

# 대표 교량을 이용한 국내 철근콘크리트 교량의 지진취약성 분석 방법

안 효 준<sup>1</sup> · 정 성 훈<sup>2</sup> · 신 수 봉<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 사회인프라공학과 석사과정, <sup>2</sup>인하대학교 건축공학과 교수, <sup>3</sup>인하대학교 사회인프라공학과 교수

## Seismic Fragility Assessment Method for RC Bridges in Korea using a Representative Bridge

HyoJoon An<sup>1</sup>, Seong-Hoon Jeong<sup>2</sup> and Soobong Shin<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Civil Engineering, Inha Univ., Incheon, 22212, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Inha Univ., Incheon, 22212, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Inha Univ., Incheon, 22212, Korea

### Abstract

In this investigation, a set of seismic fragility curves for RC bridges in Korea is derived by considering variations of the representative analytical model. The dimensions and specifications of the model are determined, based on statistical analysis of the inventory of RC bridges in Korea. Variations of important modeling parameters such as material properties, size of structural members, and dimension of the bridge are defined based on statistical studies of the bridges. The OpenSees program is utilized for the analysis to represent the inelastic behavior of RC members. A systematic approach is developed to perform a large volume of inelastic dynamic analysis, in which continuous variation of the modeling parameters are programmed to appropriately represent the characteristics of RC bridges in Korea

**Keywords** : seismic fragility curves, RC bridges, representative analytical model, inelastic behavior

### 1. 서 론

근대 이후 급격한 산업화·도시화로 인해 최근 인구밀집지역을 강타한 자연재해는 복잡화·대형화되고 있다. 이러한 대형복합재난에 선제적으로 대비하고 그로 인한 위험을 효율적으로 관리하기 위해서는 지역의 지진방재에 대한 준비를 강화할 필요가 있다. 국민생활 안전보장의 비전 아래, 사회 인프라 시설물의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 다양한 연구가 추진되고 있으며, 이 중에서 대표 도로시설물에 대한 표준화된 지진취약도 함수 개발은 효과적인 도로망의 내진성능 관리를 통해서 사회·경제적 지역의 지진방재 수준을 향상시키기 위한 핵심 요소라고 할 수 있다.

지역 내 교통망에 분포되어 있는 다수의 교량에 대한 지진취

약도를 분석하기 위해서는 교량의 기본 자료 확보가 중요하다. 예를 들면, 미국의 HAZUS에서 제시하는 지진취약도 함수를 적용하기 위해서는 다음과 같은 여러 항목의 자료가 필요하다: 내진설계 여부, 교량의 경간장 및 형식, 교각형식 및 설계조건, 받침의 형식, 지반 조건, 그 외 교량의 경사각, 상부구조 단면적 등. 수많은 교량에 대한 자료 조사를 모두 하는 것은 불가능하고 비효율적이므로, HAZUS에서는 미국 교량 정보(NBIm national bridge inventory)의 자료를 이용하여 지진취약도 함수를 분석하도록 하고 있다. 그리스의 경우, 2013년~2015년까지 약 3년 동안 도로 및 철도 네트워크를 포함한 라이프 라인 및 인프라의 물리적 취약성을 예측하고 시스템 수준에서 이들의 상호 의존적 행동을 예측하는 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해서 도로 1,700km, 46개의 교량 75km, 28개의 터널

\* Corresponding author:

Tel: +82-32-860-7552; E-mail: sbshin@inha.ac.kr

Received November 7 2019; Revised November 13 2019;

Accepted November 14 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

182km에 해당하는 도로 네트워크를 구축하였으며, 최종 성과물로 “Retis-risk(real time intercity seismic risk)”라는 도시 및 근교의 도로 네트워크에서 지진 위험을 평가하고 관리하는 통합시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 국내 철근콘크리트 대표교량에 대한 지진취약도 분석 기법을 정리하고 이를 바탕으로 노후도를 고려한 교량의 지진취약도 함수를 도출한다.

## 2. 본 론

### 2.1 지진취약성 분석 방법

지진에 의한 구조물의 응답 예측에는 여러 가지 불확실성이 수반되며 이를 고려하기 위해서 확률론적 취약성 분석 방법이 이용되어 왔다. 지진 취약성 분석은 일반적으로 지반 진동의 세기와 구조물의 한계상태 확률에 대한 관계를 파악하는 과정으로 진행된다. 여기서 한계상태 확률은 구조물이 일정한 응답 수준(손상수준)에 도달하거나 이를 초과할 확률로 정의되며, 신뢰성 있는 통계분석을 위해서 충분한 수의 구조물 응답 자료들이 필요하다. 응답 자료들은 다양한 방법으로 얻어질 수 있는데, 자료의 특성에 따라서 취약성 분석 방법은 아래의 네 가지 분류로 나누어 질 수 있다.

- (i) 경험적(empirical) 방법: 지진 발생 후 현장 답사에 의해 수집된 데이터
- (ii) 판단적(judgemental) 방법: 전문가의 의견
- (iii) 해석적(analytical) 방법: 구조해석
- (iv) 복합적(hybrid) 방법: (i), (ii), (iii)의 융합

경험적 방법에 의한 취약성 분석은 지진 발생 후 현장에서 수집된 실제 피해 사례들을 바탕으로 이루어지므로 분석의 정확성은 현장 답사의 수준에 의해 크게 좌우된다. 충분한 피해 사례를 모을 수 있을 만큼의 강진이 드물고, 현장답사에 참가한 많은 조사자들의 조사방법과 피해 평가 정도를 일관성 있게 유지하는 것이 현실적으로 불가능하므로 분석결과의 신뢰성에 한계가 있다. 또한 수집된 데이터는 그 지역적 특성으로 인하여 다른 지역의 지진대비 자료로 사용할 수 없는 경우도 많다. 경험적 방법에 의한 취약성 분석에 대해서는 Rossetto(2003)의 연구에 보다 자세히 논의되어 있다.

판단적 방법에 의한 취약성 분석은 지진 후 현장평가에 참여한 경험이 있는 전문가 집단을 대상으로 한 설문조사를 바탕으로 도출된다. 설문항목에 취약성 곡선의 도출에 편리한 정량적 데이터를 포함할 수도 있으므로, 취약성 분석이 편리하게 이루어지는 경우가 많다. 하지만, 개인의 지식과 경험에 전적으로 의존하기 때문에 취약성 분석결과의 객관성과 정확성에 큰 제약이

있을 수밖에 없다. 판단적 취약성 분석의 예는 ATC-13(1985)과 HAZUS(1995)의 취약성 곡선 등이 있다.

해석에 의한 취약성 평가는 구조해석 결과로부터 도출된 응답분포를 이용하는데, 이것은 구조물의 수치 해석 모델에 일련의 지진하중을 가해서 얻어진 결과이다. 해석에 의한 방법 앞에서 언급한 지진피해의 관찰이나 전문가 의견에 의한 방법과 비교하여 분석과정에 편견이 개입될 여지가 감소하므로 다양한 구조물에 대한 취약성 평가의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 이러한 취약성 분석에는 모델링 오차를 감소시키기 위해 상세한 해석모델을 사용하거나(Singhal and Kiremidjian, 1998; Chryssanthopoulos *et al.*, 2000; Celik and Ellingwood, 2009), 분석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 단순화된 해석모델을 채택하기도 한다(Jeong and Elnashai, 2007; Calvi, 1999; Shinozuka *et al.*, 2000).

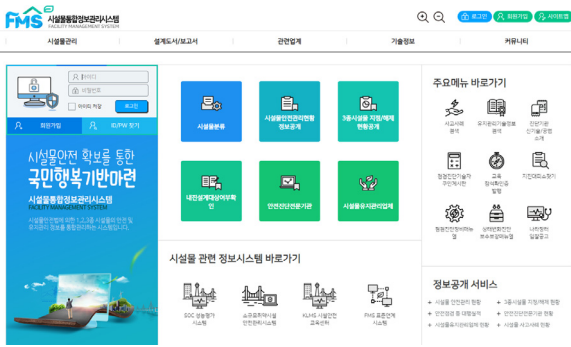
복합적 취약성 분석은 경험적 방법의 데이터 부족, 판단적 방법의 주관성, 해석적 방법의 모델링의 불확실성을 상호 보완하기 위해 고안되었다. 그 예로는 ATC-14(1987)과 ATC-40(1996)의 취약성 분석 방법들이 있다. 이들 참고문헌에서 알 수 있듯이 현실적으로는 복합적 취약성 분석이 판단적 방법에 바탕을 두고 제한적으로 지진 후 수집된 피해 데이터를 추가하는 정도에 그치고 있어, 여러 가지 취약성 분석방법의 단점을 상호 보완하는 단계에 이르지 못하고 있는 실정이다.

경험적 취약성 분석 방법의 데이터 부족과 확장성의 결여, 판단적 취약성 분석 방법의 주관성 등의 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 해석적 취약성 분석 방법을 채택한다.

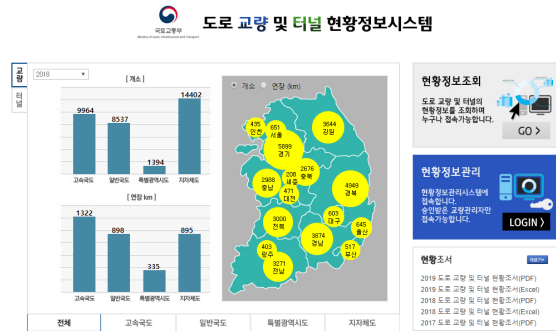
### 2.2 대표 교량의 제원 결정

국내 실정을 고려한 RC교량의 지진취약도 분석을 위해 국내에서 실제로 이용 중인 교량의 제원을 파악하고 이를 토대로 해석에 이용하는 대표 교량을 선정할 필요가 있다. 국내에서 이용하는 RC교량의 제원을 통계적으로 분석하기 위해서 ‘FMS(시설물 통합 정보 시스템)’와 국토교통부에서 제공하는 ‘2018년 도로 교량 및 터널 현황조사’를 이용하여 교량 모델링에 필요한 각 요소의 최빈값을 추정하여 분류를 하였다(Fig. 1).

FMS란 국가에서 주요 도로 시설물의 안전과 유지관리를 관리하기 위해 정보체계를 구축하여 시설물의 정보 등을 종합하여 관리하는 시스템을 말한다. 이때 연구 대상인 도로 교량은 1~3층이 포함되어 있으며, 3층 교량의 경우 국내에서 많은 양을 차지하고 현재 FMS 상에서는 2018년에 조사가 시작되었기 때문에 2019년인 지금도 계속해서 추가가 되고 있는 상황이다. 이 중 특수교에 해당하는 현수교, 사장교, 아치교, 트러스교는 제외하여 수치를 통계 내었다.



(a) FMS(facility management system)



(b) Year 2018 bridges and tunnel statistics

Fig. 1 Sources for the investigation of bridge specifications in Korea

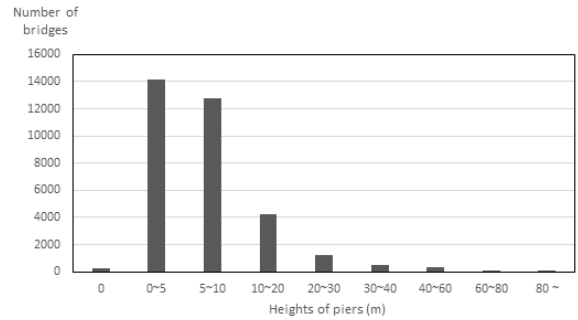
RC교량의 대표모델 선정을 위해서 FMS에서 분류한 RC 교량의 수는 약 10,000개의 제원 정보를 토대로 분류를 진행하였다. 지진취약도 해석에 이용하는 교량 모델링을 하기 위해서 필요한 요소에는 상부구조 형식, 상부구조의 연속성, 교고, 경간장, 차폭, 경간수가 있다. 이때 상부구조의 연속성의 경우 해당 자료상에 나와 있지 않은 정보이지만 2000년을 기준으로 이후에 지어진 교량은 대부분 연속교라고 가정하고 교량의 준공연도를 이용하여 교량의 연속성을 판단하였다. 각 요소에 대한 통계분류 결과가 Fig. 2에 나타나 있다.

### 2.3 해석모델

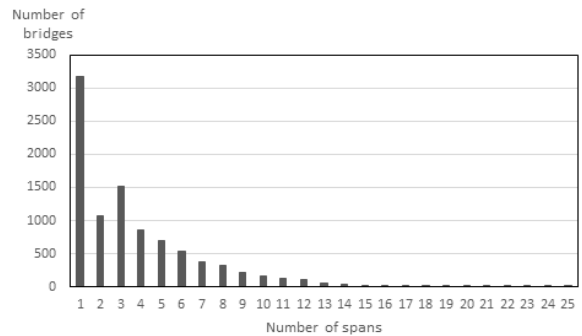
#### 2.3.1 비선형 해석을 위한 모델링 기본가정

위에서 분류한 FMS 자료를 토대로 각 요소에서의 최빈값을 설정하여 RC교량의 대표 모델을 선정을 하였다. 대표 교량의 총 연장은 45.0m로 15.0m의 경간 3개로 이루어져 있는 연속교이다. 차폭은 8.0m이며, 교각의 높이는 5.0m이다. 교각의 단면은 지름 2.0m의 원형이며, 배근은 40개의 D25 철근이 1단으로 구성되어 있다. 고무 탄성받침 교좌장치가 각 교각과 교대에 설치되어 있다. 대표 교량의 형태와 교각에 대한 정보는 각각 Fig. 3와 Fig. 4에 나타나 있다.

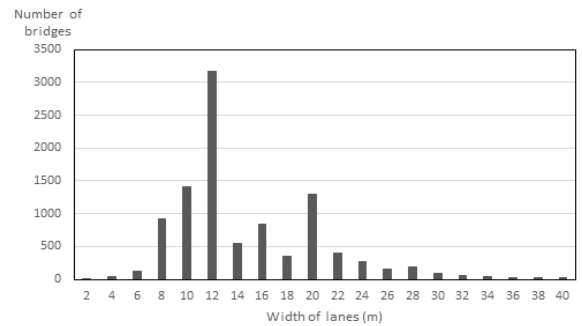
지진응답에 의한 비탄성 거동은 교각과 교좌장치에 집중되는



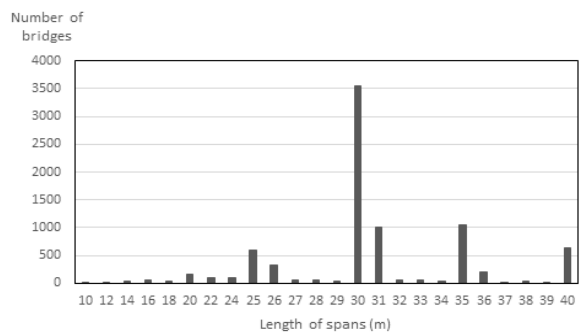
(a) Statistics on the heights of piers



(b) Statistics on the number of spans



(c) Statistics on the width of lanes



(d) Statistics on the length of spans

Fig. 2 Statistical analysis on the specification of RC bridges in Korea

것으로 가정하여, 상부구조는 탄성 보-기둥 요소(elastic beam-column elements)로, 교각 코핑은 강체 요소(rigid beam elements)로 모델링하였다. 상부구조는 상판과 RC 주형보의 합성단면으로 주축의 단면2차모멘트와 비틀림 상수를 계산

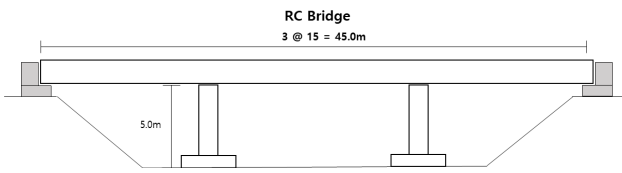


Fig. 3 Basic layout of the representative bridge

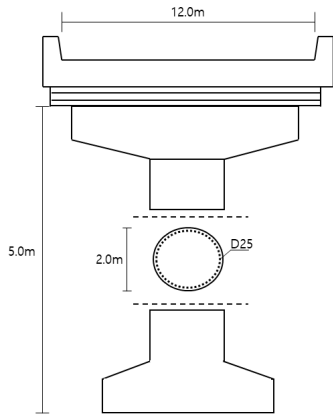


Fig. 4 Pier of the representative bridge

하여 등가 단일 단면 요소로 치환하여 사용하였다. 또한 교각에 전달되는 상부구조의 하중은 등가절점하중으로 치환하여 각 교각에 전달되도록 모델링을 하였다. 일반적으로 상부구조는 지진응답에서 탄성범위이므로 상부구조의 모델링 상세가 지진 해석의 결과에 영향을 주지 않는 경우가 많다.

본 연구에서는 구조물의 비선형 동적해석을 수행하기 위해 OpenSees 프로그램(Mazzoni *et al.*, 2005)을 이용하였다. 교각은 원형단면 섬유 요소(circular fiber elements)를 이용하여 콘크리트와 철근의 강도, 부재의 단면 치수에 따른 비탄성 거동을 확인할 수 있도록 모델링하였다. 대표 모델의 교각은 높이 5.0m의 원형단면에 지름 2.0m의 단주로 이루어져 있다. 축방향 철근, 비구속 콘크리트, 구속 콘크리트의 재료를 분리하여 각각의 물성치를 입력하여 사용하였다. 이때 콘크리트의 피복 두께는 0.1m이며 교각의 횡방향과 축방향 철근의 항복 강도는 300.0MPa이고 콘크리트의 압축강도는 24.0MPa이다. 해석을 위해 원형 화이버 단면을 20개의 단면으로 분할을 하여 교각의 비선형 해석을 진행할 수 있도록 고려하였고 교각과 기초는 말뚝기초로 이루어져 있어 교각 하부 지점의 경계조건을 고정단으로 설정하였다.

교좌 장치의 모델링에는 스프링 요소(zero length spring elements)를 사용하였으며, 탄성 고무받침을 선형 스프링 요소로 모델링하였다. 각 교대와 교각에는 교좌장치가 2개씩 배치된다. 교량 상판의 상재하중과 중력하중은 각 교각과 교대의 절점하중으로 재하하도록 하였으며, 교각에는 6MN, 교대에 3MN의 절점하중을 입력 하였다. 탄성 고무받침은 주로 열팽창에 의한 변위에 대응하기 위해 사용되며, 본 연구에서 사용된

Table 1 Specification of the elastometric bearing

Reference	Abutment	Pier
Load capacity (kN)	3,000.0	6,000.0
Maximum displacement (mm)	60.0	126.0
Axial stiffness $K_v$ (kN/m)	1,069,176.0	2,143,564.4
Shear stiffness $K_h$ (kN/m)	3,033.0	5,370.0

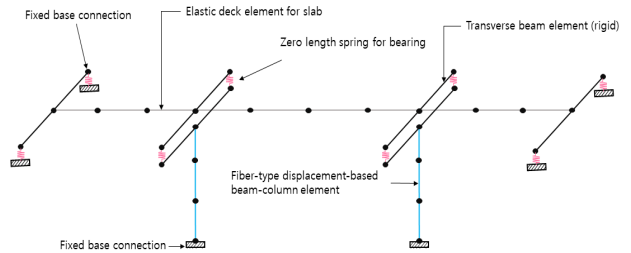


Fig. 5 Inelastic model of the representative bridge

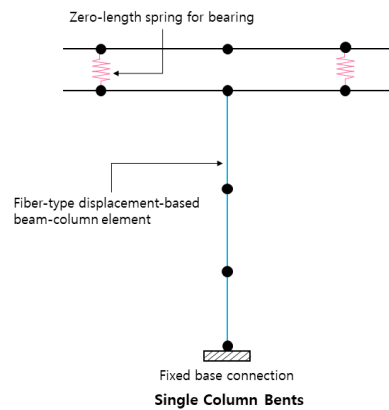


Fig. 6 Modeling of the pier and bearings

적층 고무 받침의 모델링 파라미터는 Table 1에 정리되어 있다. 모델의 경계조건은 교대와 상부구조에 대해서 교좌장치와 지반을 힌지로 연결을 하였으며, 교각과 지반은 말뚝기초로 가정을 하여 고정단으로 모델링하였다. 해석 모델의 구성에 대한 상기 설명은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있다.

## 2.4 시간이력해석 수행

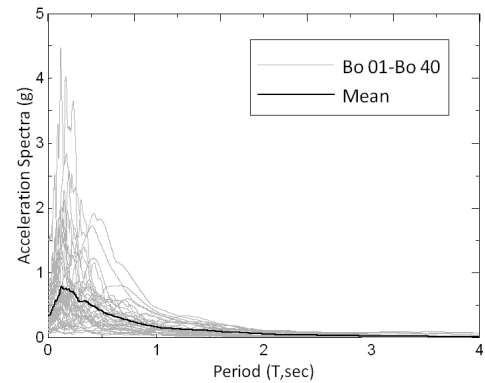
해석에 사용한 지진은 SAC Steel Project에서 사용된 지진 기록 중 Table 2에 나타난 40개의 지진을 사용하였고 사용된 지진기록의 가속도 응답스펙트럼과 변위 응답스펙트럼을 각각 Fig. 7(a)와 (b)에 나타내었다.

일반적으로 지진해석 시 교량 구조물의 파괴형상은 대부분 교축 직각방향으로의 비탄성 거동에 의해 발생하므로 본 연구에서는 교축 직각방향의 횡방향 거동에 대해서만 고려하였다. 비선형해석 결과에 사용한 지진하중은 Fig. 8(a)와 같이 나오는

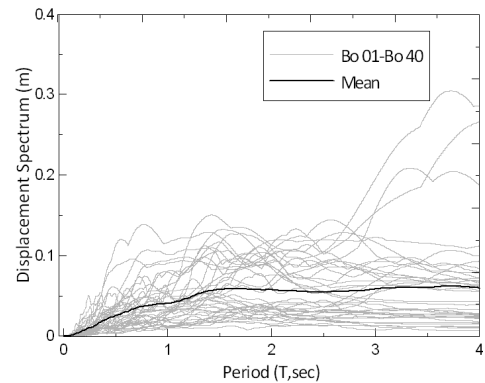
Table 2 Strong motion records

SAC name	Record	Magnitude $M_N$	Distance (Km)	PGA (m/s <sup>2</sup> )
BO01	Simulation, hanging wall	6.5	30	1.22
BO02	Simulation, hanging wal	6.5	30	0.73
BO03	Simulation, foot wall	6.5	30	1.41
BO4	Simulation, foot wall	6.5	30	1.10
BO5	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	5.65
BO6	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	3.10
BO7	Nahanni, 1985	6.9	9.6	0.86
BO8	Nahanni, 1985	6.9	9.6	0.81
BO9	Nahanni, 1985	6.9	6.1	0.59
BO10	Nahanni, 1985	6.9	6.1	0.72
BO11	Nahanni, 1985	6.9	18	1.31
BO12	Nahanni, 1985	6.9	18	1.33
BO13	Saguenay, 1988	5.9	96	1.97
BO14	Saguenay, 1988	5.9	96	2.84
BO15	Saguenay, 1988	5.9	98	5.14
BO16	Saguenay, 1988	5.9	98	2.44
BO17	Saguenay, 1988	5.9	118	1.79
BO18	Saguenay, 1988	5.9	118	2.23
BO19	Saguenay, 1988	5.9	132	1.73
BO20	Saguenay, 1988	5.9	132	2.67
BO21	Simulation, foot wall	6.5	30	3.10
BO22	Simulation, foot wall	6.5	30	3.57
BO23	Simulation, foot wall	6.5	30	3.29
BO24	Simulation, foot wall	6.5	30	2.35
BO25	Simulation, foot wall	6.5	30	2.84
BO26	Simulation, foot wall	6.5	30	3.03
BO27	Nahanni, 1985 Station 1	6.9	9.6	2.47
BO28	Nahanni, 1985 Station 1	6.9	9.6	2.32
BO29	Nahanni, 1985 Station 2	6.9	6.1	1.70
BO30	Nahanni, 1985 Station 2	6.9	6.1	2.07
BO31	Nahanni, 1985 Station 3	6.9	18	3.74
BO32	Nahanni, 1985 Station 3	6.9	18	3.81
BO33	Saguenay, 1988	5.9	96	5.62
BO34	Saguenay, 1988	5.9	96	7.68
BO35	Saguenay, 1988	5.9	98	14.75
BO36	Saguenay, 1988	5.9	98	7.00
BO37	Saguenay, 1988	5.9	118	5.14
BO38	Saguenay, 1988	5.9	118	6.39
BO39	Saguenay, 1988	5.9	132	4.96
BO40	Saguenay, 1988	5.9	132	7.66

것을 확인할 수 있으며, 비선형 동적 해석 결과 도출된 교각의 높이에 대한 상부구조의 변위비(Fig. 8(b))의 최대값을 응답 지표로 하였다. 40개의 지진파에 대한 응답지표에 대한 통계 분석을 위해서 교량의 최대 응답이 로그정규분포를 따른다고 가정하였다. 따라서, Fig. 9와 같이 최대지반가속도와 최대변위비의 상관관계를 로그-로그 스케일에서 선형 회귀분석을 통하여 파악하였다.

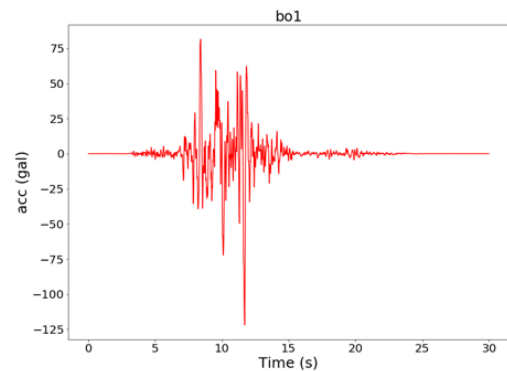


(a) Acceleration response spectra

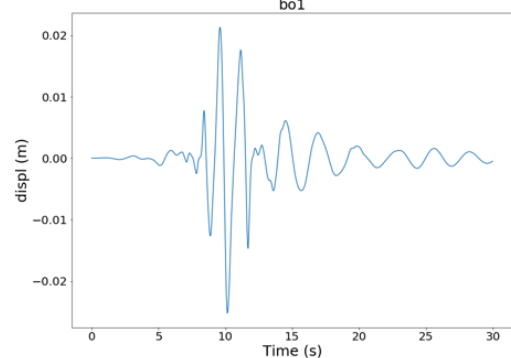


(b) Displacement response spectra

Fig. 7 Response spectra of the input records



(a) Acceleration time history of the record bo1



(b) Displacement response history of the top of the pier

Fig. 8 Input record and response history from a dynamic response history analysis

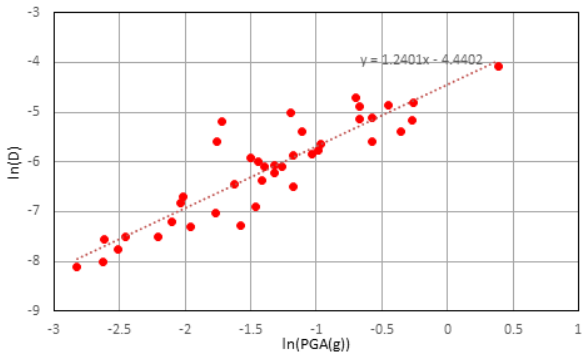


Fig. 9 Response statistics on the dynamic analyses

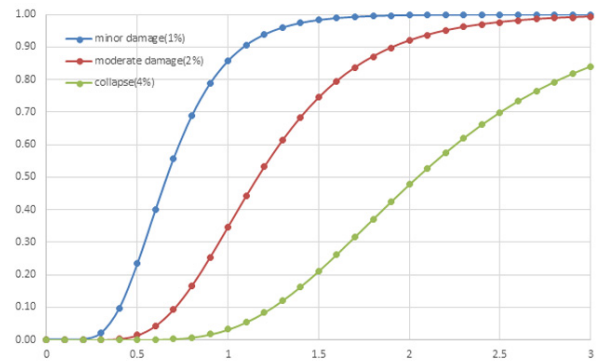


Fig. 10 Fragility curves of the representative RC bridge

### 2.5 교량의 한계상태 정의

지진취약도 분석을 위해서는 교량의 구조요소별로 손상상태의 정의가 매우 중요하다. 손상상태의 정의가 실제 구조물의 손상 상황과 큰 차이가 난다면, 해석과정의 다른 인자들을 정확하고 상세하게 해석하고 반영하였다 하더라도 지진취약도를 적절히 나타낼 수 없다. 손상상태는 실험이나 해석을 통하여 구할 수 있으며 구조요소의 손상을 적절히 나타낼 수 있는 응답을 손상상태의 지표로 사용하는 것이 일반적이다. 손상상태는 구조물의 손상정도를 정량적으로 평가하는 지표로서 각 구조요소에 대하여 변위연성도, 회전연성도, 곡률연성도, 분산된 에너지 등 각 손상상태의 정의에 따라 구분한다.

많은 연구자들이 명확한 손상상태를 정의하기 위해 연구하고 여러 손상상태 정의법을 제안하고 있으나 아직 대부분의 경우에 합리적으로 적용할 수 있는 명확한 손상상태 정의법이 없는 실정이다(Kim and Song, 2010). 이번 RC예제 교량의 지진취약도 분석은 표준 방법 도출의 예제로 사용할 수 있도록 가장 간단한 손상도 정의를 사용하기로 하였다. 이는 교각 상단의 변위를 교각의 높이로 나눈 변위비에 따라 각각 minor damage (1%), moderate damage(2%), collapse(4%)로 분류하고, 교각의 변위를 모니터링 하여 취약도 분석을 수행하였다.

### 2.6 취약도 분석

교량의 취약부로 설정된 교각(13m)에 대해서 응답 분석을 진행하였으며, 이를 바탕으로 도출된 철근콘크리트(RC) 대표 교량에 대한 지진취약도 곡선이 Fig. 10에 나타나 있다.

노후도를 고려한 교량의 지진취약성 곡선을 유도하기 위해, 고무 탄성받침의 노후화를 고려하였고, 노후화가 진행됨에 따라 초기 강성에 노후 Factor 1.3을 반영하였다. 강성의 증가로 인해 교좌장치에 변위용량은 노화 전의 교좌장치보다 줄었으며, 교좌장치에 걸리는 지진 하중의 부담이 더 커지게 된다. Fig.

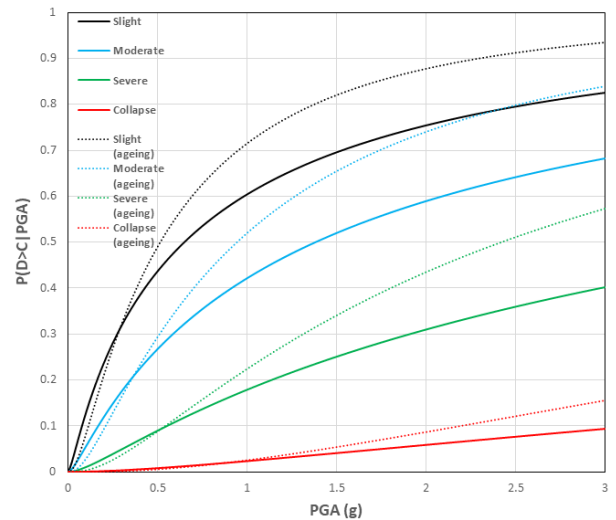


Fig. 11 Fragility curves of the representative RC bridge

11은 탄성 고무받침의 노후화에 따른 지진취약도 곡선의 변화이다. 탄성 고무받침의 경우 노후화가 고려되었을 때 전체적으로 지진취약도 곡선이 가파르게 변화하며, 그 차이는 지진하중의 세기가 커질수록 더 벌어진다. 지진의 세기가 0.5g까지는 지진취약도 곡선에 차이가 없다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 국내 실정을 고려한 RC교량의 지진취약도 분석을 위해 국내에서 실제로 이용 중인 교량의 제원을 파악하고 이를 토대로 해석에 이용하는 대표 교량을 선정하였다. RC교량의 대표모델 선정에 위해서 FMS에서 분류한 RC교량의 수는 약 10,000개의 제원 정보를 토대로 분류를 진행하였으며, 상부 구조 형식, 상부구조의 연속성, 교고, 경간장, 차폭, 경간수를 고려한 대표모델을 선정하였다. 경험적 취약성 분석 방법의 데이터 부족과 확장성의 결여, 판단적 취약성 분석 방법의 주관성 등의 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 해석적 취약성 분석 방법을 채택하였으며, 교량의 취약부로 설정된 교각

(13m)에 대해서 응답 분석을 진행하다. 고무 탄성받침의 노후화는 지진하중의 세기가 약할 때는 거의 노후화 전과 차이가 없지만 하중의 세기가 커질수록 교각의 지진취약도에 영향을 미친다고 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-B146946-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

- ATC-13** (1985) Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC-14** (1987) *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC-40** (1996) *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Calvi, G.M.** (1999) A Displacement-based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings, *J. Earthq. Eng.*, 3(3), pp.411~438.
- Celik, O.C., Ellingwood, B.R.** (2009) Seismic Risk Assessment of Gravity Load Designed Reinforced Concrete Frames Subjected to Mid-America Ground Motions, *J. Struct. Eng., ASCE*, 135(4), pp.414~424.
- Chryssanthopoulos, M.K., Dymiotis, C., Kappos, A.J.** (2000) Probabilistic Evaluation of behaviour Factors in EC8-Designed R/C Frames, *Eng. Struct.*, 22(8), pp.1028~1041.
- HAZUS** (1995) *National Institute of Building Sciences, Development of a Standardized Earthquake Loss Estimation Methodology*, FEMA, Washington, DC.
- Jeong, S.H., Elnashai, A.S.** (2007) Probabilistic Fragility Analysis Parameterized by Fundamental Response Quantities, *Eng. Struct.*, 29(6), pp.1238~1251.
- Kim, H.S., Song, J.K.** (2010) Effect of Near- and Far-Fault Earthquakes for Seismic Fragility Curves of PSC Box Girder Bridges, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 14(5), pp.53~64.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L.** (2005) *OpenSees Command Language Manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
- Rossetto, T., Elnashai, A.S.** (2003) Derivation of Vulnerability Functions for European-type RC Structures based on Observational Data, *Eng. Struct.*, 25(10), pp.1241~1263.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H-K., Kim, S-H.** (2000) Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development, *J. Eng. Mech., ASCE*, 126(12), pp.1287~1295.
- Singhal, A., Kiremidjian, A.S.** (1998) Bayesian Updating of Fragilities with Application to RC Frames, *J. Struct. Eng., ASCE*, 124(8), pp.922~929.

### 요 지

본 논문에서는 OpenSees 프로그램을 이용한 콘크리트 교량의 지진취약성 분석 방법에 대한 고찰을 제시한다. 교각 및 휨 부재 분산 비선형(distributed plasticity) 요소를 적용한 해석모델을 활용하여 지진에 대한 응답을 구하고 이를 통계적으로 처리하여 확률론적 지진취약성 분석을 수행한다. 응답 통계는 세기가 같은 지진파의 집단을 단계별로 scaling하는 stripe 방법과 다양한 세기를 가진 지진파 집단을 선정하는 cloud 방법을 적용하고 이 두 방법에 의한 분석결과의 차이를 비교한다. 한계 상태에는 교각의 휨변형과 교좌장치의 변위를 기준으로 산정한 다단계 한계상태를 적용하고, 여러 가지 한계상태를 취합한 시스템 취약성을 도출한다. 지진응답의 통계적 처리 방법과 교량의 손상 정의가 지진취약성 곡선에 주는 영향을 고찰한다.

**핵심용어** : 지진취약성, 콘크리트 교량, OpenSees, 분산 비선형