

기존 고속철도 터널의 지진취약도 함수 개발에 관한 연구

A Study on the Development of the Seismic Fragility Functions of the High Speed Railway Tunnels in use

김 홍 균¹⁾ · 신 철 식¹⁾ · 이 태 형¹⁾ · 이 종 건¹⁾ · 박 두 희[†]

Hongkyoon Kim · Chulsik Shin · Taehyung Lee · Jonggun Lee · Duhee Park

Received: August 6th, 2014; Revised: August 12th, 2014; Accepted: September 17th, 2014

ABSTRACT : In this study, the staged seismic performance evaluations were conducted to the 91 high speed railway tunnels in use for checking whether to comply with the recent design criteria or not. In addition, the seismic fragility functions of the tunnels were developed to allow the probabilistic risk assessment. The results of the staged seismic performance evaluations which consist of a preliminary assessment and a detailed assessment, show that the tunnels comply with the recent design criteria. With reference to the results of previous studies, a form of the proposed seismic fragility functions was set as a log-normal distribution by PGA, and the parameters of the functions were determined by using the probability of damage for the design PGA level. The seismic fragility functions were developed for each types (Cut & Cover, NATM) of tunnels. The seismic fragility functions from this study and the existing research results (FEMA, 2004) were compared to evaluate the seismic performance level of the tunnels, as a result the tunnels of this study were relatively superior to the ASSM tunnels on the seismic performance.

Keywords : Tunnel in use, Seismic fragility function, Rapid transit, Probabilistic risk assessment

요 지 : 본 연구에서는 공용 중인 91개 고속철도 터널을 대상으로 단계별 내진성능평가를 실시하여 설계기준에서 제시하는 목표 내진성능 확보여부를 검토하였다. 또한 지진취약도 함수도 함께 개발하여 지진규모에 따른 시설물의 확률론적 피해예측이 가능하도록 하였다. 단계별 내진성능평가는 내진성능 예비평가 및 상세평가 순으로 실시하였으며, 평가결과 대상터널들은 설계기준 수준의 내진성능을 확보하는 것으로 분석되었다. 지진취약도 함수는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 기준으로 한 대수 정규분포형태로 설정하였으며, 함수도출방법은 설계 PGA수준에 대한 손상발생확률을 이용하여 취약도함수의 모수를 결정하는 방식으로 하였다. 손상발생 검토부재는 라이닝콘크리트로서, 대상터널을 굴착식 터널(NATM 터널) 및 개착식 터널로 구분하여 각각에 대한 손상수준별 지진취약도 함수를 개발하였다. 이번연구에서 도출된 지진취약도 함수와 기존연구결과(FEMA, 2004)와의 비교·분석을 통하여 대상터널의 내진성능확보수준을 평가하였으며, 그 결과 대상터널이 기존연구의 대상인 재래식 터널(American Steel Support Method, ASSM)에 비하여 상대적으로 내진성능이 우수한 것으로 분석되었다.

주요어 : 공용 중인 터널, 지진 취약도 함수, 고속철도, 확률론적 위험도 평가

1. 서 론

최근 국내외적으로 다양한 규모의 지진이 빈번하게 발생함에 따라 지진위험에 대한 인식이 증대되고 있으며, 국내에서도 지진의 빈도수가 점차 증가추세에 있어 우리나라도 더 이상 지진에 안전지대가 아니라는 생각이 확대되고 있다.

국내에서는 이러한 사회적 분위기와 맞물려 지진재해대책법이 마련되고 관련 설계기준을 강화하여 국가 주요 시설물에 대한 내진 안전성을 확보토록 하고 있으나, 현재의 설계기준에서 제시하는 내진 안전성 평가방법은 결정론적인 방법으로서 단일지진규모에 대한 각 부재의 안전성을 검토

하도록 하고 있어, 불확실성이 큰 지진하중을 고려하기 위해서는 부족한 것이 현실이다. 이에 현재 국가 주요시설물을 대상으로 지진하중의 다양성을 고려하기 위하여 지진취약도 함수를 통해 확률론적인 내진 안전성을 평가함으로써 지진재해대책을 수립하는데 초석을 다지고 있다.

한편 기 수행된 지진취약도 함수 개발연구는 국내의 경우 주로 원전(Choi et al., 2006)이나 교량구조물(Kim et al., 2009a)등 지상구조물에 대해 한정적으로 이루어졌으며, 지중구조물인 터널을 대상으로 한 연구사례는 국외의 FEMA (2004) 및 Argyroudis & Ptilakis(2012)가 실시한 연구 외에는 전무한 실정이다.

1) Institute of Infrastructure Safety, KISTEC

† Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

이에 본 논문에서는 경부고속선상에 위치한 터널시설물에 대한 지진취약도 함수를 개발하여 내진성능을 확률론적으로 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지진취약도 함수의 정의

지진취약도 함수는 주어진 지진동 매개변수(Parameter)의 변화에 대한 분석 대상 구조물에 일정수준의 손상이 발생할 확률(지진취약도)을 함수형태로 표현한 것으로서, 지진에 따른 내진보유성능의 중앙값(Median)과 그 값의 불확실성(Uncertainty) 및 무작위성(Randomness)과 관련된 분산도를 나타내는 대수정규표준편차의 항으로 표현된다.

지진취약도 분석은 PGA 등과 같은 입력지반운동의 변화에 따른 구조요소의 내진성능과 그 불확실성을 평가하여, 다양한 지진재해 발생 경우에 대한 구조물의 물리적 피해 정도를 신속하게 예측하기 위함이다.

따라서 일반적으로 지진취약도 함수는 지반운동 규모를 나타내는 지표인 PGA의 함수로 표현되며, 특정 손상수준에 대한 손상발생확률은 Eq. (1)(Kennedy & Ravindra, 1984)과 같이 나타낼 수 있으며, 사용자의 직관적인 피해예측을 위하여 지진취약도 곡선을 함께 제시한다.

$$Probability[D_s > d_s | PGA] = \phi \left[\frac{\ln(a/\hat{A})}{\beta_R} \right] \quad (1)$$

여기서 Probability [Ds > ds|PGA] : PGA에서 특정손상수준(ds) 이상이 발생할 확률

$\phi()$: 표준정규분포의 누적확률밀도함수

\hat{A} : 주어진 지반운동에서의 내진성능의 중앙값

β_R : 불확실성을 나타내는 대수정규 표준편차

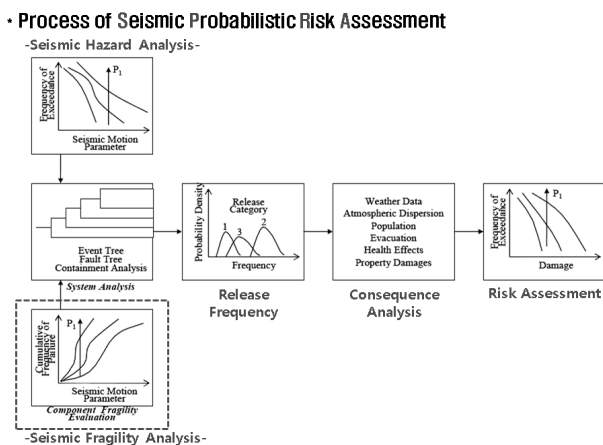


Fig. 1. Process of SPRA (Kennedy & Ravindra, 1984)

2.2 지진취약도 함수의 개발목적

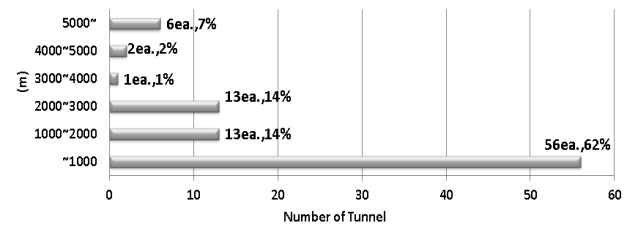
지진취약도 함수의 개발목적은 고속철도 터널과 같은 국가주요시설물을 지진과 같은 자연재해에 대비하기 위하여 수행되는 확률론적 위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA), 즉 지진재해로 인하여 초래되는 다양한 규모의 피해가 발생할 확률을 예측함에 있어(Fig. 1), 지진규모에 따른 발생 확률을 분석하는 확률론적 지진재해분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)과 더불어 (Park et al., 2009), 지진규모에 따라 구조물에 발생하는 물리적 손상의 정량화된 지표를 제공함에 있다.

즉 지진취약도 분석은 재해시나리오를 단일한 상황으로 가정하는 기존 결정론적 방법(Deterministic Approach)으로는 다양한 요인(구조물, 지역조건 및 지진하중 등)으로부터 발생하는 무작위성 및 불확실성을 고려하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 실시된다.

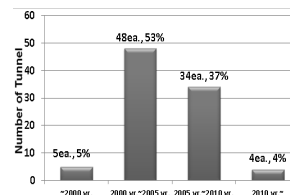
3. 대상터널의 내진성능평가

3.1 일반현황

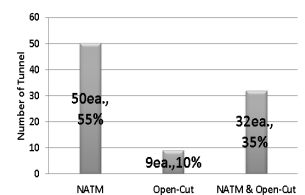
각 시설물에 대한 지진취약도 함수를 도출하기 위해서는 대상시설물의 구조적특성을 고려하여 대표형식을 분류하



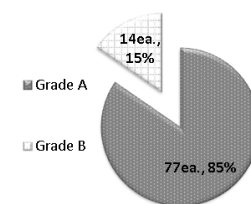
(a) Classification by the length



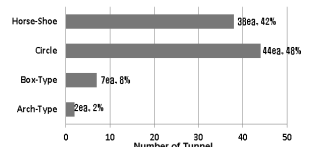
(b) Classification by the construction years



(c) Classification by the construction method



(d) Classification by the grade



(e) Classification by the shape

Fig. 2. Current state of tunnels

고, 각 형식별 평가부재와 내진성능검토 기준을 정립하여야 한다.

총 91개 대상터널에 대한 일반현황을 분석한 결과 대부분 공용공간이 15년 이하이며, 터널형상은 원형, 마제형, 박스형, 아치형 총 4가지로 분류되고 다양한 연장분포를 나타내었다. 굴착방법은 개착식 및 NATM으로 대별되었고, 모든 터널의 입·출구부는 개착식으로 시공되어있으며, 일부 연장이 긴 터널의 경우 중간개착부도 존재하는 것으로 분석되었다. 또한 진단 및 점검결과에 의한 상태평가 결과가 모두 B등급 이상인 것으로 조사되어 유지관리상태가 대부분 양호한 것으로 분석되었다(Fig. 2).

3.2 내진성능예비평가

본 논문에 대상이 되는 경부고속철도 터널과 같이 공용 중인 시설물은 보유내진성능을 평가하기 위하여 기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령(이하 ‘관련 요령’)에 따라 단계별 내진성능평가를 실시하여야 한다(MLIT, 2011). 단계별 내진성능평가는 예비평가와 상세평가의 2단계로 구성되어 있으며, 내진성능 예비평가는 설계 및 준공도서, 문헌자료 및 간단한 현장조사에 기초하여 터널의 3가지 지수(지진도, 취약도, 영향도)를 산정한 후 터널을 내진 그룹화(핵심, 중요, 관찰, 유보) 한다. 내진성능 예비평가 결과(Table 1)로부터 ‘내진보강 핵심(6개소)’ 및 ‘내진보강 중요(20개소)’ 터널과, 공용 중 터널 천장부에서 조사된 중방향 균열로 긴급점검이 이루어진 OO터널(내진보강 관찰) 1개소를 포함하여 27개소에 대하여 내진성능 상세평가를 수행하도록 하였다.

3.3 내진성능상세평가

내진성능상세평가는 예비평가로부터 선정된 대상시설물에 대해서 내진성능을 수치해석적인 방법으로 평가하는 것으로, 부재가 보유하고 있는 내하력(Capacity)과 평가지진에 대해서 각 구성부재에 대한 부재력(Demand)을 비교하여 평가한다. 본 연구에서는 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하였으며, 박스터널과 같은 개착구조물에 대해서는 응답변위법을 적용하고, 그 외의 갱구부 또는 본선부 터널(아치형)에

대해서는 시간이력해석법을 적용하였다.

특히 시간이력해석법에 의한 아치형터널의 지진응답 해석 시 필요한 다양한 입력변수 중 입력지진파가 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 특성(Jeong & Park, 2009) 및 발생 가능한 지진파의 다양성을 고려하기 위하여 인공지진파 1개와 실지진파 2개를 이용하여 터널축의 직각방향에 대해 안전율을 검토하였다.

이용된 인공지진파는 지반종류, 지진구역, 구조물 중요도에 따라 작성된 설계응답스펙트럼에 의해 합성된 인공지진파 1개와 실지진파 2개를 적용하였다.

한편 인공지진파는 주기와 위상각, 진폭이 다양한 정현함수와 포락함수를 증첩하여 Eq. (2)와 같은 시간의 함수로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 관련 설계기준(KR, 2011)을 준용하여, 보통암을 기준으로 하고 지진구역이 I일 경우, 설계지진계수(Ca=0.11, Cv=0.11), 붕괴방지수준 지진에서의 위험도 계수(I=1.4)를 고려하여 설계기준가속도가 0.154 g인 표준설계응답스펙트럼을 생성하여, 이에 부합하는 최대지진가속도(PGA)가 0.154 g이고 지속시간이 20초인 인공지진파를 Earthquake Maker 프로그램을 이용하여 생성하였다.

$$\ddot{x}_g(t) = E(t) \sum_{i=1}^n C_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (2)$$

여기서 $E(t)$: 가속도 시간이력곡선의 진도포락함수

C_i : 진폭

ω_i : 진동수

ϕ_i : 위상각(0~2π)

또한 실지진파는 지진응답해석에 널리 쓰이고, 지진기록의 주파수 대역이 비교적 넓은 지진기록인 일본 Miyagiken-oki의 Ofunato항 지진기록 및 일본 Tokachi-oki의 Hachinohe항의 지진기록을 최대가속도가 설계기준가속도(0.154 g)에 부합되도록 크기조정(Scaling)하여 각각의 지진파 특성에 따라 장주기파(Hachinohe)와 단주기파(Ofunato)로 사용하였

Table 1. Results of preliminary assessment

Classification	Group of seismic retrofit				Sum.
	Core	Important	Observation	Reservation	
Number of Tunnels (ea.)	6	20	54	11	91
Percentage (%)	7	22	60	11	100
Detailed Assessment	Essential		Not mandatory (Conduct if necessary)		-

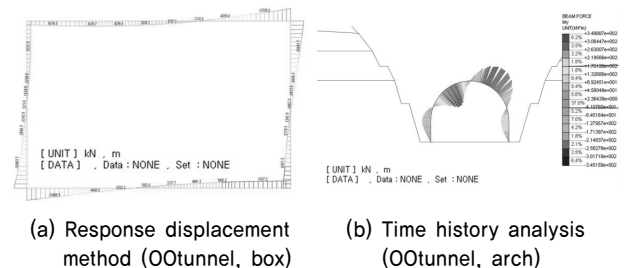


Fig. 3. Results of the detailed assessment

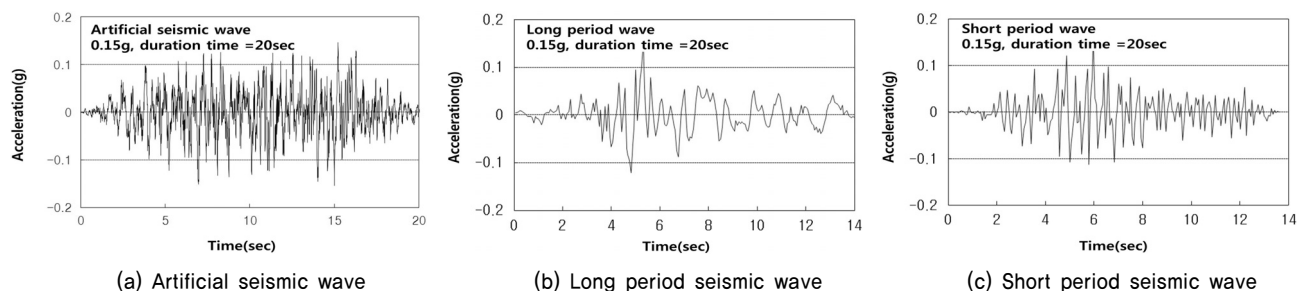


Fig. 4. Seismic waves (KISTEC et al., 2013)

Table 2. Results of detailed assessment

No.	Name	Station	Shape	Lining type	Construction method	Construction year	Factor of safety	
							Wall (Side-wall)	Arch (Slab)
1	Tunnel #1	STA.15+000	Box	RC	Cut & Cover	2004	1.08	1.01
2		STA.15+420	Arch	RC	NATM		5.43	8.62
3		STA.16+480	Arch	RC	NATM		2.09	2.90
4	Tunnel #2	STA.64+000	Box	RC	Cut & Cover	2001	1.05	1.18
5	Tunnel #3	STA.94+020	Arch	RC	NATM	1999	2.22	2.65
6	Tunnel #4	STA.103+010	Arch	RC	NATM	1999	3.90	4.38
7		STA.104+290	Arch	RC	Cut & Cover		2.35	3.13
8		STA.104+330	Arch	RC	Cut & Cover		2.33	3.23
9	Tunnel #5	STA.126+330	Arch	RC	Cut & Cover	1999	1.65	2.66
10	Tunnel #6	STA.129+430	Arch	RC	Cut & Cover	1999	3.88	5.53
11		STA.129+800	Arch	RC	NATM		3.68	4.46
12	Tunnel #7	STA.137+180	Arch	RC	Cut & Cover	2000	2.81	2.80
13		STA.137+412	Arch	RC	Cut & Cover		3.01	2.78
14	Tunnel #8	STA.139+900	Arch	RC	Cut & Cover	2002	1.80	3.01
15		STA.140+340	Arch	RC	Cut & Cover		1.79	2.86
16	Tunnel #9	STA.146+607	Box	RC	Cut & Cover	2002	1.11	1.34
17	Tunnel #10	STA.170+140	Arch	RC	Cut & Cover	2002	2.56	3.02
18	Tunnel #11	STA.178+800	Arch	RC	Cut & Cover	2002	2.46	1.39
19		STA.179+420	Arch	RC	NATM		3.07	2.84
20		STA.179+560	Arch	RC	Cut & Cover		1.52	1.49
21	Tunnel #12	STA.187+850	Arch	RC	Cut & Cover	2002	4.80	2.10
22		STA.188+555	Arch	RC	Cut & Cover		3.12	3.54
23	Tunnel #13	STA.189+205	Arch	RC	Cut & Cover	2002	2.35	10.92
24		STA.189+540	Arch	RC	NATM		5.81	19.58
25		STA.189+680	Arch	RC	Cut & Cover		3.33	1.56
26		STA.190+350	Arch	RC	Cut & Cover		2.26	2.27
27		STA.190+780	Arch	RC	Cut & Cover		3.94	4.65
28	Tunnel #14	STA.194+350	Arch	RC	Cut & Cover	2001	8.29	2.46
29	Tunnel #15	STA.212+385	Arch	RC	Cut & Cover	2001	5.02	4.25
30		STA.207+730	Arch	RC	NATM		18.67	6.73
31	Tunnel #16	STA.225+705	Arch	RC	Cut & Cover	2002	4.18	3.51
32	Tunnel #17	STA.230+500	Arch	RC	Cut & Cover	2001	1.76	2.00
33		STA.231+300	Arch	RC	Cut & Cover		2.04	1.10
34		STA.231+340	Arch	RC	Cut & Cover		2.20	1.98
35	Tunnel #18	STA.232+020	Arch	RC	Cut & Cover	2001	1.84	2.23
36		STA.233+520	Arch	RC	Cut & Cover		1.61	1.70
37		STA.233+220	Arch	RC	NATM		3.06	4.22

Table 2. Results of detailed assessment (Continued)

No.	Name	Station	Shape	Lining type	Construction method	Construction year	Factor of safety	
							Wall (Side-wall)	Arch (Slabe)
38	Tunnel #19	STA.249+320	Arch	RC	Cut & Cover	2002	2.45	3.06
39		STA.251+160	Arch	RC	Cut & Cover		1.82	1.02
40	Tunnel #20	STA.255+100	Arch	RC	Cut & Cover	2003	5.82	3.40
41		STA.256+650	Arch	RC	Cut & Cover		5.94	5.80
42	Tunnel #21	STA.302+615	Arch	RC	Cut & Cover	2007	1.51	1.90
43		STA.303+700	Arch	RC	Cut & Cover		1.62	1.09
44		STA.303+740	Arch	RC	Cut & Cover		1.06	2.59
45		STA.304+640	Arch	RC	NATM		3.73	3.57
46	Tunnel #22	STA.312+200	Arch	RC	NATM	2007	1.54	8.19
47		STA.313+131	Arch	RC	NATM		2.12	4.11
48		STA.316+400	Arch	RC	Cut & Cover		1.10	2.46
49	Tunnel #23	STA.336+100	Arch	RC	Cut & Cover	2009	1.41	2.36
50		STA.338+250	Arch	RC	NATM		1.14	1.49
51		STA.339+180	Arch	RC	Cut & Cover		2.15	2.45
52	Tunnel #24	STA.357+505	Arch	RC	NATM	2009	7.38	4.80
53		STA.358+200	Arch	RC	Cut & Cover		1.65	1.19
54	Tunnel #25	STA.365+420	Arch	RC	Cut & Cover	2008	1.00	1.89
55		STA.370+020	Arch	RC	NATM		1.96	12.00
56		STA.373+000	Arch	RC	NATM		1.42	5.70
57		STA.378+403	Arch	RC	Cut & Cover		1.63	3.28
58	Tunnel #26	STA.378+850	Arch	RC	Cut & Cover	2008	1.03	1.62
59		STA.379+069	Arch	RC	NATM		1.00	3.05
60	Tunnel #27	STA.389+285	Arch	RC	Cut & Cover	2009	3.46	3.44
61		STA.389+540	Arch	RC	Cut & Cover		1.85	3.16
62		STA.390+870	Arch	RC	Cut & Cover		1.75	3.24
63		STA.409+140	Box	RC	Cut & Cover		1.03	2.37

다(Fig. 4).

상기에서 기술한 방법으로 굴착식 터널(NATM 터널) 및 개착식터널(Cut & Cover)에 대하여 터널축의 직각방향 즉 횡단면에 대한 안전율을 평가하였으며, Table 2에 각 부재의 최저안전율을 표기하였다.

4. 지진취약도 함수 개발

지진취약도 함수를 개발하기 위해서는 지진하중의 규모에 따른 대상구조물의 손상발생확률이 필요하며, 손상발생확률을 획득하는 방법에는 다양한 방법 및 각 경우마다의 장·단점이 존재하여(Kim, 2014), 목적에 맞게 선택적으로 방법을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 국내에 지진피해기록이 다양하지 못한 점과 대상으로 하는 구조물이 단일 철도터널이 아닌 경부고속선 전체 터널 군(群)을 대상으로 하므로, 단일 PGA에 대한

수치해석을 통한 취약도함수의 모수(중앙값 및 표준편차)를 결정하는 방식(Kim et al., 2009b)을 적용하여 지진취약도 함수를 개발하였다.

즉 기존 연구결과(Kennedy & Ravindra, 1984)를 활용하여 대상시설물에 대한 지진취약도 함수모델을 Eq. (1)과 같이 대수정규분포형태로 가정하였고, 수치해석을 통하여 함수모델의 특성을 결정하는 모수(母數)를 결정하여 취약도함수를 도출한 후, 그를 이용해 PGA 변화에 따른 손상발생확률을 획득할 수 있도록 하였다.

4.1 구조요소의 손상상태 정의 및 기준

4.1.1 손상상태 정의

미국 FEMA(2004)에서는 터널의 라이닝 콘크리트에 대한 손상상태를 Table 3과 같이 정의하고 있으며, 이러한 분류기준은 손상검토부재를 라이닝 콘크리트로 하는 경부고속철도 터널에도 동일하게 적용 가능할 것으로 판단되었다.

Table 3. Definitions of damage state (FEMA, 2004)

Damage state	Definitions
None (ds1)	None
Slight/Minor Damage (ds2)	Minor cracking of the tunnel liner (damage requires no more than cosmetic repair)
Moderate Damage (ds3)	Moderate cracking of the tunnel liner
Extensive Damage (ds4)	Major ground settlement at a tunnel portal and extensive cracking of the tunnel liner
Complete Damage (ds5)	Major cracking of the tunnel liner, which may include possible collapse

다만 Table 3의 손상상태 정의는 정성적인 정의이므로 실제 각 손상상태별 지진취약도 함수를 도출하기 위하여 각 단계별 손상기준을 정의하였다.

4.1.2 손상상태 기준

고속철도 터널의 지진취약도 함수를 도출하기 위해서는 손상발생 검토부위인 라이닝 콘크리트의 아치부 및 측벽부에 대한 손상상태(Table 3)에 따른 평가기준이 필요하다.

터널의 구조부재에 손상발생여부는 관련 요령에 따라 부재가 보유하고 있는 구조물보유성능(Capacity)과 설계지진에 대해 각 구성부재에 요구되는 지진요구량(Demand)을 비교하여 판단할 수 있다.

여기서 소요강도(U)는 사용성에 예상을 초과한 하중 및 구조해석의 단순화로 인하여 발생하는 초과 요인을 고려한 하중계수를 곱하여 산정하며, 구조부재의 설계강도는 공칭강도에 1.0보다 작은 값인 강도감소계수 Φ 를 곱하여 산정한다.

$$F_s(\text{안전율}) = \frac{\text{설계강도}(\phi \times \text{공칭강도})}{\text{소요강도}(U)} \quad (3)$$

Eq. (3)에 의하여 안전율이 1.0 이하인 것으로 평가되면, 지진하중에 의하여 라이닝 콘크리트에 구조적 손상이 발생하는 상태이며, 이러한 상태를 Table 3에 정리된 손상상태에 대한 정의에 의하면 중간손상(Moderate Damage, ds3)에 해당된다고 볼 수 있다.

또한 경미한 손상(Slight/Minor Damage, ds2) 및 광범위한 손상(Extensive Damage, ds4)에 대한 안전율 기준은 Argyroudis & Pitilakis(2012)의 연구결과에 따라 각각 1.6 및 0.67로 가정하여 취약도함수를 도출하였다.

4.2 지진취약도 함수 도출

4.2.1 지진에 대한 확률적 성능정보 획득

경부고속철도 터널의 지진하중에 대한 취약도 평가를 위

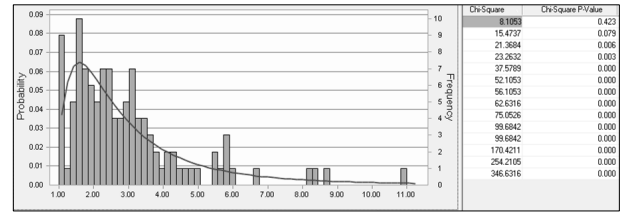


Fig. 5. Decision of probability distribution model & chi-square

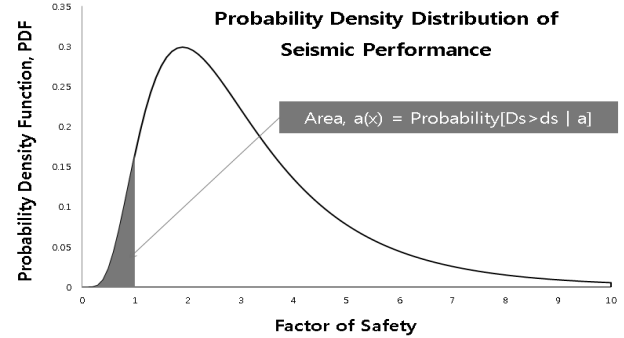


Fig. 6. Probability density distribution of seismic performance

해서는 앞서 정의된 손상상태에 대한 지진 시 요구 성능과 구조물 보유성능에 대한 확률적 정보가 필요하다. 이를 위해 Kim et al.(2009b)은 기존 내진성능평가 결과를 활용하였으며, 본 연구에서도 동일한 방법으로 Eq. (3)에 의한 평가부위별 안전율 분석결과(Table 2)를 활용하여 구조물 내진성능에 대한 확률적 정보(손상발생확률)를 획득하였다. 단, 취약도함수를 통한 정밀한 지진피해예측을 위해서는 대상 시설물의 지진응답거동이 유사함과 동시에 지진응답거동평가방법(수치해석방법)이 동일하여야 하므로, 본 연구에서는 27개소 상세평가대상터널 중에 박스형 단면(응답면위법 적용)인 OO터널 외 1개소를 제외한 25개소 아치형터널(시간이력해석법 적용)의 결과만을 활용하여 지진취약도 함수를 도출할 수 있도록 하였다.

손상발생확률을 획득하기 위하여 안전율 분석결과를 근거로 히스토그램을 작성하고 그 형상에 가장 적합한 확률분포모형을 결정하도록 하였다(Fig. 5).

본 연구에서 고려된 확률분포모형으로는 대수정규분포를 포함한 총 3가지(대수정규분포, 감마분포 및 정규분포)모형이 있으며, χ^2 (Chi-Square) 검정을 통하여 각 확률분포모형과 관측데이터(안전율의 히스토그램)와의 적합도를 검정하였다. 적합도 검정 결과 대수정규분포가 3가지 확률분포모형 중에서 관측데이터와의 적합도가 가장 우수한 것으로 분석되어, 본 연구에서는 터널 라이닝 콘크리트의 안전율이 대수정규분포를 따른다고 가정하였다.

대수정규분포를 따르는 내진성능의 확률밀도분포에서 해당 PGA(a')에 대한 손상발생확률은 Fig. 6에서와같이 기준

안전율 이하의 면적이 손상발생확률이 되며 이는 Eq. (4)를 활용하여 획득할 수 있다(Ang & Tang, 2006).

$$Probability[D_s > d_s | a] = \Phi \left[\frac{\ln(F_{s_s} / F_{s_m})}{\beta} \right] \quad (4)$$

- 여기서 $\Phi(\)$: 표준정규분포의 누적확률밀도함수
- F_{s_s} : 특정손상수준에 대한 기준안전율
- F_{s_m} : 안전율의 중앙값
- β : 안전율의 대수표준편차

4.2.2 지진취약도 함수의 모수 산정

지진취약도 함수는 지반운동 규모를 나타내는 지표인 최대 지반운동가속도(PGA, a)의 함수로 표현되며, 특정 손상수준에 대한 손상발생확률(Probability[$D_s > ds$ | PGA])은 Kennedy & Ravindra(1984)이 제시한 Eq. (1)과 같이 대수정규분포의 형태를 나타낸다. 이러한 확률분포모델은 모수(Parameters)에 따라 그 형태가 결정되며, 대수정규분포의 경우 중앙값(\hat{A})과 대수정규표준편차(β) 두 개의 항을 모수로 한다(Ang & Tang, 2006).

본 연구에서는 지진취약도 함수 산정 시 불확실성 및 무작위성과 관련된 대수정규표준편차(β)는 Argyroudis & Pitilakis (2012)가 제안한 Eq. (5)와 같이 편차의 발생 요인별로 구분하여 개별적인 영향을 고려하였다.

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{DS}^2 + \beta_C^2 + \beta_D^2} \quad (5)$$

- 여기서 β_{DS} : 손상지수예측과 관련된 대수정규표준편차
- β_C : 구조물의 내진성과 관련된 대수정규표준편차
- β_D : 지진응답과 관련된 대수정규표준편차

한편 본 연구에서는 대수정규표준편차 산정 시 Eq. (5)의 3개 항목 중 손상지수예측과 관련된 β_{DS} 및 구조물의 내진성과 관련된 β_C 는 본 연구의 범위가 한정적인 점을 고려하여 FEMA(2004) 및 Salmon et al.(2003)의 연구결과를 준용하여 각각 0.4 및 0.3으로 적용하였다. 또한 구조물의 지진응답과 관련된 β_D 는 본 연구의 수치해석 시 획득한 구조

Table 4. Lognormal standard deviation of tunnels

Tunnel type	β_{DS}	β_C	β_D	β
Cut & Cover	0.4	0.3	0.44	0.67
NATM	0.4	0.3	0.61	0.79

물의 지진응답 분포를 통하여 결정하였다. 이상의 내용을 정리하면 Table 4와 같으며, 굴착식 터널(NATM 터널)의 경우 주변지반조건이 개착식터널(퇴매음토사)에 비하여 다양하므로 지진취약도 함수의 대수정규표준편차 값이 상대적으로 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

또한 지진취약도 함수의 나머지 모수인 중앙값(\hat{A})은 Eq. (1)의 지진취약도 함수에, 앞서 Table 4에서 제시한 터널종류별 대수정규표준편차(β)값과, Eq. (4)를 통하여 획득한 설계수준의 PGA(a')에 대한 손상발생확률(Probability [$D_s > ds$ | PGA])을 대입함으로써 산정하였다.

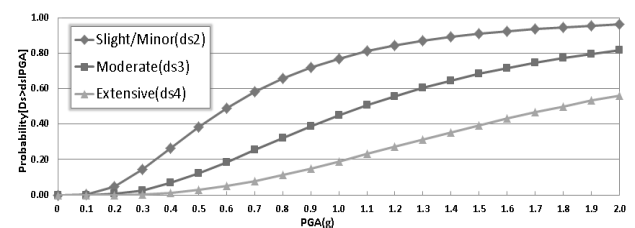
4.3 지진취약도 함수 도출 결과 및 분석

4.3.1 터널종류별 지진취약도 평가

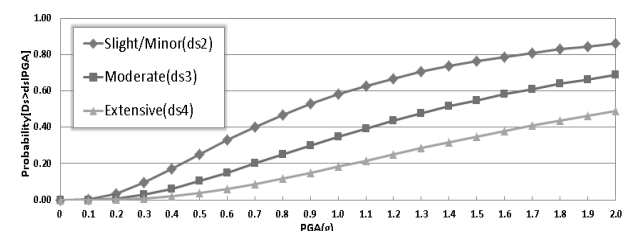
경부고속선 터널의 터널종류(굴착방법)에 따른 지진취약도 평가 결과는 Table 5 및 Fig. 7과 같다. 터널종류(굴착방

Table 5. Seismic fragility functions for Gyung-Bu line

Tunnel type	Damage state	Median (g)	Lognormal standard deviation (β)
Cut & Cover	Slight/Minor Damage (ds2)	0.61	0.67
	Moderate Damage (ds3)	1.09	0.67
	Extensive Damage (ds4)	1.80	0.67
NATM	Slight/Minor Damage (ds2)	0.85	0.79
	Moderate Damage (ds3)	1.36	0.79
	Extensive Damage (ds4)	2.04	0.79



(a) Cut & Cover tunnel



(b) NATM tunnel

Fig. 7. Seismic fragility curves for Gyung-Bu line

법)에 따른 내진성능을 비교·분석하기 위하여 지진취약도 곡선을 함께 도시하였으며, 그 결과 개착식 터널의 지진취약도가 굴착식 터널(NATM 터널)에 비하여 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 이는 굴착식공법(NATM 터널)이 적용된 구간의 주변지반이 개착식 구간의 주변지반인 퇴메움토사에 비하여 상대적으로 강성이 큰 암반지반에 가까우므로 지진발생 시 지진동 발생이 적고 상대적변위차가 작게 나타남에 따라 부재에 발생하는 응력이 작기 때문인 것으로 분석되었다.

4.3.2 기존 연구결과와의 비교·분석

본 연구에서 도출된 지진취약도 함수를 활용하여 경부고속선상

속선상에 위치한 터널의 내진성능확보수준을 평가하기 위하여, 기존 연구(FEMA, 2004)에서 제시한 지진취약도 함수와 비교·분석을 실시하였다(Table 6 및 Fig. 8).

PGA 1.0 g 수준에서 손상발생확률을 비교·분석한 결과, 경부고속선 터널은 기존연구 대상터널에 비하여 개착식은 약 71 %, 굴착식은 약 77 % 수준인 것으로 평가되어, 경부고속선 터널이 상대적으로 지진취약도가 낮은 것으로 분석되었다.

이는 경부고속선상에 위치한 터널이 고속철도의 안전한 운영을 확보하기 위하여 최신의 터널 설계 및 시공기술이 적용되어 FEMA(2004)에서 대상으로 하는 재래식터널에 비하여 상대적으로 내진성능이 우수한 것으로 분석되었다.

Table 6. Comparison with exiting research (Gyung-Bu line vs HAZUS)

Division	Tunnel type	Damage state	Median (g)	Lognormal standard deviation (β)
Gyung-Bu Line	Cut & Cover	Slight/Minor Damage (ds2)	0.61	0.67
		Moderate Damage (ds3)	1.09	0.67
	NATM	Slight/Minor Damage (ds2)	0.85	0.79
		Moderate Damage (ds3)	1.36	0.79
HAZUS (FEMA, 2004)	Cut & Cover	Slight/Minor Damage (ds2)	0.5	0.6
		Moderate Damage (ds3)	0.7	0.6
	Bored/ Drilled	Slight/Minor Damage (ds2)	0.6	0.6
		Moderate Damage (ds3)	0.8	0.6

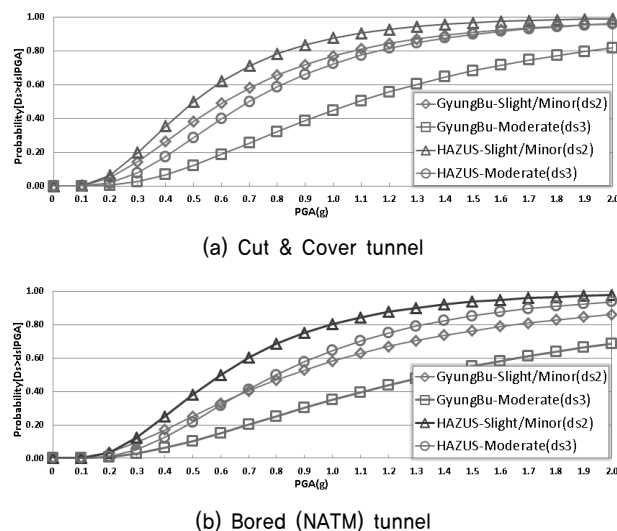


Fig. 8. Comparison with exiting research (Gyung-Bu line vs HAZUS)

5. 결 론

본 연구에서는 경부고속선상에 위치한 공용 중인 터널시설물을 대상으로 내진성능을 다양한 방법으로 평가·분석하였으며, 주요연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 설계기준(MLIT, 2011)에서 제시하는 설계지진가속도 (PGA=0.154 g) 수준에서 대상시설물의 내진성능확보 여부를 검토하기 위하여 단계별 내진성능평가(예비평가 및 상세평가)를 실시하였으며, 그 결과 경부고속철도 터널은 설계목표내진성능을 확보한 것으로 분석되었다.
- (2) 내진성능 상세평가 결과인 터널별 안전율을 활용하여 경부고속철도 터널에 대한 터널종류 및 손상수준별 지진취약도 함수를 개발하여 제시함으로써, 지진가속도크기에 따른 확률적 피해예측이 가능토록 하였다.
- (3) 굴착방법(굴착식, 개착식)에 따른 터널의 내진성능을 비교·분석하기 위하여 각각의 지진취약도 함수를 비교·분석하였으며, 굴착식터널(NATM)의 지진취약도가 개착식터널(Cut & Cover)에 비하여 작은 것으로 나타나 지진에 의한 피해발생 확률이 상대적으로 작은 것으로 분석되었다. 이는 굴착식공법이 적용된 구간의 주변지반이 개착식 구간의 주변지반인 퇴메움토사에 비하여 상대적으로 강성이 큰 암반지반이므로 지진발생 시 지진동 발생이 적고 상대적변위차가 작게 나타남에 따라 부재에 발생하는 응력이 작기 때문인 것으로 분석되었다.
- (4) 이번 연구를 통하여 도출된 경부고속선상 터널의 지진취약도 함수와 FEMA(2004)에서 제시한 재래식 터널의 것과 비교·분석을 통하여 경부고속선상 터널의 내진성능확보수준을 평가하였으며, PGA 1.0 g 기준으로 경부고속선상 터널의 손상발생확률(지진취약도)이 기존연구

의 대상인 재래식 터널에 비하여 개착식은 약 71 %, 굴착식은 약 77 % 수준인 것으로 평가되어 상대적으로 우수한 내진성능을 확보한 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 한국철도시설공단에서 지원한 “고속철도 기준 시설물 내진성능평가 및 보강방안 수립용역”의 일환으로 수행한 연구입니다.

References

1. Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (2006), Probability concepts in engineering : emphasis on applications to civil and environmental engineering, John Willy & Sons., pp. 105~194.
2. Argyroudis, S. A. and Pitilakis, K. D. (2012), Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 35, pp. 1~12.
3. Choi, I. K., Ahn, S. M. and Jeon, Y. S. (2006), Seismic fragility analysis of PSC containment building by nonlinear analysis, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 1, pp. 63~74 (in Korean).
4. FEMA (2004), HAZUS-MH technical manual, pp. 7-1~24.
5. Jeong, C. G. and Park, D. H. (2009), Selection of input earthquake motion for dynamic analysis, Korean Geo-Environmental Conference 2009, September 11, 2009/Seoul/Korea, pp. 187~195 (in Korean).
6. Kennedy, R. P. and Ravindra, M. K. (1984), Seismic fragility for nuclear power plant risk studies, Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47~68.
7. Kim, H. K. (2014), Development of the seismic fragility functions of the tunnels on the gyeongbu high speed railway, Master's thesis, Hanyang Univ. (in Korean).
8. Kim, M. K., Choun, Y. S., Choi, I. K. and Oh, K. H. (2009a), Seismic fragility analysis of substation systems by using the fault tree method, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 13, No. 2, pp. 47~58 (in Korean).
9. Kim, M. K., Hahm, D. G. and Choi, I. K. (2009b), Seismic fragility evaluation for railway bridge structures using results of a safety factor, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 13, No. 4, pp. 57~65 (in Korean).
10. KISTEC, KRRI and CTC Co. (2013), Seismic performance evaluation & retrofitting method planning for rapid-transit railway in use, pp. III.1~139 (in Korean).
11. KR (2011), The design standard of railway, pp. 2-22~29, 7-21~26 (in Korean).
12. MLIT (2011), The manual of seismic performance evaluation & improvement seismic performance for the existing tunnel, pp. 1~62 (in Korean).
13. Park, D. H., Kwak, D. Y. and Jeong, C. G. (2009), Development of new probabilistic seismic hazard analysis and seismic coefficients of korea “Part I: application and verification of a novel probabilistic seismic hazard analysis procedure”, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 7, pp. 103~109 (in Korean).
14. Salmon, M., Wang, J., Jones, D. and Wu, Ch. (2003), Fragility formulations for the BART system, in: Proceedings of 6th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE, Long Beach, pp. 183~192.