

탄성받침의 강성 변동을 고려한 PSCI 거더 교량의 지진 응답 평가

Seismic Response Evaluation of PSCI Girder Bridges Considering Stiffness Variation in Elastic Bearings

윤혜진^{1)*} · 조창백²⁾ · 김영진³⁾ · 강준원⁴⁾

Yoon, Hyejin^{1)*} · Cho, Chang-Beck²⁾ · Kim, Young-Jin³⁾ · Kang, Jun Won⁴⁾

¹⁾한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원, ²⁾한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, ³⁾한국건설기술연구원 기획조정본부 선임연구위원, ⁴⁾홍익대학교 건설환경공학과 교수

¹⁾Research Fellow, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ²⁾Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ³⁾Senior Research Fellow, Planning and Coordination Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ⁴⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

/ A B S T R A C T /

An elastic bearing must be strong against vertical loads and flexible against horizontal loads. However, due to the material characteristics of rubber, it may show variability due to the manufacturing process and environmental factors. If the value applied in the bridge design stage and the actual measured value have different values or if the performance during operation changes, the performance required in the design stage may not be achieved. In this paper, the seismic response of bridges was compared and analyzed by assuming a case where quality deviation occurs during construction compared to the design value for elastic bearings, which have not only always served as traditional bearings but also have had many applications in recent seismic reinforcement. The bearing's vertical stiffness and shear stiffness deviation were considered separately for the quality deviation. In order to investigate the seismic response, a time history analysis was performed using artificial seismic waves. The results confirmed that the change in the bearing's shear stiffness affects the natural period and response of the structure.

Key words: Elastomeric bearings, Earthquake, Seismic design

1. 서론

교량 받침은 교량에서 상부구조와 하부구조 사이에 위치하여 상시에는 상부구조의 하중 전달과 신축에 따른 이동량을 수용하는 전통적인 역할과 함께 지진시 지진 수평력을 분담 또는 감쇄시키거나 지진 변위를 흡수하는 등의 내진장치로서의 역할이 요구되고 있다. 국내에서는 행정안전부의 2011년 내진보강 기본계획이 수립되면서 내진보강을 위한 예산 투자가 지속적으로 증가 추세이며, 경주지진('16년)과 포항지진('18년)을 계기로 평균과 비교하여 예산 투자가 크게 증가하였다. 공공시설물 중에서도 도로, 철도 등의 주요 인프라와 학교의 내진보강이 우선시됨에 따라 내진장치의

다양화 및 고기능화가 요구되는 추세이다.

교량의 내진보강은 지진 수평력에 저항할 수 있도록 부재의 성능을 향상시키는 방법과 구조물의 동특성을 이용하여 지진 수평력을 감소시키는 방법으로 구분된다. 본 연구에서 다루고자 하는 탄성받침은 고무와 보강판의 적층구조로 이루어져 있으며, 경제성 및 효율성 측면에서 받침의 주요 기능을 수행하기에 유리하다. 또한 경제성을 이유로 최근 지진격리받침과 함께 내진보강 방안으로 적용이 확대되어왔다. 탄성받침은 수직하중에 대해서는 강하면서 수평하중에 대해서는 유연한 성능이 요구된다. 하지만 고무의 재료 특성상 제조과정과 환경적인 요인에 의해 큰 변동성을 보일 수 있는데, 교량 설계 단계에서 적용한 값과 실측치가 상이하거나 공용 중 받침의 성능이 변화하는 경우에는 설계 단계에서 요구되는 성능이 발휘되지 못할 수도 있다. 기존 연구 중에서 설계값과 실측치의 차이에 주목한 연구사례를 살펴보면 Yoon et al.[1]은 탄성받침에 대한 실험을 통해 강성 제안식과 실측치

*Corresponding author: Yoon, Hyejin

E-mail: hiyoon@kict.re.kr

(Received December 28, 2022; Revised June 1, 2023; Accepted June 1, 2023)

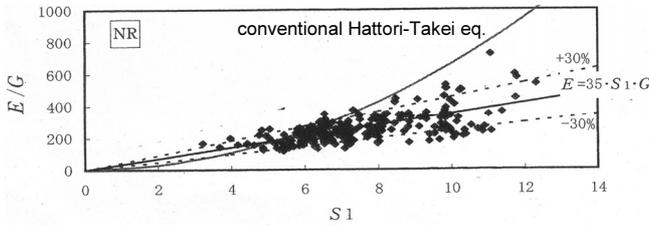


Fig. 1. Improved compressive modulus of elasticity at the Road Bridge Bearing Handbook in Japan[9]

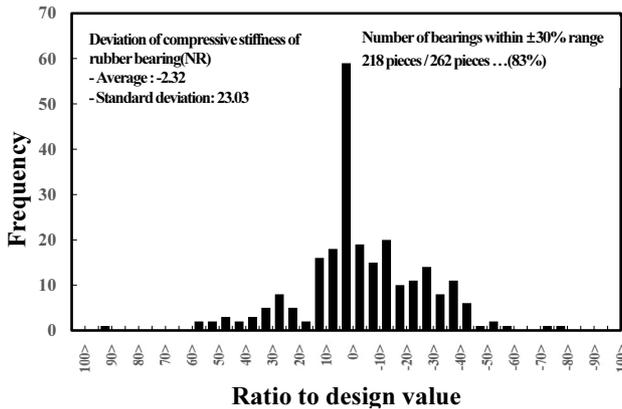


Fig. 2. Distribution of measured values versus design values[9]

의 편차 정도를 분석하였다. Erduran et al.[2]은 수치해석으로부터 철도교량에서 받침 강성, 교량의 고유진동수 및 열차 하중 진동수 영향 사이의 상호작용을 분석하고, 받침의 강성이 교량의 최대 가속도 진폭과 교량의 최대 가속 위치에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 한편, 공용 중 환경적인 요인에 의한 고무의 물성 변동성에 주목하여 Itoh and Gu[3]는 천연고무의 열노화 테스트로부터 받침 블록의 표면과 내부의 물성변화를 정량적으로 조사하여 비교하였다. Park and Oh[4]는 납고무받침의 열노화에 따른 받침 특성변화가 교량의 내진성능에 미치는 영향을, Oh and Jung[5]은 천연고무받침을 대상으로 열노화에 따른 내진성능 변화를 분석하였다. Jung et al.[6]는 교량받침의 물성치에 보정계수를 적용함으로써 노후화를 고려한 PSC Box 교량의 내진성능을 평가하였다.

설계에서 목적인 받침의 성능이 설치 후에도 지속적으로 발휘되기 위해서는 설계기준이 사용되는 받침의 실제 성능 수준을 반영해야 하며, 합리적인 성능평가기준의 설정을 통한 품질관리가 필요하다[1]. 국내에서는 받침이 교량의 주요 부재가 아니라는 인식이 연구개발에서 소외되어 온 탓에 관련 연구가 매우 미흡하고 2012년에 도로교설계기준 한계상태설계법(현재 KDS 24 90 11) 제정을 계기로 비로소 탄성받침을 비롯한 대표적인 받침 형식에 대한 상세한 설계기준이 마련되었다[7, 8]. 하지만 실제 받침에 대한 정확한 진단과 평가를 위한 성능 실험 절차 및 품질 기준이 뒷받침되지 못해 그 성능을 객관적으로 확인하는 면에서는 미흡한 상황이다. 현재 KDS 24 90 11에서 강제보강 탄성받침의 설계기준은 마련되어 있지만 성능 확인을 위한 품질기준과 시험기준은 없는 상태이다. 한편 지진격리받침은 설계기준에서 품질기준을 제시하고 있지만 이를 확인할 수 있는 국내 시험절차가 부재한 상황이다.

대규모 지진 경험이 많은 일본, 미국 등의 국가에서는 지진시 받침 등의

Table 1. KDS 24 90 11 Quality standard of rubber type seismic isolation bearings

	Effective stiffness	EDC
Individual	±20%	-25%
Average	±10%	-15%

연결부의 파손이 전체 교량이 붕괴로 이어짐에 따라 내진장치를 교량의 주요 부재로 격상하여 내진장치의 안전성 향상을 위해 지속적인 연구개발을 통한 설계기준 개선과 품질 확보에 노력을 기울여 왔다. 일본에서는 고무의 요구성능 변화로 기준에서 기존의 실측치와의 차이를 줄이기 위한 노력으로 광범위한 고무받침 데이터를 수집·분석하여 2004년 도로교지승편람에 탄성계수 산정식을 개선하였다. Fig. 1은 당시 기준 개선을 위해 고무받침의 최신 실측치와 함께 탄성계수 개선식을 나타낸 것으로, 허용오차는 ±30%로 설정하였다. 한편 Fig. 2는 설계치 대비 실측치의 빈도분포를 나타낸 것으로 ±30% 범위 내의 받침 비율은 83%로 관찰되었다[9].

미국은 교량 해석에서 지진격리받침의 특성값의 변동을 고려하도록 보정계수(λ)를 두고 있다. 보정 상한값(λ_{max})과 하한값(λ_{min})을 적용하여 환경조건, 받침의 노화, 오염에 의한 영향을 반영하도록 한다[10].

$$K_{d,max} = \lambda_{max} K_d \quad (1)$$

$$K_{d,min} = \lambda_{min} K_d \quad (2)$$

국내에서는 탄성받침의 품질 변동을 별도로 고려하고 있지는 않으나, 고무형 지진격리받침에 대해서는 Table 1과 같이 특성값의 변동을 고려한 품질 기준이 있다[8]. 이때 지진격리받침의 특성 변동 범위를 고려한 설계응답이 ±15% 범위 이내인 경우는 적절한 것으로 보고 있다.

본 논문에서는 최근 내진보강에 있어 지진격리받침과 함께 많은 적용 사례를 보이는 탄성받침을 대상으로 품질 편차가 발생하는 경우를 가정하여 교량의 지진응답을 비교하여 분석하였다. 특성 편차는 받침의 수직강성과 전단강성 값을 고려하였다. 수직강성 편차는 일본 도로교지승편람에서 압축탄성계수 제안을 위한 실측치 빈도분포 사례를 참고하였는데, 허용오차(±30%)를 벗어난 경우도 포함할 수 있도록 설계값 대비 ±40%까지 고려하였다. 전단강성 편차에 대해서는 국내 지진격리받침 품질기준에서 전단강성의 개체치에 대한 허용오차(±20%)를 벗어난 경우도 포함할 수 있도록 설계값 대비 ±30%까지 고려하였다. 받침의 물성치 변화의 고려에 따라 설계값과 비교하여 교량의 지진거동을 살펴봄으로써 향후 탄성받침의 품질 기준을 제언함에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 대상 교량

본 논문에서는 지진해석을 위하여 공용 중인 PSCI 거더 교량을 대상으로 하였다. PSCI 거더교는 저렴한 공사비와 짧은 공기의 장점으로 2022년 기준으로 국내 전체 교량의 22.4%를 차지한다[11]. Fig. 3은 대상교량의 전체적인 형상을 나타낸 것이다. 상부구조는 PSCI 형식이며, 5경간 연속의 경간장 30 m, 교폭 12.10 m, 높이 2 m이다. 하부구조는 5개의 T형 교각과

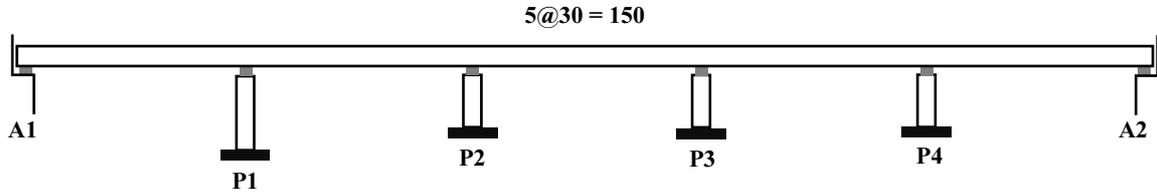


Fig. 3. Overall shape of the bridge

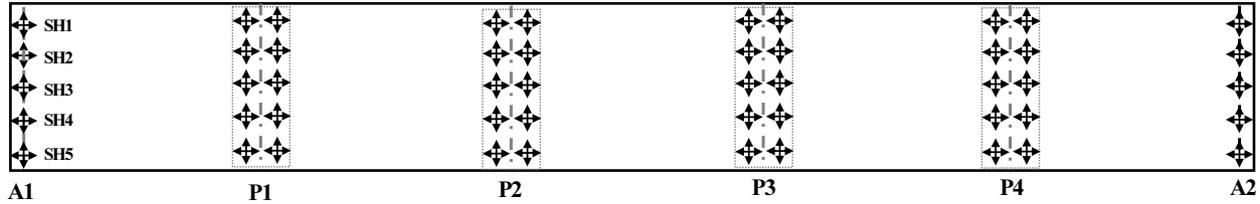


Fig. 4. Bearing arrangement

Table 2. Stiffness property considering quality variation of elastic bearing

Model	Shear stiffness (kN/m)				Compressive stiffness (k_v kN/m)			
	Design	S+10 (S-10)	S+20 (S-20)	S+30 (S-30)	Design	V+15 (V-15)	V+30 (V-30)	V+40 (V-40)
	* design value	* 10% deviation from design value	* 20% deviation from design value	* 30% deviation from design value	* design value	* 10% deviation from design value	* 30% deviation from design value	* 40% deviation from design value
Abutments	1,643	1,807.3 (1,478.7)	1,971.6 (1,314.4)	2,135.9 (1,150.1)	291,000	334,650 (247,350)	378,300 (203,700)	407,400 (174,600)
Pier	2,875	3,162.5 (2,587.5)	3,450.0 (2,300.0)	3,737.5 (2,012.5)	509,300	585,695 (432,905)	662,090 (356,510)	713,020 (305,580)

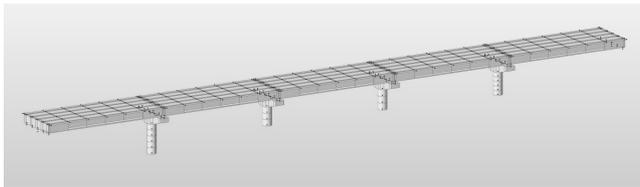


Fig. 5. Target bridge modelling

2개의 교대로 구성되어 있다. 콘크리트 재료는 상부구조에 35 MPa, 하부 구조에 24 MPa를 적용하였다. 받침 배치 현황은 Fig. 4와 같다. 탄성반침이 총 50개소 배치되었는데, 교각에는 10개의 받침을 교축직각방향으로 2열 배치하고, 교대에는 5개의 받침을 교축직각방향으로 1열로 배치하였다. 받침 용량은 1,350 kN이다. 대상 교량은 준공 당시 포트받침이 설치된 교량이었으나, 내진보강을 위해 전량 양방향 탄성반침으로 교체되었다.

2.1 교량 모델링

지진 해석을 위하여 상용 프로그램인 MIDAS를 이용하여 대상교량을 모델링하였다(Fig. 5). 상부구조에서 거더는 보요소, 슬래브는 플레이트 요소로 모델링하고, 하부구조에서 교각을 보요소로 모델링하였다. 탄성반침은 링크 요소를 사용하였다. 이때 교량 받침의 실제 높이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 받침과 교량상부구조 및 하부구조와의 연결은 절점 거리를

반영하여 강체 연결하였다. 구조물 자중은 프로그램에서 자동 계산되도록 하였다.

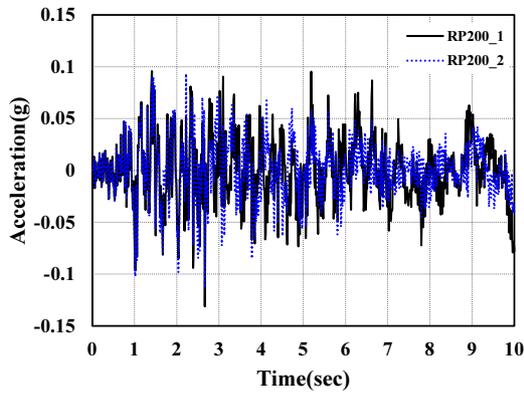
2.2 강성 변동을 고려한 탄성반침 해석조건

설계받침과 공용받침의 물성치 변동을 모사하기 위하여 탄성반침의 설계값 대비 강성 편차에 대한 지진응답 변화를 조사하였다. 대상 교량의 경우 교대부는 수직강성 291,000 kN/m, 전단강성 1,643 kN/m을 갖는 받침으로 설계되었으며, 교각부는 압축강성 509,300 kN/m, 전단강성 2,875 kN/m을 갖는 받침으로 설계되었다. 해석에서 강성 편차는 설계값 대비 수직강성은 $\pm 40\%$, 전단강성은 $\pm 30\%$ 까지 변동성을 갖는 것으로 가정하였다.

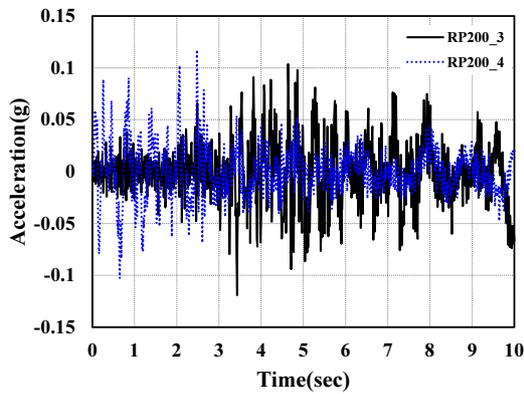
Table 2는 해석 모델별로 받침 물성치 변동 정도를 보여준다. 여기서, 해석모델 “Design”은 설계값을 적용한 것을 의미한다. 전단강성 변동성을 반영한 해석모델은 S-30, S-20, S-10, S+10, S+20, S+30으로 구분하였다. 수직강성 변동성을 고려한 해석모델은 V-40, V-30, V-15, V+15, V+30, V+40으로 구분하였다. 여기서, S와 V는 각각 전단강성과 수직강성을 의미하여 함께 표기되는 부호와 숫자는 물성치 변동 정도를 의미한다.

2.3 지진 하중

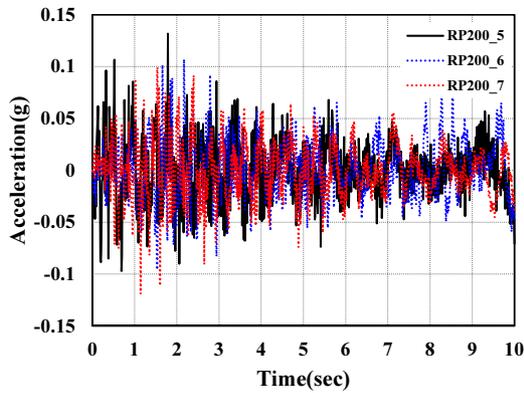
대상 교량의 시간이력해석을 위하여 최대 PGA가 0.11~0.17g 수준인 7



(a) Input earthquake (RP200_1~2)



(b) Input earthquake (RP200_3~4)



(c) Input earthquake (RP200_5~7)

Fig. 6. Input earthquake

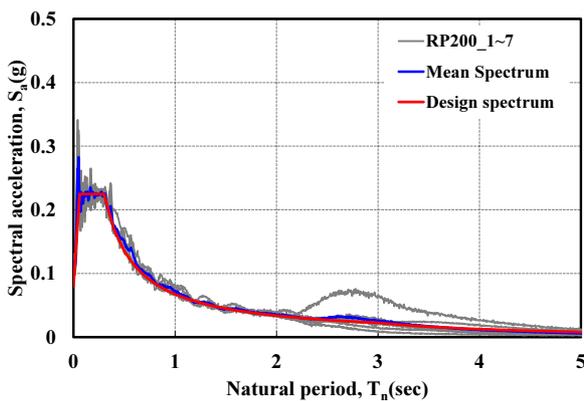


Fig. 7. Acceleration response spectrum

개의 인공지진파를 사용하였다. 시간이력해석은 입력지진에 따른 지진의 크기, 지속시간, 주파수 특성 등과 같이 불확실성을 반영할 수 있다[12]. 인공지진파는 KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법) 기준에 따라 200년 재현주기를 만족시키도록 선정하였으며, 교축방향에 대해 가진 하여 해석하였다. Fig. 6은 시간이력해석에 사용된 인공지진파의 가속도 시간이력을 보여주고 있으며, Fig. 7은 국내 기준에 따른 설계응답스펙트럼과 비교한 것이다.

3. 지진응답 평가

3.1 고유주기 비교

교량 받침의 품질 특성 편차 정도에 따른 교량 시스템의 영향 정도를 알아보기 위하여 모드형상과 고유주기를 비교하였다. Fig. 8은 대상 교량의 모드 형상을 나타낸 것으로, 본 논문에서 고려한 해석에서는 공통적으로 1차 모드 및 2차 모드는 비틀림모드, 3차 모드는 휨모드를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 9는 전단강성의 변동에 따른 일부 해석모델에 대한 1차 모드형상과 고유주기이다. 전단강성 편차가 $\pm 30\%$ 에 이르는 경우 이들 받침이 설치된 교량의 고유주기는 최대 0.27 sec 차이를 보이는 것으로 나타났다. Table 3은 전체 해석모델의 고유주기 산정 결과를 나타내었다. 결과에 따르면 특히 받침 전단강성 변동에 따라 교량의 고유주기가 달라지는 것을 확

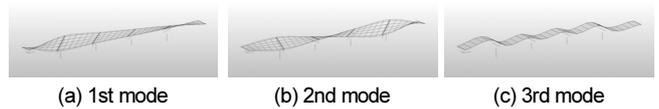


Fig. 8. Mode shape

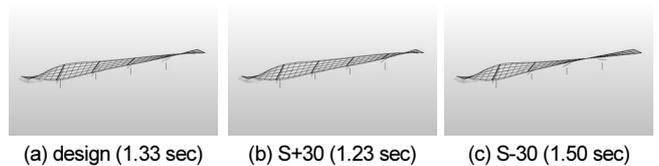


Fig. 9. 1st mode shape and natural cycle

Table 3. Natural cycle according to stiffness variation of elastic bearing

Model	Design	Increasing shear stiffness			Decreasing shear stiffness			
		S+10	S+20	S+30	S-10	S-20	S-30	
Natural cycle (sec)	1st	1.33	1.30	1.26	1.23	1.38	1.44	1.50
	2nd	1.27	1.22	1.18	1.15	1.32	1.38	1.46
	3rd	1.17	1.12	1.09	1.05	1.22	1.27	1.35
Model	Design	Increasing compressive stiffness			Decreasing compressive stiffness			
		V+15	V+30	V+40	V-15	V-30	V-40	
Natural cycle (sec)	1st	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	
	2nd	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	
	3rd	1.17	1.16	1.16	1.15	1.17	1.18	

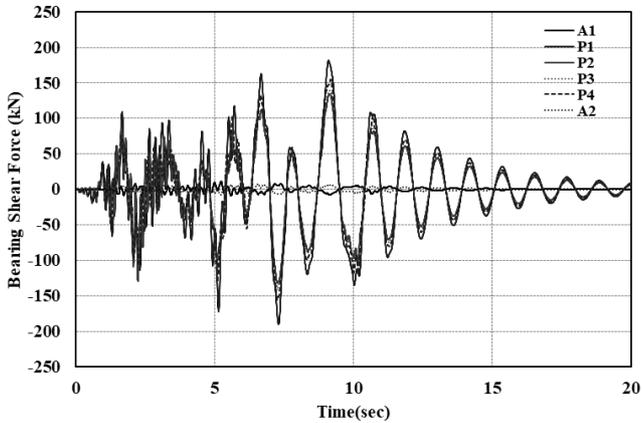


Fig. 10. Bearing shear force time history

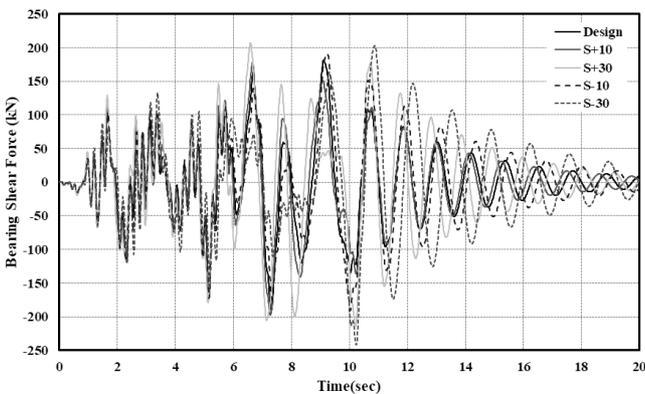


Fig. 11. Bearing shear force time history for the deviation from design value

인할 수 있었다. 교량 설계에서 고려한 받침보다 전단강성이 큰 받침을 설치하는 경우에는 전체 시스템의 고유주기가 감소하고, 전단강성이 작은 받침을 설치하는 경우에는 교량의 고유주기가 증가하는 경향을 보였다. 반면 받침 수직강성 변동에 대해서는 교량 고유주기가 의미 있는 변동은 보이지 않았다.

3.2 받침의 전단강성 편차에 따른 지진응답 비교

Fig. 10은 교축방향으로 일직선상에 있는 교대(A1, A2)와 교각(P1~P4) 받침을 대상으로 교축방향 전단력 시간이력을 나타낸 것이다. 설계값 적용된 해석모델(design)에서의 응답이다. 전단력 응답은 교각P1에서 가장 크게 나타났으며, 전체적으로는 교대보다는 교각에 설치된 받침 응답이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 11은 대상 교량에서 가장 큰 전단력이 발생하는 P1에서 받침의 전단강성 편차가 발생하는 경우에 대한 시간이력응답을 나타낸 것이다. 10초 가진 시간에 대한 전단력 응답은 크기의 편차는 있지만 비슷한 주기로 거동하는 반면 가진이 종료된 이후 응답은 해석 모델에 따라 상이한 주기로 거동하는 것으로 나타났다.

받침의 전단 강성 변동이 교량의 지진응답에 미치는 영향을 알아보기 위하여 받침의 전단 강성 변동이 고려된 해석모델(S+10 ~ S-30)에서의 받침 위치별 절대 최대 단면력과 설계값이 적용된 해석모델(Design)에서의 받

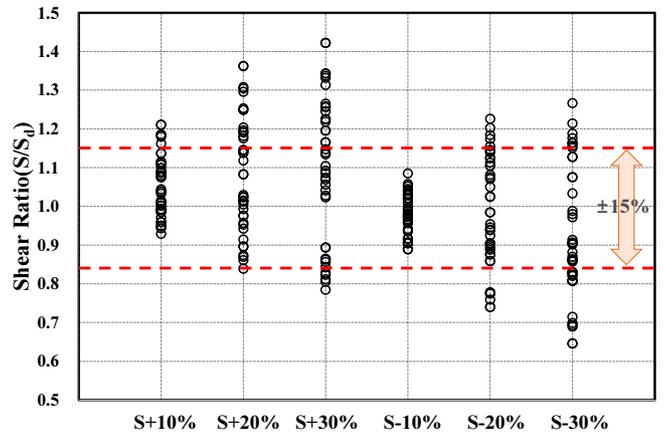


Fig. 12. Variation in shear force ratio of the bridge according to the shear stiffness deviation of the bearing

Table 4. Shear force ratio of the bridge according to the shear stiffness deviation of the bearing

Model		S+10	S+20	S+30	S-10	S-20	S-30
Shear ratio	Max	1.211	1.363	1.422	1.085	1.226	1.266
	Min	0.929	0.839	0.784	0.889	0.740	0.646

침 위치별 단면력과과의 비율을 계산하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 가로축은 받침 전단강성의 변동 정도를 구분한 것이고, 세로축은 설계값과의 단면력 비율을 의미한다. 시간이력해석을 위한 입력지진은 2.3절에서 기술한 7개의 인공지진을 사용하였다. 결과에 따르면 전단강성이 설계값 대비 10% 증가를 모사한 S+10 모델에서는 전단력비가 0.929~1.211 범위로 나타났다. 한편 전단강성이 설계값 대비 30%까지 증가하는 S+30 모델에서는 전단력비는 0.784~1.422 범위인 것으로 나타났다. 받침의 전단강성 증가 또는 감소와 지진응답의 사이에는 일관된 경향이 보이지 않았다. 하지만 지진응답받침의 전단강성이 설계 특성값을 기준으로 품질 편차가 커질수록 설계에서 고려하였던 응답과의 편차도 큰 것으로 나타났다.

한편 Fig. 12에는 국내 기준에서 고무형 지진격리받침의 품질 허용 범위 ($\pm 15\%$)를 함께 표기하였다. 해석모델 S-10을 제외하고는 모든 경우에서 설계응답이 15%를 초과하는 것을 확인할 수 있었다. Table 4는 Fig. 12에서 나타난 해석모델별 전단력비의 최대값과 최소값을 표기한 것이다.

3.3 받침의 수직강성 편차에 따른 지진응답 비교

교량받침의 수직강성 편차에 따른 지진응답을 비교하였다. Fig. 13은 받침의 수직 강성 변동이 고려된 해석모델(V±15, V±30, V±40)에서의 받침 위치별 절대 최대 단면력과 설계값이 적용된 해석모델(Design)에서의 받침 위치별 단면력과의 비율을 계산하여 나타낸 것이다. Fig. 13에서 가로축은 받침 수직강성의 변동 정도를 구분한 것이고, 세로축은 설계값과의 단면력 비율을 의미한다. 받침의 수직강성 편차에 대해서는 전단력 응답 변동은 10% 미만인 것으로 나타났다. 한편, Table 5는 Fig. 13에서 나타난 해석모델별 전단력비의 최대값과 최소값을 표기한 것이다.

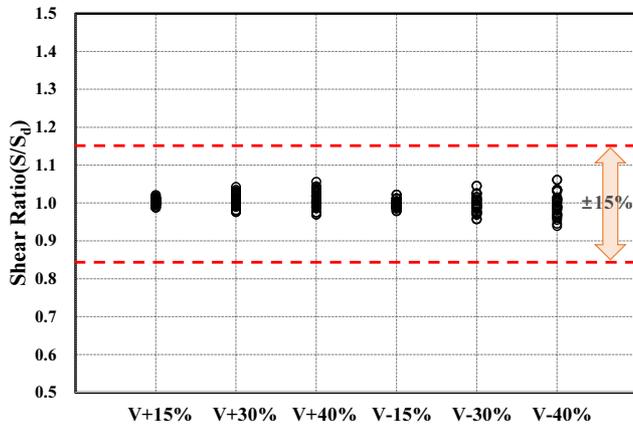


Fig. 13. Variation in shear force ratio of the bridge according to the compressive stiffness deviation of the bearing

Table 5. Shear force ratio of the bridge according to the compressive stiffness deviation of the bearing

Model		V+15	V+30	V+40	V-15	V-30	V-40
Shear ratio	Max	1.021	1.042	1.056	1.022	1.045	1.061
	Min	0.988	0.977	0.970	0.979	0.957	0.939

4. 결론

국내에서 탄성받침은 경제성 및 효율성 측면에서 받침의 주요 기능을 수행하기에 유리하며 최근에는 경제성을 이유로 지진격리받침과 함께 내진 보강 방안으로 적용 사례가 확대되어왔다. 본 논문에서는 교량 설계 단계에서 적용된 값과 실측치가 상이한 값을 가지거나 공용중 성능이 변화 영향을 고려하여 국내의 받침 관련 기준과 함께 지진응답을 조사하고 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 받침의 수직강성 변동은 대상 교량의 지진응답에 미치는 영향이 작음을 알 수 있었다. 받침의 수직강성이 변동되더라도 대상교량의 고유주기에 는 거의 영향이 없었으며, 받침부 응답 크기에도 의미 있는 변화를 확인 하지 못하였다.
- 2) 받침의 전단강성 변동은 구조물의 고유주기에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 설계치보다 실측치가 작은 경우에는 고유주기를 장주기화하는 역할을 하고, 반대의 경우에는 고유주기를 단주기화하는 역할을 한다.
- 3) 받침의 전단강성 변동에 따라 구조물의 지진응답 크기에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 설계값 대비 ±10% 강성 변동에서는 지진응답은 최대 21% 차이를 보였으며, ±20% 강성 변동 시에는 지진응답은 최대 36%, ±30% 강성 변동 시에는 지진응답이 최대 42%까지 차이를 보였다. 국내 기준에서 고무형 지진격리받침의 품질 허용 기준이라 할 수 있는 받침 물성치 변화에 따른 설계응답의 허용 변동범위인 ±15%를 고려한다면 해석모델 S-10을 제외하고는 모든 경우에서 설계응답이 15%를 초과하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 현행 국내 기준에서는 고무형 지진격리받침의 경우 특성 변동 범위를 고

려한 응답이 설계값의 ±15% 이내인 경우 적정한 것으로 규정하는 반면, 지진격리받침과 유사한 고무형 받침인 탄성받침에 대해서는 특성 변동을 고려하지 않고 있다. 탄성받침이 지진격리받침과 함께 내진성능 확보 방안으로 적용 사례가 확대되는 것을 고려한다면 탄성받침에서도 고무형 지진격리받침과의 설계 일관성 확보를 위하여 내진설계에 있어 받침의 특성 변동을 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(건설기술촉진사업, 과제번호 RS-2021-KA163620)으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Yoon H, Cho CB, Kim YJ, Kwahk IJ. A Experimental Study on the Stiffness Characteristics of Elastomeric Bearings. Journal of the Korean Society of Civil Engineering. 2008 Jul;28(4):475-485.
2. Erduran E, Nordli C, Gonen S. Effect of Elastomeric Bearing Stiffness on the Dynamic Response of Railway Bridges Considering Vehicle-Bridge Interaction. Appl. Sci. 2022 Nov;11952.
3. Itoh Y, Gu H. Prediction of Aging Characteristics in Natural Rubber Bearings Used in Bridges. Journal of Bridge Engineering. 2009 Mar; 14(2):122-128.
4. Park SK, Oh J. Influence of Aging of Lead Rubber Bearing on Seismic Performance of Bridges. KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research. 2012 Mar;32(2A):109-116.
5. Oh J, Jung HY. Effects of Thermal Aging of Natural Rubber Bearing on Seismic. Journal of the Korean Society of Civil Engineering. 2013 May;33(3):855-864.
6. Jeong YH, Song JK, Shin S. Evaluation of Seismic Response Considering the Ageing Effect of Rubber and Lead-Rubber Bearings Applied to PSC Box Bridge. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2019 Oct;23(6):311-319.
7. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Road Bridge Design Criteria (Limit State Design Method). c2012.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Design standards for bridges and other facilities (limit state design method) (KDS 24 90 11:2021). c2021.
9. Japan Road Association. Road Bridge Bearing Handbook. Science and Technology. c2005.
10. AASHTO. Guide Specification for Seismic Isolation Design, 4th edition, c2014.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2022 Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics. c2021.
12. Lee DH, Jeong HD, Kim BH. Seismic Fragility Analysis of a RC Bridge Including Earthquake Intensity Range. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE. 2018;38:635-643.