

철골 커플링 보-벽체 접합부의 변형 특성

Deformation Characteristics of Steel Coupling Beam-Wall Connection

박 완 신* 전 에스더* 한 민 기* 김 선 우* 황 선 경** 윤 현 도***
Park, Wan-Shin Jeon-Esther Han, Min-Ki Kim, Sun-Woo Hwang, Sun-Kyung, Yun, Hyun-Do

Abstract

The use of new hybrid systems that combine the advantages of steel and reinforced concrete structures has gained popularity. One of these new mixed systems consists of steel beams and reinforced concrete shear wall, which represents a cost- and time-effective type of construction. A number of previous studies have focused on examining the seismic response of steel coupling beams in a hybrid wall system. However, the shear transfer of steel coupling beam-wall connections with panel shear failure has not been thoroughly investigated. The objective of this research was to investigate the seismic performance of steel coupling beam-wall connections governed by panel shear failure. To evaluate the contribution of each mechanism, depending upon connection details, an experimental study was carried out. The test variables included the reinforcement details that confer a ductile behaviour on the steel coupling beam-wall connection, i.e., the face bearing plates and the horizontal ties in the panel region of steel coupling beam-wall connections. It investigates the seismic behaviour of the steel coupling beams-wall connections in terms of the deformation characteristics. The results and discussion presented in this paper provide background for a companion paper that includes a design model for calculating panel shear strength of the steel coupling beam-wall connections.

1. 서론

구조적인 성능, 공사비 및 공간계획 측면에서 철근 콘크리트 벽체-철골 커플링 보로 구성된 합성구조시스템(이하, HCWS)의 우수성이 점차로 인식되어 감에 따라, 지난 10여년 동안 미국과 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며 그 활용이 날로 증가되고 있는 실정이다. 특히, 철골 보와 철근콘크리트 벽체로 구성된 복합 병렬 전단벽(이하, HCWS)은 최근 10여년 동안 미국과 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며 그 활용이 날로 증가되고 있는 실정이다¹⁾. HCWS 구조는 철골과 철근 콘크리트의 이질 구조재료로 구성되어 있으므로 이들 구조재료간의 응력전달이 발생하는 접합부의 구조성능이 전체 구조물의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 철골 커플링 보-벽체 접합부의 예상 파괴형태는 패널 전단파괴 및 지압파괴로 철근 콘크리트 기둥-철골보 접합부의 파괴양상과 유사한 경향을 보이고 있으며, 이들 파괴형태 중 하나가 접합부의 강도를 지배하는 것으로 나타났다. 패널 전단파괴는 강제 웨브의 항복, 콘크리트 스트럿(Strut) 및 트러스 작용에 의한 전단파괴이며, 지압파괴는 지렛대 기구(Lever mechanism)에 근거하여 콘크리트에 비해 상대적으로 강성이 큰 철골 커플링 보의 강제 회전으로 인해 철골보 상·하부의 콘크리트는 높은 지압응력을 받게 되어 벽체 콘크리트가 압괴되는 파괴형태이며 지압강도는 지압 콘크리트의 구속정도의 함수로 나타나는 콘크리트의 지압강도와 유효지압면적에 의해 결정되는 것으로 보고되었다²⁾. 국내·외의 연구동향을 파악하면 패널전단파괴가 발생하는 SRC³⁾ 및 지압파괴가 발생하는 HCWS 구조의 접합부⁴⁾에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 패널 전단파괴가 발생하는 HCWS 접합부 변형특성에 관한 연구는 전무한 실정이므로 이에 대한 규명이 절실히 필요하다고 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 HCWS 접합부의 패널전단강도식에 대한 설계지침서를 작성하기 위한 기초적인 연구로서 접합부 보강상세에 따른 철골보-철근콘크리트 벽체 접합부의 변형특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 및 실험결과

2.1 실험

실험체 설계시 고려된 변수는 표 1에 나타난 바와 같이 접합부 보강상세이며 본 실험에 사용된 콘크리트, 철근 및

* 충남대학교 건축공학과 대학원

** 우송대학교 강의전담교수, 공박

*** 충남대학교 건축공학과 교수, 공박

강재의 시험결과를 표 2 및 3과 같다. 실험진행은 벽체 중심에서 5cm 떨어진 위치에서 $0.12f_{cu}$ 의 일정한 축응력하에서 철근콘크리트 벽체에 매립된 철골 커플링보의 하중-회전각 관계를 파악하기 위하여 표준 실험체인 HCWS-PSF 실험체를 기준으로 예상 파괴하중의 1/2까지는 하중제어로 가력하였고, 그 이후에는 변위제어로 가력하였다.

2.2 콘크리트 변형률

그림 1은 각 실험체에 대하여 회전각에 따른 매립된 철골보 하부 및 패널영역에서의 콘크리트 변형률 분포를 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 콘크리트 변형률은 강재 웨브가 항복한 이후 다소 증가하였으며 상대적으로 큰 하중을 콘크리트 패널에 의해 전달하는 것으로 나타났다. 모든 실험체의 경우 철골 보 중앙 하부 C점에서의 콘크리트의 최대변형률은 $486\sim 820(\times 10^{-6})$ 범위로 A 및 B점에서의 변형률에 비해 1.59~2.25배 크게 났으며 이는 하중 작용시 플랜지 하부에서의 지압응력이 보 중앙에 집중적으로 작용하였기 때문으로 판단된다.

그림 1(a)에서 나타난 바와 같이 HCWS-PSF 실험체에서 내부패널영역에서의 최대 변형률은 $9,727(\times 10^{-6})$ 이며 외부 패널에서의 최대 변형률에 비해 약 23% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 하중 작용시 콘크리트의 압축영역이 외부패널영역에서 형성되었기 때문으로 판단된다.

HCWS-PSFF 실험체의 경우, 그림 1(b)에서 나타난 바와 같이 내부 패널영역 점 C에서의 최대 변형률은 각각 7,781 및 $6,225(\times 10^{-6})$ 이며 외부 패널영역 점 A에서의 변형률에 비해 약 2배 크게 나타났다. 이는 플랜지 사이에 FBP에 의해 내부 콘크리트를 효율적으로 구속함으로써 내부 패널영역에서 콘크리트의 압축 스트럿을 형성하여 이에 따른 영향에 기인한 것으로 사료된다. HCWS-PSFFT 실험체의 경우,

그림 1(c)에서 나타난 바와 같이 외부패널의 콘크리트

표1. 실험체 계획

실험체명	접합부상세			수평타이 철골보 웨브영역	스터드 볼트			벽체 철근	
	①	②	③		개수 (n)	직경 (mm)	길이 (mm)	중앙부	매립부
HCWS-PSF	-	-	●	-	12	19	125	HD13	HD13
HCWS-PSFF	●	●	-	-	12	19	125	HD13 @230	HD13 @230
HCWS-PSFFT	●	●	●	HD13@230	12	19	125		

① FBP: 지압플레이트(Face bearing plate)

② HT: 수평타이(Horizontal ties)

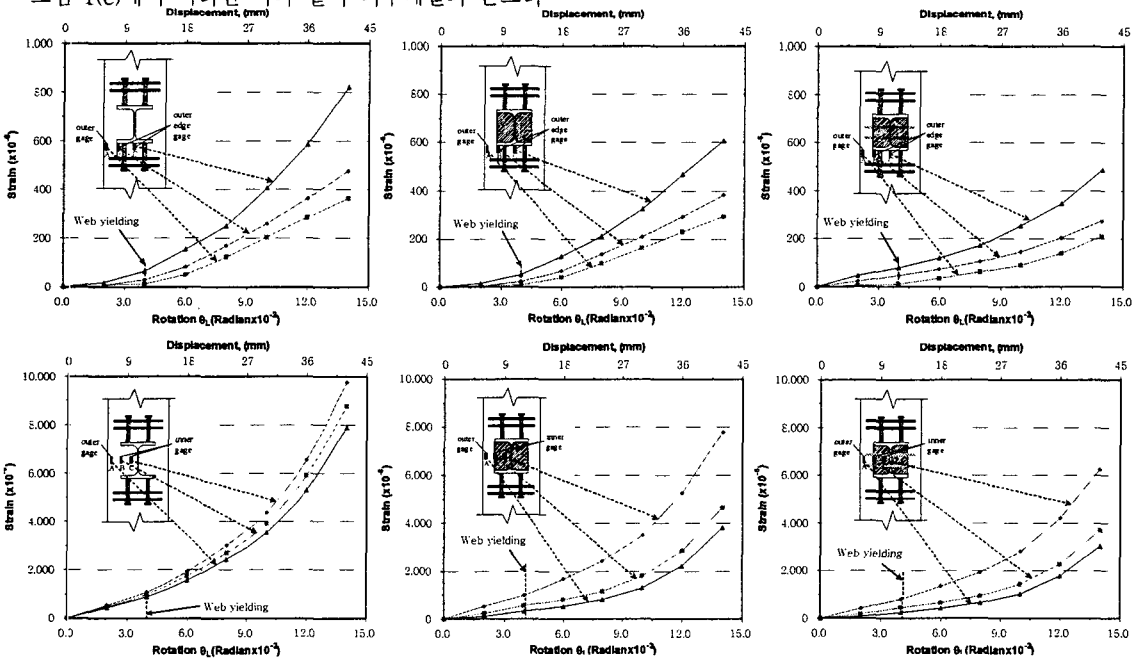
③ ST: 스투드 볼트(stud bolt)

표2. 콘크리트의 기계적 특성

슬럼프 (mm)	28일 압축강도 (MPa)	극한변형률 ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 (GPa)	포화중비 (-)
145	30.0	3,116	25.3	0.16

표3. 강재의 기계적 특성

구분	항복강도 (MPa)	항복변형률 ($\times 10^{-6}$)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
종류				
철근				
HD10	398	2,325	566	171
HD13	400	2,380	555	168
철골				
D 19 스투드	442	2,650	600	167
Flange	352	1,827	489	192
Web	339	1,682	461	216



(a) HCWS-PSF 실험체

(b) HCWS-PSFF 실험체

(c) HCWS-PSFFT 실험체

그림1. 매립영역에서의 콘크리트 변형률

트의 변형률은 상대적으로 HCWS-PSFFT 실험체에 비해 작게 나타으며 이는 수평타이에 의해 콘크리트의 외부 패널을 효율적으로 구속하였기 때문으로 판단된다.

2.3 철골보 웹 응력

그림 2는 각 실험체에 대하여 정가력시 각 사이클 별 접합부 매립영역에서 철골보 웹의 응력분포를 비교하여 나타낸 것이다. HCWS-PSF 실험체의 경우 그림 11(a)에서 나타난 바와 같이 매립면과 매립영역 단부(A 및 C점)에서의 응력은 매립된 철골보 중앙부(B점)에서의 응력에 비해 크게 나타났다. 이는 하중작용시 점 A 및 C에서 지압응력이 발생하여 이에 따른 영향에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT 실험체의 경우 그림 11(b)에서 나타난 바와 같이 응력분포는 비대칭으로 점 A 및 C에서 보다 매립영역의 중간 위치인 B점에서 응력이 가장 크게 나타났다. 특히, 벽체면에서 25cm떨어진 위치 A점에서의 응력은 벽체면 C점에서의 응력에 비해 20% 작게 나타났다. 이는 지압응력의 대부분을 FBP에 의해 주로 저항하여 상대적으로 매립면과 매립영역 단부의 철골보 웹가 중앙부에 비해 하중을 적게 전달하였기 때문으로 판단된다.

전술한 결과로 판단해 볼 때, 강재 웹패널에서 전달하는 전달력은 접합부 상세에 따라 현저한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

2.4 스티드 볼트 응력

그림 3은 각 실험체에 대하여 정가력시 접합부 매립영역 철골 보 상·하부에서 스티드 볼트의 응력분포와 전형적인 휨이론에 의한 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 정가력시, 철골 보 상부의 스티드 볼트는 인장상태, 하부 스티드 볼트는 압축상태로 모든 실험체의 경우 스티드 볼트의 응력은 탄성한도 이내에 놓이는 것으로 나타났다.

HCWS-PSF 실험체의 경우, 부재 회전각 0.020rad에서 스티드 볼트의 인장 및 압축응력은 각각 14.5 및 13.0MPa로 HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT와 대등한 수치를 보이고 있었다. 그러나, 실험값은 휨이론에 의한 예측된 값의 약 1/4~1/5범위로 나타났으며 이는 병렬 전단벽 접합부에서의 미소균열에 의한 고정도가 감소하여 이에 따른 영향에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 모든 실험체의 경우 최대하중 이후 부재 회전각 0.120rad에서 스티드 볼트의 응력은 88.1~133.8MPa범위로 이론에 의한 값의 약 1/4~1/2로 나타났다. 실험 및 휨이론에 의한 응력의 차이점은 병렬 전단벽 접합부에서 스티드 볼트에 의한 하중의 전달이 이론에 의한 예측값에 비해 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 하중전달의 감소는 병렬 전단벽 접합부에서의 집중적인 균열에 의해 상·하부의 스티드 볼트와 콘크리트의 부착력 감소로 인해 분리되는 경향에 기인한 것으로 판단된다. 전술한 유사한 거동은 Wight 등¹³⁾의 RCS 접합부 실험

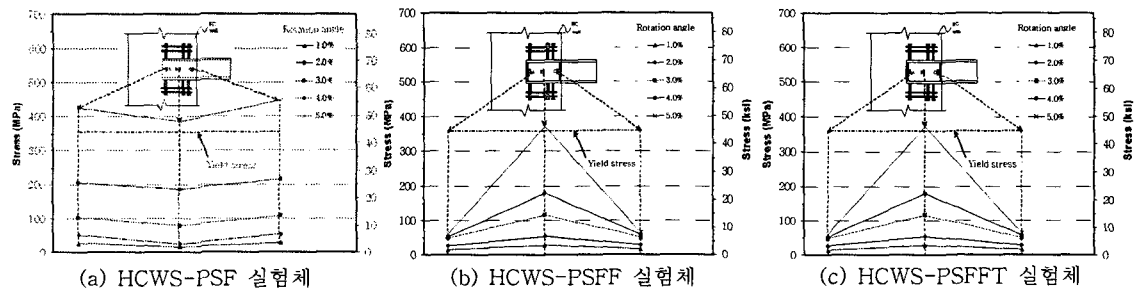


그림 2. 매립된 철골보 웹의 응력

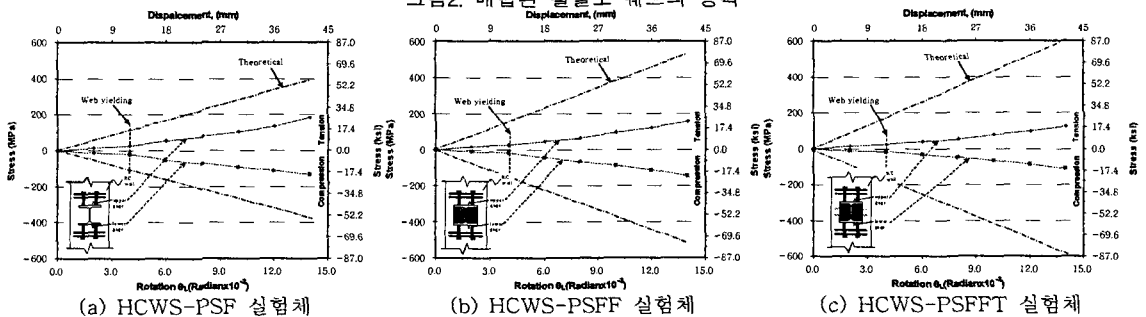
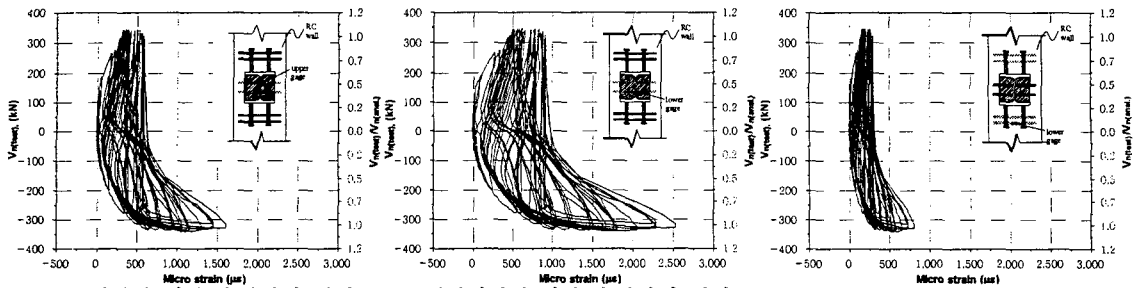


그림 3. 스티드 볼트의 응력



(a) 패널영역의 상부 수평타이 변형률 (b) 패널영역의 하부 수평타이 변형률 (c) 철골보 하부 수평타이 변형률
 그림 4. 수평타이의 변형률

(ACI-ASCE "Recommendation", 1994)에서도 유사한 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다.

2.5 수평타이의 변형률

그림 4는 FBP 및 수평타이에 의해 접합부 보강된 HCWS-PSFFT 실험체에 대하여 패널영역 및 철골보 상·하부에서 수평타이의 변형률을 나타낸 것이다. 그림 4(a) 및 (b)에서 나타난 바와 같이 균열이 발생되기 전에는 접합부 매립영역에서의 작은 인장응력으로 인하여 변형률은 무시할 정도로 작게 나타났으며 대부분의 하중은 매립영역의 철골보 웨브 및 콘크리트에 의해 저항하는 것으로 나타났다. 그러나 균열이 발생된 이후에는 수평타이의 변형률이 급격하게 증가하였으며 콘크리트를 효율적으로 구속하는 것으로 나타났다. 특히, 정 및 부가력시 수평타이의 변형률은 균열발생 이후 비대칭으로 나타났으며 이는 접합부 패널영역의 균열발생 시점이 다르게 나타났기 때문으로 사료된다. 최종과괴시 패널영역에서의 타이의 변형률은 모두 탄성한도를 초과하는 것으로 나타났다. 그림 4(c)는 철골보 상·하부의 수평타이 변형률을 나타낸 것으로 철골보 상·하부의 수평타이는 패널영역에서의 수평타이와 유사한 거동을 하는 것으로 나타났으나 실험종료시까지 상·하부 수평타이는 모두 탄성한도를 초과하지 못하는 것으로 나타났다.

3. 결론

(1) 모든 실험체의 경우 플랜지 중앙 하부 및 내부패널영역에서 콘크리트의 변형률은 하부 연단 및 외부 패널에서의 변형률에 비해 크게 나타났으며 이는 철골보 단면 중앙부에서 하중이 대부분 전달되었기 때문으로 판단된다.

(2) HCWS-PSF 실험체의 경우 매립면과 매립영역 단부(A 및 C점)에서의 응력은 매립된 철골보 중앙부(B점)에서의 응력에 비해 크게 나타났으나, HCWS-PSFF 및 HCWS-PSFFT 실험체의 경우 매립면과 매립영역 단부(A 및 C점)에서 보다 매립영역의 중간(B점)에서 응력이 가장 크게 나타났다.

(3) 모든 실험체의 경우 최대하중 이후 부재 회전각 0.120rad에서 스테드 볼트의 실제응력은 88.1~133.8MPa범위로 이론에 의한 값의 약 1/4~1/2로 작게 나타났으며 이는 실험 수행시 병렬 전단벽 접합부에서의 집중적인 균열에 의해 상·하부의 스테드 볼트와 콘크리트의 부착력 감소로 인해 분리되는 경향에 기인한 것으로 판단된다.

(4) HCWS-PSFFT 실험체에 대하여 패널영역의 수평타이의 변형률은 균열이 발생되기 전에는 작은 인장응력으로 인하여 변형률은 무시할 정도로 작게 나타났으나, 균열 발생 이후에는 수평타이의 변형률이 급격하게 증가하였으며 콘크리트를 효율적으로 구속하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 병렬 전단벽 접합부를 FBP 및 수평타이로 보강한 HCWS-PSFFT 실험체가 HCWS-PSF 및 HCWS-PSFF 실험체에 비해 내진성능이 월등히 탁월한 것으로 나타났으며 지진하중 작용시, 병렬 전단벽이 바람직한 거동을 확보할 수 있는 접합부 보강상세라 판단되며 향후 이의 영향을 고려한 패널 전단강도 설계식 정립이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Gong B., Shahrooz B. M., Gillum A. J., "Cyclic Response of Composite Coupling Beams," ACI Committee 335 Special Publication, 1997.
- ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. Guideline for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994; 120(8), 2330-51.
- Sheikh T.M., Deierlein G.G., Yura J.A., Jirsa J.O. Beam-column moment connections for Composite Frames: Part 1, Journal of Structural Engineering., 1989; ASCE, 115(11), 2858-76.
- Yun, Hyun-Do et al. "Shear strength of the connection between a steel coupling beam and a reinforced concrete shear wall in a hybrid wall system, Journal of Constructional Steel Research, 61(7), 2005, In press