

모듈러 신축이음장치 지진거동 모사 실험적 연구

이정우^{1*}, 최은석²

Experimental Study on the Seismic Behavior Simulation of Modular Expansion Joint

Jung-Woo Lee^{1*}, Eun-Suk Choi²

Abstract: In order to evaluate the seismic performance of the modular expansion joint known for its large expansion allowance and remarkable durability, this study conducts seismic response analysis and seismic simulation test. The bridge selected for the seismic response analysis is a cable stayed bridge with main span length of 1,000m. Three artificial earthquake were generated with respect to the design response spectra of the Korean Standards (KS), AASHTO LRFD and Eurocode, and applied to the selected bridge. The seismic simulation tests reproduced the artificial earthquakes using dynamic hydraulic actuators in the longitudinal and transverse directions. The test results verified the durability and safety of the expansion joint in view of its seismic behavior since abnormal behavior or failure of the expansion joint was not observed when the artificial earthquake waves were applied in the longitudinal direction, transverse direction and both directions.

Keywords: Seismic performance, Modular expansion joint

1. 서론

신축이음장치는 온도에 의한 교량의 신축량과 콘크리트의 건조수축 및 크리프와 활하중 등에 의한 교량의 수평이동, 지점침하 또는 지진과 같은 예상치 못한 변위 등에 의한 교량 상부의 이동 및 회전을 수용하여, 노면과 일체로 차륜을 지지하여 원활한 주행성과 불연속부의 방수에 대한 신뢰성을 확보하며 교량의 기능 및 구조적 안정성을 도모하는 장치이다.

최근에는 교량의 장대화 경향에 따라 부속장치인 신축이음에 대한 성능요구 조건이 강화되고 있는 추세이며, 지진 및 풍하중에 대한 내구성을 확보하기 위해 신축이음의 지진 및 피로거동에 대한 최적화된 실험방법이 필요하다. 특히, 지진시에 교량에 설치된 신축이음장치의 원활한 거동확보를 위해서는 지진입력에 의한 장치의 거동모사 성능이 실험적으로 규명될 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 모듈러 신축이음장치의 성능 및 지진거동 모사실험과 내구성 확보를 위해 KS, AASHTO LRFD, Eurocode의 규정을 적용하여 실험적으로 규명하고자 한다.

¹정희원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정희원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

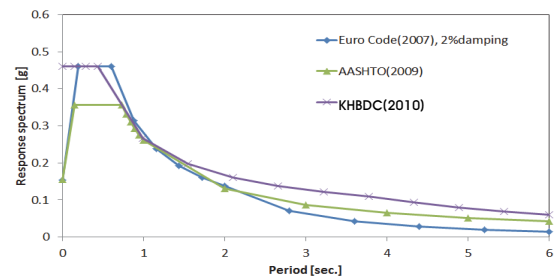
*Corresponding author: duckhawk@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

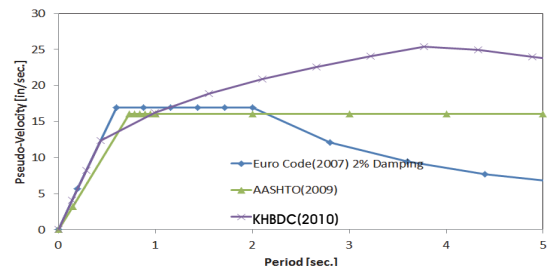
•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 인공지진파 생성

지진응답거동 해석을 위해 한국, 미국, 유럽의 설계기준에 대한 응답스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다. 한국의 경우에는 도로교설계기준(2010)을 따랐고, 유럽과 미국의 경우 한국의



(a) Acceleration response spectra



(b) Velocity response spectra

Fig. 1 Response spectra according to the design code of each country

설계지진과 유사한 크기의 인공지진을 생성하기 위해 설계지진 반가속도(a_g)는 유럽의 경우 0.154g, 미국의 경우는 0.156g를 적용하여 인공지진이력을 생성하였다.

본 연구에서는 SIMQKE 프로그램(vanmarcke et al., 1976)을 이용하여 도로교설계기준(2010), Eurocode(2007), AASHTO LRFD(2010)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼과 일치하도록 인공지진이력을 생성하였다. SIMQKE는 확률 진동이론을 이용하여 개발한 프로그램으로서, 수많은 진동수를 갖는 불규칙한 정현함수의 중첩을 통하여 인공의 지진파를 생성한다. 모든 주기함수는 정현함수의 급수로 나타낼 수 있다는 확률 진동이론에 의하면 주기함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(T) = \sum A_n \sin(\omega_n T + \phi_n) \quad (1)$$

여기서 A_n 은 n번째 sin 함수의 진폭, ω_n 은 n번째 sin 함수의 진동수, ϕ_n 은 n번째 sin 함수의 위상각을 나타낸다. 이 식에 의해 생성된 운동은 steady-state motion이므로 실제 지진 특성과 유사하게 만들기 위해 사다리꼴(Trapezoidal), 지수형(Exponential), 복합형(Compound) 등의 포괄함수를 곱하여 사용하는데, 본 연구에서는 해석의 효율성을 위하여 일반적으로 자주 사용되는 사다리꼴 포괄함수를 적용하였다. 인공지진 발생시간은 24초, 시간간격은 0.01초이고 최대응답이

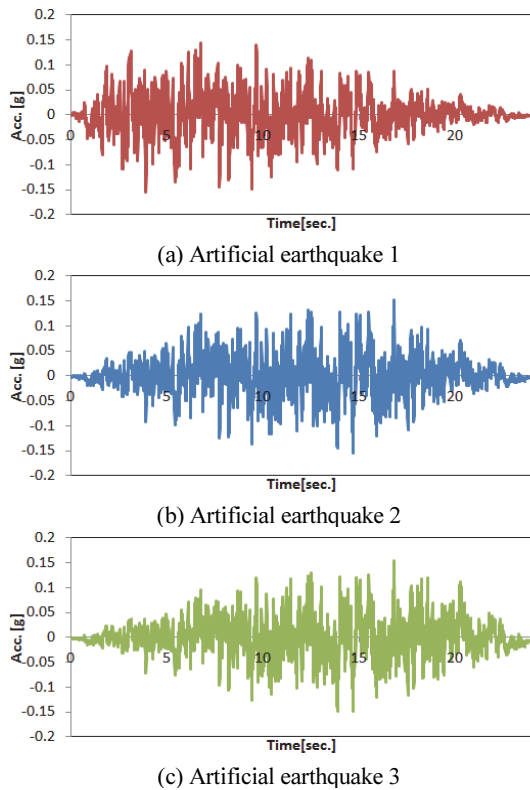


Fig. 2 Artificial earthquake by the Korean cable-supported bridge design specifications

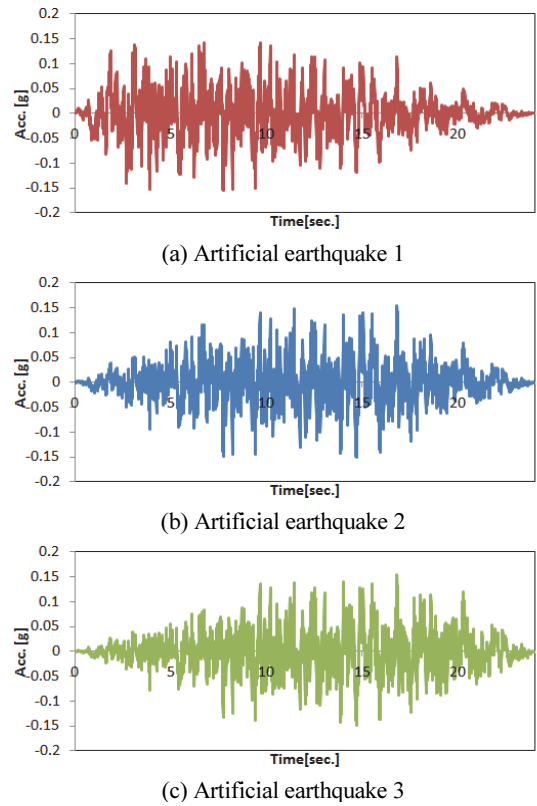


Fig. 3 Artificial earthquakes by Eurocode (2007)

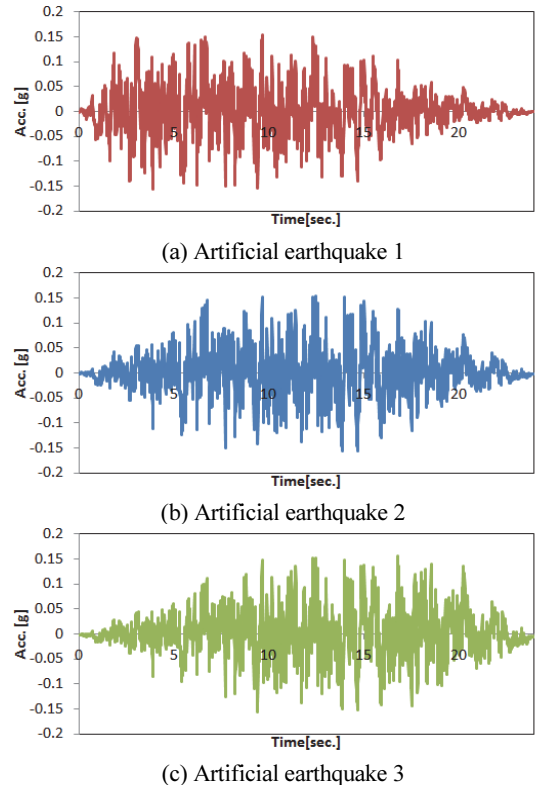


Fig. 4 Artificial earthquake by AASHTO (2009)

발생하는 시간을 달리하여 각각 세 가지 인공지진을 생성하였고, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4는 각 국가의 설계기준에 의한 인공지진파를 나타낸 것이다.

3. 유한요소 해석

본 연구에 사용된 해석대상 교량은 장대교량의 대표적 형식인 사장교이다. 해석 시 사용 모델은 교량 전체를 모델링 범위에 포함하며, 유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 사용하였다. 각 연결부와 절점은 6개의 자유도를 갖고 구조질량은 최소한 3개의 이동을 갖는 집중질량으로 모형화하였다. 보강형과 주탑부는 빔(beam)요소로 모델링하였고, 주케이블과 행어는 케이블 요소로 모델링하였다. 자유진동 해석 시 교축방향, 교축직각방향 질량 참여율이 90%에 가깝도록 400차의 고차모드까지 해석을 수행하였고, 케이블 강교량의 특성을 고려하여 구조물 감쇠비는 2%를 적용하였다. 또한 각각의 가력 인공지진파는 24초까지 가력 후의 영향을 보기 위해 40초까지 해석을 진행하였다.

인공지진파는 한 번에 하나의 방향에 대해 해석을 수행하였으며, 신축이음부에서 교축(X축)방향과 교축직각(Y축)방향에 대한 변위를 해석하였으며 전체 모델형상은 Fig. 5(a)에 나타내었다. MIDAS 모델에서 신축이음부는 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 절점 1000번, 1280번이다. 유한요소해석을 통해

이 절점의 X축과 Y축에 대해 시간에 따른 변위를 해석하였다.

해석시 사용한 지진하중 조합은 Table 1과 같이 도로교설계기준(2010)의 직교 지진력의 조합을 사용하였고, Table 2, Table 3, Table 4는 각 설계기준에 따른 인공지진파를 가력한 결과 X축과 Y축에 대한 변위값을 나타낸 것이다.

Table 1 Load combinations (KHBDC, 2010)

| Load combination | Longitudinal elastic support force (X-axis) | Transverse elastic support force (Y-axis) |
|------------------|---|---|
| 1 | 1.0 | 0.3 |
| 2 | 0.3 | 1.0 |

Table 2 Results of loading by artificial earthquake waves according to each design code (node 1000, Artificial earthquake 1, unit: mm)

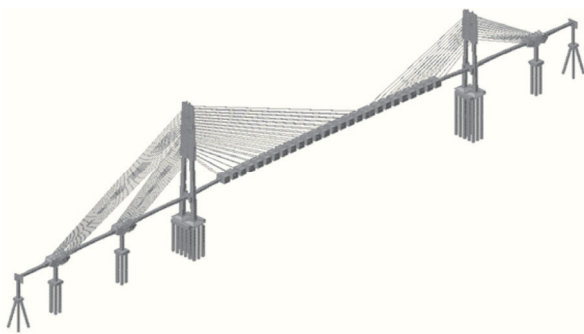
| | | Longitudinal direction | | Transverse direction | |
|----------|-----|------------------------|--------|----------------------|--------|
| | | 0.3X+Y | X+0.3Y | 0.3X+Y | X+0.3Y |
| KS | Max | 52.5 | 168.5 | 246.5 | 73.3 |
| | Min | -48.4 | -159.3 | -227.7 | -66.4 |
| Eurocode | Max | 38.0 | 123.2 | 297.4 | 84.6 |
| | Min | -37.2 | -120.2 | -269.6 | -79.8 |
| AASHTO | Max | 53.6 | 171.1 | 277.0 | 82.4 |
| | Min | -51.5 | -169.2 | -250.9 | -73.5 |

Table 3 Results of loading by artificial earthquake waves according to each design code (node 1000, Artificial earthquake 2, unit: mm)

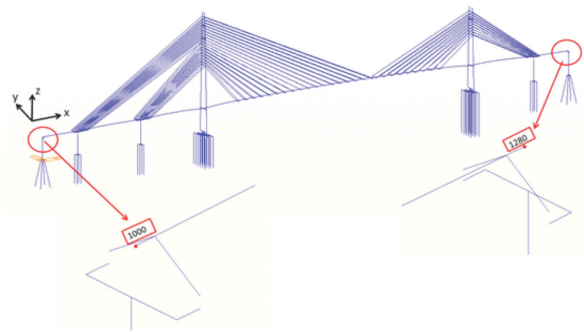
| | | Longitudinal direction | | Transverse direction | |
|----------|-----|------------------------|--------|----------------------|--------|
| | | 0.3X+Y | X+0.3Y | 0.3X+Y | X+0.3Y |
| KS | Max | 61.6 | 198.9 | 223.3 | 63.9 |
| | Min | -49.3 | -162.4 | -192.2 | -64.5 |
| Eurocode | Max | 49.0 | 159.1 | 298.2 | 87.0 |
| | Min | -41.1 | -133.8 | -269.9 | -80.7 |
| AASHTO | Max | 59.6 | 188.5 | 253.5 | 74.6 |
| | Min | -49.0 | -157.9 | -212.3 | -69.5 |

Table 4 Results of loading by artificial earthquake waves according to each design code (node 1000, Artificial earthquake 3, unit: mm)

| | | Longitudinal direction | | Transverse direction | |
|----------|-----|------------------------|--------|----------------------|--------|
| | | 0.3X+Y | X+0.3Y | 0.3X+Y | X+0.3Y |
| KS | Max | 57.3 | 184.7 | 210.7 | 58.6 |
| | Min | -44.2 | -145.3 | -194.5 | -59.4 |
| Eurocode | Max | 31.9 | 111.9 | 233.7 | 62.2 |
| | Min | -27.0 | -92.3 | -189.4 | -53.4 |
| AASHTO | Max | 55.8 | 176.5 | 278.5 | 72.1 |
| | Min | -43.0 | -138.6 | -230.0 | -66.3 |



(a) Cable stayed bridge model



(b) Ends of the bridge and position of expansion joint

Fig. 5 Analysis model of the selected bridge

4. 실험방법 및 결과

신축이음장치의 지진에 대한 내구성 확보를 위한 성능평가는 실험 규정이 아직 전무한 실정이다. 따라서 KS, Eurocode, AASHTO 각각의 설계기준에 의한 지진응답 거동 해석을 통해 얻어진 신축이음부의 변위양상을 실제 신축이음장치에 동적 유압가력기(actuator)로 신축이음장치의 X축 및 Y축 방향

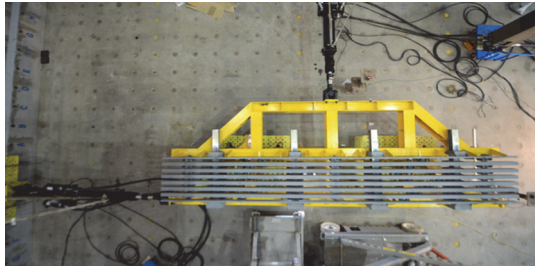
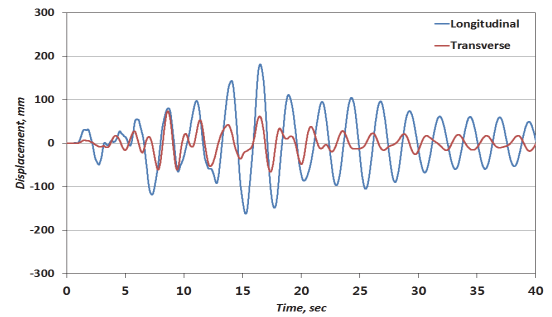


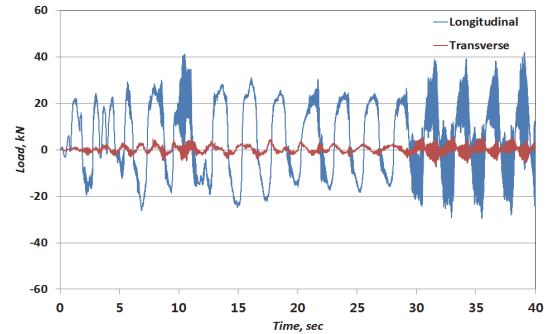
Photo 1 Seismic simulation test of expansion joint

Table 5 Peak displacement and peak acceleration of cable stayed bridge

| Test variable | Longitudinal direction | | Transverse direction | |
|---------------|------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | Peak displ. (mm) | Peak accel. (mm/s) | Peak displ. (mm) | Peak accel. (mm/s) |
| AASHTO_1X | 353.4 | 493.8 | 151.3 | 511.6 |
| AASHTO_1Y | 110.7 | 203.6 | 513.7 | 919.7 |
| AASHTO_2X | 346.9 | 486.6 | 139.8 | 285.0 |
| AASHTO_2Y | 108.4 | 208.3 | 452.4 | 1049.6 |
| AASHTO_3X | 311.2 | 737.7 | 134.1 | 511.1 |
| AASHTO_3Y | 96.8 | 202.8 | 494.9 | 1030.4 |
| EURO_1X | 244.0 | 508.1 | 159.8 | 481.8 |
| EURO_1Y | 75.1 | 129.1 | 552.4 | 1063.2 |
| EURO_2X | 286.4 | 460.5 | 163.6 | 377.2 |
| EURO_2Y | 87.7 | 182.7 | 554.6 | 1123.6 |
| EURO_3X | 202.3 | 349.7 | 112.7 | 257.0 |
| EURO_3Y | 57.3 | 148.7 | 424.7 | 956.8 |
| KS_1X | 337.0 | 569.1 | 136.3 | 518.4 |
| KS_1Y | 104.8 | 148.6 | 464.3 | 929.1 |
| KS_2X | 359.1 | 758.36 | 125.5 | 258.9 |
| KS_2Y | 110.1 | 199.2 | 406.6 | 771.1 |
| KS_3X | 326.2 | 763.3 | 144.8 | 385.6 |
| KS_3Y | 100.5 | 152.2 | 397.2 | 907.3 |
| AASHTO_X | 355.4 | 867.0 | - | - |
| AASHTO_Y | - | - | 519.7 | 950.7 |
| EURO_X | 228.3 | 828.2 | - | - |
| EURO_Y | - | - | 559.3 | 1021.5 |
| KS_X | 360.1 | 605.4 | - | - |
| KS_Y | - | - | 467.8 | 565.8 |

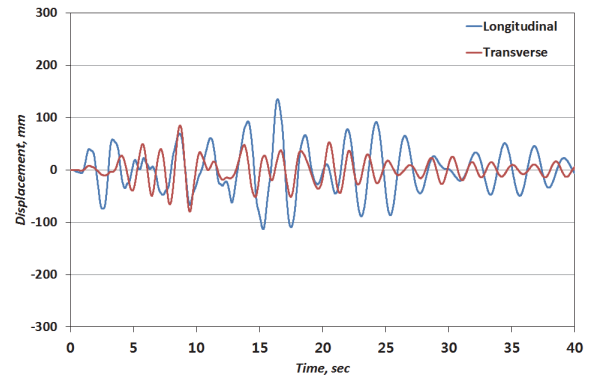


(a) Displacement time histories

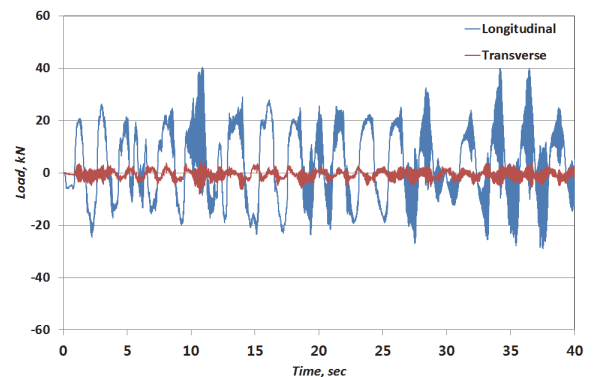


(b) Load time histories

Fig. 6 Displacement and load time histories (KS)

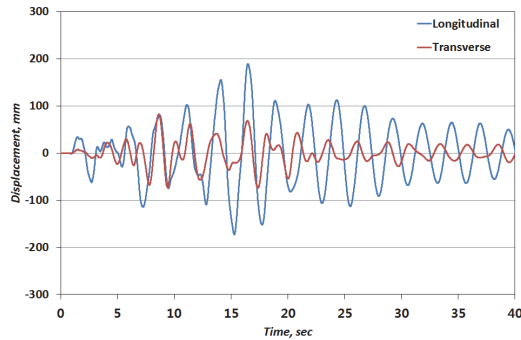


(a) Displacement time histories

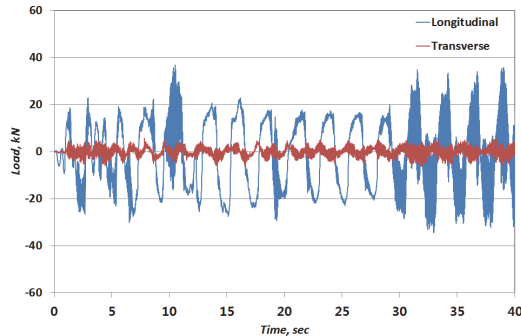


(b) Load time histories

Fig. 7 Displacement and load time histories (Eurocode)



(a) Displacement time histories



(b) Load time histories

Fig. 8 Displacement and load time histories (AASHTO)

으로 재현하여 거동양상 및 신축변위 변화를 측정하는 실험을 수행하였다. Photo 1은 지진모사실험전경을 나타낸 것이고, Table 5는 실험변수에 따른 최대변위 및 최대속도를 나타낸 것이다. 최대변위는 지진응답 해석으로 구한 변위값을 동적 유압 가력기를 통해 모사하여 계측한 변위값이며, 최대속도는 동적 유압가력기의 가진속도를 나타낸 것이다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 설계기준에 따른 X축 및 Y축 방향에 대한 인공지진파 가진 결과를 시간에 대한 변위 이력으로 나타낸 것이다.

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타난 바와 같이 각 기준에 맞는 인공지진파를 가력한 결과 신축이음장치는 원활한 거동양상을 보였으며, 작동시에도 신축이음장치에 작용하는 하중은 약 40 kN(교축방향) 미만으로 지진에 대한 충분한 내구성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 지진 내구성 평가 실험 종료 후 신축이음 부품의 육안 검사를 통해 부품의 이상결함도 발생하지 않았다. 따라서 한국, 유럽, 미국의 내진설계기준에 의한 인공지진파 가력 실험 결과 각 내진기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 신축이음장치의 지진에 대한 내구성 확보를 위한 성능평가에 있어서 신축이음장치의 지진 거동 특성을

파악하고, 그 응답에 대한 신축이음의 성능평가 방법에 대한 연구를 수행하였다.

한국, 유럽, 미국의 설계기준에 적합한 인공지진파를 신축이음장치에 가력한 결과 원활한 거동양상을 보였으며, 이때 신축이음에 작용하는 하중도 40kN 미만의 작은 하중이 발생하였고, 이는 교량에 손상을 입히지 않고 지진에 대한 충분한 이동 성능을 확보하고 있음을 알 수 있다. 향후, 점점 더 활발해지는 교량의 장대화 경향에 따라 지진 및 풍하중에 대한 내구성 확보를 위해 최적화된 성능평가법 개발이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-B132914-02) 및 대봉비엠텍(주)의 시험체 제공에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. National Construction Institute (1982), Methods for expansion joint and bearing of bridges, National Construction Institute.
2. Korean Standards Association (2001), KS F 4425 – Testing method for bridge expansion joint, Korean Standards Association .
3. Kim, Y. J., Cho, C. B., Kwahk, I. J., Yoon, H. J., Kwark, J. W., and Lee, J. W. (2008), Design and performance evaluation of bridge expansion joint, Korea Bridge Design & Engineering Research Center.
4. Korea Highway Corporation. (2004), A survey on the design specifications and improvement directions of finger joint, Korea Highway Corporation.
5. Korea Road & Transportation Association. (2010), Highway bridge design code, Korea Road & Transportation Association .
6. AASHTO. (2010), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington DC, USA.
7. David J. Lee (1994), Bridge Bearing and Expansion Joints Second edition, E&FN SPON, U.K.
8. Dexter, R. J., Conner, R. J., and Kaczinski, M. R. (1997), Fatigue Design of Modular Bridge Expansion Joints, National Research Board, NCHRP Report 402.
9. Dexter, R. J., Mutziger, M. J., and Osberg, C. B. (2002), Performance Testing for Modular Bridge Joint Systems, National Research Board, NCHRP Report 467.
10. Eurocode. (2007), Bridge Bearing and Expansion Joints Second edition, E&FN SPON, U.K.
11. Vanmarcke, E. H. and Gasparini, D. A. (1976), Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, M.I.T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, No. 527.

Received : 08/08/2022

Revised : 08/24/2022

Accepted : 09/12/2022

요 지 : 본 논문에서는 신축량이 크고 내구성이 우수한 모듈러 신축이음장치의 내진성능을 평가하기 위해 지진응답 거동해석과 지진거동모사실험을 수행하였다. 지진응답 거동해석은 한국(KS), 미국(AASHTO LRFD), 그리고 유럽(Eurocode)의 설계기준 응답스펙트럼을 적용하여 인공지진파를 생성하였다. 해석대상 교량은 경간 1,000m 사장교를 대상으로 각 기준에 대해 세가지의 인공지진파를 생성하였으며, 지진거동모사실험은 축방향과 횡방향의 동적 유압가력기를 사용하여 인공지진파를 재현하였다. 실험결과 축방향, 횡방향 및 양방향에 인공지진파를 재하하였을 때 신축이음의 거동 이상이나 파괴는 발생하지 않았으며, 신축이음장치의 지진거동에 대한 내구성 및 안전성을 확인하였다.

핵심용어 : 내진성능, 모듈러 신축이음장치
