

탄소성 이력댐퍼를 구비한 접합부의 거동

Structural Behavior of Beam-to-Column Connections with Elasto-Plastic Hysteretic Dampers

오상훈* 유홍식** 김영주***
Oh, Sang Hoon Ryu, Hong Sik Kim, Young Ju

ABSTRACT

The resistance of a structure against an earthquake is related to its ability to absorb the seismic input energy. The development of devices for dissipating the seismically induced energy on the structure is a subject that is receiving large attention in the field of earthquake engineering. One example of these devices is the steel plate with slits. In this paper, a connection with a slit-type steel plate damper installed at each ends of wide-flange section beam, as an energy absorption element, was proposed. A series of experiment was performed to investigate their behavior and structural characteristic. The main parameters were the aspect ratio of the struts in slit plates, thickness of the struts and height of the vertical plates. Test results indicated that most of the energy was absorbed by plastic deformation of slit plate dampers.

1. 서론

극한지진하에서 구조물의 내진성능을 확보하기 위해서는, 구조물이 지진에 의한 입력에너지를 상회하는 에너지흡수 능력을 가져야 한다. 내진설계에서는 기둥 붕괴형이나 보 붕괴형과 같이 항복 메카니즘¹⁾을 고려한 설계법이 주를 이루고 있다. 붕괴 메커니즘을 고려할 시 기둥 붕괴형보다는 보 붕괴형으로 설계하여야 하지만 실질적으로 슬래브 구속효과 등에 의해 보 붕괴형의 실현이 어렵다. 보 붕괴형을 RBS(Reduced Beam Section)단면 등을 채용하여 보의 소성화를 유도할 수 있다. 그러나, RBS 단면은 보의 소성화에 의해 에너지를 흡수하므로, 지진 발생등에 의해 1차 부재인 보 부재의 손상을 피할 수 없다. 따라서 지진발생후의 보수가 어렵게 되고, 슬래브 합성에 의한 거동이 아직 명확하게 밝혀지지 않은 단점이 있다.

* 정회원 · 포항산업과학연구원, 책임연구원
** 학생회원 · 포항산업과학연구원, 선임연구원
*** 학생회원 · 한양대학교, 박사과정

따라서 보 부재에 소성힌지가 발생하는 전체 붕괴메커니즘의 효과를 실현하기 위해서는 접합부에서 에너지를 흡수시키는 반강접 접합부²⁾로 하는 것이 유리할 수 있으며, 주로 볼트 접합부로 설계가 된다. 하지만 접합부를 볼트로 할 경우 시공은 간편해 지지만 Pre-Northridge에서 볼트가 취성파단의 단점이 지적되어 내진성능의 발휘가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하고자 기본적으로 볼트접합을 대상으로 하더라도 내진성능을 확보하면서도 보 붕괴형이 실현 가능한 새로운 형태의 접합부를 제안하고자 한다.

본 연구에서 조립형 슬릿플레이트 댐퍼³⁾를 사용하여 안정된 에너지 흡수능력을 확보함과 동시에, 지진재해 후에 유요소를 편리하게 재사용(Re-use)하는 가능성을 고려한 것이다. 보-기둥 접합부에 탄소성 이력댐퍼를 적용하였다. 첫 번째는 그림 1에서 나타낸 것처럼 보에서 작용하는 응력은 보와 댐퍼부를 연결하는 이음부를 통해 전달되고, 댐퍼부의 응력은 종판을 통해 기둥에 전달되는 시스템이다. 두 번째로 적용한 접합부는 그림 2처럼 상단에는 순수 Split-T를 하단에는 Split-T에 탄소성 이력댐퍼를 부착하고 이것을 다시 보와 기둥에 연결하는 시스템이다. 두 방법에서 적용된 접합부들은 모두 고력볼트접합으로 설계하여, 지진 후 손상된 댐퍼를 쉽게 교체할 수 있는 방법을 모색한 것이다. 그림 1 및 그림 2에서 제시한 접합부는 접합부가 소성화하더라도 기둥, 보에는 손상이 발생하지 않고, 모든 에너지를 기둥과 보 부재의 연결재로 사용된 슬릿 플레이트 댐퍼에서 흡수하도록 고안된 것이다.

본 연구에서는 그림 1,2와 같이 골조의 보에 댐퍼부를 삽입한 접합부에 대한, 정적반복가력실험을 통하여, 그 역학적 거동을 파악하고자 하였다.

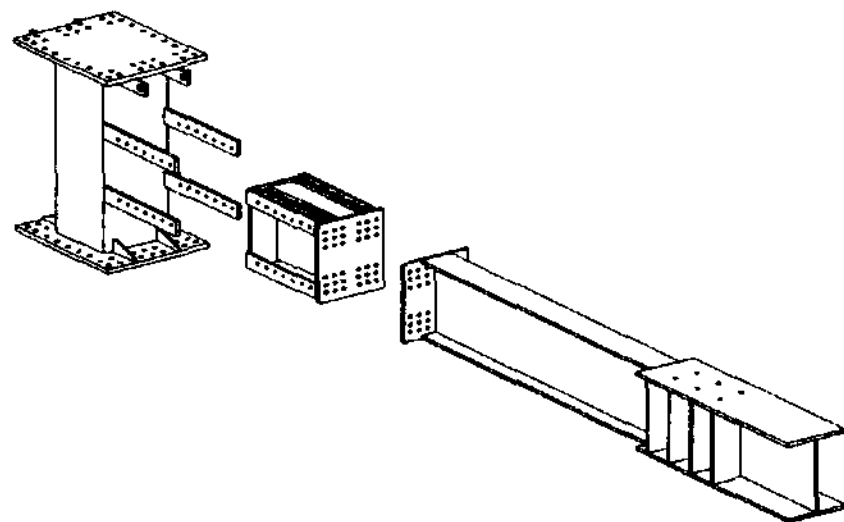


그림 1. Box type 댐퍼 접합부

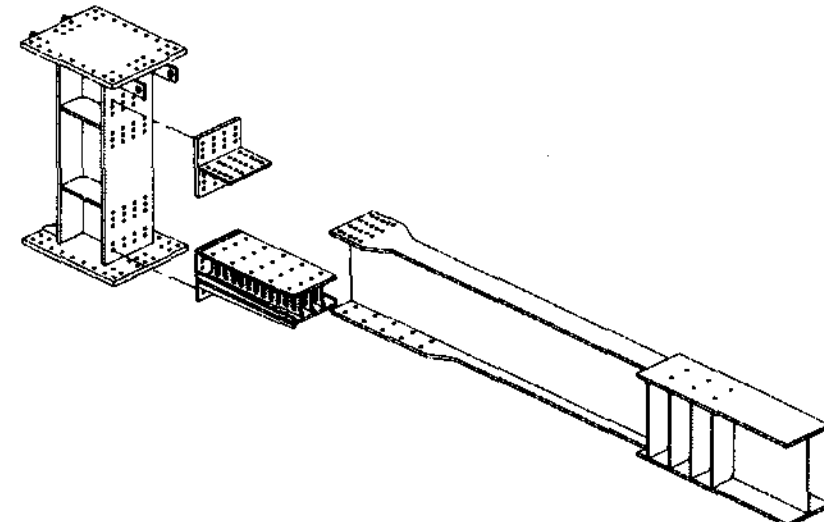


그림 2. Split-T type 댐퍼 접합부

2. 실험 절차

2.1 실험체

본 연구에서 적용한 실험체는 Box type 댐퍼 접합부 7개, Split-T type 댐퍼 접합부는 2개를 포함하여 총 9개이다. 먼저 Box type 댐퍼 접합부는 용접조립 H형강 기둥과 압연롤 H형강으로 이루어진 T자형의 접합부이다. 그림 1과 같이 실험체는 종판(Vertical Plate)이 용접된 기둥, 댐퍼부, 및 보의 3부분으로 이루어져 있다. 댐퍼부의 상세도는 그림 3에 나타내었다. 보웨브는 웨브 접합판에 완전용입용접을 했고, 보플랜지는 재단을 30mm 절단해서 댐퍼가 변형하기에 유효한 거리를 두었다. 댐퍼는 한쪽면은 보플랜지와 동일평면상에서 완전용입 용접되고, 다른 한 면은 기둥에 응력을 전달하기 위한 댐퍼부 종판에 모살용접되었다. 특히, 보의 웨브부분을 기둥에 직접적으로 용접하지 않고 웨브 접합판에 용접을 한 것은, 댐퍼의 변형이 심화되어도 기둥에 그 영향을 주지 않기 위함이다.

Split-T type 댐퍼부는 그림 4와 같이 상단에는 슬래브 타설 등에 방해가 되지 않도록 Split-T로 구성되며, 하단의 Split-T에는 슬릿 댐퍼를 부착하여 보-기둥을 연결하였다. Box type 댐퍼와 마찬가지로

가지로 기둥으로 응력을 전달하기 위하여 종판을 부착하였다. 또한 전단력과 모멘트의 확보를 위하여 보 플랜지에 수평 스티프너를 용접처리하였다.

실험체 일람을 표 1에 나타냈다. Box type 댐퍼접합부의 경우 댐퍼의 스트럿의 형상비(폭/길이; B_s/H_s)와 슬릿플레이트의 두께 및 종판의 크기가 주요한 파라메타이다. 사용강재는, 댐퍼는 SS400, 이외의 기둥이나 보는 모두 SM490재를 사용하였다. Split-T type 댐퍼부의 경우 스트럿의 형상비가 0.3과 0.5인 경우로 나누어지며, 0.3인 경우 상단의 Split-T의 강판 두께를 32mm로 하여 변형에 충분히 견딜 수 있게 설계한 반면 형상비가 0.5인 경우 Split-T의 강판 두께를 16mm로 하여 상대적으로 약하게 설계하여 Split-T의 두께 영향을 비교하고자 하였다.

표 1 실험체 일람

Type	실험체명	댐퍼두께 [mm]	스트럿폭 [mm]	스트럿 갯수	B_s / H_s
Box type	B-1	20	14	16	0.35
	B-2	20	20	14	0.50
	B-3	20	26	12	0.65
	B-4	12	20	14	0.50
	B-5	16	20	14	0.50
	B-6	12	14	16	0.35
	B-7	16	14	16	0.35
Split-T type	S-1	19	30	12	0.3
	S-2	19	50	5	0.5

2.2 실험방법

실험은 최대하중용량 200t, 스트로크 용량 $\pm 300\text{mm}$ 의 성능을 가진 정적 액츄에이터를 사용하여 가력을 하였으며, 가력장치도를 그림 5에 나타냈다. 실험체와 반력벽과의 접합은 기둥상하단에 대해 편접합부이고, 시험체 자유단은 액츄에이터와 연결되어 수직하중을 작용시키도록 했다. 가력은 댐퍼의 상대변위에 따라 제어되었다. 목표변위는 댐퍼의 항복변위⁴⁾를 기준으로 하였다. 가력패턴은 탄성역에서 가력후 변형진폭증분 $2\delta_y$ 의 점증변위 반복재하이력으로 하였다. 여기서, δ_y 는 댐퍼의 항복변위이다. 변위측정은 보 단부의 가력점에서 연직방향으로 변위계를 사용하여 측정하였고, 특히 실험의 변위제어 기준으로 쓰이는 댐퍼의 상대변위를 측정하기 위해 상·하 각각 2개씩 모두 4개의 변위계를 설치하였다. 변형도계이지는 댐퍼의 스트럿 부분과 보플랜지 부분에 각각 부착하여 그 변형도 분포를 관찰하고자 했다.

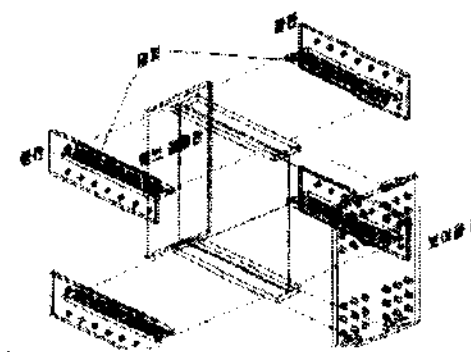
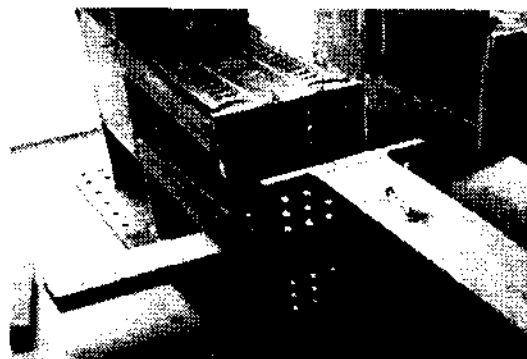


그림 3 Box type 댐퍼부

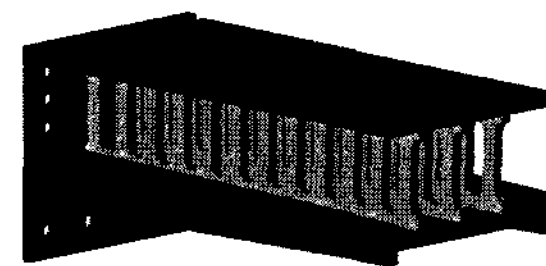


그림 4 Split type 댐퍼부

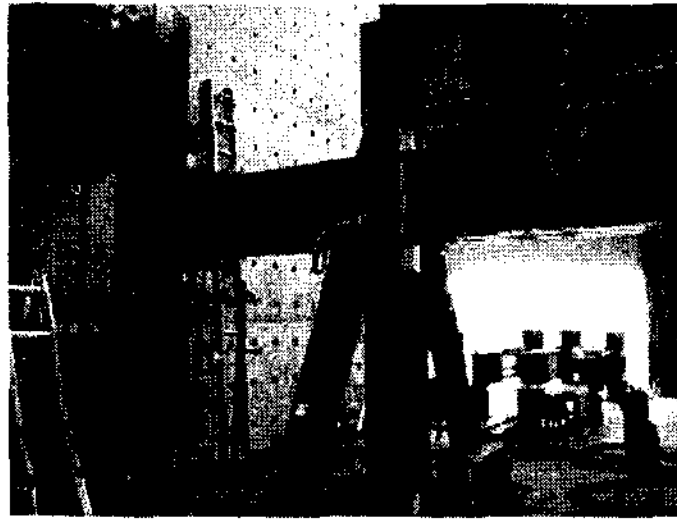


그림 5 실험체 설치도

3. 실험결과

3.1 하중-변형 관계

그림 6에 Box Type 실험체의 하중-변형 관계를 각각 나타냈다. 각 실험체의 실험결과를 표 2에 나타냈다. Box type 댐퍼접합부의 경우 모든 실험체가 슬릿플레이트에 발생한 균열의 진전에 의해서, 내력의 저하가 나타났다. 동일한 두께의 슬릿플레이트에 대해서, 형상비를 증가시키면 내력 및 강성이 증가하였다.

Split-T Type 댐퍼 접합부의 경우 스테럿의 형상비가 0.5인 S-2실험체는 Split-T의 두께가 16mm로 얇아서 Split-T의 파단으로 실험이 조기 종료되었다. 하지만 스테럿의 형상비가 0.3인 S-1실험체는 Split-T의 두께를 32mm로 하여 Split-T에서의 파단은 발생하지 않았으며 안정된 이력특성을 나타내었다.

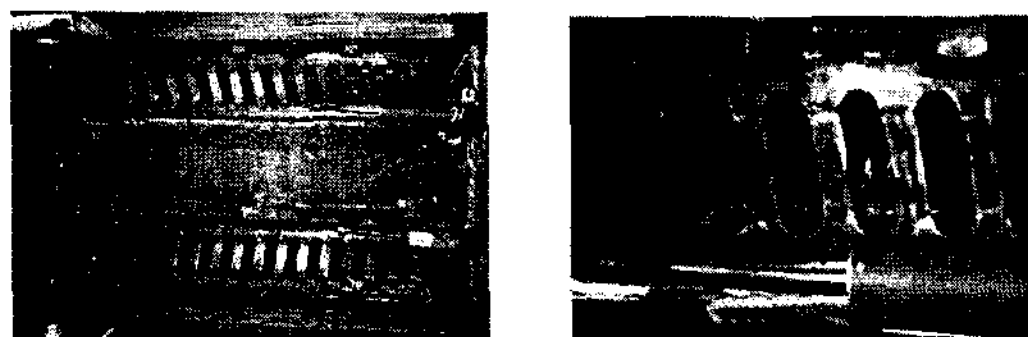
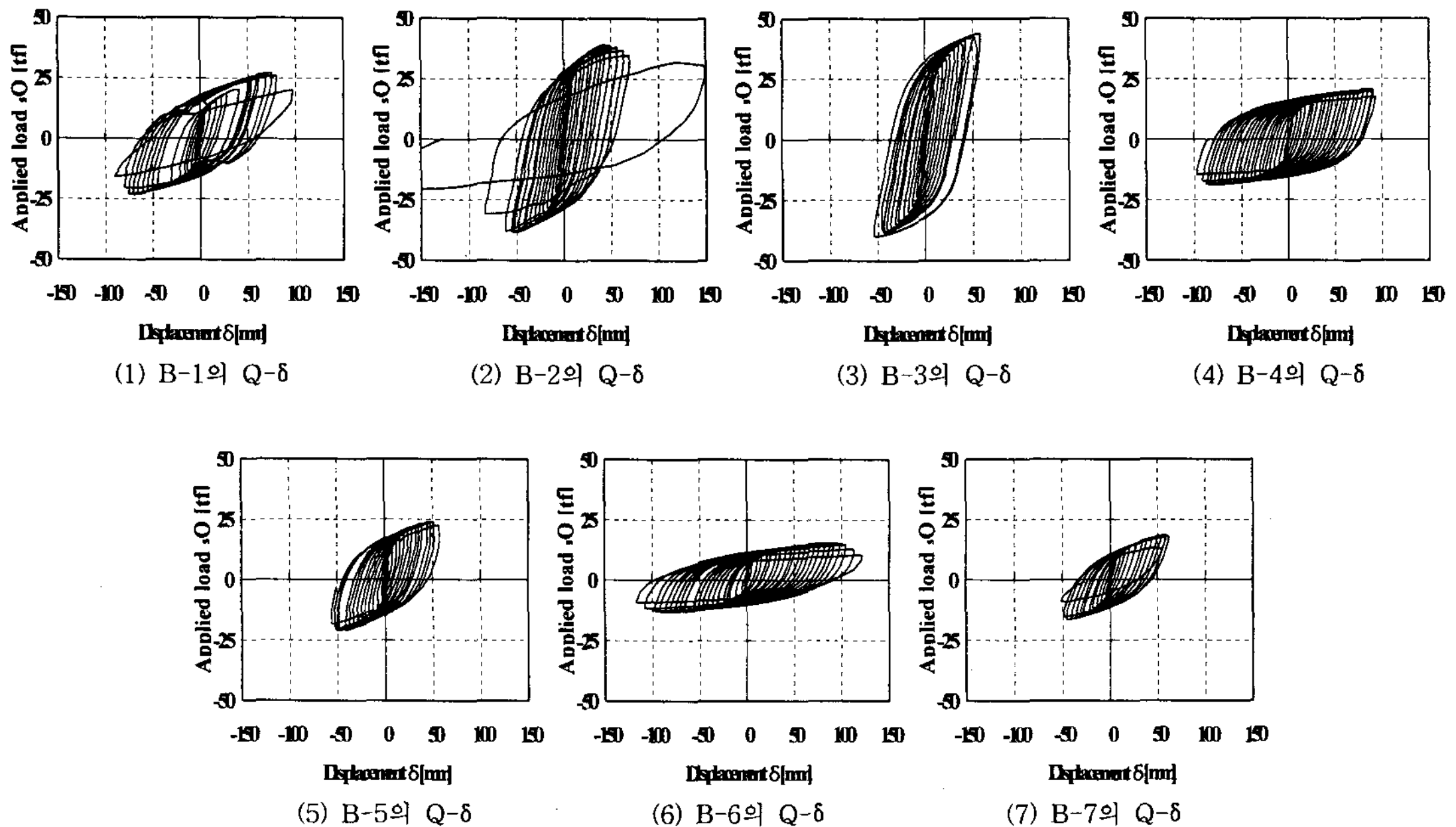


그림 6 Box type 실험체의 하중-변형관계 및 파단사진(B-4)

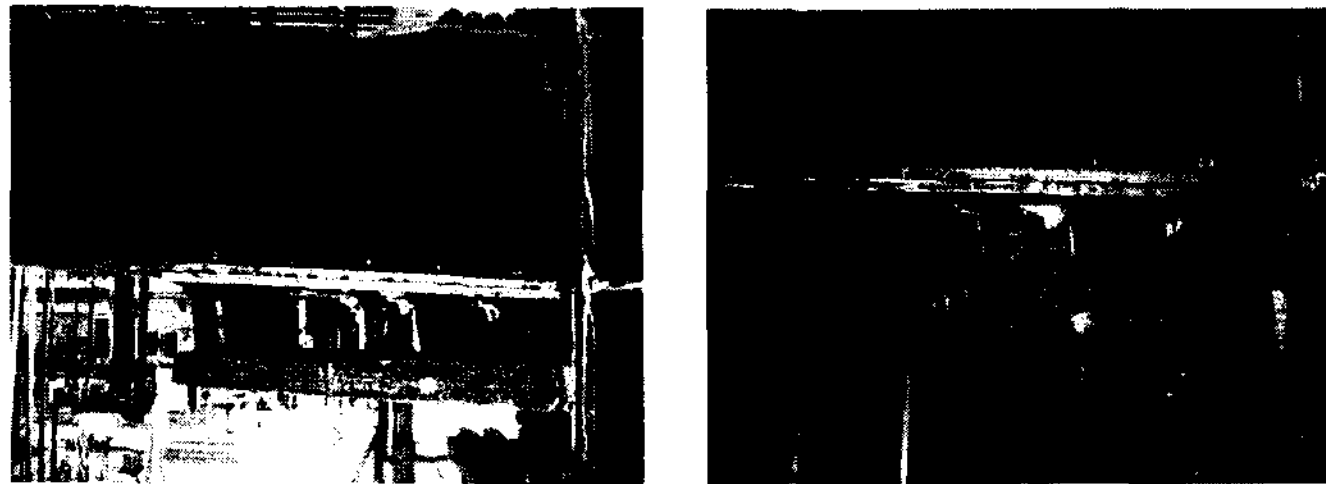
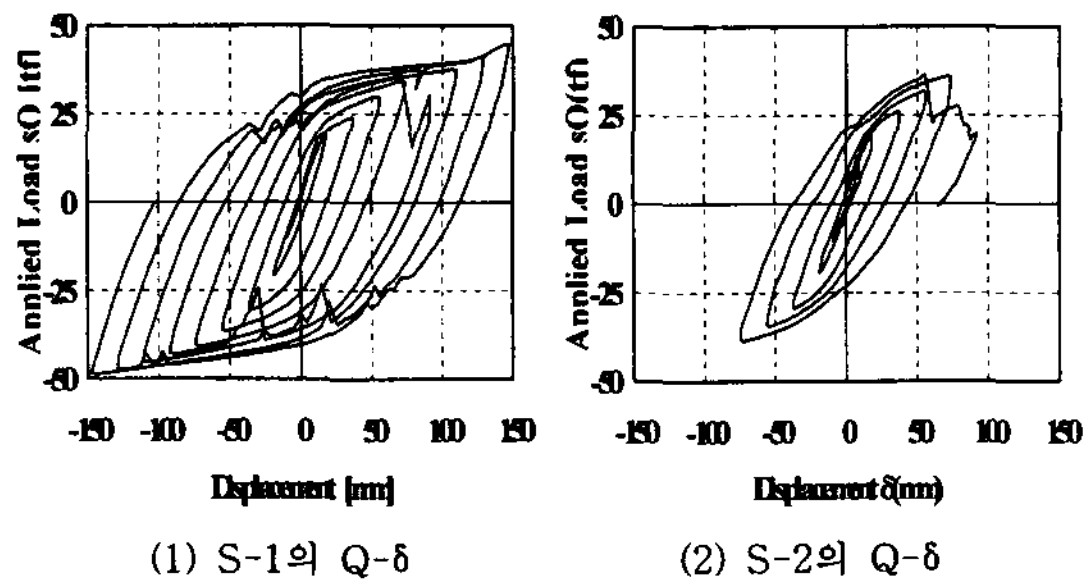


그림 7 Split-T type 실험체의 하중-변형 관계 및 파단사진(S-1)

표 2 실험결과

NO	Specimen	Q_y [tf]	δ_y [cm]	Q_{max} [tf]	δ_{max} [cm]	K_1 [tf/cm]
1	B-1	14.90	2.70	27.10	113.8	5.5
		-12.2	-2.20	-23.05	-77.0	
2	B-2	27.10	4.50	39.01	122.15	6.0
		-24.10	-4.00	-28.25	-117.8	
3	B-3	27.20	3.80	43.82	148.1	7.2
		-26.50	-3.70	-39.73	-107.45	
4	B-4	10.20	1.90	20.47	119.9	5.4
		-9.70	-1.80	-18.85	-91.55	
5	B-5	15.50	2.70	23.93	81.5	5.7
		-13.20	-2.30	-21.04	-57.75	
6	B-6	7.80	1.50	15.38	120.45	5.2
		-4.70	-0.90	-13.02	-83.85	
7	B-7	11.00	2.10	18.58	75.25	5.3
		-8.90	-1.70	-16.44	-60.35	
8	S-1	22.46	1.65	44.43	228.46	13.6
		-22.15	-1.57	-43.65	-225.91	
9	S-2	22.98	2.29	35.71	98.25	10.0
		-24.26	-2.29	-38.40	-111.35	

3.2 파괴상황

Box type 접합부의 경우 모든 실험체가 댐퍼의 균열 이후에 하중이 서서히 저하하였고, 안정된 이력거동을 나타냈다. B-1의 경우, 15사이클 때에 후면 상부댐퍼에서 균열이 시작되었고, 17사이클에서 스트럿의 균열진전에 따른 하중저하 현상이 뚜렷이 관찰되었다. 이후 18사이클 때는 하중저하 진폭이 다소 커진 경향을 나타냈는데, 이는 종국적으로 댐퍼의 균열이 한 개소로 집중된 영향으로 밝혀졌다. 이러한 결과를 나타낸 시험체는 B-2, B-5, 및 B-7이 있다. 하지만, 최종파단 이전에

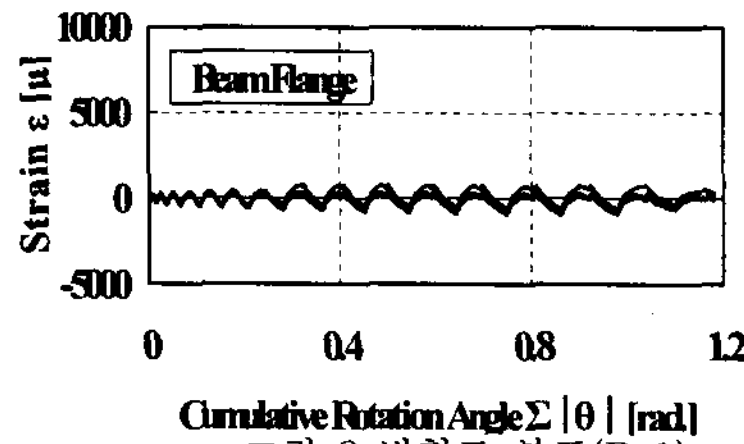
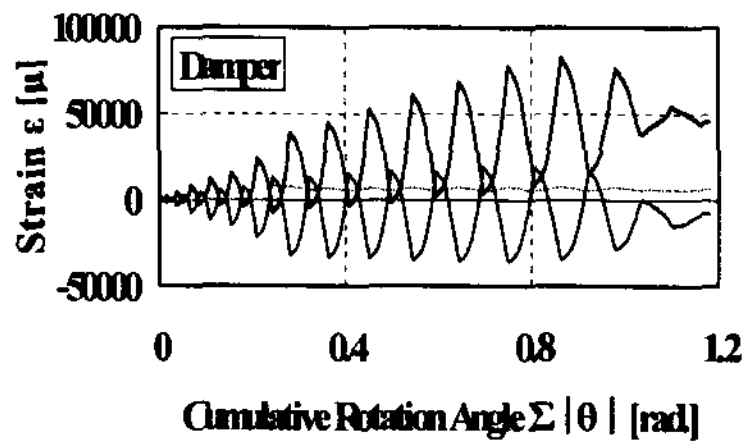


그림 8 변형도 분포(B-1)

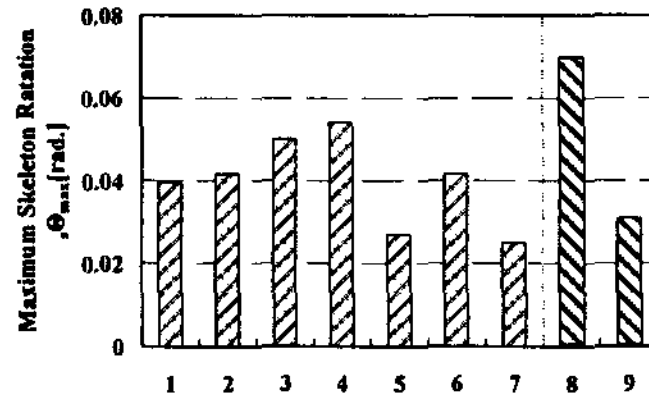


그림 9 최대골격곡선 회전각

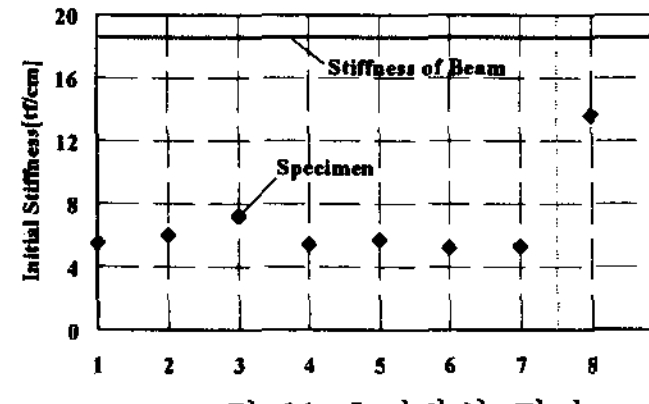


그림 11 초기강성 평가

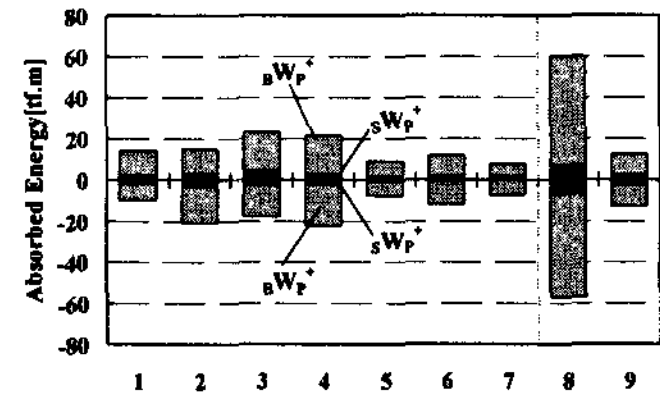


그림 10 에너지 흡수량

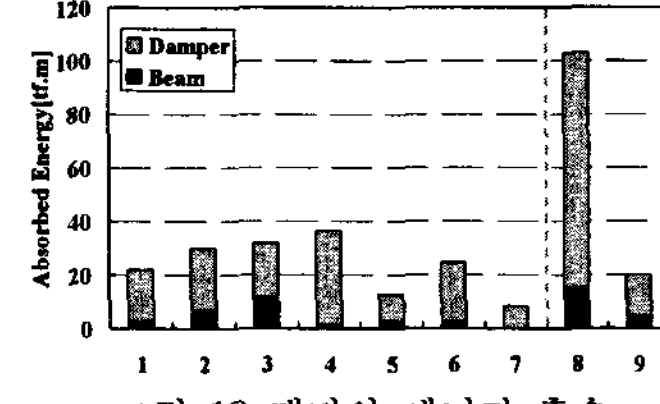


그림 12 댐퍼의 에너지 흡수

이미 댐퍼에서 많은 에너지를 안정적으로 흡수한 것을 확인하였다. B-4와 B-6 실험체의 경우, 그림 3과 같이 4개의 댐퍼가 골고루 변형을 부담하여 매우 안정적인 복원력특성을 발휘하였다. 따라서, 댐퍼가 전단력에 의한 스트럿의 변형이 일어나고 변형의 심화로 인해 스트럿 단부의 균열이 개시되어 진전되는 과정을 통해 매우 큰 에너지 흡수능력을 발휘하였다.

Split-T type 접합부의 경우 상단 Split-T의 두께가 얇은 B-2 실험체의 경우 Split-T에서 연성 균열이 발생하여 5사이클에서 조기 파단되었다. 하지만 상단 Split-T의 두께를 여유있게 설계한 No 8 실험체의 경우 하단 댐퍼로의 에너지 흡수 및 변형이 유도되었으며, 안정된 이력곡선을 나타내었다. 모든 실험체는 강접한 된 보의 취성과파단과 같은 현상은 발견할 수 없고, 내력이 서서히 저감하는 방추형의 안정된 이력거동을 나타내었다. 또한, 댐퍼부의 웨브가 용접된 웨브 접합판은 댐퍼의 변형에 대해 적절히 면외변형하였다.

3.3 변형도 분포

그림 8에 B-1의 변형도 분포를 나타내었다. 그림 8의 상부그림에서 종축은 댐퍼부분의 변형도를 나타내고, 하부의 그림은 댐퍼부와 보 이음부 근처의 하부 보플랜지의 변형도의 변화를 나타냈다. 또한 그림의 횡축을 반복가력에 따른 누적 회전각을 나타내고 있다. 댐퍼는 에너지 흡수요소로서 큰 변형도를 나타낸 반면에 보 플랜지 부분은 여전히 탄성상태에 머물고 있다.

결과적으로, 댐퍼를 가진 기둥-보 접합부는 소성변형능력의 우수한 댐퍼부에서 대부분의 소성변형 에너지를 부담하고, 주구조체인 보는 탄성에 머물게 하는 시스템을 구축할 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.4 변형능력 및 에너지 흡수능력

그림 9는 최대 골격부 회전각을 나타낸 것이다⁵⁾⁶⁾. 댐퍼의 두께가 같은 경우는 형상비가 증가할수록, 형상비가 같은 경우는 댐퍼 두께가 얇을수록 변형능력이 증가하는 경향을 다소 나타냈지만 변수에 대해 지배적으로 큰 차이는 발견하지 못했다. 댐퍼가 한 개소에 조기집중한 B-5, B-7과 상단 Split-T에서 균열이 먼저 발생한 S-2를 제외하면, 최대골격부 회전각은 0.04rad. 이거나 상회하는 결과를 나타냈다. 즉, 댐퍼의 형상이나 두께는 변형능력에 큰영향을 주지 않고, 변수에 상관없이 대체

적으로 안정된 값을 나타내고 있다.

그림10은 각 실험체의 골격부와 바우싱거부에서 흡수한 에너지를 나타내었다. 에너지 흡수능력도 변형능력과 마찬가지로, 같은 두께의 댐퍼의 경우에 형상비가 증가할수록, 형상비가 같은 경우 댐퍼두께가 작을수록 흡수에너지가 다소 크게 나타났다. 특히, S-1실험체는 Box type 실험체보다 점증 진폭이 큼에도 불구하고 스러텟의 길이가 긴 영향으로 변형능력 및 에너지도 가장 많이 흡수하였다.

4 고찰

4.1 초기강성 평가

하중-변형관계로부터 구한 실험체의 초기강성(접선강성)을, 동일한 조건의 강접된 보의 강성과 비교하기 위해 그림11에 나타냈다. 본 연구에서 사용된 실험체에서는 그 비율이 Box type에서는 32%~38%, Split-T type에서는 55%~77로 나타나 split-T type이 우수하게 나타났으며, split-t type의 플랜지를 두겹게 설계한 경우는 강접에 가까운 강성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 본 실험에서는 댐퍼부와 보의 이음부 즉, 엔드플레이트 형식 이음부의 변형도 이러한 결과에 어느정도 영향을 끼쳤다고 할 수 있다. 따라서, 각 부분이 부담하는 변형능력을 정량적으로 평가 할 필요가 있다.

4.2 댐퍼의 에너지 흡수능력 평가

그림12는 댐퍼와 보에서 각각 흡수한 에너지를 비교하여 나타냈다. 그림에서 댐퍼의 에너지는 댐퍼의 상대변위를 사용하여, 회전각으로 치환한 후 이를 보부의 환산한 후에 구한 값이다. 에너지를 평가의 단순화를 위해 전체에너지를 댐퍼와 보의 탄성변형에 의해서만 흡수한다고 가정하였다. 따라서, 보의 에너지는 전체에너지에서 댐퍼의 에너지를 제한 것이다. 이는 실험체의 전체흡수에너지에 대한 댐퍼가 흡수한 에너지를 평가하기 위한 목적에 따라서는, 이러한 가정이 가능하다. 그림12를 통해서, 댐퍼가 에너지 흡수를 대부분 부담하여 접합부 대부분의 변형을 댐퍼가 부담한다는 것을 알 수 있다. 하지만, B-2, B-3 및 S-1의 경우에는 보가 소성변형에 의해 에너지를 다소 흡수한 것처럼 보이지만, 이는 보의 소성변형에 의한 것이 아니라 보이음부의 변형에 의한 값이다.

5. 결론

보항복형으로 전체항복형의 메카니즘을 형성해서 효율이 좋은 에너지 분산형 구조를 실험함과 동시에, 지진재해등에 의한 골조의 소성변형 이후 보강의 용이를 위해서, 댐퍼 분리형 기둥-보 반강접합부의 실험을 행한 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 1) 접합부의 이력거동은 방추형의 형상을 나타냈고, 댐퍼의 파단에 의해서 최대내력이 결정될 때까지 안정된 에너지 흡수능력을 발휘했다.
- 2) 실험체의 초기강성은 Box type에서는 32%~38%, Split-T type에서는 55%~77로 나타나 split-T type이 우수하게 나타났으며, split-t type의 플랜지를 두겹게 설계한 경우는 강접에 가까운 강성을 확보할 수 있음을 알 수 있다
- 3) 변형도분포의 결과를 통해서, 댐퍼부분에서 대부분의 변형을 부담하고 있음을 검증하였다. 또한,

실험체의 흡수에너지를 크게 댐퍼의 흡수에너지와 보의 흡수에너지로 나누어 살펴본 결과, 대부분의 에너지를 댐퍼에서 흡수하고 있음을 알 수 있다. 이로부터, 지진이 발생하더라도 기둥, 보등의 주구조체는 탄성에 머물게 하여 보수, 보강이 간단하고, 향후 해체 후에 부재의 Reuse가 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

“건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술 연구개발 사업(03 산학연 C04-01)에 의한 것임”

참고문헌

1. 秋山 宏：建築物の耐震極限設計 第2版, 東京大學出版會, 1987年
2. 秋山 宏, 吳相勳, 大竹章夫, 福田浩司, 山田 哲：無補強角形鋼管柱・H形鋼梁 接合部のモーメント-回轉角關係の一般化, 日本建築學會構造係論文集 第 484號, pp.131-140, 1996 年 6月
3. 吳相勳, 山田 哲, 秋山 宏, 大竹章夫, 福田浩司, “スリットプレートダンパーを有する半剛接合部の實驗”, 日本建築學會構造係論文集 第 553號, pp.113-120, 2002 年 3月
4. Amadeo Benavent Climent, Sang-Hoon OH, Hiroshi Akiyama : Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations, 日本建築學會構造係論文集 第 503號, 1998 年 1月
5. 吳相勳, “柔剛混合形式接合部から成るエネルギー分散型多層骨組の耐震設計”, 東京大學校 博士學位論文, 1998年
6. Kato B. and Akiyama H. , “Predictable Properties of Material under Incremental Cyclic Loading, IABS, Preliminary Publication Lisbon, pp.119-124, 1973