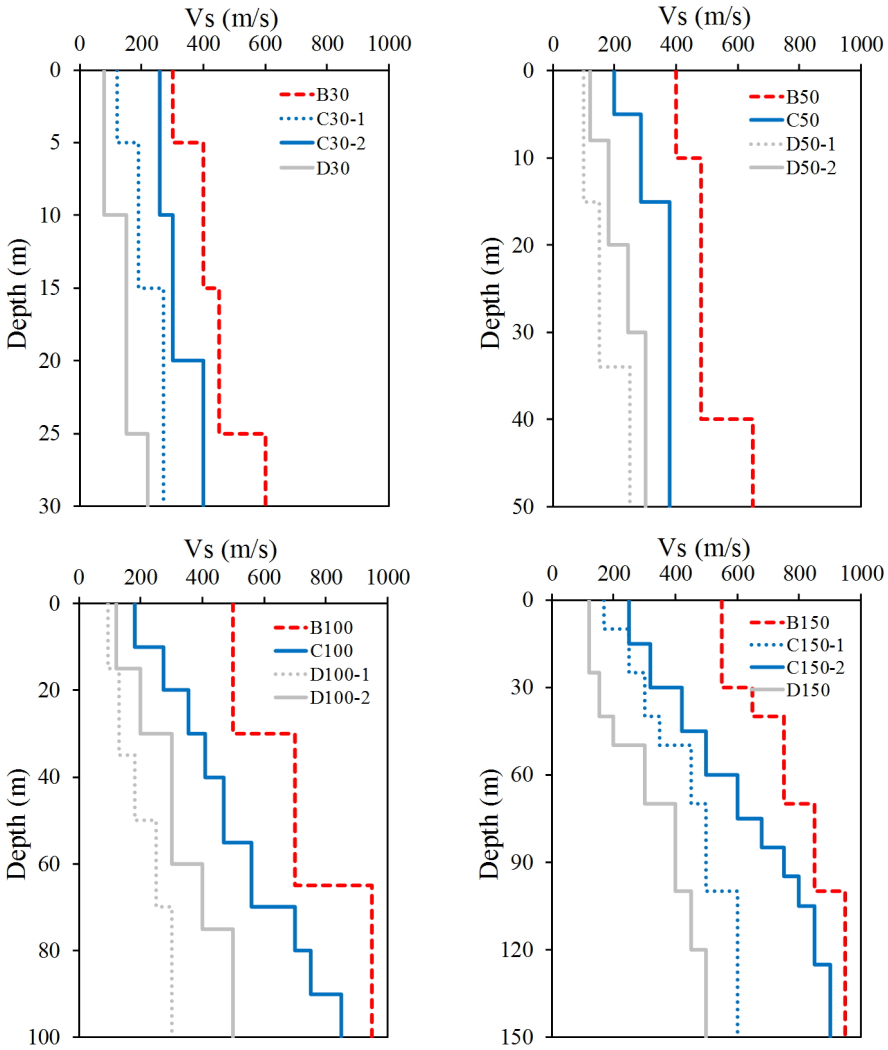


Fig. 2. Selected site profiles

Table 2. Summary of site profiles

Site profile name	$V_{s,soil}$ (m/s)	V_{s30} (m/s)	Depth to bedrock (m)	Site period (s)	MPSS 2017 Site class	KBC 2016 Site class
B30	400	400	30	0.3	S_4	S_B
B50	486	450	50	0.4	S_4	S_B
B100	690	500	100	0.6	S_4	S_B
B150	771	550	150	0.8	S_4	S_B
C30-1	200	200	30	0.6	S_4	S_C
C30-2	349	349	30	0.3	S_4	S_C
C50	328	301	50	0.6	S_4	S_C
C100	412	250	100	1.0	S_4	S_C
C150-1	389	221	150	1.5	S_4	S_C
C150-2	518	281	150	1.2	S_4	S_C
D30	127	127	30	0.9	S_5	S_D
D50-1	152	120	50	1.3	S_5	S_D
D50-2	208	172	50	1.0	S_4	S_D
D100-1	174	110	100	2.3	S_5	S_D
D100-2	258	150	100	1.6	S_4	S_D
D150	292	140	150	2.1	S_4	S_D

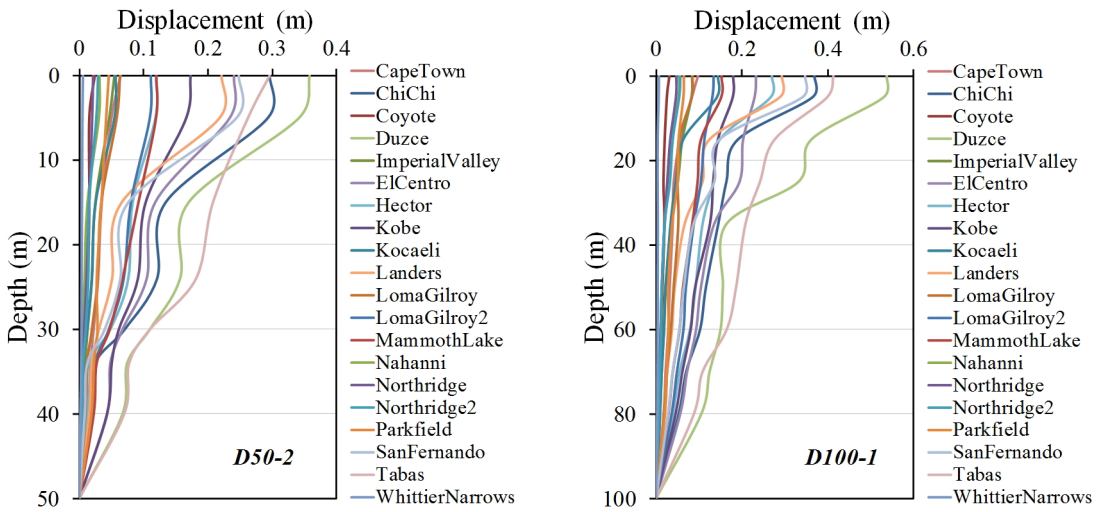


Fig. 3. Peak horizontal displacement profiles at selected sites

제 강성이 깊이에 따라 감소하거나 얇은 연약층이 있는 경우 등 모든 조건을 대표하는 것은 아니다. 이와 같은 경우에는 현장에서 측정된 전단파속도 주상도를 사용하여 부지 고유의 해석을 수행해야 한다.

주목할만한 점은 S_B로 분류되는 주상도들이 MPSS (2017)에는 S_D와 유사한 S_4로 분류된다는 점이다. 이는 강성이 매우 높지만 평균 전단파속도가 암반의 기준인 760m/s보다 작기 때문이다. 단단한 S_B 지반이 S_4로 분류될 수 있는 현 지반분류체계는 특정 지반에서 지반진동을 과대하게 보수적으로 평가할 가능성이 있으므로 이에 대한 추후 재평가가 필요할 것으로 판단된다.

지진응답으로 계산되는 수평변위는 1차원 등가선형해석으로부터 계산하였으며 사용된 소프트웨어는 DEEPSOIL v6.0(Hashash et al., 2015)이다. 해석에는 Darendeli(2001)의 전단탄성계수 감소와 감쇠비 곡선을 사용하였다(Fig. 3). 지반은 사질토로 가정하였으며 과압밀비(OCR) = 1.0, 정지토압계수(K_0) = 0.5, 반복횟수(N) = 10, 진동주파수(f) = 1.0를 적용하였다. 입력지반운동은 탄성 기반암 조건을 적용하여 재하하였다. 등가선형해석에서 유효전단변형률계수는 0.65를 적용하였고 시행착오 횟수는 15회를 사용하였으며 해석결과의 수렴여부를 확인하였다.

실무에서는 부지응답해석을 수행하지 않고 단일코사인 또는 이중코사인법 등의 경험적인 방법이 주로 사용된다. 부지응답해석과 경험적인 방법과의 차이는 박두희 등(2010)에서 보고되었다. 선정된 지반주상도에 대한 부지응답해석과 경험적 방법과의 비교는 본 연구의 범위를 벗어나므로 다루지 않았다.

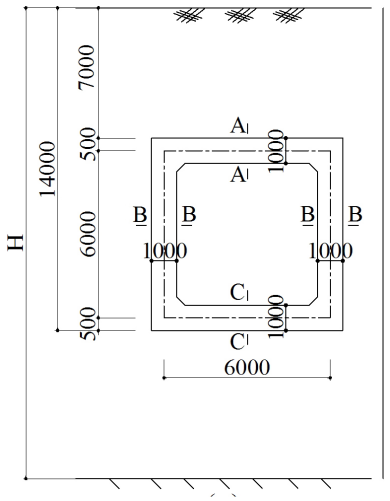


Fig. 4. Cross sections of cut-and-cover box tunnel

4. 구조해석

본 연구에서는 프레임 해석 프로그램 SAP2000(CSI, 2011)을 사용하여 단일 박스 철도 터널의 지진응답을 계산하였다. 대상 터널은 국내의 대표 철도이며 단면도는 Fig. 4에 도시하였다. 유사정적 해석은 Iai(2005)의 지침을 따라서 수행하였다(Fig. 5). 터널 주변 지반은 지반-터널 간의 상호 작용을 고려하기 위해 일련의 수직, 전단 스프링으로 모형화 하였다. 각각의 스프링 계수는 도시철도 내진설계 기준(MLTM, 2009)에 정해진 절차를 따라 계산하였다. 먼저 측벽에 대한 수평 지반반력계수(K_H)와 상, 하판에 대한 연직 지반반력계수(K_V)는 각각 다음과 같이 구해진다.

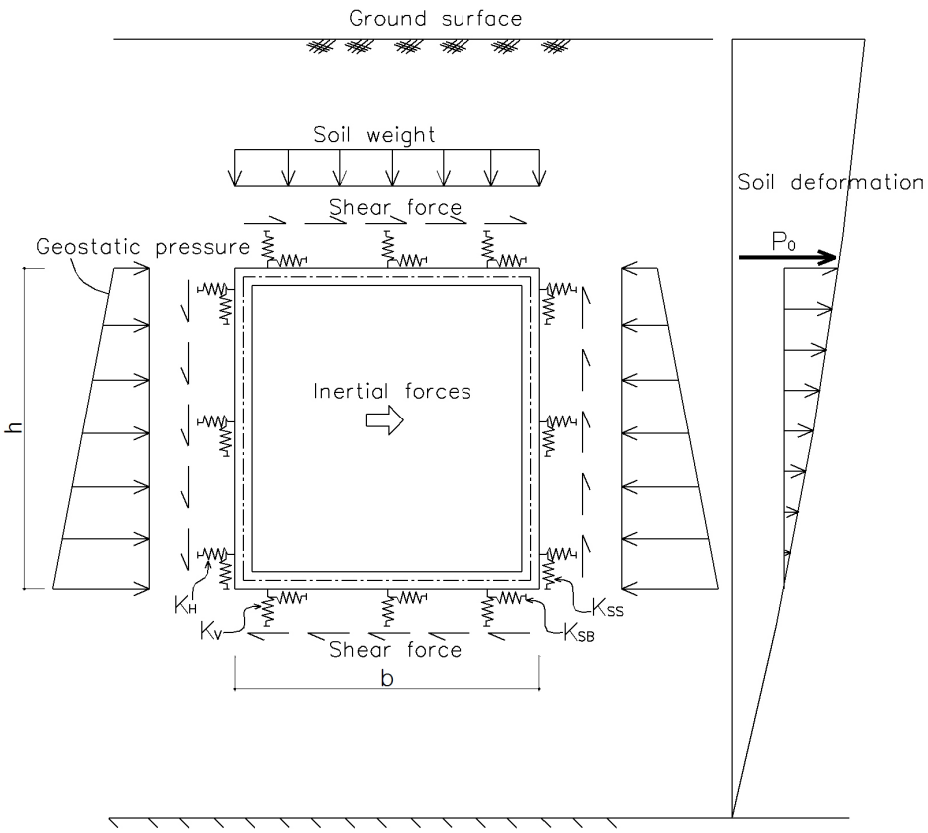


Fig. 5. Boundary condition and loads to the box tunnel (after Lee et al., 2016)

$$K_H = k_{h0}\left(\frac{h}{30}\right)^{-3/4} \tag{3}$$

$$K_V = k_{h0}\left(\frac{b}{30}\right)^{-3/4} \tag{4}$$

여기서 k_{h0}는 직경 30cm의 강체 원판에 의한 평판 재하시험의 값에 상당하는 수평 지반반력계수로서 k_{h0} = 1/30E_D, h = 터널 높이 b = 터널 폭이다. E_D는 대상 지반의 탄성계수이다. 측벽 스프링의 전단 지반반력계수(K_{SS})와 상, 하판 스프링의 전단 지반반력계수(K_{SB})는 아래와 같다.

$$K_{SS} = \frac{1}{4}K_H \tag{5}$$

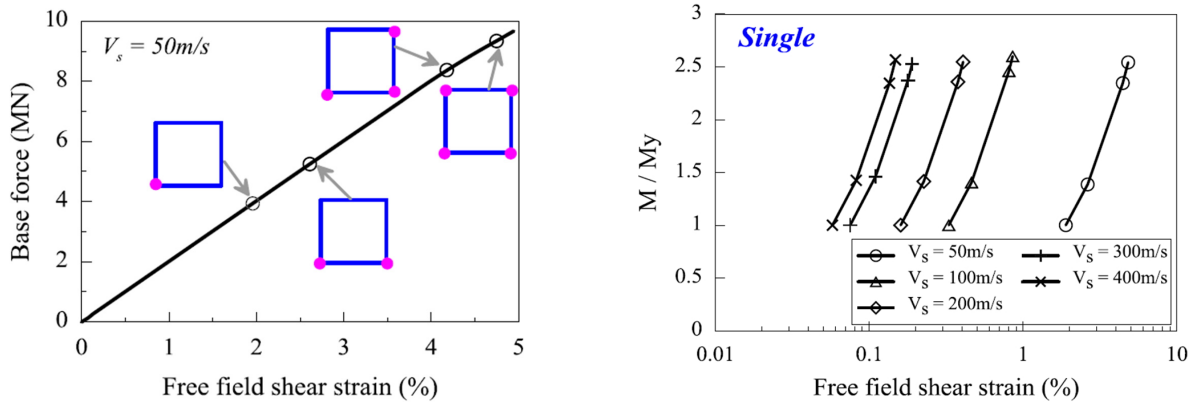
$$K_{SB} = \frac{1}{4}K_V \tag{6}$$

해석에서는 먼저 토압에 상응하는 힘을 프레임에 직접 적용하고, 다음으로 부지응답해석으로부터 계산된 자유장 지반 변위를 수직 및 전단 스프링에 적용한다. 측벽에는 수직 스프링에 변위를 가해주며 상판에는 전단스프링에 수평 변위를 적용한다. 터널-지반 경계에서 발생하는 전단응력은 프레임에 직접 재하한다. 지하수위는 고려하지 않았으며, 흙의 단위중량과 정지토압계수는 17kN/m^{3}과 0.5를 각각 사용하였다. 지반의 비선형성을 고려하기 위하여 E_D는 부지응답해석으로부터 계산된 터널 중심 심도에서의 등가선형 전단탄성계수로부터 계산하였으며 프와종비(ν) = 0.3을 적용하였다.

연속체 지반을 스프링으로 모사하는 프레임 해석법은 다수의 단순화가 적용된 근사이다. 하지만 프레임 해석은 해석해(Penzien, 2000; Anderson, 2008)와 유한요소해석(Wang, 1993)과 유사한 결과를 주는 것으로 보고되어서 본 취약도 평가에 사용하였다(Nguyen et al., 2018).

5. 취약도 곡선 적용

본 연구에서는 Lee et al.(2016)의 손상상태와 손상지수를 사용하여 터널의 취약도를 평가하였다. Lee et al.(2016)은 비탄성 유사정적해석을 수행하여 터널에 발생하는 손상을 분석하였으며 터널 프레임에 발생하는 소성



(a) Development of plastic hinges

(b) Damage index for soils with a range of Vs

Fig. 6. Proposed damage states and indices for single box tunnels (after Lee et al., 2016)

Table 3. Definition of damage states and corresponding damage indices (DIs)

Tunnel type	Damage state	Damage index (DI, M/M_y)
Single box	None	DI < 1.0
	Minor/Slight	1.0 ≤ DI < 1.2
	Moderate	1.2 ≤ DI < 2.0
	Extensive	2.0 ≤ DI

힌지의 개수로 손상상태를 정의하였다. 실무에서 비탄성 해석을 수행하는 것은 어려우므로 소성힌지의 개수에 상응하는 손상지수를 더불어서 제시하였다. 손상지수는 탄성해석에서 계산되는 탄성모멘트(M)와 항복모멘트(My)의 비율(M/My)로 정의되었으며 비탄성해석과 탄성해석을 병행해서 이를 계산하였다. Lee et al.(2016)의 연구결과 중에서 유사정적해석으로 수평하중의 증가에 따라 소성힌지가 발생하는 특성은 Fig. 6(a)에 도시하였으며 다양한 Vs의 지반에서 손상상태와 손상힌지를 계산한 결과는 Fig. 6(b)에 도시하였다. 해석에 사용된 손상상태는 Minor, Moderate, Extensive의 3가지이며 이들에 대한 세부 정보는 Table 3에 정리하였다.

취약도 곡선은 위의 3가지 손상상태에 대해서 Table 3에 기술된 손상지수를 적용하여 계산되었다. 취약도 곡선은 지반 주상도별로 계산되었으며 PGA의 증가에 따른 손상확률을 도출하였다. Fig. 7에는 3가지 손상상태와 모든 주상도에 대한 취약도 곡선을 도시하였다. 회색 선 곡선들은 개별 주상도에 대한 취약도이며 붉은색 선은 지반등급별 평균값을 나타낸다. 주목할 만한 점은 취약도 곡선은 지반 조건의 영향을 크게 받는 다는 것이다. 터널의 손상확률은 지반의 강성(V_{s30})과 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. V_{s30}가 증가할수록, 지반

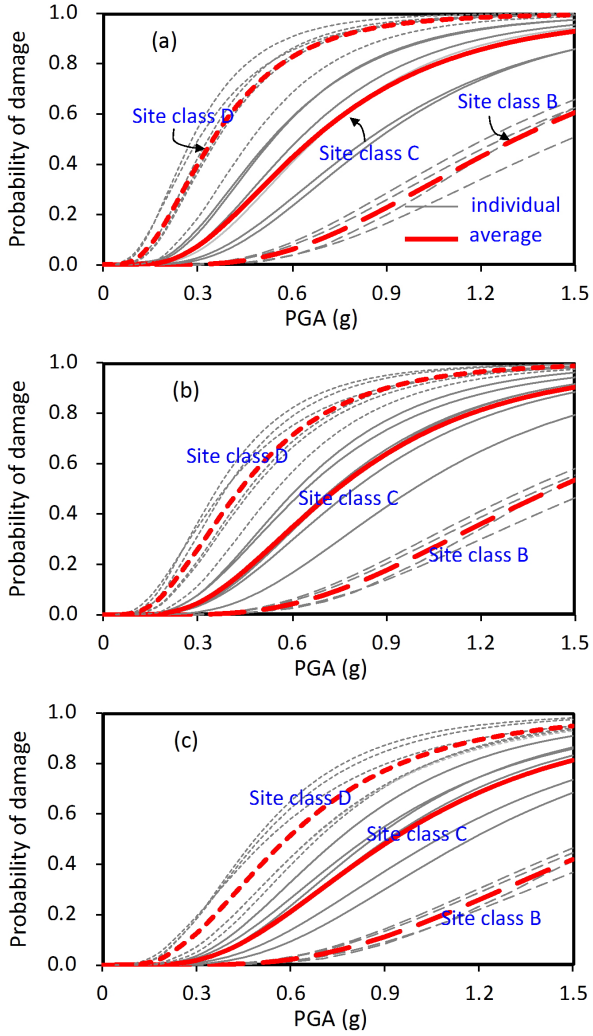


Fig. 7. Comparison of fragility curves of single tunnel in various soil profiles

의 강성이 증가하며 동일한 크기의 지반운동에 의하여 발생하는 지반변형이 감소한다. 관성력의 영향을 거의 받지 않는 터널의 응답은 지반변형에 지배를 받기에 지

반변위가 감소하면 터널의 손상도 감소하기 때문이다. 즉, 강성이 가장 높은 S_B 지반의 경우, 손상 확률이 극히 낮은 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7에서 확인할 수 있는 점은 취약도 곡선이 지반의 영향을 크게 받는 다는 점이다. 지반등급 별로 평균 곡선을 제시하였지만 등급별로 큰 차이가 발생하는 것을 유의하여야 하며 특정 터널의 취약도 평가 시 부지 고유의 증폭 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

6. 기존 취약도 곡선과의 비교

수치해석을 통하여 도출된 취약도 곡선을 기존의 연구에서 제시된 개착식 터널의 곡선들과 비교하였다. Fig. 8에는 경험적으로 도출된 ALA(2001), HAZUS(2004) 곡선과 수치해석을 통하여 계산된 SYNER-G 곡선(Pitilakis, 2011)을 본 연구에서 도출된 곡선들과 비교하였다. 경험적 곡선은 실제 손상 자료를 토대로 도출되었으며 지반 조건의 영향이 고려되지 않았다. Pitilakis(2011)의 곡선은 유한요소해석 결과를 토대로 도출되었으며 지반등급의 영향을 고려하였다. Pitilakis(2011)도 Lee et al.(2016)과 동일하게 손상지수는 M/My로 정의되었지만 손상상태별 손상지수는 해석 결과에 기반하지 않았으며 공학적 판단을 적용하였으므로 Lee et al.(2016)에 비하여 보수적인 값이 적용되었다. 또다른 차이는 터널의 크기로써 Lee et al.(2016) 연구에 사용된 개착 터널은 철도 터널로 단면 크기가 7 × 7m인 반면 Pitilakis(2011)에 사용된 터널은 단면이 16 × 10m에 달하는 도로터널이다. 또한, Pitilakis(2011)에서는 철근망의 영향이 고려되지 않은 반면, Lee et al.(2016)의 연구에서는 이를 고려한 비탄성 해석을 수행하였다.

ALA(2001)와 HAZUS(2004)는 모두 경험적인 방법으로 도출된 곡선으로써 각각의 취약도 평가 결과가 매우 유사한 것으로 나타났다. 경험적 곡선들은 Minor 손상상태의 경우 본 연구에서 계산된 S_C와 S_D 등급의 중간값에 가까우며 Moderate와 Extensive 손상상태의 경우에는 S_C 등급과 유사한 것으로 비교되었다. 즉, 경험적 곡선을 사용하는 경우, S_D 등급의 연약지반에서의 손상을 과소예측하게 된다. Syner-G 곡선의 경우, S_C와 S_D 곡선의 차이가 매우 작은 것으로 나타났다. 지반 조건에 따라 터널 응답이 크게 영향을 받지만 취약도 곡선에는 영향이 제한적인 것은 의외이다. Minor 손상상태에서는 본 연구의 S_D 등급 결과와 유사하며 Moderate와 Extensive 손상상태에서는 S_C 등급과 유사한것으로 확인되었다.

전반적으로 본 연구에서 수치해석을 통하여 계산된 취약도 곡선은 기존에 제시된 곡선들과 유사한 경향성

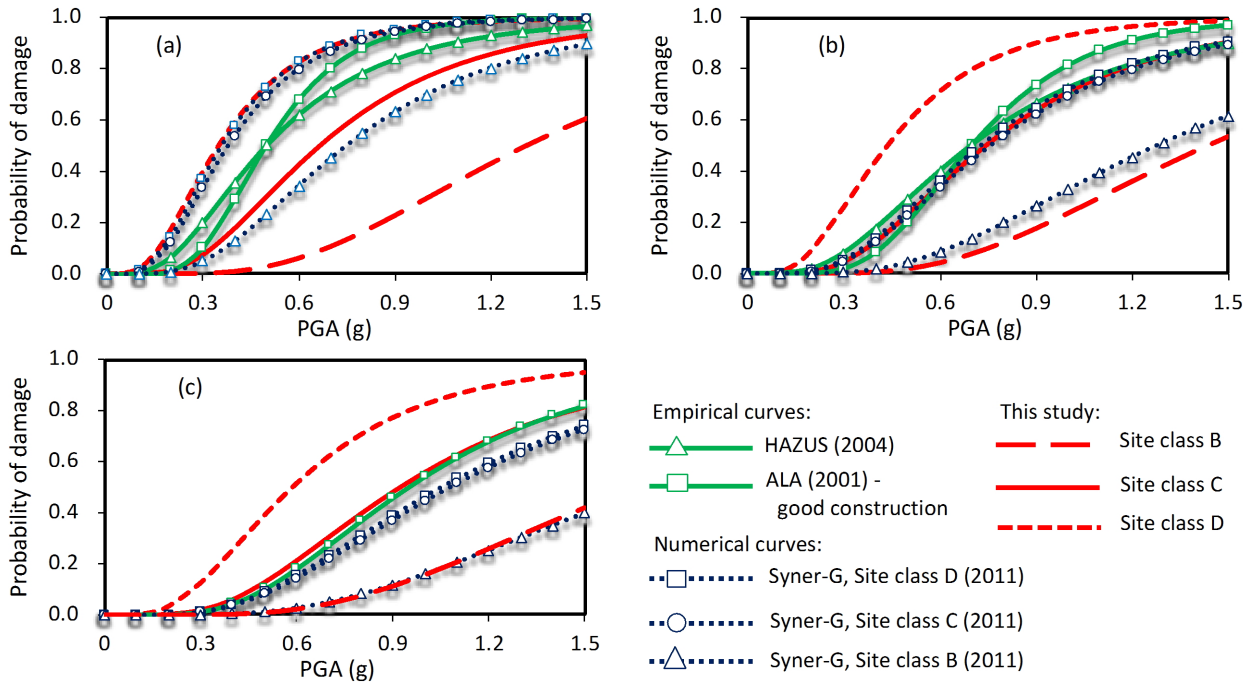


Fig. 8. Comparison of proposed and published fragility curves for single box tunnel. The curves of ALA (2001), HAZUS (2004), and Syner-G (Pitilakis, 2011) for cut and cover tunnels are compared.

을 가지고 있으며 특히 S_C 등급 지반의 주상도가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면, S_D 등급 지반의 경우에는 취약도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 지반에서는 본 연구에서 계산된 취약도 곡선을 사용하거나 부지 고유의 곡선을 계산하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 응답변위법을 수행하여 개착식 박스 터널의 취약도 곡선을 도출하였다. 취약도 곡선은 Minor, Moderate, Extensive 손상상태에 대해서 각각 산정하였으며 기존 연구에서 제시된 탄성 모멘트와 항복모멘트의 비로 정의된 손상지수를 사용하였다. 지반 조건의 영향을 평가하기 위하여 16개의 주상도를 사용하였다. 응답변위법에 적용되는 지반변위 주상도는 1차원 등가선형해석으로부터 계산하였다. 입력지진파의 영향을 고려하기 위하여 12개의 계측 지반운동을 사용하였다. 취약도 곡선은 최대지반가속도(PGA)에 대해서 적용되었다.

해석 결과, 지반 조건에 따라 터널의 취약도는 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 동일한 진동세기가 발생할 경우, 상대적으로 강성이 작은 지반에서 큰 변형이 발생하며 이는 큰 터널 응답을 유발하기 때문이다. 기존에 제시된 경험적 취약도 곡선은 지반조건의 영향을 고려할 수 없으므로 특히 연약 지반에서는 사용하는 것이 적절하지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(18SCIP-B146946-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. ALA (2001), *Seismic fragility formulations for water systems: Part 1- Guideline*. American Society of Civil Engineers - FEMA.
2. Anderson, D.G. (2008), *Seismic analysis and design of retaining walls, buried structures, slopes, and embankments*, Transportation Research Board.
3. Andreotti, G. and Carlo, G. (2014), "Seismic Vulnerability of Deep Tunnels: Numerical Modeling for a Fully Nonlinear Dynamic Analysis", *2ECEES (Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology), Istanbul, Turkey*.
4. Andreotti, G., Lai, C.G., and Martinelli, M. (2013), "Seismic fragility functions of deep tunnels: a new cumulative damage model based on lumped plasticity and rotation capacity", *ICEGE Istanbul, Turkey*.
5. Argyroudis, S. and Pitilakis, K. (2012), "Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering 35*, 1-12.
6. Corigliano, M., Lai, C., and Barla, G. (2007), "Seismic vulnerability of rock tunnels using fragility curves", *11th ISRM Congress, Lisbon, Portugal*. International Society for Rock Mechanics.
7. CSI (2011), SAP2000 software, ver15. Berkeley, California, USA.
8. Darendeli, M. (2001), "*Development of new family of normalized modulus reduction and material damping curves*", University of Texas, Austin, USA.
9. Dowding, C.H. and Rozan, A. (1978), "Damage to Rock Tunnels from Earthquake Shaking", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 104*, 175-191.
10. Hashash, Y., Karina, K., Koutsoftas, D., and O'Riordan, N. (2010), "Seismic Design Considerations for Underground Box Structures", *Earth Retention Conference, Washington, USA*, pp.620-637.
11. Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Groholski, D., Phillips, C., and Park, D. (2015), *DEEPSOIL 6.0, User Manual*, 114 p.
12. Hashash, Y.M., Hook, J.J., Schmidt, B., John, I., and Yao, C. (2001), "Seismic Design and Analysis of Underground Structures", *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 247-293.
13. HAZUS (2004), *Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model*, Department of Homeland Security, FEMA, Washington, DC, USA.
14. Hwang, J.-H. and Lu, C.-C. (2007), "Seismic Capacity Assessment of Old Sanyi Railway Tunnels", *Tunnelling and underground space technology* 22, 433-449.
15. Iai, S. (2005), International Standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works-an overview. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, 605-615.
16. Lee, T.H., Park, D., Nguyen, D.D., and Park, J.S. (2016), "Damage Analysis of Cut-and-cover Tunnel Structures under Seismic Loading", *Bulletin of Earthquake Engineering* 14, 413-431.
17. MLTM (2009), *Earthquake resistance design regulations for subway structures*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea.
18. Nguyen, D.D., Lee, T.H., and Park, D. (2018), "Seismic Damage Analysis of Box Metro Tunnels Accounting for Aspect Ratio and Shear Failure", Submitted to *Tunnelling and underground space technology*.
19. Park, D., Sagong, M., Kwak, D.-Y., and Jeong, C.-G. (2009), "Simulation of Tunnel Response under Spatially Varying Ground Motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, 1417-1424.
20. Park, D., Shin, J.-H., and Yun, S.-Y. (2010), "Seismic Analysis of Tunnel in Transverse Direction Part I: Estimation of Seismic Tunnel Response via Method of Seismic Displacement", Vol.26, No.6, pp.57-70.
21. Penzien, J. (2000), "Seismically Induced Racking of Tunnel Linings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* 29, 683-691.
22. Pitilakis, K. (2011), *D 3.7–Fragility functions for roadway system elements*. SYNER-G.
23. Pitilakis, K. and Tsinidis, G. (2014), "Performance and Seismic Design of Underground Structures", *Earthquake Geotechnical Engineering Design. Springer*, pp.279-340.
24. Roy, N. and Sarkar, R. (2017), "A Review of Seismic Damage of

Mountain Tunnels and Probable Failure Mechanisms", *Geotechnical and Geological Engineering* 35, 1-28.

25. Wang, J.-N. (1993), *Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach*, Parsons Brinckerhoff.
26. Werner, S.D., Taylor, C.E., Cho, S., Lavoie, J.-P., Huyck, C.K., Eitzel, C., Chung, H., and Eguchi, R.T. (2006), *Redars 2 Methodology and software for seismic risk analysis of highway systems*. Special Report MCEER-060SP08. University of Buffalo, The State University of New York, USA.
27. Zou, Y., Liu, H., Jing, L., and Cui, J. (2017), "A Pseudo-static Method for Seismic Responses of Underground Frame Structures Subjected to Increasing Excitations", *Tunnelling and Underground Space Technology* 65, 106-120.

Received : October 29th, 2018
Revised : November 14th, 2018
Accepted : November 15th, 2018