



# 강재 기둥과 하이브리드 강재 보-RC 보 접합부의 반복 휨 거동 평가

권혁진<sup>1)</sup> · 양근혁<sup>2)\*</sup> · 홍승현<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>경기대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>경기대학교 플랜트·건축공학과 <sup>3)</sup>(주)한주에스티

## Evaluation on Cyclic Flexural Behavior of HSRC (Hybrid H-steel-reinforced Concrete) Beams Connected with Steel Columns

Hyuck-Jin Kwon,<sup>1)</sup> Keun-Hyeok Yang,<sup>2)\*</sup> and Seung-Hyun Hong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Han-Ju ST Co., Ltd, Seoul 08390, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The objective of the present study is to evaluate the cyclic flexural behavior of a hybrid H-steel-reinforced concrete (HSRC) beam at the connection with a H-steel column. The test parameter investigated was the configuration of dowel bars at the joint region of the HSRC beam. The HSRC beam was designed to have plastic hinge at the end of the H-steel beam rather than the RC beam section near the joint. All specimens showed a considerable ductile behavior without a sudden drop of the applied load, resulting in the displacement ductility ratio exceeding 4.6, although an unexpected premature welding failure occurred at the flanges of H-steel beams connecting to H-steel column. The crack propagation in the RC beam region, flexural strength, and ductility of HSRC beam system were insignificantly affected by the configuration of dowel bars. The flexural strength of HSRC beam system governed by the yielding of H-steel beam could be conservatively evaluated from the assumption of a perfect plasticity state along the section.

**Keywords** : hybrid beam, HSRC beam, dowel bar, flexural ductility

### 1. 서 론

최근 산업사회의 발달과 함께 공장건물, 집회시설 및 주차장과 같은 장경간 건축물에 대한 수요가 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 장경간 건축물들에서는 기존의 단독구조 시스템의 한계를 극복하기 위하여 서로 다른 구조 시스템을 조합하는 하이브리드 보 시스템의 적용이 점차 활성화되고 있다. 하이브리드 보 시스템에서 가장 널리 사용되는 구조 시스템은 강재 보와 철근 콘크리트(reinforced concrete, RC) 보 시스템인데, 이러한 하이브리드 보에서 합성은 단순한 재료적 합성이 아닌 서로 다른 두 시스템간의 연결절점을 갖는 구조적인 합성이다.<sup>2,3)</sup>

강재 보와 RC 보를 사용하는 대부분의 하이브리드 보 시스템<sup>4,5)</sup>에서 두 시스템의 연결절점은 주로 RC 보에 매립된 보강철물과 강재 보와의 볼트 체결을 통한 접합으로 시공된다. 이러한 볼트 체결방식은 볼트 구멍을 맞추는 것에 있어서 시공성이 불리하며 크레인 양중 시간의 증가로 인한 공기

증가의 문제점이 있다. 또한 반복가력 하에서는 RC 보에 매립된 강재와 콘크리트의 강성 차이로 인한 역사인장 균열 및 연결절점 파괴의 위험성이 있다.<sup>6,7)</sup>

볼트 접합을 사용하는 기존 하이브리드 보의 문제점을 개선하기 위해 Yang et al.<sup>8)</sup>은 H-보-RC 보의 연결절점을 갖는 하이브리드 보 시스템(hybrid H-steel-reinforced concrete, HSRC)을 개발하였다. 시공성과 부재의 연성향상을 고려하여 개발된 HSRC 보에서 RC 보는 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC)를, 연결절점 영역과 상부 슬래브는 현장타설 콘크리트(cast-in-place concrete, CIP)를 이용한다. H-보와 RC 보는 접합을 위해 H-보 단부에 용접된 L-형 연결재를 통해 연결된다. RC 보의 상·하부 주철근 및 장부철근은 L-형 연결재에 커플러를 통해 기계적 정착으로 강접합 되는데, 이는 힌지접합으로 간주되는 기존 볼트체결 방식보다 부재 간의 응력전달에 유리하다.

건축물의 내진설계는 주로 강한 기둥-약한 보의 개념으로 설계되며, 부재에 발생하는 소성힌지의 위치는 전체 구조물의 거동에 영향을 미친다. 제안된 시스템에서 소성힌지의 형성 위치는 연결절점의 접합 여부에 따라 강재 보 또는 RC 보에 발생할 수 있는데, 이에 따라 모멘트의 재분배가 달라진다.<sup>9)</sup> 부재 및 구조물의 연성증진을 위해서는 RC 보보다는

\*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr  
 Received January 31, 2017, Revised March 30, 2017,  
 Accepted April 6, 2017  
 ©2017 by Korea Concrete Institute

기둥과 연결되는 단부 강재 보에 소성힌지가 발생하는 것이 바람직하다.

이 연구의 목적은 강재 기둥과의 접합부 영역에서 HSRC 보의 반복 내력 및 휨 거동을 평가하는 것이다. 실험변수는 강재 보와 RC 보의 일체화에 영향을 주는 연결절점의 상세로써, 장부철근의 배근유무, 배근방법 및 L-형 연결재의 상세이다. 반복가력 하에서 HSRC 보의 소성힌지는 기둥과 연결되는 강재 보 단부에서 형성되도록 유도하였다. 하중전달에 대한 연결절점의 영향을 평가하기 위하여 HSRC 보의 길이방향에서 변형을 분포를 측정하였다. 휨 연성은 하중-변위 관계로부터 얻은 변위연성비 및 일 손상지수로부터 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체 상세

강재 기둥과 연결되는 HSRC 보 실험체의 상세는 Fig. 1에 나타내었다. 반복가력 하에서 기둥과 접합된 HSRC 보의 휨 거동을 평가하기 위한 3개의 실험체는 장부철근의 배근방법 및 연결절점의 상세를 주요변수로 하였다. 단부 H-보의 길이는  $L_s$ 의 함수로써  $1.0L_s$ 를 선택하였는데, 여기서,  $L_s$ 는 연속보의 모멘트 분포에서 기둥 단부에서부터 변곡점까지의 거리이다. Seo et al.<sup>10)</sup>은 강재 보와 RC 보의 연결절점의 위치는 연결절점의 RC 보 영역에서 과도한 균열진전을 방지하기 위하여 변곡점에 위치하는 것이 유리함을 보였다. C 실험체(Fig. 2(a))는 장부철근이 배근되어 있지 않은 실험체이다.

A 실험체(Fig. 2(b))는 장부철근이 PC 보에 600 mm의 정착 길이를 확보하여 배근되었으며, 배근된 장부철근은 L-형 연결재에 커플러를 이용하여 정착되었다. N 실험체(Fig. 2(c))는 장부철근을 연결절점 영역에서  $\pi$ 모양으로 절곡하여 L-형 연결재에 정착시키지 않고 배근하였다. N 실험체에서 L-형 연결재의 하부철근 받침의 높이는 PC 높이까지 증가시켰다. 장부철근의 정착 길이는 콘크리트 설계기준에서 요구하는 인장철근의 소요 정착 길이 이상으로 하였다.

모든 실험체에서 보의 전체길이는 2,400 mm이고 H-보의 길이는 960 mm이다. 기둥은 SM490의 H-400 × 300 × 13 × 21 (mm)를 사용하였다. 단부 H-보는 SS400의 H-400 × 300 × 9 × 14 (mm)를 사용하였으며 9 mm 두께의 스티프너를 100 mm 간격으로 용접하여 H-보의 국부좌굴과 전단파괴를 방지하였다. 기둥과 단부 H-보는 용접 접합하였다. RC 보의 단면은 모든 실험체에서 300 × 500 mm인데, 여기서 PC 보는 350 mm이고 현장 타설 콘크리트 부위인 상부 슬래브는 150 mm이다. RC 보와 H-보의 연결을 위한 L-형 연결재는 25 mm 두께로 제작하였으며 H-보 단부에 용접으로 접합하였다. 장부철근이 배근되어 있지 않은 실험체의 L-형 연결재에는 콘크리트의 미끄러짐을 방지하기 위하여 직경 19 mm의 스티드 볼트를 용접하였다. 상·하부 주철근은 4-D25를 배근하였으며, 이때의 철근비는 1.6%이다. 전단철근은 모든 실험체에서 직경 13 mm의 철근을 사용하였는데, 배근간격은 연결절점 영역에서 40 mm, RC 보 영역에서는 80 mm이다. 모든 실험체는 강재 기둥, H-보 및 L-형 연결재를 각각 제작한 후에

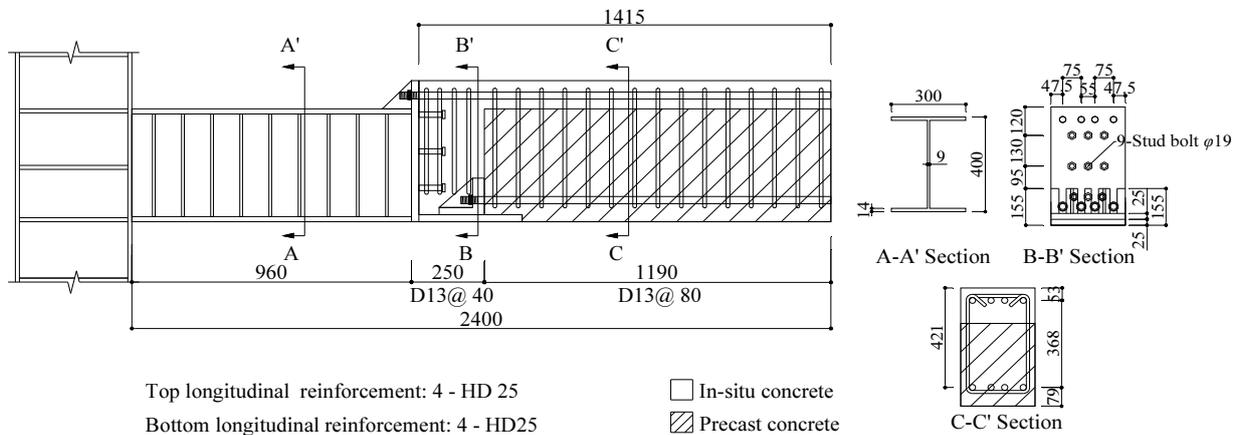


Fig. 1 Details of section dimension and reinforcement arrangement of specimens

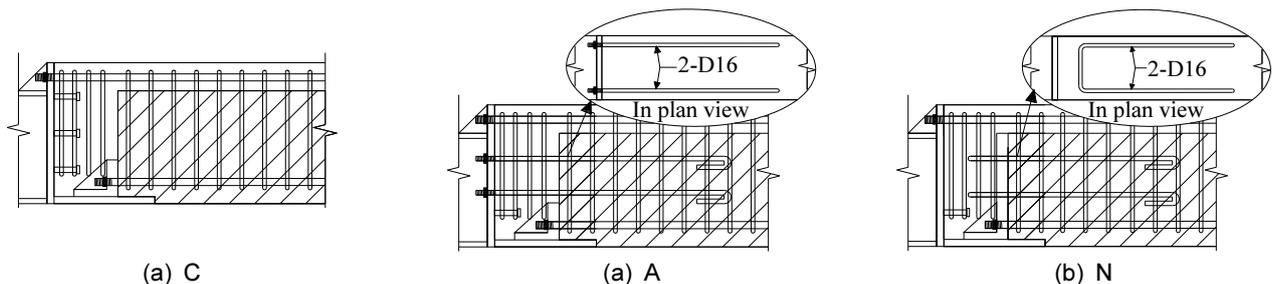


Fig. 2 Joint details between H-beams and RC beams

용접 접합하였으며, 미리 제작된 PC 보를 L-형 연결재에 거치한 후, PC 보의 하부 주철근 또는 장부철근을 커릴러를 이용하여 정착하였다. 이후에는 상부 주철근을 배근하였으며, 현장 타설 콘크리트 부위인 연결절점 영역과 슬래브를 타설하였다.

## 2.2 재료

부재 실험에 사용된 콘크리트의 설계 압축강도는 50 MPa로 하였으며, 설계 압축강도를 고려하여 결정된 배합표는 Table 1에 나타내었다. 타설은 프리캐스트 콘크리트와 현장 타설 콘크리트 영역에서 모두 레이콘을 이용하였다. 타설된 콘크리트의 압축강도와 응력-변형률 관계는 KS 기준<sup>1)</sup>에서 제시하는 표준 원주 공시체( $\phi 100 \times 200$  mm)를 이용하여 측정하였다. 콘크리트 압축강도는 부재 실험 직전에 측정하였으며, 프리캐스트 콘크리트 영역과 현장타설 콘크리트 영역에서 각각 59.0 MPa와 57.5 MPa였다.

Table 2에는 강재 기둥, 강재 보 및 RC 보에 사용된 H-형강과 철근의 역학적인 특성을 나타내었다. 이들의 평가는 KS

기준<sup>12)</sup>에 따라 수행하였다. Fig. 3에는 강재의 응력-변형률 관계를 나타내었다. 주철근으로 사용된 직경 25 mm 철근의 항복강도는 524 MPa이었다. 장부철근은 직경 16 mm 철근을 사용하였으며, 항복강도는 474 MPa이었다. 강재 보에 사용된 SS400 강재의 항복강도는 315 MPa이었다. 실험체에 사용된 H-형강과 철근의 탄성계수는 약 200,000 MPa이었다.

## 2.3 실험 및 측정방법

Fig. 4에는 강재 기둥과 접합된 HSRC 보의 반복가력을 위한 측정 상세를 나타내었다. 실험체는 H-기둥에 단부 H-보를 용접하여 반복가력이 가능하도록 세팅하였다. 기둥은 상·하부 힌지를 두고 각각 10개의 강재 락볼트(rock bolts)를 이용하여 가력시스템에 고정하였다. 실험체에는 반복가력에 따른 H-보 및 철근의 변형률을 파악하기 위하여 H-보 단부 및 연결절점 영역 철근에 전기 저항식 와이어 스트레인 게이지(wire strain gauge, WSG)를 부착하였으며 부재의 항복은 부재에 부착된 WSG의 변형률이 항복변형률에 도달하였을 때 하였다. 가력은 2,000 kN 용량의 액추에이터를 사용하여 보 자유단에서 변위제어로 1점 반복가력 하였다.

Table 1 Mixture proportion of concrete

Designed compressive strength	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
50	0.295	0.43	166	563	699	935

Note) W/C = water/cement ratio, S/a = sand/aggregate ratio, W = water, C = cement, S = sand, G = gravel

Table 2 Mechanical properties of metallic materials

Type	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Elongation (%)	
Reinforcing bar	D13	523	639	200,579	18
	D16	474	616	198,519	21
	D25	524	661	202,571	18
H-steel	SS400	315	463	199,159	21
	SM490	412	531	205,548	17

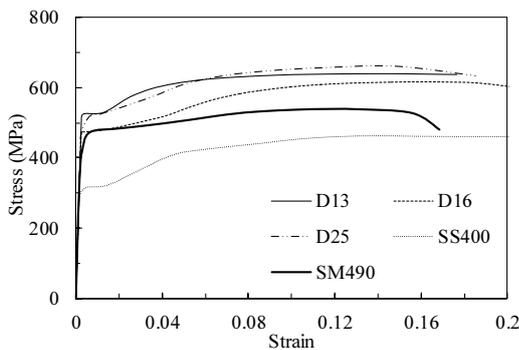


Fig. 3 Stress-strain curve of metallic materials

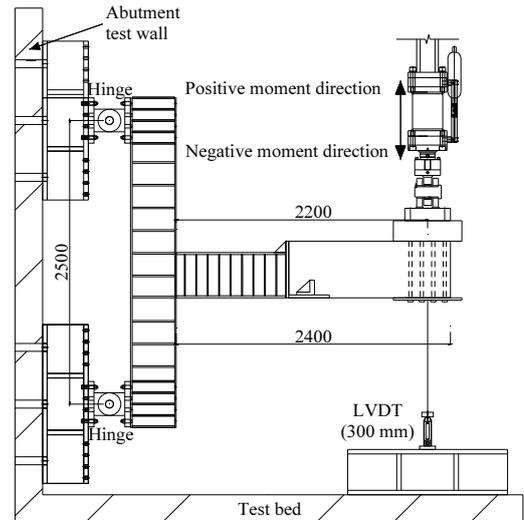


Fig. 4 Test set-up

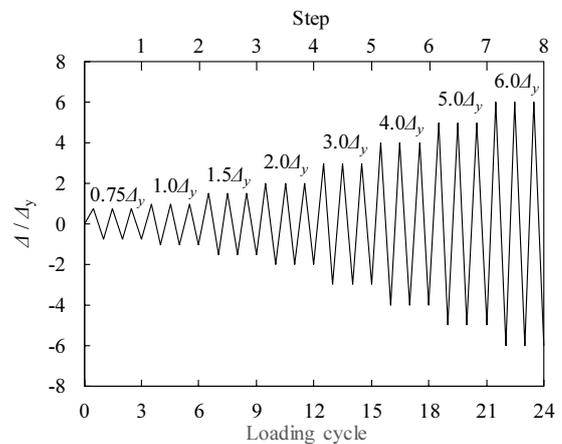


Fig. 5 Cyclic loading history

Fig. 5에는 변위제어 기반의 가력이력을 나타내었다. 각 하중이력 단계(step)는 해당 하중이력 단계의 변위를 기준으로 3 사이클(cycle)씩 반복하였는데, 이때의 하중이력 단계 당 변위는 부재항복변위( $\Delta_y$ )의 0.75~6배로 증분하였다. 반복 가력 하에서 HSRC 보의 소성힌지는 H-보 단부에서 형성되도록 유도되었기 때문에  $\Delta_y$ 는 H-보 플랜지의 변형률이 항복변형률에 도달하였을 때, HSRC 보 자유단에서의 변위로 하였다. HSRC 보 자유단에서의 변위는 300 mm 용량의 변위계(linear variable differential transducers, LVDTs)를 이용하여 측정하였으며, 실험은 부재의 과도한 변형, 또는 하중이 최대 내력의 80%이하로 감소하였을 때까지 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 균열 및 파괴양상

각 실험체의 RC 보에서 균열양상은 Fig. 6에 나타내었다. 초기 균열은 PC와 CIP의 수직 경계면 및 L-형 연결재 부근에서 발생하였다. 균열은 하중의 진전과 함께 RC 보에서 휨 모멘트가 가장 크게 작용하는 연결절점 영역에 집중되었으며, 대부분 연결절점 영역에서부터 약 400 mm 범위에 발생하였다. 연결절점 영역의 콘크리트는 최대 내력 이후에 L-형 연결재 하부철근받침 부근에서 탈락이 발생하였다. 모든 실험체의 균열 양상은 유사하였으며 장부철근 배근이나 연결절점 상세에 따른 차이는 매우 미미하였다.

모든 실험체는 RC 보의 주철근 항복 이전에 H-보가 항복하였으며 부재의 항복 이후에 보-기둥 용접접합부, 또는 L-형 연결재 하부철근받침이 파괴되었다. C 실험체(Fig. 7(a))는 최대내력에 도달한 이후 하중이 서서히 감소하다가  $6\Delta_y$  (정모멘트 방향)에서 L-형 연결재 하부철근받침이 파괴되었다. A 실험체(Fig. 7(b))는  $3\Delta_y$ (부모멘트 방향)에서 강재 기둥과 H-보 상부플랜지의 용접접합부의 선형파괴로 인해 부모멘트 방향의 가력이 불가능하여 이후에는 정모멘트 방향의 가력만 수행하였다. A 실험체의 H-보는  $6\Delta_y$ (정모멘트 방

향) 가력 이후에 웨브의 파괴가 발생하였다. N 실험체(Fig. 7(c))는  $4\Delta_y$ (정모멘트 방향)에서 기둥과 H-보 하부플랜지의 용접탈락이 발생하였다. 이후에는 부모멘트 방향의 가력만 수행하였으며  $5\Delta_y$ (부모멘트 방향)에서 H-보 상부플랜지 및 용접부의 파괴로 인해 가력을 종료하였다.

#### 3.2 하중-변위 관계

Fig. 8에는 각 실험체의 하중-변위 관계를 나타내었으며,

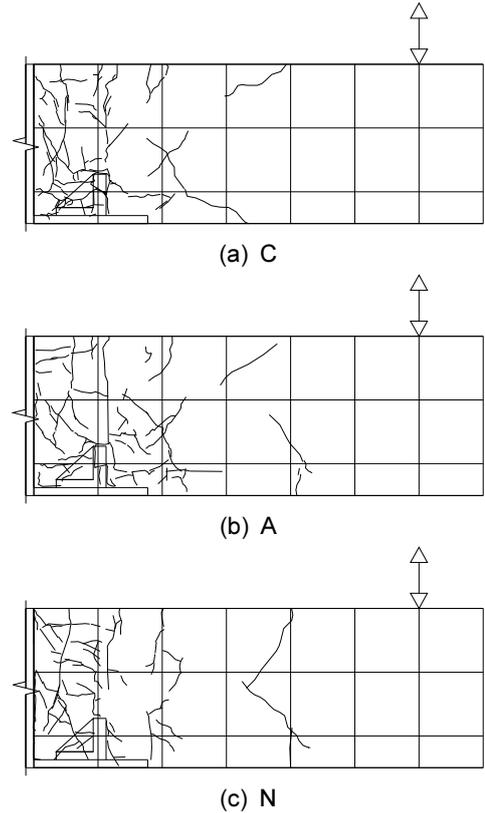
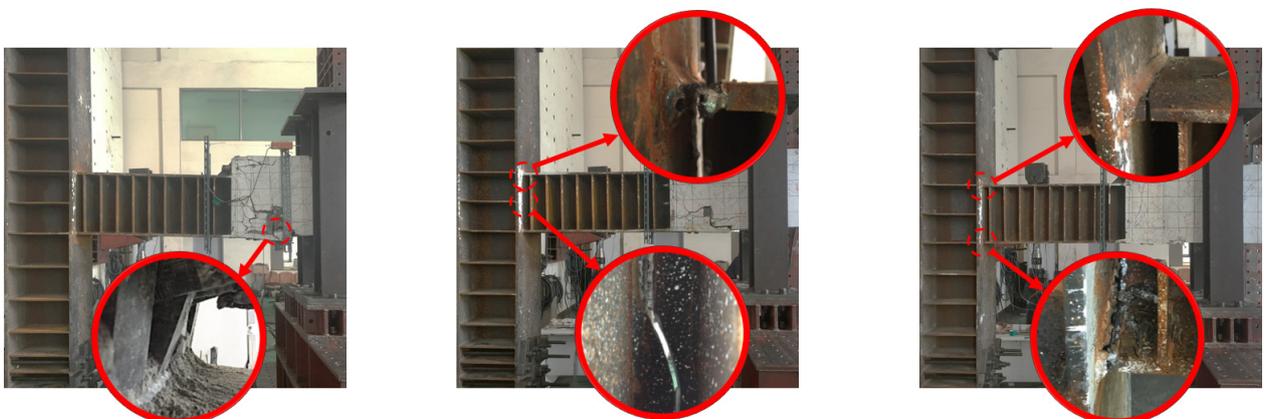


Fig. 6 Crack propagation in the RC beam region of each specimen



(a) Welding failure at the L-shaped steel plate (specimen C) (b) Welding failure at the top flange and web of H-beams (specimen A) (c) Welding failure at the top and bottom flanges of H-beams (specimen N)

Fig. 7 Failure zone of each specimen

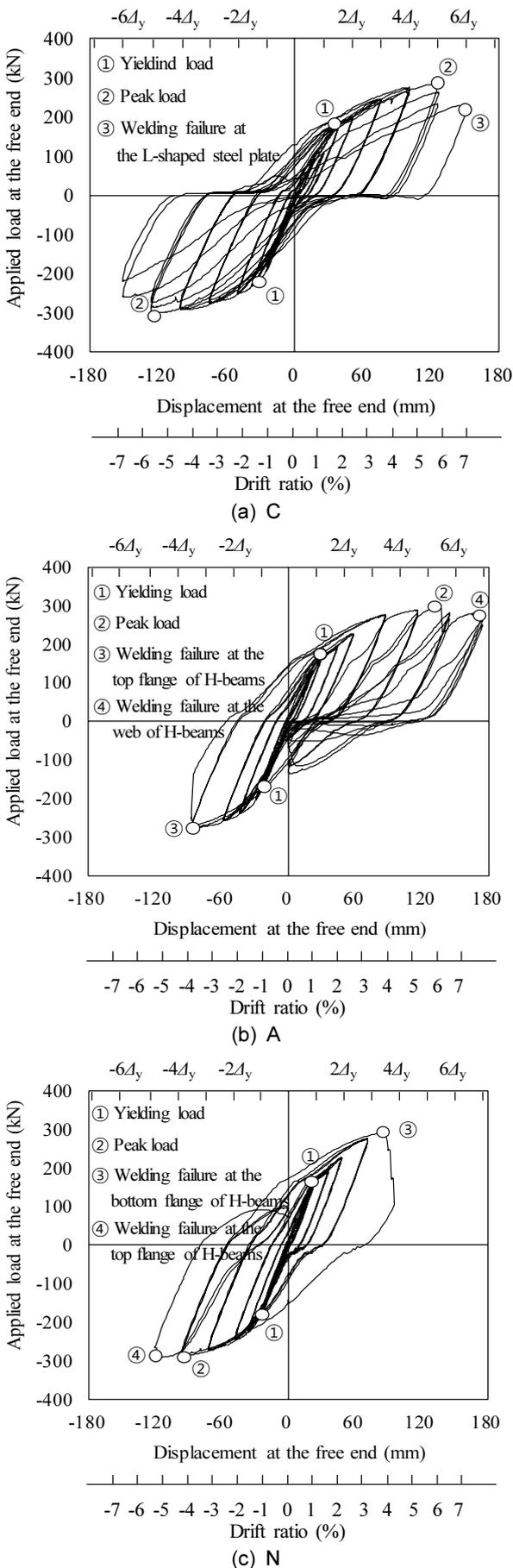


Fig. 8 Load-displacement relationship

Table 3에는 실험결과를 요약하였다. Fig. 8에서 ‘+’ 영역은 정모멘트 방향(↑) 하중이며 ‘-’ 영역은 부모멘트 방향(↓) 하중이다. 모든 실험체에서 보 자유단의 변위는 최초 휨 균열의 발생과 함께 급격히 증가하였다. 작용하중은 H-보 플랜지의 항복 이후 완만하게 증가하였다. 또한 최대 내력 전 동일 변위에서의 강도 저감율은 1% 이내였다. 각 실험체의 최대하중은  $4\Delta_y$  또는  $5\Delta_y$ 에서 도달하였으며, 이후에는 하중이 감소하거나 용접 접합부의 파괴로 가력이 불가능하였다. 초기 동일 변위에서 정모멘트 방향 하중은 부모멘트 방향 하중에 비해 약 80~90%였는데, 그 차이는 변위의 증분과 함께 작아지는 양상을 나타냈다. 또한 모든 실험체는 RC 보의 균열로 인해 편칭현상이 나타났지만, N 실험체는 L-형 연결재 하부 철근받침이 PC 보 높이까지 증가되어 다른 실험체보다 편칭현상이 적었다. C 실험체는  $5\Delta_y$  정·부모멘트 방향에서 모두 최대하중에 도달하였으며,  $6\Delta_y$  두 번째 사이클에서 최대하중의 80%로 하중이 감소하였다. A 실험체의 최대 내력은 정모멘트 방향에서  $5\Delta_y$ 에 도달하였지만, 부모멘트 방향에서는  $3\Delta_y$ 에서 발생한 용접접합부 선행파괴로 인해 정모멘트 방향보다 약 7% 낮았다. N 실험체는 정·부모멘트 방향에서 대칭의 하중-변위 관계를 보였다. 실험체 A와 N은 최대내력 이후 보와 기둥의 접합부에서 용접부의 파괴로 예상 최대변위 이전에 정 또는 부모멘트 방향에서의 가력이 종료되었다. 만약 용접내력이 적절하게 확보되었다면, HSRC 보에서의 더 많은 가력이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 휨 내력

Table 4에는 실험된 HSRC 보의 휨 모멘트 실험값과 예측값의 비교를 나타내었다. 강제 보의 항복에 의해 결정되는 HSRC 보의 최대 휨 내력은 H-보의 완전 소성상태를 가정하여 산정하였다. A 실험체에서 부모멘트 방향의 최대 휨 내력은 정모멘트 방향의 값에 비해 약 7% 낮게 나타났는데, 이는 정모멘트 방향 가력 시에 발생한 용접부의 선행파괴 때문이다. 모든 실험체에서 휨 내력에 대한 실험값과 예측값의 비는 약 1.00~1.09 범위에 있었으며, 장부철근이 HSRC 보의 최대 휨 내력에 미치는 영향은 미미하였다. 즉, 부재의 휨 파괴가 RC 보보다는 강제 보에 의해 지배되는 HSRC 보의 최대 휨 내력은 H-보의 완전소성 응력분포에 비해 안전 측에서 평가될 수 있었다.

### 3.4 휨 연성

Fig. 9에는 각 실험체의 하중-변위 관계로부터 산정된 변위연성비를 나타내었다. HSRC 보의 변위연성비( $\mu_\Delta$ )는 최대내력 시의 변위( $\Delta_u$ )를 H-보 항복 시의 변위( $\Delta_y$ )로 나누어 산정하였다.<sup>13)</sup> 변위연성비는 용접부가 선행파괴된 A 실험체의 부모멘트 방향과 N 실험체의 정모멘트 방향을 제외한 모 실험체에서 4.64 이상이었다. C 실험체의 부모멘트 방향에서의 변위연성비는 5.01로 가장 높았지만, A 및 N 실험체

**Table 3** Summary of test results

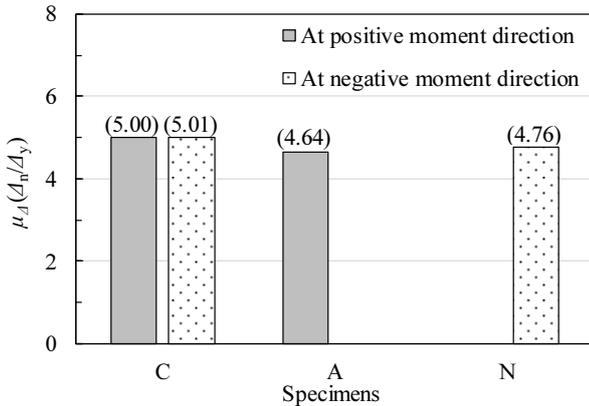
Specimen	$P_{cr}$ (kN)		$P_y$ (kN)		$P_n$ (kN)		$\Delta_y$ (mm)		$\Delta_n$ (mm)		$\mu_{\Delta}$		$W_c$
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
C	52.4	55.8	179.3	180.6	286.2	301.1	25.0	25.0	124.9 (5 $\Delta_y$ )	125.3 (5 $\Delta_y$ )	5.0	5.0	303
A	53.0	57.7	163.4	181.3	295.3	275.6	29.2	29.1	135.6 (5 $\Delta_y$ )	84.5 (3 $\Delta_y$ )	4.6	-*	204
N	51.0	54.1	166.8	179.2	292.0	290.9	24.1	24.2	87.3 (4 $\Delta_y$ )	115.2 (5 $\Delta_y$ )	-*	4.8	145

Note:  $P_{cr}$  = initial flexural cracking load,  $P_y$  = yield load,  $P_n$  = ultimate load,  $\Delta_y$  = free end displacement at the yielding of H-beams,  $\Delta_n$  = free end displacement at the peak load,  $\mu_{\Delta}(=\Delta_n/\Delta_y)$  = displacement ductility ratio, and  $W_c$  = work damage index, The positive( $\uparrow$ ) and negative( $\downarrow$ ) moment directions are identified using ‘+’ and ‘-’, respectively.  
 \* The ultimate displacement at the negative or positive direction could not be measured in specimens A and N because of a premature welding failure of flanges of H-beam connected with H-column.

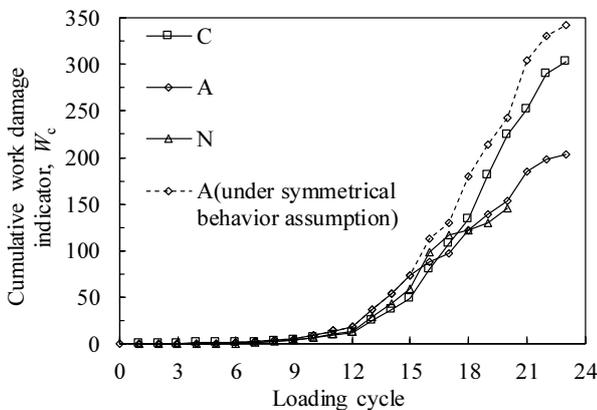
**Table 4** Comparisons of measured peak loads and predictions

Specimen	$(M_{steel})_{exp}$ (kN·m)		$(M_{steel})_{pre}$ (kN·m)		$(M_{steel})_{exp} / (M_{steel})_{pre}$	
	+	-	+	-	+	-
C	629.7	662.4	608.7		1.03	1.09
A	649.7	606.2			1.07	1.00
N	642.4	640			1.06	1.05

Note:  $(M_{steel})_{exp}$  = measured moment capacity, and  $(M_{steel})_{pre}$  = predictions calculated from the perfect plasticity section



**Fig. 9** Displacement ductility ratio of specimens



**Fig. 10** Cumulative work damage indicator of specimens

와 큰 차이를 보이지 않았다. 변위연성비에 대한 장부철근의 영향은 미미하였는데, 이는 연결절점에서의 하중전달이 원활하게 이루어져 부재의 거동이 H-보의 항복에 의해 결정되었기 때문이다.

하중이력에 따른 각 실험체의 일손상지수( $W_c$ )는 Fig. 10에 나타내었다. 일손상지수는 Sheikh and Khoury<sup>14)</sup>의 모델을 통해 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$W_c = \frac{1}{V_n \Delta_y} \sum_{t=1}^{n_c} (\omega_m) \left( \frac{K_m}{K_y} \right) \left( \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \right)^2 \quad (1)$$

$$K_m = \frac{K_m^+ + K_m^-}{2} \quad (2)$$

$$\Delta_m = \frac{\Delta_m^+ + \Delta_m^-}{2} \quad (3)$$

여기서,  $V_n$ 은 실험체의 최대하중,  $n_c$ 는 총 사이클의 개수,  $m$ 은  $m$ 번째 사이클,  $\omega_m$ 은 에너지의 양,  $K_m^+$ 와  $K_m^-$ 는 정 및 부방향의 강성 및  $\Delta_m^+$ 와  $\Delta_m^-$ 는 정 및 부방향의 최대변위를 나타낸다. 모든 실험체의 일손상지수는 2 $\Delta_y$  (12 Cycle)까지 유사한 경향을 보이며 점진적으로 증가하였다. A 실험체는 3 $\Delta_y$  (15 Cycle)에서 C 실험체보다 약 49% 높은 에너지 소산 능력을 보였지만 용접부의 파괴로 인해 정모멘트 방향 가력만 수행한 4 $\Delta_y$  (16 Cycle)부터는 C 실험체보다 낮은 에너지 소산 능력을 보였다. N 실험체의 일손상지수는 4 $\Delta_y$  (16 Cycle)에서 다른 실험체보다 높았으나 이후 정모멘트 방향 용접부의 파괴로 인해 증가량이 크게 감소하였다. C 실험체는 용접부의 선행파괴 없이 정·부모멘트 방향에서 다른 실험체보다 더 많은 횟수를 가력 하였기 때문에 일손상지수가 지속적으로 증가하였으며 최종적으로 가장 높은 일손상지수를 나타냈다.

A 실험체는 보-기둥 접합부의 용접부가 선행파괴된 이후 부모멘트 방향 가력만 수행하였는데, Fig. 10에는 용접부 선행파괴가 발생하지 않을 경우 정·부 대칭거동을 가정하여 일손상지수를 평가하였다(dotted line in Fig. 10). 대칭거동으

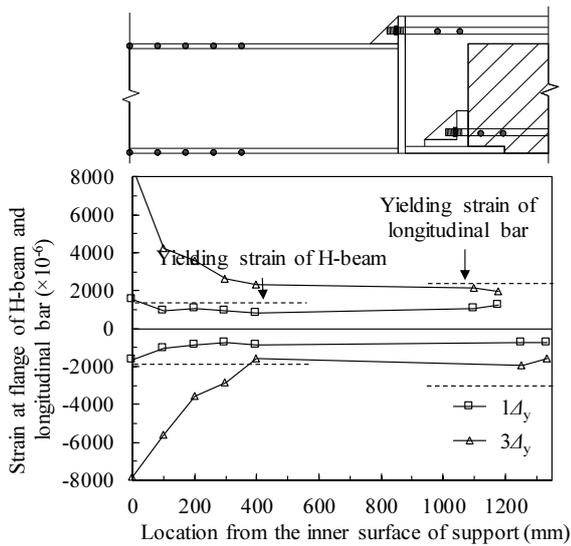


Fig. 11 Typical strain distributions measured in the flanges of H-steel and longitudinal bars (C specimen)

로 가정된 A 실험체의 일손상지수는 C 실험체와 유사한 거동을 보였다. 즉 보-기둥 접합부에서 용접파괴가 선행되지 않는다면 HSRC 보는 변위연성비 4.6 이상의 충분한 연성을 확보할 수 있다고 판단된다.

### 3.5 변형률 분포

Fig. 11에는 C 실험체에서  $1\Delta_y$ 와  $3\Delta_y$ 의 변위 시 보 길이를 따른 주철근 및 H-보 플랜지에서 측정된 변형률 분포를 나타내었다. A와 N 실험체에서 측정된 변형률 분포는 C 실험체와 유사한 경향을 보였기 때문에 Fig. 11에 나타내지 않았다. 실험체의 소성힌지는 보-기둥 접합부의 강재 보에서 발생하도록 유도하였기 때문에 RC 보의 주철근은  $3\Delta_y$ 까지 항복 변형률에 도달하지 않았다. 보 길이 방향을 따른 주철근 및 H-보 플랜지의 변형률 분포는 모든 실험체에서 휨 모멘트도와 유사하게 나타났으며, 변위 증분에 따라 비례적으로 증가하는 거동을 보였다. 따라서, HSRC 보의 H-보와 RC 보는 장부철근의 배근과 관계없이 RC 보 주철근의 응력이 L-형 연결재를 통해 H-보로 원활하게 전달되고 있다고 판단된다.

## 4. 결 론

강재 기둥과 접합된 HSRC 보 실험체에서 소성힌지는 H-보에서 유도하였지만, A와 N 실험체는 예상치 못한 보-기둥 접합면 용접부의 선행파괴가 발생하였으며, 이로 인해 더 많은 가력을 수행하지 못하였다. 반복가력 실험으로부터 얻은 부재의 균열진전, 하중-변위 관계, 변형률 분포 등을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HSRC 보의 연결절점에 배근된 장부철근이 보의 균열진전, 최대 휨 내력 및 연성에 미치는 영향은 미미하였다.
- 2) 실험체 A와 N는 용접부 선행파괴로 인해 정 또는 부모멘트 가력 방향에서 최대내력 이후 가력을 진행할 수

없었지만, 모든 실험체의 변위연성비는 최소 한쪽가력 방향에 대하여 4.6 이상이었다.

- 3) 휨 파괴가 RC 보보다는 강재 보에 의해 지배되는 HSRC 보의 휨 내력은 H-보 단면의 완전소성 응력분포에 의해 안전 측에서 평가될 수 있었다.
- 4) HSRC 보 길이를 따른 주철근 및 H-보 플랜지에서의 변형률 분포는 휨 모멘트도와 유사하였으며, 변위 증분에 따라 비례적으로 증가하였다.

## 감사의 글

이 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 중소기업청(과제번호: S2298119)과 경기대학교 대학원 연구원장 학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

## Reference

1. Lee, D. S., Kim, S. Y., and Kim, T. K., "Development of Hybrid OCB Beam for the Long-span Building Structures", *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, Vol. 6, No. 3, 2015, pp. 129-138.
2. Ahn, H. J., Jung, I. Y., Kim, Y. J., and Hwang, J. S., "Shear Resistance of BESTOBEAM Shear Connector According to the Length", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 27, No. 5, 2015, pp. 483-491.
3. An, J. H., and Park, C. S., "A Proposal for Estimating Method of Shear Strength on the Beam-column Joints of Composite Structure with Transverse Beam", *The Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 18, No. 1, 2016, pp. 225-232.
4. Lee, H. C., Shim, N. J., and Lee, J. I., "Performed Project and Development of ECO-prestressed PC Beam for the Improvement of Connection", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 24, No. 2, 2011, pp. 15-22.
5. Lee, H. G., "Study on Self-Weight Reduction Method for Prestressed Concrete Composite Beam Capable of Connecting with Steel Structure", MS. Thesis, Korea University, Korea, 2012.
6. Seo, E. A., "Seismic Performance Evaluation of Hybrid System Composed of Steel-reinforced Concrete Beams with Rigid Joint", MS. Thesis, Kyonggi University, Korea, 2015, p. 28.
7. Kim, Y. J., Bae, J. H., Ahn, T. S., Kim, J. W., and Ryu, H. S., "Cyclic Loading Test on Connection of SRC Column-Composite Beam Consisting of H-Section and U-Section Members", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 26, No. 4, 2014, pp. 263-275.
8. Yang, K. H., Seo, E. A., and Hong, S. H., "Cyclic Flexural Tests of Hybrid Steel-Precast Concrete Beams with Simple Connection Elements", *Engineering Structures*, Vol. 118,

- 2016, pp. 344-356.
9. Lee, D. S., Kim, T. K., and Chae, G. B., "The Experimental Study of Full-scale Optimized Composite Beam (OCB) Reinforced with Open Strands", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 5, 2015, pp. 471-480.
  10. Seo, E. A., Yang, K. H. and Hong, S. H., "Evaluation on Flexural Behavior of Hybrid Beams with Rigid Joint Connecting Steel and Precast Concrete Elements", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, 2016, pp. 13-21.
  11. KS F 2405, *Method of Test for Compressive Strength of Concrete*, Korean Standards Association, 2010.
  12. KS B 0802, *Method of Tensile Test for Metallic Materials*, Korean Standards Association, 2003.
  13. P. Paultre, and F. Legeron, "Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 5, 2008, pp. 738-749.
  14. Sheikh, S. A., and Khoury, S. S., "A Performance-based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, 1997, pp. 421-431.

---

**요 약** 이 연구에서는 강재 기둥과 접합된 하이브리드 H-보-철근 콘크리트 보(HSRC)의 반복 휨 거동을 평가하였다. 실험 변수는 HSRC 보의 연결절점에 배근되는 장부철근의 유무이다. HSRC 보의 소성힌지는 RC 보보다는 기둥 접합부 부근의 H-보에서 형성되도록 유도하였다. 모든 실험체는 하중의 급격한 감소 없이 연성적인 거동을 보였으며, 비록 예상치 못한 H-기둥과 H-보 용접 접합부의 파괴가 발생하였지만, 결과적으로 4.6 이상의 변위연성비를 나타내었다. HSRC 보 시스템에서 RC 보의 균열진전, 휨 강도 및 연성에 대한 장부철근의 영향은 매우 미미하였다. HSRC 보 시스템의 휨 강도는 단면의 완전소성으로 가정하여 산정한 H-보의 최대 휨 내력에 비해 안전 측에서 평가될 수 있었다.

**핵심용어** : 하이브리드 보, HSRC 보 시스템, 장부철근, 휨 연성