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

Journal of the Society of Disaster Information
Vol. 15, No. 4, pp. 626-633, December 2019
https://doi.org/10.15683/kosdi.2019.12.31.626

Original Article

거더 단면형상 변화에 따른 곡선교량의 지진 취약도 분석

Seismic Fragility Analysis of Curved Bridge Structure by Girder Section Shape

전준태[1] · 주부석[2]* · 손호영[3]
Juntai Jeon[1], Buseog Ju[2]*, Hoyoung Son[3]

[1]Professor, Department of Civil&Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, Republic of Korea
[2]Professor, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea
[3]Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Yongin, Republic of Korea

*Corresponding author: Buseog Ju, bju2@khu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The primery objecting of this paper is to explore the seismics fragility of curved bridge based on the change of girder section. **Method:** The cross section of the bridge structure was constructed with I, T, and Box shapes and then, in order to perform the seismic fragility 24 seismic ground motions were used, including Gyeongju Pohang Earthquake. **Result:** Fist, T-Shape of the bridge strucrue was much fragility in terms of the stress on girder section, in comparison to the other shapes. The seismic fragilies of the structures with respect to displacement(drift ratio), however, were shown simialr. **Conclusion:** In other to wvaluation the seismic fragility of curved structure using different girder shapes, analytical models of the structure were constructed and then, the probability failure of box-shape girder was shown lower probability. In further, Parametric studies of curved structures must be conducted.

Keywords: Curved Bridge, Seismic Fragility, Section Shape, Finite Element Model, Gyeongju and Pohang

요 약

연구목적 : 동일한 단면 2차 모멘트를 갖는 곡선 거더의 형상 변화에 따른 곡선 교량의 확률론적 안전성 평가인 지진 취약도 평가를 수행하고자 한다. **연구방법 :** I, T, Box Shape 단면을 갖는 곡선 교량을 유한요소 모델로 구축하였으며 경주 및 포항지진을 포함하여 24개의 입력지진을 적용하여 지진 취약도 평가를 수행하였다. **연구결과 :** 거더의 응력에 대한 지진 취약도의 경우 T-Shpae 거더에서 가장 큰 파괴확률이 나타났으며 수평변위에 대한 지진 취약도의 경우 3개의 곡선 교량에서 비슷하게 발생하는 것으로 나타났다. **결론 :** 3개의 곡선 교량에 대한 지진 취약도 분석을 수행하였으며 비틀림 저항이 가장 큰 Box-Shape 거더의 파괴확률이 가장 낮은 것으로 나타났다. 추후 연구에서는 추가적인 매개변수를 고려하여 지진 취약도 평가를 수행하고자한다.

핵심용어: 곡선교량, 지진 취약도, 단면형상, 유한요소모델, 경주 및 포항지진

Received | 8 November, 2019
Revised | 18 November, 2019
Accepted | 24 December, 2019

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.

서 론

교통 시스템의 내진성능은 지진이 발생하였을 때 피해복구 및 관리에 중요한 역할을 차지하며 1995년 Kobe 지진으로 인해 교통 시스템의 파손으로 인해 화재진압 및 실종자 수색 등의 피해복구와 구조활동이 지연되었다(Tanaka et al., 2000). 이러한 교통 시스템 중 교량은 교통의 유기적인 흐름을 위해 중요한 역할을 수행하며 사회가 발전함에 따라 사회 구성원의 빠른 이동 및 물류의 원활한 유통에 필수적인 역할을 한다. 산악지역 및 하천 등으로 인한 공간적 제약 및 경제적 제약으로 교량은 종종 곡선형으로 설치되는 경우가 발생하며 곡선형 교량의 경우 형상적 특성으로 인한 비틀림으로 거동이 비교적 복잡하다. Lee et al. (1993)은 곡선형교의 순수비틂과 뒴비틂의 비를 비틂정수비의 변화에 따라 분석하였으며 단면형상에 따른 비틂정수비의 한계치를 분석하였다. Jeon (2018)은 정사각형 단면을 갖는 곡선 거더를 유한요소 모델로 구축하여 이론해와 해석결과를 비교하여 구축된 모델을 검증하였으며 경주지진을 적용하여 시간이력 해석을 통한 안전성 평가를 수행하였다. 이외에도 다양한 연구자들이 곡선거더의 거동에 대한 연구를 수행하였다(Kim et al., 2005; Dong et al., 2010).

교량은 자연재해에 의한 피해가 발생할 확률이 높으며 특히 지진의 경우 앞서 언급한 바와 같은 지진으로 인해 많은 도로 및 교량이 손상되었고 이로 인해 후속복구가 늦어져 추가 피해가 발생하였다. 미국에서 San Fernando 지진으로 인해 고속도로의 교량이 손상되어 많은 피해가 발생하였으며 국내에서는 지난 2017년 포항 지진으로 인해 몇몇 교량의 신축이음이 손상되거나 교좌받침이 손상되는 사고가 보고되었다. Kennedy et al. (1984)는 원자력 발전소 내부 구성요소의 지진에 의한 손상을 예측하기 위해 확률론적인 방법으로 평가하기 위해 지진 취약도 개념을 도입하였으며 이후 많은 연구자들이 구조물의 지진 피해 예측을 위해 지진 취약도 분석을 수행하였다. Jeon et al. (2018)은 I-Shpae 단면을 갖는 곡선 거더의 유한요소 모델을 구축하고 경주 및 포항 지진을 포함하여 20개의 지진을 입력 지진으로 지진 취약도평가를 수행하였다. 직선 교량에 대한 내진성능 평가 및 지진 안전성 평가에 비해 곡선 교량에 대한 내진성능평가 및 안전성 평가에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 거더의 단면 형상 변화에 따른 곡선교량의 지진 취약도 분석을 위해 동일한 단면 2차 모멘트의 I-Shape, T-Shape, Box-Shape 단면을 갖는 곡선교량을 ABAQUS Platform을 이용하여 유한요소 모델로 구축하였다. 경주 및 포항 지진을 포함하여 지진파의 불확실성을 고려한 24개의 입력 지진을 선정하였으며 시간이력 해석을 통해 동적 거동 특성을 분석하였다. 마지막으로 입력 지진을 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g 스케일로 변화 시켜 시간이력 해석을 수행하였고 해석결과를 바탕으로 확률론적 안전성 평가인 지진 취약도 평가를 수행하였다.

유한요소 모델 및 해석

곡선 교량의 유한요소 모델

본 연구에서는 거더의 단면형상 변화에 따른 곡선 교량의 해석적 지진 취약도 분석을 위해 ABAQUS Platform (Ver. 2007)을 이용하여 I-Shape, T-Shape, Box-Shape의 곡선 거더를 유한요소 모델로 구축하였다. 단면 형상 변화에 의한 거동을 분석하기 위해 Table 1과 같이 단면 2차 모멘트를 $I=9.296e^{-3}m^4$으로 동일하게 적용하였으며 R=6.096m, θ=42.97이며 사용된 재료는 일반적인 강재의 물성치를 이용하여 선형탄성 유한요소 모델을 구축하였다.. 거더의 유한요소 모델은 4절점 Shell요소(S4R)을 사용하여 모델링 되었으며 각 거더의 유한요소 모델에 사용된 요소 및 절점의 개수는 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Characteristic of Curved Girder

Moment of Inertia (m^4)	Radius (m)	Angle	Elastic Modulus (MPa)	Poisson`s Ratio	Density (kg/m^3)
9.296e-3	6.096	42.97	200,000	0.3	7850

Table 2. Elements Properties of Curved Girder Model

Properties Girder Type	Element Type	Number of Elements	Number of Nodes
I-Shape	S4R	117,760	118,657
T-Shape		78,720	76,856
Box-Shape		266,240	267,904

교각의 유한요소 모델의 경우 일반적인 T형 교각으로 가정하여 총 길이는 3m, 기둥의 단면은 0.2π, 코핑부의 단면은 0.2m × 0.2m 이며 교각의 단위중량은 2640kg/m^3, 탄성계수는 27,000MPa, 포아송비는 0.167 이다. ABAQUS Platform에서 일반적으로 사용되는 Beam 요소인 3D 2Node Beam 요소(B31)를 사용하였으며 거더와 교각의 연결은 Hwang et al. (2001)의 연구에서 사용된 베어링 모델을 적용하였으며 적용된 모델은 아래 Fig. 1과 같다. 구축된 I-Shape, T-Shape, Box-Shape 곡선 교량의 유한요소 모델은 Fig. 2에 정리하여 나타내었다.

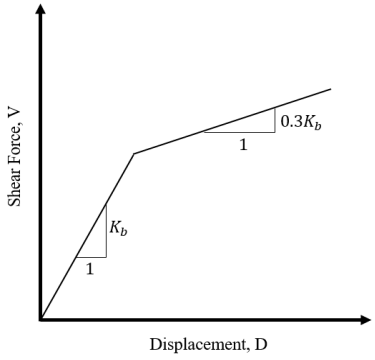
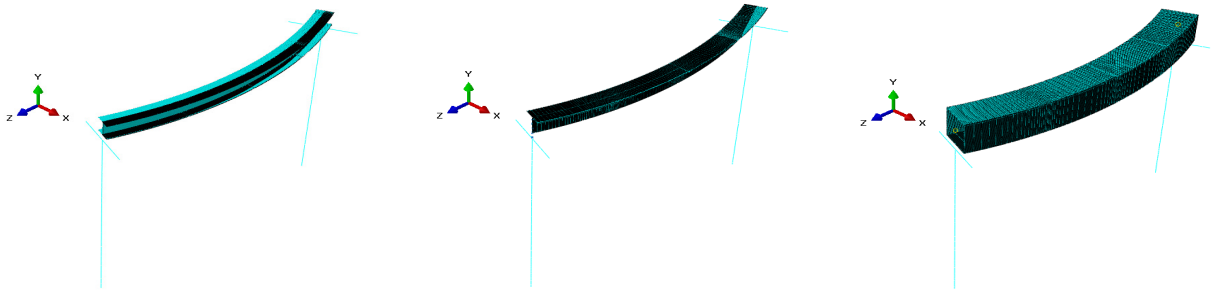


Fig. 1 Finite Element Model of Curved Girder (Hwang et al, 2001)



(a) I-Shape (b) T-Shape (c) Box-Shape

Fig. 2 Finite Element Model of Curved Bridge

동적 특성 분석

구축된 유한요소 모델의 동적 특성을 분석하기 위해 Eigenvalue 해석을 수행하였으며 각 모델의 모드별 진동수를 Fig. 3에 정리하여 나타내었다. I-Shpae 교량의 경우 3차 모드가 질량 참여율이 63.62%로 가장 지배적인 모드일 것으로 판단되며 이때 진동수는 12.19Hz이다. T-Shpae 교량의 경우 1차 모드에서 66.00%의 질량 참여율이 나타나 가장 지배적일 것으로 판단되며 이때 진동수는 4.95Hz로 나타났다. Box-Shape 교량은 T-Shape 교량과 유사하게 1차 모드에서 69.06%의 질량참여율이 발생하였으며 이때 진동수는 4.94Hz로 나타났다.

경주 및 포항지진을 포함하여 세계각지에서 발생한 24개의 입력지진을 선정하여 시간이력해석을 수행하였다. Table 3에는 각 지진파의 정보를 정리하여 나타내었으며 Fig. 4에는 각 지진파의 Spectral Acceleration을 나타내었다. 입력지진을 0.2g 스케일로 조정하여 시간이력해석을 수행하였으며 각 거더에서 발생한 응력을 Fig. 5에 정리하여 나타내었다. 전체적으로 T-Shape 교량에서 발생한 응력이 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 단면 형상에 의한 비틀림 저항이 T-Shape 거더가 가장 작기 때문인 것으로 판단된다. T-Shape과 Box-Shape 교량의 경우 지배적인 모드의 진동수 영역이 비교적 낮은 주파수 대역에 있어 고주파 지진의 영향보다 저주파 지진에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며 I-Shpae 거더의 경우 경주 및 포항 등의 고주파수 지진에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

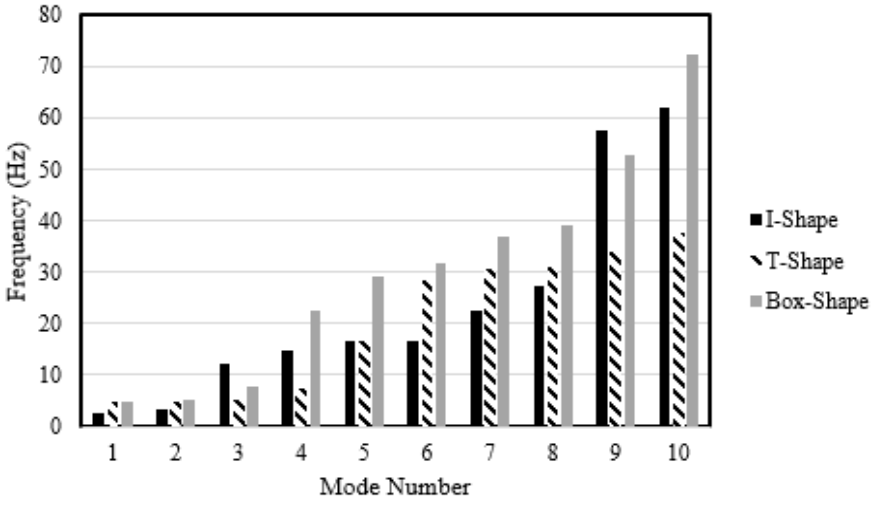


Fig. 3 Natural Frequency for Each Model

Table 3. Input Ground Motions

No.	Earthquake	Mw	PGA(g)	No.	Earthquake	Mw	PGA(g)
1	Northridge	6.7	0.3265	13	Loma Prieta	6.9	0.5285
2	Northridge	6.7	0.4820	14	Loma Prieta	6.9	0.3673
3	Duzce	7.1	0.2025	15	Manjil	7.4	0.4963
4	Hector Mine	7.1	0.2655	16	Superstiton Hills	6.5	0.3578
5	Imperial Valley	6.5	0.1449	17	Superstiton Hills	6.5	0.4463
6	Imperial Valley	6.5	0.3795	18	Cape Mendocino	7.0	0.1953
7	Kobe	6.9	0.5027	19	Chi-Chi	7.6	0.4401
8	Kobe	6.9	0.0587	20	Chi-Chi	7.6	0.5120
9	Kocaeli	7.5	0.3578	21	San Fernando	6.6	0.1359
10	Kocaeli	7.5	0.2188	22	Northridge	6.7	0.4157
11	Landers	7.3	0.1515	23	USN	5.8	0.4422
12	Landers	7.3	0.4169	24	Pohang	5.4	0.2830

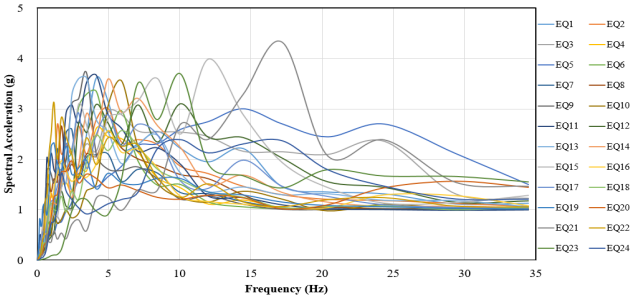


Fig. 4 Spectral Acceleration

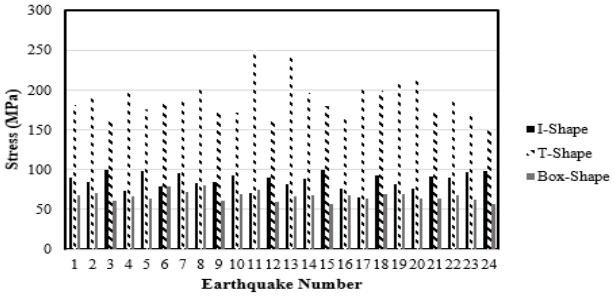


Fig. 5 Damage on 0.2g Scale Earthquake

지진 취약도 분석

지진 취약도의 정의

지진 취약도 분석은 지진으로 인해 발생되는 구조물의 응답이 정해진 한계상태를 초과하는 조건부 확률로써 Kennedy et al., (1984)의 연구에서 원자력 발전소 설비와 PGA의 상관관계를 확률함수로 정의하면서 연구되었다. 일반적인 지진 취약도 함수는 로그정규 누적분포 함수로 표현될 수 있으며 지진파의 불확실성, 재료의 불확실성 등을 고려하여 구조물의 지진 안전성 평가를 수행할 수 있다. 지진 취약도 분석에는 다양한 방법이 존재하며 본 연구에서는 해석모델을 기반으로 하는 해석적 지진 취약도 분석 방법을 이용하였으며 지진 취약도 함수는 일반적으로 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서, D : 특정 구성요소의 불확실한 손상상태

d : 한계상태, $d \in [1, 2, \cdots, N_d]$

X : 불확실성을 내포하는 외부 자극

x : X의 특정 값

θ_d : 로그정규 누적분포 함수의 평균 값

β_d : 로그정규 누적분포 함수의 표준편차

한계상태

지진 취약도 분석을 위해서는 구조물의 한계상태를 정의해야 한다. 한계상태는 구조물의 용도, 형태, 재료 등에 따라 다양하게 정의할 수 있으며 본 연구에서는 거더와 교각에 대한 한계상태를 사용하였다. 거더에 대한 한계상태의 경우 도로교 설계기준(2012)에서 제시하고 있는 SM490 강재의 허용응력인 190MPa (Korean Highway Bridge Design Code, 2012)로 정의하였으며 교각에 대한 한계상태의 경우 Table 4와 같이 Dutta (1999)의 연구에서 제시된 교각의 수평변위비로 정의하였다.

Table 4. Limit State of Pier

Limit State	Description	Criteria
No Damage	Limit of Drift Ratio to Pier Height (Δ/L)	0.005
Slight Damage		0.007
Moderate Damage		0.015
Extensive Damage		0.025
Complete Damage		0.050

곡선교량의 지진 취약도 분석

본 연구에서는 곡선교량의 지진 취약도 분석을 위해 24개의 입력 지진을 0.2g, 0.5g, 0.8g. 1.2g, 1.5g로 스케일을 변화시켜 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력 해석결과를 바탕으로 거더의 응력과 교각의 수평변위비에 대한 지진 취약도 분석을 수행하였다.

Fig. 6은 거더의 응력에 대한 지진 취약도이며 T-Shape 곡선 거더 교량의 경우 0.05g를 지나면서 급격하게 파괴확률이 증가하는 것으로 나타났다. I-Shape 곡선 거더 교량의 경우 0.2g를 넘어서면서 파괴가 시작되고 1.5g에서 대부분의 파괴가 발생하는 것으로 나타났으며 Box-Shape 곡선 거더 교량의 경우 비교적 완만한 기울기를 갖는 파괴확률이 나타났다. 이는 각 거더의 형상에 의한 비틀림저항에 기인한 것으로 판단된다.

Figs.7-9는 I-Shape, T-Shape, Box-Shape 곡선 거더 교량의 교각 수평변위비에 대한 지진 취약도 분석 결과 이다. 3개의 교량 모두 유사한 결과로 나타났으며 이는 교각의 형식 및 재료 등이 동일하며 상부에 위치한 거더의 스팬의 길이가 비교적 짧고 단일 스팬이기 때문에 교각에 미치는 영향이 미미하여 거의 유사한 결과가 발생한 것으로 판단된다.

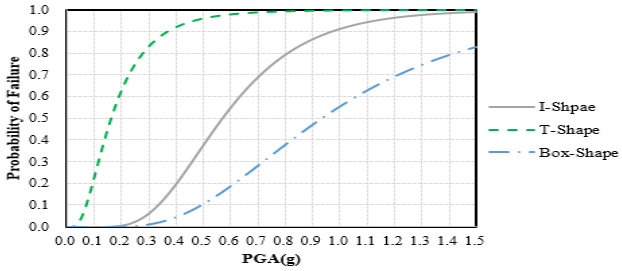


Fig. 6 Seismic Fragility on Stress

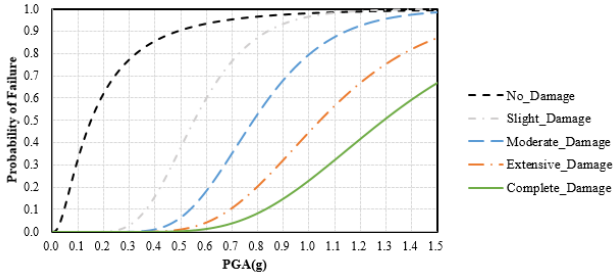


Fig. 7 Seismic Fragility on Drift Ratio of I-Shape

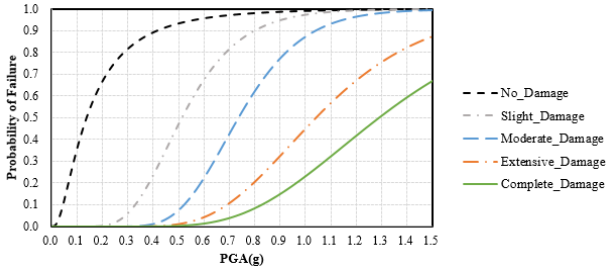


Fig. 8 Seismic Fragility on Drift Ratio of T-Shape

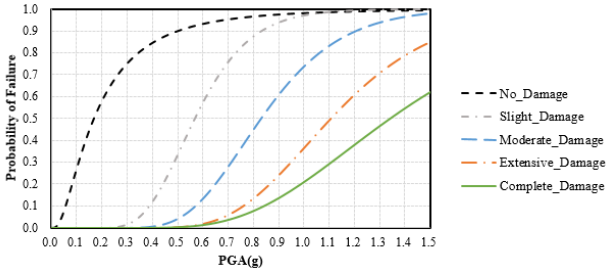


Fig. 9 Seismic Fragility on Drift Ratio of Box-Shape

결 론

본 연구에서는 곡선 거더 교량의 거더 형상변화에 따른 지진 취약도를 분석하기 위해 동일한 단면 2차 모멘트를 갖는 I-Shape, T-Shape, Box-Shape 곡선 거더 교량을 선형탄성 유한요소 모델로 구축하였다. 경주 및 포항 지진을 포함하여 24개의 입력지진을 선정하였고 스케일 변화를 통해 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 확률론적 안전성 평가인 지진 취약도 평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 각 곡선 거더 교량의 동적 특성을 분석하였을 때 T-Shape 및 Box-Shape 곡선 거더 교량의 경우 1차 모드가 지배적인 모드로 분석되었으며 이 때의 진동수는 각각 4.95Hz, 4.94Hz로 나타났다. I-Shape 곡선 거더 교량은 3차 모드가 가장 지배적인 모드로 분석되었으며 이 때의 진동수는 12.19Hz로 나타났다.

(2) 입력 지진을 0.2g 스케일로 조정하여 시간이력 해석을 수행하였을 때 모든 지진파에서 T-Shape 곡선 거더 교량의 응력 응답이 가장 크게 발생하였으며 이는 단면 형상에 따른 비틀림 저항에 기인한 것으로 판단된다. 또한 T-Shape 및 Box-Shape 곡선 거더 교량의 경우 저주파 지진에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며 I-Shape 곡선 거더 교량의 경우 고주파수 지진에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이것은 T, Box Shape 곡선 거더 교량의 경우 고유진동수 영역이 저주파수 대역에 존재하고 I-Shape 곡선 거더 교량의 경우 고주파수 영역에 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 거더에서 발생한 응력에 대한 지진 취약도 분석 시 단면 형상에 의한 비틀림 저항으로 인해 T-Shape 곡선 거더 교량의 파괴확률이 가장 크게 나타났으며 Box-Shape 곡선 거더 교량은 완만한 기울기를 갖는 파괴확률이 나타났다.

(4) 교각의 수평변위비에 대한 지진 취약도 분석 시 거의 유사한 결과가 발생하는 것으로 나타났는데 이는 교각의 형식, 길이, 재료 등이 동일하고 곡선 거더의 스팬 길이가 비교적 짧고 단일 스팬이기 때문에 교각에 미치는 영향이 미미하기 때

문인 것으로 판단된다.

(5) 추후연구에서는 곡선 거더에 영향을 미치는 추가적인 매개변수를 적용하여 곡선거더의 동적 영향성을 평가하고자하며 다중 스팬을 적용하였을 때 단면형상에 따른 지진 취약도 분석을 수행하고자 한다.

Acknowledgments

이 성과는 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1C1B1002855).

References

[1] ABAQU S Ver. 2017, Dassault Systems.

[2] Dong, J., Sause, R. (2010). “Finite Element Analysis of Curved Steel Girder with Tubular Flange.” Engineering Structures, Vol. 32, pp. 319-327.

[3] Dutta, A. (1999). On Energy Based Seismic Analysis and Design of Highway Bridge. Ph.D. Thesis, State University of New York at Buffalo, USA.

[4] Hwang, H., Liu, J.B., Chiu, Y.H. (2001). Seismic Fragility Analysis of Highway Bridge, Mid-America Earthquake Center Technical Report MAEC RR-4.

[5] Jeon, J.T. (2018). “Seismic Performance Evaluation of Curved Bridge by Gyeong-Ju Earthquakes.” Journal of the Society of Disaster Informantion, Vol. 14, No. 1, pp. 43-50.

[6] Jeon, J.T., Ju, B.S., Son, H.Y. (2018). “Seismics Fragility Analysis of Curved Beam with I-Shape Section.” Journal of the Korea Society of Disaster Informantion, Vol. 14, No. 3, pp. 379-386.

[7] Kennedy, R.P., Ravindra, M.K. (1984). “Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies.” Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47-68.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), Korean Highway Bridge Design Code.

[11] Tanaka, S., Kameda, H., Nojima, N., Shunsyke, O. (2000). “Evaluation of Seismic Fragility for Highway Transportation Systems”, World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 4, pp. 1-6.