KOSDI ISSN : 1976-2208 (Print)
ISSN : 2671-5287 (On-line)
www.sodi.or.kr

Journal of the Society of Disaster Information
Vol. 19, No. 4, pp. 976-983, December 2023
https://doi.org/10.15683/kosdi.2023.12.31.976

Original Article

지진하중을 받는 I형 곡선거더 단경간 교량의 대리모델 기반 전역 민감도 분석

Surrogate Model-Based Global Sensitivity Analysis of an I-Shape Curved Steel Girder Bridge under Seismic Loads

전준태[1] · 손호영[2] · 주부석[3]*
Jun-Tai, Jeon[1], Hoyoung Son[2], Bu-Seog, Ju[3]*

[1]Professor, Department of Civil & Environment Engineering, Inha Technical College, Incheon, Republic of Korea
[2]Research Doctor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea
[3]Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea

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

ABSTRACT

Purpose: The dynamic behavior of a bridge structure under seismic loading depends on many uncertainties, such as the nature of the seismic waves and the material and geometric properties. However, not all uncertainties have a significant impact on the dynamic behavior of a bridge structure. Since probabilistic seismic performance evaluation considering even low-impact uncertainties is computationally expensive, the uncertainties should be identified by considering their impact on the dynamic behavior of the bridge. Therefore, in this study, a global sensitivity analysis was performed to identify the main parameters affecting the dynamic behavior of bridges with I-curved girders. **Method:** Considering the uncertainty of the earthquake and the material and geometric uncertainty of the curved bridge, a finite element analysis was performed, and a surrogate model was developed based on the analysis results. The surrogate model was evaluated using performance metrics such as coefficient of determination, and finally, a global sensitivity analysis based on the surrogate model was performed. **Result:** The uncertainty factors that have the greatest influence on the stress response of the I-curved girder under seismic loading are the peak ground acceleration (PGA), the height of the bridge (h), and the yield stress of the steel (fy). The main effect sensitivity indices of PGA, h, and fy were found to be 0.7096, 0.0839, and 0.0352, respectively, and the total sensitivity indices were found to be 0.9459, 0.1297, and 0.0678, respectively. **Conclusion:** The stress response of the I-shaped curved girder is dominated by the uncertainty of the input motions and is strongly influenced by the interaction effect between each uncertainty factor. Therefore, additional sensitivity analysis of the uncertainty of the input motions, such as the number of input motions and the intensity measure(IM), and a global sensitivity analysis considering the structural uncertainty, such as the number and curvature of the curved girders, are required.

Keywords: Curved Girder, Bridge, Seismic Loading, Surrogate Model, Global Sensitivity Analysis

Received | 8 December, 2023
Revised | 22 December, 2023
Accepted | 22 December, 2023

요 약

연구목적: 지진하중을 받는 교량 구조물의 동적 거동은 지진파의 특성 혹은 재료 및 기하학적 특성과 같은 많은 불확실성에 영향을 받는다. 하지만 모든 불확실성 인자가 교량 구조물의 동적 거동에 중요한 영향을 미치진 않는다. 영향성이 낮은 불확실성 인자까지 고려한 확률론적 내진성능 평가는 많은 계산비용이 요구되기 때문에 교량의 동적 거동에 미치는 영향을 고려하여 불확실성 인자는 식별되어야 한다. 따라서 본 연구는 I형 곡선거더를 갖는 단경간 교량의 동적 거동에 영향을 미치는 주요 매개변수를 식별하기 위해 전역민감도 분석을 수행하였다. **연구방법:** 지진파의 불확실성과 곡선 교량의 재료 및 기하학적 불확실성을 고려하여 유한요소 해석을 수행하였으며 해석결과를 기반으로 대리모델을 작성하였다. 결정계수와 같은 성능평가지료를 이용하여 대리모델을 평가하였으며 최종적으로 대리모델 기반의 전역 민감도 분석을 수행하였다. **연구결과:** 지진하중을 받는 I형 곡선 거더의 응력응답에 가장 큰 영향을 미치는 불확실성 인자는 최대지반가속도(PGA), 교각의 높이(h), 강재의 항복응력(fy) 순으로 나타났다. PGA, h, fy의 주효과 민감도 지수는 각각 0.7096, 0.0839, 0.0352로 나타났으며 총 민감도 지수는 각각 0.9459, 0.1297, 0.0678로 나타났다. **결론:** I형 곡선 거더의 응력응답은 입

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 anymedium, provided the original work is properly cited.

ⓒ Society of Disaster Information All rights reserved.

력운동의 불확실성에 대한 영향성이 지배적이며 각 불확실성 인자 사이의 교호작용에 큰 영향을 받는다. 따라서 입력운동의 개수 및 intensity measure과 같은 입력운동의 불확실성에 대한 추가적인 민감도 분석과 곡선거더의 개수 및 곡률과 같은 구조적 불확실성까지 고려한 총 민감도 분석은 필요하다.

핵심용어: I형 곡선거더, 교량, 지진하중, 대리모델, 전역 민감도 분석

서 론

교량 구조물은 산업사회에서 물류의 유기적인 이동을 위해 필수적인 사회간접자본시설이며 지진과 같은 자연재해 의한 손상은 치명적인 피해로 이어질 수 있다. 교량 구조물은 지리적인 특성으로 인해 곡선형 거더를 이용하여 건설될 수 있으며 우리나라와 같이 산악지형이 많은 지리적 특성을 갖을 경우 도시를 이어주는 중요한 매개체이다. 미국은 건설된 전체 교량의 30% 이상이 곡선형 거더를 갖는 교량인 것으로 보고되었다(Davidson et al., 2022). 따라서 다양한 연구자들에 의해 지진 하중을 받는 곡선교량의 안전성 평가를 위해 실험적, 해석적 연구는 수행되었다. 지진은 주기, fault mechanism, 진앙거리와 같은 다양한 불확실성을 내포하고 있으며 곡선 교량은 교각의 높이, 형식, 스팬의 길이 등과 같은 기하학적 특성 및 재료특성의 불확실성을 갖는다. 즉, 곡선 교량의 지진 안전성 평가를 위해서는 교량의 기하학적 특성, 재료특성 및 지진파 특성의 불확실성을 고려한 확률론적 안전성 평가가 필요하다. Bavaghar et al.(2017)은 곡선 콘크리트 거더를 갖는 다경간 교량의 지진 취약도 분석을 통해 확률론적 내진 안전성 평가를 수행하였다. 또한 Seo et al.(2017)은 서로 다른 곡률반경을 갖는 곡선 거더의 확률론적 내진 안전성 평가를 수행하고 피해 복구 비용의 추정을 확률론적 방법으로 수행할 수 있는 프레임워크를 제안하였다. Jeon et al.(2016)은 곡선 거더를 갖는 다경간 콘크리트 교량의 기하학적 특성을 매개변수로 고려하여 지진 취약도 분석 수행하였다. 또한 Jeon et al.(2019)는 켈리포니아에 위치한 곡선교량을 대상으로 재료특성 및 기하학적 특성을 불확실성 인자로 고려하여 베이지안 접근법 기반의 지진 취약도 평가를 수행하였다. Jeon et al.(2022)는 머신러닝 기법을 활용하여 재료특성과 지진파 특성의 불확실성을 고려한 곡선 거더를 갖는 교량의 지진 취약도 분석을 수행하였다.

앞서 언급된 선행연구들에서 곡선교량의 확률론적 내진 안전성 평가를 위해 다중 매개변수를 불확실성 인자로 고려하여 지진 취약도 분석을 수행하였다. 하지만 많은 수의 매개변수를 고려한 확률론전 안전성 평가는 많은 계산비용이 소모되는 제한이 있다. 민감도 분석은 중요 매개변수를 식별하기 위한 방법으로 매개변수 중 구조물의 안전성에 대한 불확실성과 위험에 대해 가장 중요한 인자의 식별할 수 있는 기법이다. 따라서 민감도 분석을 통해 구조물의 거동에 중요하지 않다고 식별된 매개변수는 공칭 값으로 고정하여 모델을 단순화할 수 있으며 중요도가 높은 매개변수에 세심한 주의를 기울여 보다 현실적인 안전성 평가를 수행할 수 있다(Xiao et al., 2017). 민감도 분석은 크게 국부 및 전역 민감도 분석으로 나뉠 수 있으며 모델이 비선형적이거나 매개변수 사이의 상호작용 효과가 있는 경우 전역 민감도 분석이 필요하다(Saltelli et al., 2013). 따라서 본 연구는 지진 하중을 받는 곡선 교량에서 I형 거더의 응력응답에 영향을 미치는 주요 매개개변수를 식별하기 위한 전역 민감도 분석을 수행하고자 한다. 전역 매개변수 분석은 많은 수의 시뮬레이션 횟수가 필요하기 때문에 대리모델 기반의 전역 민감도 분석을 수행하고자 하며 불확실성 인자를 고려한 유한요소 해석결과를 학습데이터로 사용하여 대리모델을 구축하고한다.

I형 곡선 거더를 갖는 단경간 교량의 유한요소 모델 및 불확실성 인자

유한요소 모델

본 연구는 유한요소 해석결과를 학습 데이터로 사용한 대리모델을 기반으로 전역 민감도 분석을 수행하기 위해 I형 곡선

거더를 갖는 단경간 교량의 유한요소 모델을 구축하였다. 본 연구의 유한요소 모델은 Joen et al.(2018)의 연구에서 검증된 I형 곡선 거더를 기반으로 구축되었다.

I형 곡선 거더는 W10×49 단면을 갖으며 감차 적분된 4절점 Shell 요소(S4R)을 사용하여 유한요소 모델을 구축하였다. 감차 적분된 요소는 Hourglass 문제로 인해 비물리적인 해석결과가 발생할 수 있며 이를 해결하기 위해 적절한 요소크기의 결정이 중요하다(ABAQUS User`s manual, 2021). 따라서 휨 모멘트에 의한 I형 곡선 거더 거동의 이론해와 유한요소 해석결과를 비교하여 구축된 유한요소 모델을 검증하였으며 적절한 요소 크기를 결정하였다. 교각은 원형의 기둥과 직사각형 코핑부를 갖는 T형으로 가정하였으며 2절점 Beam 요소(B31)을 사용하였다. 기둥의 높이 및 직경은 불확실성 인자로 고려하였으며 직사각형 코핑부의 단면은 0.4m×0.4m이다. 구축된 I형 곡선 거더를 갖는 단경간 교량의 유한요소 모델은 Fig. 1과 같다. 지진하중을 받는 I형 곡선 거더의 비선형 거동을 모사하기 위해 적절한 재료구성 모델의 결정은 필요하다. ABAQUS Platform에서 반복하중이나 동적하중을 받는 강재의 비선형 거동을 모사하기 위한 대표적인 재료구성모델은 Kinematic hardening 모델이다(ABAQUS User`s manual, 2021). Kinematic hardening 모델은 Bi-linear 형태로 입력되기 때문에 강재의 응력-변형률 관계는 Fig. 2와 같다. 여기서 항복응력(σ_y)과 극한응력(σ_u)은 불확실성 인자로 고려하였다.

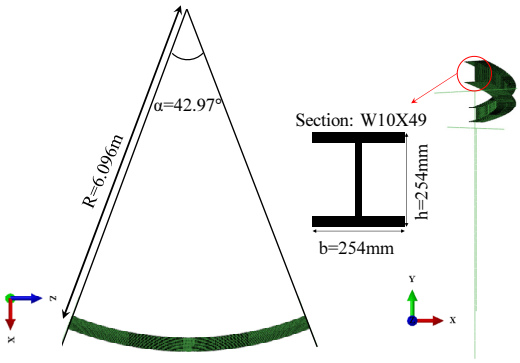


Fig. 1 Finite element model of I-shape girder curved bridge

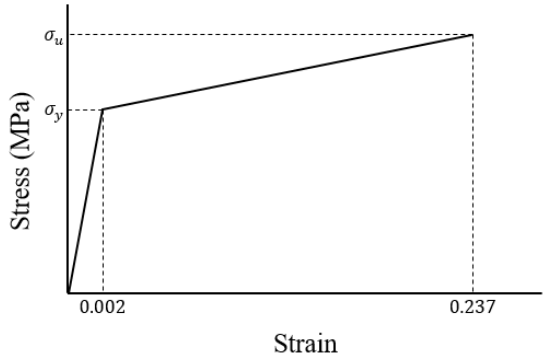


Fig. 2 Stress-strain relation for steel curved girder

불확실성 인자의 통계적 매개변수

불확실성 인자를 고려한 학습데이터를 생성하기 위해 지진하중을 받는 I형 곡선 거더를 갖는 곡선 교량의 거동에 영향을 미칠 수 있는 불확실성 인자에 대한 통계적 매개변수를 결정하였다. 먼저 콘크리트 교각의 높이, 직경과 콘크리트의 압축강도을 불확실성 인자로 고려하였다. 콘크리트 교각의 높이는 3m에서 6m까지 균일하게 분포하고 교각의 직경은 0.5m에서 1m까지 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. Kim et al.(2009)의 연구에서 콘크리트의 압축강도 및 인장강도에 대한 통계적 특성을 분석하였으며 설계 압축강도(f_{ck}) 30MPa인 콘크리트의 압축강도(f_c)에 대한 통계적 특성은 평균 36.78MPa와 표준편차 2.56MPa를 갖는 정규분포를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 Kim et al.(2009)의 연구결과를 참고하여 콘크리트 압축강도의 통계적 특성을 결정하였다. 또한 콘크리트의 탄성계수(E_0)는 식 (1)과 같이 압축강도에 따라 계산된다(ACI Committe 318, 2007).

$$E_0 = 4700\sqrt{f_c} \tag{1}$$

I형 곡선 거더의 경우 교량에 일반적으로 사용되는 SM490 강재를 사용하는 것으로 가정하였으며 SM490의 재료특성에 대한 통계적 매개변수는 Kim et al.(2000)의 연구를 참고하여 결정하였다. Kim et al.(2000)의 연구에서 밀시트를 기반으로 두께 16mm 이하의 SM490 강재에 대한 기계적 성질의 통계적 특성을 분석하였다. SM490의 항복응력은 평균 405MPa, 표준편차 39MPa를 갖는 정규분포로 가정될 수 있으며 극한응력은 평균 557MPa, 표준편차 19MPa를 갖는 정규분포로 가정될 수 있다. 본 연구에서 고려된 불확실성 인자의 통계적 매개변수는 Table 1에 정리하였다.

불확실성 인자를 샘플링하는 기법은 대표적으로 몬테카를로 시뮬레이션과 라틴하이퍼큐브 샘플링 기법이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션을 기반으로 샘플링하는 기법은 많은 수의 반복횟수를 필요로 하는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 개발된 라틴하이퍼큐브 샘플링 기법은 비교적 적은수의 반복횟수만으로 정의된 분포특성을 만족하는 샘플을 추출할 수 있다. 따라서 본 연구는 라틴하이퍼큐브 샘플링 기법을 이용하여 불확실성 인자를 추출하였다.

Table 1. Statistical parameter of I-shape curved steel girder bridge

Component	Parameter	Mean	Coeffient of Variation	Distribution
Concrete Column	Height (h)	3m (Lower Bound)	6m (Upper Bound)	Uniform
	Diameter (d)	0.5m (Lower Bound)	1m (Upper Bound)	Uniform
	Compressive Strength (f_c)	36.78 MPa	0.0696	Normal
I-Type Stee Girder	Yield Strength (f_y)	405MPa	0.0963	Normal
	Ultimate Strength (f_u)	557MPa	0.0341	Normal

본 연구는 지진하중에 의한 전역 민감도 분석을 수행하기 위해 지진파의 불확실성을 추가적으로 고려하였다. 지진파는 주기, 진앙거리, Fault Mechanism등과 같은 다양한 불확실성을 내포하고 있기 때문에 세계 각지에서 발생한 20개의 지진파를 선택하여 입력운동으로 결정하였다. 선택된 입력운동은 Table 2와 같으며 곡선교량의 거동에 지배적일 것으로 판단되는 수

Table 2. Input motion

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

평방향 성분(X 및 Z방향)을 적용하였다. 각 지진파의 최대지반가속도(PGA)로 정규화하여 0.1g부터 1.0g까지 0.1g씩 스케일을 증가시키면서 시간이력해석을 수행하였다.

대리모델 기반 전역 민감도 분석

전역 민감도 분석 기법

민감도 분석은 불확실성 인자가 구조물의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 사용되며 일반적으로 국부 및 전역 민감도 분석 방법이 있다(Sobol, 1993). 국부 민감도 분석은 전역 민감도 분석에 비해 적은 시뮬레이션 횟수를 필요로 하지만 불확실성 인자 사이의 상호작용을 고려할 수 없으며 제한된 공간에서 민감도만 분석할 수 있는 단점이 있다(Tian, 2013). 전역 민감도 분석은 모든 불확실성 인자가 전체 입력공간에 대해 동시에 변하기 때문에 개별 불확실성 인자의 영향성 및 교호작용에 의한 영향성을 동시에 분석할 수 있으며, 전역 민감도 분석 기법 중 SOBOL 기법은 강력한 기법 중 하나이다(Zhang et al., 2015). SOBOL 기법에서 i번째 불확실성 인자(x_i)의 영향성(주효과)에 대한 민감도 지수(S_i)는 다음 식 (2)와 같이 계산된다.

$$S_i = \frac{V_i}{V_s} \tag{2}$$

여기서, V_i는 불확실성 인자 x_i에 의해 계산된 분산을 나타내며 V_s은 모든 불확실성 인자에 대한 분산을 의미한다. 주효과와 교호작용에 의한 효과를 포함한 총 민감도 지수(S_{Ti})는 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$S_{Ti} = S_i + S_{ij} + \cdots + S_{1 \cdots i \cdots n} \tag{3}$$

여기서, S_{ij}는 i번째 및 j번째 불확실성 인자의 교화작용 효과를 나타내는 민감도 지수이다. $S_{1 \cdots i \cdots n}$는 i번째 및 n번째 불확실성 인자의 교호작용 효과를 나타내는 민감도 지수이다.

SOBOL 기법은 주효과 및 교호작용 효과에 대한 분석을 수행하기 때문에 많은 수의 시뮬레이션 횟수가 보장되어야 한다는 단점이 있다. 수치해석결과를 학습데이터로 구축된 대리모델 기반의 SOBOL 기법을 사용하여 전역 민감도 분석을 수행하여 많은 시뮬레이션 횟수로 인한 계산비용을 절감할 수 있다(Yoo et al., 2020). 따라서 본 연구는 대리모델 기반의 전역 민감도 분석을 위해 정량화된 불확실성 인자를 고려하여 유한요소해석을 수행하고 해석결과를 학습데이터로 사용하여 대리모델을 구축하고자 한다.

대리모델 구축

대리모델 기반의 전역 민감도 분석을 위해 본 연구는 Gradient Tree Boosting(GTB) 알고리즘을 기반으로 대리모델을 구축하였다. GTB 알고리즘은 여러개의 의사결정 트리가 순차적으로 연결되어 각 트리의 입력 변수와 잔차 사이의 패턴을 학습하기 때문에 잔차는 점진적으로 감소하여 높은 정확도의 예측성능을 발휘할 수 있다(Wang et al., 2021). 불확실성 인자를 고려한 200회의 비선형 시간이력해석을 수행하였으며 해석결과를 대리모델의 학습데이터로 사용하였다. 비선형 시간이력

해석에서 계측된 I형 곡선 거더의 응력응답에 대한 데이터 세트은 학습데이터 세트와 검증데이터 세트로 무작위하게 구분하였으며 비율은 8:2로 구성된다. Fig. 3은 대리모델을 통해 예측된 값과 유한요소 해석을 통해 얻어진 값을 비교하였다. 학습데이터 세트와 검증데이터 세트의 결정계수(R^2)은 각각 0.9529 및 0.4223로 나타났다. 구축된 대리모델을 이용하여 SOBOL 전역 민감도 분석을 수행하였으며 결과는 다음 절에서 논의된다.

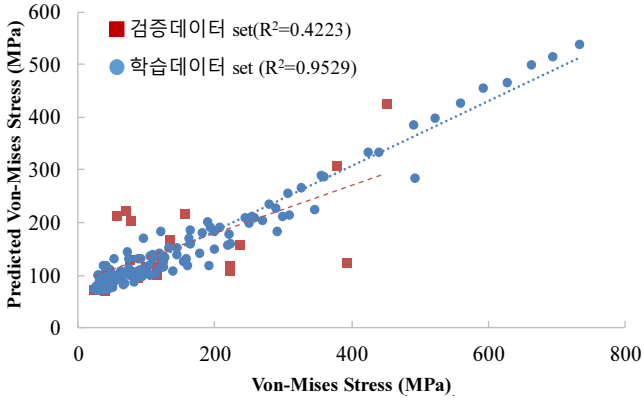
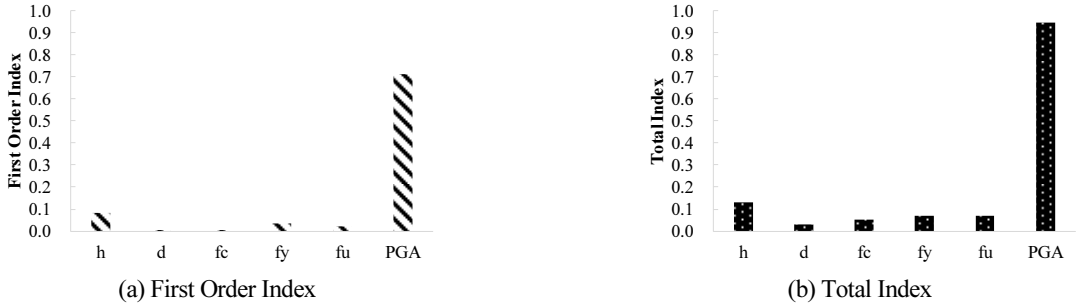


Fig. 3 Compare prediction and FE analysis result

불확실성 인자를 고려한 전역 민감도 분석

I형 곡선 거더를 갖는 교량의 기하하적 특성, 재료 특성, 지진파의 특성에 대한 불확실성이 거더의 응력응답에 미치는 영향성을 분석하기 위해 대리모델 기반의 SOBOL 전역 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 4은 개별 매개변수의 영향성에 대한 주효과 민감도 지수(First Order Index)와 각 매개변수 사이의 상호작용을 고려한 총 민감도 지수(Total Index)를 그래프로 표현하였다. Fig. 4(a)는 각 불확실성 인자의 주효과에 대한 민감도 지수를 비교하여 나타내었다. 곡선 거더의 응력응답은 최대 지반가속도(PGA), 교각의 높이(h), 강재의 항복응력 순으로 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 각각 0.7096, 0.0839, 0.0352의 주효과 민감도 지수를 갖는다. Fig. 4(b)는 각 불확실성 인자 사이의 교호작용 효과를 고려한 총 민감도 지수를 나타내었다. 모든 불확실성 인자는 주효과 민감도 지수 보다 교호작용을 고려한 총 민감도 지수에서 크게 증가하는 것으로 나타났다. PGA 및 교각 높이에 대한 총 민감도 지수는 각각 주효과 민감도 지수보다 약 33% 및 약 55% 증가하는 것으로 나타났다. PGA는 가장 큰 주효과 및 총 민감도 지수를 갖는 것으로 나타났으며 다음으로 교각의 높이가 크게 나타났다. 교각의 높이 변



(a) First Order Index (b) Total Index

Fig. 4 SOBOL indexies of I-shape steel curved girder

화로 인해 교각 상단에서 발생하는 변위 및 변형각의 크기는 변화하며 결과적으로 I형 곡선 거더의 응력응답에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 불확실성 인자가 단경간 곡선 교량의 I형 거더의 응력응답에 미치는 영향성을 분석하기 위한 기초적인 연구로써 대리모델 기반 전역 민감도 분석을 수행하였다. 불확실성 인자는 기하학적 특성 및 재료특성, 지진파의 특성으로 결정하였다. 불확실성 인자를 고려하여 총 200회의 비선형 시간이력해석을 수행하였며 해석결과를 학습데이터로 이용하여 대리모델을 구축하였다. 결과적으로 불확실성 인자에 대한 주효과 민감도 지수와 교호작용을 고려한 총 민감도 지수를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 최대지반가속도의 주효과 민감도 지수는 0.7096으로 지진하중을 받는 I형 곡선거더의 응력응답에 가장 지배적인 것으로 나타났다. 즉, 입력운동의 불확실성에 의해 I형 곡선 거더의 거동은 지배될 수 있기 때문에 확률론적 평가 시 입력운동에 대한 불확실성은 신중히 고려되어야 한다. 입력운동의 불확실성 중 Intensity Measure(IM)은 최대지반가속도, 최대지반속도, 수정된 누적 절대 속도 등이 있으며 교량의 지진응답은 IM에 큰 영향을 받는 것으로 연구되었다(Wang et al., 2021). 따라서 IM이 곡선 교량의 동적 응답에 미치는 영향성 분석은 필요하다.

(2) 교호작용을 고려한 총 민감도 지수는 모든 불확실성 인자에서 주효과 민감도 지수보다 큰 것으로 나타났으며 최대지반가속도 및 교각의 높이는 약 33% 및 55% 증가하였다. 즉, 각 불확실성 인자 사이의 교호작용 효과는 크게 작용하기 때문에 전역민감도 분석을 통해 불확실성 인자의 식별은 중요하며 현실적인 곡선 교량의 내진성능을 평가할 수 있는 것으로 보여진다.

(3) 본 연구는 곡선교량의 지진응답에 미치는 영향성 분석을 위한 기초적인 연구로써, 지진하중을 받는 단경간 교량의 I형 곡선 거더의 응력응답에 대한 전역 민감도 분석을 수행하였다. 입력운동의 불확실성에 대한 민감도 지수가 가장 큰 것으로 나타났기 때문에 입력운동의 개수 및 추가적인 IM을 고려하여 곡선 교량의 민감도 분석을 필요하며 거더의 개수 및 곡률반경과 같은 구조적 불확실성을 고려한 추가적인 연구는 필요하다.

Acknowledgement

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

References

[1] ABAQUS (2021). ABAQUS/CAE User`s Manual 2021; ABAQUS: Pawtucket, RI, USA.

[2] ACI Committe 318 (2007). ACI 318M-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Farmington Hills, MI, USA.

[3] Bavaghar, Y., Bayat, M. (2017). “Seismic fragility curves for highly skewed highway bridges.” Journal of Vibroengineering, Vol. 19, No. 4, pp. 2749-2758.

[4] 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, USA.

[4] 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.

[5] Jeon, J., Ju, B.S., Son, H. (2018). "Seismic fragility of I-shape curved steel girder bridge using machine learning method." Journal of the Korea Society of Disaster Information, Vol. 18, No. 4, pp. 899-907.

[6] 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, pp. 121-143.

[7] Jeon, J.S., Mangalathu, S., Song, J., Desroches, R. (2019). "Parameterized seismic fragility curves for curved multi-frame concrete box-girder bridges using bayesian parameter estimation." Journal of Earthquake Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 954-979.

[8] 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.

[9] Kim, J.S., Shin, J.H. (2009). "Mechanical properties of concrete with statistical variations." Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No. 6. pp. 789-796.

[10] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D. (2008). Global Sensitivity Analysis: The Primer. John Wiley & Sons. New Jersey, USA.

[11] 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.

[12] Sobol, I.M. (1993). "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models." Mathematical Modelling and Computational Experiments, Vol. 1, pp. 407-414.

[13] Tian, W. (2013). "A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis." Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 20, pp. 411-419.

[14] Wang, W., Li, Z., Shafieezadeh, A. (2021). "Seismic response prediction and variable importance analysis of extended pile-shaft-supported bridges against lateral spreading: Exploring optimized machine learning models." Engineering Structures, Vol. 236, 112142.

[15] Xiao, S., Lu, Z. (2017). "Structural reliability sensitivity analysis based on classification of model output." Aerospace Science and Technology, Vol. 71, pp. 52-61.

[16] Yoo, Y.S., Yi, D.H., Kim, S.S., Park, C.S. (2020). "Rational bulding energy assessment using global sensitivity analysis." Jornal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 36, No. 5, pp. 177-185.

[17] Zhang, X.Y., Trame, M.N., Lesko, T.J., Schmidt, S. (2015). "Sobol sensitivity analysis: A tool to guide the development and evaluation of systems pharmacology models." CPT: Pharmacometrics & Systems Pharmacolohy, Vol. 4, No. 2, pp. 69-79.