

지진격리장치(LRB)의 피로시험 결과 Results of Fatigue Test of Lead Rubber Bearing

이 민 구^{*} 강 형 택^{**} 유 환 구^{***}
Lee, Min-Koo Kang, Hyeong-Taek Yoo, Hwan-Gu

ABSTRACT

최근 장대교량의 건설이 증가하고 지진에 대한 관심이 고조되면서 교량의 내진설계와 면진설계가 교량설계의 주요항목으로 자리잡게 되었다. 특히 최근 ILM교량과 같은 다경간 장대교의 경우 지진시 교량의 상부구조와 하부구조를 격리시켜 주기를 변화시키는 LRB를 이용한 면진설계가 주로 이루어지고 있다. 그러나 아직까지 국내에는 LRB의 거동과 기본성능에 대한 실험데이터가 절대적으로 부족하며, 따라서 그 특성을 엄밀히 검증하지 못한 채 고속도로 및 국도상의 교량에 LRB를 다수 사용하고 있는 현실이다.

본 연구에서는 실교량에 사용될 LRB에 대하여 기본성능 중의 하나인 피로마모시험을 수행함으로써 온도하중과 같은 반복하중에 대한 LRB의 피로거동을 모사하고 피로시험 전·후의 기본성능의 변화를 파악하였다. 이러한 LRB의 기본성능에 대한 실험은 LRB의 성능에 대한 검증과 함께 LRB의 거동에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 기본 자료로 축적할 수 있으며, 현재 한국도로공사 도로교통기술원에서 마련중인 지진격리장치(LRB) 성능시험기준(안)의 정립에 기초 자료로 참고하고자 한다.

1. 서 론

80년대와 90년에 미국, 일본, 대만, 터키 등에서 발생한 대규모의 지진피해로 내진설계의 중요성이 우리나라에도 크게 부각되어 1992년도 도로교시방서에 관련 규정이 포함되고 내진설계가 수행되고 있다. 내진방법으로는 구조물의 연성을 증가시키는 방법과 면진장치를 이용하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 전자에 관하여는 연성 확보 및 증대를 위한 띠철근 상세 등 상세한 내용이 도로교시방서에는 포함되어 있으나, 후자의 경우에는 관련 내용이 미비한 실정이다. 그럼에도 불구하고 기 시공된 교량의 내진성능 개선을 용이하게 할 수 있고 비교적 교각이 낮은 다경간 연속교의 내진방법으로 적합하기 때문에 면진장치 특히 LRB가 널리 사용되고 있다.

* 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

** 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, 정회원

*** 한국도로공사 대구-포항건설사업소 과장

그러나 LRB에 대한 기본성능과 거동에 대한 정확한 검증이 이루어지지 않고 또한 그 성능에 대한 기준이 정립되지 않은 상태에서 LRB를 이용한 면진설계와 시공이 이루어짐에 따라 실무를 수행하는데 있어서 어려움이 발생하고 있다. 특히, LRB의 제작 및 설치시 아주 기본적인 성능시험만 수행함으로써 LRB의 장기적인 거동에 대한 실험자료가 턱없이 부족한 실정이다. 따라서 LRB의 사용에 있어서 불확실성을 제거하고 지진시와 상시에 LRB의 거동을 검증할 수 있는 여러 가지 기본성능 실험이 필요하다. 본 실험에서는 LRB의 기본성능중의 하나인 교량의 온도하중 등의 상시하중에 대한 LRB의 거동을 분석하기 위해 실물시험체를 이용한 피로시험을 수행하였으며, 피로시험 전·후에서 기본성능의 변화를 측정하였다.

2. 대상교량의 제원 및 실험개요

(1) 교량의 제원

피로시험에 사용된 LRB가 설치되는 교량은 대구-포항간 고속도로 건설공사 8공구(봉계교-대구방향)중 봉계교이며 대상교량의 개략적인 제원과 일반도는 그림 1과 같다.

- 경간구성 : $50.0 + 8@60.0 + 50.0 = 580.0\text{m}$
- 상부구조형식 : Steel Box Girder
- 교각형식 : 단주식(원형)

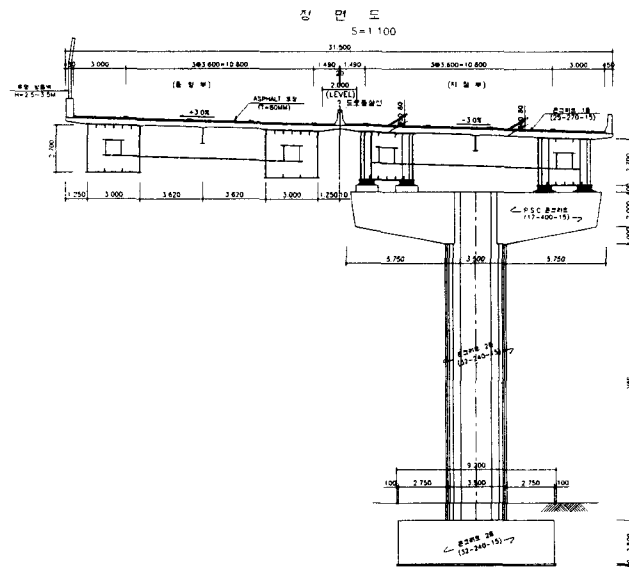
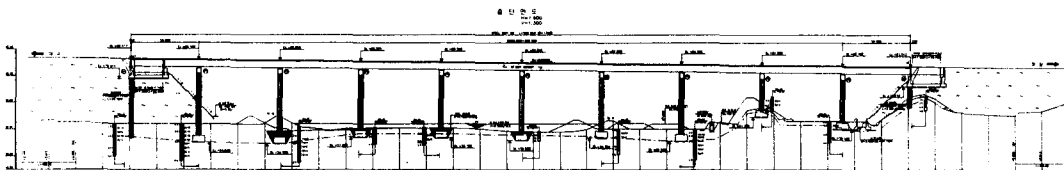


그림 1 대상교량의 일반도

(2) LRB의 특성

LRB는 고무와 철판의 적층에 납이 삽입된 지진격리장치로서, 일반적으로 LRB의 거동은 항복강도(F_y) 또는 특성강도(Q_d), 초기강성(K_i), 항복후강성(K_d) 등으로 표현된다(그림 2). 풍하중, 교통하중 등 비교적 작은 하중에 대하여는 초기 강성(K_i)으로 미소변형을 허용하며, 지진과 같은 큰 하중에 대하여는 납이 항복함에 따라 큰 변형이 발생하고 낮은 강성(K_{eff})을 갖는다. 이러한 특성을 갖은 LRB는 (1) 지진에 의해 발생하는 에너지가 집중되어 있는 주파수 대역을 벗어나도록 구조물의 주기를 길게 하며, (2) 항복거동에 의하여 에너지소산 작용을 한다.

LRB를 이용한 구조물의 상시, 지진시의 거동특성 및 지진격리의 효과를 평가함에 있어서 중요한 요소는 유효수평강성(K_{eff}), 등가감쇠비(ξ_{eq}) 등이며 (식 1)과 (식 2)에 의하여 계산된다. 또한, 고무의 전단탄성계수(G)는 LRB의 유효수평강성과 등가감쇠비에 직접적인 영향을 미치는데, 전단 변형의 크기 등에 따라 변화되는 특성을 가지고 있어 이에 대한 평가 및 설계를 위한 등가 선형식(식 3)이 제시되어 있다.

$$\text{유효수평강성} : K_{eff} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})} \quad (\text{식 1})$$

$$\text{등가감쇠비} : \xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eff} \delta_{max}^2} \quad (\text{식 2})$$

$$\text{전단탄성계수} : G = \frac{1}{6.38\gamma_{max}} + 0.33 \quad (\text{식 3})$$

여기서, P_{max} 와 P_{min} 은 각각 B와 B'점에서의 수평력, δ_{max} 와 δ_{min} 은 각각 B와 B' 점에서의 변위, ΔW 는 사각형의 면적, γ_{max} 는 최대 전단변형률을 의미한다.

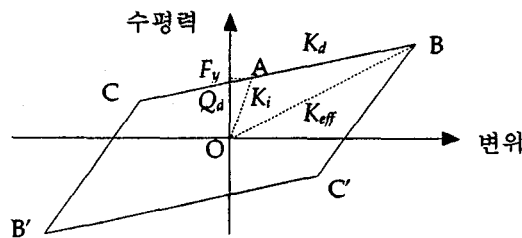


그림 2 납-고무받침(LRB)의 이력특성

(3) 피로시험의 개요

교량에 설치된 LRB는 교량의 온도하중 및 차량 등의 활하중과 같은 상시하중에 의하여 반복적이고 장기적인 피로하중을 받게 된다. 따라서 본 시험의 목적은 이러한 피로하중을 모사하여 시험체에 재하함으로써 피로하중에 대한 LRB의 거동과 내구성능을 평가하는데 있다. 본 시험의 개요는 다음과 같다.

- 총 하중재하 Cycle 횟수 : 7020 Cycle

- 총 이동거리 : 1600m(1 mile - AASHTO 기준)
- 하중재하속도 : 150~240 mm/min(0.01~0.018Hz)
- 재하 Stroke 거리 : 약 ±57mm
- 총 시험시간 : 7,299min

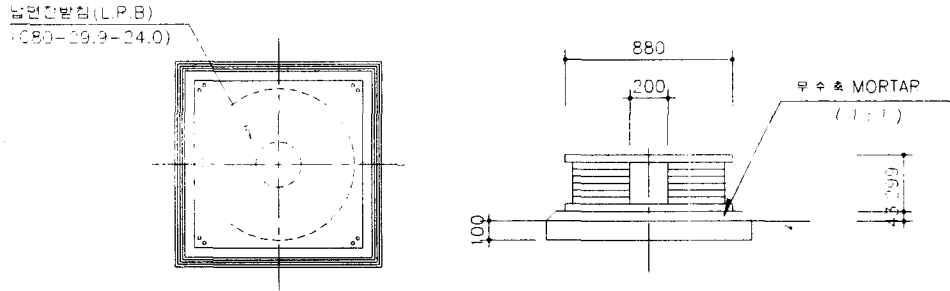


그림 3 시험체의 형상

본 시험에서 사용된 LRB시험체는 봉계교의 교각에 설치되는 실물시험체를 사용하였다. LRB는 납땜 및 고무와 강판의 적층구조로 이루어져 있고 구성재료의 특성때문에 온도에 의하여 그 거동 특성값이 변하는 성질을 갖고 있다. 따라서 피로시험을 위해 지속적으로 하중을 재하하면 LRB내부의 온도가 상승하여 고유의 특성값이 변할 수 있으므로 시험중에는 과도하게 온도가 올라가지 않도록 냉각하도록 하고 각 시험사이에 충분한 시간간격을 두어 시험체의 온도를 상온의 온도와 비슷하게 유지하면서 시험하였다. 각 시험일별 시험과정은 표 1과 같다

표 1 LRB 피로시험 과정

시험일수	Cycle	총 Cycle	가진속도	이동거리(m)	총 이동거리(m)
1	301	301	150 mm/min	69	69
2	513	814	150 mm/min	117	186
3	41	855	240 mm/min	9	195
4	461	1316	240 mm/min	105	300
5	991	2307	240 mm/min	226	526
6	227	2534	240 mm/min	52	578
7	1487	4021	240 mm/min	339	917
8	1114	5135	240 mm/min	254	1171
9	147	5282	240 mm/min	34	1204
10	575	5857	240 mm/min	131	1335
11	341	6198	240 mm/min	78	1413
12	150	6348	150 mm/min	34	1447
13	170	6518	150 mm/min	39	1486
14	238	6756	240 mm/min	54	1540
15	263	7019	240 mm/min	60	1600

3. LRB 피로시험의 결과 및 분석

(1) 피로시험 결과

1) 피로시험 전의 시험체의 기본성능

피로시험을 수행하기 전의 시험체의 기본성능시험 결과는 그림 4와 같다.

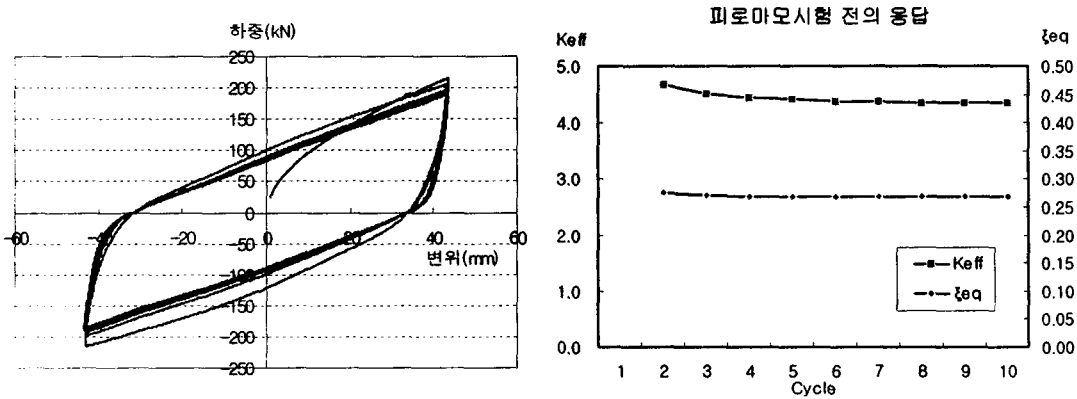


그림 4 피로시험 전의 시험체의 기본성능

기본성능시험에서는 시험체를 10회 왕복시험을 하였으며, 수평유효강성(K_{eff})값과 등가감쇠비(ξ_{eq})값의 산정에는 1, 2회와 10회 시험을 제외한 3~9회 시험에서의 측정값만을 사용하였는데 이는 1, 2회 및 10회 시험에서는 약간의 시험오차가 발생할 수 있기 때문이다. 기본성능시험에서 하중재하횟수가 증가함에 따라 시험체의 수평유효강성(K_{eff})과 등가감쇠비(ξ_{eq})는 약간 감소하였으나 그 차이는 5% 이내로 시험체의 성능저하는 크지 않았다. 3~9회 시험에서 수평유효강성(K_{eff})과 등가감쇠비(ξ_{eq})의 평균값은 각각 4.41(kN/mm), 0.27 이었다.

2) 피로시험 후의 시험체의 기본성능

약 7000회의 피로시험 후 시험체의 기본성능의 변화를 확인하기 위하여 동일한 방법으로 10회 왕복시험을 하였다. 피로시험 전의 기본성능 시험결과와 마찬가지로 10회 동안 하중재하횟수가 증가함에 따라 수평유효강성(K_{eff})과 등가감쇠비(ξ_{eq})는 약간 감소하였으며, 3~9회 시험에서 수평유효강성(K_{eff})과 등가감쇠비(ξ_{eq})의 평균값은 각각 4.34(kN/mm), 0.26 이었다. 이는 피로시험 전의 수평유효강성(K_{eff})과 등가감쇠비(ξ_{eq})의 98.4%, 96.3%의 값으로 피로시험 후에도 시험체의 기본성능은 상당히 양호한 것으로 나타났다. 피로시험 후의 기본성능시험 결과는 그림 5와 같다.

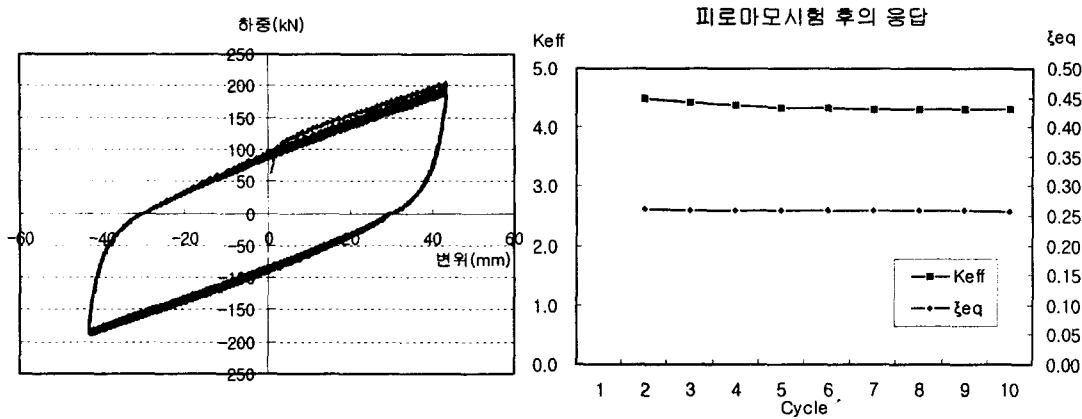


그림 5 피로시험 후의 시험체의 기본성능

(2) LRB 특성시험결과와의 비교

한국도로공사 도로교통기술원에서는 지진격리장치(LRB)의 성능시험기준(안)을 마련하기 위하여 연구과제를 수행하였으며, 실무에서 발생하는 혼란과 LRB의 성능에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 특성시험 기준을 마련하였다. 특성시험 기준은 미국 HITEC의 면진장치 특성시험 기준을 토대로 국내 지방서와 시공 및 설계환경에 적합한 기준을 제시하고자 하였으며, 특성시험절차는 LRB의 연직강성, 수평유�효강성, 감쇠비, 내구성 등 총 9개 항목에 대하여 정리하였다. 특성시험기준의 항목 중에서 피로마모시험의 결과와 본 봉계교 LRB 피로시험의 결과를 비교해 보고자 한다. 성능시험기준(안)을 마련하기 위한 피로시험의 시험방법은 표 2와 같다

표 2 지진격리장치(LRB)의 성능시험기준(안) 마련을 위한 피로마모시험 방법

측정 항목	시험 방법	참고(평가기준)
활하중으로 발생하는 상시변위에 의해 피로가 발생한 후의 성능평가	- 제조사가 규정한 이동거리에 따라 모사된 최소 10,000회의 변위 - 0.1Hz 또는 제조사가 제시한 속도 (최소 4.5inch/min)이상	기본성능시험의 수평유�효강성, 감쇠비의 오차가 ±10% 이내

LRB의 특성시험기준을 위한 시험에서 사용한 시험체는 직경이 600mm인 원형받침으로써 3개의 축소시험체를 시험하였다. 성능시험기준을 위한 피로시험과 봉계교 LRB 피로마모시험의 결과를 비교하면 표 3과 같다. 모든 시험에서 피로시험 후 시험체의 기본성능은 평가기준을 만족하는 것으로 나타나 LRB가 온도하중과 차량하중 등에 의한 피로 후에도 비교적 정확하고 안정적인 기본성능을 발휘하는 것으로 판단된다.

표 3 피로시험 결과 비교

		성능시험기준(안)을 위한 피로시험							봉계교 LRB 피로시험	
		시험체1	증감률	시험체2	증감률	시험체3	증감률	평균	시험체	증감률
K_{eff}	시험전	7.310	-	8.370	-	7.764	-	-	4.41	-
	시험후	7.147	-2.23%	8.070	-3.58%	7.313	-5.80%	-3.87%	4.34	-1.59%
ξ_{eq}	시험전	34.7%	-	33.2%	-	39.3%	-	-	27%	-
	시험후	31.6%	-9.04%	33.6%	1.24%	41.8%	6.36%	-0.48%	26%	-3.7%

4. 맺음말

본 연구에서는 실교량에 적용되는 실물크기의 지진격리장치(LRB)에 대하여 피로시험 전·후의 기본성능의 변화를 파악하고자 피로시험을 수행하였다. AASHTO기준에 근거한 1mile의 피로시험결과 시험체의 수평유�효강성 및 감쇠비의 증감률은 피로시험 전과 비교하여 각각 -1.59%, -3.7%로 피로시험 후에도 비교적 정확한 기본성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 결과는 한국도로공사 도로교통기술원에서 마련중인 '지진격리장치(LRB) 성능시험기준(안)'에서 규정한 특성시험기준의 피로시험항목에도 적합한 시험결과이다.

참고문헌

1. I. D. Aiken, J. M. Kelly, P. W. Clark, K. Tamura, M. Kikuchi, and T. Itoh(1992), "Experimental Studies of the Mechanical Characteristics of Three Types of Seismic Isolation Bearings," Proc. of 10th world Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain.
2. 한국도로공사 도로교통기술원, "지진격리장치의 거동특성에 관한 연구", 2002
3. Y. Kato, T. Miyama, H. Yamanouchi, S. Soda, S. Iizuka, E. Inai, H. Ishibashi, and O. Chiba(2000), "An Experimental Study on the Rotational and Vertical Load-Carrying Characteristics of Rubber Bearings" 12th World Conference in Earthquake Engineering.
4. A. Mori, A. Carr, N. Cooke, and P. Moss(1996), "Compression Behaviour of Bridge Bearings used for Seismic Isolation", Engineering Structures, Vol. 18. No. 5, pp. 351-362.