

강재 재료 불확실성을 고려한 I형 곡선 거더 교량의 경주 지진 기반 지진 취약도 분석

Seismic Fragility Analysis based on Material Uncertainties of I-Shape Curved Steel Girder Bridge under Gyeongju Earthquake

전준태¹ · 주부석^{2*} · 손호영³Juntai Jeon¹, Bu-Seog Ju^{2*}, Ho-Young Son³¹Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, Republic of Korea²Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea³Ph. D Candidate, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea

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

ABSTRACT

Purpose: Seismic safety evaluation of a curved bridge must be performed since the curved bridges exhibit the complex behavior rather than the straight bridges, due to geometrical characteristics. In order to conduct the probabilistic seismic assessment of the curved bridge, Seismic fragility evaluation was performed using the uncertainty of the steel material properties of a curved bridge girde, in this study. **Method:** The finite element (FE) model using ABAQUS platform of the curved bridge girder was constructed, and the statistical parameters of steel materials presented in previous studies were used. 100 steel material models were sampled using the Latin Hypercube Sampling method. As an input ground motion in this study, seismic fragility evaluation was performed by the normalized scale of the Gyeongju earthquake to 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, and 1.5g. **Result:** As a result of the seismic fragility evaluation of the curved girder, it was found that there was no failure up to 0.03g corresponding to the limit state of allowable stress design, but the failure was started from 0.11g associated with using limit state design. **Conclusion:** In this study, seismic fragility evaluation was performed considering steel materials uncertainties. Further it must be considered the seismic fragility of the curved bridge using both the uncertainties of input motions and material properties.

Keywords: Curved Bridge, Seismic Fragility, FE Model, Material Uncertainties, Latin Hypercube

요약

연구목적: 곡선 교량은 기하학적 특성으로 직선교량에 비해 복잡한 거동을 보이기 때문에 지진 안전성 평가가 반드시 이루어져야 한다. 본 연구에서는 곡선 거더를 갖는 교량의 강재 재료 특성의 불확실성을 고려한 지진 취약도 평가를 수행하였다. **연구방법:** I형 곡선 거더를 갖는 교량의 유한요소 모델을 구축하였으며 선행연구에서 제시된 강재 특성의 통계적 매개변수를 이용하였다. 라틴 하이퍼큐브 기법을 이용하여 100개의 강재 재료 모델을 샘플링하였다. 경주지진의 지반가속도를 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g로 scale을 변화시켜 지진 취약도 평가를 수행하였다. **연구결과:** 곡선거더의 지진 취약도 평가결과 한계상태가 190MPa일 때 0.03g 파괴가 시작되었으며 한계상태가 315MPa일 때 0.11g를 초과하면서 파괴가 시작되는 것으로 나타났다. **결론:** 본 연구에서는 재료 불확실성을 고려한 지진 취약도 평가를 수행하였으며 추후 연구에서는 지진파의 불확실성과 재료의 불확실성을 동시에 고려한 지진 취약도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 곡선교량, 지진 취약도, 유한요소 모델, 재료 불확실성, 라틴 하이퍼큐브

Received | 10 September, 2021

Revised | 4 November, 2021

Accepted | 11 November, 2021

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.

서론

교량은 유기적인 교통을 위한 필수적인 요소로 지형적, 경제적 문제로 인해 종종 곡선 거터를 갖는 교량으로 건설되어진다. 곡선 거터는 기하학적 특성으로 직선 거터에 비해 매우 복잡한 거동을 보여 다양한 연구자들이 곡선 거터의 유한요소 모델 및 거동 평가에 대한 연구를 수행하였다(Lee et al., 1993; Jeon et al., 2018; Kim et al., 2005; Dong et al., 2010). 교량과 같은 대형 토목구조물은 지진과 같은 재연재해에 빈번하게 노출될 수 있으며 지진에 피해를 입을 경우 대피 시간 및 복구 시간의 지연 등으로 2차 피해가 발생할 수 있다. 따라서 많은 연구자들이 곡선교량의 지진 안전성 평가에 관한 연구들을 수행하였다.

Wieser et al.(2014)의 연구에서 2:5 스케일의 곡선 고속도로 교량을 대상으로 대규모 진동대 실험을 수행하여 곡선 교량의 동적거동을 분석하였다. 교대의 충격에 의한 거동을 조사하였으며 실험 중 입력 하중의 불확실성이 관측되어 수치해석 모델을 통한 추가 분석이 필요하다고 언급하였다. Bavaghar et al.(2017)는 교량의 다양한 성능 수준에 대한 지진 취약도 곡선을 개발하기 위해 60도 뒤틀린 다중 경간을 갖는 콘크리트 거터 교량의 상세한 유한요소 모델을 개발하였다. 비선형 동적 해석을 수행하였으며 PGA 범위가 다른 14개의 기록 지진을 사용하여 지진 취약도 곡선을 개발하였다. Seo et al.(2017)은 지진에 의한 곡선형 강교의 확률론적 복원 비용 추정을 위해 교량의 불규칙성, 피해율의 변동성 등의 불확실성을 설명하는 프레임워크를 개발하였다. 이 연구에서 곡률반경이 다른 곡선 강재 교량의 지진 취약도 곡선을 개발하고 교량에 대한 확률론적 복구비용을 추정하였다. Guo et al.(2019)은 수동 제어 장치 유무에 따른 곡선형 교량의 지진 취약도 평가를 수행하였으며 지진의 불확실성을 고려하기 위해 80개의 기록 지진을 적용하였다. 결과적으로 1초주기 스펙트럼 가속도가 곡선형 교량에 대한 최적의 강도측정임을 보여주며 수동제어 장치가 있는 교량에서 가장 취약성이 낮은 구성요소는 기둥인 것으로 나타났다.

지진의 불확실성을 고려한 지진 취약도 평가 이외에 콘크리트, 강재 등의 재료 불확실성과 스패의 길이, 곡률반경 등의 기하학적 불확실성을 고려한 지진 취약도 평가도 이루어지고 있다. Jeon et al.(2016)은 곡선 거터를 갖는 다경간 콘크리트 박스 거터 교량의 지진 응답 및 취약도에 대한 수평곡률, 곡률반경, 교각의 높이 등과 같은 기하학적 매개변수의 영향성에 대한 연구를 수행하였다. 대부분의 기하학적 매개변수는 일부 구성요소의 취약성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났지만 전체 교량 시스템의 취약성에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. Jeon et al.(2019)의 연구에서 캘리포니아의 곡선교를 대상으로 지진 취약도 평가를 위한 베이지안 매개변수 추정 방법을 제안하였다. 이 연구에서 지진의 불확실성뿐만 아니라 교량의 재료 및 기하학적 불확실성을 고려하였으며 베이지안 매개변수 접근법을 통해 지진 취약도 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 I형 거터를 갖는 곡선교량의 강재 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석을 수행하기 위해 곡선교량의 유한요소 모델을 구축하였으며 선행연구에서 분석된 강재에 대한 재료 불확실성의 통계적 매개변수를 이용하여 100개의 강재 재료 모델을 샘플링하였다. 입력지진의 경우 Jeon et al.(2020)의 연구에서 I형 거터 곡선 교량이 고주파 지진에 민감한 것으로 나타난 것을 고려하여 경주지진을 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g로 scale을 변화하여 유한요소 해석을 수행하였다.

곡선 교량의 유한요소 모델 및 재료 불확실성

유한요소 모델

Jeon et al.(2018)의 연구에서 거터의 정적하중에 의한 휨 모멘트에 대해 이론해와 수치해석 결과를 비교하여 모델의 유의성을 검토하였다. 따라서 본 연구에서 곡선 거터의 유한요소 모델은 Fig. 1과 같으며 Jeon et al.(2018)의 연구에서 사용된 모

델을 적용하였다.

ABAQUS Platform(2021)을 이용하여 유한요소 모델을 구축하였으며 거더의 경우 W10×49 단면으로 곡률반경 $R=6.096\text{m}$, 중심각 $\theta=42.97^\circ$ 이고 탄성계수 $200,000\text{MPa}$, Poisson's Ratio=0.3, 단위중량 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ 을 적용하였다. 거더의 재료는 SM490C가 사용된 것으로 가정하였으며 강재의 불확실성을 고려한 재료 모델은 다음 절에서 자세히 다루도록 한다.

교각은 기둥 단면의 직경 0.4m, 코핑부의 단면 $0.2\text{m}\times 0.2\text{m}$ 을 갖는 T형 교각으로 가정하였다. 콘크리트 교각으로 탄성계수 $27,000\text{MPa}$, Poisson's Ratio=0.167, 단위중량 $\rho=2640\text{kg/m}^3$ 을 적용하였다. 거더와 교각에 사용된 요소는 각각 4절점 Shell 요소 S4R, 2절점 Beam 요소 B31 이며 사용된 총 요소와 노드의 수는 각각 117,760개, 118,657개 이다.

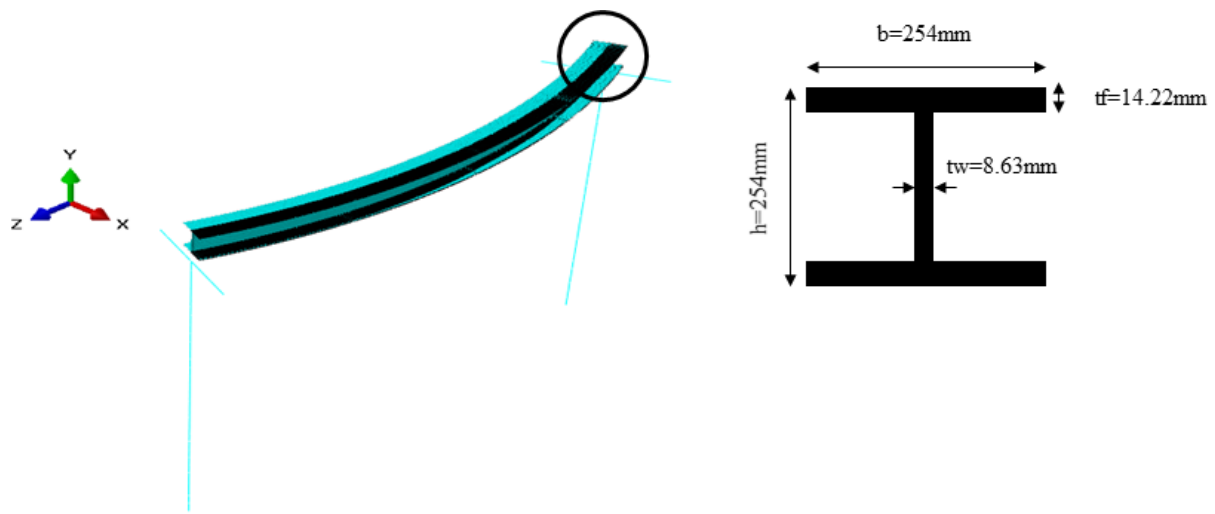


Fig. 1. Finite Element Model of I-Shape Girder Curved Bridge

강재의 재료 불확실성

본 연구에서는 강재의 재료 불확실성에 따른 I형 곡선 거더 교량의 지진 취약도 분석을 위해 거더의 재료를 SM490C로 가정하였다.

강재의 대표적인 재료 불확실성은 항복강도 σ_y 와 인장강도 σ_u 가 있으며 재료 불확실성의 통계적 매개변수는 Kim et al.(2000)의 연구에서 조사된 자료를 사용하였다. Kim et al.(2000)은 용접구조용 압연강재인 SM490의 기계적 성질과 화학성분에 대한 통계조사를 수행하여 각 성질 사이의 상관관계와 항복점의 상한치를 제안하였다. 이 연구에서 SM490C는 주로 교량용으로 사용되는 것으로 언급되었으며 Table 1과 같이 두께 t 가 16mm 이하에 대한 통계적 매개변수를 제시하였다.

Monte-Carlo Simulation 기반의 변수 샘플링은 이론적으로 정해를 얻을 수 있으나 매우 많은 수의 샘플링 횟수가 필요하다는 단점이 있어 비교적 작은 샘플링 횟수로도 전 범위에 걸쳐 고르게 분포할 수 있는 Latin Hypercube Sampling(LHS) 기법을 이용하여 Fig. 3과 같이 항복강도와 인장강도를 각각 100개씩 샘플링 하였다. 유한요소 모델에 구축에 사용된 강재의 재료 모델은 Kinematic Hardening 모델이며 Fig. 2와 같이 bi-linear로 적용되었다. 샘플링된 항복 및 인장 강도를 Fig. 2의 재료 모델에 적용하여 Fig. 4와 같이 100개의 응력-변형률 곡선을 작성하였다.

Table 1. Statistical parameters of SM490C Material ($t \leq 16\text{mm}$)

구분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
평균 (μ)	405	557
표준편차 (σ)	39	19

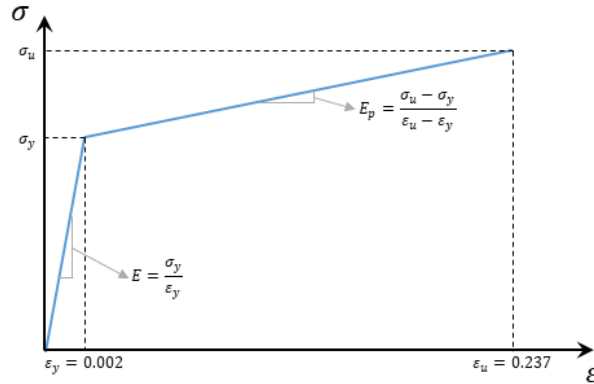
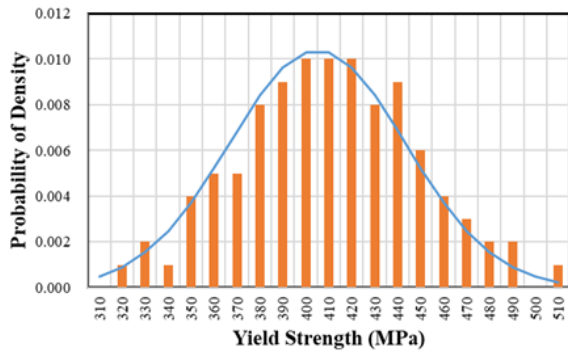
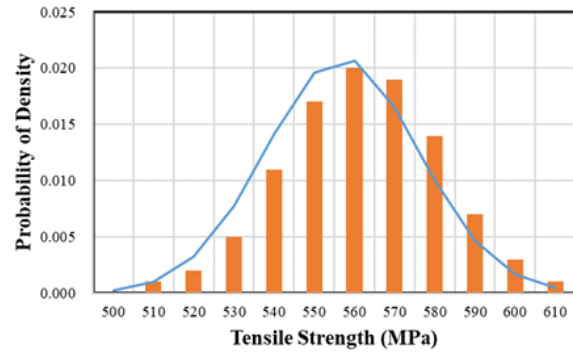


Fig. 2. Stress-strain curve of steel material



(a) Yield strength



(b) Tensile strength

Fig. 3. Steel material uncertainties sampling

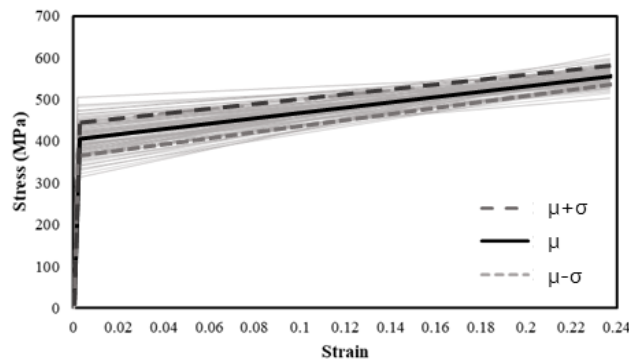


Fig. 4. Stress-strain curves sampled using LHS

지진 취약도 분석

취약도 정의

취약도 분석은 원자력 발전소의 구성요소가 지진에 의해 손상될 확률을 조건부 확률함수로 정의하기 위해 연구되었다. 불확실성을 내포하고 있는 외부 자극 X 가 특정 값 x 일 때 구조물의 응답 D 가 정해진 한계상태 d 를 초과할 조건부 확률로써 일반적으로 대수정규누적분포 함수로 표현될 수 있다. X 는 지진파의 불확실성, 재료의 불확실성, 기하학적 불확실성 등을 내포할 수 있으며 본 연구에서는 강재 재료의 불확실성을 고려하여 경주지진 기반의 지진 취약도 평가를 수행하였다. 일반적인 취약도 함수는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_d = (x) = P[D \geq d | X = x] = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_d)}{\beta_d}\right) \tag{1}$$

여기서, $\Phi(\cdot)$: 대수정규 누적분포 함수

θ_d : 대수정규 누적분포 함수의 평균 값

β_d : 대수정규 누적분포 함수의 표준편차

입력지진

Oh et al.(2016)의 연구에서 경주 지진은 5Hz~10Hz 사이의 고주파 영역에 탁월진동수가 존재하는 고주파 지진으로 언급되었으며 Jeon et al.(2020)의 연구에서 I형 곡선 거더를 갖는 교량이 고주파 지진에 민감한 것으로 나타났다. 이를 고려하여 본 연구에서는 2016년 발생한 경주지진을 기반으로 취약도 평가를 수행하였다. 울산관측소에서 계측된 경주지진의 시간이력 데이터는 Fig. 5와 같으며 x, y, z 축의 최대지반가속도(PGA)는 각각 0.443g, 0.226g, 0.391g이다. Fig. 5의 경주지진을 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g의 scale로 적용하여 시간이력해석을 수행하였다.

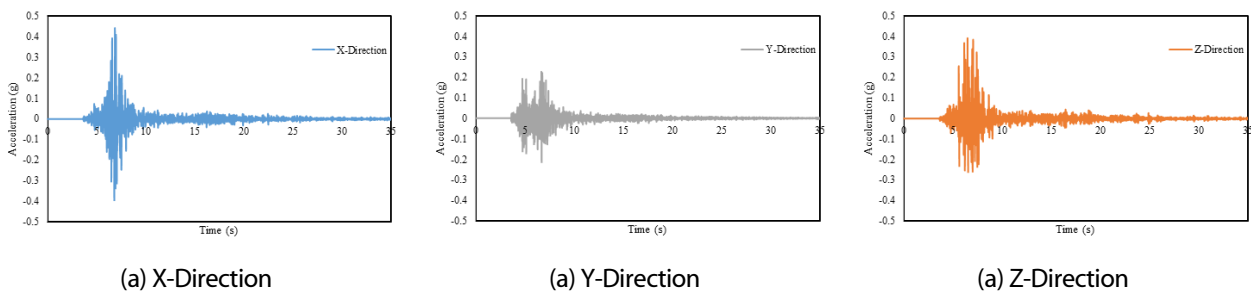


Fig. 5. Gyeongju earthquake time history

강재 재료 불확실성에 따른 지진 취약도 분석

강재 재료 불확실성에 따른 거더의 응력 응답 분포를 분석하기 위해 PGA 수준에 따라 Box Plot 형태로 Fig. 6과 같이 나타내었다. 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g에서 거더 응력의 평균 값은 각각 290.79MPa, 369.07MPa, 413.94MPa, 477.12MPa,

530.32MPa로 발생하였다.

앞선 절에서 취약도는 구조물의 응답이 특정 한계상태를 넘어서는 것에 대한 조건부 확률로 정의되었으며 본 연구에서는 I형 곡선 거더의 응답에 대한 취약도 분석을 수행하기 위해 도로교 설계기준에서 제시하고 있는 강재의 허용응력 및 항복응력을 한계상태로 정의하였다. 도로교 설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에서 SM490의 허용응력은 190MPa(Allowable Stress Design, ASD)로 제시하고 있으며 도로교 설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)의 경우 한계상태 설계법을 적용함에 따라 SM490의 항복응력을 315MPa(Limit State Design, LSD)로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 거더에서 발생하는 응력응답의 한계상태를 190MPa와 315MPa로 정의하여 강재 재료 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석을 수행하였다.

지진 취약도 분석을 수행한 결과 Fig. 7과 같이 한계상태가 190MPa(ASD)일 때 거더의 파괴는 약 0.03g를 넘어서면서 시작되는 것으로 나타났으며 315MPa(LSD)일 때 파괴는 약 0.11g를 초과하면서 시작되는 것으로 나타났다. 또한 한계상태가 190MPa(ASD)일 때 중앙값은 0.0907g, 한계상태가 315MPa(LSD)일 때 중앙값은 0.2725g 인 것으로 나타났다.

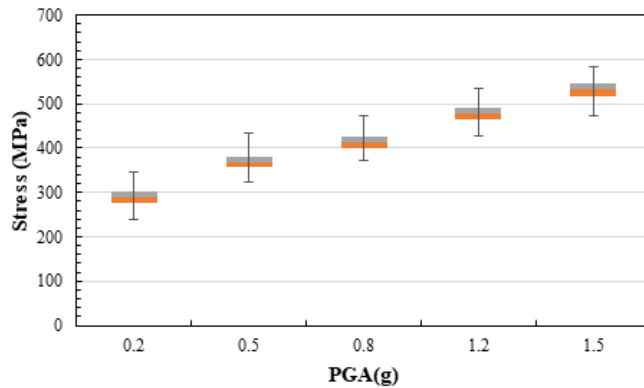


Fig. 6. Distribution of stress on girder in each PGA level

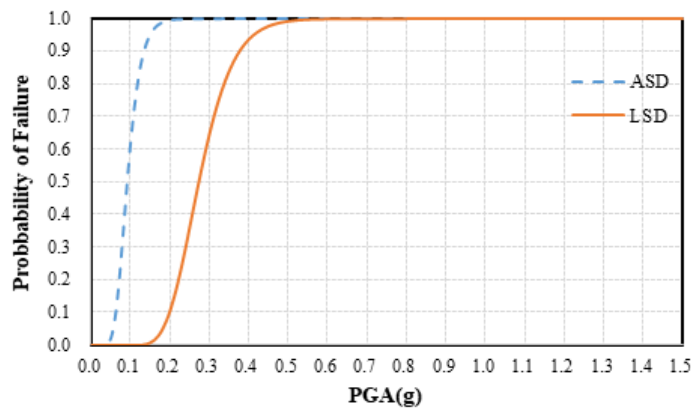


Fig. 7. Gyeongju Earthquake Time History

결론

본 연구는 I형 곡선 거더를 갖는 단경간 교량의 강재의 재료 불확실성을 고려한 지진 취약도 분석을 수행하였다. 재료 불확실성의 통계적 매개변수는 선행연구를 참고하였으며 LHS 기법을 이용하여 재료 불확실성을 샘플링하였다. 경주지진을 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g로 Scale을 변화시켜 시간이력해석을 수행하였으며 도로교설계기준에서 제시하고 있는 SM490 강재의 허용응력 및 항복응력을 기준으로 지진 취약도 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SM490C의 통계적 매개변수는 Kim et al.(2000)의 연구를 참고하였으며 강재의 재료 불확실성을 항복강도와 인장강도로 정의하였다. LHS 기법을 이용하여 100개의 강재 재료 불확실성을 샘플링하였을 때 항복강도와 인장강도가 정규 분포를 따르는 것으로 나타났으며 샘플링된 100개의 항복 및 인장강도를 이용하여 Kinematic Hardening을 적용한 bi-linear 모델로 100개의 재료 모델을 작성하였다.
- 2) Jeon et al.(2020)의 연구에서 I형 거더가 고주파 지진에 민감하게 반응하는 것을 고려하여 경주지진의 Scale을 변화하여 시간이력해석을 수행하였으며 PGA 수준에 따른 거더의 응력 응답 분포의 평균은 각각 290.79MPa, 369.07MPa, 413.94MPa, 477.12MPa, 530.32MPa로 발생하였다.
- 3) 한계상태의 경우 도로교설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)의 SM490에 대한 허용응력인 190MPa와 도로교설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)의 SM490에 대한 항복응력인 315MPa로 정의하였다. 한계상태가 190MPa일 때 약 0.03g를 초과하면서 손상이 발생하기 시작하여 0.2g에서 모든 거더가 한계상태를 초과하는 것으로 나타났으며 한계상태가 315MPa일 때 약 0.11g에서 손상이 발생하여 0.5g를 넘어서면서 모든 거더에서 한계상태를 초과하는 것으로 나타났다.
- 4) 추후연구에서는 지진파의 불확실성과 재료의 불확실성을 동시에 고려한 지진 취약도 분석이 필요할 것으로 판단되며 다중 곡선 거더를 갖는 교량의 지진 취약도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

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

References

- [1] ABAQUS Ver. (2021). Dassault Systems.
- [2] Bavaghar, Y., Bayat, M. (2017). "Seismic fragility curves for highly skewed highway bridges." *Journal of Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 2749-2758.
- [3] Dong, J., Sause, R. (2010). "Finite element analysis of curved steel girder with tubular flange." *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 319-327.
- [4] Guo, J., Zhong, J., Dang, X., Yuan, W. (2019). "Influence of multidirectional cable restrainer on seismic fragility of a curved bridge." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 1-13.
- [5] 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.

- [6] Jeon, J., Ju, B.S., Son, H. (2020). "Seismic fragility analysis of curved bridge under high frequency earthquakes." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 6, pp. 806-812.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kim, B.G., Sause, R. (2005). "High performance steel girders with tubular flanges." *International Journal of Steel Structure*, Vol. 5, No. 3, pp. 253-263.
- [10] 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.
- [11] Lee, W.H., Jeon, J.T. (1993). "A study on the torsional constant ratio of continuous curved girder bridges by transfer matrix method." *Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 5, pp. 169-180.
- [12] Oh, S.H., Shin, S.H. (2016). "Correlation analysis of gyeongju earthquake waveform and structural damage scale." *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, Vol. 32, No. 12, pp. 33-44.
- [13] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). *Korean Highway Bridge Design Code*.
- [14] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). *Korean Highway Bridge Design Code*.
- [15] 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.
- [16] Wieser, J.D., Maragakis, E.M., Buckle, I.G. (2014). "Experimental evaluation of seismic performance of seat-type abutments in a curved highway bridge." *Proceedings of the Tenth National Conference in Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 1-11.