

바닥슬래브에 의해 구속된 철골 모멘트접합부의 내진보강에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Seismic Retrofit of Steel Moment Connections Considering Constraint Effect of the Floor Slab

오 상 훈¹⁾ · 김 영 주²⁾ · 문 태 섭³⁾
Oh, Sang Hoon · Kim, Young Ju · Moon, Tae-Sup

요 약 : 본 실험프로그램은 슬래브가 있는 합성보의 내진성능향상을 위해 기존 모멘트접합부의 내진보강 방법을 개발을 목적으로 수행하였다. 반복하중을 통해 5개의 실험형 합성실험체에 대한 실험을 수행하였다. 각형강관기둥과 H형강보로 이루어진 기존의 다이아프램접합부가 RBS 또는 개량수평스티프너를 통해서 하부플랜지에만 내진 보강되었다. 제안한 보강접합부의 효율성을 조사하였다. 실험결과 하부플랜지에만 RBS를 적용한 접합부는 부족한 변형성능을 나타냈지만, 개량스티프너를 적용한 합성보 접합부는 내진성능을 향상시켰다.

Abstract : An experimental program was undertaken to develop seismic retrofit methods of existing steel moment connections with floor slab for improved seismic performance. Five full-scale composite specimens were tested under cyclic loading. Conventional through-diaphragm connections (please check this: no search results were found for through-diaphragm connections) composed of square-tube column and H-beam were retrofitted by adding either a bottom-flange dogbone (RBS) or an improved welded horizontal stiffener at the beam bottom flange. The effectiveness of the proposed retrofit connections schemes was evaluated. The specimen retrofitted using the RBS concept at the bottom flange showed poor connection ductility. In contrast, specimens with the proposed horizontal stiffener details exhibited improved connection ductility.

핵심용어 : 합성보, 변형능력, 보강, 개량수평스티프너, RBS

KEYWORDS : Composite beam, Deformation capacity, Retrofit, Improved horizontal stiffener, Reduced Beam Section

1. 서론

효고현 남부지진에서 철골구조 건물의 기둥-보 접합부에서 많은 하부플랜지 파단이 발생하였다. 기존의 연구에서는, 슬래브가 있는 철골 접합부는 내력상승이 기대되고, 변형능력은 순철골보와 같다는 가정하에서 대부분의 접합부 연구들이 순철골보를 바탕으로 이루어졌고, 합성보 효과를 고려하지 않았다. 하지만, 슬래브효과를 고려하면 정힘을 받을때(콘크리트 슬래브가 압축을 받을 때) 중립축이 상승하여 하부플랜지에 변형도를 집중시켜서 하부플랜지의 조기 파단을 유발하였다(日本建築學會, 1995). 특히, 각형강관 기둥을 사용한 경우, 기둥플랜지의 면외변형에 의한 웨브의 모멘트 전달효율이 저

하되고 보 플랜지는 보다 큰 인장력을 받게 된다(岡田 健, 2002). 또한, 접합부에서 스캘럽에 의한 단면 결손의 영향으로 더욱 큰 응력집중이 발생하게 된다. 이로 인해 취성파단이 발생할 가능성이 더욱 크게 되었다.

최근에 이러한 요인들을 검증하는 실험이 실시되었다. 오상훈(2001), OKADA등(2001)은 고베지진에서 발생한 하부플랜지의 취성파단을 재현하고 합성보의 변형능력을 파악하기 위해 실험 및 해석을 수행하였다. 이 연구에서 합성보의 변형능력이 순철골보에 비해 상대적으로 저하하는 것을 확인하였다. 최근까지 대다수의 연구가 새롭게 건설되는 건물에 적용되는 내진보강 상제가 다수를 차지하고 있으며, 노스리지 지진이나 고베지진 이전에 지어진 건물 등에 대한 내진보강 상제에 관

1) 포항산업과학연구원, 책임연구원, 공학박사.
(Tel. 051-510-2350, Fax. 051-513-9596, E-mail : oshoon@rist.re.kr)

2) 한양대 대학원 박사과정(kyj282@empal.com)

3) 한양대 건축공학부 교수, 공학박사(blue_moon@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

한 연구는 미미하다.

본 연구에서는 고베지진 이전에 건축된 철골건물들을 대상으로 하여, 기존의 접합부를 내진 보강(retrofit)하는 방법을 제안하였다. 이러한 연구의 일환으로 저자들은 이전부터 이미 일련의 연구를 진행해 왔다(김영주, 2002, OH, 2001). 그 결과, 슬래브 합성효과에 의해 플랜지가 조기에 파단한 사실을 재현하였고, 이러한 파단을 방지하기 위한 내진보강방법에 따른 합성보의 변형능력을 평가하였다. 또한, 보강방법 중 수평스티프너 상세를 가진 합성보가 가장 우수한 변형능력을 나타내는 것도 확인하였다.

따라서, 본 연구에서는 수평요소의 형상 및 크기와 RBS상세를 변수로 해서 실험형 합성보접합부 실험을 실시하였고, 합성보의 조기파단지양·변형능력 향상에 유효한지를 검증하였다.

2. 내진보강의 개념

효고현 남부지진과 노스리지 지진 이후 일본과 미국에서는 기존의 접합부에 대한 실험적·해석적 연구를 통하여 접합부 상세에 대한 많은 문제점들을 발견하고, 새로운 접합부에 대한 연구를 활발하게 수행하였다.

FEMA-350 (2000)에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해서, WCPF(welded cover plated flange), WBH(welded bottom haunch), WTBH(welded top and bottom Haunch)와 RBS(reduced beam section)등의 기둥보접합부 상세들을 제안하였다. 특히, RBS 접합부는 역학적·시공적으로 명확하고 간결하며 또한, 경제적으로 유리한 것이 장점이다. 吹田(1999)과 Sheng-Jin Chen(2001)등도 RBS 접합부에 관한 실험을 통하여 내진성능에 유리한 상세라는 사실을 확인하였다. 하지만, 이는 서론에서 기술한 바와 같이 순철골보에 한정된 연구가 대부분이므로, 바닥슬래브의 합성효과를 고려할 경우의 접합부 거동을 확실히 밝히지는 못하였다.

그림 1은 수평하중이 작용할 경우, 보에 작용하는 모멘트도를 통하여, RBS 접합부의 개념을 도시화한 것이다. 횡축은 보 중앙부까지의 거리를 나타내고, 종축은 보단부(기둥플랜지 면)에서의 모멘트이다. 그림에서 sM_p 와 cM_p 는 각각 순철골보와 합성보 단면의 전소성모멘트를 나타낸 것이다. RBS의 장점은 그림과 같이 보에 작용하는 모멘트보다 단면이 갖고 있는 능력을 약화시킴으로 인해 기둥에서 일부 떨어진 거리에 소성힌지를 발생시켜서 접합부의 취성파단을 방지하는 것이다. 그러나, 슬래브와 보가 일체화된 합성보일 경우는 다른 거동이 예상된다. 그림 1과 같이 슬래브가 있는 합성보일 경

우, 정모멘트 작용시 콘크리트의 압축력에 의해 모멘트가 증가한다. 또한, 순철골보의 중립축(sX)이 슬래브 합성효과에 의해 합성보의 중립축(cX) 방향으로 상승한다. 따라서, 동일 부재각에 있어서 순철골보의 하부플랜지의 변형도($s\epsilon$)에 비해 합성보의 응력($c\epsilon$)은 매우 크게 증가하게 된다. 결과적으로, 합성보효과를 고려할 경우에는, 내력상승과 동시에 중립축의 상승을 통한 하부플랜지의 응력집중이 우선적으로 고려되어야 됨을 알 수 있다. Steel design guide series 12(1999)에서는 접합부에 RBS를 적용하는 경우에 있어서도, 스캘럽의 형상개선이나 기타 추가적인 보강이 요구된다고 보고했다. 따라서, 합성보 효과를 고려할 경우에, 내력상승과 중립축상승에 적절히 대응할 수 있는 내진 상세가 필요하다. 김영주(2002) 등의 연구에서는 합성보의 적절한 내진보강방법으로 수평스티프너형식을 제안한 바 있다. 이것의 장점은 내력상승과 중립축상승의 효과를 동시에 고려한 상세이다. 하지만, 중국상태에서는 수평스티프너 끝단부에 단면크기의 급격한 변화에 의해 응력이 집중되어 취성파단이 발생할 수 있는 문제가 지적될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 개량 수평스티프너상세를 제안하였고, 개념도는 그림 2에 나타냈다. 개량수평스티프너는 스티프너 자체에 RBS형상의 절취부를 두어, 스캘럽 저면의 응력집중 방지와 더불어 기둥에서 일부 떨어진 거리에서 소성화가 되도록 할 수 있을 뿐만 아니라, 스티프너 끝단부에서 발생할 수 있는 응력집중을 최대한 절취부에서 분산시키고자 하였다. 기존건물의 보강에 있어서는 시공성, 경제성 및 역학적으로도 유효하도록 고려하는 것이 중요하므로, 이러한 점들을 반영하고자 하였다.

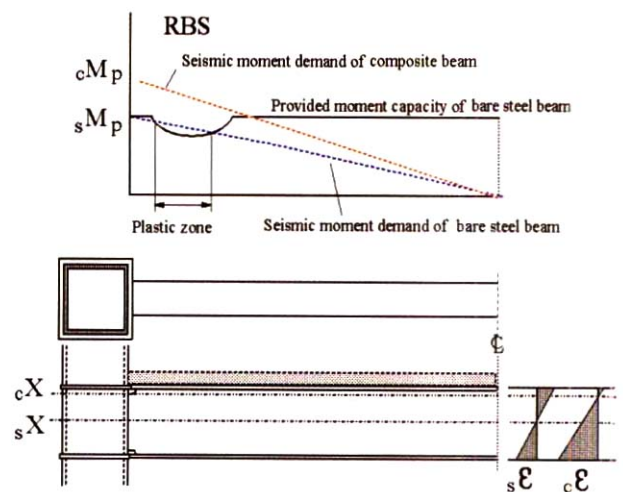


그림 1. 합성보 효과에 의한 내력 및 중립축 상승

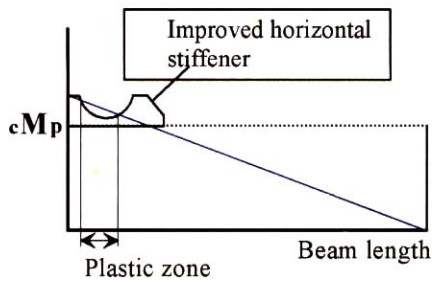


그림 2. 개량 수평스티프너보강 개념도

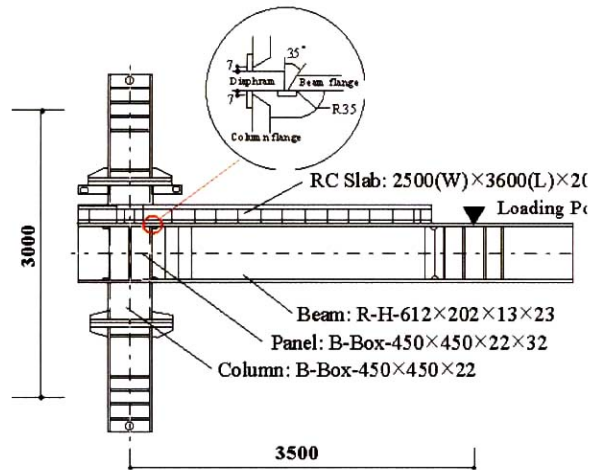


그림 3. 표준실험체 상세

3. 실험 프로그램

3.1 실험체

각 실험체는 그림 3에 나타낸 바와 같이 중충규모 철골건물의 외측부분의 일부를 절취한 접합부로 형상이 T형이다. 접합부에는 H형강보 (H-612×202×13×23)와 용접조립의 각형강관기둥 (Box-450×450×22)이 사용되었다. 기둥의 중심으로부터 가력점까지의 거리는 3500mm, 기둥의 상하지점간 거리는 3000mm이며, 접합부는 각형강관 기둥과 철골보를 기둥관통형 다이아프램(공장용접)을 사용하여 용접 접합하였다. 플랜지는 스캐럽을 사용한 완전용입용접, 웨브는 모살용접이고, 스캐럽의 형상은 R=35mm인 개량하지 않은 종래형의 상세이다(그림 3).

본 실험은 합성보 접합부의 변형능력에 주목하였기 때문에 기둥의 축력은 무시하였고, 특히, 패널존은 기둥과 달리 B-Box-450×450×32×22로 제작하여 접합부가 종국상태에 이르렀을때에도 탄성에 머물도록 계획하였다.

슬래브의 콘크리트는 설계강도 $F_c=240\text{kgf/cm}^2$ 의 보통 콘크리트이다. 슬래브는 철근콘크리트 슬래브이고, 데크플레이트는 사용하지 않았다. 슬래브두께는 200mm이고, 슬래브의 폭은 2500mm이다. 배근은 지름 13mm, 격자간격 200mm의 용접철망으로 2중배근하였고, 스테드커넥터의 직경은 22mm, 길이는 150mm인 것을 사용하였다. 스테드는 2열고 200mm 간격으로 배치하였고, 이 배치는 일본의 강구조한계상태 설계기준 및 해설(1998)을 참조하여 완전합성효과를 나타내도록 설계되었다.

실험체 일람은 표 1과 그림 4에 나타나 있고, 각 실험체의 특징은 아래와 같다.

SSP-01 실험체는 기존의 각형강관 기둥과 철골보를 기둥관통형 다이아프램(공장용접)을 사용하여 용접 접합한 종래형의 디테일을 가진 실험체로써, 보강된 4개의 실험체와 비교대상인 표준실험체이다.

나머지 실험체는 내진보강공법을 적용하였으며, 합성보의 변형능력은 하부플랜지에서 크게 좌우되는 것으로 판단하여 그림 4에서 보는 바와 같이 내진보강은 하부플랜지에만 적용하였다. ISP-02 실험체는 RBS 공법을 적용한 실험체이다. 보의 원단면은 H-612×202×13×23이고, 기둥면으로부터 150mm의 위치에서 460mm의 플랜지를 원호상으로 잘랐다. 최대로 자른부분의 단면은 H-612×102×13×23이다. 자른 부분의 형상은 문헌8을 참고로 하였다. ISP-03 실험체는 김영주(2002) 등의 연구에서 합성보의 변형능력에 우수한 결과를 보인 수평스티프너를 하부플랜지에 보강한 상세로서, 기존의 수평스티프너와 달리 원호상으로 절취한 개량수평스티프너 상세이다. 이 실험체의 목적은 접합부의 취성파단을 방지하면서 내력을 향상시킴과 동시에, 절취부에서 소성힌지가 생기게 하는 기존 RBS공법의 개념을 접목시킨 형태이다. ISP-04 실험체는 기존의 수평스티프너 상세와 RBS상세의 장점을 결합하여, 기둥면에서 어느정도의 거리에 소성힌지를 생성하게 하는 상세이다. ISP-05 실험체는 ISP-03 실험체와 유사한 형태이며, 소성힌지 생성가능 위치를 기둥단부쪽으로 조금 이동한 것이다. 그 이유는 수평하중에 의해 생긴 모멘트가 기둥면으로 갈수록 증가하기 때문에 ISP-03 실험체에 비해서 응력분산이 유리하다고 판단하였기 때문이다.

기존의 건물에 보강하는 특징으로 본 실험체의 보강은 모두 하부플랜지에만 국한하였다. 이는 시공·경제상으로 상부플랜지를 보강할 경우에 슬래브를 제거해야 하는 노력과 비용이 요구되어지므로 하부플랜지에만 보강하는 것이 모든 면에서 유리하다고 판단된다.

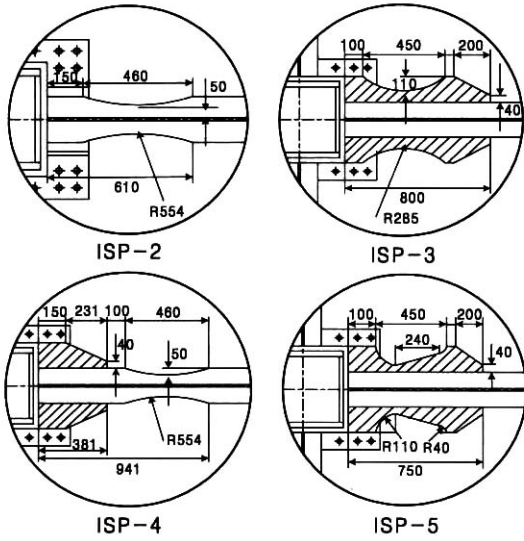


그림 4. 접합부 보강 상세

표 1. 실험체 일람

실험체	상세	구분	보강 위치
SSP-01	종래형 상세	표준접합부	-
ISP-02	RBS 공법	개량접합부	하부플랜지
ISP-03	개량수평스티프너 I	개량접합부	하부플랜지
ISP-04	수평스티프너 + RBS 공법	개량접합부	하부플랜지
ISP-05	개량수평스티프너 II	개량접합부	하부플랜지

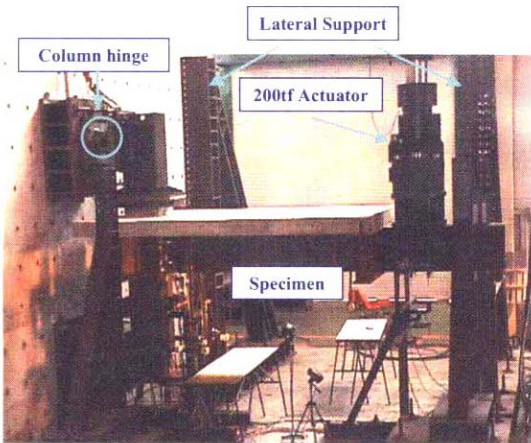


그림 5. 가력장치

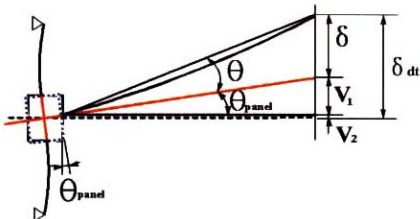


그림 6. 목표 회전각

3.2 가력방법 및 측정방법

실험은 최대하중용량 200t, 스트로크 용량 ±300mm의 성능을 가진 정적 액추에이터를 사용하여 가력을 하였으며, 가력장치사진을 그림 5에 나타냈다. 실험체와 반력벽과의 접합은 기동상단에 대해 핀접합부이고, 기동직교보의 끝부분과 시험체 자유단에 면외변형을 구속하는 횡방지 구조를 설치하였다. 가력은 그림 6에 정의된 부재각 θ 에 따라 제어되었다. 그림과 같이 목표된 부재각 θ 는 가력점의 연직변위 δ_{dtt} 에서 패널준 변형각 θ_{panel} 에 의한 변위 $V1$ 과 연직변위 $V2$ 를 제외한 변위 δ 를 기동면에서 가력점까지의 거리(3,275mm)로 나눈 순수 보만의 회전각이다. 가력패턴은 탄성역에서 가력후 변형진폭증분 2 s0p의 점증변위로 반복제하 하였다. 여기서, s0p는 순철 골보의 전소성모멘트에 상응하는 회전각을 나타낸다. 또한, 변위 및 변형도를 측정하기 위해 변위계 및 변형도 게이지를 설치하였다. 실험에 사용된 모든 강재는 SM490이며, 소재인장 시험 결과는 표 2에 나타내었으며, 콘크리트의 압축강도 시험 결과, 28일 압축강도는 260 kgf/cm²으로 나타났다.

표 2. 강재 인장시험 결과 (평균값)

시 험 체	σ_v (tf/cm ²)	σ_u (tf/cm ²)	σ_v/σ_u	Elo. (%)
Beam web-13	4.78	6.11	0.78	21.38
Beam flange-23	4.41	5.94	0.74	24.02
Plate-22	4.12	5.78	0.71	24.71
Plate-32	4.09	5.88	0.69	24.00

4. 실험 결과

4.1 전체적인 거동 및 파괴상황

각 시험체에 대한 모멘트(M)-회전각(θ)관계를 그림 7에, 실험결과를 표 3에 나타냈다. 또한 파괴사진을 그림 8에 나타냈다. M- θ 관계에서 종축의 모멘트(M)는 기둥-보 접합부의 기둥플랜지면에서의 모멘트를 나타내고, 횡축의 θ 는 보의 변형에 따른 부재각을 나타낸다. 그림 7에는 鋼構造限界狀態設計指針·同解説 (1998)에 따라서 산정한 합성보단면의 정첩축의 전소성모멘트(cMp)와 콘크리트인장을 무시한 순수 철 골보만의 전소성모멘트(sMp)가 점선으로 표시되었다. 표3에서 전소성모멘트(cMp 또는 sMp)에 대한 실험체별 최대내력의 비는 0.99~1.46의 분포를 나타냈다. 수평요소의 보강에 의해 약 21% 내지 45% 정도의 내력상승이 관찰되었다. 또한, 초기강성에 있어서는 수평요소를 보강할 경우 상승이 있

지만, 그렇게 큰 차이는 보이지 않고 있다. 표에서 +는 정모멘트이고 -는 부모멘트를 나타낸다.

그림 7과 그림 8을 바탕으로 해서 각 실험체별 이력특성 및 파괴상황을 아래와 같이 나타냈다.

- (1) SSP-01 실험체는 +4 sθp에서 스켈럽저면의 하부플랜지 중심부에서부터 균열이 발생하였고, 이 균열이 플랜지 외곽으로 확장되어 종국적으로 하부플랜지가 파단하였다. 이때 웨브에서는 기둥플랜지의 면외변형(배틀링현상)이 관찰되었다. 이러한 현상은 보웨브의 모멘트전달효율을 저하시켜서, 플랜지에 모멘트가 집중되어 응력집중을 유발하였다.
- (2) ISP-02 실험체는 +4sθp에서 기둥플랜지의 면외변형과 더불어 보플랜지의 스켈럽저면에서 균열이 개시되었고, -4sθp에서 횡좌굴로 인해 내력이 다소 저하하였다. +6sθp에서 스켈럽저면의 하부플랜지의 중심부에서 바깥으로 균열이 진전되어 종국적으로 파단하였다.
- (3) ISP-03 실험체는 +6sθp까지 안정된 이력거동과 더불어 개량수평스티프너에 의해 내력상승이 두드러졌다. 하지만, -6sθp에서 상부플랜지가 스켈럽저면에 발생된 균열에 의해 파단되었다. 하지만, 기존의 표준합성정보에 비해서 다소 우수한 변형능력을 나타낸 것으로 사료된다.
- (4) ISP-04 실험체는 -4sθp에서 -189.7 tf.m에 도달했을 때 RBS부분에서 보 플랜지와 웨브의 국부좌굴이 발생했고, -6sθp에서는 전 사이클보다 낮은 내력 167.9tf.m에서 국부좌굴이 심화되었다. +8sθp에서는 부모멘트 가력시 슬래브의 인장균열폭의 증가로 인해, 정모멘트 가력시에는 슬래브의 균열폭이 단혀 압축력에 저항하기 전까지는 철골에 의해 저항하므로 내력상승이 저하되는 편칭현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 종국적으로는 수평스티프너끝단부에서 발생한 균열이 진전되어 하부플랜지가 파단되었다.
- (5) ISP-05 실험체는 +6sθp까지 내력의 증가와 더불어 하부플랜지의 취성파단없이 안정된 이력거동을 나타내었고, -6sθp의 248.7tf.m에서 수평스티프너의 절취부와 끝부분에서 하부플랜지와 웨브하부에서 국부좌굴로 인해 약간의 내력이 저하되었다. +8sθp에서 전사이클의 최대내력에 도달하기 이전에 수평스티프너끝단부에서 균열이 일부진전되었다. 그리고, -8sθp에서 하부플랜지와 웨브의 국부좌굴로 인해 내력이 점차 감소하였다. +10sθp으로 가력을 하던중 액츄에이터의 문제상으로 실험이 중단되었으나, 이미 실험목적상 영향이 없는 것으로 판단하여 실험을 종료하였다.

표 3. 실험결과

실험체명		M_u	M_u/cM_p	$s\theta_{max}$	θ_{max}	K_I
		(tf.m)	M_u/sM_p	(rad.)	(rad.)	
SSP01	+	258	1.02	0.019	0.020	35000
	-	186	1.08	0.018	0.013	28800
ISP02	+	251	0.99	0.027	0.027	34700
	-	186	1.07	0.040	0.028	26600
ISP03	+	369	1.46	0.038	0.042	40700
	-	251	1.45	0.039	0.028	26300
ISP04	+	306	1.21	0.039	0.048	36000
	-	196	1.13	0.017	0.040	22800
ISP05	+	368	1.45	0.037	0.050	34700
	-	250	1.45	0.038	0.057	29200

M_c : 항복모멘트, M_u : 최대모멘트
 $s\theta_{max}$: 골격부 최대회전각, θ_{max} : 최대회전각

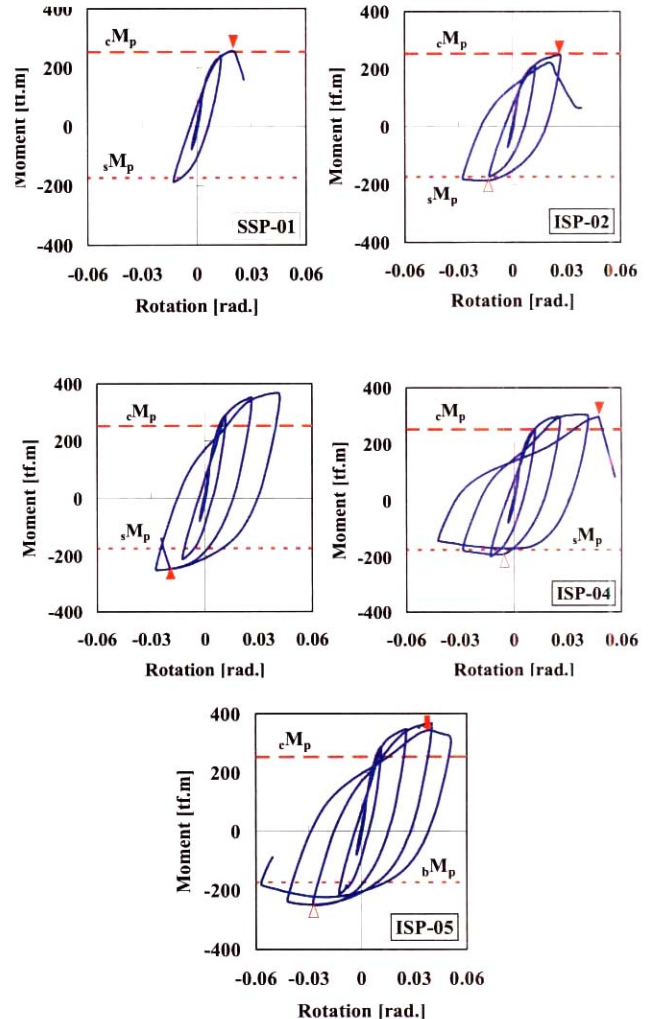


그림 7. 접합부의 모멘트-회전각 관계
 (▼ : 하부플랜지 파단, ▲ : 상부플랜지 파단, △ : 보의 국부좌굴,
 ↓ : 수평스티프너 끝단부 플랜지 균열)



(a) SSP-01(플랜지 파단)



(b) ISP-02(RBS 소성화)



(c) ISP-04(RBS 국부좌굴)



(d) ISP-05(국부좌굴)

그림 8. 접합부의 파단상황

4.2 에너지 흡수능력

강구조 부재의 하중-변형관계는 골격부, 바우싱거부 및 탄

성제하부로 분해할 수 있다. 이 중에서 골격부는 반복되는 하중-변형관계에서 부재가 경험하지 않은 하중영역의 하중-변형관계이며, 골격부를 하나로 합한 것을 골격곡선이라한다. 이전의 연구로부터 강부재의 실험에 있어서 반복가력에 의한 하중-변형관계로부터 얻은 골격곡선이 일방향가력의 하중-변형관계와 대응하는 것으로 알려져 있다(加藤勉, 1968, 秋山宏, 1990). 또한, 이러한 사실은 파단, 국부좌굴 및 횡좌굴등 부재의 종국상황에 의존하지 않기 때문에 강부재의 변형능력을 평가함에 있어서 상당히 유효한 방법으로서 사용되었다.

각 실험체가 파단에 도달할때까지 보에서 흡수한 에너지를 정방향측(+)과 부방향측(-), 각각 골격부와 바우싱거부로 나누어서 그림 9에 나타내었다. 에너지 흡수량을 비교한 결과 개량한 접합부상세를 가진 실험체는 표준합성보 실험체에 비하여 매우 큰 에너지를 흡수하였다는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 각 실험체는 대체로 골격부보다 바우싱거부에서 흡수한 에너지가 매우 크게 나타났는데, 그 이유는 정방향가력시 합성보 슬래브의 슬릿형거동을 고려하면 편칭현상이 두드러지는데, 이 편칭현상에 의해 전 사이클의 최대하중을 초과하기 전에 많은 에너지를 흡수한 것이고, 또한 부방향가력시에는 보의 횡좌굴 및 국부좌굴로 인해 내력이 저하하였기 때문이다.

에너지는 내력과 변형량의 곱을 나타내는 면적을 의미하므로 표준합성보에 비해서 개량접합부들이 에너지 흡수능력이 우수한 것이 반드시 변형능력이 우수하다고는 말할 수 없다. 왜냐하면, 변형능력의 증가없이 접합부 보강을 통해 내력의 큰 상승만으로도 에너지량이 증가할 수 있기 때문이다. 따라서, 에너지 흡수능력의 평가는 변형능력의 평가와 동반되어야 한다고 생각되고, 다음절에서 변형능력을 평가하였다.

4.3 변형능력

그림 10은 각 시험체의 정방향의 골격곡선($s\theta+$)을 나타낸 그래프이고, 그림 11은 골격부 최대회전각($s\theta+max$)과 각 시험체의 정방향 최대회전각($\theta+max$)을 나타낸 것이다.

골격부 최대회전각($s\theta+max$)에 있어서, SSP-02 실험체는 표준실험체 SSP-01의 1.40배 정도이고, ISP-03, ISP-04 및 ISP-05 실험체의 변형능력은 SSP-01에 비해서 각각 1.97, 2.00 및 1.92 정도로 나타났다. 또한, 각 실험체별 정방향최대부재각($\theta+max$)에 대해서, ISP-02는 표준실험체 SSP-01의 1.37배 정도이고, 그 외 3개의 보강 실험체는 2.13-2.57배의 변형능력을 나타냈다. 따라서, 단순히 RBS만으로 보강한 ISP-02를 제외한, 개량수평스티프너 실험체와 RBS에 수평요소로 보강한 실험체의 변형능력은 종래형 합성보에 비해서 약 2배정도로 나타났다. 기존의 순철골보

에서 우수한 변형능력을 나타냈던 RBS공법을 적용한 ISP-02는 SSP-01에 비해서 약 40%정도의 변형능력이 상승한 결과를 가져왔으나, 매우 안정된 이력거동과 종국상황을 나타내었던 기존의 RBS접합부에 비해 큰 변형능력 없이 조기에 파단했다. 이러한 사실을 통해서, RBS공법을 적용하기 위해서는 접합부의 스캘럽을 개선하거나 또는 ISP-04와 같이 보강하는 방법 등이 요구되며, 합성보의 변형능력을 향상시키는 보강방법에 있어서, 기존의 RBS를 그대로 적용 하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

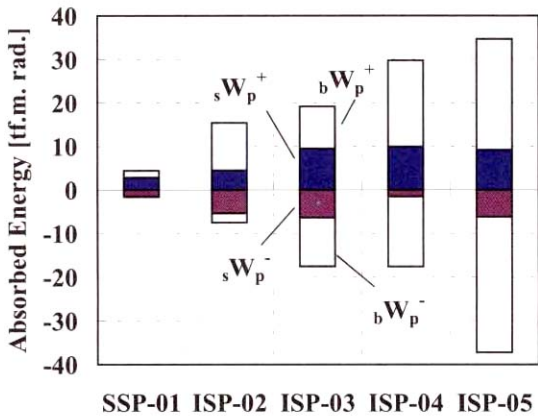


그림 9. 에너지 흡수량

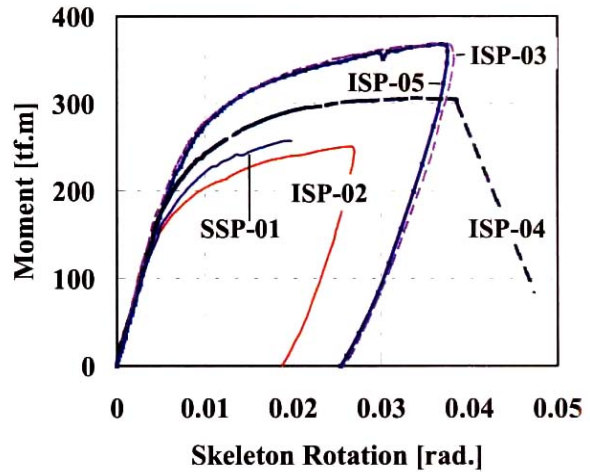


그림 10. 모멘트-골격곡선 관계

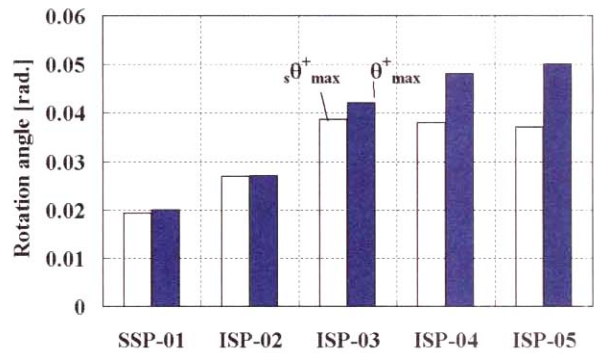


그림 11. 변형 능력

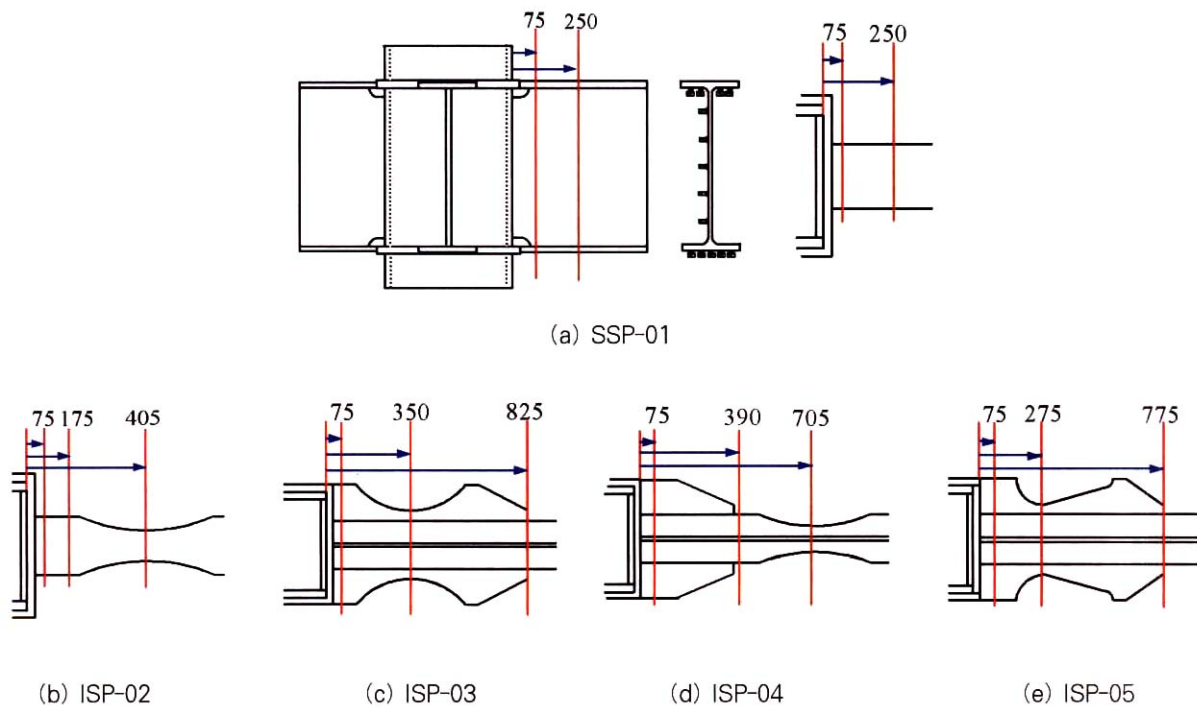


그림 12. 스트레인게이지의 위치

5. 고찰

5.1 변형도 분포

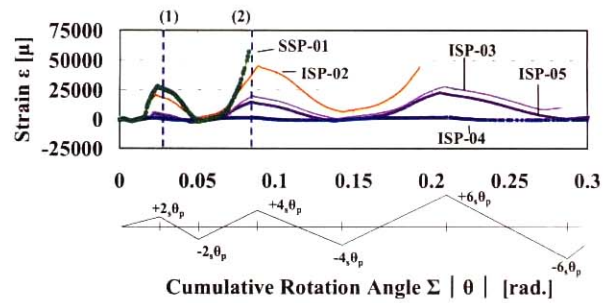
각 시험체별 보 길이방향의 변형도 분포를 얻기 위해서 그림 12와 같이 보플랜지와 웨브에 변형도게이지를 부착하였다. 특히, 기둥면으로부터 75mm 떨어진 위치에 있어서는 모든 실험체가 동일하게 보에 변형도게이지를 부착하였는데, 이 위치는 스캘럽이 있는 위치로 스캘럽이 끝나는 위치이기도 하다. 이 위치에서는 스캘럽의 불연속성 등으로 응력이 집중되는 곳이다. 문헌 8에서는 이러한 응력집중에 대비한 논스캘럽 공법을 적용하여 변형능력이 향상된 것을 알 수 있다.

그림 13(a)는 스캘럽의 위치[75mm]에서의 각 실험체별 변형도(ϵ)-누적회전각($\Sigma \theta$) 관계를 나타낸 것이다. 세로축은 변형도게이지로 측정된 값이고, 가로축은 반복하중에 의한 변형각을 양의 방향으로 누적한 값이다. 그림 13(b)는 그림 13(a)의 (1)과 (2)로 표시한 누적변형각에서의 변형도를 막대그래프로 단순히 비교한 것이다. ϵ - $\Sigma \theta$ 관계를 보면, SSP-01 실험체의 변형율이 가장 급격하게 상승하고 있음을 알 수 있다. SSP-01은 $+2s\theta_p$ 에서부터 변형도가 다른 실험체에 비해 컸으며, 더우기 $+4s\theta_p$ 에서는 급격한 변형도의 상승과 더불어 스캘럽저면이 파단하였다. 이 파단은 일본 고베 지진에서 보였던 합성보의 전형적인 하부플랜지 파단이다. ISP-02 실험체는 합성보의 하부플랜지에만 RBS공법의 적용한 것인데, 종래형합성보인 SSP-01보다는 변형도가 낮았지만 큰 개선효과는 나타나지 않았다. 하지만, ISP-03, ISP-04 및 ISP-05 실험체는 사이클이 진행하면서 급격한 변형도의 증가없이, 큰 변형능력을 나타내었다. 이것은 기둥-보접합부의 하부플랜지에 단면적을 증가시킨 수평스티프너보강은 합성보접합부의 보강에 유효하다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

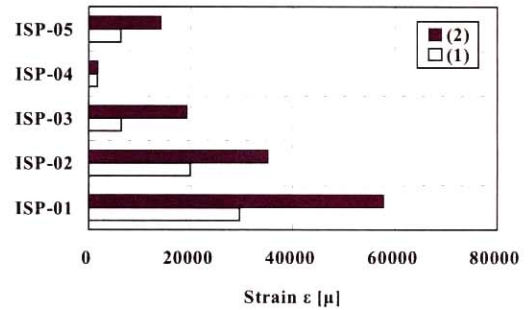
5.2 보길이에 대한 변형도 분포

전절에서 수평스티프너를 하부플랜지에 보강한 실험체들은 스캘럽저면에서의 변형도집중을 방지하여, 종래합성보에서 관찰되었던 조기취성파단을 방지한 사실을 확인하였다. 수평스티프너의 영향을 자세히 알아보기 위해 그림 14에 보의 길이에 따른 변형도 분포를 나타내었다.

SSP-01은 접합부[75mm] 근방에서의 변형도 집중이 명확하게 나타나 있음을 보여준다. 이것은 스캘럽에 의한 단면결손부에서 변형도가 집중되고 보 중간부분으로의 변형도분배는 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.



(a) ϵ - $\Sigma \theta$ 관계



(b) (1)과 (2)에서의 변형도 분포

그림 13. 보플랜지의 변형도 분포(스캘럽저면: 75mm)

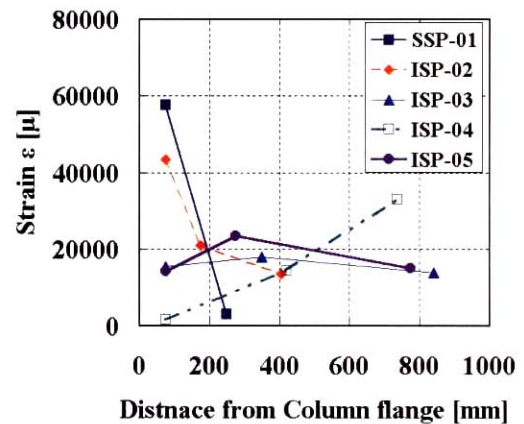


그림 14. 보의 길이방향에 따른 변형도 분포

이러한 결과는 스캘럽의 존재와 각형강관기둥플랜지의 면외변형의 영향에 따라岡田 健(2002) 등은 웨브의 모멘트전달 효율과 변형도 집중사이에 상관관계가 있음을 순철골보 실험을 통해 밝혔다. 또한, 모멘트 전달효율이 적으면 적을수록 변형도의 급격한 증가가 나타난 사실도 확인하였다. SSP-01 실험체는 스캘럽에 의한 웨브의 단면결손과 기둥플랜지의 면외 변형으로 인해 웨브의 모멘트 전달효율이 저하하여 플랜지에 변형도가 집중된 것이다. 이와 더불어 합성보의 경우 슬래브 효과에 의해 이러한 변형도 집중효과를 가중시키는 결과를 초

래하였다고 판단된다. 종래의 RBS상세를 사용한 실험체인 ISP-02실험체의 경우에 있어서도 SSP-01실험체 보다는 보다는 다소 완화되었지만, 여전히 스캘럽저면의 변형도가 집중되어지는 것을 관찰하였다. 개량수평스티프너를 사용한 ISP-03 실험체와 ISP-05실험체는 스캘럽에서의 변형도집중을 효과적으로 방지한 것을 확인할 수 있었고, 특히 ISP-05와 같은 개량형 수평요소를 이용한 경우가 ISP-03과 같이 전형적인 RBS 형상을 가진 경우보다 효과가 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, ISP-02실험체의 보강형으로 설계된 ISP-04실험체는 스캘럽에서의 변형도는 거의 관찰되지 않았고 RBS부의 최소단면부에서 변형도가 크게 관찰되었다. 이러한 사실은, 취약한 접합부에서의 변형도는 줄이는 대신에, 상대적으로 연성의 성질을 가진 부분에서 소성화를 하는 것은 매우 효과적이라고 판단된다.

6. 결론

합성보-기둥접합부에 RBS공법과 개량 수평스티프너공법을 적용한 시험체를 이용해서 정적반복가력을 실시하여 이하의 사실을 얻었다.

- (1) 표준합성보와 개량접합부에 대한 실험결과, 표준합성보는 조기에 하부플랜지에서 파단하였지만, 수평스티프너를 가진 접합부는 조기에 파단하지 않고, 변형도집중을 완화해서 변형능력개선에 유효하게 작용했다.
- (2) 기존의 RBS공법을 하부플랜지에만 적용한 결과, 변형능력이 표준합성보 보다는 우수했지만, 기존의 RBS를 순철골보에 적용한 실험체에 비해서 안정된 이력거동과 우수한 변형능력의 효과는 발휘하지 못했다. 따라서, 합성효과를 고려한 경우, RBS공법이 반드시 유효하지는 않다고 판단된다.
- (3) 각 실험체별로 골격부 최대회전각($s\theta + \max$)과 각 시험체의 정방향 최대회전각($\theta + \max$)을 비교한 결과, 표준합성보에 비하여 개량접합부의 변형능력은 약 2배인 것으로 밝혀졌고, 에너지 흡수능력에 있어서도 매우 향상되었다.
- (4) 접합부의 변형도집중에 대한 개량수평스티프너의 영향을 확인한 결과, 개량수평스티프너를 사용한 경우에는 접합부 근방에서의 변형도집중이 일어나지 않고, 스티프너 절취부등에 골고루 분포하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 넓은 소성화구역의 확보를 통해 응력집중에 의한 취성파단을 방지하는데 매우 효과적임을 보여준다.

참고 문헌

- 김영주, 오상훈, 김종성, 문태섭(2002), 슬래브 효과를 고려한 합성보 개선 접합부의 실험적 거동, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 제22권 제2호, p.253~256
- 日本建築學會近機支部鐵骨構造部會(1995), 1995年兵庫縣南部地震鐵骨造建築物被害調査報告書
- 岡田 健, 吳 相勳, 松本 由香, 山田 哲(2002), 延性破壊するH形鋼梁の継手効率とひずみ集中率の關係, 日本建築學會大會學術講演梗概集, p.749-750
- 吹田 啓一郎, 田村 匠, 森田周平, 中島正愛(1999), マイケル D エンゲルハート, “ノンスカラップ工法RBS工法による柱梁接合部の塑性變形能力-改良形溶接柱梁接合部の實大實驗-その 1-”, 日本建築學會構造系論文集, 第526號, p.177-184
- 鋼構造限界狀態設計指針・同解説(1998), 日本建築學會, 加藤勉, 秋山宏(1968), 鋼構造の耐力(その4), 日本建築學會論文報告集, 第151号, pp. 15-20
- 秋山宏, 高橋誠, 鋼構造剛接骨組の耐震性能に及ぼすパウシंगाー効果の影響(1990), 日本建築學會論文報告集, 第418号, pp. 49-57
- K. OKADA, S-H, OH S. YAMADA, T. IMAEDA, M. YAMAGUCHI, I-H CHANG, A. WADA(2001), Experimental study on deformation capacity of the composite beams, 6th Pacific Structural Steel Conference, Beijing, China
- S.H. OH, C.B. Joh, W-F Chen(2001), Slab effects on the seismic behavior of steel moment connections, 6th Pacific Structural Steel Conference, Beijing, China
- FEMA. Recommended seismic design criteria for new steel moment buildings, FEMA-350, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA
- Sheng-Jin Chen(2001), Design of Ductile Seismic Moment Connections, Increased Beam Section Method and Reduced Beam Section Method, Steel Structure, p.45-52
- Steel design guide series 12(1999), Modification of existing welded steel moment frame connections for seismic resistance, AISC
- (접수일자 : 2003. 12. 15 / 심사일 2003. 12. 29 / 심사완료일 2004. 3. 4)