

지진위험도평가 방법을 통한 교량의 내진성능 추정 서비스 개발

조한민*·이진혁**·박기태***·김진수****·정규산*****·김재환*****

Cho, Han Min*, Lee, Jin Hyuk**, Park, Ki Tae***, Kim, Kun Soo****, Jung, Kyu San*****, Kim, Jae Hwan*****

Development of Seismic Performance Estimation Service of Bridge through Seismic Risk Assessment

ABSTRACT

In order to understand the seismic performance of a bridge, it is common to review through seismic performance evaluation and numerical analysis of the target bridge. Seismic performance evaluation and review through numerical analysis are analysis methods for specific target bridges, and many problems can arise in each management body managing bridges nationwide. Therefore, in this study, research was conducted to estimate the seismic performance of public bridges with various types and characteristics. Seismic performance was estimated by applying the seismic risk assessment method, calculating the seismic fragility curve for the type and specifications of the bridge, and estimating the seismic performance of the bridge in use by applying the domestic seismic design standard. In addition, by installing it on the platform, service items were established so that users can easily review the estimation of seismic performance of domestic bridges.

Keywords : Bridges, Seismic performance, Seismic fragility curve, Seismic design criteria, Platform

초 록

교량의 내진성능을 파악하기 위해서는 대상 교량에 대한 내진성능평가 및 수치해석을 통해 검토하는 것이 일반적이다. 내진성능평가 및 수치해석을 통한 검토는 특정 대상교량에 대한 분석 방법으로 전국 교량을 관리하는 각각의 관리주체에서 이를 수행하기에는 많은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 형식 및 특성을 지니고 있는 공용 교량에 대한 내진성능을 추정할 수 있도록 연구를 수행하였다. 내진성능 추정은 지진위험도평가 방법을 적용하였으며, 교량의 형식 및 제원에 대한 지진취약도 곡선을 산정하고 국내 내진설계기준을 적용하여 공용 중인 교량의 내진성능을 추정하였다. 또한 이를 플랫폼에 탑재하여 사용자가 국내 교량에 대한 내진성능 추정을 간편하게 검토할 수 있도록 서비스 항목을 구축하였다.

검색어 : 교량, 내진성능, 지진취약도 곡선, 내진설계 기준, 플랫폼

* 정회원·교신저자·한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원 (Corresponding Author·KICT·chohm@kict.re.kr)

** 정회원·한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원 (KICT·leejinhyuk@kict.re.kr)

*** 종신회원·한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구원 (KICT·ktpark@kict.re.kr)

**** 종신회원·한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원 (KICT·kunsookim@kict.re.kr)

***** 정회원·한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원 (KICT·jungkyusan@kict.re.kr)

***** 정회원·한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원 (KICT·jaehwankim@kict.re.kr)

Received November 24, 2022/ revised January 18, 2023/ accepted February 14, 2023

1. 서론

최근 지진은 국내 주변국의 대지진을 포함하여 전 세계적으로 빈번하게 발생하고 있다. 일본의 경우 규모 9.0의 동일본 대지진으로 사망자는 약 2만여 명이 발생하였으며, 약 240조 원의 재산피해가 발생하였다. 중국의 경우 규모 7.9의 쓰촨성 대지진으로 사망자 약 6만 5천여 명, 실종자 약 2만 3천여 명이 발생하였으며, 약 160조 원의 재산피해가 발생하였다(Cho and Hu, 2021). 또한, 우리나라와 비교적 가깝게 위치한 파푸아뉴기니에서는 지난 2022년 10월 14일 규모 6.4의 지진이 발생하였다. 우리나라의 경우 지진에 대해 안전한 국가로 인식하고 있으나 기상청 지진통계 자료에 따르면 Fig. 1과 같이 아날로그 관측(1978~1998년) 시점에는 연평균 19.1회의 지진이 발생하였으며, 디지털 관측(1999년 이후) 이후에는 연평균 70.6회의 지진이 발생한 것으로 나타났다(KMA, 2022).

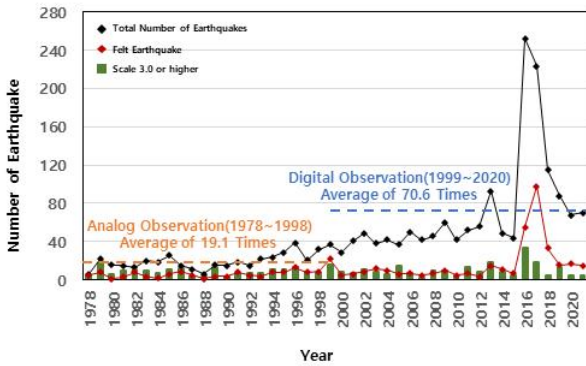


Fig. 1. Domestic Earthquake Statistical Data

Table 1. Status of Facilities in Korea

Facility	Type			Total
	1	2	3	
Bridge	5,015	7,631	20,519	33,165
Tunnel	1,914	2,259	848	5,021
Port	129	370	-	503
Dam	78	544	-	622
Building	3,289	74,046	29,180	106,515
River	585	6,303	20	6,908
Water and Sewage	545	1,739	1	2,285
Retaining wall	-	3,566	684	4,250
Cut Slope	-	4,535	1	4,536
Utility-Pipe Conduit	-	40	-	40
etc	-	-	516	516
Sum	11,555	101,037	51,769	164,361

국내 지진 발생추이는 2000년대 들어 급격히 증가하고 있으며 최근 경주 및 포항 지역에서는 규모 5.0 이상의 대지진이 발생하였다. 2016년 발생한 경주지진은 우리나라에서 발생한 최대 규모의 지진으로 134명의 인명피해와 약 110억 원의 재산피해를 발생시켰다. 또한 2017년 발생한 포항지진은 1,889명의 인명피해와 약 551억 원의 재산피해를 발생시켰다. 국내외 사례와 같이 지진은 인명피해뿐만 아닌 국가 주요기반시설에도 막대한 피해를 발생시킨다. 국내 주요기반시설의 현황은 국토안전관리원의 시설물통합관리시스템을 통해 관리되고 있으며 주요 현황은 Table 1과 같다(MOLIT, 2022b).

우리나라의 주요 시설물은 건축물, 교량, 댐, 항만 등으로 분류할 수 있으며, 특히 교량의 경우 33,165개소로 집계되고 있다. 교량은 Fig. 2와 같이 건축물을 제외한 국가 주요기반시설 중 57%로 가장 많은 비중을 차지하고 있지만 상시적으로 유지관리하기에는 현실적인 어려움이 있다. 국내에서는 “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침”을 통해 유지관리에 힘쓰고 있지만, 특히 교량의 내진성능평가는 정밀안전진단의 필수항목이 아닌 선택과업으로 포함되어 있다. 또한, 교량 각각의 관리주체에서는 소수의 교량이 아닌 다양한 형식 및 많은 개소수의 교량을 관리하고 있어 예산적, 시간적 문제점을 가지고 있다.

지진 발생이 빈번한 국외 국가에서는 지진 발생에 의한 피해를 예측하기 위해 지진위험도평가 방법을 활용하고 있다. 대표적으로 미국의 HAZUS, 일본의 DIS(Disaster Information System), 대만의 HAZ-Taiwan이 있으며, 지진피해에 대한 예측 및 보수보강에 대한 대응방안을 수립하고 있다. 국내의 경우 연구단 중심으로 국내 지진취약도 함수에 대한 연구가 다양하게 이루어졌다(NDMRI, 2007; MOLIT, 2022a). 반면 지진취약도 함수에 대한 선행연구는 실제 교량 관리주체의 담당자가 직접 활용하여 교량의 유지관리를 판단하기에는 전문가적 요소가 부족하여 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 나타내는 바와 같이 교량의 형식 및 제원에 따라 지진취약도 함수를 분류하고

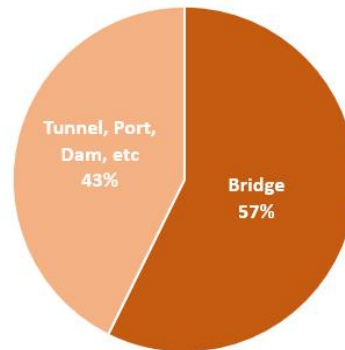


Fig. 2. Status of Facilities Ratio in Korea

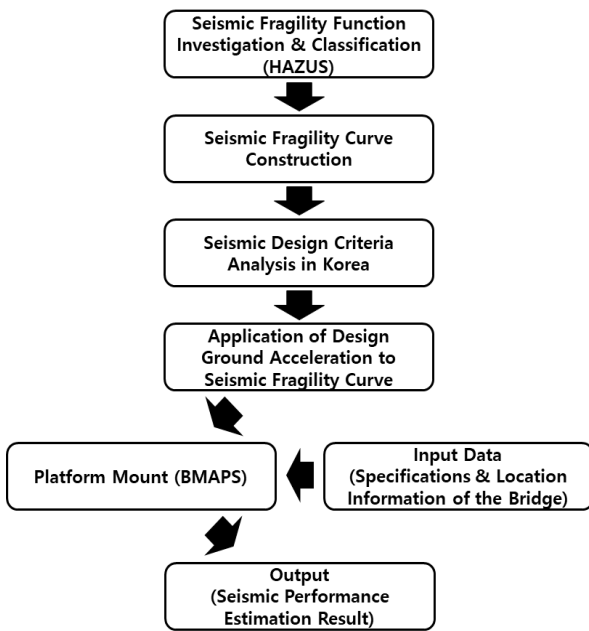


Fig. 3. Flow Chart of Research

있는 미국의 HAZUS와 국내 내진설계기준을 분석 및 활용하여 교량의 내진성능을 추정할 수 있는 서비스를 개발하고자 한다. 또한 개발된 내진성능 추정 서비스를 플랫폼화하여 실무요자가 간편하게 사용하고, 추후 교량 유지관리 우선순위의 기초자료로 활용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 이론적 배경

지진취약도 함수는 특정 대상교량에 대한 정확한 해석을 통해 분석하는 방법과 비교적 정확도는 낮지만 쉽게 분석할 수 있는 방법으로 구분된다. 특정 대상교량에 대한 분석 방법은 교량의 제원 정보를 바탕으로 다양한 지진 데이터를 활용하여 비선형 동적해석을 수행하는 방법이다(Lee et al., 2018). 반면 비교적 쉽게 분석할 수 있는 방법은 HAZUS에서 제시하고 있는 분석 방법으로 교량의 다양한 거동특성을 반영하여 간단한 제원 정보를 토대로 분석하는 방법이다.

지진취약도 함수는 Eq (1)과 같이 나타낼 수 있으며 지진 수준에 대해 손상이 발생할 확률을 나타낸다(Shinozuka et al., 2020).

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (1)$$

여기서, a 는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 나타내며, $\Phi[]$ 는 표준정규분포함수, c 와 ζ 는 표준

정규분포함수의 중앙값과 표준편차를 나타낸다.

국내에서는 지진 발생으로 인한 교량의 실제 손상 데이터를 확보하는데 어려움이 있기 때문에 수치해석을 통해 지진취약도 함수를 도출하고 있다. 그러나 수치해석 방법은 특정 대상교량에 대한 결과를 도출하기 때문에 국내에서 공용 중인 다양한 형식의 교량에 대한 적용이 어렵다. 또한, 비선형 동적해석을 수행해야 하기 때문에 많은 시간이 소요된다(Kim et al., 2004; Song et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 HAZUS의 간편한 방법을 활용하여 지진취약도 곡선을 산출하고 내진성능 추정에 적용하였다. HAZUS에서 제시하고 있는 교량의 분류는 NBI(National Bridge Inventory) 체계에 따라 상부구조형식 및 재료특성 등을 고려하여 총 28개 형식으로 분류하고 있으며, 교량의 손상별 지진취약도 함수를 중앙값 및 표준편차로 제시하고 있다. 교량의 손상별 등급은 경미한 손상, 보통 손상, 심각한 손상, 붕괴로 분류하고 있다(FEMA, 2020).

3. 연구방법

3.1 지진취약도 곡선 작성

이론적 배경에서 언급한 바와 같이 HAZUS에서 제시하고 있는 교량 형식별 분류는 총 28개이다. 교량 형식별 분류 항목으로는 내진설계 여부, 경간장의 길이, 경간 구성, 교각 형태, 거더의 형상 및 재료특성, 거더의 연속성이 있으며, 교량 손상에 대한 지진취약도 함수의 중앙값 및 표준편차를 제시하고 있다. 또한 지진취약도 곡선에 영향을 미치는 지반 손상함수도 제시되어 있으며, 지반진동 및 지반붕괴에 대해 정의하고 있다(FEMA, 2020). 본 연구에서는 지진발생 시 지반붕괴를 고려하지 않고 지반진동에 의한 손상을 고려하였다. 지진취약도 함수를 바탕으로 최대지반가속도별 지진취약도 곡선을 Fig 4와 같이 작도하였으며, HAZUS에서 제시하고 있는 최대지반가속도는 20 g로 나타나지만 국내 지진 발생규모를 고려하여 1.0 g까지 작도하였다.

Fig 4에서 작도된 지진취약도 곡선의 y축은 누적 손상확률이며, x축은 지반가속도를 의미한다. 지진취약도 곡선은 지진 발생에 의한 각각의 손상확률을 모두 포함하고 있다. 임의의 지반가속도 발생 시 교량에서 발생할 수 있는 무손상, 경미한 손상, 보통 손상, 심각한 손상, 붕괴의 손상확률을 누적한 것이다. 각각의 교량을 살펴보면 형식별 분류에 따라 동일한 지반가속도가 작용하더라도 발생할 수 있는 손상 확률이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.2 국내 내진설계기준 분석

지진취약도 곡선에 대한 국내 교량의 내진설계기준을 적용하기 위하여 한국건설기술연구원에서 운영 중인 국가건설기준센터의

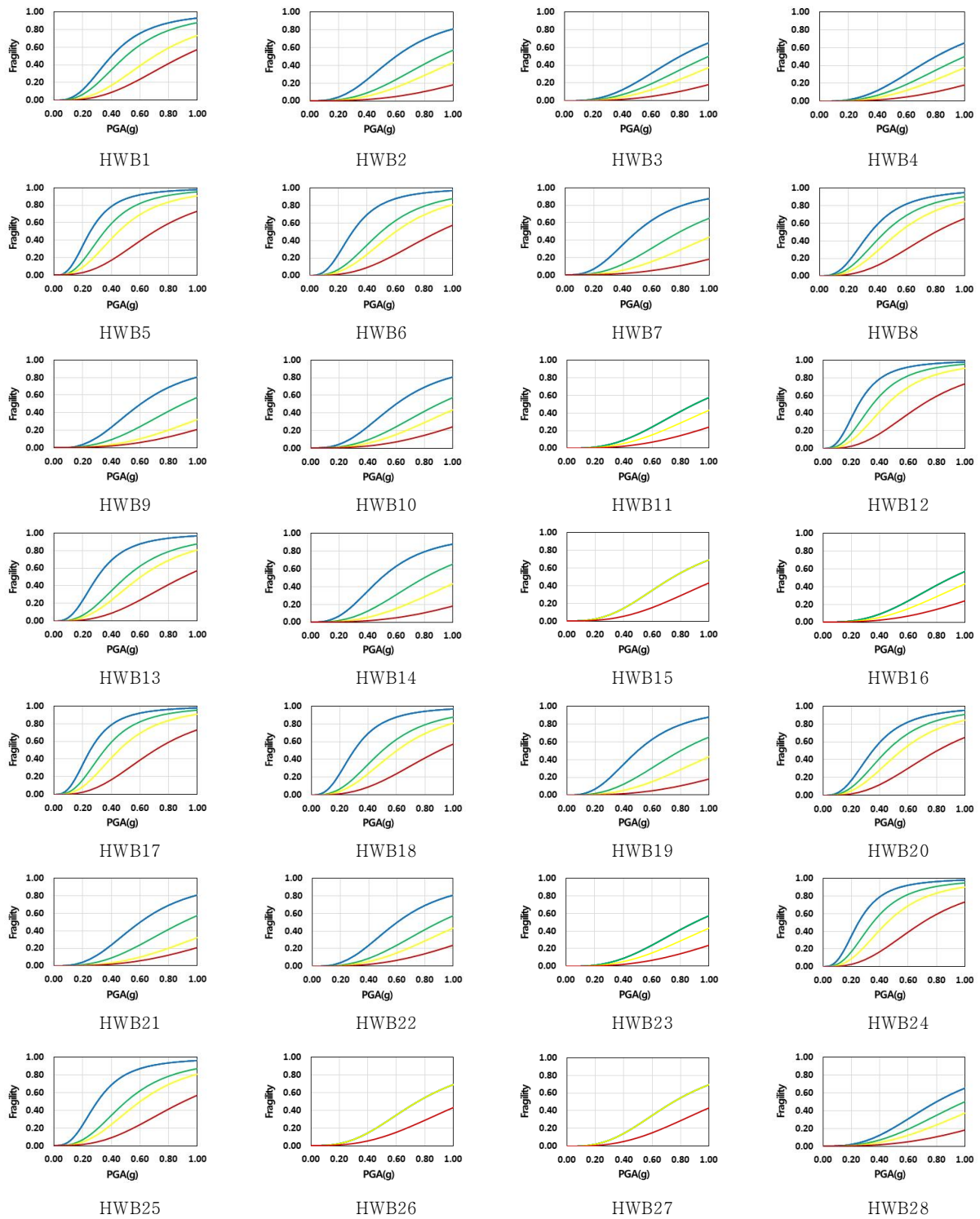


Fig. 4. Fragility Curve of Highway Bridge: HWB1~28

“내진설계 일반”편을 사용하였다. 국내 교량의 내진설계 적용을 위해서는 먼저 설계지반가속도를 산정해야 한다. 국내 교량은 지진

이라는 복잡한 특성을 단순화하여 설계지반가속도(PGA)로 설계 및 해석하는 것이 일반적이다(Seo et al, 2010). 국내 내진설계기준

을 살펴보면 지반의 종류 및 감쇠비 등을 통해 응답스펙트럼을 지진가속도로 산출할 수 있지만 본 연구에서 대상이 되는 교량은 전국에서 공용 중인 불특정 다수의 교량으로 각각의 상태를 고려할 수 없어 행정구역 및 평균 재현주기를 통한 방법을 활용하였다. 설계지반가속도는 Eq. (2)의 식을 통해 구할 수 있다(MOLIT, 2018).

$$S = Z \times I \tag{2}$$

여기서 S 는 설계지반가속도, Z 는 지진구역계수, I 는 위험도계수를 나타낸다. 먼저 지진구역계수는 국내 행정구역에 따라 지진구역 I 과 지진구역 II로 분류된다. 지진구역 I 은 서울시, 인천시, 대전시, 부산시, 대구시, 울산시, 광주시, 세종시, 경기도, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도, 강원도 남부에 해당하며 0.11의 계수를 갖는다. 지진구역 II는 강원도 북부, 제주시에 해당하며 0.07의 계수를 갖는다. 위험도계수는 교량의 설계 당시 해당지진에 저항할 수 있는 평균 재현주기를 토대로 산정된다. 평균 재현주기는 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,400, 4,800년으로 분류하고 있으며 각각의 계수값은 0.40, 0.57, 0.73, 1.00, 1.40, 2.00, 2.60이다. 이때 위험도계수는 특정 교량 대상이 아닌 교량의 중요도 등급에 따라 분류된다. 교량의 등급은 크게 내진특등급, 내진 I 등급, 내진 II 등급으로 분류된다.

지진취약도 곡선에 대한 적용 및 내진성능 추정을 위해 설계지반가속도를 산정하였다. 지진구역계수의 경우 국내에서 공용 중인 교량에 대한 분석을 모두 수행할 수 있도록 두 가지 계수 모두를 사용하였으며, 위험도계수의 경우 내진성능목표를 붕괴방지수준으로 설정하여 평균 재현주기 500, 1,000, 2,400년에 해당하는 계수를 사용하였다. 결과적으로 총 6개의 설계지반가속도를 선정하였으며, Table 2에서 나타내는 바와 같다.

Table 2. Design Ground Acceleration

Case	Design Ground Acceleration(g)	Remarks
1	0.110	Earthquake Zone I × 2nd Grade
2	0.154	Earthquake Zone I × 1st Grade
3	0.220	Earthquake Zone I × Special Grade
4	0.070	Earthquake Zone II × 2nd Grade
5	0.098	Earthquake Zone II × 1st Grade
6	0.140	Earthquake Zone II × Special Grade

3.3 지진취약도 곡선에 대한 설계지반가속도 적용 및 분석

교량 형식별 손상확률을 분석하기 위해 31절에서 작도된 지진취약도 곡선에 32절에서 선정된 국내 내진설계기준의 설계지반가속도를 적용하였다. 지진취약도 곡선과 설계지반가속도를 통해 다양한 형식의 교량에 대한 손상확률을 분석할 수 있다(Kim et al., 2019; Kim et al., 2020). 교량의 손상확률을 확인하기 위한 대표 예시로 HWB1과 HWB2에 대한 분석 내용을 수록하였다. HWB1과 HWB2의 지진취약도 곡선에 대한 설계지반가속도 적용은 Fig 5에서 나타내고 있다. Fig 5는 HWB1과 HWB2에 대해 설계지반가속도 0.22g를 적용한 것으로 전체 손상확률을 육안으로 확인해보면 내진설계가 적용된 HWB2가 HWB1에 비해 더 낮은 손상확률을 갖는 것으로 나타난다. 결과에 대한 손상확률을 면밀히 검토하기 위해 선정된 6개의 설계지반가속도를 모두 적용하여 분석을 수행하였다. Table 3과 Table 4는 각각 HWB1과 HWB2의 손상확률을 수치상으로 표현한 것이다. 두 표를 비교해보면 설계지반가속도 0.22g 발생 시 HWB1의 무손상 확률은 69.58%이며, HWB2의 무손상 확률은 91.11%로 나타나 HWB2가 동일 지진에 대해 더욱 안전한 것으로 나타난다. 또한 각각의 지진취약도 곡선은 지진 발생 규모가 증가할수록 손상확률도 증가하는 것으로 나타났다.

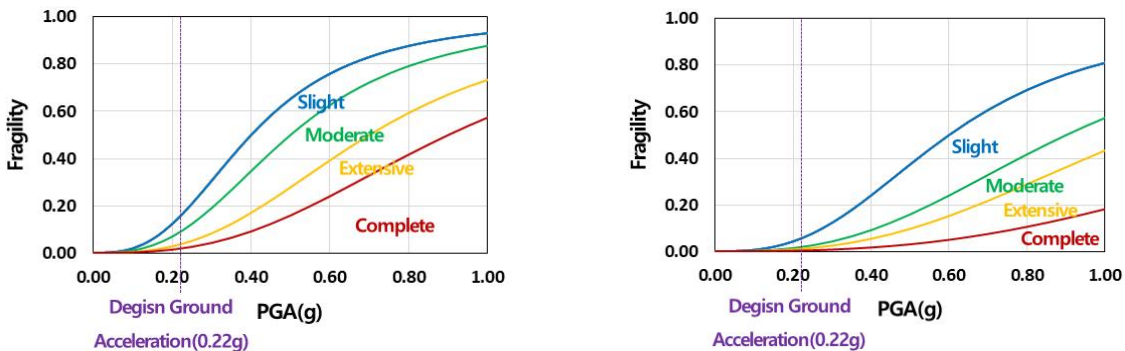


Fig. 5. Application of Design Ground Acceleration to Fragility Curve: (a) HWB1, (b) HWB2

Table 3. Damage Probability of HWB1

Fragility	Design Ground Acceleration(g)					
	0.070	0.098	0.110	0.140	0.154	0.220
Undamaged	0.9827	0.9656	0.9496	0.9055	0.8808	0.6958
Slight	0.0094	0.0186	0.0271	0.0506	0.0636	0.1574
Moderate	0.0050	0.0100	0.0147	0.0276	0.0349	0.0908
Extensive	0.0019	0.0039	0.0057	0.0109	0.0138	0.0373
Complete	0.0010	0.0019	0.0028	0.0054	0.0068	0.0187

Table 4. Damage Probability of HWB2

Fragility	Design Ground Acceleration(g)					
	0.070	0.098	0.110	0.140	0.154	0.220
Undamaged	0.9953	0.9907	0.9863	0.9740	0.9670	0.9111
Slight	0.0030	0.0060	0.0088	0.0167	0.0212	0.0564
Moderate	0.0010	0.0019	0.0028	0.0054	0.0068	0.0187
Extensive	0.0005	0.0011	0.0016	0.0030	0.0039	0.0107
Complete	0.0002	0.0003	0.0005	0.0009	0.0011	0.0031

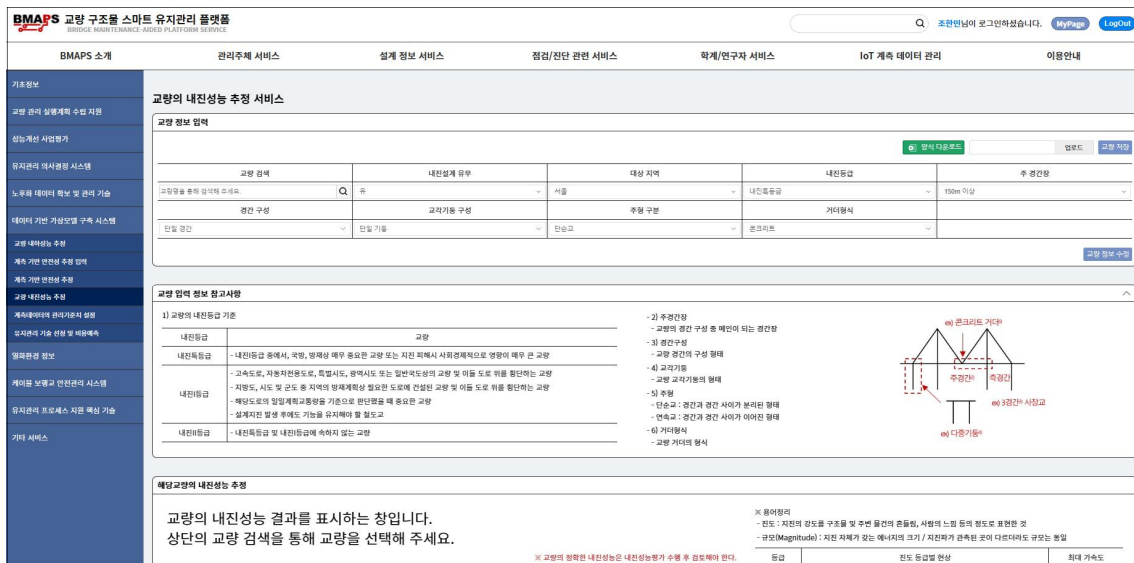


Fig. 6. Platform Construction Screen of Seismic Performance Estimation Service

Fig. 5, Table 3, Table 4에서 나타난 교량의 손상확률 분석 예시와 같이 Fig. 4의 지진취약도 곡선에 대한 손상확률을 모두 분석하여 로직화한 내진성능 추정 서비스를 개발하였다. 또한, 개발된 내진성능 추정 서비스를 Fig. 6과 같이 교량 유지관리 플랫폼에 탑재하여, 교량의 관리주체 등에서 교량 위치 및 간단한 제원의 입력을 통해 손쉽게 내진성능을 추정할 수 있도록 구현하였다.

4. 연구결과

3장의 연구내용을 바탕으로 실제 공용 중인 교량의 내진성능을 플랫폼의 내진성능 추정 서비스를 통해 도출하였다. 대상 교량은 경기도 고양시에 위치한 중소형 규모의 교량들로 Fig. 7과 Table 5에서 나타내는 바와 같다. A교량은 단경간으로 구성된 총 연장 38 m의 라멘교이고, B교량은 5경간으로 구성된 총 연장 46.1 m의



Fig. 7. Target Bridge: (a) A-Bridge, (b) B-Bridge, (c) C-Bridge, (d) D-Bridge

Table 5. Target Bridge Specifications

Division	Region	Seismic Grade	Main Span Length	Span Configuration	Pier	Girder Continuous	Girder Type
A Bridge	Gyeonggi-do	II	less than 150m	Multi	Single	Simple	Steel
B Bridge	Gyeonggi-do	II	less than 150m	Multi	Multi	Simple	PSC
C Bridge	Gyeonggi-do	II	less than 150m	Multi	Multi	Simple	Concrete
D Bridge	Gyeonggi-do	II	less than 150m	Single	Single	Continuous	Concrete

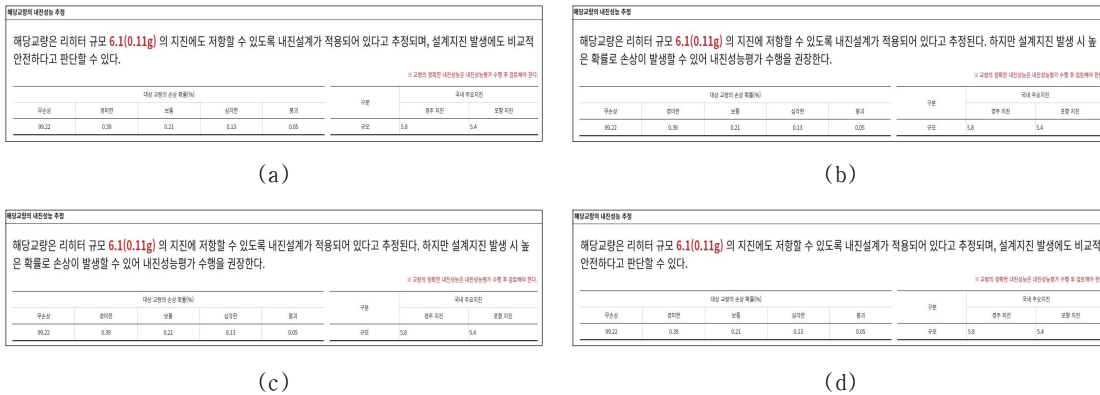


Fig. 8. Seismic Performance Estimation Result: (a) A-Bridge, (b) B-Bridge, (c) C-Bridge, (d) D-Bridge

RC슬래브 교량이다. 또한, C교량은 2경간으로 구성된 총 연장 70.3 m의 PSC 교량이고, D교량은 2경간으로 구성된 총 연장 90 m의 강박스 교량이다. 선정된 4개소의 교량을 플랫폼 상에 탑재되어 있는 내진성능 추정 서비스에 적용하면 Fig. 8과 같이 결과를 표출한다. 해당결과에는 표출되지 않지만 A교량은 HWB3, B교량은 HWB5, C교량은 HWB17, D교량은 HWB28로 분류된다. 이때의 결과를 살펴보면 모두 경기도 고양시에 위치한 교량이고 내진등급이 동일하나 B, C교량이 A, D교량에 비해 설계지반기속에 준하는 지진 발생시 보다 위험하다고 나타나며, 앞서 언급한 교량 형식별 분류에 기반한 것으로 손상확률이 보다 높게 나타난다.

해당 결과와 같이 내진성능 추정 서비스를 활용하여 전국에서 공용 중인 교량에 대해 직접적인 내진성능평가를 수행하지 않더라도 해당교량의 대략적인 내진성능을 추정할 수 있다.

5. 결론

국내에서 공용 중인 교량은 서론에서 언급한 비와 같이 사회기반 시설 중 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 교량별 다양한 형식 및 특성을 지니고 있어 개별적인 독립체로 볼 수 있다. 교량의 내진성능을 파악하기 위해서는 “시설물의 안전 및 유지관리 실시

세부지침에서 제시하고 있는 내진성능평가를 수행하거나 수치해석을 통해 단일 교량에 대한 검토를 수행해야 한다. 그러나 내진성능평가 및 수치해석 방법을 국내 교량 전체에 대해 수행하기에는 예산, 시간, 인력 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 공용 중인 교량의 대략적인 내진성능을 추정하기 위한 서비스를 개발하였으며, 내진성능 추정 서비스를 플랫폼화 하여 교량의 관리주체에서 손쉽게 활용 가능하도록 구현하였다. 연구결과를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) HAZUS에서 제시하고 있는 28개 형식의 교량에 대한 지진취약도 곡선 및 국내 내진설계 기준을 적용하여 지반기속도별 손상 확률을 분석하였다. 또한, 내진성능 추정에 대한 로직을 산정하고 플랫폼화 하여 교량의 위치정보 및 제원을 바탕으로 특정 대상교량의 내진성능을 파악할 수 있도록 내진성능 추정 서비스를 구축하였다.
- (2) 내진성능 추정 서비스에 대한 검토를 수행하기 위해 경기도 고양시에 위치한 교량 4개소를 대상으로 검토를 수행하였으며, 내진설계 기준에서 제시하고 있는 행정구역 및 내진성능에 따라 설계지반기속도가 동일하더라도 각각의 교량 형식별 다른 결과를 도출하였다. 내진성능 추정 서비스의 검토 결과와 같이 전국 공용 교량에 대한 정보의 입력만으로 국내 교량의 내진성능을 추정할 수 있을 것으로 예상된다.
- (3) 교량의 관리주체는 플랫폼을 통해 구축되어 있는 내진성능 추정 서비스를 활용하여 관리하고 있는 전체 교량에 대한 내진성능을 추정하고, 수집된 결과를 바탕으로 향후 유지관리계획 수립의 기초자료로 활용 가능할 것으로 예상된다. 또한, 관리주체가 입력한 교량의 정보 및 결과를 바탕으로 국내 교량의 내진성능 통계현황 자료를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원(주요사업) 사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230073-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발). 본 논문은 2022 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

Cho, H. M. and Hu, J. W. (2021). "Seismic performance evaluation for piloti structures of MPS seismic isolation device in response to earthquakes on the Richter Scale 7.0 - nonlinear dynamic analysis." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 41, No. 1, pp. 13-20, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2021.41.1.0013> (in Korean).

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2020). *Hazus earthquake model technical manual*.

Kim, D. J., Choi, J. H. and Kim, B. H. (2019). "Decision making of seismic performance management using seismic risk assessment." *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 23, No. 6, pp. 329-339, <https://doi.org/10.5000/EESK.2019.23.6.329> (in Korean).

Kim, D. J., Choi, J. H. and Lee, D. H. (2020). "Seismic performance management of aged road facilities using deterministic method vs. probabilistic method." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 40, No. 5, pp. 455-463, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2020.40.5.0455> (in Korean).

Kim, S. H., Kim, D. K., Seo, H. Y. and Kim, J. I. (2004). "Fragility curves of seismic retrofitted concrete bridges." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 8, No. 1, pp. 203-210 (in Korean).

Korea Meteorological Administration (KMA) (2022). *Earthquake statistics* (in Korean).

Lee, D. H., Jeong, H. D. and Kim, B. H. (2018). "Seismic fragility analysis of a RC bridge including earthquake intensity range." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 38, No. 5, pp. 635-643, <https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.5.0635> (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018). *Seismic Design Criteria*. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022a). *Development of decision supporting technology of seismic performance management for aged road facilities (bridges, tunnels, slopes, retaining walls)*.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2022b). *Facility Management System*. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (in Korean).

National Disaster Management Research Institute (NDMRI) (2007). *Development of Seismic Fragility Function for Bridge Structures in Korea* (in Korean).

Seo, H. Y., Yi, J. H., Kim, D. K. and Song, J. K. (2010). "Modified HAZUS method for seismic fragility assessment of domestic PSC-I girder bridges." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 14, No. 2, pp. 161-170, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2010.14.2.161> (in Korean).

Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. H. and Naganuma, T. (2000). "Statistical analysis of fragility curves." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 12, pp. 1224-1231, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1224)).

Song, J. K., Jin, H. S. and Lee, T. H. (2009). "Seismic fragility analysis for probabilistic performance evaluation of PSC box girder bridges." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 29, No. 2A, pp. 119-130 (in Korean).