

춤이 깊은 데크플레이트를 적용한 기둥-보 접합부의 내진성능평가

문병철¹ · 김상섭² · 김성배³ · 강민정^{4*}

¹석사과정, 한국기술교육대학교, 건축공학과, ²교수, 한국기술교육대학교, 디자인·건축공학부,
³소장, ㈜더나은구조엔지니어링, ⁴박사과정, 한국기술교육대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of Wide HyFo Beam-to-Column Connections with Double Rib Deck Plate (D-Deck)

Moon, Byung Cheol¹, Kim, Sang Seup², Kim, Sung Bae³, Kang, Min Joung^{4*}

¹Graduate Student (Master Course), Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

²Professor, School of Design & Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

³Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 07205, Korea

⁴Graduate Student (Ph.D. Course), Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

Abstract - Recently, various construction methods have been developed and applied to the site due to the continuous increase in labor costs in the domestic construction industry, minimization of fieldwork, and demand for shortening the construction period. In particular, research on off-site construction through a dry construction method is actively being conducted when the same module is repeated, such as an underground parking lot and a knowledge industry center. In this study, the details of the beam-to-column connection of the dry construction method were developed for deep deck plates (D-Deck), wide HyFo composite beams, SRC columns, and RC columns. A total of three specimens were manufactured to evaluate the seismic performance of the beam-to-column connection, and the seismic performance was verified through the cyclic test. As a result, it was confirmed that specimens with deep deck plates, wide HyFo composite beams, and SRC columns satisfied an interstory drift angle of 0.03 rad required by the seismic standard, securing seismic performance above the intermediate composite moment frame.

Keywords - Double rib deck plate (D-Deck), Wide HyFo composite beam, Beam-to-column connection, Seismic performance test, Composite intermediate moment frame, Interstory drift angle

1. 서론

오늘날 많은 건축물이 철근콘크리트 라멘구조로 설계, 시공된다. 보통 라멘구조는 기둥에 큰 보를 설치하고, 큰 보에 작은 보를 설치하여 슬래브를 작은 보가 지지하도록 설계한다. 또한 수평, 연직하중에서 발생된 하중은 슬래브로부터 기둥-보 접합부를 통해 보에서 기둥으로 하중이 전달된다. 이러한 공법이 건축물 설계에 가장 많이 적용되며, 구조적으로 안정적이다. 그러나 국내 건설산업의

지속적인 인건비 상승과 현장작업 최소화(off site construction), 공기 단축 요구 등으로 기존의 철근콘크리트 구조를 벗어난 다양한 공법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 특히 지하주차장과 지식산업센터, 자동차 매매단지 등과 같이 동일 모듈이 반복되는 경우, 건식공법 적용을 통한 현장작업 최소화에 대한 연구가 활발하다.

중전 건축구조기준(KBC 2016)에선 지하구조물의 내진 설계가 불필요했으나, 새로운 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)은 지하구조물에 대한 내진설계를 규정하고 있다^{[1],[2]}. 일반적으로 지하구조물은 지진하중과 지진토압에 안전하도록 설계되어야 하며, 지상구조물과 연결되는 지하구조물의 경우 지진하중을 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 일반적으로 합성구조는 철근콘크리트 구조에 비해 경제성이 저하되나, 시공성은 개선되어 현장작업 최소화과 공기 단축에 효과적이다. 이를 위해 시공성과 경제성을 확보하는 방안으로 춤이 깊은 데크플레이트(double

Note.-Discussion open until June 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 13, 2022; revised on October 12, 2022; approved on October 12, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-41-560-1330 Fax. +82-41-560-1224

E-mail. kangmj356@koreatech.ac.kr

rib deck plate, 이하 D-Deck) 슬래브와 기존 hybrid forming beam(이하 HyFo beam)을 활용하여 보 폭을 확장한 형상의 합성보와 철골철근콘크리트 기둥(SRC 기둥) 및 철근콘크리트 기둥(RC기둥)을 조합한 기둥-보 접합부 상세를 개발하였다.

HyFo 보는 Fig. 1과 같이 3개의 단위 부재를 제작하여 내부에서 고력볼트로 일체화시키나, 본 연구에서는 플레이트를 절단하여 제작하였다. HyFo 보 외부의 강재는 구조재 역할을 하여 시공 시 거푸집이 불필요하고, 공장제작·현장설치에 의한 공기 단축이 가능하다. 또한 보 춤 감소로 층고 절감에 용이하며, 보 내부에 콘크리트를 충전하여 처짐 및 진동 등의 사용성을 개선한 구조형식이다³⁾.

춤이 깊은 데크플레이트(D-Deck)는 Fig. 2와 같이 판두께 0.8 mm, 단위 폭 600 mm에 두 개의 리브로 구성되며 리브 춤은 200 mm이다. 설계에 따라 리브 위에 110 mm, 160 mm의 콘크리트 슬래브가 형성되며, 중앙부에 2줄의 동바리를 설치하면 약 8m 내외의 장경간에 적용할 수 있다. 그러므로 단위 모듈을 기준으로, 일방향의 폭이 넓은 큰보만 설치하면 내부에 작은보가 불필요하고, 기존 철

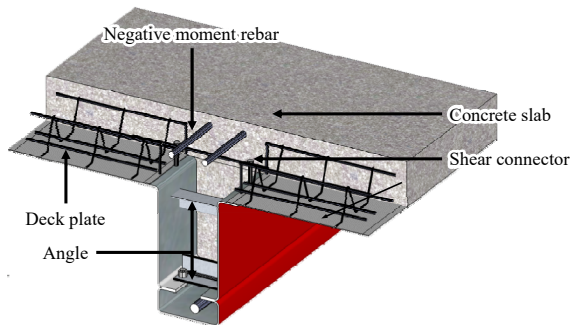


Fig. 1. Concept of hybrid forming composite beam

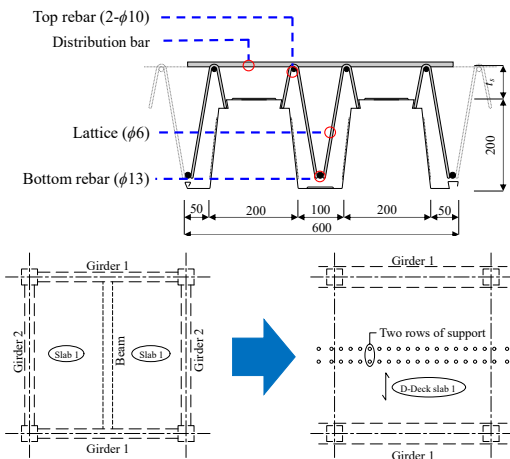


Fig. 2. Concept of double rib deck plate (D-Deck)

선일체형 거푸집 데크플레이트에 비해 약 2배 정도의 장경간 적용이 가능하다⁴⁾. 춤이 깊은 데크플레이트는 이러한 특징으로 경제성과 시공성이 향상되나, 대부분 철근콘크리트구조에 적용되고 있다.

이에 본 연구에서는 춤이 깊은 데크플레이트(D-Deck)와 폭이 넓은 HyFo 합성보, 철골철근콘크리트 기둥(SRC 기둥) 및 철근콘크리트 기둥(RC 기둥)을 대상으로 강구조를 활용한 건식공법의 기둥-보 접합부상세를 개발하였다. 기둥-보 접합부의 내진성능평가를 위해 모두 3개의 실물 크기 실험체를 제작하였으며, 합성중간모멘트골조의 내진성능을 확보하는 방안에 대해 검증하였다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 연구에서는 춤이 깊은 데크플레이트를 적용한 폭이 넓은 합성보와 SRC 및 RC 기둥의 내진접합부를 개발하였으며, 접합부 내진성능을 평가하기 위하여 Fig. 3와 같이 실물 크기의 실험체를 제작하였다. 실험체는 기둥의 종류와 보 춤, 다이어그램 철판 두께, 기둥과 보의 주근갯수 등을 변수로 3개를 제작하여 실험하였다. Table 1은 실험체의 상세사항이다.



Fig. 3. Set-up of specimen

실험체의 형상은 Fig. 4와 같으며, Fig. 5는 폭이 넓은 합성보와 SRC 및 RC 기둥의 접합을 위해 개발한 접합부의 상세도면이다. 하중에 따른 보 춤, 슬래브의 폭과 두께, 스티드 커넥터 규격($\phi 19$) 등은 현장적용 상세를 기준으로 반영하였으며, 설계식은 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00)을 적용하였다⁶⁾. 보 춤은 적용 범위를 가정하여

Table 1. Specimens for seismic test

No.	Specimens*	Beam			Column		Slab	
		Beam (SM275; mm)	Upper rebar (SD500)	Space of stud (mm)	Column (SM355; mm)	Main rebar (SD600)	Width (mm)	Thickness (mm)
1	HF-SRC-BR	HF-450×600×8×8	8-D22	2-φ19@160	□-700×600 H-250×250×9×14	12-D32	2,000	160(topping) +200(deck plate)
2	HF-SRC-BM	HF-250×600×8×8	6-D22	φ19@110	□-700×600 H-250×250×9×14	8-D32		110(topping) +200(deck plate)
3	HF-RC-BM	HF-250×600×8×8	6-D22	φ19@110	□-700×600	12-D32		110(topping) +200(deck plate)

*HF: hybrid forming composite beam, SRC: steel reinforced concrete, RC: reinforced concrete, BR: beam for roof level, BM: beam for middle level

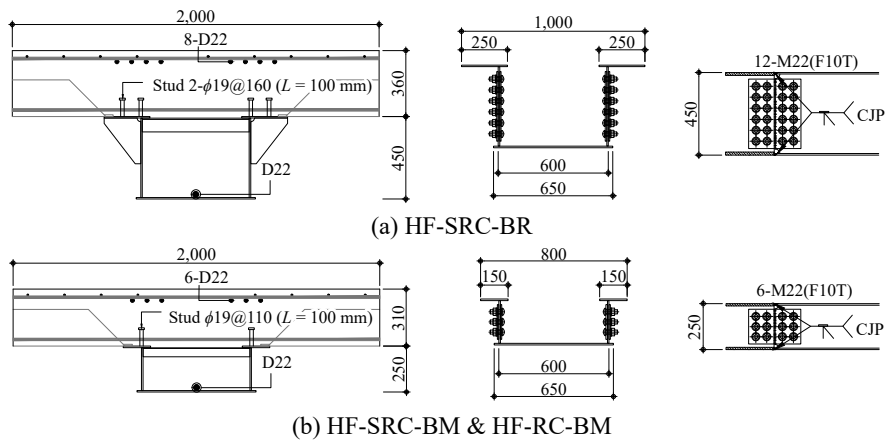


Fig. 4. Details of specimens (Unit: mm)

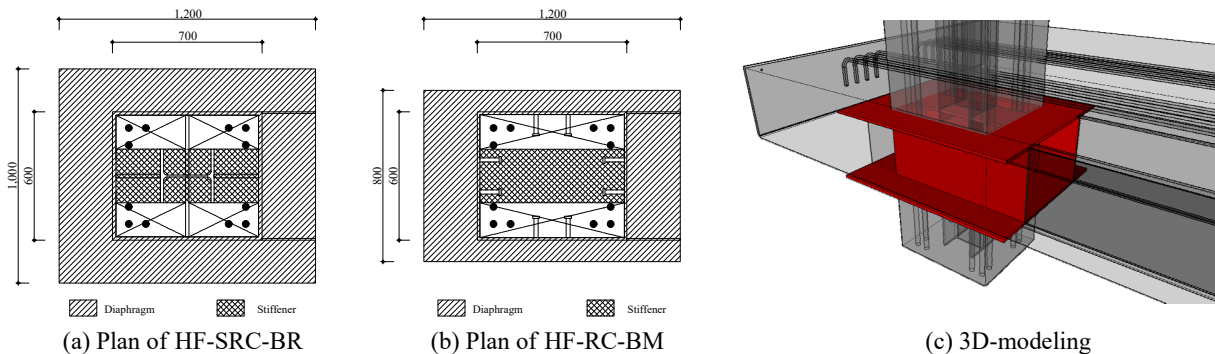


Fig. 5. Details of diaphragm

두 가지로 설정했다. 고하중을 받는 경우, 보 춤은 450 mm 를 적용하였고, 일반하중을 받는 경우, 보 춤은 250 mm 로 적용하였다. 또한 보 상부 철근은 슬래브 내부에 길이 방향으로 설치하였으며, 완전합성보로 설계하였다.

실험체의 콘크리트 강도는 모두 27MPa을 적용하였다. 기둥 길이는 2,000 mm이고, 기둥 중심에서 액추에이터 가력지점까지의 거리(L)는 3,500 mm, 보 전체길이(L_p)는 4,600 mm이다. 슬래브 폭은 2,000 mm이며, 적용범위에 따라 리브춤을 포함한 슬래브 두께는 고하중 구간의 경

우 360 mm, 일반하중 구간은 310 mm이다.

콘크리트 슬래브와 합성보의 일체화를 위하여 스티드 커넥터를 설치하여 완전합성보로 설계하였다. 또한 소성 중립축이 슬래브 내에 위치하도록 콘크리트의 압축력을 강재의 인장력보다 크게 설계하여 강재의 연성파괴를 유도하였다^[5].

기둥-보 접합부의 상·하부 다이아프램은 고하중 구간의 경우 합성보 플랜지 두께의 2배, 일반하중 구간의 경우 합성보 플랜지 두께의 1.5배로 적용하였다. 웨브는 합

성보와 동일한 두께를 사용하였다. 상·하부 다이아프램과 플랜지는 모두 그루브용접(complete joint penetration)으로 접합하였다. 측면 접합은 8 mm 강판과 F10T M22 고장력볼트를 사용하여 볼트 접합하였다.

2.2 실험체 세팅 및 재하프로그램

실험은 송도에 위치한 포스코 글로벌R&D센터에서 진행하였으며, 최대용량 3,000 kN, 최대스트로크 ±250 mm의 액추에이터로 반복가력실험을 실시하였다. 실험체 가력은 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00, 4.19.2.4)의 ‘기둥-보 모멘트 접합부의 가력방법’에 준하여 수행하였으며, Table 2에 본 실험에서의 단계별 가력 변위량을 나타냈다^[6]. 액추에이터 가력지점에 설치된 줄변위계(wire DT)로 실험체의 전체 변위량을 확인하였고, 가력하중의 크기는 액추에이터의 로드 셀(load cell)로 측정하였다.

Fig. 6는 실험체 세팅 상세이고, Fig. 7은 스트레인 게이지 설치 위치이다. 스트레인 게이지는 다이아프램과 보 웹, 슬래브 내부의 상부 철근 등에 설치하여 변형량을 측정하였다.

Table 2. Loading program for seismic test

No.	Story drift ratio (%rad)	Cycle	Displacement (mm)
1	±0.00375	6	±13.1
2	±0.005	6	±17.5
3	±0.0075	6	±26.3
4	±0.01	4	±35.0
5	±0.015	2	±52.5
6	±0.02	2	±70.0
7	±0.03	2	±105.0
8	±0.04	2	±140.0
9	±0.05	2	±175.0
10	±0.06	2	±210.0

3. 실험결과

3.1 소재의 기계적 특성

Table 3는 콘크리트 배합비이며, 콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2403, KS F 2405에 준하여 실시하였다. 콘크리트 설계기준 압축강도는 27 MPa이며, 콘크리트 압축강도 시험결과 35.5 MPa로 확인되었다^{[7],[8]}.

강재 인장시험 및 결과분석은 KS B 0801, KS B 0802에 따라 수행하였다^{[9],[10]}. 강재의 소재시험은 기둥 H형강의 플랜지 및 웹, 합성보 플랜지 및 웹, 다이아프램의 강재와 슬래브, 보, 기둥 주근에 대해 인장시험편을 제작하여 실시하였다. 실험결과는 Table 4와 같다.

3.2 모멘트-회전각 및 파괴 양상

본 연구는 기둥-보 접합부의 합성중간모멘트골조 내진 성능확보를 목표로 계획하였다. 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00, 4.11.10)에서 합성중간모멘트골조의 경우, 접합부는 반복하중실험을 통해 최소 0.03 rad의 총층간변위각을 발휘하고 접합부 휨강도는 보 소성휨모멘트

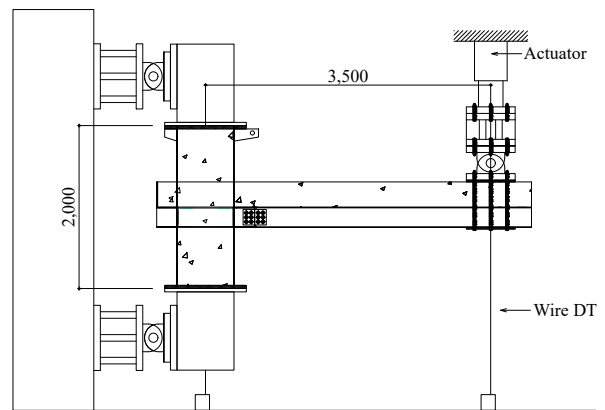


Fig. 6. Location of wire DT and test set-up

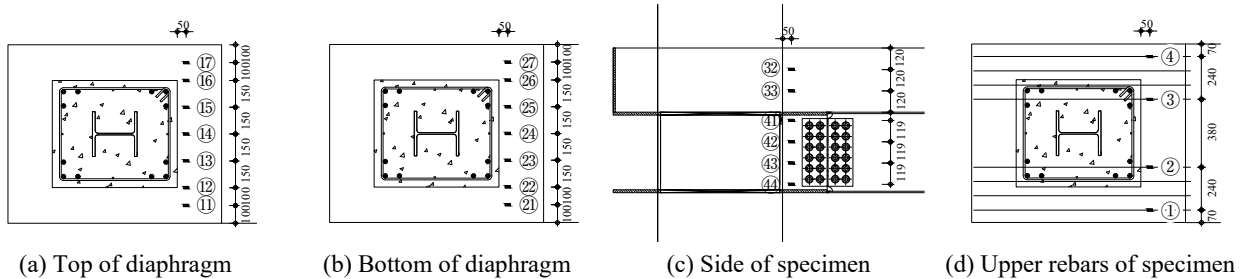


Fig. 7. Locations of strain gauge

의 80 % 이상 확보되어야 한다^[6]. Table 5는 설계기준강도를 적용한 실험체의 공칭휨강도와 최대내력 시 층간변위각을 나타낸 것이다. 합성보의 공칭휨강도는 소성중립축을 기준으로 압축력 및 인장력과 소성중립축까지 거리의 곱을 합하여 산정하였다.

3.2.1 HF-SRC-BR 실험체

HF-SRC-BR 실험체의 경우, 기둥의 크기는 700×600 (mm)이며, 내부 H형강은 H-250×250×9×14(mm), 기둥의 주근은 12-D32, 합성보 크기는 HF-450×600×8×8(mm), 합성보 상부 철근은 8-D22, 슬래브 두께는 360 mm이다.

HF-SRC-BR 실험체에서는 실험 시작 후 층간변위각 0.02 rad 1 cycle 시 하부플랜지 좌굴이 관찰되었다. 또한

층간변위각 0.03 rad 1 cycle 시 하부플랜지 용접부에서 크랙이 관찰되었으며, 층간변위각 0.04 rad 1 cycle 시 하부플랜지 용접부가 파단되어서 2 cycle까지 가력 후 실험을 종료하였다.

Fig. 8은 HF-SRC-BR 실험체의 회전각에 대한 모멘트 비이다. 정모멘트 구간의 최대내력은 0.03 rad에서 공칭휨강도(M_n^+)의 114 %로 나타났다. 또한 부모멘트 구간의 최대내력은 0.04 rad에서 공칭휨강도(M_n^-)의 112 %이다.

실험 결과 HF-SRC-BR 실험체는 0.04 rad의 층간변위각을 발휘하여, 건축물 강구조 설계기준(KDS 41 31 00, 4.11.10) 합성중간모멘트골조 내진규정의 요구조건인 0.03 rad의 층간변위각을 확보하였다. Fig. 9은 하부 다이아프램과 하부플랜지의 용접부 파괴양상이다.

Table 3. Concrete mix proportion

Design criterion strength (MPa)	W/C ratio (%)	Slump (mm)	Max. size of coarse aggregate (mm)	Fine aggregate ratio (%)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)
27	47.3	120	25	51.3	4.5±1.5	35.5

Table 4. Material test results of steel & rebar

Division		Specified design yield strength (MPa)	Test yield strength (MPa)	Test tensile strength (MPa)	Elongation (%)	
Rebar	D13 (SD400)	400	459.0	580.5	34.2	
	D22 (SD500)	500	549.0	679.3	51.1	
	D32 (SD600)	600	666.0	811.2	29.4	
Steel	Beam	PL8 (SM275)	275	290.6	413.6	32.0
	Diaphragm	PL12 (SM275)		310.4	469.5	23.8
		PL16 (SM275)	350.5	436.1	27.9	
	Column	PL9 (SM355)	355	415.9	534.0	19.7
		PL14 (SM355)		401.1	533.1	22.6

Table 5. Specimens for seismic test

Specimens		M_u (kN·m)	θ_u (rad)	M_{n1} (kN·m)	θ (rad)	M_u/M_{n1}
HF-SRC-BR	Positive	2,955.6	0.031	2,589.4	0.03	1.14
	Negative	2,081.1	0.042	1,853.2	0.03	1.12
HF-SRC-BM	Positive	1,850.3	0.030	1,435.3	0.03	1.29
	Negative	816.1	0.030	817.4	0.03	1.00
HF-RC-BM	Positive	1,544.7	0.018	1,435.3	0.03	1.08
	Negative	879.2	0.020	817.4	0.03	1.08

M_u : maximum bending strength, M_{n1} : nominal bending strength, θ : total interstory drift angle, θ_u : interstory drift angle of maximum bending strength

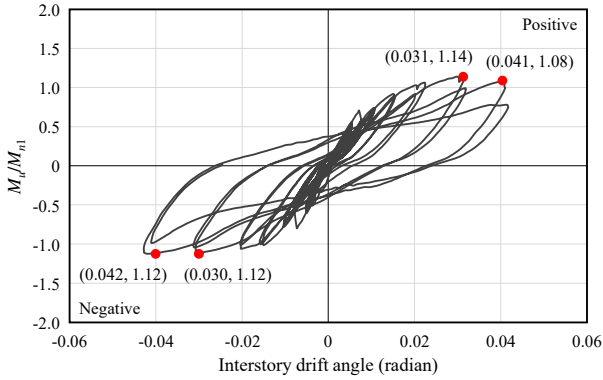


Fig. 8. $M_u/M_{n1} - \theta$ curve of HF-SRC-BR

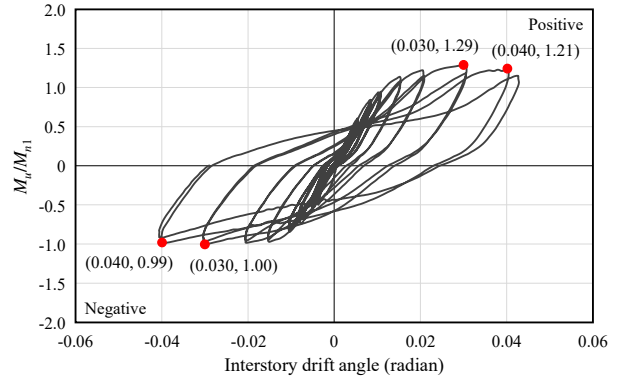


Fig. 10. $M_u/M_{n1} - \theta$ curve of HF-SRC-BM



Fig. 9. Failure shape of HF-SRC-BR



Fig. 11. Failure shape of HF-SRC-BM

3.2.2 HF-SRC-BM 실험체

HF-SRC-BM 실험체의 경우, 기둥의 크기는 700×600 (mm)이며, 내부 H형강은 H-250×250×9×14(mm), 기둥의 주근은 8-D32, 합성보 크기는 HF-250×600×8×8(mm), 합성보 상부 철근은 6-D22, 슬래브의 두께는 310 mm이다.

HF-SRC-BM 실험체에서는 실험 시작 후 층간변위각 0.03 rad 1 cycle 시 하부플랜지에서 좌굴이 관찰되었으며, 0.04 rad 1 cycle 시 다이아프램과 하부플랜지 용접부가 파단되어 2 cycle까지 가력 후 실험을 종료하였다.

Fig. 10은 HF-SRC-BM 실험체의 회전각에 대한 모멘트비이다. 정모멘트 구간의 최대내력은 0.03 rad에서 공칭휨강도(M_n^+)의 129 %로 나타났다. 또한 부모멘트 구간의 최대내력도 0.03 rad에서 공칭휨강도(M_n^-)의 100 %로 나타났다.

실험 결과 HF-SRC-BM 실험체는 0.04 rad의 층간변위각을 발휘하여, 건축물 강구조 설계기준 합성중간모멘트골조 내진규정의 요구조건인 0.03 rad의 층간변위각을 확보하였다. Fig. 11은 하부 다이아프램과 보 하부플랜지 용접부의 국부좌굴 발생양상이다.

3.2.3 HF-RC-BM 실험체

HF-RC-BM 실험체의 경우, 기둥의 크기는 700×600 (mm)이며, 기둥의 주근은 12-D32, 합성보 크기는 HF-250×600×8×8(mm), 합성보 상부 철근은 6-D22, 슬래브의 두께는 310 mm이다.

HF-RC-BM 실험체에서는 실험 시작 후 층간변위각 0.02 rad 1 cycle에서 기둥 주근과 하부 지그 연결 플레이트 용접부가 파단되어 안전상의 이유로 실험을 종료하였다.

Fig. 12는 HF-RC-BM 실험체의 회전각에 대한 모멘트비이다. 정모멘트 구간의 최대내력은 0.018 rad에서 공칭휨강도(M_n^+)의 108 %로 나타났다. 또한 부모멘트 구간의 최대내력도 0.020 rad에서 공칭휨강도(M_n^-)의 108 %로 나타났다. HF-RC-BM 실험체는 제작오류로 인한 기둥 주근과 지그 연결 플레이트 용접부 탈락으로 층간변위각 0.02 rad에서 실험을 종료하였다. 그러나 실험 종료 전까지의 실험체 거동으로 미루어보아, 용접부 탈락 없이 실험이 진행되었다면 합성중간모멘트골조의 내진성능을 충분히 확보했을 것으로 판단된다. Fig. 13은 기둥 주근과 지그 연결 플레이트 용접부의 파괴양상이다.

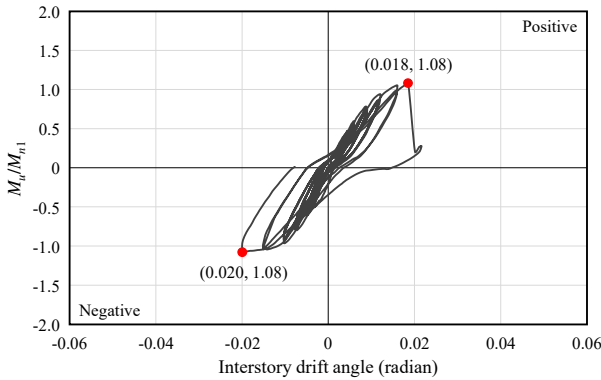


Fig. 12. $M_u/M_{n1} - \theta$ curve of HF-RC-BM



Fig. 13. Failure shape of HF-RC-BM

4. 결과분석 및 고찰

4.1 하중-변위 관계

실험체의 내력과 강성을 평가하기 위하여 실험체에 대

한 이력곡선을 분석하였다. 그러나 이력곡선은 반복가력으로 인해 복잡한 루프 형태로 나타나기 때문에, 이를 단조화하여 분석하였다. 이력곡선의 각 cycle 최대회전각에 대응하는 점을 평행이동시켜 연결함으로써 Fig. 14과 같이 단조화곡선을 나타냈다^[11]. 또한 단조화곡선을 통해 얻은 강성을 포함한 실험결과를 Table 6에 정리하였다.

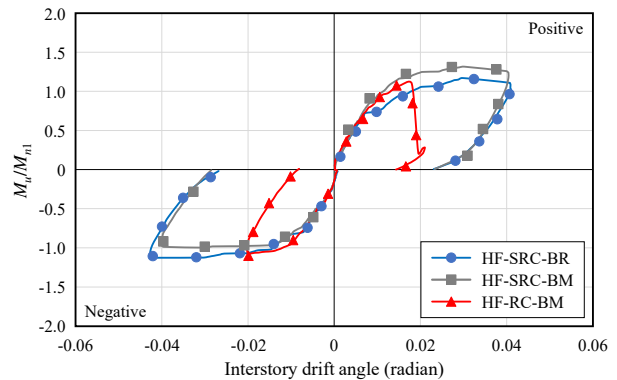


Fig. 14. Skeleton curves of specimens

공칭모멘트는 설계기준강도(M_{n1})와 소재시험결과(M_{n2})에 의한 결과로 구분하여 산정하였다. 항복강도(M_y)는 실험결과와 하중-변위곡선에서 초기강성과 최대내력이 만나는 점의 내력을 항복모멘트로 산정하였다. 실험 결과 강재의 설계기준강도를 반영한 내력비(M_u/M_{n1})는 약 1.0~1.3배, 소재시험결과를 반영한 내력비(M_u/M_{n2})는 약 0.9~1.2배로 확인되었으며, 정힘모멘트가 부힘모멘트보다 다소 크게 나타났다. 또한 실험에 의한 소요강도와 항복강도의 비(M_u/M_y)는 약 1.3~1.6배로 확인되었다.

Table 6. Results of seismic tests

Specimens		M_{n1} (kN·m)	M_{n2} (kN·m)	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)	M_u/M_{n1}	M_u/M_{n2}	M_u/M_y	δ_y (mm) (%rad)	δ_u (mm) (%rad)	δ_u/δ_y	K (kN/mm)
HF-SRC-BR	Positive	2,589.4	2,790.0	1,874.7	2,955.6	1.14	1.06	1.58	34.94 (0.99)	109.81 (3.13)	3.14	13.33
	Negative	1,853.2	2,025.4	1,473.5	2,081.1	1.12	1.03	1.41	26.03 (0.74)	147.45 (4.21)	5.66	16.18
HF-SRC-BM	Positive	1,435.3	1,521.0	1,419.3	1,850.3	1.29	1.22	1.30	40.04 (1.14)	105.01 (3.00)	2.62	10.13
	Negative	817.4	884.7	603.6	816.1	1.00	0.92	1.35	27.43 (0.78)	105.01 (3.00)	3.83	6.29
HF-RC-BM	Positive	1,435.3	1,521.0	1,177.8	1,544.7	1.08	1.02	1.31	31.73 (0.91)	62.36 (1.78)	1.97	10.61
	Negative	817.4	884.7	653.9	879.2	1.08	0.99	1.34	27.63 (0.79)	70.57 (2.01)	2.55	6.76

M_{n1} : nominal bending strength based on the specified design strength, M_{n2} : bending strength based on the material test results, M_y : yield strength, M_u : maximum bending strength, δ_y : displacement of yield strength, δ_u : displacement of maximum bending strength, K : stiffness

Fig. 15은 평균강성 변화곡선이다. 평균강성은 각 층간 변위각의 첫 번째 cycle에서 최대 정방향 내력과 부방향 내력의 차를 변위 차로 나누어 산정하였다. 그 결과 층간 변위가 증가할수록 강성은 감소하는 경향을 보여주었으며, 보 층이 450 mm이고 슬래브 두께가 360 mm인 HF-SRC-BR 실험체가 강성이 가장 큰 것으로 나타났다. HF-SRC-BR과 HF-SRC-BM 실험체는 0.03 rad에서 초기강성 대비 약 30%의 강성으로 저하되는 것으로 확인되었다.

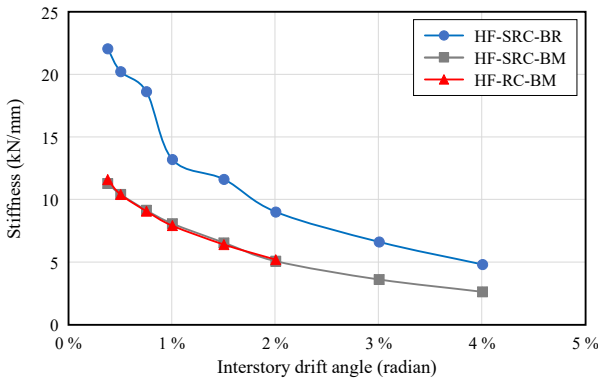


Fig. 15. Average stiffness change curves

4.2 에너지소산능력

Fig. 16은 각 층간변위각 첫 번째 cycle에서 하중-변위 곡선의 내부면적을 기준으로 산정한 에너지소산능력이다. 에너지소산능력은 구조물에 작용하는 지진에너지를 구조체가 흡수할 수 있는 능력이므로 건축물 내진성능을 평가하는 지표로 활용된다^[12]. 모든 실험체는 0.01 rad 이후 에너지소산능력이 급격하게 증가하여 충분한 연성능력을 발휘한다고 판단된다. 또한 HF-SRC-BR 실험체의 증가폭이 크게 확장되었으며, 이는 공칭모멘트의 영향으로 판단된다.

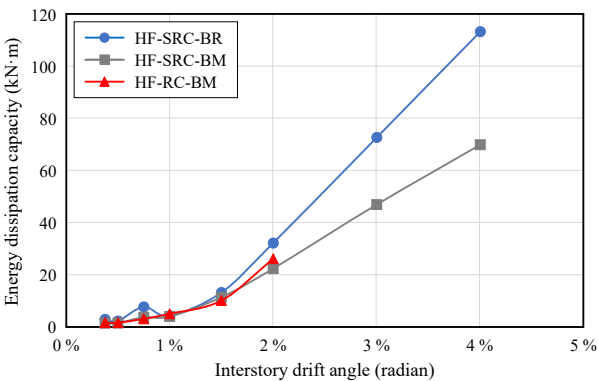


Fig. 16. Energy dissipation capacity of specimens

4.3 변형능력

Fig. 17은 변형능력을 정리한 것이다. 변형능력의 산정은 각 실험체의 항복하중 시 변위(δ_y)에 대한 최대하중 시 변위(δ_u)의 비(δ_u/δ_y)로 정리하였다.

부모멘트 변형능력 비는 정모멘트 변형능력 비에 대하여 HF-SRC-BR 실험체의 경우 약 1.8배, HF-SRC-BM 실험체의 경우 약 1.5배, HF-RC-BM 실험체의 경우 약 1.3배 큰 것으로 확인되었다. 전반적으로 부모멘트가 정모멘트에 비해 변형능력이 상대적으로 우수함을 확인할 수 있다^[5]. 부모멘트의 인장력은 보 상부 철근에 좌우되나, 정모멘트의 경우 브래킷과 합성보의 접합, 브래킷 강판의 좌굴 등의 영향을 받는다. 슬래브 내부에 삽입된 철근은 충분히 정착되면 좌굴 없이 전강도가 내력에 반영되나, 외부에 노출된 강재는 내부에 콘크리트가 충전되어도 압축에 의한 좌굴로 내력이 저하되고 이로 인해 변형능력이 저감되는 것으로 판단된다.

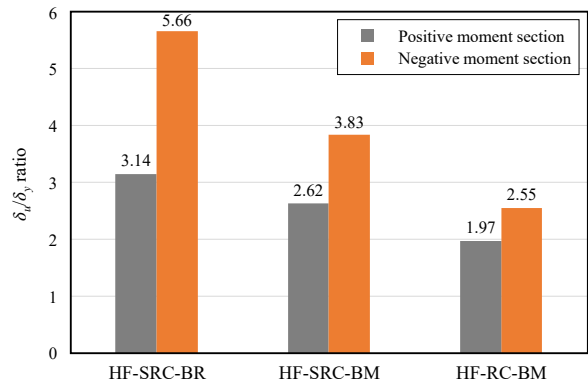


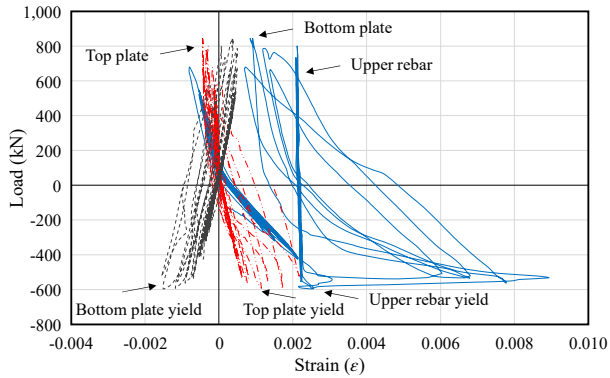
Fig. 17. Displacement capacity: δ_u/δ_y ratio

4.4 변형률 분석

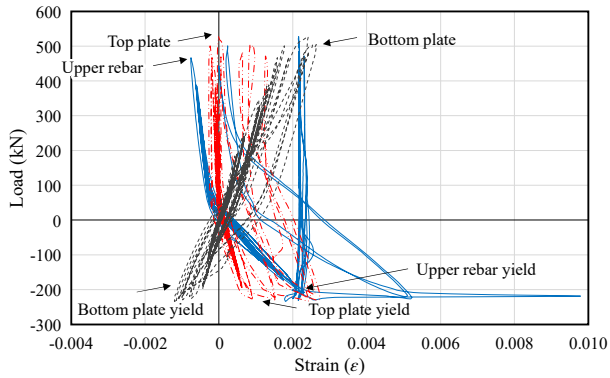
Fig. 18은 실험체에 부착된 스트레인 게이지로 측정한 상·하부 다이아프램과 보 주근의 변형률 양상이다.

HF-SRC-BR 실험체의 경우, 상부 철근은 0.04 rad 1 cycle 시 0.0026의 변형도가 발생하여 항복상태에 도달하였다. 상·하부 다이아프램은 0.03 rad 1 cycle 시 0.0014의 변형도가 발생하여 항복상태에 도달하였으며, 이후 소성변형을 보였다.

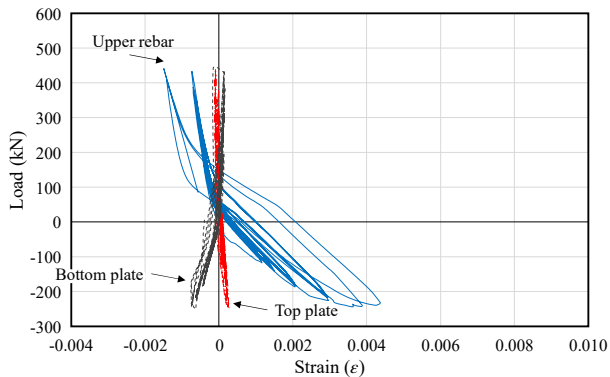
HF-SRC-BM 실험체의 경우, 상부 철근은 0.03 rad 1 cycle 시 0.0024의 변형도가 발생하여 항복상태에 도달하였으며, 상부 다이아프램은 0.03 rad 1 cycle 시 0.0018의 변형도가 발생하여 항복상태에 도달하였다. 하부 다이아프램



(a) HF-SRC-BR



(b) HF-SRC-BM



(c) HF-RC-BM

Fig. 18. Strain patterns of specimens

은 0.04 rad 1 cycle 시 0.0012의 변형도에 도달하였으며, 이후 소성변형을 보였다.

HF-RC-BM 실험체의 경우, 실험체 오제작으로 인한 안전상의 이유로 실험을 중단하기 전까지 상부 철근과 상·하부 다이아프램이 탄성영역에 머무르는 것으로 나타났다.

합성중간모멘트골조 이상의 내진성능을 확보한 HF-SRC-BR 및 HF-SRC-BM 실험체는 상부철근과 상·하부 다이아프램이 0.03 rad 이후 항복상태에 도달하였으나, 추가적인 변형능력을 확보하여 충분한 소성변형을 한 것

으로 확인되었다. 반면 하부 다이아프램의 경우 상대적으로 변형량이 적어서 국부좌굴에 의해 충분한 변형을 확보하지 못한 것으로 판단된다.

5. 결론

춤이 깊은 데크플레이트(D-Deck)와 폭이 넓은 합성보, 철골철근콘크리트 기둥(SRC 기둥) 및 철근콘크리트 기둥(RC 기둥)을 대상으로 기둥-보 접합부상세를 개발하였으며, 실험을 통해 기둥-보 접합부의 내진성능을 평가하였다. 실험 결론은 다음과 같다.

- (1) 춤이 깊은 데크플레이트를 적용하고, 폭이 넓은 합성보와 철골철근콘크리트 기둥을 적용한 기둥-보 접합부의 경우, 층간변위각 0.04 rad 내진성능이 확인되어 합성중간모멘트골조의 내진성능을 확보하는 것으로 확인되었다. 그러므로 춤이 깊은 데크플레이트와 강구조 합성구조를 조합한 건식공법도 적합한 내진접합부 상세를 적용하면, 합성중간모멘트골조의 내진성능이 확보된다고 판단된다.
- (2) 실험 결과 부모멘트와 정모멘트의 변형능력 비는 부모멘트의 변형능력이 약 1.5배 이상(HF-RC-BM 실험체 제외) 큰 것으로 확인되었다. 이러한 이유는 부모멘트의 경우, 슬래브 내부에 삽입된 철근이 충분히 정착되면 좌굴 없이 전강도가 내력에 반영되나, 정모멘트의 경우 외부에 노출된 강재 내부에 콘크리트가 충전되어도 압축에 의한 좌굴로 내력이 저하되고 이로 인해 변형능력이 저감되는 것으로 판단된다.
- (3) 실험 결과 소요모멘트와 공칭모멘트의 비는 강재의 설계기준강도를 반영한 내력비(M_u/M_{n1})의 경우 약 1.0~1.3배, 소재시험결과를 반영한 내력비(M_u/M_{n2})의 경우 약 0.9~1.2배이며, 실험에 의한 소요강도와 항복강도의 비(M_u/M_y)는 약 1.3~1.6배로 확인되었다. 그러므로 춤이 깊은 데크플레이트와 합성구조 기둥-보를 적용하는 경우, 적절한 내진상세를 확보하면 접합부의 내력전달은 양호하게 이루어질 것으로 판단된다.
- (4) 합성중간모멘트골조 이상의 내진성능을 확보한 HF-SRC-BR 및 HF-SRC-BM 실험체는 상부철근과 상·하부 다이아프램이 0.03 rad 이후 항복상태에

도달하였으나, 추가적인 변형능력을 확보하여 충분한 소성변형을 한 것으로 확인되었다. 반면 하부 다이아프램의 경우 상대적으로 변형량이 적어서 국부좌굴에 의해 충분한 변형을 확보하지 못한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포스코 ‘2021년 하반기 강건재 제품 솔루션 연구과제’ 지원에 의해 수행되었으며, 실험체 제작은 NI 스틸의 협조로 실시된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, D.K. (2019) Seismic Design of Building Sub-structures, *Magazine of Korea Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.21-24 (in Korean).
- [2] Architectural Institute of Korea (2019) *Seismic Building Design Code and Commentary*, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [3] Kim, S.B., Kang, M.J., Cho, S.H., and Kim, S.S. (2015) An Experimental Study on Bending and Seismic Performance of New Concept Hybrid Composite Beam, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.15, No.4, pp.1-12 (in Korean).
- [4] Kim, S.B., Choi, J.M., and Kim, K.S. (2018) Deep Deck Plate(D-Deck) with Double Ribs and Inverted Triangle Steel Wire Truss, *Magazine of Korea Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.4, pp.41-44 (in Korean).
- [5] Kim, S.B., Jeon, Y.H., Cho, S.H., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2017) Seismic Performance of HyFo Beam with High Depth-to-SRC Column Connections, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.2, pp.135-145 (in Korean).
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Steel Structures Design Standard* (KDS 41 31 00: 2019), Korea (in Korean).
- [7] Korean Agency for Technology and Standards (2019) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens* (KS F 2403: 2019), Korea (in Korean).
- [8] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete* (KS F 2405: 2010), Korea (in Korean).
- [9] Korean Agency for Technology and Standards (2022) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [11] Jo, H.S. (2014) *Structural Performance Evaluation of New-Shape Weak Axis Connection with Variable Column Section*, Master's Thesis, Koreatech, Korea (in Korean).
- [12] Park, B., and Kwon, K. (2017) Development of External Reinforcement Method for Improvement on Seismic Performance of Masonry Infilled Wall, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.17, No.3, pp.11-19 (in Korean).

요 약: 최근 국내 건설산업의 지속적인 인건비 상승과 현장작업 최소화, 공기 단축 요구 등으로 기존의 철근콘크리트 구조를 벗어난 다양한 공법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 특히 지하주차장과 지식산업센터, 자동차 매매단지 등과 같이 동일 모듈이 반복되는 경우, 건식공법 적용을 통한 현장작업 최소화에 대한 연구가 활발하다. 본 연구에서는 층이 깊은 데크플레이트(D-Deck)와 폭이 넓은 HyFo 합성보, 철골철근콘크리트 기둥(SRC 기둥) 및 철근콘크리트 기둥(RC 기둥)을 대상으로 강구조를 활용한 건식공법의 기둥-보 접합부 상세를 개발하였다. 기둥-보 접합부의 내진성능평가를 위해 총 3개의 실물 크기 실험체를 제작하였으며, 반복가력실험을 통하여 내진성능을 검증하였다. 내진성능실험 결과, 층이 깊은 데크플레이트와 폭이 넓은 합성보, 철골철근콘크리트 기둥을 적용한 실험체는 모두 내진규정의 요구조건인 0.03 rad의 층간변위각을 발휘하여 합성중간모멘트골조 이상의 내진성능을 확보하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 층이 깊은 데크플레이트, 폭이 넓은 HyFo 합성보, 기둥-보 접합부, 내진성능평가, 합성중간모멘트골조, 층간변위각
