

경주지진에 의한 곡선교량의 내진 안전성 평가

Seismic Performance Evaluation of Curved Bridges by Gyeong-Ju Earthquakes

Jun-Tai Jeon^{a*}

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

ABSTRACT

This study presented 3D Finite Element (FE) analysis of curved beam structures subjected to static and dynamic loading conditions, which is particularly strong ground motions. It was shown that the results obtained from 3D FE analyses was similar to the theoretical solution within 1% convergence error, in order to validate the 3D solid FE models in this study. In particular, it was focusing on development of dynamic characteristics of curved beam structures subjected to three-different seismic ground motions: Gyeongju, Lomapieta and Northridge earthquakes. Consequently, It was interesting to find that the results obtained from Gyeongju earthquake was detuned due to high frequency effect, but the Von-Mises of the curved beam structure under Lomapieta earthquake was 647.824 MPa at 45 curvature degree.

KEYWORDS

3D Finite Element,
Curved Bridge,
Dynamic
Characteristic,
Seismic Ground,
Motion

본 연구에서는 곡선형 보의 선형탄성 3D Solid 유한요소 모델을 구축하고 외력이 작용하였을 때 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석결과와 이론해 결과의 오차는 대부분의 위치에서 1% 내외로 발생하는 것으로 보아 이론해와 잘 부합한다고 판단된다. 검증된 유한요소 모델을 이용하여 시간이력해석을 수행하였으며 시간이력해석결과 경주 지진과 적용시 가장 작은 결과가 나타났으며 이는 경주 지진파의 특성이 고주파 성분의 영역의 특성을 보이기 때문이다. 또한 곡선형 보의 곡률중심을 45°로 감소시켜 동적 해석을 수행하였을 때 Lomapieta 지진파의 Von-Mises 결과가 647.824MPa로 가장 큰 것으로 나타났다.

3D 유한요소,
곡선형 보,
동적거동 특성,
지진,

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Jeon, Jun-Tai Email. jtjeon@inhac.ac.kr
Tel. 82-32-870-2235. Fax. 82-32-870-2510

ARTICLE HISTORY

Received Dec. 29, 2017
Revised Jan. 5, 2018
Accepted Mar. 12, 2018

1. 서론

현대사회는 급격한 산업화로 인해 물류와 인적자원의 신속한 이동을 위해 교통망이 중요하며 특히 교량의 경우 우리나라와 같이 산악지역이 많은 곳에서는 도시와 도시를 잇는 중요한 교통망 중의 하나이다. 교량은 공간적, 경제적 제약조건으로 인해 직선형 교량이 아닌 곡선형 교량을 건설하는 경우가 많이 있고 심미적인 아름다움을 추구하기 위해서 건설되기도 한다.

과거에는 곡선형 교량의 다양한 해석법 및 유한요소 해석을 위한 유한요소 개발에 많은 연구들 (Lee, W. H. et al, 1993; Min, B. C. et al, 1998; Lee, B. G. et al, 2002; Yoon, H. T. et al, 2005)이 진행되어 왔다. 최근 들어 곡선 보의 거동분석을 위한 요소 및 해석 기법의 개발 이외에도 Jang, M. S. et al(2014)은 강박스와 트러스가 조합된 곡선 교량의 정적 거동을 분석하였으며 Kim, K. S. et al.(2015)은 곡률변화와 교좌장치의 배치형식에 따른 거동을 분석하여 곡률 변화에 따른 지점의 부반력 크기를 예측하는 산정식을 제안하였다. Pack, N. H. et al(2004)은 동일지간장을 갖는 직선 및 곡선 교량의 하부와 상부구조의 동적 거동을 분석하기 위해 7자유도를 갖는 보 요소로 이루어진 교량 모델에 지진하중을 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 Choi, M. S. et al(2017)은 선행연구에서 개발된 유한요소-전달강성계수법을 통하여 곡선 보의 진동해석 가능성을 제시하였다. 많은 연구자들이 곡선 보의 정확한 정적 및 좌굴 해석을 위한 곡선 보 요소 및 해석 기법에 대한 연구를 진행하였으며 나아가 곡선 보 요소를 적용하여 곡선 교량의 자유진동 해석 및 지진해석을 수행하였지만 대부분의 연구는 보 요소를 기반으로 하여 진행되었다.

따라서 본 연구에서는 상용구조해석 프로그램인 ABAQUS, ANSYS, MIDAS를 이용하여 곡선형 보의 3차원 Solid 요소를 활용한 선형탄성 유한요소 모델을 구축하고 유한요소 해석결과와 이론해의 비교를 통해 유한요소 모델을 검증하였다.

또한 검증된 유한요소 모델에 지진과를 적용한 시간이력해석을 수행하여 동적거동을 분석하였으며 나아가 중심각을 45°로 감소시켜 중심각 변화에 따른 곡선형 보의 동적 거동의 변화를 분석하여 내진안전성을 평가하였다.

2. 곡선보의 이론적 배경

곡선형 보의 해석방법은 휨, 비틀림, 뒤틀림의 거동에 기초를 두고 있다. 본 절에서는 곡선형 보에 임의의 외력이 작용하였을 때 발생할 수 있는 모든 내력을 방향성분에 따라 분류하고 평형방정식을 유도하고 이에 따라 내력과 외력의 관계식을 도출한다. (Lee, W. H. et al, 1993)

$$\sum F_x = 0 : \frac{\partial N_x}{\partial x} - \frac{Q_y}{R} + q_x = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 : \frac{\partial Q_y}{\partial x} + \frac{N_x}{R} + q_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_z = 0 : \frac{\partial Q_z}{\partial x} + q_z = 0 \quad (3)$$

$$\sum M_x = 0 : \frac{\partial T_x}{\partial x} - \frac{M_y}{R} + m_x = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_y = 0 : \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{T_x}{R} - Q_z + m_y = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_z = 0 : \frac{\partial M_z}{\partial x} + m_z + Q_y = 0 \quad (6)$$

위의 6개의 미분방정식은 전단력 Q_y , Q_z 와 축력 N_x 를 소거하여 3개의 식으로 줄일 수 있다. 위의 식 (1)에 $(\partial^2/\partial x^2)$ 을 취하면 다음 과 같은 식이 되며,

$$\frac{\partial^3 M_z}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 m_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2} = 0 \tag{7}$$

식 (2)에 $(\partial/\partial x)$ 를 취하면 아래 식과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{1}{R} - \frac{\partial q_y}{\partial x} \tag{8}$$

식 (7)에 식(8)을 대입하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\frac{\partial^3 M_z}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 m_z}{\partial x^2} - \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{1}{R} - \frac{\partial q_y}{\partial x} = 0 \tag{9}$$

또한 식 (1)에 $Q_y = -(\partial M_z/\partial x) - m_z$ 을 대입하면

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} = \frac{1}{R} \left[-\frac{\partial M_z}{\partial x} - m_z \right] - q_x \tag{10}$$

가 되며, 식 (9)를 식 (10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\frac{\partial^3 M_z}{\partial x^3} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_z}{\partial x} = \frac{\partial q_y}{\partial x} - \frac{q_x}{R} - \frac{\partial^2 m_z}{\partial x^2} - \frac{m_z}{R^2} \tag{11}$$

식 (5)에 $(\partial/\partial x)$ 를 취하고 식 (3)을 대입하여 풀면 아래와 같은 식이 된다.

$$\frac{\partial M_y}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{1}{R} = -q_z - \frac{\partial m_y}{\partial x} \tag{12}$$

식 (4), (11), (12)는 곡선형 보에 임의의 하중이 작용할 때 외력과 내력의 관계를 나타내는 최종적인 지배방정식이 된다.

3. 곡선형 보의 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델

본 연구에서는 상용구조해석 프로그램인 ABAQUS, ANSYS, MIDAS를 이용하여 단면은 $0.1524m \times 0.1524m$ 의 정사각형 단면이며 곡률반경 $R = 48.768m$, 중심각 $\theta = 180^\circ$ 인 반원의 곡선형 보를 3D Solid Element를 적용한 선형 탄성 유한요소 모델을 구축하였다. 외력이 작용했을 때 곡선형 보의 정적거동을 평가하기 위해 하중은 반원의 중심에서 4.448N을 적용하였고 곡선형 보의 양 끝단인 0° 와 180° 위치를 고정단으로 정의하여 정적해석을 수행하였다. 사용된 요소는 3D 8절점 요소를 사용하였으며 각 Platform 별로 사용된 요소 Type과 요소 및 노드의 개수를 정리하여 Table 1에 정리하였다. 또한 유한요소 모델 구축에 사용된 단면 및 재료의 성질은 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Finite Elements of Curved Beam Structures

Platform	ABAQUS	MIDAS	ANSYS
Element Type	3D8R	Solid	Solid45
Number of Elements	504000	144000	144000
Number of Nodes	556101	174361	174361

Table 2. Material Properties of Curved Beam Structures

Properties	Area(m2)	Radius (m)	Angle(°)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m3)
Value	0.0232576	48.768	180	206842.7	0.3	7850

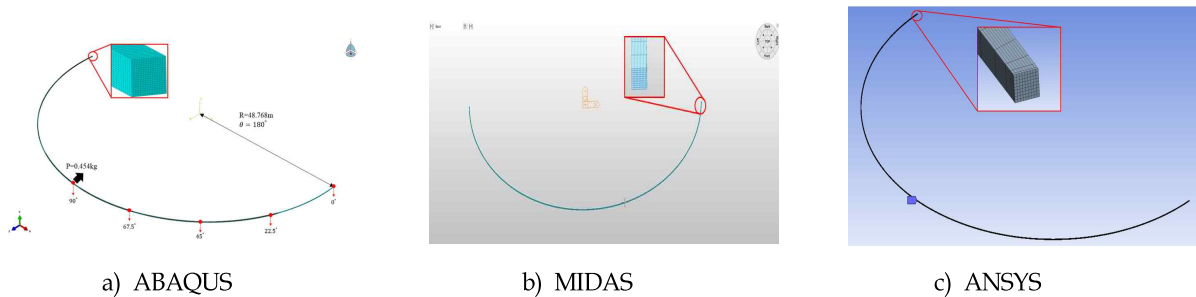


Fig. 1. Finite Element Models by Three Different Platforms

3.2 유한요소 해석 결과와 이론해의 비교

이론해 및 유한요소 해석의 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90° 인 위치에서 y축 방향 모멘트 결과를 비교하여 구축된 유한요소 모델을 검증하였다. 유한요소 해석결과 ABAQUS Platform의 경우 각도가 0° 인 위치에서 24.177 N-m, 90° 인 위치에서 32.735N-m의 모멘트가 발생하는 것으로 나타났으며 이론해와 비교하였을 때 각도가 67.5° 인 위치에서 3.089%의 오차로 가장 큰 오차가 발생하였지만 67.5° 를 제외한 위치에서 1% 내외의 오차가 발생한 것으로 보아 이론해의 결과와 잘 부합한다고 판단된다. Table 3과 Fig. 2는 Platform별 유한요소해석 결과와 이론해를 비교하여 정리하였고 Fig. 3은 각 Platform별 결과를 Plotbox 분석을 수행하여 나타내었다.

Table 3. Finite Element Analysis Results and Exact Solution

Platform \ Angle	ABAQUS (N-m)	MIDAS (N-m)	ANSYS (N-m)	Exact Solution (N-m)
0°	24.177	24.057	24.491	23.994
22.5°	5.906	5.967	5.915	5.865
45°	14.815	14.882	14.524	14.666
67.5°	1.101	1.195	1.134	1.068
90°	32.735	32.801	32.536	32.859

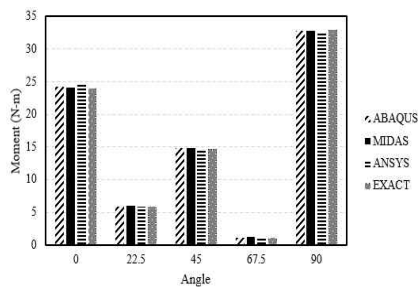


Fig. 2. Finite Element Analysis Result and Exact Solution Comparison

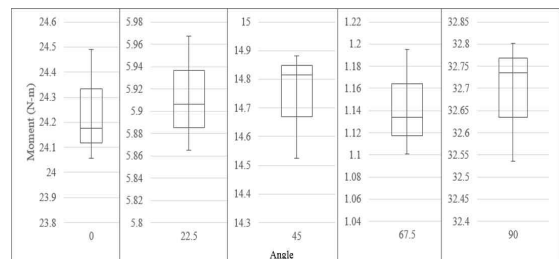


Fig. 3. Moment of the Curved Beam Structure Based on Angles

4. 곡형형 보의 시간이력 해석

4.1 고유치 해석

곡선형 보의 시간이력 해석을 수행하기에 앞서 구축된 곡선보 유한요소 모델의 동적 거동 특성을 파악하기 위해 고유치 해석을 수행하였다. Fig. 4는 각 Platform에 따른 Mode별 고유진동수와 축방향 별 Effective Mass를 정리하여 나타내었다. X축 방향의 질량 참여율은 2차 모드에서 전체 질량의 약 69%로 가장 크게 나타났으며 이때 고유진동수는 6.6266E-02Hz로 나타났다. Y축은 1차 모드에서 약 68%의 질량참여율이 나타났으며 이때 고유진동수는 2.73728E-02Hz로 나타났다. Z축의 질량참여율은 4차 모드에서 약 12%로 나타났으며 이때의 고유진동수는 1.4587E-01Hz로 나타났다.

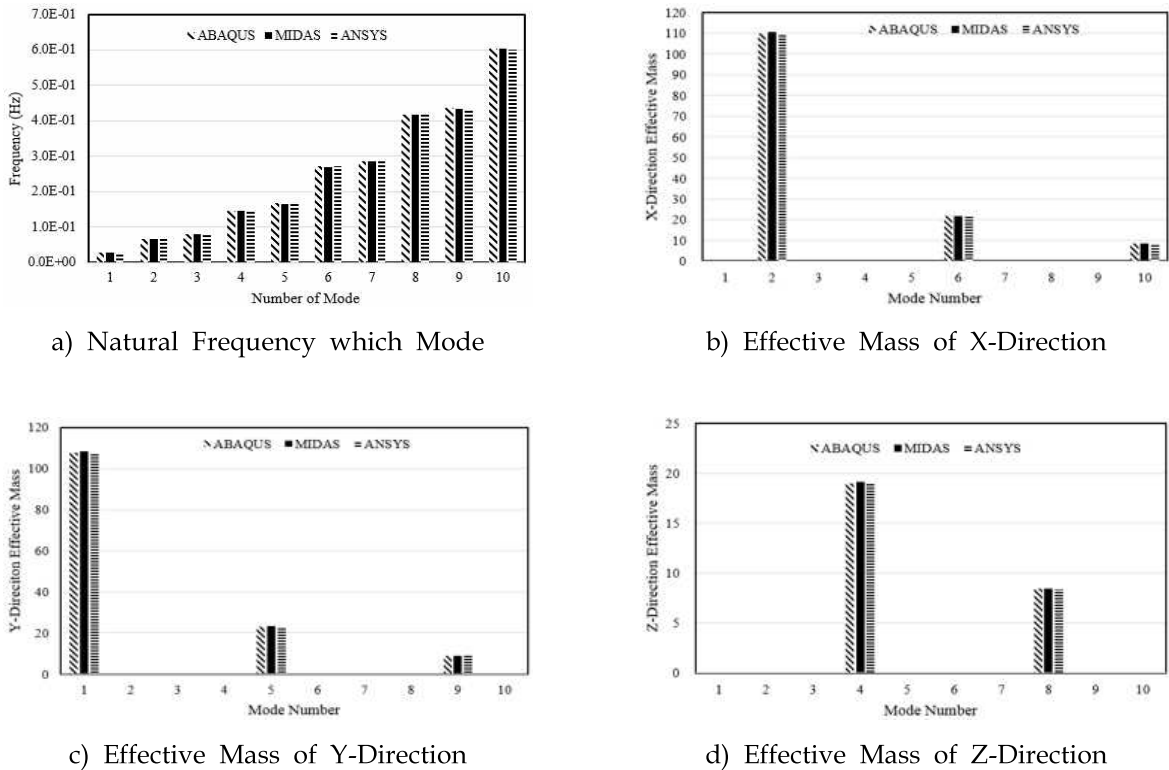


Fig. 4. Eigenvalue Analysis by which Platform

4.2 지진파의 불확실성에 따른 동적 거동 분석

본 연구에서는 곡선보의 지진에 의한 동적 거동을 분석하기 위해 Northridge, Lomaprieta, Gyeong-Ju 지진파를 적용하였으며, Fig. 5는 각 지진파의 시간이력에 대한 가속도를 보여 주고 있다. 지진파의 방향은 곡선교량의 수평 성분과 직각인 곡선보의 양끝 지점 Z축 방향으로 적용하였다.

Fig. 6은 각 Platform별 지진파에 따른 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90° 위치의 변위 및 Von-Mises 응력 최대 값을 정리하여 그래프로 나타내었다. 변위의 경우 Northridge 지진파를 적용하였을 때 90° 위치에서 19.635cm로 가장 큰 값이 발생하였으며 Von-Mises 응력 또한 Northridge 지진파 적용 시 0° 위치에서 88.282MPa로 가장 큰 값이 발생하였다. Gyeong-Ju 지진파의 경우 변위는 45° 위치에서 0.079cm, Von-Mises 응력의 경우 0° 위치에서 0.497MPa로 가장 작은 값으로 나타났다.

이는 곡선보의 고유진동수 영역은 1Hz 미만이고 1Hz 미만의 주파수 영역에서 Northridge 지진파의 가속도가 크게 발생하기 때문이라고 판단된다. 또한 Gyeong-Ju 지진파의 경우 진동 특성이 고주파수 영역대의 성분을 많이 갖고 있어(Oh, S. H et al, 2016) 곡선보에 많은 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

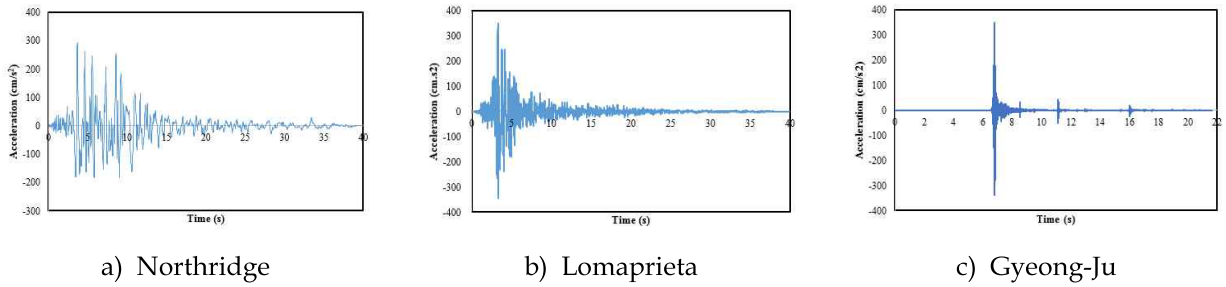


Fig. 5. Seismic Ground Motions

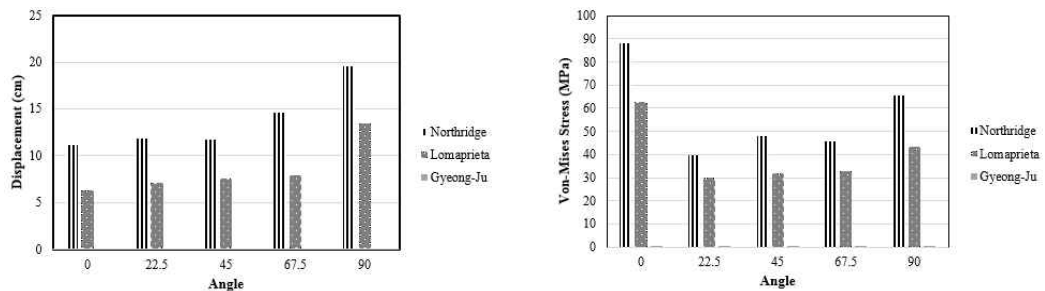
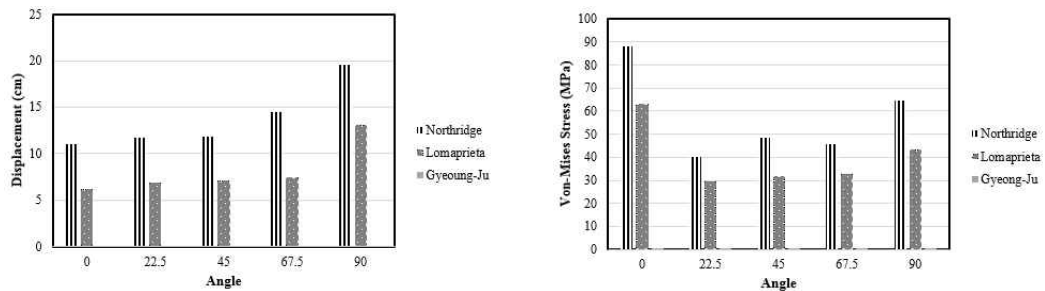
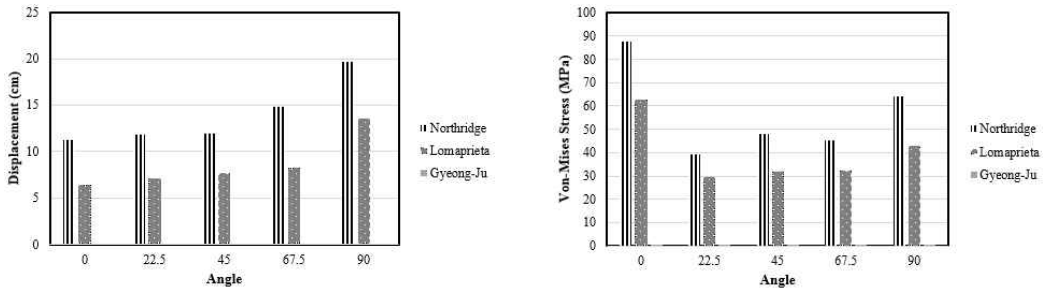


Fig. 6. Dynamic Characteristic of Curved Beam Structures

5. 곡률의 변화에 따른 동적 거동 분석

본 절에서는 곡선보의 중심각을 45° 로 변화시켜 곡률 변화에 따른 동적 거동의 변화를 분석하였다. 요소의 크기는 앞 절에서 수행된 모델과 동일한 크기로 유한요소 모델을 구축하였으며 이에 따라 전체적으로 보의 길이가 줄어들고 사용된 요소와 노드의 수도 줄어들었다. 중심각이 180° 일 때를 Case 1, 45° 일 때를 Case 2로 정의하였으며 곡선보의 길이 방향의 중심에서 Von-Mises 응력값을 비교하였다. 해석결과 Gyeong-Ju 지진과 적용 시 0.165MPa에서 15.689MPa로 가장 큰 변화가 나타나는 것으로 보이며 Lomapieta 지진과 적용 시 647.824MPa로 가장 큰 응력 값이 나타났다. Table 4에서 Table 6은 각 지진과 적용에 따른 결과를 Table로 정리하였다.

Table 4. Maximum Von-Mises Stress at 90° applied to Northridge Earthquake

Case \ Platform	ABAQUS (MPa)	MIDAS (MPa)	ANSYS (MPa)
Case1	64.433	64.084	65.405
Case2	4.140	4.147	4.141

Table 5. Maximum Von-Mises Stress at 90° applied to Lomapieta Earthquake

Case \ Platform	ABAQUS (MPa)	MIDAS (MPa)	ANSYS (MPa)
Case1	43.466	42.845	43.386
Case2	647.824	642.275	645.133

Table 6. Maximum Von-Mises Stress at 90° applied to Gyeong-Ju Earthquake

Case \ Platform	ABAQUS (MPa)	MIDAS (MPa)	ANSYS (MPa)
Case1	0.165	0.159	0.165
Case2	15.689	14.923	13.935

6. 결론

본 연구에서는 곡선보의 동적거동 분석을 위해 선형 탄성 유한요소소 모델을 구축하였으며 곡선보의 곡률변화에 따른 동적 거동을 분석하였다.

(1) 곡선보의 검증을 위해 외력이 적용하여 유한요소 해석을 수행하여 발생된 모멘트와 정밀해로 계산된 모멘트를 비교하였으며 대체적으로 오차가 1% 미만으로 적합한 것으로 판단된다.

(2) 곡선보에 지진파를 적용하여 시간이력 해석을 수행하였을 때 Northridge 지진파에서 가장 큰 변위 및 응력 값이 나타났다. 곡선보의 대부분의 질량 참여가 1Hz 미만의 영역에서 발생하는 것으로 나타났고 Northridge 지진파의 1Hz 미만의 영역에서 가속도가 크기 때문에 변위 및 응력 응답이 가장 큰 것으로 판단된다.

(3) Lomapieta 지진과 적용 시 곡선보의 중심각이 180° 에서 90° 로 감소하였을 때 Von-Mises 응력이 약 14.9배의 증가하는 것으로 나타났으며 이는 중심각이 변화하면서 곡선보의 동적 거동 특성이 변화하였고 이에 따라 Lomapieta 지진파의 주파수 영역과 맞물려 큰 결과 값이 나타나는 것으로 판단된다.

(4) Gyeong-Ju 지진과 적용 시 중심각이 180° 일 때 다른 지진파에 비해 굉장히 작은 변위 및 Von-Mises 응력이 발생하였는데 이는 Gyeong-Ju 지진과 경우 고주파 특성을 보이고 있고 곡선보의 고유진동수 영역은 1Hz 미만에 분포하고 있어 작게 나타난 것으로 판단된다.

(5) 추후 연구에서는 곡선보의 단면 형상 및 곡률을 변화시킨 선형탄성 유한요소 모델을 구축 하고 이를 통해 곡선 보의 정적, 동적 거동 특성을 분석하고자 한다. 또한 지진파의 불확실성을 고려하여 확률론적 안전성 평가인 취약도 평가를 진행하고자한다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] ABAQU S Ver. 2017, Dassault Systems.
- [2] MIDAS Civil 2017 Ver. 1.6, MIDAS Information Technology.
- [3] ANSYS Workbench Ver. 18.0,
- [4] Kim, K. S., Lee, H. J. (2015). "Evaluation of Characteristics on Negative Reactions of Simply Supported Curved Box Girder Bridges with Elastomeric Bearings." Journal of the computational structural engineering institute of Korea, Vol. 28, No. 2, pp. 161-168.
- [5] Choi, M. S., Yeo, D. J. (2017). "Free Vibration Analysis of Curved Beams Regarded as Discrete System Using Finite Element-Transfer Stiffness Coefficient Method." Journal of the Korea society for power system engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 37-42.
- [6] Jang, M. S., Kim, J. H., Kim, J. M. and Kang, Y. J. (2012). "The Analysis of Behavior of Steel Box-truss Hybrid Curved Bridge." Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 4, pp. 45-50.
- [7] Lee, B. K., Jin, T. K., Lee, T. E. (2002). "Free Vibration of Horizontally Curved Beams with Clothoid Transient Curve." Journal of the computational structural engineering institute of Korea, Vol. 15, No. 1, pp. 189-195.
- [8] 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.
- [9] Min, B. C., Kim, M. Y. (1998). "Spatial Stability of Non-Symmetric Thin-Walled Curved Beams I : Analytical Approach." Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 11, No.4, pp. 239-251
- [10] Oh, S. H., Shin, S. H. (2016). "Correlation Analysis of Gyeongju Earthquake Waveform and Structural Damage Scale." Architectural Research, Vol. 32, No.12, pp. 34-44.
- [11] Park, N. H., Yoon, K. Y., Kang, Y. J. (2005) "Dynamic Behavior of Curved Bridges under Seismic Loading." Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 5, No. 3, pp. 11-21.
- [12] Yoon, H. T., Kim, M. Y., Kim, Y. K. (2003). " Exact Static Element Stiffness Matrices of Non-symmetric Thin-walled Curved Beams." Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No, 4, pp. 753-764.
- [13] JEON, J. T., Jung, W. Y., Ju, B. S. (2014) "Evaluation of Seismic Performance of 3-Story Fire Protection Sprinkler Piping System." Journal of The Korean Society of Disaster Information, Vol. 10, No.3, pp. 458-464