강재판형 이력댐퍼 연결부재와 RC벽체의 접합상세에 따른 구조거동

강인석¹⁾ · 허무원^{2)*}

¹⁾(주)토탈이엔씨 ²⁾단국대학교 건축공학과

Structural Behavior of Joints between the Hysteretic Steel Damper Connector and RC Wall Depending on Connection Details

In-Seok Kang¹⁾ and Moo-Won Hur^{2)*}

¹⁾TOTAL ENC, Architecture Engineering, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Dan-kook University, Yongin 448-701, Korea

ABSTRACT Hysteretic steel damper has been applied mainly to steel buildings. However, the usage in RC buildings is rapidly increasing recently. In order to apply the steel hysteretic damper in RC buildings, supporting elements of the damper should have sufficient strength and stiffness suitable for transferring damper forces to beams and walls. But due to the inevitable damage in reinforced concrete elements due to cracking, identification of the load transfer mechanism from damper to supporting element and hysteretic characteristics of the supporting element are extremely important in evaluating the damper behavior. Experiments were carried out on connection details between RC walls and supporting elements of the steel plate typed damper such as EaSy damper. The test results showed that fracture patterns of all specimens were almost identical except in the crack number and pattern associated with shear loading condition. Among the specimens, HD-3 showed a well distributed cracks patterns along with good performance with respect to energy dissipation capacity, stiffness deterioration, and strength degradation.

Keywords : hysteretic damper, energy dissipation, stiffness degradation, steel fiber reinforced concrete

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 지진활동이 왕성해지고 있으며, 일본 대지진 등에서 볼 수 있듯이 지진으로 인한 사회·경제적 피해 규모도 대형화되고 있는 실정이다. 지난 30년 동안 비약적인 경제발전을 이룩한 우리나라에도 지진에 대해 안전지대가 될 수 없다는 인식이 확대되고 있으며, 지진 발생 시 대규모 피해가 발생할 수 있다는 우려가 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 국내에서도 중요도가 높은 건물 또는 국내 내진기준이 제정되기 이전에 지어진 건물과 같이 내진성능이 의문시 되는 구조물을 대상으로 지진으로부터 발생하는 에너지를 효과적으로 소산할 수 있는 제진장치를 사용한 기존 구조물의 내진보강이 증가하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 신축건물에서도 제진장치를 도입하여 내진성능을 확보하고자 하는 노력도 점차 증가하는 추세이다.

수동형 댐퍼의 일종인 강재형 이력댐퍼는 주로 철골건

물에 많이 적용되어 왔으나 최근에 들어 리모델링 시 내진보강용으로 철근콘크리트 건물에도 적용되는 사례가 증가하고 있다. 철근콘크리트 건물에 강재이력댐퍼를 적용하기 위해서는 댐퍼의 접합부재가 댐퍼의 지지능력을 보 및 벽체로 전달하기에 적합한 강도와 강성을 지녀야만 한다. 하지만 균열로 인한 철근콘크리트의 손상은 부득이한 것으로, 댐퍼로부터 지지부재로의 하중전달 메커니즘과 댐퍼 지지부재 이력특성의 규명은 이러한 댐퍼의 거동을 평가하는데 매우 중요하다.

따라서 이 연구에서는 국내에서 많이 적용되고 있는 EaSy 댐퍼¹⁾와 같은 강재판 형상을 가지는 이력댐퍼를 대상으로 지지부재로서 RC벽체와의 연결을 고려한 3가지 상세를 제안하였으며, 댐퍼연결부재와 지지부재 접합상세에 따른 거동을 실험을 통하여 알아보고, 효과적인 힘전달이 가능한 상세를 제안하고자 한다.

2. 접합부 상세 계획

접합부 상세는 먼저 기존 연구결과들을 분석하여 제작이 용이하면서도 강재댐퍼로부터 콘크리트 벽체로 응력을 효과적으로 전달할 수 있는 3가지 상세를 고안하였

*Corresponding author E-mail: hmw01@nate.com

Received August 1, 2012, Revised September 10, 2012,

Accepted September 11, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

재료적인 측면에서는 콘크리트 균열제어를 통한 전단 능력 향상을 목적으로 일반 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트의 2종류를 병행 실험하고자 한다.

두 번째 그룹은 일반 고강도 콘크리트가 아닌 강섬유 보강 콘크리트를 사용한 실험체로서 SFHD-1, 2, 3 실험체의 강재 판의 구성은 HD-1, 2, 3 실험체와 동일하다. 강섬유 보강 콘크리트는 보강되지 않은 콘크리트에 비하여 강도증진, 취성적인 콘크리트 성질개선 및 균열제어 효과가 우수한 것으로 보고되고 있어 첫 번째 그룹의 실험체보다 우수한 인성의 확보가 기대된다.

3.2 사용재료

3.2.1 콘크리트

이 연구에서 사용한 콘크리트의 설계강도는 30 MPa로 KS F 2405에 의한 콘크리트 압축강도 시험 결과는 Table 2에 나타내었다.

3.2.2 철근, 강섬유 및 스티드 볼트

이 연구에서 사용된 철근은 KS B 0801(금속재료 인장 시험편 규정) 2호의 금속재료 규정에 따라 시험편을 제작하여 KSB 0802의 금속재료 인장시험방법에 따라 시험을 실시하였다. 철근의 인장시험 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 4는 강섬유 보강콘크리트 제작 시 사용한 강섬유의 특성을 나타내었다. 강섬유의 형상비(aspect ratio, AR)는 62.5이고, 혼입률(V_f)은 시공성을 고려하여

Table 2 Characteristic value of concrete

No.	f_{ck} (MPa)	Average f_{ck} (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
1	33.53	31.4	1.92×10^4
2	33.17		
3	29.20		
4	29.80		
5	30.51		
6	32.21		

Table 3 Material properties of steel

Bar size	Yield strength (MPa)	Yield strain ($\times 10^{-5}$)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
D13	538.8	260.4	664.6	26.8
D10	554.6	494.8	773.8	36.0

Table 4 Material properties of steel fiber

Type	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio (L/D)	Specific gravity
Hooked	50	0.8	62.5	7.85

Fig. 3 Shape of the steel fiber

기존논문³⁾에서 제시한 1.5%로 하였다. 실험체에 사용된 스티드 볼트와 볼트류는 기성제품으로 F10T를 사용하였다.

3.3 실험방법

Fig. 4에 실험체의 설치 상황을 도시하였다. 실험체의 설치는 댐퍼 연결부재의 상부가 반복 수평하중을 받도록 설치하였다. 볼트를 사용하여 하부 고정블록을 안전하게 반력 바닥프레임에 고정시키고, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 그리고 0.5%의 부재각(R, 가력점의 수평변위를 가력점까지의 높이로 나눈 값)에 대하여 두 번씩, 그리고 0.8, 1.0, 1.3, 1.5 그리고 2.0%의 부재각에 대해서는 실험상황에 따라 한 번 또는 두 번씩 반복하중이 집중 가력되도록 계획하였다. 실험 시 축력은 적용하지 않았다.

실험이 진행되는 동안 수평하중의 반복가력과 동시에 벽체 상부에 부착된 로드셀 및 벽체 상부와 기초부분에 LVDT를 설치하여 수평변위를 측정하였다. 또한, 벽체 내부에 벽체의 응력분포를 확인하기 위하여 댐퍼 연결부의 좌우 부분에 2개씩 변형률 게이지를 부착하였다. 이와 마찬가지로 벽체 부분에도 좌우측 외단부 수직철근에 변형률 게이지를 4개씩 설치하여 응력분포를 확인하였다. Fig. 6에 변형률 게이지 설치 위치와 LVDT 설치위치를 각각 나타내었다.

Fig. 4 Specimen setting

Fig. 5 Loading histories

Fig. 6 Strain gauge and LVDT locations

4. 실험 결과

4.1 균열 및 파괴상황

각 실험체의 균열패턴은 실험체 파괴메커니즘의 중요한 실마리를 제공한다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 HD-1, HD-2, HD-3 실험체와 강섬유 보강 콘크리트로 보강된 SFHD-1, SFHD-2, SFHD-3 실험체는 모두 전단균열을 동반하기는 하였으나 최종적으로는 미끄러짐 전단파괴, 콘크리트 박리 및 압괴로 파괴되었으며, 균열의 양과 차이를 제외하고는 거의 동일한 양상을 나타내었다.

HD-1 실험체 균열은 휨-전단 균열이 벽체 전체에 발생하였으며, 벽체와 기초의 접합부 부위는 미끄러짐 전단파괴도 일부 발생하였다. 하지만 매립철판이 끝나는 하단부에서는 이상균열 및 보강철판의 뿔힘 현상은 관측되지 않았다. HD-2 실험체 균열은 휨-전단 균열이 벽체 전면에 균등하게 분포되어 발생하였으며, 벽체의 양단부에서 콘크리트의 압괴에 의한 파괴가 크게 관측되었다. 또

Fig. 7 Crack of specimens

한, HD-1 실험체와 마찬가지로 미세균열을 제외하면 매립철판이 끝나는 하단부에서는 특이한 이상균열 및 보강철판의 뿔힘 현상은 관측되지 않았다. HD-3 실험체 균열양상은 전체적으로 HD-1 및 HD-2 실험체와 비슷한 양상을 나타내었지만, 벽체 면과 기초 접합부 부분이 다른 실험체보다 심한 미끄러짐 전단균열과 압괴를 나타내었다.

강섬유 보강 실험체는 전술된 바와 같이 일반 콘크리트를 사용한 실험체(HD-1, HD-2 및 HD-3)와 비슷한 양상의 균열패턴을 보였다. 이는 콘크리트 타설 시 강섬유의 섬유뭉침(fiber ball) 현상으로 인해 충분한 인성을 확보하지 못한 것으로 판단된다.

4.2 하중-변형능력

Table 5에 6개 실험체에 대한 실험 결과를 정리하였으며, Fig. 8에 각 실험체의 수평하중-변위관계를 나타내었다. Table 5로부터 알 수 있듯이 각 실험체의 하중부담 능력과 변형능력은 거의 동일한 것으로 나타났으며, 연결철판의 상세 또한 3개의 실험체가 거의 동일한 파괴형태를 나타내는 것으로 나타났다. HD-1실험체는 이 연구에서 제안된 기본 실험체로서 최대변위 40.64mm, 최대내력 250.98kN으로 나타났으며, 내진기준 허용 층간변형각 1.5%를 초과하여도 안전한 거동을 하는 것으로 나타났다. 또한, HD-2와 HD-3 실험체는 HD-1실험체 보다 최대내력은 정방향으로는 1.07배 1.04배 증가하였고, 부방향으로는 0.96배, 0.99배 감소하였다. 변형능력은 두 실험체 모두 정방향으로는 1.38배, 부방향으로는 1.31배 증가하였다. 두 실험체 역시 내진기준 허용 층간 변형각 1.5%를 초과하여도 안전한 거동을 나타내었다. 강섬유 보강 실험체인(SFHD-1, SFHD-2 및 SFHD-3)은 내력 및 변형능력의 편차가 크게 차이 나지 않고 유사한 결과를 나타내었다. SFHD-1대비 SFHD-2와 SFHD-3은 내력은 1.05배, 1.08배 증가하였고, 변형능력은 유사한 결과를 나타내었다. 결론적으로 강도-변형능력은 제안된 HD-3 및 SFHD-3 실험체가 가장 좋은 것으로 나타났다.

4.3 강도저하

수평하중을 받는 실험체의 하중-변위 곡선은 매 사이클마다 결과들이 동시에 나타나므로 전체적인 하중 및 변형특성을 파악하기는 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 각 사이클마다 최대 하중점을 연결한 포락선(envelope curve)으로 전체 거동을 평가하는 것이 편리하므로 실험체의 포락선을 나타내었다.

Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이 일반 콘크리트 실험체 모두 비슷한 양상을 나타내었다. 스티드 볼트를 적용한 HD-1 실험체의 경우 층간 변위비 1.5%에서 최대강도의 약 11.0%의 강도감소를 나타낸 반면 $\phi 24$ hole을 뚫고 볼트로 체결한 HD-2 실험체와 $\phi 50$ hole과 철판 끝부분에

Table 5 Result of specimens

Specimen	Cycle	Yield load (kN)	Yield Displ. (δ_y , mm(%))	Maximum load (kN)	Maximum displacement (δ_{max} , mm(%))	Ductility ratio
HD-1	+	197.88	9.60	247.35	39.02	4.1
	-	-200.78	-9.80	-250.98	-40.64	4.1
HD-2	+	211.98	8.70	264.98	53.82	6.2
	-	-194.52	-10.10	-243.15	-53.00	5.2
HD-3	+	206.71	9.10	258.39	53.89	5.9
	-	-199.88	-8.70	-249.86	-53.51	6.2
SFHD-1	+	197.48	7.83	246.85	54.81	7.0
	-	-195.39	-8.07	-244.24	-54.78	6.8
SFHD-2	+	207.60	10.22	259.51	55.59	5.4
	-	-194.65	-9.32	-243.32	-55.17	5.9
SFHD-3	+	212.58	7.99	265.73	54.96	6.9
	-	-186.29	-6.88	-232.86	-54.92	8.0

Fig. 8 Load-displacement relationships

Fig. 9 Strength degradation of the specimens

70 mm 틱을 둔 HD-3 실험체는 층간 변위비 4.0%에 가서야 각각 9%와 28%의 강도 감소를 나타내었다. Fig. 9(b)는 모든 실험조건은 HD-1, HD-2, HD-3과 동일하지

만 일반 콘크리트 대신 강섬유 보강 콘크리트를 사용한 실험체로서 일반 콘크리트를 사용한 실험체와 거의 비슷한 양상을 나타내었다.

Fig. 10 Strength degradation comparison of reinforcement type

Fig. 10은 포락곡선을 보강형태별로 구분하여 도시한 것으로 상기에서 언급된 바와 같이 강섬유 보강으로 인한 효과는 크게 기대되지 않는 것으로 나타났다. 이는 실험체를 세워서 타설하여 벽체의 주근 및 보강철판 등으로 타설시 워크빌리티가 잘 유지 되지 않아 파이버 불현상이 발생한 때문인 것으로 사료된다.

결론적으로 강도의 유지라는 측면에서 볼 때 댐퍼와 벽체의 접합은 제안된 상세 어느 것을 채용하더라도 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 제작상의 용이함 등을 고려해 볼 때 HD-3 실험체에 적용된 $\phi 50$ hole과 70 mm 정착판으로 보강된 실험체가 가장 효과적인 것으로 판단된다.

4.4 강성저하

원점으로부터 각 이력 사이클의 최대강도 점을 연결한

Fig. 11 Stiffness degradation of RC specimens

직선의 기울기로 정의된 각 실험체의 강성저하(stiffness degradation) 경향을 정·부 방향으로 나누어 Fig. 11과 12에 나타내었다. 정방향 가력의 경우 일반 콘크리트 실험체와 강섬유 보강 콘크리트 실험체 모두 유사한 강성저하를 보였다. 하지만 일반 콘크리트의 부방향의 경우 HD-1 실험체와 HD-2 실험체의 강성저하가 심각한 것으로 평가되었으며, HD-3 실험체의 경우 일반 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트 실험체 모두 완전한 강성저하를 나타내었다. 강성저하를 평가한 결과 $\phi 50$ hole을 뚫고 70 mm 정착판을 둔 HD-3과 SFHD-3 실험체가 강성저하를 방지하는데도 효과적임을 알 수 있었다.

4.5 에너지소산능력

실험체의 에너지 소산능력(energy dissipation capacity)을 Fig. 13에 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 HD-3

Fig. 12 Stiffness degradation of SFRC specimens

Fig. 13 Energy dissipation of specimens

Fig. 14 Strain distribution of specimens

실험체의 에너지 소산능력이 가장 우수한 것으로 나타났으며 극한변형 시까지 우수한 에너지 소산능력을 발휘하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 에너지 소산능력의 증진은 강도와 변형 능력의 증진에 따른 결과라고 사료된다.

다만, 이러한 에너지 소산능력의 증가는 강도나 변형 능력의 증진량에 비하여 그리 큰 증가를 보이고 있지 못하는데 이는 벽체의 거동이 강도나 변형능력의 증진을 가져온 휨 모멘트 저항성분에 의해 지배되지 않고, 종국적으로는 기초와 벽체하부의 미끄러짐 전단파괴와 콘크리트 압괴에 의해 지배되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.6 변형률 게이지의 변형률 분포

이 실험의 주된 목적은 댐퍼 연결철판과 콘크리트 벽체 사이의 응력전달이 원활하게 이루어지는가의 여부를 판단하기 위한 것이다. 따라서 수평하중 작용 시 실험체

의 응력분포를 알아보기 위하여 철근 및 댐퍼연결 철판에 변형률 게이지를 부착하였다. 측정은 가력방향과 직각되는 방향으로 총 14개의 게이지를 설치하였으며, 이 중 벽체 끝단으로부터 각각 175, 325, 625, 1225 mm 지점에서 측정한 4개점과 댐퍼연결 철판에 벽체와 같은 라인으로 설치한 두 개의 게이지를 대상으로 Fig 15에 오른쪽 및 왼쪽 방향 최대 변형률을 도시하였다.

Fig. 14로부터 철근의 변형률은 가력점으로 부터 기초까지 삼각형분포를 나타내고 있으며, 가력점에서 멀어질수록 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. 최대하중 시 기초 부근의 철근을 제외하고는 대부분의 주근이 2000 $\mu\epsilon$ 전후의 변형률을 나타내 기초와 벽체의 접합부를 제외하고는 625 mm 위치까지 벽체 주근의 항복이 진행되지 않았다는 것을 알 수 있다.

실험 결과를 통해 볼 때, 이 연구에서 고려된 접합상세는 모두 댐퍼로부터 철근콘크리트 벽체로 응력을 전달하는데 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

다만, 그림으로부터도 알 수 있듯이 육안상으로는 관측되지 않았으나 철판의 변형률 분포와 동일한 위치에 설치된 벽체 철근의 변형률 분포가 다르게 나타난 것으로 보아 철판과 철근콘크리트 벽체 사이에 약간의 미끄러짐이 발생한 것으로 판단되며, 이러한 미끄러짐은 HD-3 실험체에서 가장 작게 나타나 동 실험체 상세가 응력을 전달하는데 있어 가장 우수한 결과를 보일 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 연구에서는 강재형 댐퍼와 지지부재(RC벽체) 사이의 접합부 상세를 제안하고 이의 효용성 검증을 위한 실험을 실시하였다. 특히 이 실험에서는 접합상세와 강섬유보강 콘크리트의 사용에 의한 영향 평가를 실시하여 최적의 상세를 도출하고자 하였다. 이 실험에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열 및 파괴양상은 제안된 3가지 상세를 가진 실험체 모두 전단균열을 동반하기는 하였으나 최종적으로는 벽체 연결부의 콘크리트 박리 및 압괴 파괴되었으며, 균열의 양과 차이를 제외하고는 거의 동일한 양상을 나타내었다. 그 중에서 단부 정착판을 포함한 HD-3 실험체가 파괴가 집중되지 않고 균열이 잘 분산되는 좋은 결과를 나타내었다.
- 2) 에너지 소산능력에서도 HD-3의 실험체에 적용된 F50 hole과 70 mm 정착판으로 보강된 상세가 제안된 실험체 중 우수한 결과를 나타내었다.
- 3) 변형률 게이지의 변형률 분포는 모든 실험체가 가력점으로부터 기초까지 삼각형분포를 나타내었으며, 가력점에서 멀어질수록 변형률이 증가하는 것으로 나타났다. 다만, 연결철판과 벽체철근의 변형률 차이로 보아 약간의 미끄러짐이 발생한 것으로 보이며, 이러한 미끄러짐의 크기는 역시 HD-3의 실험체가 가장 작은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 한국토지주택공사의 중소기업지원과제의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S. J., Park, J. S., and Oh, S. H., "A Study on the Earthquake Response Characteristics of Steel Frames with Metallic Damper," *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 11, No. 2, 2011, pp. 119-127.
2. Matsuura, T., Inai, E., and Fujimoto, T., "A Study on Struc-

tural Performance Considering Connecting Condition of Pillar Type Hysteretic Dampers for R/C Buildings," The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008, ID 05-06-0053.

3. Lee, H. H., Kwon, Y. H., Hur, M. W., and Chun, Y. S., "Shear Capacity Evaluation of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam without Stirrups Considering Material and Member Characteristic Strength," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 7, No. 2, 2003, pp. 245-250.
4. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering 2nd Edition*, Prentice Hall, 2001, 844 pp.

요 약 강재형 댐퍼는 주로 철골구조에서 많이 사용되어 왔으나 최근에 들어 철근콘크리트 건물에도 사용빈도가 증가하는 추세이다. 철근콘크리트 건물에 강재이력댐퍼를 적용하기 위해서는 댐퍼의 접합부재가 댐퍼의 지지능력을 보 및 벽체로 전달하기에 적합한 강도와 강성을 지녀야만 한다. 하지만 균열로 인한 철근콘크리트 요소의 손상은 부득이한 것으로, 댐퍼로부터 지지부재로의 하중전달 메커니즘과 댐퍼 지지부재 이력특성의 규명은 이러한 댐퍼의 거동을 평가하는데 매우 중요하다. 이에 이 연구에서는 EaSy 댐퍼와 같은 강재관형 이력댐퍼의 지지부재와 RC벽체와의 접합상세를 대상으로 실험을 실시하였다. 실험 결과 전단과 관련된 균열의 양과 패턴을 제외하고는 모든 실험체의 파괴패턴은 거의 동일한 것으로 나타났으며, 잘 분산된 균열을 지닌 HD-3 실험체가 에너지소산능력, 강성저하 그리고 강도저하 측면에서 좋은 거동을 보여주었다.

핵심용어 : 강재형 댐퍼, 에너지 소산, 강성저하, 강섬유 보강 콘크리트