

I-Shape 단면을 갖는 곡선 보의 지진 취약도 분석

Seismic Fragility Analysis of Curved Beam with I-Shape Section

전준태^{a,1}, 주부석^{b,*}, 손호영^{b,2}

Juntai Jeon^{a,1}, Bu-Seog Ju^{b,*}, Hoyoung Son^{b,2}

^a Department of Civil&Environmental Engineering, INHA Technical College, 100, Inharo, Nam-Gu, Incheon 22212, Republic of Korea

^b Department of Civil Engineering, Kyunghee University, 1732, Deogyong-daero, Gilheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

ABSTRACT

Purpose: This study was to the fragility evaluation of I-shape curved beam structure subjected to strong ground motions including Gyeongju and Pohang earthquakes

Method: In particular, to conduct the analytical model, ABAQUS and ANSYS platform was used in this study. Furthermore, the analytical model using 3D Finite Element Model (FEM) was validated, in comparison to the theoretical solutions at the location of 0.25L, 0.5L, and 0.75L in static loading condition. In addition, in order to evaluate the seismic fragility of the curved beam structure, 20 seismic ground motions were selected and Monte-Carlo Simulation was used for the empirical fragility evaluation from 0.2g to 1.5g.

Result: It was interesting to find that the probability of the system failure was found at 0.2g, as using 190 MPa limit state and the probability of the failure using 390 MPa limit state was starting from 0.6g.

Conclusion: This study showed the comparison of the theoretical solution with analytical solution on I-shaped curved beam structures and it was interesting to note that the system subjected to strong ground motions was sensitive to high frequency earthquake. Further, the seismic fragility corresponding to the curved beam shapes must be evaluated

KEYWORDS

Curved Beam,
Finite Element,
Time History
Analysis,
Seismic Fragility,
Monte-Carlo
Simulation

연구목적: 본 연구는 I-Shape 단면형상을 가지고 있는 곡선교량의 지진과 불확실성에 따른 안전성 분석을 위해 확률론적 기반 취약도 평가를 목적으로 한다

연구방법: 상용유한요소해석 프로그램(ABAQUS, ANSYS)구축된 모델의 검증을 위해 토크와 집중하중을 적용하여 정적해석에 따른 해석결과와 이론해를 곡선 보의 1/4L, 2/4L, 3/4L 지점에서 휨 모멘트를 비교한 결과 모든 지점에서 1%내로 오차가 발생하는 것으로 나타나 3차원 유한요소 모델에 대한 신뢰성을 확보 하였다. 곡선교량 구조물의 지진과의 불확실성을 위해 경주 및 포항 지진을 포함하여 세계각지에서 발생한 20개의 지진파를 0.2g부터 1.5g까지 5개의 Scale로 변화시켜 시간이력해석을 수행하였으며, Monte-Carlo Simulation을 기반으로 지진 취약도 평가를 수행하였다.

연구결과: 지진 취약도 분석결과 한계상태를 190MPa로 하였을 때 0.2g를 넘어가면서 파괴가 발생하나 한계상태를 315MPa로 하였을 경우 0.6g를 넘어서면서 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

결론: 본 연구에서 이론해와 수치해석 모델을 비교함으로써 유한요소 모델을 검증하였으며 구축된 I-Shape 곡선 보 모델의 경우 고주파수 영역에 민감성을 보이며, 추후 연구에서 곡선 보의 주요 매개변수인 단면형상에 따른 지진 취약도 평가를 수행하고자 한다.

곡선형 보,
유한요소,
시간이력해석,
지진 취약도 분석,
Monte-Carlo
Simulation

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-201-3688. Email. bju2@khu.ac.kr

1 Tel. 82-31-201-3688. Email. bju2@khu.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Aug. 23, 2018

Revised Aug. 29, 2018

Accepted Sep. 27, 2018

1. 서론

교량은 교통을 이어주는 중요한 구조물 중에 하나이며 사회가 발전함에 따라 빠른 물류의 이동을 위해 필수적인 요소이다. 이러한 교량은 산악지역 등으로 인해 교량의 직선성이 보장되지 않은 곳에서 곡선 거더를 이용하여 교량이 설치되고 있다. 곡선 거더의 거동은 비틀림과 뒤틀림으로 인해 직선 거더에 비해 복잡한 거동 양상을 보이고 있으며, 이로 인해 많은 연구자들은 곡선 거더의 거동 평가에 관심을 기울이고 있다. Lee and Jeon.(1993)은 비틀림정수비의 변화에 따른 뒤틀림응력의 변화를 분석하였고 곡선형 거더의 단면형상의 변화에 따른 비틀림정수비의 한계치를 제시하였다. 또한 Jeon (2018)은 곡선형 보의 수치해석 모델을 구축하고 해석 결과와 이론해의 비교를 통해 수치해석 모델을 검증하였으며 검증한 모델을 통하여 경주지진의 영향성을 평가하였다. 곡선형 보의 거동에 대한 이론적 접근 및 해석을 위한 요소개발 이외에도 Kim and Sause (2005)는 I-Shape 거더의 압축 플랜지 부분에 콘크리트를 채운 등근 튜브를 적용한 거더의 거동을 일반적인 I-Shape 거더의 거동과 비교하여 강도와 강성이 증가하는 것을 보였으며 이로 인해 안전성이 증가한다는 결론을 도출하였다. 또한 Dong and Sause (2010)은 I-Shape의 인장 플랜지에 직사각형의 튜브를 적용하여 작은 비틀림 저항을 보강한 새로운 곡선형 보의 2차 비선형 거동에 대한 연구를 진행하였다.

또한 교량은 지진과 같은 자연재해에 빈번히 노출되는데 최근 국내에서 경주지진에 이어 포항에서 규모 5.4의 지진이 발생하여 많은 경제적/사회적 손실이 발생하였다. 그리고 잇달아 발생한 경주지진 및 포항지진으로 인해 대한민국이 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 강하게 자리 잡았으며 이러한 강진의 발생 빈도 및 규모는 전 세계적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 교량은 도시와 도시를 연결하는 중요한 교통망 중에 하나로써 지진으로 인해 피해를 받을 경우 대피시간의 증가로 인해 인명피해와 물질적 피해가 증가할 수 있고, 후속 복구 시간의 증가로 인해 2차적인 피해가 발생 할 수 있다 (Hwang et al. 2001). 구조물의 지진 피해를 예측하기 위해 많은 연구들이 진행되었으며 최초의 지진 취약도 개념은 Kennedy and Ravindra(1984) 등의 연구에서 원자력 발전소 배관 시스템의 파괴 빈도와 최대지반가속도 간의 관계를 확률적 함수로 정의 하면서 시작되었다. 이후 다양한 구조물에 확률론적 지진 취약도 개념을 적용하여 많은 연구가 진행되었으며 Padgett and Roches (2007) 의 연구에서 웹 설문조사를 기반으로 교량 구조물의 경험적 취약도 함수를 도출하였으며 교량 구조물의 지진 취약도 분석 시 교량에 대한 적절한 손상상태를 정의하는 것이 중요하다고 강조하였다. 또한 Tanaka et al.(2000) 의 연구에서는 교량의 주요한 구성요소(교각, 베어링, 교대 등)의 지진 취약도를 기반으로 전체적인 교량 시스템의 취약성을 고려해야한다고 언급하였다. Yang et al. (2015)의 연구에서 강 및 콘크리트 교량의 다양한 형태와 내진설계 유무에 따라 6가지 직선 및 곡선 교량 모델에 지진 취약도 평가를 수행하였다. 최근에는 지진 취약도 평가 이외에도 신경망(Neural Networks) 접근법이나 퍼지(Fuzzy) 논리 등을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는 방법들이 연구되고 있으며 Karimi-Moridani et al. (2017)의 연구에서 신경망(Neural Networks) 접근법을 이용하여 수평 곡선 교량의 파괴 확률에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 I-Shape 단면을 갖는 곡선형 보의 상용유한요소구조해석 프로그램을 이용하여 선형 탄성 유한요소 모델을 구축하였으며 정적 해석결과와 이론해를 비교하여 구축된 유한요소 모델을 검증하였다. 또한 고유치 해석을 통해 곡선형 보의 진동 특성을 분석하였고 경주 지진 및 포항 지진을 포함한 20개의 지진파를 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g로 스케일을 변화 시켜 시간이력해석을 수행하였다. 마지막으로 해석결과를 이용하여 Monte-Carlo Simulation 기반 지진 취약도 평가를 수행하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델

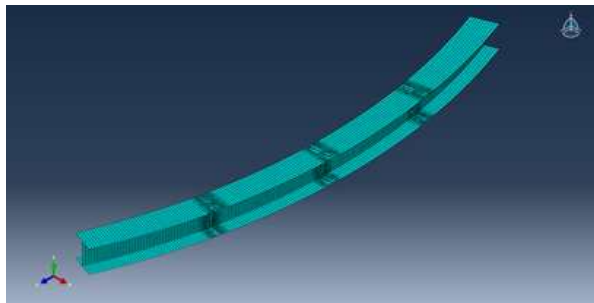
본 연구에서는 곡선 보의 해석적 지진 취약도 분석을 위해 상용구조해석 프로그램인 ABAQUS와 ANSYS를 이용하여 W10X49단면에 R=6.096m, $\theta=42.97^\circ$ 인 곡선형 보의 유한요소 모델을 구축하였다. 유한요소 모델은 3D Shell 요소를 사용하여 구축되었으며 사용된 재료 및 요소의 특성은 Table 1.과 Table 2.에 정리하였다. 곡선 보의 중앙지점에 27116.36 Nm의 토크와 8896.44N의 집중하중을 적용하여 정적거동을 분석하였으며 해석결과와 이론해를 비교함으로써 구축된 유한요소 모델을 검증하였다. ABAQUS와 ANSYS를 이용하여 구축된 유한요소 모델은 Fig 1.에 나타내었다.

Table 1. Characteristic of Curved Beam Structure

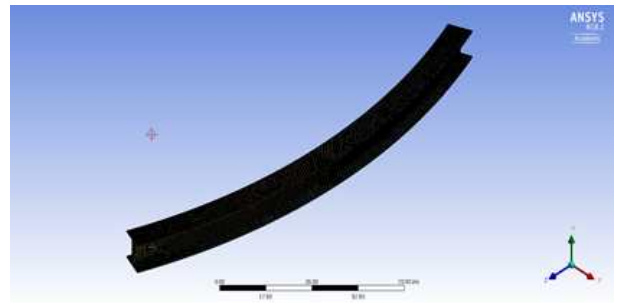
| Area (m ²) | Radius (m) | Angle | Elastic Modulus (MPa) | Poiss's Ratio | Density (kg/m ³) |
|------------------------|------------|-------|-----------------------|---------------|------------------------------|
| 9.296e-3 | 6.096 | 42.97 | 200,000 | 0.3 | 7850 |

Table 2. Elements Properties of Curved Beam Structure

| Platform | Properties | Element Type | Number of Elements | Number of Nodes |
|----------|------------|--------------|--------------------|-----------------|
| ABAQUS | | S4R | 526,616 | 522,451 |
| ANSYS | | Shell13 | 86,239 | 87,034 |



(a) ABAQUS Platform



(b) ANSYS Platform

Fig 1. Finite Element Model of Curved Beam Structure

2.2 정적거동 분석

유한요소 해석을 통해 얻은 곡선 보의 L/4, 2L/4, 3L/4 지점에서의 휨 모멘트 결과를 이론해와 비교함으로써 유한요소 모델을 검증하였다. ABAQUS Platform을 이용한 유한요소 해석결과 보의 중앙지점에서 11149.79N-m의 휨 모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 이론해와 비교하였을 때 2L/4지점에서 약 0.3%의 오차가 발생하였으며 1L/4 지점에서도 1%내의 오차가 발생한 것으로 보아 구축된 유한요소 모델이 이론해와 잘 부합된다고 판단된다. ANSYS Platform을 이용한 해석결과 또한 모든 지점에서 이론해와 1%내로 오차가 발생하였다. Table 3.과 Fig 2.를 통하여 이론해 및 ABAQUS, ANSYS Platform의 해석결과를 비교하여 나타내었다.

Table 3. Comparison of Exact Solutions and Analytical Results

| Platform | Exact Solution (N-m) | ABAQUS (N-m) | ANSYS (N-m) |
|----------|----------------------|--------------|-------------|
| Location | | | |
| 1L/4 | 5658.279 | 5647.658 | 5646.867 |
| 2L/4 | 11118.83 | 11149.79 | 11111.83 |
| 3L/4 | 5658.279 | 5647.658 | 5646.867 |

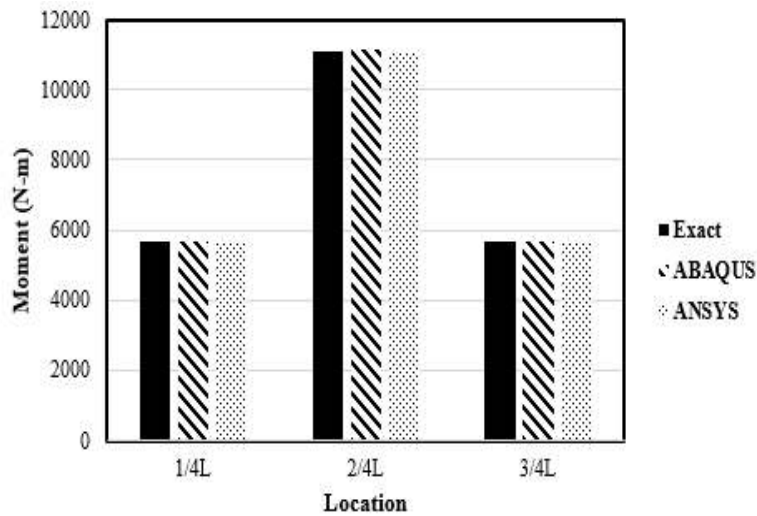


Fig 2. Quantity Comparison of Theoretical and Analytical Solutions

2.2 동적거동 분석

Eigenvalue 해석은 ABAQUS, ANSYS Platform 모두 Lanczos 방법을 이용하여 50차 모드까지 수행하였다. 해석결과 X-축 방향의 경우 4차 모드에서 가장 큰 질량참여율을 보이며 이때 고유진동수는 105.050Hz 이고, Y축 방향의 경우 1차 모드에서 가장 큰 질량참여율이 나타나고 있으며 이 때 고유진동수는 8.101Hz로 나타났다. Z축 방향의 질량 참여율은 20차 모드 이상의 고차모드에서 발생하고 있으며 10차 모드 이하에서는 5차 모드에서 11%의 질량참여율을 보이고 있다. Fig 3. (a)는 각 모드에 해당하는 곡선형 보의 고유진동수이며 Fig 3. (b)~(d)는 각 모드의 방향 별 질량참여율을 나타내었다.

본 연구에서는 경주 및 포항 지진을 포함하여 세계 각지에서 발생한 20개의 지진파를 0.2g, 0.5g, 0.8g, 1.2g, 1.5g로 스케일을 변화시켜 ABAQUS Platform을 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 0.2g 스케일을 적용하였을 때의 결과를 Fig 5.에 나타내었으며 EQ 15에서 129.572MPa로 가장 큰 결과가 발생하였다. EQ5, EQ10, EQ 14, 에서도 거의 동등한 결과가 발생하였으며 이는 I-Shape 곡선 형 보가 갖는 진동수 영역이 8Hz 이상의 영역이고 EQ5, EQ10, EQ14, EQ15의 진동 특성이 고주파 영역이며 8Hz 부근의 Spectrum Acceleration 값이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 경주 지진(EQ12)을 적용하였을 때 122.096MPa가 발생하였는데 경주 지진파가 갖는 진동특성이 고주파영역으로 탁월진동수가 5~10Hz사이에 있어(Oh and Shin, 2016) 곡선형 보에 많은 영향을 끼친 것으로 판단된다. 포항 지진파(EQ17)의 경우 94.450MPa로 낮은 결과 값이 나타났는데 이는 포항 지진파의 진동특성이 8Hz~ 15Hz 사이에 분포되어 있으나 Spectral Acceleration 값이 낮아 발생된 결과로 판단된다. Fig 4.는 적용된 지진파들의 Spectral Acceleration을 나타내었다.

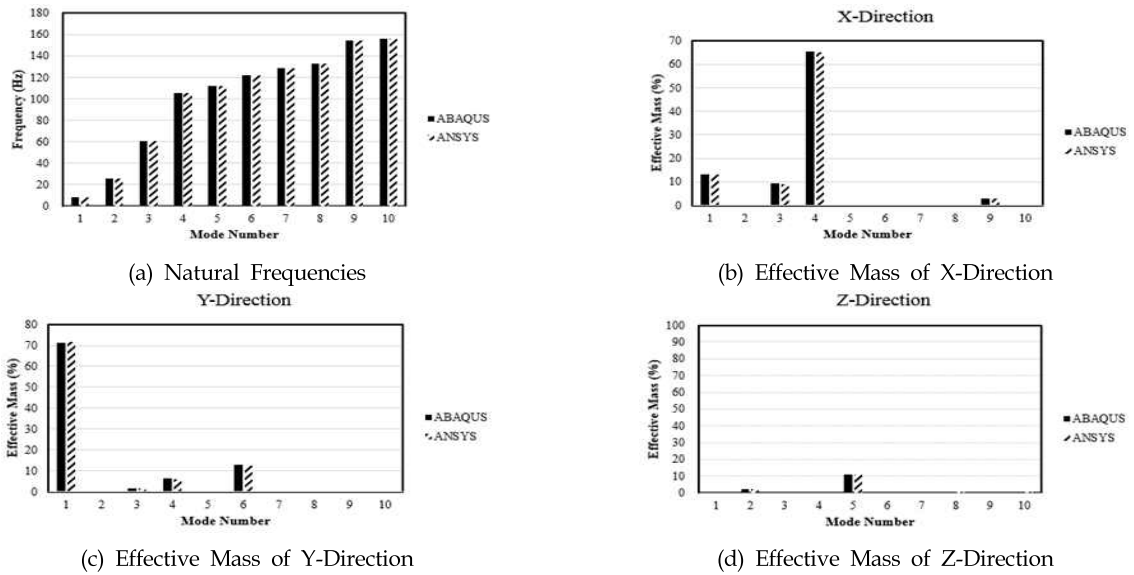


Fig 3. Eigenvalue Analysis Result by each Platform

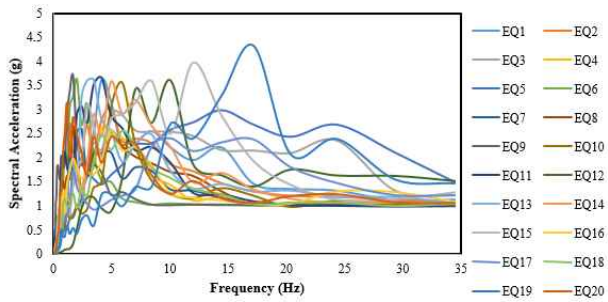


Fig 4. Spectral Acceleration

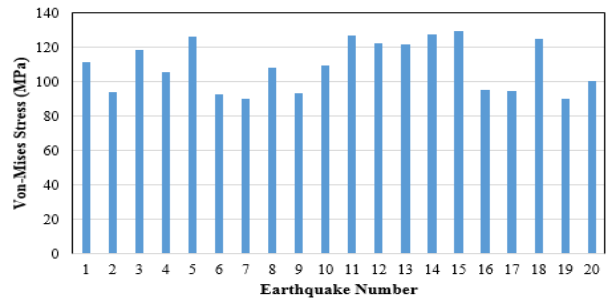


Fig 5. Damage on 0.2g Scale Earthquake

Table 4. Seismic Ground Motions

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

3. 지진 취약도 분석

지진 취약도 함수는 외부에서 발생하는 이벤트에 대해 구조물이 정의된 한계상태를 초과하는 확률을 로그 정규 누적 분포 함수로 표현한 함수로써 Kennedy and Ravindra(1984)의 연구에서 최초로 정의 되었다. 이 연구에서는 원자력 발전소의 설비의 파괴 빈도와 지진파의 불확실성을 고려하여 지진 취약도 평가를 수행하였으나 구조물의 재료적 특성 등의 불확실성을 고려하여 구조물의 안전성 평가를 수행할 수 있다. 지진 취약도 함수는 일반적으로 다음 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, D : 특정 구성요소의 불확실한 손상상태
- d : 한계상태, $d \in [1, 2, \dots, N_d]$
- X : 불확실성을 내포하는 외부 자극
- x : X 의 특정 값
- θ_d : 로그정규 누적분포 함수의 평균 값
- β_d : 로그정규 누적분포 함수의 표준편차

본 연구에는 지진파의 불확실성에 대한 곡선교량의 안전성을 평가하기 위해 Monte-Carlo Simulation을 적용하여 지진 취약도 분석을 실시 하였으며, 또한 곡선교량의 취약도 분석시 교량의 한계상태에 따라 파괴확률이 달라지기 때문에 한계상태의 결정은 매우 중요한 단계이다. 본 연구에서는 곡선형 교량의 거더 즉, 곡선형 보의 거동에 초점을 맞추어 지진 취약도 분석을 적용하고자 도로교 설계기준(2010, 2012)에서 제시하고 있는 강재의 허용응력 및 항복응력을 한계상태로 정의하였다. 강재는 강교에서 많이 사용되는 SM490을 사용한 것으로 가정하였고 이때 도로교 설계기준 2010에서 SM490강재의 허용응력을 190MPa로 제시하고 있다. 도로교 설계기준 2012에서는 한계상태 설계법으로 변경되면서 SM490강재의 항복응력을 315MPa로 제시하여 190MPa와 315MPa에 대하여 지진 취약도 분석을 수행하였다. Fig 6.에서 190MPa의 결과보다 315MPa의 결과가 오른쪽으로 많이 이동된 것을 볼 수 있다. 190MPa를 한계상태로 하였을 때는 0.2g에서 파괴가 발생하는 반면 315MPa를 한계상태로 하였을 때는 0.6g가 넘어가면서부터 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 190MPa가 한계상태 일 때 중앙값은 0.79g 이고 이 때 한계상태가 315Mpa의 경우 파괴확률이 약 3%인 것으로 나타났다.

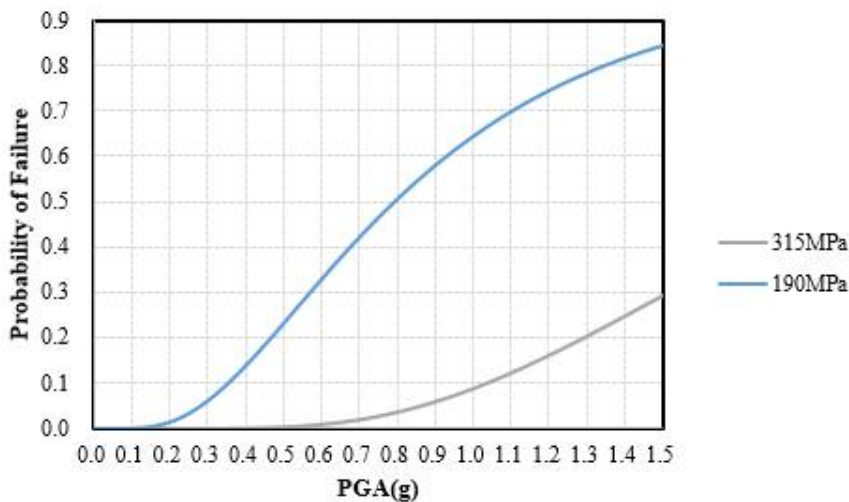


Fig 6. Seismic Fragility of Curved Beam with I-Shape Section

4. 결론

본 연구에서는 I-Shape 단면을 갖는 곡선형 보의 선형탄성 유한요소 모델을 구축하였으며 유한요소 해석결과와 이론해를 비교함으로써 구축된 유한요소 모델을 검증하였다. 또한 Eigenvalue 해석을 통해 곡선형 보의 진동특성을 분석하였으며 경주 및 포항 지진을 포함한 20개의 지진파를 적용하여 지진 취약도 평가를 수행하였다.

(1) ABAQUS 및 ANSYS Platform을 이용한 유한요소 해석 결과와 이론해를 비교하였을 때 L/4 지점 및 2L/4 지점에서의 휨 모멘트 결과가 1%내외의 오차가 발생하여 구축된 유한요소 모델이 적합하다고 판단된다.

(2) Eigenvalue 해석 결과 1차 모드의 고유진동수가 8.101Hz로 나타났고 X-Direction의 질량 참여율은 4차 모드에서 약 64%로 가장 지배적인 것으로 판단되며 Y-Direction의 경우 1차 모드에서 약 72%의 질량참여율을 보이므로 가장 지배적인 것으로 판단된다.

(3) 20개의 지진파를 0.2g로 스케일 다운시켜 시간이력해석을 수행한 결과 Manjul 지진에서 129.572MPa로 가장 큰 결과가 발생하였는데 이는 8Hz 부근과 그 이상의 영역에서 많은 진동특성이 분포되어 있기 때문이라고 판단된다.

(4) 경주 지진파의 경우 122.096MPa로 비교적 큰 결과가 발생하였는데 이는 경주 지진파가 고주파 성분을 많이 갖고 있는 지진파고 탁월주기가 5~10Hz이고 곡선형 보의 고유진동수 또한 8Hz 이상의 영역이기 때문에 큰 결과가 발생한 것으로 판단된다.

(5) 지진 취약도는 도로교설계기준 2010에서 제시하고 있는 SM490 강재의 허용응력 190MPa와 2012에서 제시하고 있는 항복응력 315MPa를 한계상태로 분석을 수행하였으며 한계상태가 190MPa일 때 0.2g를 초과하면서 파괴가 발생하는 반면 315MPa일 때는 0.6g를 초과하면서 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

(6) 곡선형 보의 경우 단면의 형상에 따라 비틀림 저항이 변화하기 때문에 단면형상은 중요한 변수이므로 추후 연구에서는 동일한 곡률반경과 중심각을 갖고 단면형상의 변화에 따른 곡선형 보의 거동을 비교하고 지진 취약도 분석을 수행하고자 한다. 또한 교각의 유한요소 모델을 추가하여 다양한 한계상태에 대해 지진 취약도 분석을 수행하고자 한다.

감사의 글

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

References

- [1] ABAQUS S Ver. 2017, Dassault Systems.
- [2] ANSYS Workbench Ver. 18.0.
- [3] Lee, W. H. and 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.
- [4] Jeon, J. T.(2018), "Seismic Performance Evaluation of Curved Bridge by Gyeong-Ju Earthquakes", Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 14, No. 1, pp. 43~50.
- [5] Kim, B. G. and Sause, R.(2005), "High Performance Steel Girders with Tubular Flanges", International Journal of Steel Structure, Vol. 5, No. 3, pp. 253~263.
- [6] Dong, J. and Sause, R.(2010), "Finite Element Analysis of Curved Steel Girder with Tubular Flange", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 319~327.
- [7] Hwang, H., Liu, J. B. and Chiu, Y. H.(2001), "Seismic Fragility Analysis of Highway Bridge", Mid-America Earthquake Center Technical Report MAEC RR-4.
- [8] Kennedy, R. P. and Ravindra, M. K.(1984), "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies", Nuclear

Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47~68.

- [9] Padgett, J. E. and Roches, R. D.(2007), "Bridge Functionality Relationships for Improved Seismic Risk Assessment of Transportation Networks", Vol. 23, No. 1. pp. 115~130.
- [10] Tanaka, S., Kameda, H., Nojima, N. and Shunsyke, O.(2000), "Evaluation of Seismic Fragility for Highway Transportation Systems", World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 4.
- [11] Yang, C. S. W., Werner, S. D. and Roches, R. D.(2015), "Seismic Fragility Analysis of Skewed Bridge in the Central Southeastern United States", Engineering Structures, Vol. 83, pp. 116~128.
- [12] Karimi-Moridani, K., Zarfam, P. and Ghafory-Ashtiany, M.(2017), "Seismic Failure Probability of a Curved Bridge based on Analytical and Neural Network Approaches", Shock and Vibration, Vol. 2017, pp. 1~18.
- [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] Oh, S. H. and Shin, S. H.(2016), "Correlation Analysis of Gyeongju Earthquake Waveform and Structural Damage Scale", Architectural Research, Vol. 32, No.12, pp. 34-44.