

인방형 강재댐퍼의 구조성능에 대한 실험적 연구

Experimental Evaluation of the Seismic Performance for Lintel Beam Type Steel Damper

노 경 민*
Ro, Kyong Min

김 민 숙**
Kim, Min Sook

이 영 학***
Lee, Young Hak

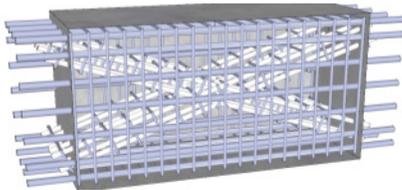
Abstract

As an alternative to coupling beam in shear wall system, application of the damper which can dissipate energy is increasing. In this study, lintel beam type steel damper which is simple to construct and change depending on design load was proposed. Cyclic loading test was conducted to compare reinforced concrete coupling beam and lintel beam type steel damper. The test results showed that lintel beam type steel damper has higher initial stiffness and energy dissipation capacity than reinforced concrete coupling beam.

Keywords : Lintel beam type steel damper, Coupling beam, Seismic performance, Energy dissipation capacity

1. 서론

일반적으로 개구부가 있는 전단벽에서는 횡하중에 효과적으로 대응하기 위해서 인방보의 강도, 강성 및 변형능력이 요구된다. 그러나 인방보는 <Fig. 1> 과 같이 배근 상세가 매우 복잡하여 시공이 어렵고 비경제적이다. 또한 층간변형을 감소시키기 위하여 인방보의 강도와 강성을 크게 설계할 경우 큰 횡하중이 작용하면 상대적으로 약한 내력을 가진 전단벽이 손상될 수 있으며, 이는 구조물 전체에 취성적인 파괴를 유발할 수 있다.



<Fig. 1> Detail of coupling beam

반면, 인방보에 댐퍼를 설치할 경우 횡하중 작용 시 콘크리트 전단벽보다 먼저 항복하여 지진에너지 소산시켜 구조물의 취성파괴를 방지할 수 있다. 이에 전단벽 시스템의 연성능력 및 내진성능 향상이 가능하도록 댐퍼를 인방보에 적용하는 연구가 다수 수행되었다¹⁾. 국외에서는 Hitaka and Matsui(2003)²⁾는 슬릿이 있는 강판 전단벽의 구조성능을 평가하기 위하여 반복가력실험을 수행하였다. 이를 통해 약 3%의 층간변위에 저항할 수 있는 강판 전단벽 슬릿의 폭두께비를 제안하였다. Christopoulos and Montgomery(2013)³⁾은 고층건물에서 풍하중과 지진하중에 효과적으로 저항할 수 있는 점탄성 커플링 댐퍼를 제안하고 댐퍼의 구조성능을 평가하였다. 국내에서는 Oh(2012)⁴⁾가 전단벽 시스템의 연성능력과 내진성능을 향상시키기 위해 강성은 기존의 인방보 이상으로 발휘되면서 설계하중에 따라 내력을 변화시킬 수 있는 강재이력 댐퍼의 형상을 제안하였다. 또한 Kim(2014)⁵⁾은 설치공간, 비용 및 시공과정을 최소화하기 위해서 연결보에 설치 가능한 혼합형 마찰댐퍼를 개발하였으며 실험을 통해 혼합형 마찰댐퍼의 구조성능을 평

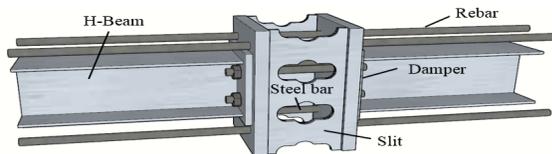
* 학생회원, 경희대학교 건축공학과, 석사과정
Architectural Engineering, Kyung Hee University
** 정회원, 경희대학교 건축공학과 학술연구교수
Architectural Engineering, Kyung Hee University
*** 교신저자, 정회원, 경희대학교 건축공학과 교수
Architectural Engineering, Kyung Hee University
Tel: 031-201-3815 Fax: 031-204-3815
E-mail: leeyh@khu.ac.kr

가하였다. 본 연구에서는 기존 인방형 댐퍼와 비교하여 설치방법이 단순하고 사용자가 의도한 목표내력에 맞게 설계가 가능하며 초기강성과 에너지 소산능력이 개선된 인방형 강제댐퍼를 제안하고 이에 대한 내진성능을 평가하는 것을 목표로 하였다. 기존 슬릿 댐퍼에 비해 성능을 향상시키기 위해 슬릿 중앙에 홈이 있는 댐퍼, 봉 부재, H형강으로 구성된 강제댐퍼를 고안하였으며 유한요소해석을 통하여 최적의 댐퍼형상을 도출하였다. 정적 반복가력 실험을 수행하여 최대 내력, 에너지 소산능력, 초기강성의 측면에서 인방형 댐퍼의 성능을 평가하였다.

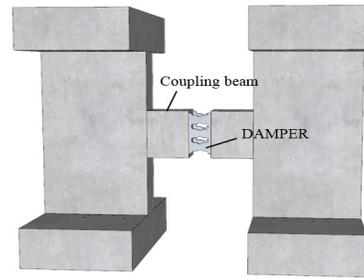
2. 인방형 강제댐퍼 형상제안

2.1 인방형 강제댐퍼 구성요소

본 연구에서 제안한 인방형 강제댐퍼는 <Fig. 2>와 같이 슬릿이 있는 댐퍼, 봉 부재 그리고 H형강으로 구성된다. 횡력 발생 시 슬릿이 먼저 항복하면서 에너지를 소산시키며 슬릿의 개수 또는 슬릿 두께 등을 조절하여 사용자가 원하는 수준의 내력에 맞추어 설계가 가능하다. 댐퍼의 슬릿이 고정되는 양단의 플레이트에 천공 후 볼트 형태의 봉 부재를 결합하는 상세를 고안하였다. 이는 슬릿 파단 이후 봉 부재로 손상이 집중되게 하여 여진 등에 대비할 수 있도록 하기 위함이다. H형강은 댐퍼에 용접된 형태로 댐퍼를 전단벽에 정착하기 위한 목적으로 고안되었다. 기존 인방형 댐퍼에 철근을 다수 배치하여 정착 및 보강하던 방법에 비해 보다 단순한 시공을 기대할 수 있다.



(a) Details of lintel type damper

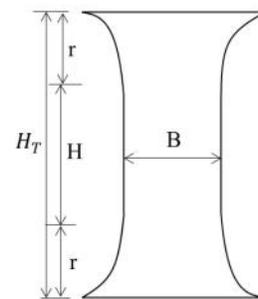


(b) Installation of damper

<Fig. 2> Lintel beam type steel damper

2.2 인방형 강제댐퍼 설계

Oh⁴⁾는 연구를 통해 댐퍼의 슬릿의 폭(B)을 슬릿의 길이(H_T)로 나눈 폭길이비가 댐퍼의 강성과 변형능력에 영향을 주는 것을 확인하였다. <Fig. 3>은 일반적인 슬릿의 형상이며 r은 슬릿 단부 곡선의 반지름, H는 직선부의 높이를 의미한다. 기존 연구를 참고하여 슬릿 단부 곡선의 반지름 r은 슬릿의 길이 H_T 의 1/6 값으로 설계하였다. 본 연구에서는 댐퍼 크기를 고려하여 슬릿의 길이(H_T)를 160mm, 슬릿 단부 곡선의 반지름(r)은 20mm로 고정하고 슬릿의 목표내력을 30kN으로 설계하였다. 목표내력을 갖는 슬릿의 폭길이비를 도출하기 위하여 댐퍼길이를 변수로 해석을 수행하였다. 해석에서 사용한 유한요소 해석프로그램은 ANSYS (R15.0)이며 해석조건은 <Table 1>과 같다. <Fig. 4>에 슬릿의 폭길이비에 따른 댐퍼 슬릿의 하중-변위 곡선을 나타내었다.

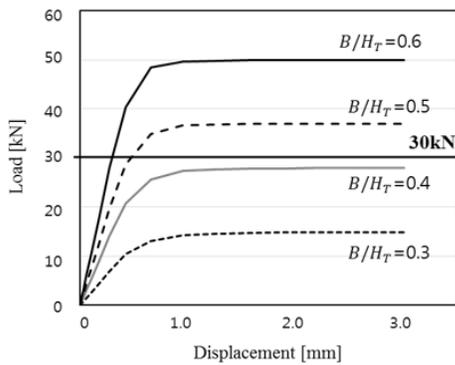


<Fig. 3> Geometric properties of slit

<Table 1> Mechanical properties and load condition of slit model

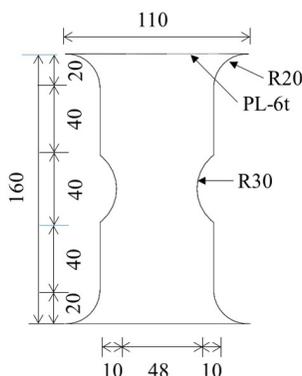
Program	ANSYS APDL R15.0	
	Structural steel(SS400)	
Material	f_y (MPa)	E_t (GPa)
	235	0
Slit thickness(mm)	6	
Mesh size(mm)	2	
Boundary condition	Fixed support	
Load condition	Displacement 3mm	

f_y : Yield stress(MPa), E_t : Tangent modulus



<Fig. 4> Load-displacement curve of slit ($H_T=160\text{mm}$)

폭길이비가 0.4일 때 슬릿의 내력은 27.4kN으로 목표내력인 30kN에 근접한 결과를 보였다. 따라서 이를 바탕으로 <Fig. 5>와 같이 슬릿의 상세 형상을 결정하였다. 기존 슬릿댐퍼에 비해 단부에서의 응력 집중을 완화시키기 위하여 슬릿의 중앙에 홈을 만들어 중앙에서 파단이 일어나도록 유도하였다.



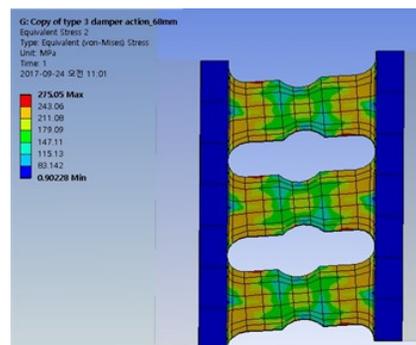
<Fig. 5> Detail of slit(mm)

댐퍼 슬릿의 상세치수를 결정한 이후 유한요소해석을 통해 횡하중으로 인한 에너지를 댐퍼 슬릿에 효과적으로 전달할 수 있도록 댐퍼를 이루는 각 부분의 상세 치수를 결정하고자 하였다. 유한요소해석을 통해 산출된 슬릿 1개의 내력은 27.4kN으로 본 연구에서는 27.4kN의 내력을 가진 슬릿이 6개 배치된 인방형 강재 댐퍼를 설계하였다. 댐퍼의 해석 조건은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Mechanical properties and load condition of damper model

Program	ANSYS APDL R15.0
Material	Structural steel(SS400) Concrete(35MPa)
Dimension of shear wall(b×h×t)(mm)	800×2100×250
Dimension of damper(b×h×t)(mm)	220×330×250
Plate thickness(mm)	30
Slit thickness(mm)	6
Mesh size(mm)	2
Boundary condition	Cylindrical support/ Displacement 5mm

해석 결과 슬릿이 고정되는 좌측 및 우측의 댐퍼 플레이트 두께를 30mm로 하였을 때 <Fig. 6>과 같이 플레이트에 변형이 거의 발생하지 않았으며 슬릿에 응력이 고르게 분포하는 것으로 나타났다.



<Fig. 6> Stress distribution of damper

3. 실험계획

3.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트의 경우 KS F 2405(2010) 기준에 따라 측정된 결과 채령 28일 평균압축강도는 35MPa이며, 인장철근의 경우 항복강도 400MPa인 이형철근을 사용하였다. 인방형 강재댐퍼는 항복강도 235MPa인 SS400 강판을 사용하였다. 실험에 사용된 재료의 물성치는 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Material Properties

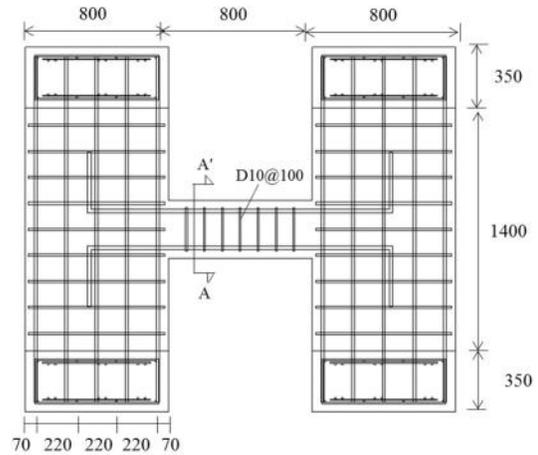
	f_y (MPa)	E_s (GPa)	f_{ck} (MPa)
Rebar	400	200	-
Steel(SS400)	235	200	-
Concrete	-	-	35

3.2 시험체 상세

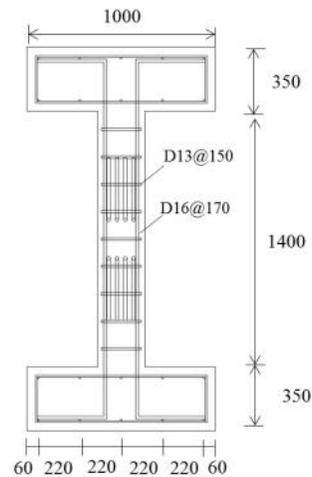
본 연구에 사용된 시험체는 기존 철근콘크리트 인방보로 연결된 전단벽 시스템인 RC 시험체와 철근콘크리트 인방보 중앙에 본 연구에서 제안한 인방형 강재댐퍼를 삽입한 SD 시험체로 제작하였다. 모든 시험체 크기는 장변방향 길이 2,400mm, 단변방향 길이 1,000mm, 높이 2,100mm이며 <Fig. 7>과 <Fig. 8>에 각각 RC 시험체와 SD 시험체의 상세를 나타내었다. 인방형 강재댐퍼는 유한요소해석을 통해 <Fig. 8 (c)>와 같이 장변방향 길이 800mm, 폭 300mm이며 댐퍼에 사용된 슬릿의 두께는 6mm, 상하부 플레이트의 두께는 30mm, 측면 플레이트 두께는 10mm로 하였다. 시험체 일람을 <Table 4>에 나타내었다.

<Table 4> Details of specimens

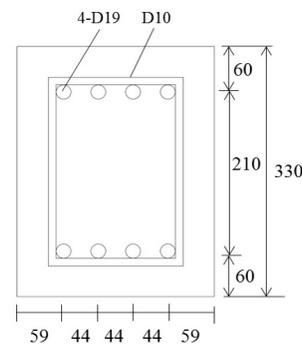
Specimen	Dimension (b×t×h) (mm)	Reinforcement			
		Wall		Coupling beam	
		Ver.	Hor.	Hor.	Ver.
RC	2400×1000	D16@170	D13@150	4-D19	D10@100
SD	×2100	170	150	Steel damper	



(a) Front view



(b) Side view

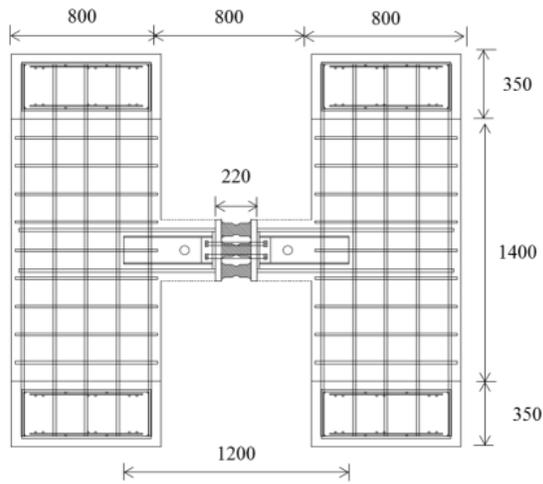


(c) A-A' section

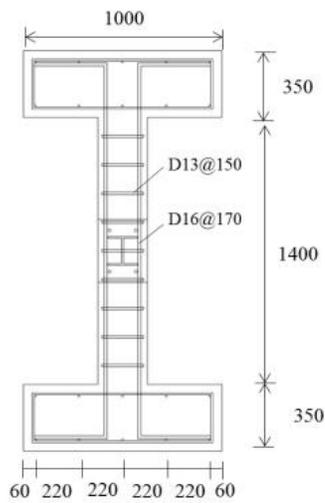
<Fig. 7> Detail of RC specimen(mm)

3.3 실험 방법

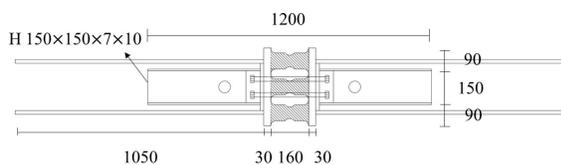
시험체 상부 가력보에 1,000kN 용량의 액츄에이터를 체결하였으며 시험체 하부에 스위블 조인트를 설치하여 반복하중을 도입하였다. 시험체 설치 상세는 <Fig. 9>에 나타내었다. 시험체의 구조성능을 평



(a) Front view



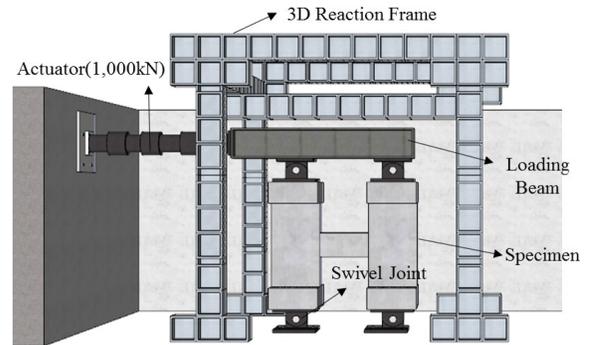
(b) Side view



(c) Dimension of damper and H-BEAM

<Fig. 8> Detail of SD specimen(mm)

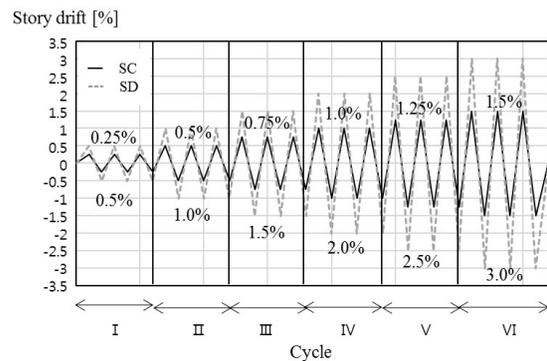
가하기 위하여 <Fig. 10>과 같이 변위제어를 통한 정적 반복가력 하였다. SC 시험체의 경우 목표층간 변위인 1.5%에 도달할 때 까지 0.25%씩 점증적으로 가력하였으며 SD 시험체의 경우 목표 층간변위를 3.0%로 설정하여 0.5%에서 0.5%씩 점증적으로 가력하였다.



(a) Test setup



(b) Photograph of test setup
<Fig. 9> Test setup



<Fig. 10> Load history

4. 실험 결과

4.1 시험체 균열 및 파괴양상

기존 철근콘크리트 인방보 형상인 RC 시험체의 경우, 층간변위각 0.5%일 때 인방보와 벽체의 접합부에서 초기 균열이 발생하였다. 이후 가력이 진전됨에 따라 인방보에서 전단균열이 발생하였으며, 층간변위각이 1.0%인 네 번째 사이클 이후 인방보 뿐만 아니라 벽체에서도 큰 균열이 관찰되었다.

본 연구에서 제안한 인방형 강재댐퍼 시험체인 SD 시험체의 경우, 층간변위각 0.5%일 때 인방보

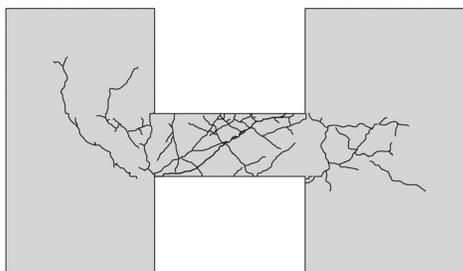
단부에서 초기 균열이 발생하였으며, 실험이 종료될 때까지 RC 시험체와 같이 큰 균열이 발생하지 않았다. 또한 벽체에도 균열이 발생하지 않았다. RC 시험체의 균열도와 실험 종료 후 사진을 <Fig. 11>에 나타내었으며 <Fig. 12>는 SD 시험체의 균열도와 시험체의 파괴상황이다.



(a) Coupling beam of RC specimen



(b) Crack patterns of shear wall



(c) Crack patterns of RC specimen

<Fig. 11> Crack patterns of RC specimen after testing

4.2 하중-변위 곡선

RC 시험체와 SD 시험체의 구조성능을 비교하기 위하여 <Fig. 13>에 하중-변위 곡선을 나타내었다.

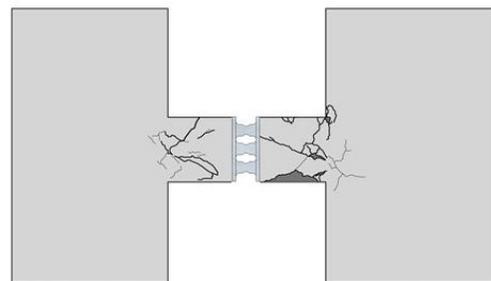
RC 시험체의 하중-변위 곡선의 경우, 철근콘크리트 구조물 거동에서 전형적으로 나타나는 핀칭현상



(a) SD specimen after testing



(b) Damper deformation of SD specimen

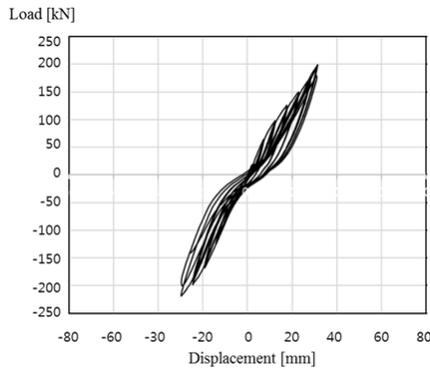


(c) Crack pattern of SD specimen

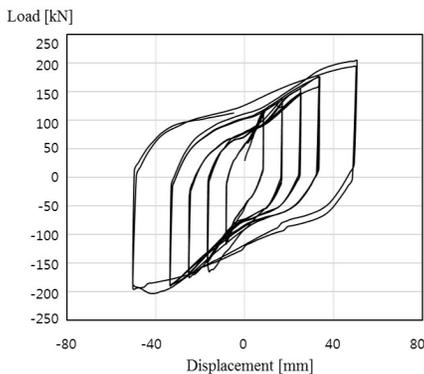
<Fig. 12> Crack pattern of SD specimen after testing

이 관찰되었다. RC 시험체의 최대 내력은 정방향으로 194.43kN, 부방향으로 213.74kN이었으며, 최대 변위는 정방향으로 31.46mm, 부방향으로 29.84mm로 관찰되었다.

SD 시험체의 경우 안정적인 방추형 이력거동을 나타내고 있다. 시험체의 최대 내력은 정방향으로 203.98kN, 부방향으로 203.70kN이었으며, 최대 변위는 정방향으로 63.08mm, 부방향으로 63.02mm로 관찰되었다. <Table 5>에 하중-변위 곡선에서 관찰된 실험 결과를 나타내었다. 동일한 설계하중을 적용하였기 때문에 RC 시험체와 SD 시험체의 최대 내력은 유사하게 나타났다.



(a) RC specimen



(b) SD specimen

(Fig. 13) Load-displacement curve

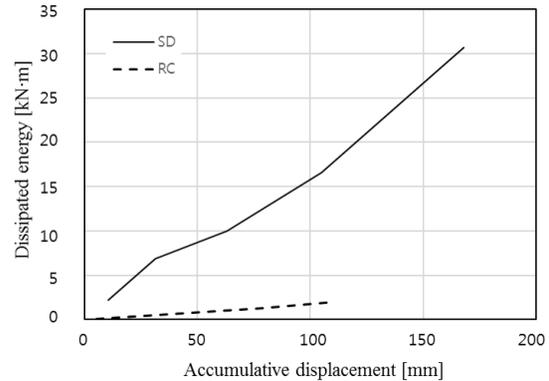
(Table 5) Results of experiment

Specimens	Direction of force	Ultimate strength (kN)	Displacement (mm)
RC	Positive	194.43	31.46
	Negative	213.74	29.84
SD	Positive	203.98	63.08
	Negative	203.70	63.02

4.3 에너지 소산능력

지진 발생 시 건물의 손상을 최소화하기 위하여 댐퍼에는 지진으로 인한 에너지를 최대한으로 흡수하는 능력이 요구된다. 본 연구에서 각 시험체의 하중-변위 곡선의 면적으로 에너지 소산면적을 산정하였으며 이를 통해 제한한 인방형 강재댐퍼의 에너지 소산능력을 평가하고자 하였다. 각 시험체 별 에너지 소산능력을 <Fig. 14>에 나타내었다. SD 시험체의 소산 에너지량은 30.68kN·m이며 RC 시험체에 비해 15배 이상의 에너지 소산능력을 발휘하였다. <Fig. 12>에 나타난 SD 시험체의 균열도를 보

면, 벽체에 균열이 발생하지 않아 대부분의 에너지가 인방형 강재댐퍼에서 소산되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 <Table 6>에 RC 시험체와 SD 시험체의 실험 결과를 비교분석 하였으며 <Fig. 15>에 RC 시험체를 기준으로 SD 시험체의 초기강성, 최대 내력과 에너지 소산능력을 평가하였다.

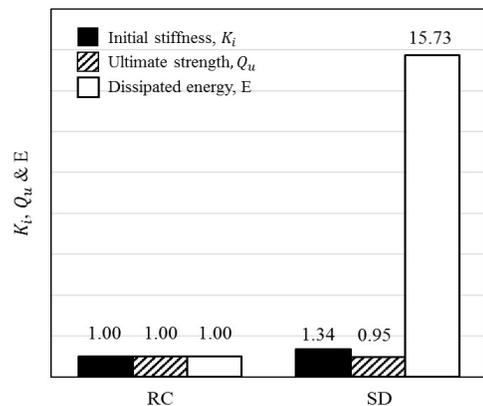


(Fig. 14) Dissipated energy of specimens

(Table 6) Results of experiment

Specimens	K_i (kN/mm)	Q_u (kN)	E (kN·m)
RC	8.37	213.74	1.95
SD	11.20	203.98	30.68

K_i : Initial stiffness, Q_u : Ultimate strength, E: Dissipated energy



(Fig. 15) Comparison of test result

<Fig. 15>에 따르면 RC 시험체를 기준으로 할 때, SD 시험체의 초기강성은 RC 시험체의 1.34배, 최대 내력은 0.95배로 나타났다. 이를 통해 SD 시험체가 RC 시험체에 비교하여 최대 내력은 유사하나 초기강성이 더 우수한 것으로 판단된다. 또한 에너

지 소산능력의 경우 RC 시험체의 에너지 소산량은 1.0으로 할 때, SD 시험체의 에너지 소산량은 15.73으로 댐퍼의 에너지 소산능력이 기존 인방보에 비하여 우수한 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 인방형 강재댐퍼는 기존 철근 콘크리트 인방보와 비교하여 볼 때, 초기강성과 에너지 소산능력이 우수한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 인방형 강재댐퍼의 형상을 제안하고 정적반복실험을 수행하여 제안한 인방형 강재댐퍼의 구조성능을 평가하고자 하였다. 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1) 인방형 강재댐퍼는 인방보에 강재댐퍼가 삽입되는 형태로 슬릿이 있는 댐퍼, 봉 부재 그리고 H형 강으로 구성된다. 유한요소해석을 통해 강재댐퍼의 상세치수를 결정하였으며 폭길이비 0.4, 댐퍼 플레이트의 두께가 30mm일 때 응력이 슬릿에 분포하는 이상적인 거동을 얻을 수 있었다.

2) 실험 결과 기존 철근콘크리트 인방보 상세인 RC 시험체의 경우 초기 균열은 인방보와 벽체의 접합부에서 발생하였으며 이후 인방보와 벽체에서 전단균열이 발생하였다. 인방형 강재댐퍼가 적용된 SD 시험체의 경우 초기 균열은 인방보 단부에서 발생하였으며 벽체에 균열이 발생하지 않아 인방형 강재댐퍼가 에너지를 효과적으로 흡수했음을 보여 준다.

3) 본 연구에서 제안한 인방형 강재댐퍼가 적용된 SD 시험체의 경우 RC 시험체에 비하여 초기강성과 최대 내력, 에너지 소산능력은 각각 1.34배, 0.95배, 15.73배로 최대 내력은 5% 감소하였으나 초기강성과 에너지 소산능력이 뛰어난 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연협력 기술개발사업(No.C0442764)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. J.Y. Kim, I.Y. Jung, H.G. Kim and D.H. Kim, "Evaluation on the Structural Performance of Hybrid Damper Using High-damping Rubber and Steel", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 16, No. 3, pp. 99~106, 2016.
2. T. Hitaka and T. C. Matsui, "Experimental study on steel shear wall with slits", Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 5, pp. 586~595, 2003.
3. C. Christopoulos and M. Montgomery, "Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 42, No. 15, pp. 2217~2233, 2013.
4. S.H. Oh, K.Y. Choi and H.S. Ryu, "Structural Performance Evaluations of Steel Hysteretic Damper in Series for High-Rise Shear Wall System", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 24, No. 4, pp. 371~382, 2012.
5. D.H. Kim, "Evaluation on Structural Performance of Hybrid Friction Damper Components I: One-nodal Rotary Frictional Component", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 2, pp. 43~50, 2014.

■ Received : October 11, 2017

■ Revised : October 25, 2017

■ Accepted : October 26, 2017