

실험을 통한 핀타입(pin-type) 강제이력댐퍼의 거동특성연구

An Experimental Study on the Characteristics of Steel Hysteretic Dampers with Pin-type Elements

강형택* · 김인배** · 이일근** · 정진혁***

Kang Hyeong-Taek, Kim In-Bae, Lee Il-Keun, Jung Jin-Hyuk

Key Words : Steel Hysteresis Damper(강제이력댐퍼), Steel Damper(강제댐퍼), Base Isolation Bearing(지진격리받침)

ABSTRACT

Base isolation bearings are known as an effective system to protect bridges from the earthquake damage. There are many types of base isolation bearings in the market. Among them, steel hysteretic damper, made of mild steel and one of the oldest ones, has some good features. Since steel hysteretic damper is made of steel and has simple structure, it is cheaper and easier to maintain than other types. Despite the advantages, steel hysteretic damper with pin-type elements has no application in Korea. The steel hysteretic damper with pin-type elements are tested to examine the basic characteristics and to evaluate antiseismic performance. In this paper, the results of the test are presented.

1. 서 론

주행성, 시공성 등 다양한 이점이 있기 때문에 다경간 연속교의 설계가 고속도로 교량의 설계에 있어서 상당한 부분을 차지하고 있다. 이러한 연속교는 상대적으로 교각의 높이가 불균일하고 긴 상부구조로 구성되어서 일반적으로 지진과 같은 수평하중에 매우 취약한 구조물이다. 긴 상판의 온도변화의 신축에 대응하기 위하여, 교량상판을 소수의 교각 위에서 고정지지하고 다른 교각들에서는 교축 방향으로 가동지지로 설계하는 것이 통례이다. 따라서, 지진발생시 상판에 작용되는 교축방향의 지진하중을 고정 지지점을 가진 교각이 모두 감당해야하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 배경에서, 미국, 일본, 유럽 등 지진위험도가 큰 국가에서는 여러 종류의 지진격리받침을 개발하여 사용하고 있으며, 국내에서도 LRB(Lead Rubber Bearing)를 비롯한 지진격리받침이 내진설계에 사용되고 있다.

면진장치를 이용한 교량의 내진설계방법으로는 LUD(Lock Up Device) 등을 사용하여 평상시에는 온도신축에 대하여 가동 지지점으로 작동하고, 지진 발생시에는 고정지

지조건으로 변하여 상판에 발생하는 지진하중을 여러 지지점으로 분산시키는 방법과 모든 지지점에 지진격리받침(Base Isolation Bearing)을 설치함으로써 교량 주기를 길게 하고 지진격리받침의 감쇠성능을 이용하여 지진하중을 줄이는 방법이 있다.

지진격리받침에 요구되는 기본적인 기능으로는 지진하중 응답을 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 등 있다.

핀타입 강제이력댐퍼(Steel Hysteretic Dampers with Pin-type Elements)는 강제로된 핀 모양의 구조를 가지고 있으며 일반적으로 포트받침(Pot Bearing)과 같이 수직하중을 지지할 수 있는 부분과 함께 사용된다. 상시에는 상부 구조물의 수직하중 및 회전변위를 포트받침이 수용하고 지진시에는 상부 구조물의 관성력에 의한 수평력을 강제이력댐퍼의 탄소성변형에 의한 변형에너지와 열에너지로 소산시키며 지진격리받침의 기능을 한다. 이 장치는 지진에 의한 수평력을 각 교각에 분배하고 감소시킴으로써 경제적인 하부구조 설계가 가능하며 상부수직하중이 포트받침에 의해 수용되므로 고무계열의 면진장치에 비해 높이가 작아 설치가 용이한 장점이 있다.

본 연구에서는 교량용 지진격리받침의 하나인 핀타입 강제이력댐퍼의 면진성능 및 동적특성을 실험적으로 평가하여 이를 이용한 지진격리설계의 타당성과 면진성능을 평가

* 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
E-mail : htkang@freeway.co.kr
Tel : (031) 371-3329, Fax : (031) 371-3339

** 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

*** (주)태명기술산업 대표이사

해 보았다.

2. 핀타입(Pin-type) 강재이력댐퍼의 특성실험

2.1 개요

핀타입 강재이력댐퍼는 고정단용과 LUD가 부착된 가동단용이 있으며 본 실험에서는 LUD가 없는 고정단용을 사용하였다. 수직하중을 지지하는 포트받침이 있는 경우에 수평가력에 대하여 포트받침에서 마찰력이 발생함으로 마찰력을 배제한 순수한 Pin만의 성능을 평가하고자 포트받침을 제외하고 시험장치를 구성하였다.

시험체는 항복력 343kN와 허용변위 65mm인 제품과 항복력 375kN와 허용변위 110mm인 2종류가 있으며 각 종류에 대하여 3개의 시험체를 사용하였다(그림 1). 수평하중은 가력기틀을 이용하여 시험체의 하단에 재하하였다. 그림 1의 사진은 Pin-type 강재이력댐퍼가 설치된 전체 실험 System의 모습이다.

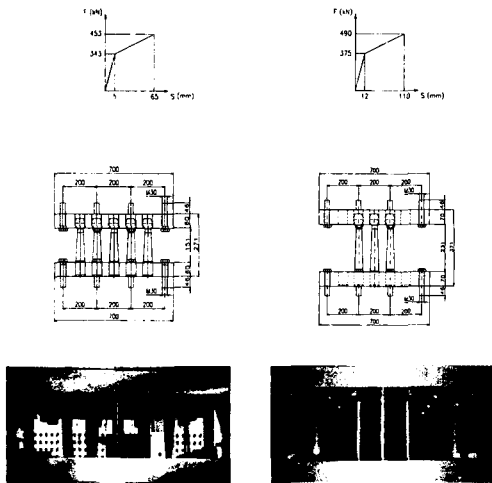


Fig. 1 시험체의 기계적 특성 및 상세

2.2 실험 방법

총 6개의 시험체에 대해서 기본특성실험, 내구성실험, 속도 의존성 실험, 변형률 의존성 실험, 유사 동적 실험을 수행하였다. 기본특성실험에서는 시험체의 설계변위의 100%의 변위로 Push-pull test 3회를 수행하며 항복변위, 강성등의 기본특성을 평가하였다. 속도 의존성 실험에서는 재하속도에 따른 의존성을 측정하기 위해 0.01Hz, 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hz의 재하속도로 50%의 설계하중변위로 Push-pull test를 역시 3회씩 수행하였다. 변형률 의존성 실험은 전단변형률의 크기에 따른

의존성을 측정하기 위해 설계변위의 25%, 50%, 75%, 100%의 변위로 Push-Pull test를 3회씩 수행하였다. 내구성 실험은 시험체의 한계 능력을 측정하기 위해 파단이 발생하기 직전까지 설계변위를 0.05Hz로 왕복하며 반복하중에 저항하는 능력을 측정하였다. 그리고 마지막으로 설계변위를 넘지않는 범위에서의 변위로 지진하중을 재하하여 유사동적실험을 수행하였다.

Table 1 실험방법

Test Unit	변위	속도 (Hz)	반복횟수 (Cycles)	비고
기본특성 실험	±설계변위	0.1	3	Cyclic test
속도 의존성 실험	±설계변위50%	0.01	3	
		0.05		
		0.1		
		0.5		
변형률 의존성 실험	±설계변위	0.1	3	
		±설계변위25%		
		±설계변위50%		
		±설계변위75%		
내구성 실험	±설계변위	0.05	-	
유사동적 실험	≤설계변위	-	-	Seismic test

2.3 실험 결과

(1) 기본 특성 실험

핀타입 강재이력댐퍼의 기본 특성을 알아보기 위해 그림 2와 같이 각 시험체 당 3Cycle의 Push-pull test를 수행하였다.

실험 결과, 항복변위(δ_y)의 경우 Type I의 경우 설계치의 236%, Type II의 경우 141% 수준으로 설계변위보다 큰 변위에서 항복을 하는 것으로 나타났으며, 항복력의 경우는 설계치의 108%, 100%로 설계항복력과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 초기강성 K_1 의 경우는 설계치의 46%, 71%수준, K_2 는 설계치의 65%, 105%로 설계수준을 밑도는 경향이었으나, 유효강성 K_{eff} 의 경우는 설계치의 92%, 95%정도로 설계 유효강성과의 오차가 약 7%정도로 밖에 나타나지 않았다.

결과적으로 항복력에 도달하였을때의 항복변위가 설계수준보다 크게 나타나 초기강성은 설계치의 59%정도의 수준으로, 강도는 만족하나 강성에서는 낮게 평가되었다.

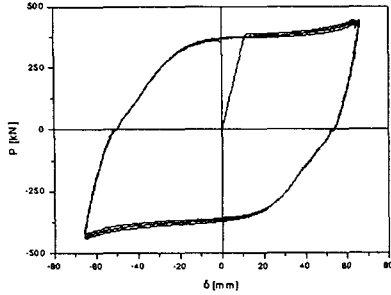


Fig. 2 Type I 시험체(설계변위 65mm)의 하중변위곡선

Table 2 실험치와 설계치의 기본특성 비교

		Experiment(평균)	Design	E/D(%)
t	δ_y (mm)	11.823	5.000	236
y	F_y (kN/mm)	371.685	343.300	108
p	K_1 (kN/mm)	31.424	68.660	46
e	K_2 (kN/mm)	1.124	1.833	61
I	K_{eff} (kN/mm)	6.413	6.974	92
t	δ_y (mm)	16.911	12.000	141
y	F_y (kN/mm)	375.074	375.000	100
p	K_1 (kN/mm)	22.143	31.25	71
e	K_2 (kN/mm)	1.231	1.173	105
II	K_{eff} (kN/mm)	4.248	4.455	95

(2) 속도 의존성 실험

속도 의존성 실험은 핀타입 강재이력댐퍼에 대하여 수평하중의 작용속도에 따라 특성값의 변화에 대한 의존성을 평가하기 위한 실험이다. 실험 결과, Type I 과 Type II의 경우 모두 크게 두드러진 경향이 나타나진 않았으나, 그림 3과 그림 4에 나타난 바와 같이 0.5Hz를 기준으로 볼 때 재하속도가 증가함에 따라 유효강성 K_{eff} 은 101.2~98.8%, 감쇠비는 98.1~101.3%의 변화율을 나타내었다. 따라서, 재하속도에 따른 유효강성 및 감쇠비의 변화가 $\pm 5\%$ 이내로 나타나, 재하속도가 Steel Damper의 성능에 큰 영향을 주는 것은 아니라고 판단된다.

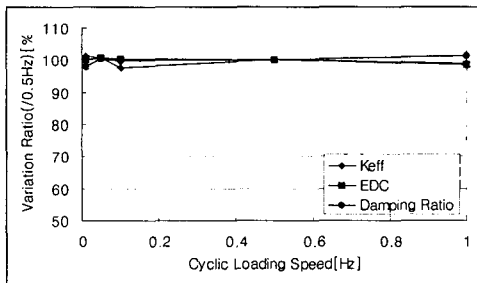


Fig. 3 속도의존성 실험 결과 분석(Type I -평균)

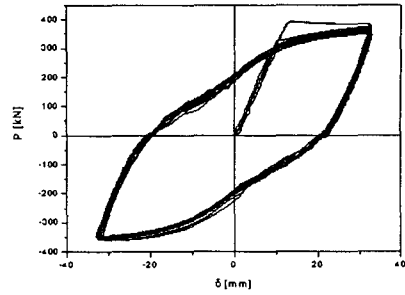


Fig. 4 Type I 시험체의 하중변위곡선(속도의존성)

(3) 변형률 의존성 실험

시험체의 전단변형률에 대한 의존성을 평가하기 위해, 설계극한변위(δ_u)의 25%에서 100%까지 수평변위를 변화시켜가면서 각 변위단계별로 3회 반복하여 그림 5와 같은 하중변위곡선을 얻었다. 그림 6에서 각 변위단계별 감쇠 성능을 평가해보면 Type I, Type II 모두 설계수준의 50% 이상의 변위에서는 일정한 수준의 감쇠 성능을 나타내고 있으며, 수평변위가 증가함에 따라 감쇠비도 증가하는 경향을 나타내었다. 설계변위의 25%수준에서 감쇠 성능이 낮은 것은, 실험체의 설계극한변위가 65mm, 110mm 임을 감안할 때, 항복변위에 근접한 작은 변위에서는 충분한 소성이력저동을 보인다고 볼 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

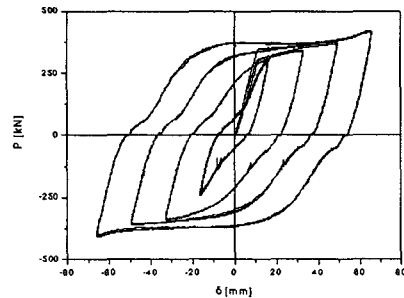


Fig. 5 Type I 시험체의 하중변위곡선(변형률의존성)

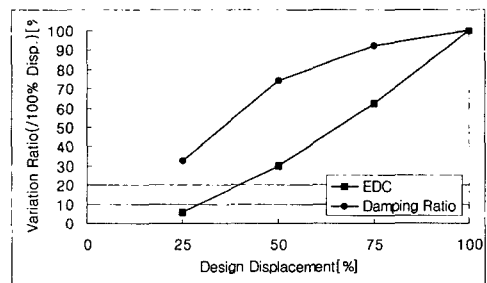


Fig. 6 변형률의존성 실험 결과 분석(Type I -평균)

(4) 내구성 실험

반복하중을 가한 상태에서의 강재이력댐퍼의 성능변화를 평가하기 위하여 설계극한변위인 65mm, 110mm의 변위로 15회의 반복하중을 가하여 내구성 실험을 수행하였다. 내구성실험의 목적은 반복하중에 따라 지진격리받침의 유효강성, 감쇠비 등을 비교하여 반복되는 지진하중에 대한 내구성을 평가하기 위함이다. 그림 7과 표 3에 나타난 바와 같이 반복실험에 의한 유효강성과 감쇠비의 감소율은 매우 작게 나타났다. 2회째 이력에서 감쇠비는 최대를 나타내었으며 15회째 실험 결과와 비교해 볼 때, 유효강성은 약 12% 감소하였으며 감쇠비는 1.3%정도 감소하여 반복 횟수가 증가하여도 매우 안정적인 거동을 보여주고 있다.

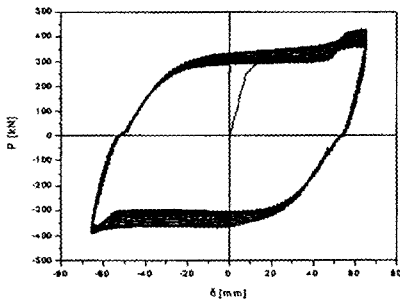


Fig. 7 Type I 시험체의 하중변위곡선(내구성 실험)
표 3. 내구성 실험 결과 분석

Cycle No.	K_{eff} (kN/mm)	EDC (kN · mm)	Damping (%)
2	6.158	68714.958	41.448
5	6.007	66970.055	41.444
10	5.666	62931.778	41.212
15	5.445	59779.756	40.889

(5) 유사 동적 실험

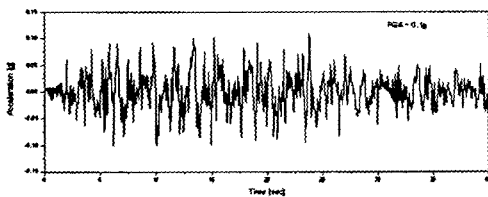


Fig. 8 유사동적실험에 사용된 인공지진파

그림 8의 인공지진파를 이용하여 유사동적실험을 수행하였다. PGA(Peak Ground Acceleration) 값을 0.07g 및

0.154g에 대하여 실험을 수행한 결과, 최대변위는 Type I의 경우 20mm와 40mm, Type II의 경우 45mm와 60mm 정도로 나타났으며 최대하중은 Type I, Type II 모두 300kN과 350kN 정도로 발생하였다. 그림 9는 핀타입 강재이력댐퍼의 하중변위 응답결과를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 각 지진입력하중에 대하여 감쇠이력 현상이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

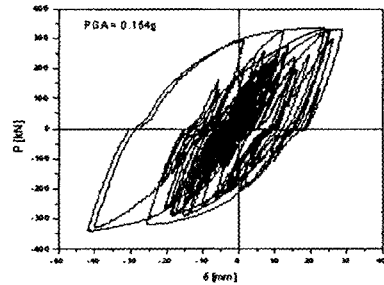
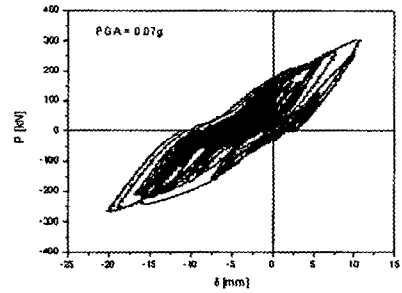


Fig. 9 Type I 시험체의 하중변위곡선(유사동적 실험)

3. 해석적 연구

3.1 변수 연구(Parametric Study)

(1) 구조물의 모델링 및 매개변수 설정

본 연구에서는 이선형 지진격리받침을 부착한 교량구조물을 그림 10과 같은 2자유도 구조물로 단순화하여 구조물의 특성별로 이선형 지진격리받침의 매개변수가 응답에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 하부구조물은 지반에 고정되어 있다고 가정하였으며 상부구조물과 하부구조물 사이에 지진격리받침을 설치하는 것으로 가정하였다.

여기서 M_s 는 상부구조물의 질량을 나타내며 M_p 는 하부구조의 질량을 나타낸다. 그리고 하부구조물의 강성을 K_p 로 나타내었다.

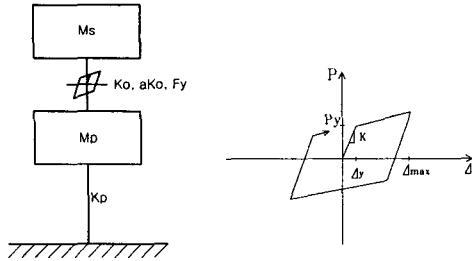


그림 10. 2자유도 구조물의 형상 및 이력거동

(2) 매개변수와 지진응답의 관계

먼저 지진격리받침의 항복력의 변화에 대한 응답 특성을 알아보기 위해 표 4와 같이 초기강성(K_1)을 100%로 고정하고 항복력의 변화에 대해서 각 구조물별로 평가해 보았다. 여기서 항복 후 강성(K_2)는 초기강성의 10%로 고정시켰다.

항복력이 증가할수록 구조물의 응답변위는 감소하고, 전단력은 증가하며 감쇠비는 감소함을 알 수 있다. 표 4에 나타난 바와 같이 항복력이 25% 감소할 경우, 변위는 7% 증가하고 전단력은 16% 감소하며 감쇠비는 27% 증가하게 된다. 또 항복력이 25% 증가할 경우에는 변위는 10% 감소, 전단력은 13% 증가, 감쇠비는 19% 감소하게 된다. 정도의 차이는 있을 수 있지만 대략 항복력의 $\pm 25\%$ 오차에 따라 변위는 약 $\pm 8.5\%$, 전단력은 약 $\pm 14.5\%$, 감쇠비는 약 $\pm 23\%$ 의 오차를 가지게 된다.

표 4. 항복력의 변화에 따른 응답 특성

$K_1=100\%$ 1.0Ms	F_y				
	50%	75%	100%	125%	150%
변위[mm]	0.085 (125%)	0.073 (107%)	0.068 (100%)	0.061 (90%)	0.055 (81%)
전단력[kN]	323.6 (66%)	412.0 (84%)	488.9 (100%)	552.2 (113%)	614.7 (126%)
감쇠비	0.411 (155%)	0.339 (127%)	0.266 (100%)	0.216 (81%)	0.183 (69%)

초기강성의 변화에 대한 응답 특성의 경우는 표 5와 같다. 항복력은 100%로 고정하고 초기강성을 60~140%로 변화시켜 해석한 결과, 응답변위는 K_1 이 증가할수록 감소하나 감소율의 기울기 역시 작아지는 경향을 보였으며, 감쇠비 역시 증가하나 증가율의 기울기가 작아지면서 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다.

초기강성의 경우 상부구조물의 질량(Mp)이 기준값의 60%, 80%, 120%인 경우에 대해서도 변수연구를 수행하였는데. 그림 11에서 나타난 바와 같이 0.6Mp일 때에는 1.0 K_1 일 때 전단력이 최대였다가 다시 감소하였으며,

0.8Mp의 경우에는 1.4 K_1 , 1.0Mp의 경우에는 2.0 K_1 , 마지막으로 1.2Mp의 경우에는 2.2 K_1 일 때까지 증가하여 최대값을 나타내었고 이후부터 감소하는 경향을 나타내었다.

응답변위의 경우 기울기가 일정한 값으로 수렴하는 경계를 정확하게는 알 수는 없으나 모든 경우는 아니지만 대략 1.0 K_1 이후부터 수렴하는 것으로 나타났다. 초기강성의 증가는 경제적인 부담을 초래하는 것을 고려할 때 가능한 한 초기강성을 일정범위 내에서 적게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 응답변위의 감소율이 일정한 값에 수렴하기 시작하는 수준이후부터는 강재이력덤퍼의 성능의 향상을 기대할 수 없으므로, 0.6~1.2Mp내에서는 응답변위의 기울기가 수렴하기 시작하는 100%의 K_1 을 넘지 않는 K_1 수준을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 5. 초기강성의 변화에 따른 응답 특성

$F_y=100\%$ 1.0Ms	K_1				
	60%	80%	100%	120%	140%
변위[mm]	0.084 (124%)	0.074 (108%)	0.068 (100%)	0.063 (93%)	0.058 (85%)
전단력[kN]	470.2 (96%)	483.6 (99%)	488.9 (100%)	496.8 (102%)	503.0 (103%)
감쇠비	0.334 (89%)	0.359 (96%)	0.375 (100%)	0.382 (101%)	0.388 (104%)

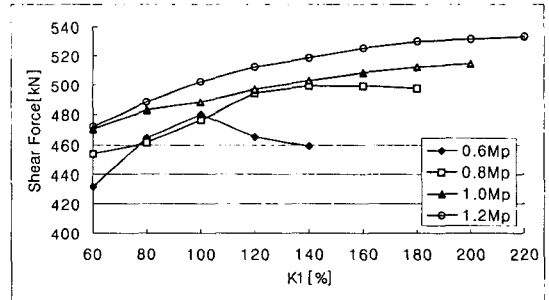


그림 11. 초기강성의 변화에 따른 응답 전단력 특성

3.2 유한요소 해석

지진 시 소성거동을 하는 강재이력덤퍼의 Pin부분의 거동을 확인하기 위하여 재료비선형을 고려한 유한요소 해석을 수행하였다(그림 12와 그림 13). 수평하중이 증가하고 변위가 커짐에 따라 Pin의 상부에서 소성이 발생하기 시작하여 하중이 증가함에 따라서 하부까지 점진적으로 소성영역이 균등하게 퍼지는 것을 볼 수 있었다. 부재의 국부적인 부위에서 소성이 발생할 경우 특정 단면에서 파괴가 일어날 수 있으나 본 실험에서 사용된 Pin은 상단이 좁고 하단이 넓은 테이퍼 형상으로 소성영역이 인장부에 넓게 유도되도록 단면형상이 고안된 것임을 알 수 있다.

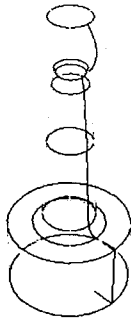


Fig 12 Pin 해석모델(Abaqus)

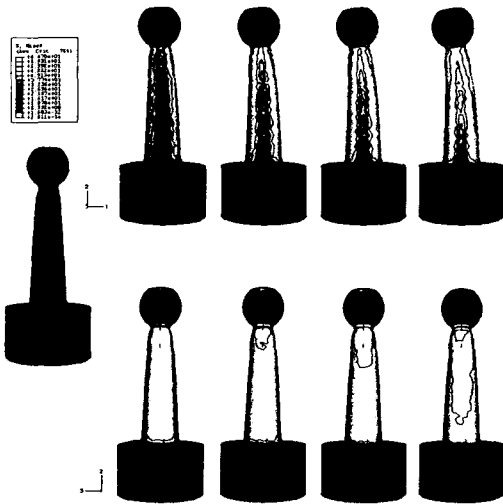


Fig 13 항복하중이후의 단면내 소성영역변화

4. 결론

실험을 통하여 지진격리받침의 주요 특성인 유효강성, 감쇠비 등을 다양한 조건에서 확인하고 핀타입 강재이력댐퍼의 동적특성 및 면진성능을 평가한 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

첫째, Pin-type 강재이력댐퍼의 기본특성실험 결과 설계치와 비교하여 초기강성이 낮게 평가되었으나 유효강성은 설계치와 근접한 성능을 보여주었으며, 강도 역시 설계치와 부합하는 성능을 보여주었다. 그리고 반복하중을 재하한 결과 시험 중이나 시험 후 손상이 발생하지 않았으며, 설계 시 가정된 이력곡선을 비교적 정확하게 얻을 수 있었다. 즉 항복변형 후 큰 소성변형에 대하여도 손상이 발생하지 않아 지진에너지 소산을 위한 충분

한 감쇠능력을 가질 것으로 판단된다.

둘째, Pin-type 강재이력댐퍼의 의존성 실험 결과, 속도의존성, 변형률 의존성 실험 모두에 있어서 단계가 증가함에 따라 감쇠비가 증가하는 경향을 보였으며, 설계 수준 내에서의 각 의존성실험 변수의 변화에 대해서도 일정한 수준의 감쇠성능을 나타내는 것으로 나타났다. 그러므로 지진 발생 시 지진에너지 소산에 있어서 만족할 만한 면진성능을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 내구성 실험에서, 설계극한변위 이전 수준에서의 동적 반복하중 하에서는 감쇠비의 저하가 매우 적어 뛰어난 내구성을 보여주는 것으로 판단된다.

셋째, 핀타입 강재이력댐퍼의 Pin 부재에 대하여 유한요소 재료비선형 해석을 수행한 결과, 항복하중 이후의 Pin 단면에서의 소성영역분포의 이력이 Pin 단면 전체에 고루 소성능력을 발휘할 수 있도록 고루 분포되는 것으로 나타나 단면에 대한 거동 및 응력분포가 매우 최적화되어있는 것으로 판단된다. 또한 변수 연구 결과, 항복하중을 고정된 상태에서 초기강성을 변화시켜서 해석한 경우에는 응답변위가 일정값으로 수렴하기 이전에서의 초기강성을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 (주)태명기술산업에서 제공된 핀타입 강재이력댐퍼와 연구비로 진행되었음을 알려 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 윤정방 등, 2001, “교량용 내진받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석”, 춘계학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.465-474
- (2) 김남식 등, 2002, “지진격리장치의 내진성능평가를 위한 실험적 연구”, 보고서, 현대건설 기술연구소, pp.156.
- (3) 강영중 등, 1999, “면진교량받침의 최적설계기법개발”, 보고서, 고려대학교 방재과학기술센터, pp. 457~464.
- (4) 김인배, 강형택 등, 2003, “E-shape 강재이력댐퍼의 거동 분석”, 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, pp. 457~464.
- (5) Skinner, R. I, Robinson, W. H., and McVerry, G. H, 1993, An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, New York.
- (6) Naem, F. and Kelly, J. M, 1999, Design of Seismic Isolated Structures, John Wiley & Sons, New York.