

## 머신러닝 기반 I형 곡선 거더 단경간 교량 지진 취약도 분석

## Seismic Fragility of I-Shape Curved Steel Girder Bridge using Machine Learning Method

전준태<sup>1</sup> · 주부석<sup>2\*</sup> · 손호영<sup>3</sup>Juntai Jeon<sup>1</sup>, Bu-Seog Ju<sup>2\*</sup>, Ho-Young, Son<sup>3</sup><sup>1</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, Republic of Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea<sup>3</sup>Research Doctor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea

\*Corresponding author: Bu-Seog Ju, bju2@khu.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** Although many studies on seismic fragility analysis of general bridges have been conducted using machine learning methods, studies on curved bridge structures are insignificant. Therefore, the purpose of this study is to analyze the seismic fragility of bridges with I-shaped curved girders based on the machine learning method considering the material property and geometric uncertainties. **Method:** Material properties and pier height were considered as uncertainty parameters. Parameters were sampled using the Latin hypercube technique and time history analysis was performed considering the seismic uncertainty. Machine learning data was created by applying artificial neural network and response surface analysis method to the original data. Finally, earthquake fragility analysis was performed using original data and learning data. **Result:** Parameters were sampled using the Latin hypercube technique, and a total of 160 time history analyzes were performed considering the uncertainty of the earthquake. The analysis result and the predicted value obtained through machine learning were compared, and the coefficient of determination was compared to compare the similarity between the two values. The coefficient of determination of the response surface method was 0.737, which was relatively similar to the observed value. The seismic fragility curve also showed that the predicted value through the response surface method was similar to the observed value. **Conclusion:** In this study, when the observed value through the finite element analysis and the predicted value through the machine learning method were compared, it was found that the response surface method predicted a result similar to the observed value. However, both machine learning methods were found to underestimate the observed values.

**Keywords:** Curved Bridge, Seismic Fragility, Machine Learning, Artificial Neural Net Work, Response Surface Method

## 요약

**연구목적:** 기계학습법을 이용하여 일반적인 직선 교량의 지진 취약도 분석 연구는 다수 수행되었으나 곡선 교량 구조물에 대한 연구 사례는 미미하다. 따라서 본 연구의 목적은 기계학습법 기반 I형 곡선 거더를 갖는 교량의 재료 특성 및 기하학적 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석하는 것이다. **연구방법:** 강재 및 콘크리트의 재료 특성과 교각의 높이를 불확실성 매개변수로 고려하였다. 라틴하이퍼큐브 기법을 이용하여 매개변수를 샘플링하였으며 지진파의 불확실성을 고려하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과를 원본데이터로 인공신경망, 반응표면분석법을 적용하여 학습 데이터를 생성하였다. 최종적으로 원본 데이터 및 학습데이터를 이용하여 지진 취약도 분석을 수행하였다. **연구결과:** 라틴하이퍼큐브 기법을 이용하여 매개변수를 샘플링하였으며 지진파의 불확실성을 고려하여 총 160회의 시간

Received | 29 November, 2022

Revised | 19 December, 2022

Accepted | 21 December, 2022

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

이력해석을 수행하였다. 해석결과와 기계학습을 통해 얻어진 예측 값을 비교하였으며 두 값의 유사도를 비교하기 위해 결정계수를 비교하였다. 반응표면분석법의 결정계수가 0.737로 비교적 관측 값과 유사한 것으로 나타났다. 지진 취약도 곡선도 반응표면 분석법을 통해 예측된 값이 관측 값과 유사한 것으로 나타났다. 결론: 본 연구에서 유한요소 해석을 통해 관측된 값과 기계학습법을 통해 예측된 값을 비교하였을 때 반응표면 분석법이 관측값과 유사한 결과를 예측하는 것으로 나타났다. 하지만 두 가지 기계학습법 모두 관측 값에 비해 과소평가되는 것으로 나타났다.

**핵심용어:** 곡선교량, 지진 취약도, 기계학습법, 인공지능망, 반응표면분석법

## 서론

물류와 인적자원의 빠른 이동을 위해 교량은 필수적인 요소이며 도시와 도시를 잇는 중요한 역할을 한다. 특히 우리나라와 같이 많은 하천과 산악지형이 있는 경우 다양한 교량이 설치된다. 교량과 같은 대형 사회기반시설물은 지진과 같은 자연재해에 빈번히 노출된다. 지진으로 인한 교량의 손상은 교통 시스템의 마비로 이어질 수 있으며 피해복구 및 구조활동 등이 지연될 수 있다(Tanaka et al., 2000). 따라서 지진 하중을 받는 교량의 안전성 평가에 대한 관심이 높아졌다. 지진은 주기, 최대지반가속도(PGA), fault rupture 등의 불확실성이 내포되어 있어 이를 고려한 확률론적 안전성 평가를 통해 지진 취약성을 분석하는 것이 일반적인 접근방법이다. 따라서 다양한 연구자들에 의해 비선형 시간이력 해석 기반으로 교량의 지진 취약도 분석이 수행되었다(Karim et al., 2003; Choi et al., 2004; Nielson et al., 2007; Kwon et al., 2010). 그 외에 보강된 교량의 지진 취약도 분석에 관한 연구들이 수행되었으며(Padgett et al., 2008; Agrawal et al., 2012; Billah et al., 2013; Stefanidou et al., 2013) 교량의 노후화를 고려한 지진 취약도 분석에 관한 연구도 수행되었다(Choe et al., 2009; Simon et al., 2010; Sung et al., 2011; Ghosh et al., 2012).

지형적 특성으로 인해 교량은 종종 곡선으로 설치되는 경우가 있으며 미국에서 건설된 강재 교량의 1/3 이상이 곡선형으로 보고되었다(Davidson et al., 2002). 곡선 교량의 기하학적 특성으로 인해 직선 교량에 비해 복잡한 거동을 보이기 때문에 정적 및 동적 거동에 대한 연구에 관심이 높아졌다. Linzell et al.(2004)의 연구에서 곡선 강재 교량의 실험 모형의 제작 및 설치 방법에 대한 연구와 굽힘 성능을 분석하기 위한 대규모 실험적 연구를 수행하였다. Jeon et al.(2016)은 곡선형 콘크리트 박스 교량의 곡률, 교대의 뒤틀림, 교각의 높이의 변화에 따른 지진 취약도 분석을 수행하였다. Seo et al.(2017)은 몬테 카를로 시뮬레이션을 기반으로 곡선형 교량의 지진 취약도 분석을 수행하였다. 이 연구에서 데크의 폭, 스패ن 길이, 교각의 높이 등의 곡선 교량에 대한 불확실성을 고려하였으며 확률론적 복구비용의 추정에 대한 프레임워크를 제안하였다. Jeon et al. (2021)은 I형 곡선 교량의 재료 불확실성을 고려하여 경주 지진 기반의 지진 취약도 평가를 수행하였다.

기존의 지진 취약도 분석에서 다중 매개변수(교각의 높이, 스패의 길이, 경간 수 등)를 고려하는 것은 많은 계산비용이 발생하며, 이를 극복하기 위해 기계학습법을 적용하여 학습된 데이터를 기반으로 대형 구조물의 지진 취약도 분석을 수행하는 연구들이 진행되고 있다. 인공지능망 기계학습법은 입력 층, 은닉 층, 출력 층의 세 가지 계층의 각 노드가 상호 연결된 네트워크를 구성하며 이 방법을 이용하여 몇몇 연구자들에 의해 교량의 재료, 기하형상, 노후화 등의 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석이 수행되었다(Ghosh et al., 2013; Pang et al., 2014; Mangalathu et al., 2018; Du et al., 2019). 인공지능망 이외에도 LASSO 기법을 적용하여 교량의 지진 취약도 분석을 수행한 사례도 있다(Soleimani et al., 2017; Xie et al., 2019). 기계학습법을 이용한 교량의 지진 취약도 분석에 관한 연구는 다양한 불확실성을 고려한 분석이 가능하지만 각각의 기법에 따라 장점 및 단점이 존재하며 아직 많은 연구를 필요로 한다(Soleimani et al., 2022).

본 연구는 곡선형 거더에 초점을 맞춰 다양한 불확실성을 갖는 확률론적 지진 안전성 분석을 위해 기계학습법 기반의 지진 취약도 분석을 수행하였다. 이를 위해 I형 곡선 거더를 갖는 단경간 교량의 유한요소 모델을 구축하였으며 강재 및 콘크리트 재료특성과 교각 높이를 불확실성으로 고려하였다. 인공신경망과 반응표면분석 기법 기반의 기계학습을 수행하여 지진 취약도를 분석하였으며 기존 방법론에 의해 분석된 지진 취약도와 비교하였다.

## 곡선교량의 유한요소 모델 및 불확실성 정량화

### 유한요소 모델

실험 및 이론해 등으로 검증된 유한요소 모델을 이용하여 지진 취약도 분석을 수행하는 것이 신뢰성 있는 지진 취약도 분석 결과를 도출할 수 있다. 따라서 본 연구는 Jeon et al.(2018)의 연구에서 W10×49 곡선 거더의 휨 모멘트에 의한 거동을 이론해와 유한요소 해석결과를 비교하여 검증된 유한요소 모델을 이용하여 지진 취약도 분석을 수행하였다.

곡선 거더의 단면은 W10×49로 Fig. 1과 같으며 곡률 반경(R)과 중심각( $\theta$ )은 각각 6.096m, 42.97°이다. 교각은 T형으로 가정하였으며 기둥의 직경은 0.4m, 코핑부의 단면은 0.4m×0.4m로 가정하였다. 곡선 거더는 4절점 Shell 요소(S4R)를 사용하였으며 교각은 2절점 Beam 요소(B31)를 사용하였다. 곡선교량 구성에 사용된 총 요소 및 절점의 개수는 각각 117,760개, 118,657개이다. 거더의 재료 모델은 Fig. 2와 같이 bi-linear 형태로 가정하였으며 kinematic hardening 모델을 적용하였다. 강재의 항복 응력과 인장강도는 불확실성 변수로 고려되었으며 탄성계수는  $\sigma_y/\epsilon_y$ 로 계산된다. 교각의 높이와 콘크리트의 압축강도는 불확실성 변수로 고려되었으며 콘크리트의 탄성계수는 압축강도에 의존하는 것으로 가정하였다.

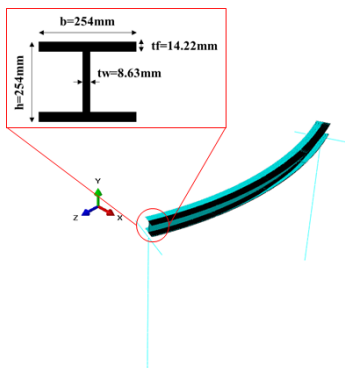


Fig. 1. Finite element model of I-shape girder curved bridge

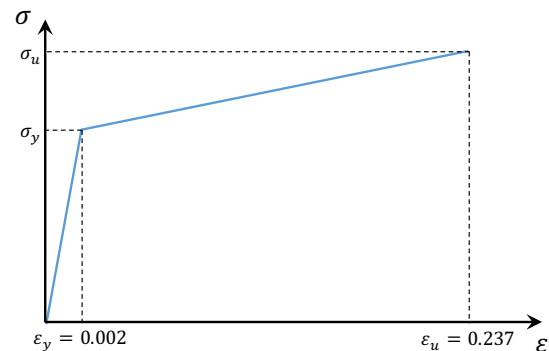


Fig. 2. Stress-strain relation for steel curved girder

### 불확실성 정량화 및 샘플링

본 연구는 다중 매개변수의 불확실성을 고려한 지진 취약도를 분석하기 위해 거더와 교각의 불확실성을 정량화하였다. 강재 거더의 항복강도, 인장강도와 콘크리트 교각의 압축강도, 높이를 불확실성으로 고려하였다. Kim et al.(2000)의 연구에서 교량 구조에 주로 사용되는 SM490의 밀시트를 기반으로 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비, 두께 사이의 상관관계를 통계적으로 분석하였다. 이 연구를 참고하여 거더에 사용된 강재는 SM490으로 가정하였으며 통계적 매개변수를 결정하였다. 콘크리트의 압축강도는 JNES/NUPEC(2000)에서 수행된 연구를 참고하여 통계적 매개변수를 결정하였다. 마지막으로 교

각의 높이는 3m에서 5m까지 일정하게 분포한다고 가정하였으며 각 불확실성의 통계적 매개변수는 Table 1에 정리하였다.

표본을 추출하는 대표적인 방법은 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)와 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS)이 있다. MCS 방법은 많은 수의 반복횟수가 보장될 경우 특정 수준의 정확도에 도달할 수 있다. 하지만 LHS 방법은 비교적 적은 수의 반복횟수만으로 높은 정확도를 갖는다. 따라서 본 연구는 LHS 방법을 이용하여 각 매개변수 표본을 추출하였다.

**Table 1.** Uncertainties of steel curved bridge

Component	Uncertainty	Distribution Type	Mean or Lower bound	Standard Deviation or Upper bound
Steel Girder	Yield Strength (MPa)	Normal	405	39
	Tensile Strength (MPa)	Normal	557	19
Column	Compression Strength (MPa)	Normal	35.4	3.19
	Height (m)	Uniform	3	5

## 기계학습법

### 인공신경망 기법

인공신경망 기법은 뇌 신경계의 정보처리구조를 모방하여 만든 알고리즘으로 입력 층, 은닉 층, 출력 층으로 나뉜다. 입력 층은 입력된 매개변수를 은닉 층으로 보내는 역할을 하며 뉴런의 개수는 입력 매개변수와 동일하다. 은닉 층은 입력 층으로부터 받은 매개변수를 처리하고 학습된 데이터를 출력 층으로 보내는 역할을 한다. 출력 층은 은닉 층으로 받은 데이터를 바탕으로 매개변수에 대한 결과 값을 출력하는 역할을 한다. 각 층에는 하나 이상의 뉴런이 위치하고 있으며 모든 뉴런은 가중치와 편향을 고려하여 서로 연결되어 있다. 출력 층에서 예측되는 값의 오차를 줄이기 위해 역방향으로 오차를 전파시켜 각 층의 가중치를 업데이트하고 최적의 학습결과를 찾아가는 역전파 알고리즘을 사용한다(Rumelhart et al., 1986).

### 반응표면분석 기법

반응표면분석 기법은 입력변수와 출력변수 사이의 관계를 N차 다항식의 함수 형태로 가정한다. 반응표면분석 모델은 정의된 n차 다항식 함수 모델의 예측 값과 실제 값의 오차가 가장 적을 모델의 계수 값을 결정하는 방식으로 생성된다(Kwag et al., 2018). 식 (1)과 (2)는 2차 다항식 함수로 가정된 반응표면분석 모델의 예시를 나타내었다.

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \tag{1}$$

$$J(\beta) = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \right) \right)^2 \tag{2}$$

여기서  $\beta$ 는 반응표면분석 모델의 추계 상수이며 오차는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

## 지진 취약도 분석

### 취약도 정의

취약도 분석은 외부 자극과 구조물의 손상 사이의 상관관계를 분석하기 위해 주로 사용된다. 손상확률( $P_f$ )은 불확실성을 내포하는 외부자극(IM)에서 대상 구조물의 용량(C)이 구조 응답(D)을 초과할 조건부 확률( $P[A|B]$ ) 함수로 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_f(IM) = P[C \leq D | IM] \quad (3)$$

외부자극은 기록된 지진 가속도 이력의 절대 최대 가속도로 손쉽게 얻을 수 있는 지진의 최대 지반가속도(PGA)로 선택한다. D는 구조물의 손상을 예측할 수 있는 구조적 응답량으로 구조해석을 통해 얻을 수 있는 응력, 변형률, 하중, 변위 등으로 대표될 수 있다. C는 구조물의 정해진 한계상태로 본 연구에서 적용된 한계상태는 다음 절에서 언급하였다. 식 (3)을 통해 이산화된 손상확률을 계산할 수 있으며 식 (4)와 같은 누적 로그정규분포로 가정된 함수를 이용하여 지진 취약도 곡선을 도출할 수 있다.

$$P_f(PGA = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_d)}{\beta_d}\right) \quad (4)$$

여기서,  $\Phi(\cdot)$ 는 누적 로그정규분포 함수,  $\theta_d$ 는 로그정규분포의 평균,  $\beta_d$ 는 로그정규분포의 표준편차를 의미한다.

### 입력지진

지진 취약도 분석을 위해 주기, PGA, Fault mechanism 등 지진파의 불확실성을 고려하여 20개의 지진을 입력운동으로 선택하였다. 저주파 및 고주파 특성을 갖는 지진파를 포함하고 있으며 최근 국내에서 발생하여 많은 피해를 야기한 2016년 경주 및 2017년 포항 지진을 포함하였다. 모멘트 규모 5.0에서 8.0까지 다양한 규모를 갖는 지진들로 구성되어 있다. 시간이력 해석에서 각 지진의 수평방향(X, Z) 성분을 적용하였으며 선택된 입력 운동은 Table 2에 정리하였다. 각 지진의 PGA로 정규화하여 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g, 1.6g로 스케일을 변화시켜 시간이력해석을 수행하였다. 20쌍의 불확실성 변수와 대응되는 지진파를 8개의 PGA 구간으로 나누어 총 160회의 시간이력해석을 수행하였다.

### 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석

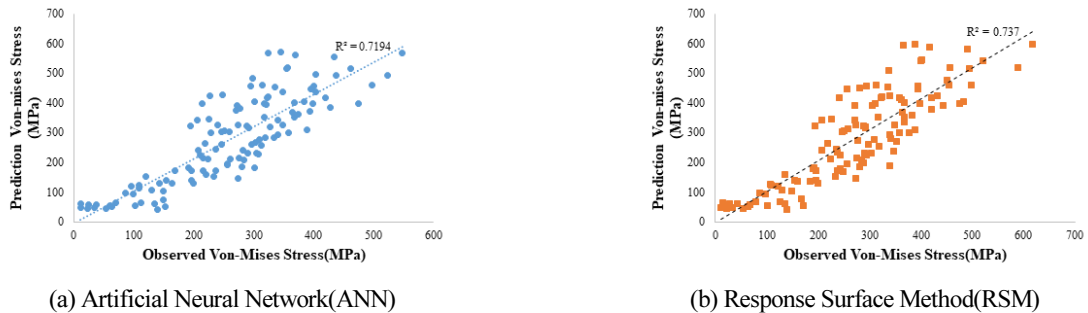
지진 취약도 분석은 구조물의 응답이 정해진 한계상태를 넘어서는 조건부 확률이기 때문에 지진 취약도 분석에 앞서 한계상태를 정의해야 한다. 본 연구는 I형 강재 곡선 거더의 거동에 초점을 맞추어 취약도 분석을 수행하기 위해 도로교 설계기준 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010; 2012)을 참고하여 SM490의 허용응력 및 항복응력을 한계상태로 정의하였으며 각각 190MPa, 315MPa로 정의된다.

Fig. 3은 각 기계학습법을 통해 예측된 값과 유한요소 해석에서 관측된 값을 비교하였다. 결정계수( $R^2$ )를 계산하여 예측값과 관측값의 유사성을 비교하였으며 인공신경망(ANN)과 반응표면분석법(RSM)의  $R^2$ 값은 각각 0.719, 0.737로 나타났다.  $R^2$ 값을 비교하였을 때 RSM이 관측값에 더 유사한 예측을 하는 것으로 나타났다.

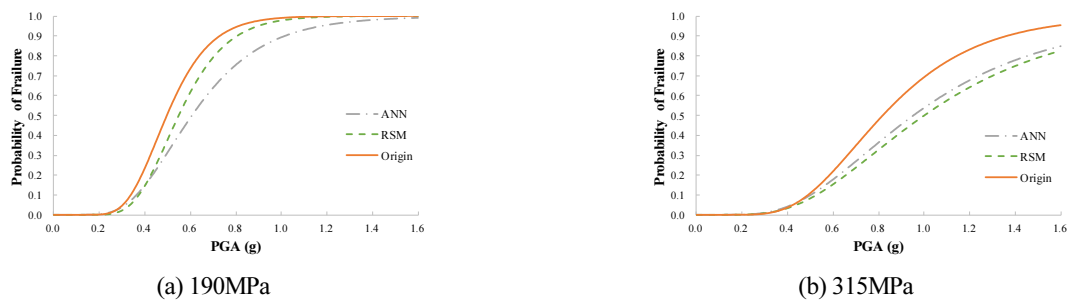
**Table 2.** Selected input motion

No.	Event	Magnitude ( $M_w$ )	PGA (g)		No.	Event	Magnitude ( $M_w$ )	PGA (g)	
			x	z				x	z
1	Northridge	6.7	0.4157	0.5164	11	Loma Prieta	6.9	0.5550	0.3673
2	Northridge	6.7	0.4100	0.4820	12	Manjil	7.4	0.5145	0.4963
3	Duzce	7.1	0.7275	0.8224	13	Superstition Hills	6.5	0.3578	0.2583
4	Hector Mine	7.1	0.2655	0.3367	14	Superstition Hills	6.5	0.4463	0.3009
5	Imperial Valley	6.5	0.2377	0.3511	15	Cape Menocino	7.0	0.3854	0.5489
6	Imperial Valley	6.5	0.3639	0.3795	16	Chi-Chi	7.6	0.3528	0.4401
7	Kobe	6.9	0.5093	0.5027	17	Sna Fernando	6.6	0.2098	0.1741
8	Kobe	6.9	0.2432	0.2119	18	Friuli	6.7	0.4157	0.5164
9	Kocaeli	7.5	0.3121	0.3578	19	Gyengju	5.4	0.4420	0.3906
10	Landers	7.3	0.2448	0.1515	20	Pohang	5.5	0.2456	0.2826

Fig. 4는 기계학습법으로 예측된 값을 이용한 지진 취약도 곡선과 관측된 값 기반의 지진 취약도 곡선을 비교하였다. 한계 상태가 190MPa일 때 RSM이 관측데이터 기반의 지진 취약도 곡선과 유사하게 나타났다. 한계상태가 315MPa일 때 ANN이 비교적 관측 데이터와 유사하나 그 차이는 미미한 것으로 보인다. ANN, RSM 모두 관측데이터에 비해 과소평가 되는 경향을 보이는 것으로 나타났다.



**Fig. 3** Comparison of predicted and observed value



**Fig. 4** Seismic fragility of each method at limit state

## 결론

본 연구는 기계학습 기반 I형 강재 곡선 교량의 지진 취약도 분석을 수행하였다. 거더 및 교각의 재료 특성과 교각의 높이를 불확실성으로 고려하였으며 라틴하이퍼큐브 기법을 이용하여 불확실성 매개변수를 샘플링하였다. 지진의 주기, PGA, Fault mechanism 등을 고려하여 입력 운동을 선택하였으며 8개의 구간으로 스케일링하여 총 160회의 시간이력 해석을 수행하였다. 시간이력해석결과를 원본 데이터로 인공신경망, 반응표면분석법을 통해 학습된 데이터를 바탕으로 지진 취약도 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 인공신경망 기법과 반응표면분석 기법을 통해 예측된 값을 관측 값과 비교하였으며 두 값 사이의 유사도를 검토하기 위해 결정계수( $R^2$ )를 비교하였다. 본 연구에서 관측된 데이터 기반으로 예측된 값의 유사도는 반응표면분석 기법을 사용한 경우가 비교적 높은 것으로 나타났다( $R^2=0.737$ ).
- (2) 두 기계학습법을 이용하여 예측된 값으로 지진 취약도 분석을 수행하였다. 한계상태가 190MPa일 때 인공신경망 기법을 이용한 예측 값이 비교적 과소평가되는 경향을 보였으며 한계상태가 315MPa일 때 두 기계학습법 모두 관측데이터에 비해 과소평가되는 것으로 나타났다.
- (3) 단일 기계학습법 모델을 조합하여 기존의 학습데이터 보다 정확도가 높은 모델을 생성하는 기법인 앙상블 기계학습에 대한 연구들이 진행되고 있다. 추후 연구에서 추가적인 매개변수를 고려한 지진 취약도 평가 및 최근 개발되고 있는 기계학습법 모델을 이용하여 지진 취약도 평가를 수행하고자 한다.

## Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2021R1A2C1010278).

## References

- [1] Agrawal, A.K., Ghosn, M., Alampalli, S., Pan, Y. (2012). "Seismic fragility of retrofitted multi-span continuous steel bridges in New York." ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 17, No.4, pp. 562-575.
- [2] Billah, A.H.M.M, Alam, M.S., Bhuiyan, M.A.R. (2013). "Fragility analysis of retrofitted multi-column bridge bent subjected to near fault and far filed ground motion." ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 992-1004.
- [3] Choe, D.E., Gardoni, P., Rosowsky, D., Haukaas, T. (2009). "Seismic fragility estimated for reinforced concrete bridges subject to corrosion." Structural Safety, Vol. 31, No. 4, pp. 275-283.
- [4] Choi, E., DesRoches, R., Nielson, B. (2004). "Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones." Engineering Structures, Vol. 26, No. 2, pp. 187-199.
- [5] Davidson, J.S., Abdalla, R.S., Madhavan, M. (2002) "Design and construction of modern curved bridges." University Transportation Center for Alabama, Report No. FHWA/CA/OR, The University of Alabama, Alabama, US.
- [6] Du, A., Padgett, J.E. (2019). "Multivariate surrogate demand modeling of highway bridge structures." In Proceedings of the 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec City, QC, Canada, pp. 17-20.

- [7] Ghosh, J., Padgett, J.E. (2012). "Impact of multiple component deterioration and exposure conditions on seismic vulnerability of concrete bridges." *Earthquakes and Structures*, Vol. 3, No. 5 pp. 649-673.
- [8] Ghosh, J., Padgett, J.E., Dueñas-Osorio, L. (2013). "Surrogate modeling and failure surface visualization for efficient seismic vulnerability assessment of highway bridges." *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 34, pp. 189-199.
- [9] Japan Nuclear Energy Safety Organization, Nuclear Power Engineering Corporation (JNES/NUPEC) (2000). *Model Test of Multi Axis Loading on RC Shear Walls*. Report for Fiscal 1994-2000, JNES/NUPEC, Japan, Tokyo.
- [10] Jeon, J., Ju, B.S., Son, H. (2018). "Seismic fragility analysis of curved beam with I-shape section." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 3, pp. 379-386.
- [11] Jeon, J., Ju, B.S., Son, H. (2021). "Seismic fragility analysis based on material uncertainties of I-shape curved steel girder bridge under Gyeongju earthquake" *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 17, No. 4, pp. 747-754.
- [12] Jeon, J.S., DesRoches, R., Kim, T., Choi, E. (2016). "Geometric parameters affecting seismic fragilities of curved multi-frame concrete box-girder bridges with integral abutments." *Engineering Structures*, Vol. 122, No. 2, pp. 121-143.
- [13] Karim, K.R., Yamazaki, F. (2003). "A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 10, pp. 1603-1626.
- [14] Kim, J.R., Kim, S.B., Park, Y.H., Jung, W.G. (2000). "A statistical study on the mechanical properties and chemical components of rolled steels for welded structure, SM490." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 16, No. 11, pp. 3-10.
- [15] Kwag, S., Gupta, A., Dinh, N. (2018). "Probabilistic risk assessment based model validation method using Bayesian network." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 169, pp. 380-393.
- [16] Kwon, O.S., Elnashai, A.S. (2010). "Fragility analysis of a highway over-crossing bridge with consideration of soil-structure interaction." *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 6, pp. 159-178.
- [17] Linzell, D., Leon, R.T., Zureick, A.H. (2004). "Experimental and analytical studies of a horizontally curved steel I-girder bridge during erection." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 521-530.
- [18] Mangalathu, S., Heo, G., Jeon, J.S. (2018). "Artificial neural network based multi-dimensional fragility development of skewed concrete bridge classes." *Engineering Structures*, Vol. 162, pp. 166-176.
- [19] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). *Korean Highway Bridge Design Code*. Sejong.
- [20] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). *Korean Highway Bridge Design Code*. Sejong.
- [21] Nielson, B.G., DesRoches, R. (2007). "Seismic fragility curves for typical highway bridge classes in Central and South eastern United States." *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No.3, pp. 615-633.
- [22] Padgett, J.E., DesRoches, R. (2008). "Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 8, pp. 1157-1174.
- [23] Pang, Y., Dang, X., Yuan, W. (2014). "An artificial neural network based method for seismic fragility analysis of highway bridges." *Advances in Structural Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 413-428.
- [24] Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986). "Learning representations by back-propagating errors." *Nature*, Vol. 323, pp. 533-536.
- [25] Seo, J., Park, H. (2017). "Probabilistic seismic restoration cost estimation for transportation infrastructure portfolios with an emphasis on curved steel I-girder bridges." *Structural Safety*, Vol. 65, pp. 27-34.
- [26] Simon, J., Bracci, J.M., Gardoni, P. (2010). "Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 10, pp. 1273-1281.



- [27] Soleimani, F., Hajializadeh, D. (2022). "State-of-the-art review on probabilistic seismic demand models of bridges: Machine-learning application." *Infrastructures*, Vol. 7, No. 5, pp. 1-31.
- [28] Soleimani, F., Vidakovic, B., DesRoches, R., Padgett, J. (2017). "Identification of the significant uncertain parameters in the seismic response of irregular bridges." *Engineering Structures*, Vol. 141, pp. 356-372.
- [29] Stefanidou, S.P., Kappos, A.J. (2013). "Optimum selection of retrofit measures for R/C bridges using fragility curves." 4<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, pp. 1-18.
- [30] Sung, Y.C., Su, C.K. (2011). "Time-dependent seismic fragility curves on optimal retrofitting of neutralised reinforced concrete bridges." *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 7, No. 10, pp. 797-805.
- [31] Tanaka, S., Kameda, H., Nojima, N. and Shunsyke, O. (2000). "Evaluation of seismic fragility for highway transportation systems." 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, pp. 1-6.
- [32] Xie, Y., DesRoches, R. (2019). "Sensitivity of seismic demands and fragility estimates of a typical California highway bridge to uncertainties in its soil-structure interaction modeling." *Engineering Structures*, Vol. 189, pp. 605-617.