

납-적층고무받침의 지진안정성 및 피로거동 실험 Seismic Stability and Fatigue Performance Test of Lead Rubber Bearings

조 창 백*, 광 임 종**, 김 영 진***, 광 종 원**, 조 해 진****

Cho, Chang Beck · Kwahk, Imjong · Kim, Young Jin · Kwark, Jong Won · Cho, Hae Jin

ABSTRACT

In this study, performance level evaluation tests have been actually performed on laminated rubber seismic isolation bearings (LRB) made in Korea. To provide basic data for setting up fabrication criteria and performance evaluation criteria three real scale LRB were tested and the test results were analysed. Accordingly, a large capacity test device has been designed and manufactured to implement the tests. The device selected for evaluation is a circular LRB actually applied in bridges. Evaluation tests were conducted using full-scale LRB with diameter of 851mm in the rubber part and total height of 215mm of which the effective horizontal stiffness and equivalent damping ratio have been measured during the experiments.

1. 서 론

최근 해상 교량을 포함한 교량 구조물의 건설에 있어서 대형화 및 장대화의 추세가 계속되고 있다. 중약진 지역에 속해 있다고 할 수 있는 우리나라에서 내진에 대한 설계 기술이 계속 발전하고 있으며, 교량이 충분한 내진성능을 확보하기 위해서는 부속시설물의 내진성능 및 신뢰성 확보가 꼭 필요하다.

국내에 LRB 등 지진격리장치가 도입되어 적용된 역사는 10여년이 넘었으나, 이를 뒷받침할 지진격리설계 기준, 지진격리장치 성능평가 기준 등은 아직 완전히 정립되지 못하여 시공 현장별로 외국의 기준을 적용한 사례가 많이 발견되었다. 이로 인해 국내 건설환경에 적합한 내진 설계에 대한 신뢰성 확보를 위하여 많은 교량설계 기술자들 사이에서 경제적이고 합리적인 지진격리 설계의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

** 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

**** 정회원 · 유니슨 주식회사 건설사업본부 과장

지진격리 설계기준은 개정된 도로교 설계기준에 지진격리설계편이 추가되면서 일차로 정리되었으나, 실제 제작되어 현장에 시공되는 지진격리장치의 성능평가 기준은 국내에 아직 정립되어 있지 않다. 이로 인해 부득이하게 외국에서 외국 기준으로 고비용의 평가실험을 많이 실시하여 왔다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 국가 시설물 내진대책으로서 납-적층고무받침(LRB)를 이용한 내진설계가 신뢰성 있는 유효한 수단으로 널리 인식될 수 있도록 국내의 지진환경, 지진격리장치 제작업체의 현황 등을 반영하여 실용성과 신뢰성을 갖춘 지진격리장치 성능평가를 위한 실험을 실시하였다.

이번 실험연구에서는 납-적층고무받침의 특성실험중 지진안정성과 피로거동에 대하여 실험을 실시하였으며 그 결과를 조사하였다.

2. 시험체 설계

본 실험 연구에서는 국내 생산된 납-적층고무 받침에 대한 실제 성능수준에 대한 평가 시험을 실시하였다. 실험을 실시하기 위해 국내 최대 규모의 지진격리 시험을 할 수 있는 시험장치를 설계 및 제작하였으며, 성능평가 실험대상으로 그림 1과 같은 원형 LRB를 선정하였다.

기존의 국내 실험에서는 축소모형을 제작하여 사용했던 관계로 실험 대상 시편의 크기가 각각 지름 600mm 이하의 시험체로서 크기가 비교적 작았고, 고유주기를 기준으로 strain rate에 맞추어 축소모형으로 상사하였다.²⁾ 그 결과 축소 상사율이 3이상인 시험체의 형상비가 상대적으로 커서 실험 도중 불안정 거동을 보인 사례가 일부 있어 일반적인 형상비의 지진격리받침의 성능을 측정하기에는 어려운 측면이 있었다. 따라서 이번 성능평가 실험에서는 축소모형 시험체 대신에 실제 시공되는 실물의 중대형 원형 LRB를 대상으로 시험을 실시하였다.

원형 LRB 시험체의 제원은 표 1과 같이 받침지름은 851mm, 전체높이는 215mm이며 시험체의 주요 설계항목 및 재료특성은 표 2와 같다.

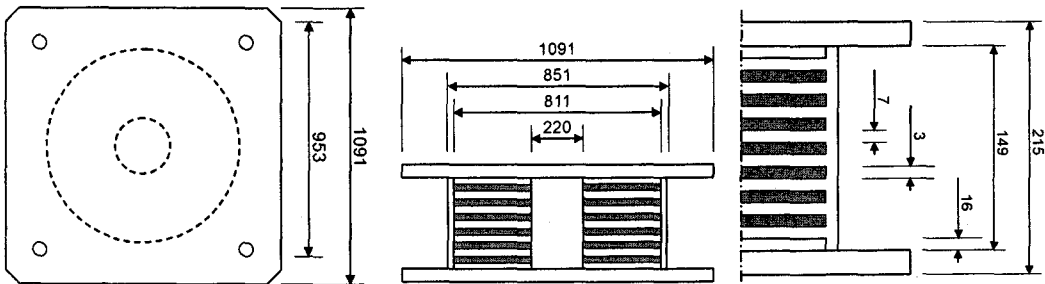


그림 1. 납-적층고무받침 시험체

표 1. 시험체 주요 제원

항목	치수	항목	치수
받침직경 (D)	851 mm	고무 층수 (n)	12 층
고무피복 (Rc)	20 mm	총 고무두께 (T)	84 mm
집착직경 (Db)	811 mm	받침면적 (Ap)	5,688 cm ²
납심직경 (DL)	220 mm	부착면적 (Ab')	4,786 cm ²
고무 한층두께 (ti)	7 mm	납심면적 (AL)	380 cm ²
철판 한층두께 (ts)	3 mm	전단면적 (As)	5,308 cm ²

표 2. 시험체 주요 특성

설계 항목	실제값	재료 특성	특성값
상시 설계 변위 (Ds)	0 mm	고무 전단탄성계수 (G)	4.079 kg/cm ²
지진시 설계 변위 (Di)	40 mm	고무 탄성계수 (E)	16.316 kg/cm ²
수직 설계 하중 (Fz)	579.2 ton	고무 재료상수 (k)	0.675
수직 설계 사하중(Fzd)	347.52 ton	고무 Bulk Modulus(K)	20387.36 kg/cm ²
수직 설계 활하중 (Fzl)	231.68 ton	납의 전단응력도 (Qo)	85 kg/cm ²

3. 지진격리 실험장치

지진격리장치를 이용한 실험은 일반적으로 수직하중을 준 상태에서 횡방향 하중을 가력하게 된다. 이를 위한 실험장치는 대단히 큰 수직하중과 수평하중을 부담하는 지진격리받침을 시험하는 장치이므로 크기 및 중량에 있어서 현저하게 큰 제약을 가진다.

특히, 대형 지진격리받침 시험체의 경우 직경이 1,000mm에 이를 경우 받침이 부담하는 수직하중이 최대 1,000tonf에 이를 수 있으므로 이러한 큰 하중에 견딜 수 있도록 설계하여 그림 2와 같은 대형 지진격리받침의 실험이 가능한 실험장치를 제작하였다.

본 실험장치는 지진격리받침의 동적 실험이 가능한 국내 최대규모의 실험장치로서 동적 Actuator를 장착하여 횡방향 정적실험은 물론 피로 반복실험 및 유사동적 실험이 가능하도록 제작하였다.

실험장치는 크게 전체 실험장치를 지지하는 하부 베이스블럭, 수직하중을 가력할 수 있는 상부 베이스블럭, 횡방향 하중을 가하는 가력판으로 구성하였다. 횡방향 가력판 밑에는 저마찰의 초강성 롤러베어링을 장착하여 횡방향 가력시 이동에 의한 마찰력을 극소화 하였다.

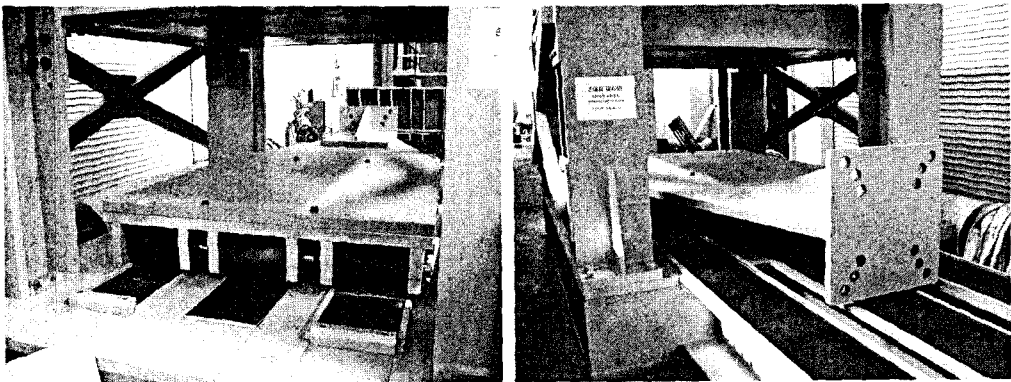


그림 2. 제작된 대형 지진격리받침 실험장치

4. 횡방향 가력 Actuator

수직하중은 하중 크기가 매우 크므로 여러 대의 유압실린더를 이용하여 가력하고, 횡방향 하중은 실험 종류에 따라 정적 또는 동적 Actuator를 장착하여 실험을 실시하였다. 전체 실험에 사용된 Actuator의 특성은 표 3과 같으며, 지진격리받침의 특성실험중 지진안정성 및 피로거동 실험에서는 동적 및 피로실험이 가능한 100tonf Dynamic Actuator를 사용하였다.

표. 3 횡방향 가력 Actuator의 특성

Actuator	Static	Dynamic
Max. Force	350 tonf	100 tonf
Max. Stroke	0~1000mm (±500mm)	0~500mm (±250mm)
Manufacture	Domestic	MTS (U.S.A)

100tonf Dynamic Actuator를 사용할 경우 설계변위(±40mm)에 대응하는 가진진동수는 그림 3과 같이 약 0.5Hz로 제조사에서 제시하고 있다. 실제 시험에서는 Actuator의 수명연한에 의한 성능 감소를 고려하고, 주어진 설계변위를 안정된 상태에서 최대로 가진해야 하므로 가진진동수를 0.3Hz로 설정하여 실험을 실시하였다.

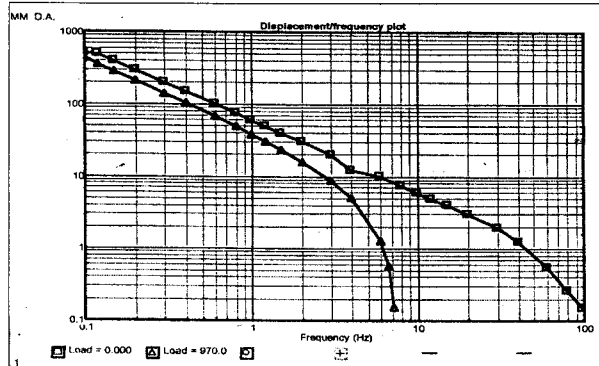


그림 3. 100tonf Dynamic Actuator 성능 제원, MTS社

5. 실험내용

남-적층고무받침(LRB)을 적용하여 지진격리 교량을 설계하는 주요 특성변수로는 수직강성(K_v), 유효수평강성(K_{eff}) 및 감쇠비(ξ), 항복후 강성 등이 있다. 이와 같은 특성값은 일반적으로 LRB 제작회사에서 제시하는 값으로서 LRB를 실제 제작한 후 성능실험에 의해 확인해야 한다. 그리고 지진시 LRB의 안정적인 성능확보 여부를 확인하기 위해 표 4와 같이 각종 의존성 성능시험을 실시해야 한다.

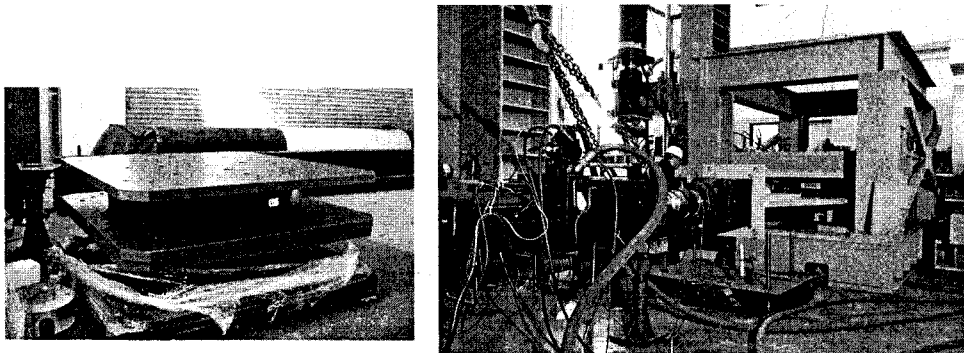


그림 4. 남-적층고무받침 시험체 및 성능시험

표 4. 적층고무 지진격리장치의 시험 항목 및 시험방법¹⁾

항 목		시 험 방 법
기 본 특 성	수직강성	수직력을 최대설계압축력의 100% -> 130% -> 70% -> 100%로 3회 반복재하
	유효수평강성	(1) 최대설계압축력으로 재하상태에서 0.5Hz로 설계지진변위를 10회 왕복
	등가감쇠비	(2) 1,2,10회 측정값 제외하고, 3~9회 측정값의 평균을 결과값으로 사용
	항복후 강성	(1) 전단변형률을 100%에서 200%가 되도록 증가시키고 각각의 강성 측정
연직하중 의존성	(1) 수직력을 최대설계압축력의 40%, 70%, 100%, 130%로 변화 (2) 0.5Hz로 설계지진변위를 10회 왕복	
진동수 의존성	(1) 수직력을 최대설계압축력으로 재하하고 설계지진변위를 10회 왕복 (2) 0.005Hz부터 1.0Hz 범위에서 실시	
전단변형 의존성	(1) 전단변형률 20%, 50%, 100%, 150% 에 대해 실시 (2) 0.01Hz보다 빠른 속도로 10회 왕복	
지진안정성	(1) 수직력을 최대설계압축력으로 재하하고 설계지진변위 50회 왕복(0.5Hz) (2) 시험체를 충분히 식힌 후, (1)을 반복	
파괴변위 (파괴하중 및 안전마진)	(1) 수직력을 최대설계압축력으로 재하 (2) 0.2Hz~0.5Hz의 속도범위로, 각 하중사이클 마다 변위를 1.1배씩 증가 (3) 전단변형률 100%를 초과시, 단조 증가 방법으로 파괴까지 수평력을 작용	
피로 (피로발생후의 성능 평가)	(1) 제조사가 규정한 이동거리, 온도변위에 따라 반복회수 모사 (2) 0.1Hz 또는 제조사가 제시하는 진동수 적용 (최소 2mm/sec 이상의 속도) (3) 최대설계압축력의 100% 재하	

위 시험방법중 본 논문에서는 표 5와 같이 3개의 납-적층고무받침들을 지진안정성 시험과 피로 저항평가 시험에 대하여만 시험하였다.

지진안정성 시험은 반복적으로 계속되는 지진이 발생하는 경우 LRB의 안정성을 평가하기 위한 것이다. 반복하중에 대한 LRB의 특성치 감소비율을 확인하는 것으로 극한거동에 대한 수평 유효강성과 감쇠성능을 평가한다. 본 연구에서는 최대 설계압축력을 재하한 후 설계 지진변위를 0.3Hz의 속도로 50회 왕복하였으며, 실험후 시험체를 충분히 식힌 후 한번 더 반복하여 실험하였다.

또한 온도하중, 차량 등에 의하여 상시에 발생하는 피로거동에 대한 LRB의 저항성을 평가해야 하는데, 이것을 피로저항평가 시험이라 한다. 일정회수 이상의 반복변위를 가하여 피로에 의한 성능저하를 발생시킨 후 기본성능시험을 다시 실시하여 특성치의 변화를 평가한다. 여기서는 0.15Hz의 속도로 10,000회 왕복하였으며 실험이 끝난 후 유효수평강성 및 등가감쇠비를 측정하였다.

표 5. 원형 LRB 시험체에 대한 시험 요약

시험항목	변위	가진속도	반복횟수
기본성능시험	±40mm	0.3Hz	10회
지진안정성시험	±40mm	0.3Hz	50회
	±40mm	0.3Hz	50회
피로저항평가시험	±14mm	0.15Hz	10,000회
	±40mm	0.3Hz	10회

6. 실험결과

6.1 기본성능시험

먼저, 납-적층고무받침 시험체의 설계 지진변위 40mm에 대해 0.3Hz의 진동수로 10회 가력한 결과를 조사하였다. 반복 재하된 값 중에서 1회, 2회값과 마지막 10회를 제외한 결과에 대한 유효수평강성과 등가감쇠비를 정리한 결과는 표 6과 같다. 1회, 2회 그리고 10회값을 제외한 것은 실험 셋팅 후 바로 실험이 실시된 초기 측정값과 마지막 측정값의 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문이다. 실험결과 그림 5와 같이 유효수평강성과 등가감쇠비 모두 반복된 재하에도 불구하고 값이 급하게 변화하지 않고 안정적인 특성을 나타내었다.

표 6. 기본성능 시험결과

항목 \ 회차	시험체	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	평균
유효수평강성 (kN/mm)	LRB #1	14.33	14.05	13.43	13.32	13.01	12.44	12.38	13.28
	LRB #2	13.66	13.30	12.78	12.19	11.70	11.49	11.35	12.35
	LRB #3	15.85	14.96	14.32	13.79	13.42	12.98	13.04	14.05
등가감쇠비 (%)	LRB #1	36.52	36.44	36.89	36.81	37.07	37.99	37.73	37.06
	LRB #2	28.26	28.36	28.80	29.21	29.80	29.90	29.90	29.17
	LRB #3	34.17	33.97	33.90	33.96	34.11	34.76	34.38	34.18

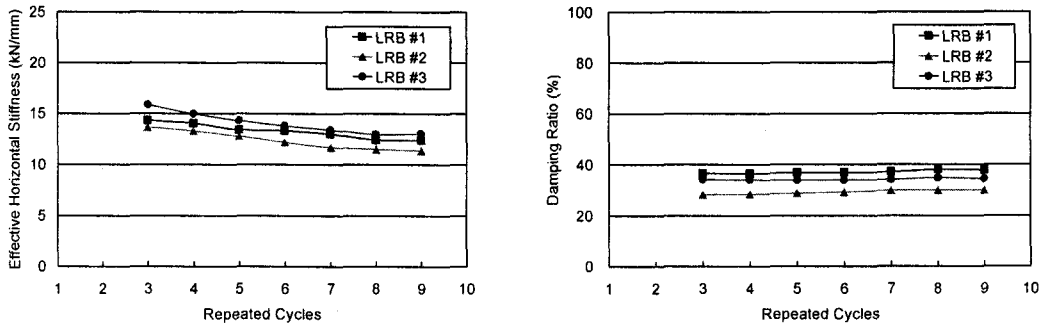


그림 5. 기본성능 시험결과

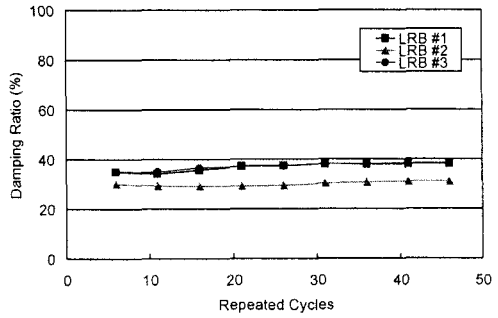
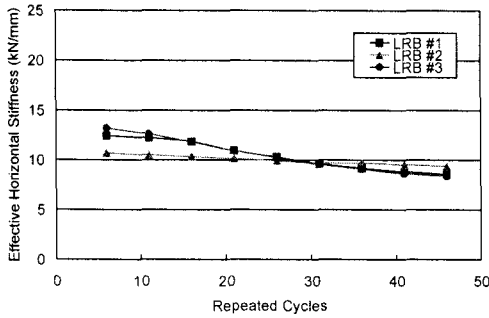
6.2 지진안정성 시험결과

지진중에 지진격리장치의 특성은 반복되는 지진변위에도 불구하고 안정적으로 발휘되어야 한다. 실제 지진이 발생할 경우, 지진격리장치가 지진 지속시간 중 겪는 변위 반복 횟수는 상황에 따라 다르지만, 유효 반복횟수를 대략 50회 정도로 보고 있다.^{1~6)} 그러므로 납-적층고무받침 시험체의 지진시 특성이 안정적인지 평가하기 위해 설계 지진변위를 50회 반복하여 가한 뒤, 유효수평강성 및 등가감쇠비의 변화를 측정하였다. 첫 번째 50회 반복 가력 후 기본성능을 측정하고 시험체를 충분히 식힌 다음, 두 번째 50회 반복 가력을 실시하고 기본성능을 측정한 결과를 표 7에 나타내었다.

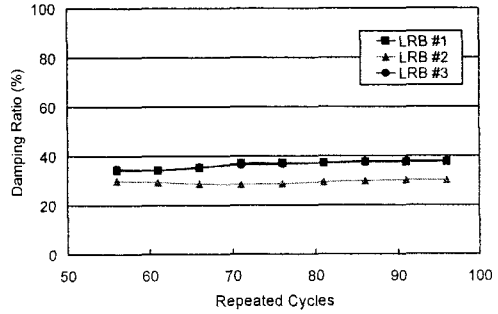
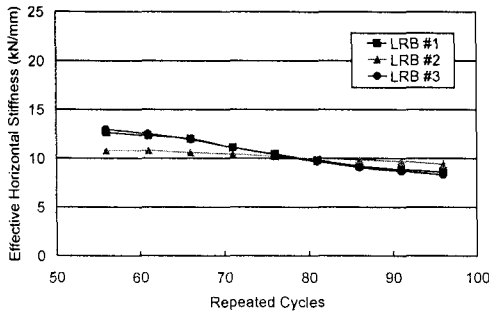
그림 6에서 보는 바와 같이 반복회수 증가에 따라 유효수평강성은 차츰 감소하는 경향을 보이거나 등가감쇠비는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

표 7. 지진안정성 시험결과

항목 \ 회차	시험체	반복 가력 전	1차 50회 가력 후	2차 50회 가력 후
등가강성 (kN/mm)	LRB #1	13.28	8.55	8.56
	LRB #2	12.35	9.36	9.39
	LRB #3	14.05	8.36	8.30
등가감쇠비 (%)	LRB #1	37.06	38.21	37.57
	LRB #2	29.17	30.99	30.16
	LRB #3	34.18	38.37	37.97



(a) 1차 50회 가력 후 성능 측정 결과



(b) 2차 50회 가력 후 성능 측정 결과

그림 6. 반복회수에 따른 유효수평강성 및 등가감쇠비 변화

6.3 피로저항평가 시험결과

납-적층고부받침은 일반적인 교량받침의 역할도 수행하므로 수명기간 동안 온도변화에 따른 상부 구조의 상시 변위로 인한 피로를 받게 된다. 따라서 피로저항성을 평가하기 위해 시험체에 10,000회 반복가진 후 유효수평강성 및 등가감쇠비를 측정하여 가진 이전의 측정값과 비교하였다.

표 8에서 보는 바와 같이 10,000회 이후의 특성이 가진 이전의 특성에 비해 크게 변화하지 않아 충분한 피로성능을 가지는 것으로 판단되었다.

표 8. 피로저항평가 시험결과

항목 \ 회차	시험체	시험전	10,000회 이후
등가강성 (kN/mm)	LRB #1	13.28	12.36
	LRB #2	12.35	10.38
	LRB #3	14.05	12.88
등가감쇠비 (%)	LRB #1	37.06	31.02
	LRB #2	29.17	26.76
	LRB #3	34.18	31.87

7. 결론

본 실험연구에서는 초대형 지진격리장치 시험장치를 설계 및 제작하고, 3개의 실물 중대형 납-적층 고무받침에 대한 지진안정성 시험과 피로저항평가 시험을 실시하였다.

지진에 대한 안정성을 평가하기 위한 지진안정성 시험에서는 유효수평강성의 경우 3개 시험체의 평균값이 가력전 강성값과 비교하여 1차 가력후 65.56%, 2차 가력후에는 66.52%의 강성을 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 등가감쇠비의 경우 1차 가력후 2.39%, 2차 가력후에는 1.76% 증가한 것으로 나타났다. 1차 반복과 2차 반복 후 각각의 실험결과가 매우 유사한 결과를 보이는데, 이것은 설계 강도 수준 이내의 지진과 여진이 단기간에 수차례 반복되더라도 안정적인 지진격리 기능을 발휘할 수 있음을 보여준다.

피로저항평가 시험에서는 시험후의 강성이 시험전과 비교하여 89.6%로 나타났으며 이것은 10,000회 이후의 피로성능이 크게 저하되지 않고 충분한 피로 내구성을 가지는 것으로 판단되었다.

전체적으로 국내에서 생산된 납-적층고무받침의 지진안정성 및 피로거동을 조사한 결과, 받침이 보유한 내진성능 및 피로성능이 일정 수준이상에 도달하였음을 보여주었다. 또한 국내 생산 제품에 대한 제품의 신뢰성도 어느정도 확인할 수 있었다. 추후에는 납-적층고무받침의 특성실험중 다양한 의존성 실험에 대한 실험결과를 조사, 분석하여 제품에 대한 충분한 성능평가를 해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 일환으로서 교량설계핵심기술연구단의 주관하에 이루어졌습니다. 본 연구를 위해 LRB 시험체를 제공해 주신 유니슨(주)에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, “교량 지진격리장치의 성능 및 신뢰성 향상 기술개발(2차년도)”, 2005.
2. 한국도로공사, “지진격리장치의 거동특성에 관한 연구”, 한국도로공사 도로교통기술원, 2002.
3. AASHTO, “Guide Specifications for Seismic Isolation Design”, AASHTO, 1999.
4. Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC) “Guidelines for the Testing of Seismic Isolation and Energy Dissipating Devices”, HITEC 96-02, 1996.
5. Kelly, J.M. “Dynamic and Failure Characteristics of Bridgestone Isolation Bearings”, Report No. UCB/EERC-91/04, EERC, CA, USA, 1991.
6. Elastomeric seismic-protection isolators - part1: Test methods, International standard ISO 22762-1