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

Journal of the Society of Disaster Information
Vol. 16, No. 4, pp. 806-812, December 2020
https://doi.org/10.15683/kosdi.2020.12.31.806

Original Article

고주파 지진에 의한 곡선 교량의 지진 취약도 분석

Seismic Fragility Analysis of Curved Bridge under High Frequency Earthquakes

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

[1]Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical Coleage, 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: This is aimed to evaluate the seismic fragility of curved bridge structure with I-shape girder subjected to 12 high frequency ground motions based on Gyeongju earthquake. **Method:** The linear elastic finite element model of curved bridge with I-Shape cross section was constructed and them linear elastic time history analyses were performed using the 12 artificial ground motions. **Result:** It was found that displacement response(LS1, LS2) was failed after PGA 0.1g and the stress response also showed failure after PGA 0.2g. **Conclusion:** The curved bridge with I-shape girder was sensitive to high frequency earthquakes.

Keywords: High Frequency Earthquakes, Curved Bridge, Seismic Fragility, Section Shape, Finite Element Model

요 약

연구목적: I-Shape 거더를 갖는 곡선교량의 지진 안전성에 미치는 고주파 지진의 영향성을 분석하기 위해 지진 취약도 평가를 수행하였다. **연구방법:** I-Shape 단면을 갖는 곡선교량의 선형탄성 유한요소 모델을 구축하고 고주파 영역의 인공지진파를 12개 생성하여 시간이력해석 및 지진 취약도 평가를 수행하였다. **연구결과:** 변위응답(LS1, LS2)에 대한 한계상태는 0.1g를 넘어서면서 파괴가 발생하였으며 거더의 응력응답 한계상태의 경우 0.2g를 넘어서면서 정해진 한계상태를 초과하는 것으로 나타났다. **결론:** 현재 구축된 곡선교량 모델의 경우 고주파 지진에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

핵심용어: 고주파 지진, 곡선교량, 지진 취약도, 단면형상, 유한요소모델

Received | 17 November, 2020
Revised | 10 December, 2020
Accepted | 17 December, 2020

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

국내에서 발생가능한 지진의 경우 고주파 성분이 많이 포함된 지진으로 연구되고 있으며 (Choi et al., 2003a; Choi et al., 2003b) 2016년과 2017년에 발생한 경주 및 포항 지진 또한 고주파 성분이 많이 포함된 지진이다. 2017년 포항지진으로 인해 일부 교량의 신축이음 혹

은 교좌받침이 손상되는 피해가 발생하였으며 Tanaka et al.(2000)의 연구에서 1995년 Kode지진으로 교통 시스템이 마비되어 소방 및 구조활동이 지연되었음을 언급하였다. 교량 구조물은 다양한 이유들로 곡선형으로 건설되는 경우가 종종 있으며 이러한 곡선형 교량의 경우 일반적인 직선형 교량 보다 형상 특성으로 인한 비틀림과 뒤틈림 등으로 인해 복잡한 거동 특성을 보인다. 곡선 교량은 직선 교량에 비해 정적 하중에 의한 거동 뿐만 아니라 동적 하중에 의한 거동이 상이할 수 있으므로 내진성능평가는 반드시 필요하다.

Abbasi et al.(2016)은 다중거더 교량에서 거더의 곡률, 교각의 높이, 데크의 불연속성 등의 다양한 불규칙성이 식별되므로 4개의 다른 곡률과 5개의 교각 높이 비를 고려하여 다중 거더를 갖는 4경간 곡선교량의 지진 취약도 평가를 수행하였다. 교량의 지진 취약성은 불규칙성이 증가할수록 커지는 것으로 나타났으며 구성 요소 및 시스템레벨의 취약성은 각각의 손상상태, 유형, 불규칙성 등에 서로 다른 민감도를 나타냈다. Movaghati et al.(2016)은 교각의 다축 지진하중 실험결과를 바탕으로 개선된 4경간 곡선형 교량의 수치 모델을 구축하였으며 개선되지 않은 수치 모델과 지진 취약도 평가 결과를 비교하였다. 이 연구에서 실험을 통해 개선되지 않은 수치 모델의 해석결과는 교량 시스템의 취약성을 과대평가 할 수 있으므로 실험결과를 바탕으로 수치모델이 개선되어야만 현실적인 교량 시스템의 지진 취약도 평가가 이루어질 수 있다고 언급하고 있다. Jeon et al.(2018)은 I-Shape 단면을 갖는 곡선 보의 유한요소 모델을 구축하고 이론해와 비교하여 모델을 검증하였으며 경주 및 포항 지진을 포함한 20개의 기록지진을 적용하여 지진 취약도 평가를 수행하였다. Shirazi et al.(2018)은 단일 거더를 갖는 1경간 곡선교량의 수평곡률이 지진응답에 미치는 영향성을 분석하기 위해 160개의 기록지진을 적용하여 지진 취약도 평가를 수행하였다. 결과적으로 곡률이 증가함에 따라 구성요소 및 시스템 레벨의 지진 취약성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 토양 상태와 지진의 스펙트럼 특성에 따라 취약도 매개변수가 변화하는 것을 관찰하였다. Feng et al.(2018)은 입력지진의 입사각 변화에 따른 곡선교량의 지진 취약도 평가에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 중국에서 일반적으로 발견할 수 있는 4경간 곡선 교량을 대상으로 연구를 수행하였으며 지진파의 입사각 변화에 따라 교량 구성요소의 지진 취약성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. Jeon et al.(2019a)는 곡선형 교량의 재료적, 기하학적 불확실성을 고려하여 베이지안 매개변수 추정 방법을 이용한 지진 취약도 평가를 수행하였다. 이 연구는 캘리포니아에서 일반적으로 발견되는 2개의 곡선교량을 대상으로 수행되었으며 곡선 교량의 곡률이 베어링과 접선방향 교각의 응답에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Jeon et al.(2019b)는 경주 및 포항을 포함한 24개의 기록 지진을 이용하여 곡선 교량의 거더 형상에 따른 지진 취약도 평가를 수행하였다. Box, I, T Shape 단면에 대한 지진 취약도 평가를 수행한 결과 Box Shape 단면의 비틀림 저항성이 다른 단면 보다 크기 때문에 취약성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

앞서 언급한 것과 같이 국내에서 발생 가능한 지진의 대부분은 고주파 성분이 많이 포함될 수 있으므로 고주파 지진에 의한 교량의 지진 안전성 평가가 필요하며 기하학적 특성으로 구조거동이 복잡한 곡선 교량에 대한 지진 안전성 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 I-Shape 단면의 거더를 갖는 1경간 곡선 교량의 유한요소 모델을 구축하였으며 경주 지진의 응답 스펙트럼을 포락하는 인공지진파를 생성하여 곡선 교량의 지진 취약도 평가를 수행하고자 한다.

곡선 교량의 유한요소 모델 및 동적특성

유한요소 모델

곡선 교량의 유한요소 모델은 Jeon et al.(2019b)의 연구에서 사용된 I-Shape 거더를 갖는 곡선교량을 이용하였다.

I-Shape 거더의 단면 2차 모멘트 I=9.296e^{-3}m^{4} 이며 Fig. 1과 같이 곡률 반경 R=6.096m, 중심각 α=42.97°이다. 거더의 재료특성은 일반적인 강재의 특성을 사용하였으며 ABAQUS Platform의 4절점 Shell요소인 S4R을 이용하여 모델링 하였다. 교각의 경우 콘크리트 T형 교각으로 가정하였으며 교각 단면의 직경은 0.4m, 코핑부의 단면은 0.2m × 0.2m으로 설정하였다. 재료특성의 경우 탄성계수 E=27,000MPa, Poisson`s Ratio=0.167, 단위중량은 2640kg/m^{3}을 사용하였으며 사용된 재료특성은 Table 1에 정리하였다. 유한요소 모델에 사용된 총 요소 수는 117,740개, 총 노드 수는 118,657이며 Table 2에 정리하여 나타내었다. 교각과 지반은 단단하게 고정되어 있는 것으로 가정하였으며 구축된 곡선교량의 유한요소 모델은 Fig. 2와 같다.

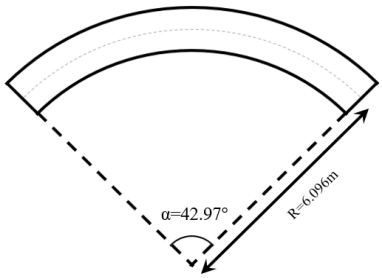

Fig. 1. Schematic design of curved girder

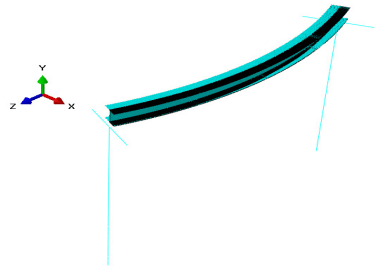

Fig. 2. Finite element model of curved bridge

Table 1. Material properties

Material	Elastic Modulus(MPa)	Poisson`s Ratio	Density(kg/m^{3})
Steel	200,000	0.3	7850
Concrete	27,000	0.167	2640

Table 2. Elements properties

Components	Element Type	Number of Elements	Number of Nodes
Girder	S4R	117,720	118,615
Pier	B31	40	42

동적 특성 분석

곡선 교량의 유한요소 모델을 이용하여 고유진동수 해석을 수행하였으며 수평방향의 질량 참여율을 분석하였을 때 3차모드에서 X축 방향의 질량 참여율이 63.6%, 5차모드에서 Z축 방향으로 유효 질량 참여율이 59.00%로 나타났다. 3차와 5차 모드가 가장 큰 유효 질량 참여율을 보이고 있어 가장 지배적인 모드일 것으로 판단되어 곡선교량의 첫 번째 고유주파수는 12.189Hz, 두 번째 고유주파수는 16.637Hz의 주파수 영역으로 결정하였다.

곡선 교량의 동적 거동에 미치는 고주파 지진의 영향성을 분석하기 위해 인공지진파를 생성하였다. 인공지진파는 국내에서 발생한 고주파 지진인 경주 지진과 유사한 진동특성을 갖으며 진동 지속시간 30초, 강진 지속시간 20초를 기반으로 구축하였다. Fig. 3에서 Required Response Spectrum(RRS)은 경주 지진파를 포락하고 있으며 생성된 12개의 인공지진파가

RRS를 포락하는 것을 확인하였다.

생성된 12개의 인공지진파를 0.2g Scale로 조정하여 곡선 교량의 유한요소 모델에 X와 Z방향으로 적용하여 시간이력 해석을 수행하였다. Fig. 4는 0.2g Scale의 지진파를 적용하였을 때 곡선 거더에서 발생한 최대 Von-Mises Stress를 정리하여 나타내었다. AE3의 인공지진파를 적용하였을 때 가장 큰 값인 157.16MPa가 발생하였으며 이것은 곡선 교량의 가장 지배적인 모드의 주파수 영역인 12.189Hz와 16.637Hz에서 AE3 인공지진파의 Spectral Acceleration 값이 가장 크게 때문인 것으로 판단된다.

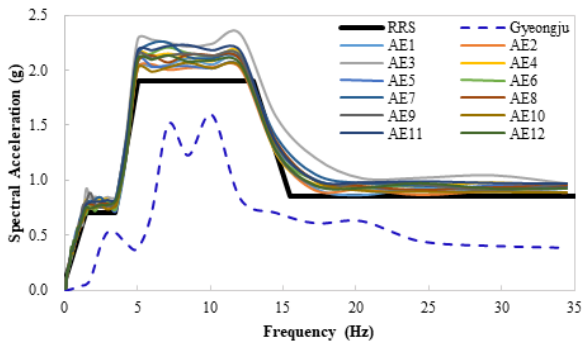

Fig. 3. Artificial earthquake design spectra

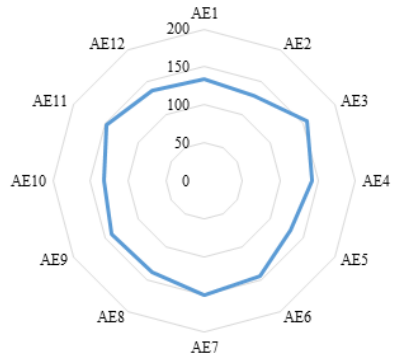

Fig. 4. Von-Mises stress of curved girder at PGA 0.2g

지진 취약도 분석

지진 취약도의 정의

지진 취약도 함수는 지진으로 인한 구조물의 안전성을 평가하기 위해 1980년대 이후로 계속적으로 연구되고 발전되어 왔다. 지진 취약도 분석 방법은 경험적, 해석적, 복합적 방법 등이 존재하며 본 연구에서는 해석적 연구를 기반으로 해석적 지진 취약도 분석을 수행하였다. 지진 취약도 함수는 식 (1)과 같이 로그정규분포로 표현될 수 있으며 재료특성, 외부자극의 특성 등의 불확실성을 고려하여 지진 취약도 평가를 수행할 수 있다.

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

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 함수는 외부자극에 의한 대상 구조물의 응답이 특정 한계상태를 초과할 수 있는 조건부 확률함수로 대상 구조물의 취약요소에 대한 한계상태 정의는 필수적이다. 본 연구에서는 곡선교량의 거더의 응력응답과 교각의 변위응답을 한계상태로 정의하였다. 거더의 응력응답에 대한 한계상태는 강거더에 많이 사용되는 SM490의 도로교 설계기준(2012)의 허용응력인 190MPa로 정의하였다. 교각의 변위 응답에 대한 한계상태는 Dutta(1999)의 연구에서 제안된 수평변위비를 한계상태로 정의하였으며 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Limit state of pier

Limit State	Description	Criteria
LS 1	Limit of Drift Ratio to Pier Height (Δ/L)	0.005
LS 2		0.007
LS 3		0.015
LS 4		0.025
LS 5		0.050

곡선교량의 지진 취약도 분석

본 연구에서는 고주파 지진에 의한 곡선교량의 지진 안전성에 대한 영향성을 분석하기 위해 고주파 영역의 인공지진 12개를 생성하였다. 생성된 인공지진파를 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g Scale로 변화시켜 시간이력해석을 수행하여 거더와 교각에 대한 지진 취약도 곡선을 도출하였다.

Fig. 5는 거더의 응력응답에 대한 지진 취약도 곡선이다. 0.2g를 넘어서면서 파괴확률이 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 0.5g에 도달하면서 모든 인공지진파에 대한 거더의 응력응답이 정해진 한계상태를 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 교각의 수평변위에 대한 지진 취약도 곡선이다. LS1과 LS2는 수평변위가 각각 15mm, 21mm를 초과하는 상태로 0.2g에서 모든 인공지진파에서 한계상태를 초과하는 것으로 나타났으며 LS5는 수평변위 150mm를 초과하는 상태로 1.5g에 도달하였을 때 대부분이 한계상태를 초과하는 것으로 나타났다.

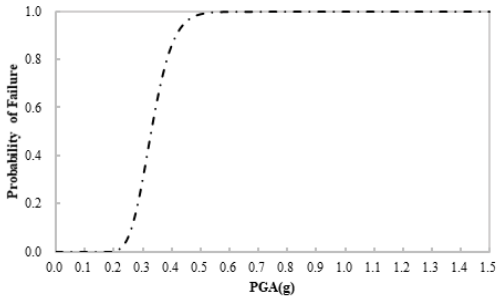

Fig. 5. Seismic fragility of curved bridge by stress

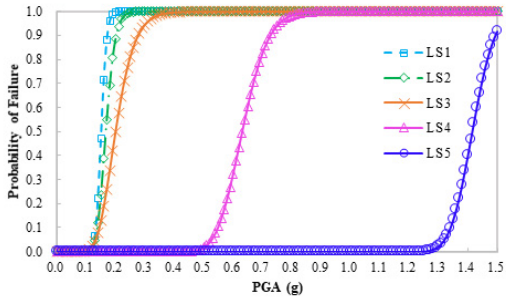

Fig. 6. Seismic fragility of curved bridge by drift ratio

결 론

본 연구에서는 곡선교량의 지진 안전성에 미치는 고주파 지진의 영향성을 분석하기 위해 경주지진의 응답스펙트럼을 포락하는 12개의 고주파 영역 인공지진파를 생성하여 지진 취약도 평가를 수행하였다. I-Shape 거더를 갖는 1경간 곡선교량을 선형 탄성 유한요소 모델로 구축하였으며 12개의 인공지진파를 5개의 Scale로 변화 시켜 시간이력해석 및 지진 취약도 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 곡선 교량의 유한요소 모델을 이용하여 고유진동수 해석을 수행하였을 때 유효질량 참여율이 3차 모드에서 X축 방향으로 63.6%, 5차 모드에서 Z축 방향으로 59.00%으로 나타나 가장 지배적인 모드일 것으로 판단되며 이 때 3차 모드는 12.189Hz, 5차 모드는 16.637Hz의 주파수 영역을 갖는 것으로 나타났다.

(2) 경주 지진을 포락하는 Required Response Spectrum(RRS)를 기준으로 12개의 고주파 인공지진파를 생성하였으며 0.2g로 Scale을 조정하여 시간이력을 수행한 결과 AE3 인공지진파를 적용하였을 때 거더의 응력응답이 157.16MPa로 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 3차, 5차 모드의 주파수 영역이 12.189Hz와 16.637Hz 사이의 Spectral Acceleration 값이 AE3 인공지진파가 가장 크기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 거더의 응력응답에 대한 지진 취약도 분석은 0.2g를 넘어서면서 모든 인공지진파를 적용한 모델에서 한계상태를 초과하는 응답이 발생하였으며 교각의 수평변위에 대한 지진 취약도의 경우 LS1과 LS2가 0.1g 넘어서면서 정해진 한계상태를 초과하는 것으로 나타났다.

(4) 거더의 응력응답을 Jeon et al.(2019b)의 연구결과와 비교하였을 때 고주파 인공지진을 적용할 경우 대체적으로 더 큰 응답이 발생하는 것으로 나타나 현재 구축된 곡선교량 모델의 경우 고파주 지진에 민감하게 반응하는 것으로 나타난다.

(5) 추후 연구에서는 곡선교량의 스팬길이와 교각의 높이, 다중스팬 등을 고려한 유한요소 모델을 이용하여 지진 취약도 평가를 수행하고자 하며 추가적으로 강재, 콘크리트 재료의 불확실성을 고려한 안전성 평가를 수행하고자 한다.

Acknowledgement

이 성과는 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1C1B1002855).

References

[1] ABAQUS Ver. 2020, Dassault Systems.

[2] Abbasi, M., Adedini. J.M., Zakeri. B., Amiri G.G. (2016). “Seismic vulnerability assessment of a californian multi-frame curved concrete box girder viaduct using Fragility Curves.” Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 12, No. 12, pp. 1585-1601.

[3] Choi, I.K., Choun, Y.S., Seo, J.M., Lee, J.R. (2003a). “Consideration of high frequency ground motion effects on the seismic fragility of NPP components.” International Symposium in Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities, Vienna, Austria.

[4] Choi, I.K., Seo, J.M., Jeon, Y.S. (2003b). Evaluation of High Frequency Ground Motion Effects on the Seismic Capacity of Nuclear Power Plant Equipment. KAERI, Technocal Report KAERI/TR-2484/2003, Daejeon, Korea.

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

[6] Feng, R., Wang, X., Yuan, W., Yu, J. (2018). "Impact of seismic excitation direction on the fragility analysis of horizontally curved concrete bridges." Vol. 2018, No. 16, pp. 4705-4733.

[7] Jeon, J.S., Mangalathu. S., Song. J., Desroches. R. (2019a). "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] 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.

[9] Jeon, J.T., Ju, B.S., Son, H.Y. (2019b). "Seismics fragility analysis of curved bridge structure by gider section shape." Journal of the Korea Society of Disaster Informantion, Vol. 15, No. 4, pp. 626-633.

[10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). Korean highway bridge design code.

[11] Movaghati, S., Abdelnaby, A.E. (2016). "Advancements in fragility analysis using numerical calibration methods for a horizontally curved RC bridge." Engineering Structures, Vol. 125, pp. 236-243.

[12] Shirazi, R.S., Pekcan. G., Itani. A. (2018). "Analytical fragility curves for a class of horizontally curved box-girder bridges." Journal of Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 881-901.

[13] Tanaka, S., Kameda, H., Nojima, N., Shunsyke, O. (2000). "Evaluation of seismic fragility for highway transportation systems." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, pp.1-6