

2HC 합성구조 시스템의 구조성능실험

오민욱¹ · 최인락^{2*} · 김기범³ · 정석재⁴ · 이재환⁵

¹석사과정, 호서대학교, 재난안전시스템학과, ²부교수, 호서대학교, 건축토목공학부, ³석사과정, 울산대학교, 건축공학과,
⁴대표, 3D엔지니어링, ⁵수석연구원, 3D엔지니어링

Structural Performance Tests for 2HC Composite Structural System

Oh, Min Uk¹, Choi, In Rak^{2*}, Kim, Gi Beom³, Jung, Suk Jae⁴, Lee, Jae Hwan⁵

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Disaster Safety System, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

²Associate Professor, Div. of Architecture and Civil Engineering, Hoseo University, Asan, 31499, Korea

³Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Ulsan University, Ulsan, 44610, Korea

⁴CEO, 3D Structural Engineers, Hanam, 12925, Korea

⁵Principal Research Engineer, 3D Structural Engineers, Hanam, 12925, Korea

Abstract - In this study, in order to verify the structural performance of the proposed 2HC composite structure system, bending tests of 2HC composite beams and cyclic-loading tests to evaluate the seismic performance of beam-column joints were conducted. In the bending test of 2HC composite beam, two-point loading tests were conducted with test parameter of the presence of stud anchor installed on the connecting steel plate on the H-beam lower flange and the flexural strength was evaluated according to the proposed flexural strength evaluation method and compared with the test results. In the 2HC beam-column joint test, cyclic-loading tests were conducted to verify the rotational performance of the joint. As a result of the bending test, regardless of the presence of stud anchor, crushing of the slab concrete or rupture of the steel beam sections were not occurred until the maximum load of test specimens. Also, flexural strength of the specimens can be approximately estimated using the plastic stress distribution method in the steel structure building design code (KDS 41 31 00: 2019). According to the composite beam-column joint cyclic loading tests, both specimens using the same detail exhibited the rotation performance of more than 5 % required for the joint of the composite intermediate moment resisting frame (C-IMF).

Keywords - 2HC composite beam, Flexural strength test, Bending strength, Composite beam-column joint, Cyclic loading test

1. 서론

최근 국내에서 공기단축을 위한 역타공법이 활발히 적용되고 있다. 국내에서 개발되는 역타공법은 토압에 대해 슬래브 지지형태에 대한 거푸집 개발이 대부분이어서 고하중이 발생하는 고심도 지하 구조물의 경우 이러한 일반적인 공법의 적용에 어려움이 있을 수 있다. 특히, 기존의 대부분의 역타공법에서는 토압에 대해 슬래브가 횡 지지대 역할을 하여 보 부재의 허용압축내력이 작아 토

압이 증가하는 경우 과도한 물량이 소요되며 적용이 제한적이고, 기둥 형상에 따른 접합부가 복잡하며 가설부재 시공으로 시공성이 떨어지는 단점이 있다. 바닥 슬래브 지지 없이 장경간의 보가 큰 축력(토압)을 지지하려면 H형강 등 기존 방식으로는 과도한 물량이 소요되며, 기존공법보다 구조성능 및 안전성 향상과 공기단축이 가능한 새로운 역타공법 개발이 필요한 실정이다.

Rhim *et al.*^[1]은 철골 역타공법에서 철골 스트럿의 집중하중을 분산시키면서 동시에 수평 지공보의 역할을 수행하는 개방형 슬래브를 개발하여 압축시험을 진행하여 토압에 대한 하중저항성능을 검증하였다. Lee *et al.*^[2]과 Lim *et al.*^[3]은 철근콘크리트 테두리보 대신 철골 좌대에 의해 지지되는 매립형 철골 띠장을 적용하는 CWS(continuous wall system) 공법을 개발하고 시공성과 경제성을 분석하였다. Kim *et al.*^[4]은 일반적인 U형 합성보^{[5],[6]}를 개선한 증고절감형 세미슬립 AU 합성보를 개발하여 시

Note.-Discussion open until June 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 02, 2022; revised on September 11, 2022; approved on September 25, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-41-540-5777 Fax. +82-41-540-5778

E-mail. irchoi@hoseo.edu

공단계 안전성을 평가하였다. AU 합성보는 강판을 성형 조립한 U형 단면 상부에 전단연결재 역할을 하는 덮개형 강판을 부착하여 구성한 단면 내부에 콘크리트를 타설하여 충고절감이 가능한 합성보로, 단면에 충전된 콘크리트가 경화되기 전 강재보가 하중을 지지하도록 개발되었다.

2HC 합성구조는 Fig. 1과 같이 한 쌍의 기성 H형강을 좌우로 이격시켜 강재나 전단연결재로 서로 연결한 형태로 보나 기둥 단면의 약축 성능이 향상되도록 구성하였다. 또한 폐단면내 콘크리트를 충전하여 부재의 축압축 성능을 향상시킬 수 있다. 일반적으로 절곡강재를 사용하는 U형 합성보나 AU 합성보와 달리 기성 H형강 제품을 이용하여 부재를 구성함으로써 부재의 제작성이 우수하여 부재의 제작기간 및 납품기간 단축이 가능하며, 고하중용 부재로 수평부재뿐만 아니라 수직부재에도 적용이 가능하다. 지하층 역타공법에 적용할 경우 폐단면 내 콘크리트를 프리캐스트 형태로 제작하여 자체로 슬래브 없이 토압을 지지하여 공사 진행이 가능하므로 지하골조 선행 작업으로 기존의 역타공법들과 차별성이 있는 공법이다.

이 연구에서는 제안한 2HC 합성보의 휨성능과 보-기둥 접합부의 내진성능을 평가하기 위하여 구조실험을 진행하였다. 2HC 합성보의 휨성능 실험에서는 합성보 내부의 하부강판에 설치한 강재앵커의 유무에 따른 합성거동의 차이를 비교하고자 2점 가력을 통한 휨실험을 진행하였으며, 제안한 휨강도식에 따라 휨내력을 평가하고 실험결과와 비교하였다. 2HC 합성보와 2HC 합성기둥의

보-기둥 접합부 반복가력실험에서는 제안한 브래킷 타입의 접합부의 내진성능을 평가하기 위한 실험을 진행하였고, 접합부의 회전성능을 검증하였다.

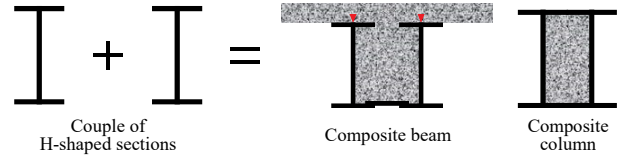
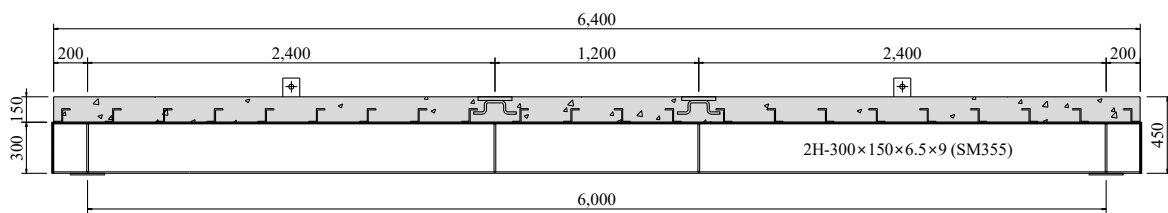


Fig. 1. 2HC composite section shapes

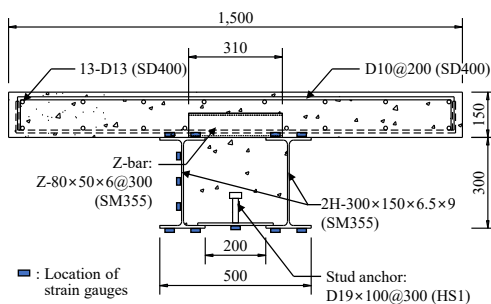
2. 합성보 휨실험

2.1 실험체 단면 상세

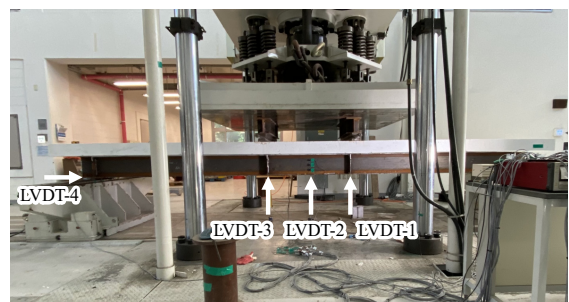
Fig. 1에 나타난 것과 같이, 제안한 2HC 합성구조 시스템은 일반적인 H형강을 사용한 노출형 합성보 대비 횡좌굴 강도 및 약축방향 휨 강성을 향상시키기 위하여 한 쌍의 H형강 하부플랜지를 강판으로 서로 연결하였으며, 상부플랜지에는 전단연결재로 Z-bar를 설치하여 일체성을 확보하고 부재 내부에 콘크리트를 충전할 수 있는 박스형태로 구성하였다. 부재 단면의 상부에는 콘크리트 슬래브를 타설하여 2HC 강재보와 콘크리트 슬래브가 일체화 거동을 할 수 있도록 제작하였다. 제안한 2HC 합성보 단면의 휨성능을 평가하고 하부 강판에 설치한 스티드 앵커 유무에 따른 합성효과를 검증하기 위하여 휨실험을 계획하였다(Fig. 2 참조).



(a) Side view



(b) Cross-section of 2HC composite beam



(c) Test set-up

Fig. 2. Details of bending test specimens and test set-up (Unit: mm)

2.2 실험계획

2HC 합성보의 휨성능 평가를 위해 Table 1과 같이 2개의 휨실험체를 구성하였다. 강재보와 콘크리트 사이의 완전합성거동을 위하여 강재보 플랜지 상단에 Z-bar 전단연결재를 설치하였으며, 합성보에 작용하는 수평전단력에 대한 편심의 영향을 고려하기 위하여 H형강 하부플랜지 연결강판에 설치한 스테드 앵커의 유무를 변수로 실험체를 계획하였다. 2HC 합성보는 서로 이격된 한 쌍의 H형강(2H-300×150×6.5×9, SM355) 하부를 9 mm 두께의 강판(PL-250×9, SM355)을 설치하여 연결하고 상부플랜지에 Z-bar 전단연결재(Z-80×50×6, SM355)를 설치한 형태로, 상부에 1,500 mm × 150 mm 슬래브를 타설하였다.

실험체의 슬래브 및 H형강 내부에 충전된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck})를 27MPa로 계획하였으며, H형강을 포함한 강재는 모두 SM355 강종을 사용하였다. 실험체는 완전합성거동을 위해 6 mm 두께의 강재앵커(Z-bar, Z-80×50×6)를 H형강 플랜지 상부에 300 mm 간격으로 설치하였다. H형강 내부의 스테드 앵커 설치 유무에 따른 휨성능을 비교하기 위하여 H형강 하부플랜지에 위치한 강판(PL-250×9)에 직경 19 mm의 스테드 앵커를 300 mm 간격으로 설치하였다.

Table 2는 2HC 합성보의 재료시험결과를 나타낸다. 강재는 KS B 0801^[8]을 준용하여 판재인 PL-SM355(6T) 인

장시험편은 5호 정형시험편을, 그 외의 시험편은 1A호로 각 3개씩 제작하여 시험을 진행하였다. 소재인장시험 결과 PL-SM355(9T) 시험편의 경우 설계기준강도보다 약간 낮은 값을 나타냈으며, 그 외 시험편에서는 설계기준강도 이상의 값을 보였다. 콘크리트 공시체는 KS F 2405 시험방법에 따라 압축강도시험을 진행하였으며, 평균 압축강도는 24 MPa, 탄성계수는 25,820 MPa로 나타났다.

2HC 합성보의 휨실험은 계명대학교 첨단건설재료시험센터에서 5,000 kN의 UTM을 사용하여 진행하였다. 실험은 0.05 mm/s 속도로 변위제어방식을 적용하여 단조 가력가였으며, 실험체는 양단부 단순지지로 설정하였다. 가력위치는 합성보 길이(L)의 2/5 지점과 3/5 지점에서 2점 가력하여 중앙부의 순수 휨모멘트 구간을 관찰하였다.

실험체의 실험 셋업 및 계측기 설치 위치는 Fig. 2(c)에 나타났다. 합성보의 하중가력에 따른 처짐량을 계측하기 위해 양측 가력점 하부와 실험체 중앙부에 수직 변위계를 설치하였으며, H형강 내부 콘크리트와 강재의 슬립을 계측하기 위해 단부에 변위계를 설치하였다. 변형률 게이지를 합성보 강재 중앙부에 부착하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 하중-변위 관계

2HC 합성보의 휨실험 결과 하중-변위 관계를 Fig. 3에

Table 1. Summary of bending test specimens

Specimens	Beam	Slab	Shear connector
2HC-CB-ZO	2H-300×150×6.5×9 (SM355) PL-250×9 (SM355)	1,500×150 (C27)	Z-80×50×6@300
2HC-CB-ZS			- Z-80×50×6@300 φ19@300

Table 2. Material properties of bending test specimens

Material	Thickness (mm)	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Yield ratio	Elongation (%)
PL-SM355(6T)	6.21	187.3	450.3	557.3	0.81	27.3
PL-SM355(9T)	9.83	189.7	331.7	470.0	0.71	27.3
FL-SM355(9T)	8.67	209.7	369.7	532.7	0.69	25.7
Web-SM355(6.5T)	6.20	212.0	398.3	546.0	0.73	25.3
SD500-D22	387.1	180.9	577.7	742.0	0.78	15.7
Concrete	24.0 MPa					

나타냈다. Fig. 3에서 항복점(Δ 표시)은 하중-변위 곡선에서 원점과 $0.75P_{max}$ 를 연결한 직선과 최대하중(\circ 표시)의 수평선이 만나는 지점의 수직선이 하중-변위 곡선과 만나는 점으로 정의하였다^[7]. 초기강성(K_i)은 원점과 최대하중의 수평선과 만나는 지점을 연결한 직선의 기울기로 산정하였다. Table 3에 실험체의 초기강성(K_i), 항복강도(P_y), 항복변위(δ_y), 최대하중(P_{max}), 최대변위(δ_{max})를 정리하여 나타냈다.

Table 3. Test results of bending test

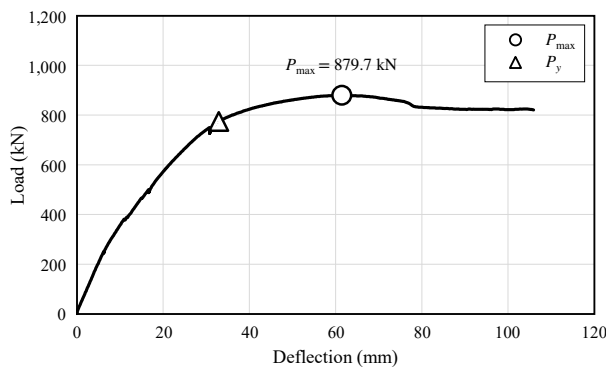
Specimens	K_i (kN/mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (kN)
2HC-CB-ZO	23.6	774.8	32.9	879.7	61.5
2HC-CB-ZS	22.5	784.3	34.8	892.8	62.3

실험 결과 2HC 합성보는 하부 강판의 스티드 앵커 설치 유무에 상관없이 가력 초기 선형적인 거동을 보였으며 초기강성은 각각 스티드 앵커를 설치하지 않은 2HC-

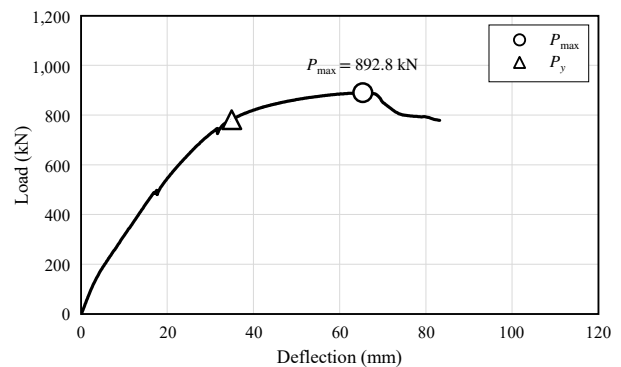
CB-ZO 실험체(이하 ZO 실험체)에서 23.6 kN/mm로 나타났고, 스티드 앵커를 설치한 2HC-CB-ZS 실험체(이하 ZS 실험체)에서는 22.5 kN/mm로 나타나 스티드 앵커를 설치하지 않은 ZO 실험체가 5% 정도 높은 초기강성값을 보였지만 그 차이는 크지 않았다. 항복하중(P_y)은 ZO 실험체가 774.8 kN, ZS 실험체가 784.3 kN으로 나타났으며, 최대하중(P_{max})은 ZO 실험체가 879.7 kN, ZS 실험체가 892.8 kN으로 나타나 스티드 앵커를 설치하지 않은 ZO 실험체가 스티드 앵커를 설치한 ZS 실험체에 비해 약간 작은 값을 나타냈다. 하지만 스티드 앵커 설치 유무와 관계없이 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.

2.3.2 하중-변형률 관계

2HC 합성보 실험체 단면의 하중단계별 변형률 분포를 검토하기 위하여 콘크리트 슬래브 철근과 H형강 플랜지와 웹, 하부 강판에 부착한 변형률 게이지를 설치하였다. 하중단계별 하중-변형률 관계를 Fig. 4에 나타냈다. 하중-변형률 관계는 실험체의 중앙부 강재 단면에 부착

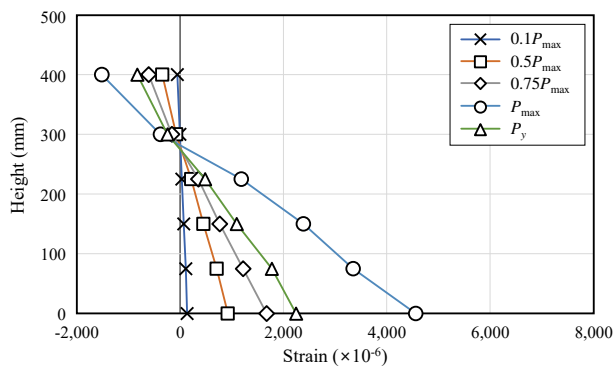


(a) 2HC-CB-ZO

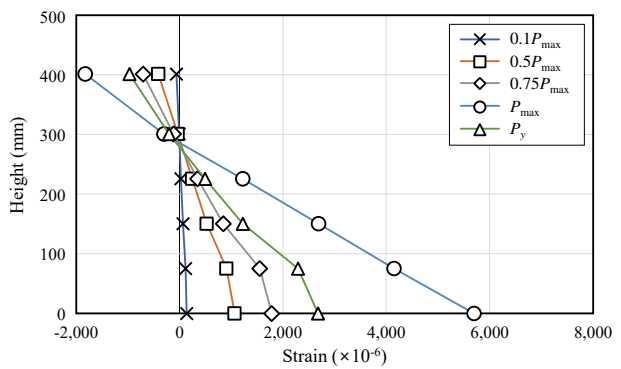


(b) 2HC-CB-ZS

Fig. 3. Load–displacement curve of bending test specimens



(a) 2HC-CB-ZO



(b) 2HC-CB-ZS

Fig. 4. Strain distribution of bending test specimens

한 변형률 게이지 값을 하중단계에 따라 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 하중이 증가함에 따라 단면의 변형률이 선형적으로 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 하부 강판에 위치한 스티드 앵커 설치 유무에 관계없이 유사한 하중-변형률 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 하중 증가에 따라 중립축을 기준으로 압축, 인장거동을 확인할 수 있었으며, 두 실험체 모두 항복 이후 소성화를 통해 연성적인 거동을 보인 것을 확인하였다.

2.3.3 합성보 단부 슬립

H형강 내부에 충전된 콘크리트의 슬립량을 계측하기 위하여 Fig. 2(c)에 나타낸 것과 같이 실험체 단부에 변위계를 설치하여 측정하였다. 계측 결과 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 하중이 증가함에 따라 단부 콘크리트 슬립량이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 하부 강판에 스티드 앵커를 설치하지 않은 ZO 실험체에서 최대하중시 0.75 mm 슬립량이 발생하였고, 스티드 앵커를 설치한 ZS 실험체에서 0.20 mm 슬립량이 발생한 것을 확인하였다. 즉, 하부 강판에 스티드 앵커를 설치한 경우 슬립량이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 실험 결과 최대 슬립량은 1 mm 이내로 스티드 앵커 설치 유무에 따른 슬립 발생은 무시할 수 있는 수준인 것을 알 수 있다.

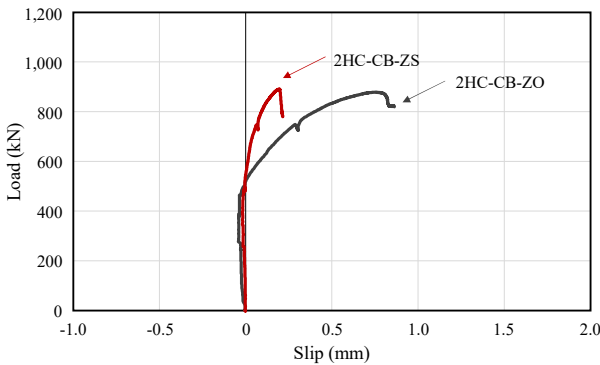


Fig. 5. Load-slip curve of bending test specimens

2.4 휨성능 평가

2HC 합성보의 설계휨강도는 건축물 강구조 설계기준 (KDS 41 31 00: 2019)^[9]의 소성응력분포로 가정하여 산정하였다. 콘크리트의 유효 압축응력은 압축구간에 균등하게 분포하는 것으로 가정하고, 인장강도는 무시하였으며, 강재의 항복강도는 강재 단면의 인장, 압축구간에 균등하게 분포한다고 가정하였다. 콘크리트 슬래브와 강

재 단면 사이의 수평전단력은 Z-bar가 부담하는 것으로 설계하였으며, Choi *et al.*^[10]의 연구결과에 따라 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)과 AISC 360-16^[11]의 C형강 앵커 전단강도평가식을 이용할 경우 Z-bar 앵커의 수평전단강도를 과대평가하여 식 (1) - 식 (3)의 수정된 전단강도 평가식을 적용하여 완전합성거동을 하도록 설계하였다.

$$Q_n = Q_{n,s} + Q_{n,c} \tag{1}$$

$$Q_{n,s} = 1.8(t_f + t_w)\sqrt{L_a}\sqrt{f'_c E_c} \tag{2}$$

$$Q_{n,c} = 1.8A_{ch} \tag{3}$$

여기서, $Q_{n,s}$ = Z-bar 앵커의 전단강도,

$Q_{n,c}$ = 콘크리트 수평전단강도,

A_{ch} = 콘크리트 수평전단면적,

t_f = C형강 앵커의 플랜지 두께,

t_w = C형강 앵커의 웨브 두께,

L_a = C형강 앵커의 길이,

f'_c = 콘크리트 압축강도,

E_c = 콘크리트 탄성계수 (= $8500\sqrt{f'_c}$).

강재보는 콘크리트와의 합성효과로 횡좌굴이 발생하지 않은 것으로 가정하였으며, 2HC 합성보의 휨강도는 일반적인 노출형 합성보와 유사하게 식 (4)와 같이 평가하는 것으로 제안하였다(Fig. 6 참조).

$$M_n = C(d_1 + d_2) + P_y(d_3 - d_2) \tag{4}$$

여기서, M_n = 설계휨강도,

$C = (0.85f'_c A_c, F_y A_s)$ 중 최솟값,

A_c = 유효폭 내의 콘크리트 단면적,

F_y = 강재의 항복강도,

P_y = 강재단면의 인장강도($P_{y,H}$ = H형강 단면의 인장강도, $P_{y,P}$ = 하부강판의 인장강도),

d_1 = 콘크리트의 압축력 C 의 중심으로부터 강재 단면의 상단까지 거리,

d_2 = 강재단면의 압축력 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리(강재단면에 압축력이 작용하지 않는 경우 $d_2 = 0$),

d_3 = P_y 가 작용하는 강재단면의 중심으로부터 강재단면의 상단까지 거리($d_{3,H}$ = H형강 단면 중심까지 거리, $d_{3,P}$ = 하부강판 중심까지 거리).

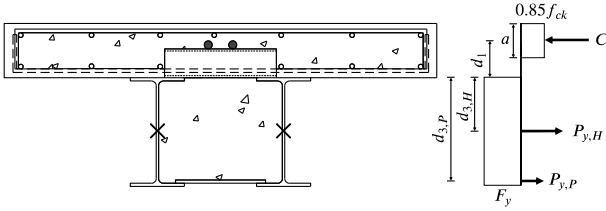


Fig. 6. Stress distribution in 2HC composite beam section

식 (1)에 Table 2의 재료시험결과를 반영하여 소성응력분포법으로 산정한 설계휨강도(M_n)를 실험체의 최대휨모멘트(M_{max})와 비교하여 Table 4에 나타냈다. 여기서, 최대휨모멘트는 가력하중에 의한 실험체의 중앙 경간에서 작용하는 휨모멘트로 계산하여 나타냈으며, 설계휨강도는 자중으로 인해 발생하는 휨모멘트를 추가하여 산정하였다.

Table 4. Comparison of calculated bending moment strength with test results

Specimens	M_{max} (kN·m)	M_n (kN·m)	M_{max}/M_n
2HC-CB-ZO	1,094.0	1,046.1	1.05
2HC-CB-ZS	1,109.6	1,046.1	1.06

2HC 합성보의 최대휨모멘트에 대한 휨강도 비(M_{test}/M_n)는 스티드 앵커를 설치하지 않은 ZO 실험체가 1.05 배, 스티드 앵커를 설치한 ZS 실험체가 1.06배로 나타나 제안한 설계휨강도와 실험한 최대모멘트가 유사한 것으로 나타났다. 즉, 2HC 합성보의 설계휨강도는 건축물 강구조 설계기준의 소성응력분포로 가정하여 휨강도를 안전측으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

3. 반복가력실험

3.1 실험계획

제안한 2HC 기둥-보 접합구조의 구조성능을 검증하기 위하여 브래킷 타입의 보-기둥 접합부 실험체를 구성하여 반복가력실험을 계획하였다. 접합부 반복가력 실험체는 동일한 상세의 접합부 실험체에 대해 2개의 실험체를 제작하였다. 접합부 실험체 상세는 Fig. 7에 나타났다.

2HC 접합부 실험체에서 기둥은 2H-500×200×10×16 (SM355)를 사용하였고, 폭 200 mm PL-200×16(SM355)을 사용하여 2개의 기둥을 서로 연결하여 제작하였다. 접

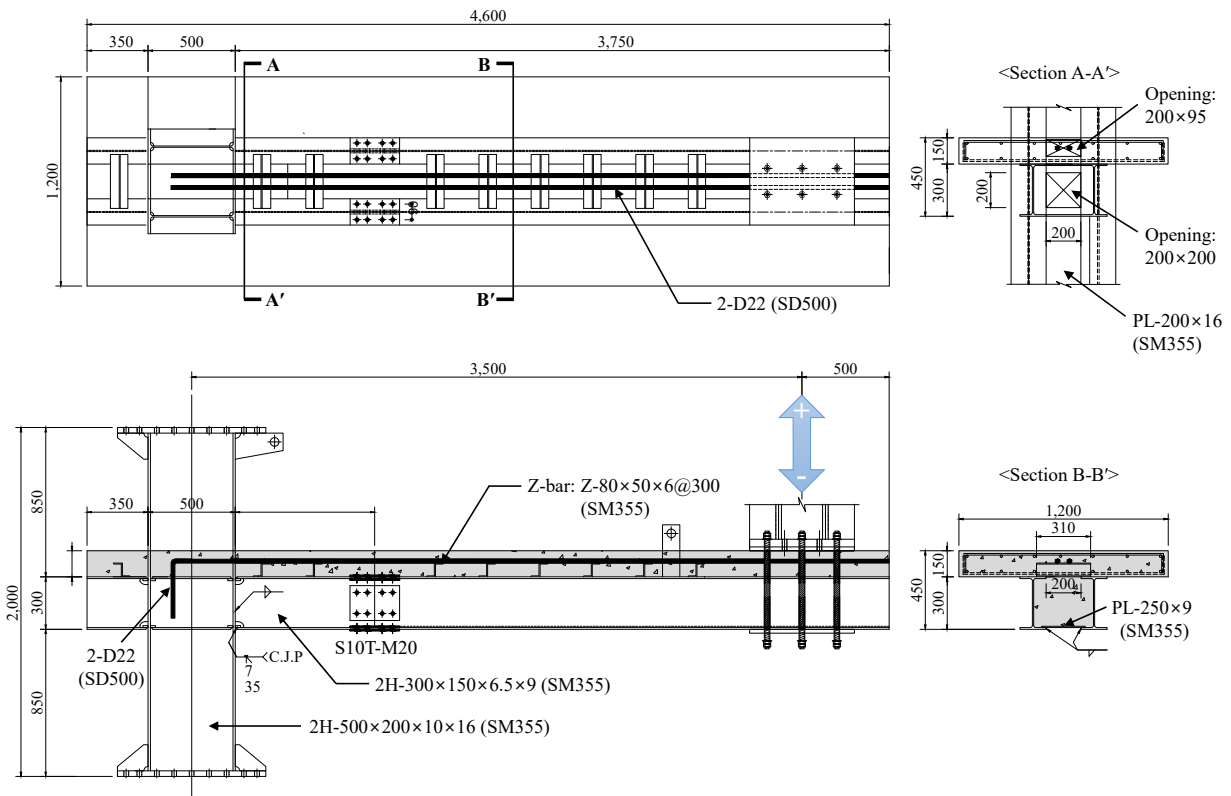


Fig. 7. Details of 2HC beam-column joint test specimen (Unit: mm)

합부의 보 브래킷은 2H-300×150×6.5×9(SM355) 부재 하부에 강판 PL-200×9(SM355)을 설치하여 연결하고 상부 플랜지에 전단연결재 Z-bar를 설치한 형태로, 1,200 mm × 150 mm 슬래브를 타설하여 상부에 2-SHD22(SD500) 철근을 기둥 내부로 정착하여 설치하였다(Fig. 7 참조).

2HC 접합부 실험체에 사용된 강재와 콘크리트의 재료는 합성보 휨강도 실험체와 동일하게 적용하였다. 슬래브에 배치한 SHD22(SD500) 철근의 소재인장시험 결과 Table 2에 나타난 것과 같이 평균항복강도 577.7 MPa, 평균인장강도 742.0 MPa, 연신율 15.7 %로 설계기준강도 이상의 값을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 실험체의 실험 셋업 및 계측기의 위치를 나타낸다. 접합부 반복가력실험은 포스코 철강솔루션센터 강구조 실험동에서 진행되었으며 3,000 kN의 actuator를 사용하였다. 가력계획은 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)에 따라 진행하였으며, 내진성능 검증을 위한 표준 반복하중에 따라 층간변위비 0.375 %, 0.5 %, 0.75 %를 각각 6사이클씩 반복가력하고, 1.0 %를 4사이클씩, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 %, 5.0 %, 6.0%는 2사이클씩 반복가력하였다. 실험은 실험체 보 끝단에 하중을 반복재하하는 방식으로 진행되었다. 하중 재하는 0.01 mm/s의 속도로 변위제어 반복가력하였으며, 가력점과 기둥 중심축의 거리는 3,500 mm이고, 실험 중 횡자굴 방지를 위해 횡지대대를 설치하였다. 접합부 가력부의 변위와 강체변형·전단변형을 측정하기 위해 가력부 하부에 수직변위계와 기둥에 수평 변위계를 설치하였고, 강재의 국부적인 변형을 분석하기 위해 변형률 게이지를 부착하였다.

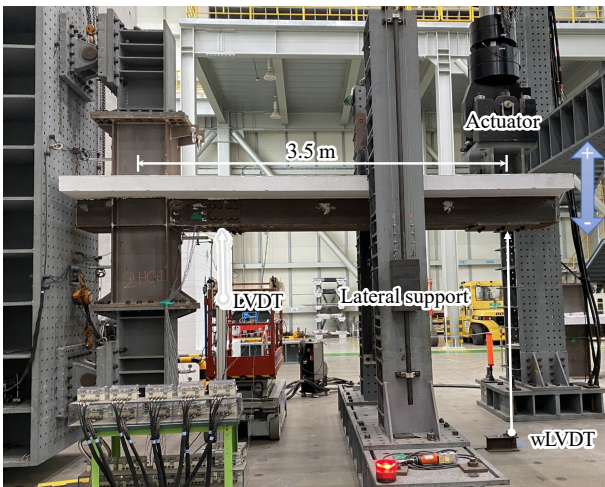
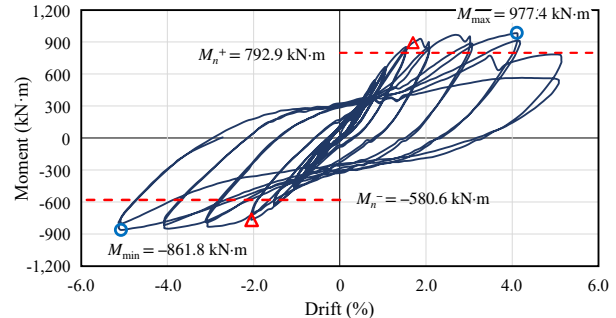


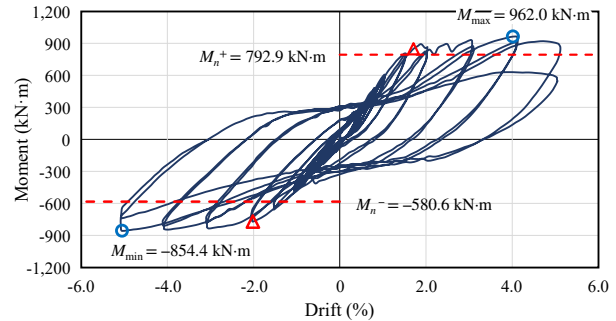
Fig. 8. Test set-up for beam-column joint tests

3.2 실험결과

Fig. 9은 각 실험체의 모멘트-회전각 관계를 나타내며, Fig. 10에 실험체의 최종 파괴거동을 나타냈다. 여기서, 접합부에 작용하는 휨모멘트는 기둥면에서의 휨모멘트 값으로 계산하여 나타냈다. 실험 결과 동일한 상세를 사용한 두 실험체 모두 유사한 거동특성을 보였으며, 5 % 회전각의 우수한 변형능력을 나타냈다.

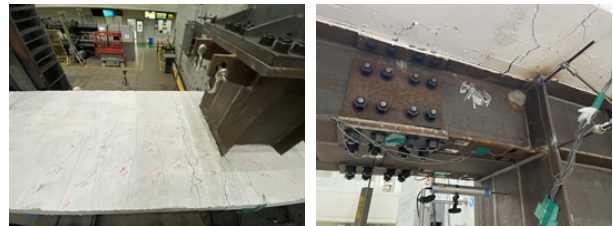


(a) 2HC-CJ-01



(b) 2HC-CJ-02

Fig. 9. Moment-story drift relationships of test specimens



(a) 2HC-CJ-01 (5 % drift)



(b) 2HC-CJ-02 (5 % drift)

Fig. 10. Failure modes of test specimens

2HC-CJ-01 실험체는 회전각 0.5%에서 콘크리트 크랙으로 내력이 저하되었고, 회전각 1.0%부터 지속적으로 소리가 발생하였다. 회전각 2.0%에서 볼트 미끄러짐이 발생하였고 회전각 3.0%에서 2HC 합성보의 하부플랜지 이음판이 벌어졌다. 회전각 4.0%에서 슬래브 균열이 심화되었으며, 회전각 5.0% 첫 번째 사이클에서 접합부 기둥 배부름 현상이 발생하고, 최종적으로 합성보 하부플랜지가 찢어졌다. 회전각 5.0% 두 번째 사이클에서 하중을 더 이상 지지하지 못하고 하중이 저하되어 실험을 종료하였다.

2HC-CJ-02 실험체는 회전각 0.375%부터 접합부 볼트가 미끄러지는 소음이 발생하였고 회전각 1.0%에서 슬래브 미세 균열이 발생하였다. 회전각 2.0%에서 소음이 발생하였고 회전각 3.0%에서 볼트 미끄러짐이 심화되며 하중이 감소되었다. 회전각 4.0%에서 합성보 하부플랜지의 좌굴이 발생하였다. 회전각 5.0% 첫 번째 사이클에서 합성보 하부플랜지 좌굴이 심화되었고 회전각 5.0% 두 번째 사이클에서 슬래브가 탈락하고 합성보 하부플랜지가 파단되어 실험을 종료하였다.

3.3 실험결과 분석

3.3.1 초기강성 및 회전성능

실험체의 항복모멘트(M_y)는 휨강도 실험과 동일하게 산정하였다(2.3.1 하중-변위 관계 참조). Table 5에 초기강성(K_i) 및 항복모멘트(M_y), 최대모멘트(M_{max}), 항복모멘트 시 회전각(θ_{M_y}), 최대모멘트 시 회전각($\theta_{M_{max}}$), 최대회전각(휨강도가 최대모멘트 M_{max} 의 80% 이하로 저하되었을 때의 회전각, $\theta_{0.8M_{max}}$)을 나타냈다.

실험 결과 정모멘트 작용시 초기강성은 동일한 상세를 적용한 두 실험체에서 각각 519.5 kN·m/(2HC-CJ-01)와 518.5 kN·m/(2HC-CJ-02)로 나타나 유사한 결과를 보였다. 부모멘트 작용시 초기강성은 2HC-CJ-01 실험체에서 419.4 kN·m/%로 나타나 2HC-CJ-02의 388.9 kN·m/%

대비 8% 정도 높은 값을 보였다. 2HC 접합부의 최대모멘트(M_{max})는 정모멘트 작용시 Table 5에 나타낸 것과 같이 각각 977.4 kN·m와 962.0 kN·m로 부모멘트 작용시 최대모멘트인 -861.8 kN·m와 -854.4 kN·m 대비 약 1.13배 정도 큰 값을 보였다. 이는 콘크리트 슬래브의 압축 효과로 인하여 접합부 단부에서의 정모멘트 휨성능이 부모멘트에 비해 증가한 것으로 판단된다. 실험 결과 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에서 최대모멘트(M_{max})는 항복모멘트(M_y) 대비 1.10~1.13배 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다. 2HC 접합부 실험체의 최대회전각($\theta_{0.8M_{max}}$)은 5.09% - 5.14%로 합성중간모멘트골조(C-IMF) 요구성능인 3%를 초과하여 안정적으로 거동하는 것으로 나타났다. 또한, 최대모멘트 시 회전각과 항복모멘트 시 회전각의 비율로 나타낸 연성도($\mu = \theta_{M_{max}}/\theta_{M_y}$)는 콘크리트 슬래브에 압축이 작용하는 정모멘트 구간에서 평균 3.02로 부모멘트 구간의 2.51 대비 1.2배 큰 연성도를 보였다.

3.3.2 휨성능 평가

2HC 접합부의 휨성능을 평가하기 위하여 2.4절의 휨강도 실험과 동일하게 부재의 완전합성거동을 가정하여 소성응력분포법에 따라 설계휨강도를 산정하였다. 여기서, 부모멘트 설계휨강도는 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)에 따라 슬래브 철근의 인장강도를 반영하여 산정하였다.

Table 6에 재료시험결과를 반영하여 소성응력분포법으로 산정한 설계휨강도(M_n)를 실험 최대휨강도(M_{max})와 비교하여 정리하였다. 2HC 접합부의 설계휨강도는 정모멘트의 경우 792.9 kN·m, 부모멘트의 경우 580.6 kN·m로 나타났다. 결과적으로 정모멘트의 경우 실험체의 최대휨강도는 설계휨강도 대비 1.21~1.23배 높은 값을 보였으며, 부모멘트의 경우 1.47~1.48배 높은 값을 보여 부모멘트의 경우 설계휨강도가 실험결과를 보수적으로 평가하는 것을 알 수 있다.

Table 5. Summary of 2HC beam-column joint test results

Specimens	Direction	K_i (kN·m/%)	θ_{M_y} (%)	M_y (kN·m)	$\theta_{M_{max}}$ (%)	M_{max} (kN·m)	M_{max}/M_y	$\theta_{0.8M_{max}}$ (%)
2HC-CJ-01	Positive	519.5	1.69	888.4	4.11	977.4	1.10	5.14
	Negative	419.4	-2.05	-767.0	-5.09	-861.8	1.12	-5.14
2HC-CJ-02	Positive	518.5	1.71	848.7	4.02	962.0	1.13	5.13
	Negative	388.9	-2.02	-768.3	-5.05	-854.4	1.11	-5.09

Table 6. Comparison of calculated 2HC beam-column joint bending moment strength with test results

Specimens	M_n (kN·m)		M_{max} (kN·m)		M_{max}/M_n	
	Positive (1)	Negative (2)	Positive (3)	Negative (4)	(3)/(1)	(4)/(2)
2HC-CJ-01	792.9	-580.6	977.4	-861.8	1.23	1.48
2HC-CJ-02	792.9	-580.6	962.0	-854.4	1.21	1.47

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트와 강재의 합성효과로 압축 및 휨강도를 증대시킨 고하중용 합성시스템 2HC의 휨성능과 내진성능을 평가하기 위한 실험을 진행하였다. 2HC 합성보의 휨성능을 평가하기 위하여 하부 강판 콘크리트 매입부에 설치한 스티드 앵커의 유무를 변수로 2점가력 휨실험을 진행하였다. 또한, 2HC 보-기둥 접합부의 내진성능평가를 위해 동일한 상세를 갖는 접합부 실험체 2개를 제작하여 접합부의 회전성능 평가를 위해 반복가력실험을 진행하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2HC 합성보의 휨성능 평가 결과 2HC 합성보 내부 하부강판의 스티드 앵커 설치 유무에 상관없이 모두 우수한 변형능력과 소성강도 이상의 휨성능을 발휘하였다.
- (2) 휨실험 결과 스티드 앵커 설치 유무에 상관없이 가력 초기에는 두 실험체 모두 선형적으로 거동하였으며, 초기강성도 유사한 값을 보였다. 실험체의 항복하중과 최대하중 모두 스티드 앵커를 설치한 ZS 실험체에서 스티드 앵커를 설치하지 않은 ZO 실험체 대비 1 % 정도 높은 값을 보여 그 차이는 크지 않았다.
- (3) 휨실험 결과 각 실험체별 최대하중에 도달할 때까지 콘크리트 슬래브의 압괴나 강재의 파단은 발생하지 않았으며, H형강과 콘크리트 사이 슬립 변형도 거의 발생하지 않아 2HC 합성보의 하부 강판에 스티드 앵커를 설치하지 않더라도 슬립변형이 발생하지 않고 완전합성거동을 보였다.
- (4) 2HC 합성보의 휨강도는 건축물 강구조 설계기준 (KDS 41 31 00: 2019)의 소성응력분포법에 따라 산정할 수 있으며, 실험 결과 제안한 2HC 합성보의 휨강도는 제안식에 따른 소성휨성능 대비 5 % - 6 % 큰 값을 나타냈다.

- (5) 2HC 합성구조의 보-기둥 접합부로 브래킷 타입의 접합구조를 제안하였으며, 접합부는 일반적인 H형강 브래킷 타입의 접합부와 유사하게 볼트접합하는 상세를 적용하여 접합부 반복가력실험을 진행하였다. 실험 결과 동일한 상세를 적용한 실험체 2개 모두 회전각 5 % 이상을 발휘하여 합성 중간모멘트골조(C-IMF)의 요구성능을 초과하여 만족하였다.
- (6) 2HC 보-기둥 접합부의 설계휨강도는 휨실험과 마찬가지로 완전합성거동을 가정한 소성응력분포법에 따라 계산하였으며, 실험체의 최대휨강도는 설계휨강도 대비 1.21~1.48배 큰 값을 나타내어 접합부의 휨내력을 보수적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학 (LINC+) 육성사업과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1061641).

참고문헌(References)

- [1] Rhim, H.-C., Song, J.-Y., and Seo, J.-H. (2008) Study on the Application of Top-Down Construction Method Utilizing Opened Slab, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.24, No.10, pp.179-186 (in Korean).
- [2] Lee, J.-B., Lim, I.-S., Chun, S.-C., Oh, B.-W., Ha, I.-H., and Rhim, H.-C. (2006) Study on Development of CWS (Buried Wall Continuous Wall System) Method, *Journal of the Korean Institute of Building*

- Construction*, KIC, Vol.6, No.2, pp.81-89 (in Korean).
- [3] Lim, I.-S., Lee, J.-B., Choi, S.-Y., Lee, J.-H., and Woo, S.-W. (2009) Study on Development and Application of CWS(Continuous Wall System) II Method, *Journal of the Korean Institute of Building Construction*, KIC, Vol.9, No.1, pp.57-64 (in Korean).
- [4] Kim, Y.-H., Kim, D.-B., Kim, D.-J., and Kim, M.-H. (2018) Safety Evaluation of Semi-Slim AU Composite Beam During Construction, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, KASSS, Vol.18, No.3, pp. 57-66 (in Korean).
- [5] Kim, S.-B., Lee, E.-T., Kim, J.-R., and Kim, S.-S. (2016) Experimental Study on Bending Behavior and Seismic Performance of Hybrid Composite Beam with New Shape, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.3, pp.477-488.
- [6] Kim, S.-B., Cho, S.-H., Choi, Y.-H., and Kim, S.-S. (2017) An Experimental Study on Bending Performance of Hybrid Forming Composite Beam, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.17, No.4, pp.1639-1649.
- [7] Lim, Y.-W., and You, Y.-C. (2017) Seismic Evaluation of Exposed Column-Base Plate Weak-Axis Connections Using L-Shaped Hooked Anchor Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.4, pp.269-280 (in Korean).
- [8] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [10] Choi, I.R., Kim, Y.H., Jung, S.J., and Lee, J.H. (2019) Push-out Test for U-Tube Flange H-Beam with Z-Bar Anchors, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.6, pp.423-434 (in Korean).
- [11] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.

요약: 본 연구에서는 제안한 2HC 합성구조 시스템의 구조성능을 검증하기 위하여 2HC 합성보의 휨실험과 보-기둥 접합부의 내진성능 평가를 위한 반복가력실험을 진행하였다. 2HC 합성보의 휨성능을 검증하기 위하여 H형강 하부플랜지에 연결강판에 설치한 스티드 앵커 유무를 변수로 2점가력 휨실험을 진행하였으며, 제안한 휨강도 산정식에 따라 휨내력을 평가하고 실험결과와 비교하였다. 또한, 2HC 합성보와 2HC 합성기둥의 보-기둥 접합부의 회전성능을 검증하기 위하여 반복가력실험을 진행하였다. 휨실험 결과 하부강판에 설치한 스티드 앵커의 유무에 관계 없이 2HC 합성보는 최대하중에 도달할 때까지 슬래브 콘크리트의 압괴나 강재보의 파단은 발생하지 않았으며, 최대 휨강도는 설계휨강도 대비 1.05배와 1.06배 큰 값을 보여, 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00: 2019)의 소성응력분포법에 따라 휨강도를 안전측으로 평가할 수 있었다. 2HC 접합부 반복가력실험 결과 2개의 동일한 상세를 적용한 실험체 모두에서 회전각 5 % 이상을 나타내어 합성중간모멘트골조(C-IMF)의 요구성능을 충분히 만족하였다.

핵심용어: 2HC 합성보, 휨실험, 휨강도, 보-기둥 접합부, 접합부 반복가력실험
