

지진위험도평가 방법을 이용한 내진성능관리 의사결정

Decision Making of Seismic Performance Management Using Seismic Risk Assessment

김동주^{1)*} · 최지혜²⁾ · 김병화³⁾

Kim, Dong Joo^{1)*} · Choi, Ji Hye²⁾ · Kim, Byeong Hwa³⁾

¹⁾한국시설안전공단 수석연구원, ²⁾한국시설안전공단 연구원, ³⁾경남대학교 토목공학과 교수

¹⁾Chief Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, ²⁾Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation,

³⁾Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

/ A B S T R A C T /

The strategy for the management of earthquakes is shifting from post recovery to prevention; therefore, seismic performance management requires quantitative predictions of damage and the establishment of strategies for initial responses to earthquakes. Currently, seismic performance evaluation for seismic management in Korea consists of two stages: preliminary evaluation and detailed evaluation. Also, the priority of seismic performance management is determined in accordance with the preliminary evaluation. As a deterministic method, preliminary evaluation quantifies the physical condition and socio-economic importance of a facility by various predetermined indices, and the priority is decided by the relative value of the indices; however, with the deterministic method it is difficult to consider any uncertainty related to the return-year, epicenter, and propagation of seismic energy. Also this method cannot support tasks such as quantitative socio-economic damage and the provision of data for initial responses to earthquakes. Moreover, indirect damage is often greater than direct damage; therefore, a method to quantify damage is needed to enhance accuracy. In this paper, a Seismic Risk Assessment is used to quantify the cost of damage of road facilities in Pohang city and to support decision making.

Key words: Seismic performance evaluation, Fragility function, Recovery time, Probabilistic seismic risk assessment

1. 서론

시설물통합정보관리체계(FMS)에 따르면, 시특법 상 1, 2종 시설물 중 사용연수가 30년 이상 된 노후 시설물이 '14년에 10.6%에서 '19년에는 13.9%, '29년에는 34.5%로 15년 사이 3배 이상 급증될 것으로 전망되고 있어, 지속적인 사회적 문제가 될 것으로 전망되고 있다. 따라서 내진성능 관리가 필요한 노후도로시설물을 식별하고 제한된 예산을 효과적으로 사용하기 위한 내진보강 우선순위를 결정하는 작업이 필요하다. 이러한 작업은 노후도로시설물 급증을 고려 할 때, 빠르게 수행가능하며 적용하기 편하고 안전 측 결과를 제공할 수 있어야 한다.

현재 사용되고 내진성능관리를 위한 우선순위 평가방법은 크게 지수평가방법(Indices Method), 피해예측방법(Expected Damage Method), 및 지진위험도평가방법(Seismic Risk Assessment) 등 3가지가 있다.

우리나라의 내진보강 우선순위 결정방법은 지수평가방법으로 결정론적인 방법이며, 우선순위를 개별시설물의 구조물의 내진결함정도와 긴급성에 따라 결정하고 있다[1]. 피해예측평가 방법은 개별시설물의 정량적인 직접피해금액과 정성적인 값으로 산정되는 간접피해정도를 고려하여 우선순위를 결정한다. 지진위험도평가 방법은 개별시설물이 아닌 도로망의 직·간접 피해규모를 모두 정량적으로 산정하고 이를 통해 우선순위를 결정한다[2]. 최근 재난관리가 사후복구에서 사전예방중심으로 재편됨에 따라 개별시설물의 물리적인 상태등급을 고려하는 기존의 결정론적인 관리방법보다는 1) 정량적인 시설물 손실비용 2) 정량적인 사회·경제적 손실비용, 3) 도로망의 지진 강도·거리 관련 불확실성 등을 포함 할 수 있는 확률론적 내진성능관리 체계 확립이 필요하다. 또한 내진성능관리를 위해서는 결정론적 방법에서 제공하고 있는 내진보강우선순위 선정 이외의 다양한 의사결정(도로망 내진보강 예산편성, 지진 시 물자공급을 위한 생존도로망 선정, 생존도로망 유지비용, 도로망 연결손실율, 도로망 경제손실율, 도로망 환경손실율)이 필요하며, 확률론적인 방법인 지진위험도평가방법을 통해 제공 되어질 수 있다.

*Corresponding author: Kim, Dong Joo

E-mail: djk776.kim@kistec.or.kr

(Received August 13, 2019; Revised October 16, 2019; Accepted October 16, 2019)

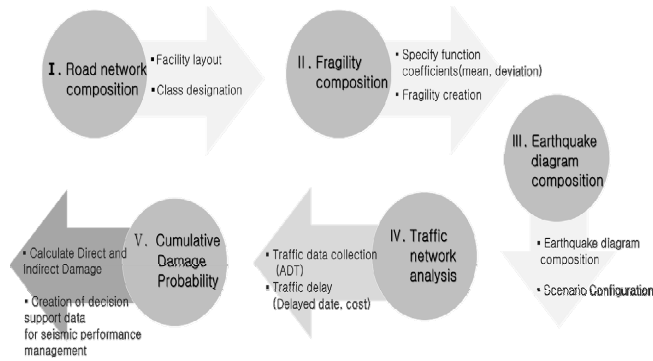


Fig. 1. Seismic Risk Assessment

본 논문을 통해 소개되는 지진위험도 평가방법은 Fig. 1과 같이 도로망 구성, 취약도 구성, 지진도 구성, 교통망해석, 누적피해계산 등 5단계 과정으로 수행된다. 1단계인 도로망 구성은 특정(포항)지역에 있는 도로시설물을 대상으로 도로망을 구성하고, 2단계로 도로시설물의 피해단계(무해, 경미, 보통, 극심, 붕괴)를 선정하고 피해단계별 취약도를 산출하며, 3단계로 특정지역의 지진의 스펙트럼가속도(Sa) 및 지반최대가속도(PGA)를 기준으로 3가지 지진시나리오를 구성하고, 4단계로 2·3단계에서 작성된 취약도 및 지진시나리오를 바탕으로 교통해석을 수행하여 각 시나리오별 교통지연 총량을 계산하며, 마지막 5단계로 시나리오별 도로망 피해비용을 산정한다.

5단계로 수행되는 지진위험도평가방법(Seismic Risk Assessment)은 국내실정에 맞는 취약도 함수를 필요로 하지만, 현재 한국형 도로시설(교량, 터널, 사면 및 옹벽)의 취약도함수는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원으로 진행 중인 “도로망의 지진복원력 평가를 통한 노후도로시설의 내진성능관리 의사결정지원 기술” 과제를 통해서 개발될 예정에 있어, 본 논문에서는 HAZUS가 제시한 취약도함수를 사용하여 포항지역의 도로망에 대한 내진성능평가를 하였다[3]. 향후, 한국형 노후도로시설물 취약도함수가 개발되면, 이를 적용하여 도로시설물의 내진성능 해석·평가를 수행할 예정이다.

2. 지진위험도 평가방법

확률론적 방법인 지진위험도 평가는 지진의 불확실성을 고려하고, 재난 관리에 필요한 정량적 사회·경제적 피해규모, 초동대응을 위한 기초자료를 제공할 수 있어 사전예방을 위한 내진관리업무를 효과적으로 지원 할 수 있다. 본 절을 통해 앞서 언급한 지진위험도 5단계 평가방법을 소개하고, 실제 적용을 통해 내진성능관리 지원에 필요한 정량적 직·간접 피해규모 산출 방법 및 활용방안을 소개하고자 한다.

2.1 도로망 구성

도로망은 지진으로부터 피해를 입을 수 있는 특정지역내의 모든 교량, 육교, 터널, 사면 및 옹벽 등의 주요 도로시설물로 구성된다. 도로포장, 교통표지판(overhead sign structure) 및 기타 도로운영관련 부속시설물은 대상에서 제외하였다. 도로망 구성을 위해 특정 지역 내의 주요시설물 종류,

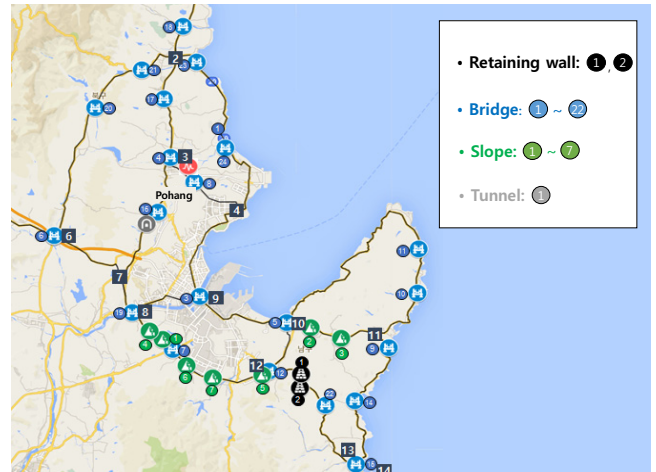


Fig. 2. Road network composition in Pohang

Table 1. Main Properties of Retaining wall

No	Total length (m)	Height (m)	Completion year	Seismic design
1	130.9	7.1	2018	Y
2	420.9	13.1	2018	N

위치, 교체 비용, 피해정도별 보수비용 등을 파악하고 시설물번호 및 이들 특성을 입력한다. 다음으로 도로망을 구성하는 노선(Link)을 정의하고 각각의 노선에 포함된 시설물을 할당하고 노선번호를 부여한다.

시설물통합정보관리체계(FMS)에 따르면, 포항시에는 1종 및 2종 도로시설물은 교량 250개소, 터널 27개소, 사면 63개소 및 옹벽 22개소가 있는 것으로 조사되고 있다.

포항시에 위치하고 있는 철근콘크리트 도로교량은 대부분 RC슬래브교이며, 라멘교가 일부 분포하고 있다. 강형 도로교량은 주로 강박스 거더교가 있으며, 소수의 강빔교 및 강판형교가 설치되어 있다. 프리스트레스 콘크리트 교량은 대부분 PC빔교이며, 일부 PC슬래브 및 신형PC빔교 등이 있다. 옹벽은 콘크리트 옹벽과 보강토 옹벽등 2가지 형식이 있으며, 사면은 높이 28 m부터 73 m까지 다양한 높이가 있는 것으로 조사되었다.

본 논문에서는 지진위험도평가 방법을 이용한 내진성능평가를 위해 대표도로시설물 교량(22개소), 터널(1개소), 사면(7개소), 옹벽(2개소)만을 고려하였으며, 향후 고도화 작업을 통해 1종, 2종 시설물을 모두 포함하여 도로망 내진성능해석을 수행할 예정이다. 소개된 포항시 대표시설물을 중심으로 아래와 같이 도로망을 구성하였다. Fig. 2와 같이 도로망은 14개의 노드(node)가 있으며, 노드를 연결하는 노선은 총 19개로 이루어져 있다. 또한, 주요 도로시설물의 제원은 Tables 1~4에 나타내었다.

2.2 피해단계별 취약도 함수

취약도 함수는 식 (1)과 같이 주어진 지진수준에 대해서 기 정의된 일정 피해정도를 초과하는 피해를 입을 확률을 나타낸다. 취약도함수를 통해 구조물의 초과손상 발생확률을 산정하며, 지진강도 수준에 따라 사전에 정의된 4가지 피해상태(경미, 보통, 심각, 붕괴)와 지반최대가속도(PGA) 또는 스펙트럼가속도(Sa)의 평균 지진강도로 표현된다. 4가지 피해상태는 모든

Table 2. Main Properties of Bridges

No	Span (m)	Total length (m)	Completion year	Width (m)	Seismic design	Type	Bearing type	Pier	Foundation
1	15+27.5+35+27.5+15	120	2000	30	N	steel box	rubber	Antigravity	pile
2	6@30	180	1998	12	Y	pc beam	brass	T type	-
3	30+60+90@3+60+30	450	2001	30	Y	-	port	-	pile
4	25.5+4@25.45+2@20.6	169.7	1992	10.8	N	pc beam	brass	Antigravity	pile
5	40+50+40	130	1997	19.3	N	steel box	port	Rahmen	-
6	50+60+2@50+3@60+50	440	2004	11.7	Y	steel box	port	T type	pile
7	30+50+30	110	2004	26.5	Y	steel box	port	Rahmen	-
8	37.5+50+37.5	125	2009	20.9	Y	steel box	port	T type	pile
9	3@45	135	2009	29.5	Y	steel box	disk	Multi	-
10	30+30+30+30+30+30	180.5	2010	20.9	Y	pc beam	rubber	T type	direct
11	45+2@55+45	200	2010	20.9	Y	steel box	rubber	T type	-
12	45+50+45	140	2012	20	Y	steel box	port	T type	-
13	3@25+ 35+25	135	2017	6	Y	pc beam	plain	T type	direct
14	2@13.5+2@10.8	48.3	1986	9.5	N	slab	-	-	-
15	4@14	56	1996	11	N	slab	-	-	-
16	3@20	60	1994	19	N	slab	-	-	-
17	2@17 +2@14	62	1992	19	N	pc beam	-	T type	-
18	2@40+40	120	2018	6	Y	steel box	Spherical	T type	steel pile
19	45.2+3@60+70+60+3@50+49.8	555	2006	23	Y	steel box	rubber	Multi	direct
20	4@15	60	1992	-	N	slab	-	-	-
21	4@15	60	1999	-	N	slab	-	-	-
22	4@8	32	1976	6.7	N	slab	-	wall	-
23	3@14 + 3@14	84	-	9.5	-	slab	-	rigid frame	-

Table 3. Main Properties of Slope

No	Total length (m)	Height (m)	slope (°)	Completion year	Seismic design
1	174	34	31	2004	N
2	246	67	38	2001	N
3	130	35	-	2001	N
4	330	67	38	2009	N
5	530	43	25	2012	N
6	450	34	32	2009	N
7	230	39	30	2009	N

Table 4. Main Properties of Tunnel

No	Total length (m)	Height (m)	Width (m)	Completion year	Seismic design	Type	Method	Type
1	43	8	10	2000	Y	steel box	open cut	undrained

도로구조물(교량, 터널, 사면, 옹벽)에 대해 정의된다. 도로시설물별로 취약도를 잘 표현할 수 있는 지진입력변수는 지반최대가속도(PGA), 지반최대변위(PGD), 스펙트럴가속도(Sa) 등이 있다. 본 연구단을 통해서 개발 예정인 취약도함수의 지진입력변수는 HAZUS와 마찬가지로 교량은 스펙트럴가속도(Sa), 터널·사면·옹벽은 지반최대가속도로(PGA)로 구성될 예정이다.

여기서, ϕ 는 표준정규누적분포함수, D는 피해상태, DS_i 는 i단계 피해상태, IM은 지진강도를 나타내는데 본 연구에서는 PGA 또는 S_a 를 지진강도로 사용하였으며, A_i 는 i단계 피해상태별 필요 지진강도 중앙값을 나타내며, β 는 i단계 피해상태별 필요 지진강도의 대수표준편차를 의미한다[2].

도로구조물 중 도로노면의 피해는 다른 도로시설물(교량, 터널, 사면 및 옹벽)에 비해 상대적으로 복구가 빨리 진행될 수 있고 피해규모가 작아, 도로노면의 피해는 고려하지 않았다.

포항지역 도로시설물(교량, 터널)의 피해단계별 취약도 구성을 위해, 미

$$P_{D > DS_i / IM} = \Phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{IM}{A_i} \right) \right] \quad (1)$$

Table 5. Classification of bridges within the road network

No	Bridge	NBI	HAZUS	No	Bridge	NBI	HAZUS
1	Chilpo 1-ri	101	classification 05	12	Ji kyung-ri	602	classification 22
2	Guji-ri	602	classification 22	13	Jang gi myeon 1	201	classification 10
3	Nam gu	101	classification 05	14	Jang gi myeon 2	201	classification 10
4	Gok gang-ri	602	classification 22	15	Yeon il ep	201	classification 10
5	Yak jeon-ri	405	classification 15	16	Chong ha myeon 1	602	classification 22
6	Nae dan-ri	405	classification 15	17	Wal po ro	405	classification 15
7	Uo bok-ri	405	classification 17	18	Joung Myung-ri	305	classification 12
8	Nam song-ri	405	classification 15	19	Shin Gwang myeon	201	classification 10
9	Deuk ryang dong	305	classification 12	20	Chong ha myeon 2	201	classification 10
10	Seok byeong-ri 1	602	classification 22	21	Jang gi myeon 3	201	classification 10
11	Seok byeong-ri 2	305	classification 12	22	Yong doo	201	classification 10

Table 6. Fragility characteristics of bridge (median, dispersion)

HAZUS	Damage State	Median Spectral Sa (T=1.0 sec)	Dispersion (β_c)	Remark
classification 05	slight	0.25	0.60	Concrete, Multi Pier, Simple bridge (Non-seismic)
	moderate	0.35		
	extensive	0.45		
	complete	0.70		
classification 10	slight	0.60	0.60	Concrete, except for classificatio 8 & 9, Continuous Bridge (Non-seismic)
	moderate	0.90		
	extensive	1.10		
	complete	1.50		
classification 12	slight	0.25	0.60	Steel bridge, Multi Pier, Simple bridge (Non-seismic)
	moderate	0.35		
	extensive	0.45		
	complete	0.70		
classification 15	slight	0.75	0.60	Steel bridge, Continuous Bridge (Non-seismic)
	moderate	0.75		
	extensive	0.75		
	complete	1.10		
classification 17	slight	0.25	0.60	PS concrete, Multi Pier, Simple bridge (Non-seismic)
	moderate	0.35		
	extensive	0.45		
	complete	0.70		
classification 22	slight	0.60	0.60	Concrete, Continuous Bridge (Non-seismic)
	moderate	0.90		
	extensive	1.10		
	complete	1.50		

국 재난청에서 제공하고 있는 HAZUS 체계를 이용하였다. HAZUS에서 지원하고 있지 않은 사면의 취약도는 “Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk”에 제시된 함수를 사용하였다[4]. 특히 사면의 취약도 함수는 지반종류에 따라 정해지는 것으로 되어있지만, Type B(단단한 사질토)로 전체 사면을 일반화하여 하나의 취약도 함수로만 구성하였다. 앞서 언급한 것과 같이 향후 한국형 노후도로시설물 취약도함수가 개발되면, 이를 적용하여 노후도로시설물의 내진성능 해석하고 비교평가 할 예정이다.

앞 절에서 구성된 도로망에 포함된 도로시설물에 대한 취약도 함수 구성을 위해 HAZUS가 제시한 기준을 이용하여 시설물을 분류하였으며[3], 교량분류는 다음 Table 5와 같으며 NBI(National Bridge Inventory) 체계에 따라 재료종류와 교량상부형식을 분류하고 총 28개 형식으로 교량을 분류하고 있다.

분류된 도로시설물의 피해단계별 취약도함수의 평균, 분산은 Tables 6~8에 정리하였다. 산정된 취약도 곡선은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 7. Fragility characteristics of tunnel (median, dispersion)

HAZUS	Damage State	Median (μ)	Dispersion (β)	Remark
tunnel	slight	0.5	0.6	open cut
	moderate	0.7	0.6	
	extensive/complete	-	-	

Table 8. Fragility characteristics of slope, retaining wall (median, Dispersion)

Type	Damage State	Median (μ)	Deviation (β)	Remark
slope	slight	0.25	0.35	-
	moderate	0.4		
	extensive/complete	0.64		
retaining wall	slight	0.26	0.7	Abut /Retaining wall
	moderate	0.52		
	extensive/complete	0.97		

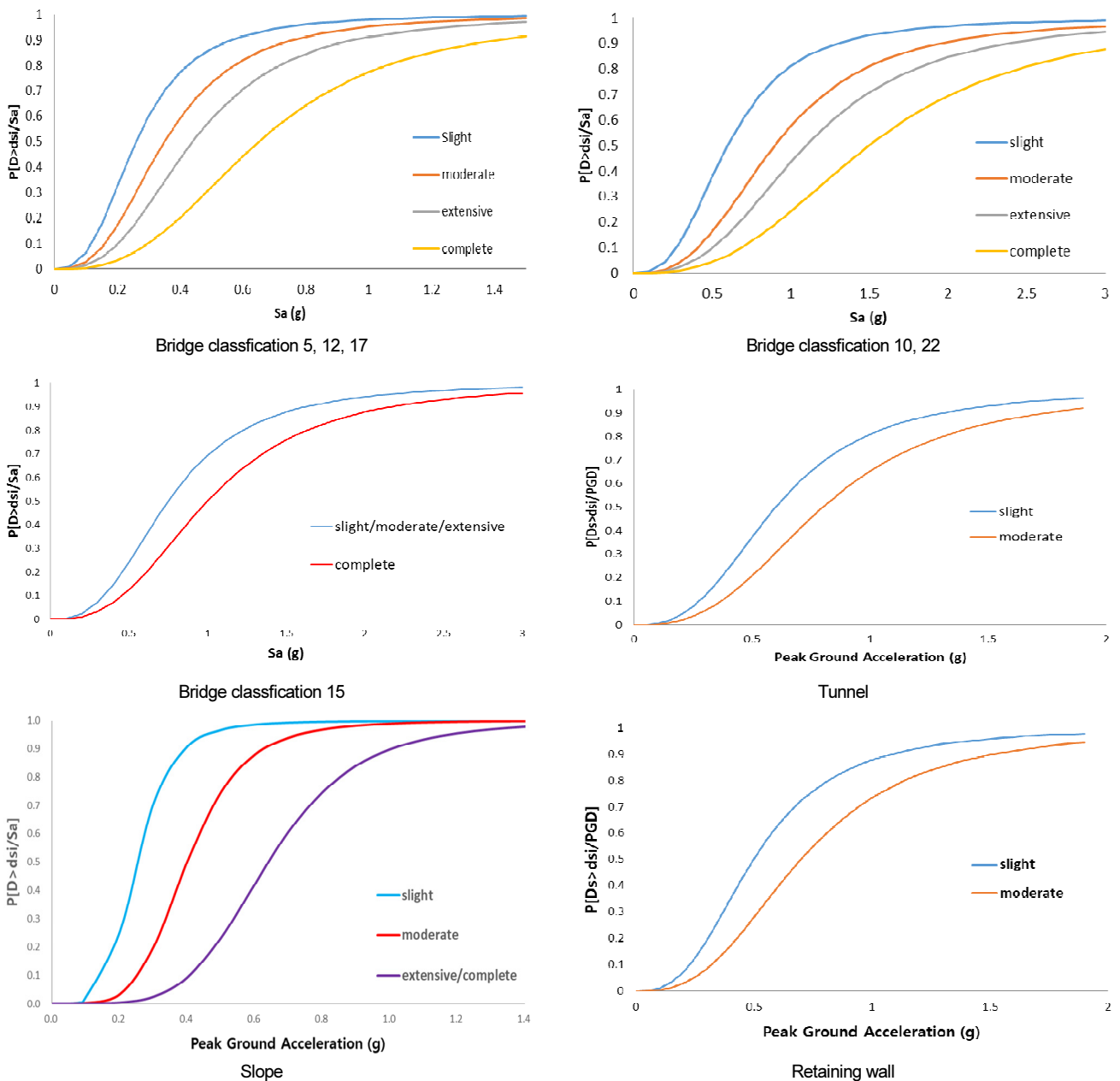


Fig. 3. Seismic fragility curves for various road facilities

2.3 지진시나리오 구성

결정론적 방법에 따른 내진해석은 권역별로 결정된 지진도에 나와 있는 재현주기 및 지진강도의 조합에 대해 지진위험도 해석을 수행한다. 이러한 방법은 재현주기, 진원지, 지진에너지 전파, 지반효과와 같은 불확실성을 고려한 해석을 수행하기에는 한계가 있다. 특히, 도로망을 구성하고 있는 도로시설물은 진원지와와의 거리에 따라 피해상태가 달라질 수 있어, 기존의 권역별로 균등한 발생분포를 가정하는 방법으로는 공간적인 도로망의 특성을 고려한 내진성능 해석을 수행하기 힘들다. 따라서, 지진의 불확실성을 고려하기 위해 도로망 내의 다양한 진원지 및 재현주기를 포함하는 지진 시나리오를 작성하고 이들 시나리오에 대한 내진성능해석을 수행함으로써 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 지진시나리오 개수는 식 (2)와 같이 진앙지 개수와 재현주기 개수의 곱으로 계산되며, 각각의 시나리오에 대응하여, 취약도 분석 및 작·간접 피해비용을 산출한다.

$$N_{Scenario} = N_{Epicenter} \times N_{Return\ Year} \tag{2}$$

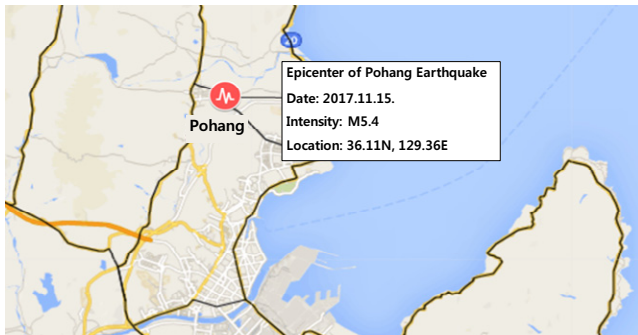


Fig. 4. Epicenter of Pohang Earthquake

여기서, $N_{Scenario}$ 는 지진시나리오의 개수이며, $N_{Epicenter}$ 는 진앙지 개수, $N_{Return\ Year}$ 는 지진재현주기의 개수를 나타낸다.

본 논문에서는 수 계산으로 지진위험도 평가방법을 수행하는 사례를 보여주기 위해, 진앙지 1곳과 3가지 지진강도로 3가지 시나리오를 간략하게 구성하였다.

진앙지는 2017년 11월에 발생한 지진 진앙지로 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 지진강도는 T=1(sec)의 스펙트럼 가속도를 기준으로 Sa(I)=0.21 g, Sa(II)=0.40 g, Sa(III)=0.62 g 등으로 구성하였다.

2.4 시설물 누적손상 해석

앞 절에서 소개된 도로시설물별 취약도함수와 지진시나리오를 이용하여 도로망에 포함된 시설물에 대한 4가지 손상단계에 대한 예상확률을 계산하였고 결과는 Table 9와 Table 10에 나타내었다.

Table 9의 P[D>DS | Sa]는 시설물이 특정 손상상태(D)를 초과할 확률을 나타내는 것이며, P[DS | Sa]는 손상단계별 확률, RCR(Replacement Cost Ratio)은 시설물 교체비용 비율로 환산된 시설물 보수비용을 나타낸다.

시나리오 I과 같은 방식으로 시나리오 II 및 III에 대한 도로시설물별 누적손상을 계산하였고, Table 11에 정리하였다. 시나리오 I에 대비하여 시나리오 II 및 III의 강도가 일률적으로 증가하지만, 누적손상은 시설물별로 다르게 나타남을 알 수 있다.

2.5 교통해석

내진관리 의사결정과 관련된 지수는 교통지연 총시간과 이를 비용으로 환산한 교통지연비용으로 나타내어질 수 있다. 교통지연 총시간을 계산하기 위해서는 교량 손상단계별 복구기간 및 일일교통량 등이 필요하다.

Table 9. Cumulative damage of Bridge

Facility type	Damage status	P [D>DS Sa]	P [DS Sa]	RCR	Ratio
Bridge classification (05,12,17)	no damage	1.0000	0.6777	0.0000	0.0000
	slight	0.3223	0.1523	0.0300	0.0046
	moderate	0.1700	0.0733	0.2500	0.0183
	extensive	0.0967	0.0625	0.7500	0.0469
	complete	0.0342	0.0342	1.0000	0.0342
	cumulative damage (maintenance ratio)				
Bridge classification (15,17)	no damage	1.0000	0.9574	0.0000	0.0000
	slight	0.0426	0.0287	0.0300	0.0009
	moderate	0.0139	0.0060	0.2500	0.0015
	extensive	0.0079	0.0046	0.7500	0.0035
	complete	0.0033	0.0033	1.0000	0.0033
	cumulative damage (maintenance ratio)				
Bridge classification (22)	no damage	1.0000	0.9769	0.0000	0.0000
	slight	0.0231	0.0000	0.0300	0.0000
	moderate	0.0231	0.0000	0.2500	0.0000
	extensive	0.0231	0.0127	0.7500	0.0096
	complete	0.0104	0.0104	1.0000	0.0104
	cumulative damage (maintenance ratio)				

Table 10. Cumulative damage of Tunnel, Slope, Retaining wall

Facility type	Damage status	P [D>DS Sa]	P [DS Sa]	RCR	Ratio
Tunnel	no damage	1.0000	0.8096	0.0000	0.0000
	slight	0.1904	0.1073	0.0300	0.0032
	moderate	0.0831	0.0831	0.2500	0.0208
	total probability		1.0000		0.0240
Slope	no damage	1.0000	0.8770	0.0000	0.0000
	slight	0.1230	0.0646	0.0300	0.0019
	moderate	0.0585	0.0585	0.2500	0.0146
	cumulative damage (maintenance ratio)				0.0166
Retaining wall	no damage	1.0000	0.8770	0.0000	0.0000
	slight	0.1230	0.0646	0.0300	0.0019
	moderate	0.0585	0.0585	0.2500	0.0146
	cumulative damage (maintenance ratio)				0.0166

Table 11. Cumulative damage rate by facility type according to earthquake scenario

Facility type	Cumulative damage (maintenance ratio)		
	Scenario (I)	Scenario (II)	Scenario (III)
Bridge classification (05,12,17)	0.1040	0.4206	0.6724
Bridge classification (15,17)	0.0091	0.060	0.1614
Bridge classification (22)	0.0199	0.1255	0.3079
Tunnel	0.0240	0.0908	0.105
Slope	0.0166	0.0697	0.0825
Retaining wall	0.0240	0.0908	0.105

Table 12. Traffic survey

Traffic survey area	Average daily traffic (4 lanes)	Average daily traffic (2 lanes)	remark
Goryeongpo-eup ~ Donghae-myeon	15,407	-	4 lanes
Donghae-myeon ~ Daesong-myeon	10,255	-	4 lanes
Daesong-myeon ~ Jamyong-ri	38,608	-	4 lanes
Gangdong-myeon ~ Pohang-si	37,120	-	4 lanes
Gampo-eup ~ Goryeongpo-eup	-	3,262	2 lanes

우리나라는 손상단계별 복구기간을 통계할 만큼 다양한 지진피해가 없어, 미국 HAZUS 기준의 복구일수를 사용하였다[3]. 또한 도시별로 복구역량의 차이가 있음에도 불구하고 단일화된 복구기간을 사용하는 것은 다소 무리가 있을 수 있다. 하지만, 지진이 전국적으로 오는 것은 아니고 특정 지역에 국한되며, 이들 특정구역은 재난지역으로 선포되어 재난복구에 국가의 역량이 집중되기 때문에, 이를 가정하여 하나의 복구기간으로 표준화하였다.

본 논문에서는 교량손상단계별 복구기간은 미국 HAZUS 기준의 시설물 손상단계별 최고 복구일수(통행제한일수)를 사용하였다(경미 0일, 보통 7일, 극심 150일, 완전 450일). 향후 본 논문에서 사용된 복구기간을 일반보수보강 기간을 바탕으로 우리나라 실정에 맞게 수정하여 제안될 예정이다.

포항시의 일평균 교통량은 e-나라지표를 이용하였으며, 상시조사지점인 구룡포읍-동해면, 동해면-대송면, 대송면-자명리, 강동면-포항시, 갑포읍-구룡포읍 등의 평균교통량을 4차선 및 2차선 대표교통량으로 활용하였다. 시물레이션에 사용된 지점별 교통량은 Table 12에 나타내었다.

교통시나리오는 각각의 지진시나리오에 대응하여 3개의 교통시나리오로 구성된다. 지진 직후 도로망을 구성하고 있는 노선의 통행상태는 2가지로 구분하였다. 경미 손상상태의 경우는 교통통제 없이 보수보강이 수행될 수 있으며, 보통·완전·극심 손상상태의 경우는 보수 보강시 교통을 전면 차단해야 하는 것으로 단순화하였다. 보통·완전·극심 손상상태 단계 시 교통통제 여부는 각 손상상태 확률 50%를 기준으로 미만은 전면통행, 이상은 전면차단 하는 것으로 다음 식 (3)과 같이 기준을 정의하였다.

$$T_r = \begin{cases} 1.0 & \text{if } P_k[D > DS_i] < 0.5 \\ 0.0 & \text{if } P_k[D > DS_i] \geq 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

여기서, T_r 는 교통상태지수이며 P_k 는 손상확률, D 는 시설물 손상상태, DS_i 는 손상등급(무해, 경미, 보통, 극심, 붕괴)을 나타낸다[5].

교통시나리오 구성을 위해 본 논문에서는 수 계산을 위해 단순화된 결정론적인 방법(0: closed, 1:open)을 사용 하였지만, 향후 몬테카를로 방법 등 고도화를 통해 좀 더 의미 있는 (최적화된) 교통시나리오를 구성할 예정

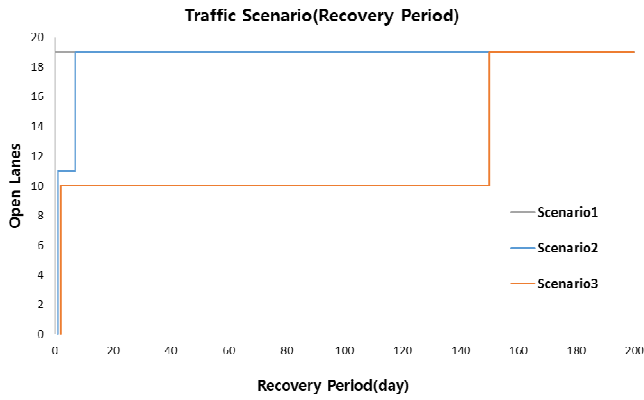


Fig. 5. Number of open lanes in each damage status

이다.

도로망을 구성하는 노선에 포함되는 도로시설물은 서로 다른 내진성능 및 노후화상태에 있고, 진양으로 부터 위치가 달라 전달되는 지진강도가 다르다. 이에 따라 피해상태별 초과확률도 서로 다르므로, 노선의 피해상태 경우의 개수는 다음과 같다.

$$N_{DS_{Link}} = [N_{DS}]^{N_{Facility}} \quad (4)$$

여기서, DS_{Link} 는 노선 손상 경우 개수, $N_{Facility}$ 는 전체시설물 개수(=22), N_{DS} 는 손상단계의 개수(=5)를 나타낸다.

따라서, 모든 경우의 수를 시뮬레이션 하는 것은 현실적으로 어려워, 본 연구에서는 노선을 구성하고 있는 시설물중 가장 큰 피해를 입는 구조물 피해상태를 노선의 손상상태로 정의하였다.

교통지연 해석결과 시나리오 I [Sa(I)=0.21 g]에서는 교통지연이 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 시나리오 II [Sa(II)=0.4 g] 및 시나리오 III [Sa(III)=0.62 g]에서는 Fig. 5와 같은 총 교통지연이 발생하는 것으로 나타났다.

2.6 지진위험도 평가(누적피해도 해석)

지진위험도 지진 시나리오에 대한 직접피해규모와 간접피해규모 평가를 통해 이루어진다. 직접피해는 취약도 함수를 이용하여 피해등급별 초과 확률을 계산하였고 이를 활용하여 교체비용에 대한 비율을 산출함으로써 계산된다. 지진피해 예측비용은 도로망 총 시설물피해비용과 도로망 총 교통지연 비용의 합으로 계산한다. 도로망 총 시설물피해비용은 식 (6)의 개별시설물 피해비용을 합산하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$FCost_{(k)} = \sum_{i=1}^N Facility_{(i,k)} \quad (5)$$

여기서, $FCost_k$ 는 시설물 피해비용, k 는 재현기간 시나리오 번호, i 는 시설물 번호, N 는 전체시설물 개수를 나타낸다.

Table 13. Ratio of cost repair by damage rating

Damage status	Ratio of cost repair (Repair cost/Replacement cost)
slight	0.03
moderate	0.25
extensive	0.75
complete	1.0

$$Facility_{(i,k)} = Replace\ Cost_{(i)} \times \sum_{m=1}^M \sum_{ds=1}^{DS} (RCR_m^i \cdot P_{ds}^{i,k,m}) \quad (6)$$

여기서, $Facility_{(i,k)}$ 는 각각의 시나리오에 대응하는 개별 시설물 피해비용, i 는 시설물 번호, k 는 재현기간 시나리오 번호, m 은 진원지 번호, ds 는 피해등급, RCR 는 교체비용 비율로 환산되는 보수비용, $P_{ds}^{i,k,m}$ 는 재현주기 k , 진원지 m 에 따른 각각의 시설물 i 의 피해등급에 따른 피해확률을 나타낸다[5].

손실비용으로 환산된 직접피해는 시설물 교체비용으로 표준화하여 계산하였다. 시설물 교체비용에 대한 D/B가 구축되어 있지 않아서 정확한 비용을 알 수 없지만, 일반적으로 신설 대비 임시 우회시설물 건설 및 철거 등의 추가 비용이 발생한다. 특히, 도심지의 경우는 교체 기간 동안 임시로 사용할 우회로 건설비용이 크게 증가한다. 따라서, 시설물 교체비용은 신설비용 크며, 본 연구에서는 편의를 위해 교체비용을 기존 준공비용의 1.5배 증가한 비용을 가정하여 사용하였다. 구조물 준공비용은 준공기간이 달라 현재 기준으로 환산할 필요가 있으며, 환산은 물가상승률 5%를 적용한 할인율을 사용하였다. 교량의 준공비용은 FMS자료를 기준으로 하며, 준공비용이 확인 되지 않는 경우는 설계건설단가를 적용하였다.

교량피해 상태별 보수비 비율은 교량종류 및 교량상태에 따라 차이가 발생하지만, 피해예측 시뮬레이션에서는 교량피해별 보수비용을 동일한 것으로 가정하였다. Table 13은 가정된 교량피해별 보수비율을 정리한 것이다.

도로시설물의 교체비용에 대한 보수비 비율을 바탕으로 총 보수비용을 계산하면 Table 14 및 Table 15와 같다.

시나리오 I과 같은 방식으로 시나리오 II 및 III에 대한 도로시설물별 누적피해비용을 계산하였고, Table 16에 정리하였다. 시나리오 I에 대비하여 시나리오 II 및 III의 강도가 일률적으로 증가하지만, 누적손상은 시설물별로 다르게 나타남을 알 수 있다.

도로망 총 교통지연으로 인한 피해비용은 아래 식 (7)과 같다.

교통지연은 정해진 출발지와 도착지를 통과하는데 걸리는 지진 전·후의 총 이동시간을 비교함으로써 산출 할 수 있으며, 교통지연에 따른 피해비용은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$TCost_{(p)} = VOT \times \sum_{j=1}^{Link} (V_{j,p} t_{j,p} - V_{j,0} t_{j,0}) \quad (7)$$

여기서, $TCOST_{(p)}$ 는 도로망의 총 교통지연에 따른 피해비용을 의미하며, p 는 복구단계를 나타내며 j 는 노선번호, VOT 는 단위 지체시간당 비용, $V_{j,p}$ 는 노선 j 의 p 복구단계에서의 교통량, $t_{j,p}$ 는 노선 j 의 p 복구단계에서의 노선 통과시간, $V_{j,0}$ 는 노선 j 의 지진전 교통량, $t_{j,0}$ 은 노선 j 의 지진 전 노선 통과시

Table 14. Damage cost of bridges (Scenario I)

No	Bridge name	Ratio of cost repair	Replacement cost	Repair cost (One million won)	No	Bridge name	Ratio of cost repair	Replacement cost	Repair cost (One million won)
1	Chilpo 1-ri	0.1040	12,960	1,348	12	Ji kyung-ri	0.0091	2,430	22
2	Guji-ri	0.0091	6,480	59	13	Jang gi myeon 1	0.0091	1,385	13
3	Nam gu	0.1040	144,053	14,982	14	Jang gi myeon 2	0.0091	1,848	17
4	Gokgang-ri	0.0091	5,498	50	15	Yeon il ep	0.0091	3,420	31
5	Yak jeon-ri	0.0199	9,032	180	16	Chong ha myeon 1	0.0091	3,534	32
6	Naedan-ri	0.0199	20,293	404	17	Wal po ro	0.0199	2,592	52
7	Uobok-ri	0.0199	394,732	7,858	18	Joung Myung-ri	0.1040	285,455	29,687
8	Nam song-ri	0.0199	2,190	44	19	ShinGwang myeon	0.0091	64,706	590
9	Deuk ryang dong	0.1040	9,771	1,016	20	Chong ha myeon 2	0.0091	1,800	16
10	Seok byeong-ri 1	0.0091	11,317	103	21	Jang gi myeon 3	0.0091	643	6
11	Seok byeong-ri 2	0.1040	15,048	1,565	22	Yong doo	0.0091	2,394	22
Total repair cost of bridges									58,297

Table 15. Damage cost of slope, retaining wall, tunnel (Scenario I)

No	Facility name	Ratio of cost repair	Replacement cost	Repair cost (One million won)	No	Facility name	Ratio of cost repair	Replacement cost	Repair cost (One million won)
1	Yeon il slope	0.0166	2,566	42	1	Bon seon retaining wall	0.024	678	16
2	Dong hae seok slope	0.0240	2,685	64	2	Jahn retaining wall	0.024	678	16
3	Dong hae sang jeong slope	0.0166	2,991	50	3	Ipchoi tunnel	0.024	2,357	57
4	Yeon il uobok slope	0.0240	1,629	39					
5	ohcheon segae slope	0.0166	3,719	62					
6	Daesong Dae gak slope	0.0166	5,817	96					
7	Daesong okmyeong slope	0.0166	2,676	44					
Total repair cost of slope				398	Total repair cost of retaining wall/tunnel				89

Table 16. Direct damage scale cost by scenario cases

—	Scenario (I)	Scenario (II)	Scenario (III)
Total expected damage scale cost (One million won)	58,784	259,914	468,636

간을 나타낸다[5].

위 식을 사용하여, 지진 시나리오 I, II, III에 대한 도로망의 지연교통량과 이에 따른 교통지연 피해규모를 계산하였고 Table 17 및 Table 18에 정리하였다. 지진 시나리오 I에 따른 지연 교통량은 없는 것으로 조사되었다.

지진시나리오에 따른 시설물 물리적 피해 증감율과 교통지연으로 표현되는 간접피해가 증가율이 서로 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 특히 지진시나리오 II 대비 지진시나리오 III의 지연 교통량 증가율은, 시설물 직접피해 증가율(2배) 보다 큰 증가율(25배)을 보이고 있다. 이러한 경향은 3종 도로시설물을 포함하는 경우 더욱 두드러질 것으로 예상된다.

3. 제한사항

지진위험도 평가방법을 이용하여 포항시 도로망, 시설물취약도 및 지진

시나리오를 구성하고 이에 따른 도로시설물(교량, 터널, 사면, 옹벽)의 손상 확률 및 교통지연 해석을 통해서 도로시설물 직접피해규모, 교통지연 피해 규모를 정량적으로 산출하였다.

본 논문에서 사용된 요소기술들, 특히 취약도함수는 Hazus를 준용하였지만, 향후 연구를 통해 개발예정인 한국형 취약도함수를 사용하여 동일 도로망(포항지역)을 대상으로 내진성능 해석을 수행할 예정이다. 이를 통해 한국형과 Hazus의 취약도 함수 차이점을 확인하고, 한국형 도로시설물 취약도함수의 특징을 살펴볼 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

수 계산으로 지진위험도 평가방법 사례를 보여주기 위해, 제한된 도로시설물 수(총 32개) 및 간략한 3가지 시나리오로 내진성능관리 해석을 수행하였다. 하지만, 의미 있는 결과를 산출하기 위해서는 모든 1종, 2종 시설물 및 수천 개의 다양한 교통 시나리오가 필요하다. 수 계산을 통해 대형 도로

Table 17. Estimated amount of delayed traffic by scenario

Route	Scenario II				Scenario III			
	Probability of dominance			Delayed traffic	Probability of dominance			Delayed traffic
	Usual	Intense	Complete		Usual	Intense	Complete	
1	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
2	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
3	0.0913	0.0538	0.0231	-	0.2407	0.1522	0.0694	-
4	0.5935	0.4329	0.2017	177,429	0.8216	0.7066	0.4435	3,802,050
5	0.3355	0.0538	0.0231	-	0.3925	0.1522	0.0694	-
6	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
7	0.5935	0.4329	0.2017	177,429	0.8216	0.7066	0.4435	3,802,050
8	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
9	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
10	0.5935	0.4329	0.2017	245,000	0.8216	0.7066	0.4435	5,250,000
11	0.5935	0.4329	0.2017	245,000	0.8216	0.7066	0.4435	5,250,000
12	0.5935	0.4329	0.2017	245,000	0.8216	0.7066	0.4435	5,250,000
13	0.3925	0.2525	0.1006	-	0.8216	0.7066	0.4435	5,250,000
14	0.5935	0.4329	0.2017	177,429	0.8216	0.7066	0.4435	3,802,050
15	0.5935	0.4329	0.2017	177,429	0.8216	0.7066	0.4435	3,802,050
16	0.1442	0.1442	0.0694	-	0.3470	0.3470	0.1904	-
17	0.5935	0.4329	0.2017	22,834	0.8216	0.7066	0.4435	489,300
18	0.3355	0.1442	0.0694	-	0.3925	0.3470	0.1904	-
19	0.0913	0.0538	0.0231	-	0.2407	0.1522	0.0694	-

※ B=Bridge, S=Slop, T=Tunnel, R=Retaining Wall

Table 18. Traffic delay damage scale cost by Scenario

Classification	Scenario (I)	Scenario (II)	Scenario (III)
Total expected damage scale cost (One million won)	-	14,675	366,975

망모델과 수천 개의 교통 시나리오를 계산하는 것은 현실적으로 어렵다. 이를 극복하기 위한 “내진성능관리 의사결정지원 프로그램” 소프트웨어를 개발 중이며, 이를 통해서 보다 다양한 시나리오를 분석하고 의미 있는(최적) 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

내진성능관리 의사결정을 위해서는 3가지 항목(정량적인 직접 피해규모, 정량적인 사회경제적 간접피해 규모, 내진보강 수혜규모)을 모두 고려해야지만, 내진보강 수혜규모에 대한 산출방법은 현재 개발 중에 있어 소개하지는 않았다. 향후, 내진보강 수혜규모 산출방법 소개를 통해 보다 의미 있는 해석결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 본 논문에서는 소개가 되지 않았지만, 연구단을 통해 다양한 의사결정지수(도로망연결지수, 도로망환경지수, 도로망경제손실지수)가 개발되고 있으며, 기 소개된 정량적인 직·간접 피해규모와 함께 의사결정지원 자료로 활용될 예정이다. 향후 이들 자료를 바탕으로 내진보강 우선순위결정 뿐만 아니라 다양한 의사결정(생존도로망 선정, 지진 직후 초동대응, 도로망연결을 특정, 경제손실을 특정, 환경피해를 특정 등)도 수행할 수 있다.

4. 결론

현재 우리나라에서 이용되고 있는 내진성능평가 방법은 결정론적 방법

인 지수평가방법(Indice Method)으로서 개별 시설물에 대한 정성적인 지수 값을 제공하고 있으며 지진재난 사전예방에 필요한 도로망의 손상상태 및 정량화된 직·간접 지진 피해규모를 제공할 수 없는 실정이다. 그리고 그에 따른, 개별시설물별의 내진성능(강도, 변위)과 지진요구도를 단순 비교한 결과와 정성적인 사회·경제적 중요도를 바탕으로 내진성능관리 의사결정을 수행하여 불필요한 시설물을 내진보강하거나, 우선순위결정 오류로 인해 과도한 관리비 지출의 원인을 제공하였다.

확률론적인 방법인 지진위험도평가방법(Seismic Risk Assessment) 지진 재현주기, 진원지, 지진에너지 전파와 관련된 지진의 불확실성을 다양한 지진시나리오를 통해 고려하고, 재난관리에 필요한 정량적 직·간접피해 규모, 지진초기 초동대응을 위한 기초자료(시설물별 예상피해규모, 지진시나리오별 도로망 예상피해규모 등) 제공과 같은 지진재난 사전예방을 위한 내진성능관리업무를 지원할 수 있다.

“내진성능관리 의사결정지원기술 개발” 연구단을 통해서 개발되고 있는 한국형 도로시설물 취약도함수, 피해복구도 함수, 교통지연 및 교통포기 비용 등을 포함하는 교통해석 고도화, 물류불가 또는 지연에 따른 간접경제 피해 등을 활용하면 향후 보다 의미 있는 내진성능관리 의사결정을 지원할 수 있을 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부 건설기술연구사업(19SCIP-B146946-02)의 연구의 일환으로 수행되었음

/ REFERENCES /

1. Korea Infrastructure Safety Corporation, Guidelines for Evaluating and Improving Seismic Performance of Existing Road facility (Stayed Bridges). c2011.
2. FHWA, Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part I, Part II. c2006.
3. FEMA, Hazus Estimated Annualized Earthquake Losses for the United State. c2017.
4. Kaynia AM, Guidelines for Deriving Seismic Fragility Functions of Elements at Risk. c2013.
5. Sextos A, Kilanitis I, Integrated Seismic Risk and Resilience Assessment of Roadway Networks in Earthquake Prone Area, Bulletin of Earthquake Engineering. 2019 Jan;17(1):181-210.