

E-Shape 강재이력댐퍼의 거동 분석

Experimental Study on the Characteristics of Steel Hysteretic Dampers with E-Shape Elements

김인배* 강형택** 이민구*** 서주원****
Kim, In-Bae Kang, Hyeong-Taek Lee, Min-Koo Seo, Ju-Won

ABSTRACT

최근 교량의 건설에 있어서 내진설계가 주요문제로 부각되면서, 구조물의 진동응답을 제어하는 갖가지 형태의 진동제어 기법이 적용되고 있다. LRB(Lead Rubber Bearing), LUD(Lock Up Device)등 다양한 지진격리장치가 설계에 적용되고 있으며 특히, 설계변경·내진보수보강과 같이 제약 조건이 있는 상황에서 유용한 면진방법으로 사용되고 있다. 이러한 지진격리장치는 기본적인 설계특성인 수평강성, 감쇠성능에 대한 검증이 필요로 한다. 특히, 지진과 같은 동적하중에 대하여 하중속도, 수직력, 변형률 등에 대한 의존성과 내구성의 검토가 필요하며 유사장치에 대하여 검증실험기준의 정립이 진행 중에 있다.

강재이력댐퍼인 E-Shape 댐퍼는 지진격리장치로서 교각의 고정단에 교좌장치로 설치되어 상시에는 탄성영역 내에서 거동하는 고정단의 역할을 하다가, 지진발생시에는 E-Shape형태의 강재댐퍼가 소성변형을 통한 이력거동으로 에너지 소산기능을 가진 교좌장치이다. 최근 LRB에 대하여는 다양한 특성실험이 수행되고 있으나 상대적으로 강재이력댐퍼에 대하여는 이러한 검증실험이 수반되지 않고 사용되고 있다. 본 실험연구에서는 E-Shape 강재이력댐퍼에 대하여 연직하중, 수평변형률, 수평속도에 대한 동적특성을 평가함으로써 강재이력댐퍼를 이용한 지진격리설계의 타당성과 면진성능을 평가해 보았다.

1. 서 론

주행성, 시공성 등 다양한 이점이 있기 때문에 다경간 연속교의 설계가 고속도로 교량의 설계에 있어서 상당한 부분을 차지하고 있다. 이러한 연속교는 상대적으로 불균일한 높은 교각과 긴 상부 구조로 구성되어서 일반적으로 지진과 같은 수평하중에 매우 취약한 구조물이다. 긴 상판의 온도 변화의 신축에 대응하기 위하여, 교량상판을 소수의 교각 위에서 고정지지하고 다른 교각들에서는

* 한국도로공사 도로연구소 연구원
** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 정회원
*** 한국도로공사 도로연구소 연구원
**** 현대건설기술연구소 선임연구원

교축 방향으로 가동지지로 설계하는 것이 통례이다. 따라서, 지진발생시 상판에 작용되는 교축 방향의 지진하중을 고정 지지점을 가진 교각이 모두 감당해야하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 배경에서, 미국, 일본, 유럽 등 지진위험도가 큰 국가에서는 여러 종류의 내진받침을 개발하여 사용하고 있으며, 국내에서도 수년 전부터 LRB(Lead Rubber Bearing), LUD(Lock Up Device)등을 내진설계에서 이용하기 시작하였다.

면진장치는 지진하중응답을 감소시키기 위해서 전체 시스템의 주기를 길게 하기 위한 유연성, 구조물과 지반사이의 상대변위를 조절하기 위한 에너지 소산능력, 풍하중이나 상시진동 같은 상시하중에 대하여 탄성거동을 하기 위한 강성 등의 기본적인 기능을 가져야 한다. 교량의 교축 방향에 대한 내진설계방법에 있어서 LUD, Creep Coupler 등의 지진격리장치를 사용하여 평상시에는 온도신축에 대하여 가동 지지점으로 작동하고, 지진 발생시에는 고정지지조건으로 변하여 상판에 발생하는 지진하중을 여러 지지점으로 분산시키는 방법이다. 다른 방법은, 고정받침을 교축 방향으로 없애고 모든 지지점에 LRB, Friction Pendulum System, Steel Damper 등의 면진받침(Base Isolation Bearing)을 설치함으로써 교량의 지진시 주기의 이동과 교좌장치의 감쇠성능을 통한 면진설계 방법이 있다.

E-Shape 강재이력댐퍼(Steel Hysteretic Dampers with E-shape Elements)는 Pot 받침에 E 형태의 강재이력댐퍼를 장착한 교좌장치로, 상시에는 상부 구조물의 수직하중·온도변위 및 회전 변위를 Pot 받침이 수용하고 지진시에는 상부 구조물의 관성력에 의한 수평력을 강재이력댐퍼의 탄소성변형에 의한 변형에너지와 열에너지로 소산시키는 지진격리장치이다. 이 장치는 지진에 의한 수평력을 각 교각에 분배하고 감소시킴으로써 경제적인 하부구조 설계가 가능하며 상부수직하중이 Pot 받침에 의해 수용되므로 고무계열 면진장치에 비해 높이가 작아 설치가 용이한 장점이 있다.

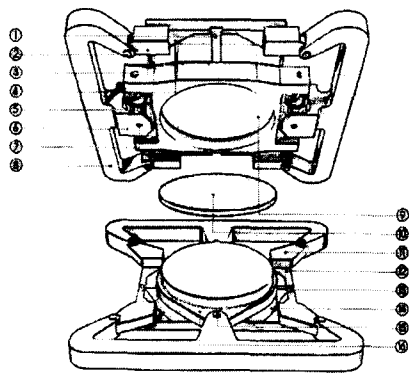
본 연구에서는 교량용 면진받침의 하나인 E-Shape 강재이력댐퍼의 면진성능 및 동적특성을 실험적으로 평가하여 이를 이용한 지진격리설계의 타당성과 면진성능을 평가해 보았다.

2. E-Shape 강재이력댐퍼의 특성실험

2.1 개요

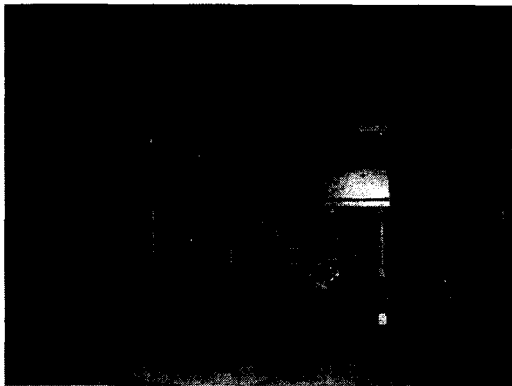
E-shape 강재이력댐퍼는 고정단용과 LUD가 부착된 가동단용(그림1)이 있다. 이 댐퍼는 수직하중·회전 등을 수용하는 일반 포트베어링, 지진력에 저항하는 수평력 잠금장치인 LUD와 지진에너지 소산을 위한 E-Shape 형태의 강재댐퍼를 조합한 형태로 이루어져 있다. 이 장치는 온도신축을 고려한 LRB에 비하여 높이가 낮아 받침 높이의 문제가 해소되며, 또한 E-Shape의 강재댐퍼는 지진 시에 자체의 변형을 유발하여 이력거동을 통해 충분한 에너지 소산력을 가지고 있다.

본 실험에서는 LUD가 없는 고정단용이 사용되었다. 수직하중은 그림 2에 나타난 바와 같이 4개의 유압 Jack을 이용하여 위에서 아래로 재하 하였고, 수평하중은 가력기를 이용하여 시험체의 하단에 재하 하였다. 그림2는 E-Shape 강재이력댐퍼가 설치된 전체 실험 System의 모습으로 수직압력을 받는 상태에서 수평방향으로 실험을 수행할 수 있도록 설계되어 있다.

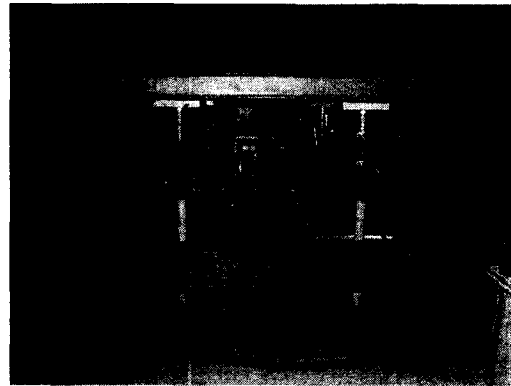


번호	수량	품명	번호	수량	품명
1	1	상판 이동유도장치	9	1	포트
2	8	강재댐퍼 고정핀	10	1	고무판
3	4	강재댐퍼 고정장치	11	4	강재댐퍼 고정장치
4	1	상판	12	1	하판
5	2	LUD	13	1	하판 이동유도장치
6	4	LUD 고정장치	14	4	미끌림판
7	4	LUD 고정볼트	15	2	강재댐퍼 고정핀
8	4	강재댐퍼	16	1	피스톤

그림1 성능 실험이 수행된 면진 장치인 E-Shape 강재이력댐퍼와 재료표



(a) 전체 실험 system의 전면



(b) 전체 실험 system의 측면

그림2 E-Shape 강재이력댐퍼가 설치된 모습

2.2 실험 방법

본 연구에서는 총 3개의 시험체에 대해서 기본특성실험, 내구성실험, 변형률 의존성 실험, 속도 의존성 실험, 수직하중 변위 의존성 실험을 수행하였다. 기본특성실험에서는 시험체를 +120mm 변위까지 단순하중재하(Push)하였다. 또, 내구성 실험에서는 ±100mm의 변위로 반복하중으로 20cycle 반복 후 20Cycle을 반복재하 하였다. 변형률 의존성 실험은 ±10mm, ±20mm, ±40mm, ±60mm, ±80mm, ±100mm의 변위를 20mm/sec의 속도로 각각 3회반복하중을 가하였다. 또한, 0.005Hz(0.8mm/sec), 0.01Hz(1.6mm/sec), 0.5Hz(8mm/sec), 0.1Hz(16mm/sec), 0.2Hz(32mm/sec), 0.3Hz(64mm/sec), 0.4Hz(128mm/sec)의 속도로 40mm의 변위를 각각 3회반복 하중재하하여 진동수 의존성 실험을 수행하였다. 수직하중 변위 의존성 실험에서는 0.1Hz의 속도로 ±40mm의 변위를 각각 3회씩 30ton, 90ton, 150ton, 200ton, 250ton의 수직하중을 재하하여 수직하중에 따른 변위 의존성을 시험하였다.

표1 각 시험체의 실험 방법

구분	변위 (mm)	속도 (mm/sec)	수직하중 (ton)	반복횟수 (cycles)	시험체	비고
기본특성실험	+120	0.5	30	-	E-Shape1	Monotonic test (기본특성 분석)
내구성실험	±100	5		40		Cyclic test (시험체의 내구성 평가 및 반복거동 시 유효강성, 감쇠비의 변화 측정)
전단변형률의존성 실험	±10	20	30	3	E-Shape2	Cyclic test (시험체의 수평변위에 따른 특성 변화 측정)
	±20					
	±40					
	±60					
	±80					
	±100					
속도의존성 실험	±40	0.8(0.005Hz)	30	3	E-Shape2	Cyclic test (시험체의 주작동방향에 대한 정·동적특성 결정)
		1.6(0.01Hz)				
		8(0.05Hz)				
		16(0.1Hz)				
		32(0.2Hz)				
		48(0.3Hz)				
64(0.4Hz)						
수직하중의존성 실험	±40	16(0.1Hz)	30	3	E-Shape3	Cyclic test (시험체의 수직하중의 변화에 따른 유효강성과 감쇠비의 변화 측정)
			90			
			150			
			200			
			250			

3. 실험 결과

3.1 기본특성 실험

E-Shape 강재이력댐퍼의 기본특성을 살펴보기 위하여 설계변위인 100mm 이상의 변위까지 가력기를 이용하여 단순하중재하 실험방법으로 pushover test를 수행하여 표2와 같이 기본적인 초기 강성, 항복강도, 항복강성 및 설계변위에서의 유효강성 값을 구하였다. 그림3과 같이 설계 하중-변위관계와 단순하중재하 실험의 하중-변위관계를 비교한 결과, 시험체의 항복강도가 설계치의 83% 수준, 탄성영역의 강성 역시 설계치의 56% 수준으로 설계치보다 낮게 평가되었으나 소성영역의 강성은 설계치의 155% 수준, 유효강성역시 시험체가 설계치의 113%수준으로 높게 평가되었다.

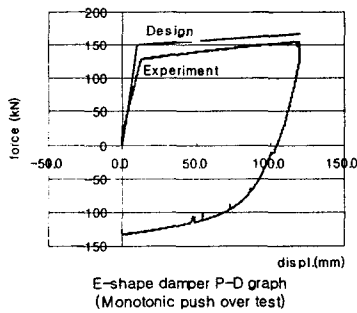


표2 설계치와 기본특성 실험의 특성값 비교

구분	Design	Experiment	D/E (%)
F_y [kN]	150	124.4	83
K_1 [kN/mm]	15	8.45	56
K_2 [kN/mm]	0.161	0.25	155
K_e [kN/mm]	1.15	1.3	113
비고	변위120mm 기준		

그림3 기본특성 실험 하중-변위 관계 비교

3.2 내구성 실험

반복하중을 가한 상태에서의 E-Shape 강재이력댐퍼의 성능변화를 평가하기 위하여 그림4와 같이 최대 설계변위인 100mm의 변위로 20회 반복이력 실험을 2번 수행하였다. 반복이력실험의 목적은 반복하중에 따라 지진격리장치의 유효강성, 감쇠비 등을 비교하여 반복되는 지진하중에 대한 내구성을 평가하기 위함이다. 그림5, 그림6과 표3에 나타난 바와 같이 반복이력 실험에 의한 유효강성과 감쇠비의 감소율은 매우 작게 나타났다. 3번째 이력에서 최대값을 나타내었으며 20회째 시험결과와 비교해 볼 때, 유효강성은 약 4.2% 감소하였으며 감쇠비는 거의 동일한 결과를 얻었다. 그림 7은 실험 전과 실험 후의 E-Shape 강재댐퍼의 형상과 실험중의 형상을 나타낸 것이다.

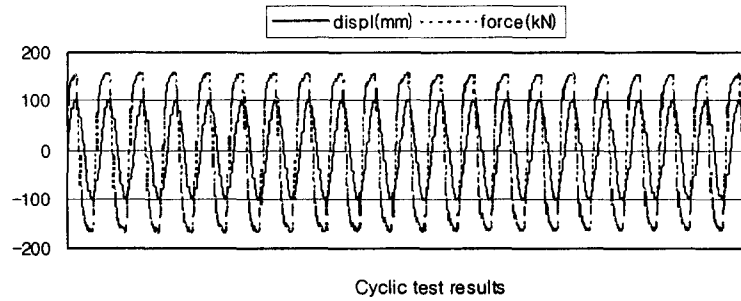


그림4 내구성 실험에서의 하중-변위 결과 (20회)

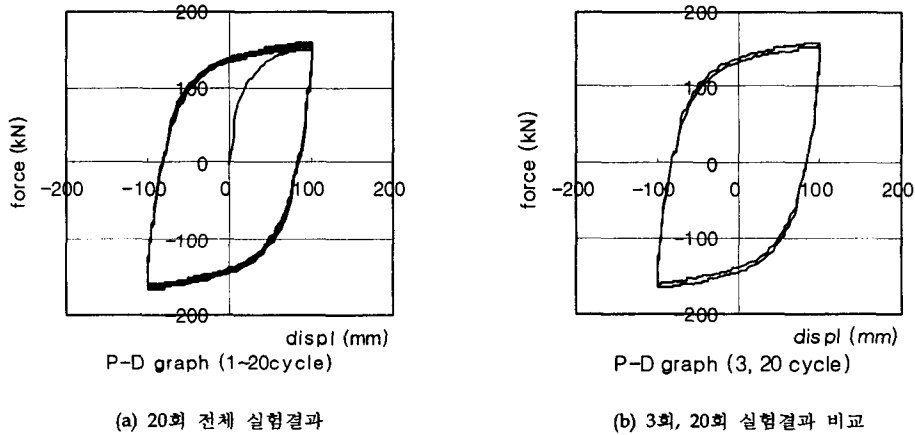
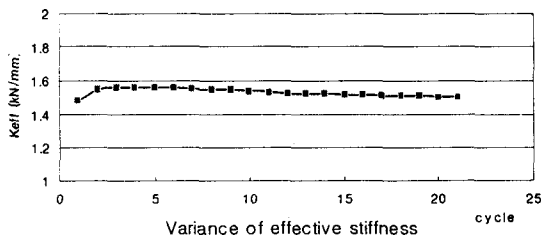


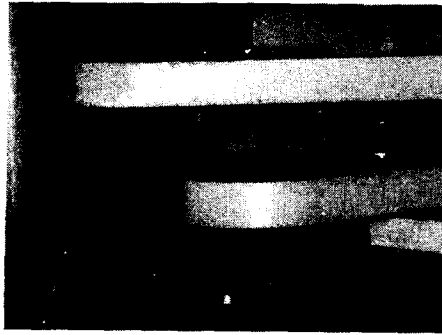
그림5 내구성 실험 하중-변위 그래프 (20회)

표3 내구성 실험에 의한 특성값 감소율 비교

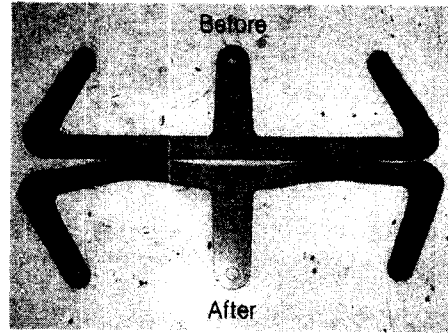


	K_{eff} (kN/mm)	EDC (mm ²)	damping (%)
3 cycle	1.57	45582.6	46.21%
20 cycle	1.504	43629	46.17%
감소율	4.2%	4.3%	0.1%

그림6 내구성 실험에 따른 유효강성(K_{eff})의 변화



(a) E-Shape 강재댐퍼의 형상 변화

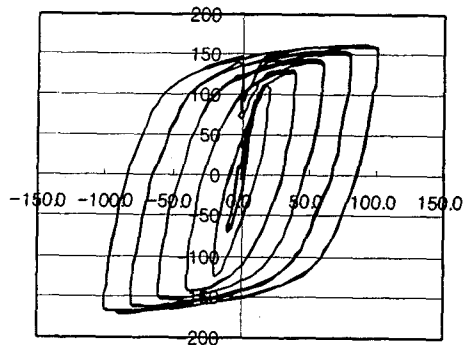


(b) 실험 전과 후의 E-Shape 댐퍼형상

그림7 E-Shape 강재이력댐퍼의 실험 모습

3.3 전단변형을 의존성 실험

전단변형을 의존성 실험은 20~100mm 까지 수평변위를 변화시켜가면서 각 변위별로 3회 반복 실험을 수행하여 그림8에 나타난 바와 같은 하중-변위력 그래프를 얻었다. 표4에서 각 변위별 감쇠성능을 평가해 보면 약 40mm 이상의 변위에서는 일정한 수준의 감쇠성능을 나타내고 있으며, 수평변위가 증가함에 따라 감쇠비는 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 20mm 변위에서 감쇠성능이 작은 것은, 실험체의 설계변위가 150mm임을 감안할 때, 항복변위에 가까운 작은 변위에서는 충분한 소성이력거동을 보인다고 볼 수 없기 때문인 것으로 판단된다.



P-delta graph (10, 20, 40, 60, 80mm)

표4 수평변위에 따른 특성값 변화 비교

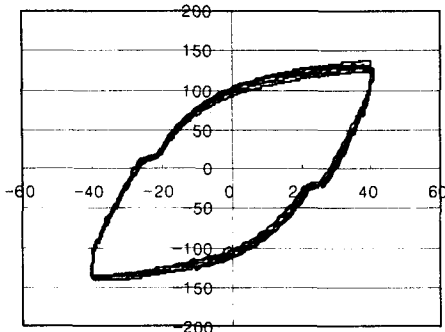
Displ. (mm)	K_{eff} (kN/mm)	EDC (mm^2)	Damping (%)
20	5.38	3041.8	22.5%
40	3.13	12096.5	38.4%
60	2.28	22925.6	44.5%
80	1.83	35003.5	47.6%
100	1.55	47807.4	49.1%

그림8 수평변위에 따른 하중-변위 그래프

3.4 진동수 의존성 실험

진동수 의존성 실험은 설계수직하중을 받는 E-Shape 강재이력댐퍼에 대하여 수평변위의 이동속도에 따라 특성값의 변화에 대한 의존성을 평가하기 위한 실험이다. 그림9와 같이 0.05Hz에서 0.4Hz까지 속도를 달리하며 실험을 수행하였으며, 표5에서 특성값을 평가한 결과 유효강성과 감쇠비 모두 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

표5 진동수에 따른 특성값 변화 비교



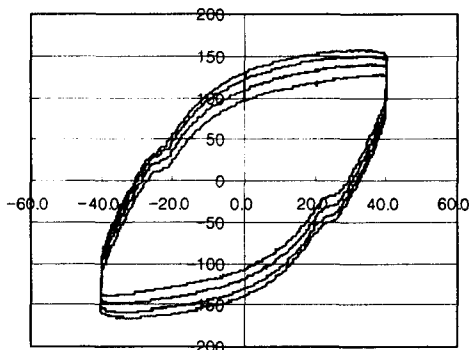
P-D graph (0.005Hz ~ 0.3Hz)

Frequency (Hz)	K_{eff} (kN/mm)	EDC (mm^2)	Damping (%)
0.05	3.10	11382.0	36.6
0.1	3.15	11795.6	37.2
0.2	3.19	12199.8	38.0
0.3	3.22	12413.9	38.3
0.4	3.23	12602.5	38.8
변화율	4.3%	10.7%	6.1%

그림9 진동수에 따른 하중-변위 그래프

3.5 수직하중 의존성

수직하중에 따른 마찰포트의 마찰력이 수평방향에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림10과 같이 수직하중 의존성 실험을 수행하였다. 표6에서, 유효강성의 경우 200ton의 수직하중에서 30ton의 하중에 비하여 약 18% 증가하는 결과를 보였으며, 감쇠비도 18% 가량 증가함을 알 수 있다.



P-D graph (30~200ton)

표6 수직하중에 따른 특성값 변화 비교

수직하중 (ton)	K_{eff} (kN/mm)	EDC (mm^2)	Damping (%)	최대하중 (kN)
30	3.16	11795.6	37.2	126.2
90	3.43	13713.5	39.8	137.2
150	3.63	15414.0	42.2	145.3
200	3.75	16533.7	43.9	150.1
변화율	18.9%	40.2%	17.9%	18.9%

그림10 수직하중에 따른 하중-변위 그래프

4. 동적특성 및 먼진성능 평가

E-Shape 강재이력댐퍼의 기본특성 실험의 하중-변위관계를 비교한 결과, 시험체의 항복강도가 설계치의 83% 수준, 탄성영역의 강성 역시 설계치의 56% 수준으로 설계치보다 낮게 평가되었으나 소성영역의 강성은 설계치의 155% 수준, 유효강성역시 시험체가 설계치의 113%수준으로 높게 평가되어, 강도에서는 설계치보다 낮은 수준이었지만 유효강성에서는 설계치를 상회하는 성능을 보여주었다. 내구성 실험에서는 3번째와 20회째의 이력을 비교해 볼 때, 유효강성은 약 4.2% 감소하였으며 감쇠비는 거의 동일한 결과를 얻어 우수한 내구성능을 보여주는 것으로 판단된다.

전단변형을 실험에서는 지진하중의 크기에 따라 강제받침의 수평변위가 달라지므로 각 경우의 하중응답과 감쇠비를 산정하여 수평변위에 따른 받침의 특성변화를 분석하였는데, 각 변위별 감쇠성능을 평가해 보면 약 40mm 이상의 변위에서는 일정한 수준의 감쇠성능을 나타내고 있으며, 수평변위가 증가함에 따라 감쇠비는 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 강재댐퍼가 소성거

동 시에도 충분한 감쇠성능을 보여주는 내구성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 속도 의존성 실험에서는 진동수 변화에 따른 수평속도의 변화에 대하여 민감한 변화없이 일정 수준의 수평강성과 감쇠능력을 유지하는 것으로 판단된다.

수직하중에 대한 의존성 평가실험결과 E-Shape 강재받침의 마찰포트의 마찰력이 수직하중이 변함에 따라 수평방향에 영향을 미침을 알 수 있었다. 유효강성의 경우 200ton의 수직하중에서 30ton의 하중에 비하여 약 18% 증가하는 결과를 보였으며, 감쇠비도 18% 가량 증가함을 알 수 있다. 따라서 수평유효강성은 증가하여 지진격리설계 측면에서 불리하나 감쇠성능이 증가하는 유리한 면이 있음을 알 수 있다.

5. 맺음말

E-Shape 강재이력댐퍼의 특성실험은 유효강성, 감쇠비에 대해 다양한 조건에 대하여 평가하여 강재댐퍼의 동적특성 및 면진성능을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 따라서 본 연구에서는 여러 조건에 따른 반복하중 재하실험을 통하여 E-Shape 강재이력댐퍼의 면진성능을 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

첫째, E-Shape 강재이력댐퍼의 기본특성실험 결과 설계치와 비교하여 강도에 있어서는 약간 낮은 수준으로 나타났으나, 유효강성에서는 설계치 보다 상향하는 결과를 보여주었다. 그리고 반복하중을 가한 결과 시험중이나 시험 후 손상이 발생하지 않았으며, 설계 시 가정된 이력곡선을 얻을 수 있었다. 즉 항복변형 후 큰 소성변형에 대하여도 손상이 발생하지 않아 지진에너지 소산을 위한 충분한 감쇠능력을 가질 것으로 판단된다.

둘째, E-Shape 강재이력댐퍼의 의존성실험 결과 전단변형률 의존성, 진동수 의존성, 수직하중 의존성 모두 단계가 증가함에 따라 감쇠비가 증가하는 경향을 보였으며, 설계수준 내에서의 의존성 특성치의 변화에 대해서도 일정한 수준의 감쇠성능을 나타내는 것으로 나타났다. 그러므로 지진발생시 지진에너지 소산에 있어서 만족할 만한 면진성능을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 최대 설계변위인 150mm이전 수준에서의 동적 반복하중 하에서는 감쇠비의 저하가 매우 적어 매우 뛰어난 내구성을 보여주는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 윤정방, 박동욱, 이동하, 안창모, " 교량용 내진받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석", '01춘계학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.465-474
2. 김남식 외, "지진격리장치의 내진성능평가를 위한 실험적 연구",보고서, 현대건설 기술연구소, 2002, pp156