

بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصال مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و تیر

بتن آرمه

سیده مرضیه قیامی تکلیمی^۱، علی خیرالدین^۲، امید رضایی فر^۳

۱- دکتری، دانشکده مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m.qiyami@semnan.ac.ir

۲- استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، kheyroddin@semnan.ac.ir

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، orezayfar@semnan.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از ستون‌های فولادی-بتن آرمه در سازه‌های بلند افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین موضوعات در بحث اتصالات، اتصال مناسب بین مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه (اتصال کامپوزیت) می‌باشد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصال مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و قطعه انتقالی محاط در تیر بتن آرمه و مقایسه آن با دیگر اتصالات پرداخته شده است. سه نمونه آزمایشگاهی (تیر و ستون بتن آرمه، تیر بتن آرمه و ستون فولادی محاط در بتن آرمه و تیر بتن آرمه به همراه قطعه انتقالی و ستون فولادی محاط در بتن آرمه) ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای و بار محوری، قرار گرفته است. پارامترهای اصلی آزمایش، تأثیر مقطع فولادی در ستون بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی و اثر استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون بر شکل‌پذیری و سختی می‌باشند. براساس نتایج آزمایشگاهی، استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر، سبب بهبود عملکرد این اتصال، نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه و مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه شده است. استفاده از قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر، سبب افزایش ظرفیت باربری جانبی نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه و ستون فولادی محاط در بتن آرمه به ترتیب در جهت کششی ۱٪ و ۱۵٪، در جهت فشاری به ترتیب ۲۰٪ و ۸٪ شده است. نتایج شکل‌پذیری نمونه‌ها، نشان می‌دهد نمونه دارای قطعه انتقالی نسبت به نمونه‌های تیر و ستون بتن آرمه و تیر بتن آرمه و ستون فولادی محاط در بتن آرمه، به ترتیب ۴۴٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی

اتصال کامپوزیت، عملکرد لرزه‌ای، قطعه انتقالی، ستون فولادی محاط در بتن آرمه (SRC)، بارگذاری چرخه‌ای

اعضای مرکب فولادی محاط در بتن آرمه (Steel-Encased Reinforced Concrete)؛ (SRC) شامل مقاطع فولادی سازه‌ای هستند که توسط بتن آرمه دربر گرفته شده‌اند. به کارگیری پروفیل فولادی در این سیستم‌ها موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری می‌شود. علاوه بر این، وجود پوشش بتن آرمه، مقاومت مطلوبی در برابر آتش و خوردگی فراهم کرده و سختی جانبی بالاتری نسبت به ستون‌های متعارف ایجاد می‌نماید. به دلیل این ویژگی‌ها، ستون‌های SRC کاربرد گسترده‌ای در انواع سیستم‌های سازه‌ای دارند؛ از جمله در ساختمان‌های بلندمرتبه دارای محدودیت‌های معماری، سازه‌های با اهمیت زیاد نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای [۱] و همچنین در پایه پل‌ها و سازه‌های متوسط و سنگین [۲، ۳]. مطالعات متعددی بر رفتار انواع ستون‌های SRC تحت بارگذاری‌های مختلف، از جمله بارگذاری چرخه‌ای، انجام شده است [۴]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت جلوگیری از کماتورهای آرماتورها، ظرفیت باربری چرخه‌ای و شکل‌پذیری ستون‌های SRC نسبت به سایر انواع ستون‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. Wei و همکاران [۵] و Zhu و همکاران [۶] عملکرد ستون‌های SRC را تحت بارهای ضربه‌ای جانبی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد افزایش انرژی و سرعت ضربه موجب افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود و این موضوع می‌تواند رویکرد مؤثری برای بهبود عملکرد ستون‌ها در برابر ضربه باشد. علاوه بر این، کاربرد اعضای SRC در سیستم‌های سازه‌ای مختلف نیز موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده است. به‌عنوان نمونه، Zhou و همکاران رفتار تیرهای عمیق SRC را بررسی کرده‌اند [۷]، و در ادامه، عملکرد قاب‌های SRC را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند [۸]. همچنین Xu و همکاران [۹] و Zhang و همکاران [۱۰] رفتار قاب‌های ترکیبی SRC-RC را تحلیل کرده‌اند. نتایج این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهد که استفاده از مقاطع SRC می‌تواند موجب بهبود سختی جانبی و ظرفیت باربری سیستم شود و عملکرد لرزه‌ای سازه را ارتقا دهد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از مقاطع فولادی درون ستون‌های بتن آرمه موجب افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی جانبی و توان اتلاف انرژی اعضا می‌شود؛ از این رو، این نوع ستون‌ها در مناطق با لرزه‌خیزی بالا عملکرد لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان داده و گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای سازه‌ای محسوب می‌گردند. حضور پروفیل فولادی در مقطع ستون، مقاومت آن را در برابر کماتورهای فشاری افزایش می‌دهد و پوشش بتن آرمه نیز نقش مؤثری در بهبود مقاومت در برابر خوردگی و حفاظت از مقطع فولادی دارد. اتصال تیر و ستون یکی از مهم‌ترین اجزای تأثیرگذار بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و کنترل مکانیزم خرابی تدریجی آن‌ها محسوب می‌شود [۱۱]، به‌منظور جلوگیری از شکست زود هنگام اتصال و انتقال مناسب نیرو بین تیر و ستون، رعایت معیار «تیر ضعیف - ستون قوی» در طراحی الزامی است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات صورت گرفته است؛ از جمله مطالعات مقاوم‌سازی اتصالات بتن آرمه [۱۲، ۱۳]، پیش‌بینی شکل‌پذیری با الگوریتم‌های یادگیری ماشین [۱۴]، و بررسی اتصالات کامپوزیت [۱۵-۱۷]، همچنین تحقیقات متعددی بر روی انواع ستون‌های SRC [۱۸، ۱۹]، استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا [۲۰، ۲۱]، افزایش محصور شدگی و یا تغییر نسبت آرماتور عرضی [۲۲-۲۴]، بهره‌گیری از اعضای پیش‌ساخته SRC [۲۵، ۲۶]، تغییر نسبت آرماتور طولی [۲۷، ۲۸]، و استفاده از مقاطع فولادی جدارنازک به‌عنوان جایگزین آرماتور [۲۹] است.

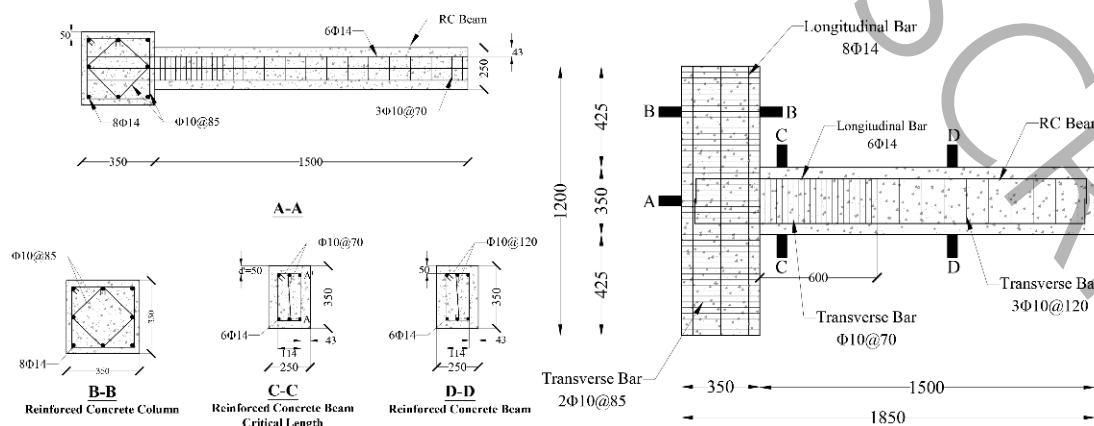
اتصالات ستون SRC [۳۰] با انواع تیرها از جمله تیر فولادی [۳۱-۳۵]، بتن آرمه [۳۶-۳۸] و تیر SRC [۳۹، ۴۰] نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، تأثیر حضور دال بر عملکرد این اتصالات توسط Chu و همکاران [۴۱] و Liao و همکاران [۴۲] بررسی شده است که نتایج بیانگر عملکرد لرزه‌ای مناسب این سیستم‌ها در هر دو حالت همراه با دال و بدون دال می‌باشد. افزایش نسبت نیروی محوری نیز موجب بهبود ظرفیت برشی اتصال می‌شود. از دیگر حوزه‌های پژوهشی، بررسی رفتار اتصالات و ستون‌های SRC در برابر آتش [۴۳، ۴۴] شیوه‌های مختلف مقاوم‌سازی آن‌ها [۴۵] است. یافته‌ها نشان می‌دهد که وجود بتن پیرامون مقطع فولادی باعث تأخیر در افزایش دما شده و در نتیجه عملکرد سازه تحت اثر آتش نسبتاً مطلوب باقی می‌ماند. مطالعات متعددی به بررسی استفاده از قطعه انتقالی (Transitional Piece) به منظور جلوگیری از آسیب در ناحیه اتصال تیر و ستون پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات، مطالعه آزمایشگاهی و عددی Moharram و همکاران [۴۶] بر روی سیستم تیر RC و ستون مختلط می‌باشد. عمده پژوهش‌ها بر روی اتصالات ستون بتن آرمه و تیر فولادی متمرکز شده‌اند. علاوه بر این، Pan و همکاران [۴۷] اتصال تیر بتن آرمه به ستون فولادی محاط در بتن آرمه (SRC) را با استفاده از یک قطعه انتقالی دایره‌ای در ناحیه اتصال بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی صحیح چنین اتصالی نیازمند توجه ویژه به نسبت مساحت آرماتورهای تیر در ناحیه دایره‌ای، نسبت خاموت‌ها در اعضای مختلف و نحوه قرارگیری

گل‌میخ‌ها می‌باشد. همچنین، عملکرد اتصال پیشنهادی به طول مهاري آرماتورها در بتن، مکانیسم انتقال برش بین بتن و فولاد و میزان محصورشدگی مقطع وابسته است. بررسی نحوه قرارگیری مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن‌آرمه در مطالعات انجام شده توسط دیگر نویسندگان نشان می‌دهد، این مقطع در جهت بال به تیر مورد نظر متصل شده و آرماتورهای طولی تیر نیز از بال مقطع فولادی ستون بتن‌آرمه عبور کرده است. همچنین نحوه اتصال قطعه انتقالی مورد بررسی در مطالعات انجام شده توسط دیگر نویسندگان به مقطع ستون فولادی به صورت پیچی با استفاده از پیچ‌های با مقاومت بالا انجام شده است. مطالعات پیشین در زمینه نحوه قرارگیری مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن‌آرمه نشان می‌دهد که این مقطع عمدتاً در جهت بال به تیر متصل شده و آرماتورهای طولی تیر از بال مقطع فولادی ستون عبور می‌کنند. همچنین، در مطالعات دیگر، اتصال قطعه انتقالی به مقطع ستون فولادی معمولاً به صورت پیچی با استفاده از پیچ‌های با مقاومت بالا انجام شده است. در این مطالعه، عملکرد لرزه‌ای آزمایشگاهی اتصال بین مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و تیر بتن‌آرمه بررسی شده و اثر استفاده همزمان از قطعه انتقال (پروفیل فولادی-Transition Part) در تیر و ناحیه اتصال تیر به ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. قطعه انتقالی در ناحیه اتصال تیر به ستون به جان مقطع فولادی محاط در ستون جوش شده و آرماتورهای طولی تیر از جان مقطع فولادی عبور کرده و در انتهای ستون مهار می‌شوند. این طراحی امکان مقایسه اثرات قرارگیری مقاطع فولادی محاط در بتن‌آرمه در ستون و ناحیه اتصال با مطالعات پیشین را فراهم می‌کند. تیرهای مورد بررسی به صورت پیوسته و مطابق با الزامات استاندارد ACI318-2019 [۴۸] طراحی شده‌اند و اتصال مورد مطالعه یک اتصال میانی در سازه محسوب می‌شود.

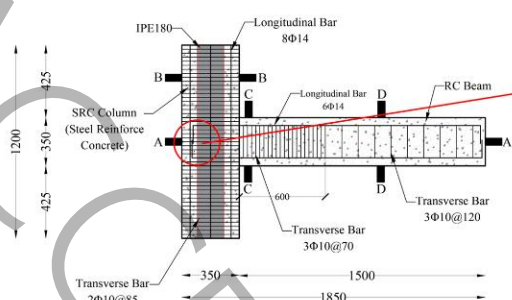
هدف اصلی این مطالعه، جلوگیری از شکست زود هنگام تیر و محدود کردن خرابی در ناحیه چشمه اتصال و همچنین پیشگیری از گسترش ترک در ستون است. همچنین از دیگر اهداف اصلی این مطالعه، مهار آرماتورهای طولی تیر به جان مقطع فولادی ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه می‌باشد. علاوه بر این، اثر استفاده همزمان از قطعه انتقالی (پروفیل فولادی-TP) در تیر بتن‌آرمه و ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه (SRCC-RCB-TP-Hooked) بررسی شده است. عملکرد این اتصال، با دو اتصال دیگر، یعنی اتصال ستون فولادی محاط در بتن‌آرمه به تیر بتن‌آرمه (SRCC-RCB) و اتصال تیر و ستون بتن‌آرمه (RCC-RCB)، مقایسه شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل تأثیر قطعه انتقالی و نحوه قرارگیری مقطع فولادی محاط در بتن‌آرمه بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و سختی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی می‌باشد. در نهایت، استفاده از قطعه انتقالی به عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر-ستون و افزایش ایمنی و مقاومت نمونه‌ها پیشنهاد شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

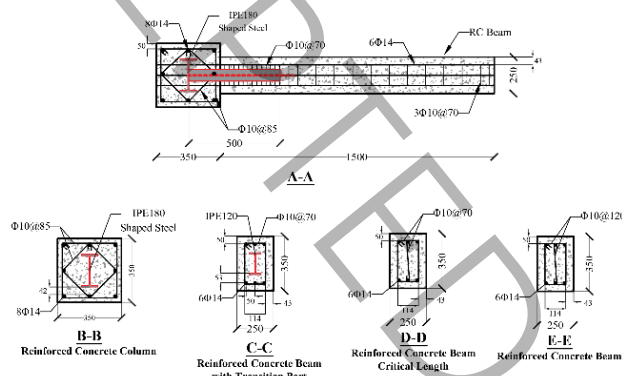
در این مطالعه سه نمونه اتصال کناری تیر-ستون ساخته و مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱ ارائه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی براساس نوع ستون (بتن‌آرمه، فولادی محاط در بتن‌آرمه)، وجود مقطع انتقال دهنده و در هر سه نمونه وجود تیر بتن‌آرمه دسته‌بندی شده و با عناوین RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-TP نام‌گذاری شده است.



الف) نمونه RCC-RCB



SRCC-RCB نمونه (ب)



SRCC-RCB-TP-Hooked نمونه (ج)

شکل ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

RC (Reinforced Concrete) بیان کننده بتن آرمه، SRC (Steel Incased Reinforced Concrete) بیانگر مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و TP-Hooked بیان کننده مقطع انتقالی می باشد. آرماتورهای طولی تیر بتن آرمه، در هر دو نمونه دارای ستون SRC، پس از عبور از جان مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و در نمونه دارای ستون بتن آرمه، در انتهای داخلی ستون مهار شده اند. طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked براساس استاندارد ACI318-19 انجام شده و در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به طراحی‌های انجام شده برای تیر و ستون، طول ستون در ناحیه بحرانی قرار دارد. بر همین اساس فاصله خاموت‌ها براساس استاندارد ACI318-19 در ناحیه بحرانی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها

| نمونه‌ها | نوع ستون | نوع تیر | نیروی محوری (kN) | مقطع فولادی ستون | مقطع فولادی تیر | آرماتورهای عرضی | آرماتورهای طولی |
|--------------------|--|----------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RCC-RCB | بتن آرمه (RCC) | بتن آرمه | ۴۰۰ | - | - | Φ10 | Φ14 |
| SRCC-RCB | محاط در بتن آرمه (SRCC) با مقطع فولادی | بتن آرمه | ۴۰۰ | IPE180 | - | Φ10 | Φ14 |
| SRCC-RCB-TP-Hooked | محاط در بتن آرمه (SRCC) با مقطع فولادی | بتن آرمه | ۴۰۰ | IPE180 | IPE120 | Φ10 | Φ14 |

درصد فولاد مصرفی در طراحی تیر و ستون، براساس استاندارد ACI318-19، در بازه ۱٪ الی ۸٪ قرار دارد. خاموت‌های استفاده برای تیر و ستون هر سه نمونه قطر ۱۰ میلی‌متر می باشد. فواصل آن‌ها در ستون ۸۵ میلی‌متر و همچنین در طراحی تیر، بخشی از طول تیر بتن آرمه در ناحیه بحرانی و بخشی دیگر در خارج از ناحیه بحرانی قرار گرفته است. فاصله خاموت‌های تیر در ناحیه بحرانی ۷۰ میلی

متر و خارج از ناحیه بحرانی ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر سه نمونه بار محوری فشاری ثابت ۴۰۰ کیلونیوتن معادل ۰.۸٪ ظرفیت محوری ستون بوده، اعمال گردیده است.

در طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل مقیاس شده مبتنی بر اصول کلاسیک similitude طراحی نشده‌اند و ابعاد آن‌ها با توجه به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی و ظرفیت سیستم بارگذاری انتخاب شده است. در مقابل، خواص مصالح، نسبت‌های هندسی، جزئیات اجرایی و شرایط بارگذاری بدون اعمال ضرایب مقیاس و مطابق با مقادیر واقعی در نظر گرفته شده‌اند تا رفتار واقعی و مکانیزم‌های حاکم بر عملکرد اتصال تیر به ستون به درستی ارزیابی شود. طراحی تیر و ستون به طوری انجام شده است که ظرفیت لنگر ستون، حداقل برابر با ۱.۲ ظرفیت لنگر تیر باشد. در طراحی تیرها و ستون‌ها اصل تیر ضعیف- ستون قوی در نظر گرفته شده است، به طوری که آسیب، شکست و مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شده و در ناحیه چشمه اتصال و ستون آسیب و یا ترک مشاهده نشود (رابطه ۱). مقطع فولادی به کار رفته در ستون SRC، IPE180 به ارتفاع جان ۱۸۰ mm، عرض بال ۹۱ mm و به طول ۱۲۰۰ mm است. همچنین قطعه انتقالی (Transition Part)، از نوع IPE120 به ارتفاع جان ۱۲۰ mm، عرض بال ۶۴ mm و به طول ۵۰۰ mm می‌باشد. برای عبور آرماتورهای طولی تیر از مقطع فولادی ستون SRC نمونه‌ها، در جان مقطع سوراخی به ابعاد ۲۵ mm ایجاد شد و تقویت کننده‌ای در جان یا بال آن استفاده نشده است:

$$\sum M_C \geq 1.2 \sum M_B \quad (1)$$

برای مهار آرماتورهای طولی تیر به ستون، براساس استاندارد ACI318-19، طول مهاری ۱۱ برابر قطر میلگرد با زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است که در هر سه نمونه آرماتورهای دارای خم‌های ۹۰ درجه در انتهای داخلی ستون به آرماتورهای طولی آن، مهار گردیده است.

برای ظرفیت برشی طراحی شده هر سه نمونه، برابر مجموع ظرفیت‌های برشی بتن ناحیه اتصال، آرماتورهای طولی و عرضی و در مقطع فولادی ستون و ناحیه اتصال تیر می‌باشد (رابطه ۲). ظرفیت برشی طراحی شده برای نمونه‌های SRCC-RCB، RCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked در جدول ۲ ارائه شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} = \text{Shear RC Beam} : V_{concrete} + V_{reinforcement} \\ = \text{Shear RC Column} : V_{concrete} + V_{reinforcement} \\ = \text{Shear SRC Column} : V_{concrete} + V_{reinforcement} + V_{steel\ section} \\ = \text{Shear RC Beam with TP (Transional Part)} : V_{concrete} + V_{reinforcement} + V_{steel\ section} \end{array} \right. \quad (2)$$

جدول ۲: ظرفیت‌های برشی هر یک از نمونه‌ها

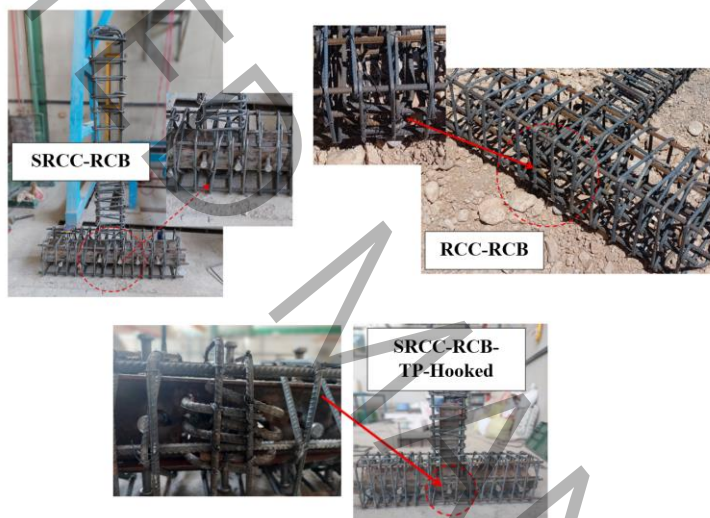
| ظرفیت برشی ستون (VjV-kN) | | ظرفیت برشی تیر (VjH-kN) | | | نمونه‌ها | |
|-----------------------------|----------------|----------------------------|--------|----------------|----------|--------------------|
| VSteel | Vreinforcement | VConcrete | VSteel | Vreinforcement | | VConcrete |
| - | ۵۳۶.۵ | ۱۰۱ | - | ۴۰۳.۷ | ۷۲ | RCC-RCB |
| ۳۸۲ | ۵۳۶.۵ | ۱۰۱ | - | ۴۰۳.۷ | ۷۲ | SRCC-RCB |
| ۳۸۲ | ۵۳۶.۵ | ۱۰۱ | ۲۱۱.۱ | ۴۰۳.۷ | ۷۲ | SRCC-RCB-TP-Hooked |

جزئیات اجرایی آرماتورهای طولی و عرضی تیر و ستون، مقاطع فولادی ستون و ناحیه اتصال تیر نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است. مقاطع فولادی IPE180 و IPE120 در بتن آرمه محصور شده‌اند و بار محوری به ستون‌های هر سه نمونه اعمال می‌شود. برای ایجاد ارتباط بین بتن و فولاد از گل‌میخ‌های برشی استفاده شده است (شکل ۳). فواصل گل‌میخ‌ها بر اساس استاندارد AISC-360 تعیین شده‌اند. در ستون، گل‌میخ‌ها روی بال و جان مقاطع فولادی به ترتیب با فواصل ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر نصب شده‌اند و در

تیر (Transition Part) نیز روی بال و جان مقطع فولادی با همان فواصل نصب شده‌اند تا انتقال نیرو به‌طور مؤثر انجام شود و رفتار اتصال به شکل قابل اطمینان مشاهده گردد.



(الف) جزئیات ساخت نمونه‌ها



(ب) مهار آرماتورهای طولی و جزئیات ناحیه چشمه اتصال
شکل ۲: جزئیات اجرایی آرماتورها و ناحیه اتصال

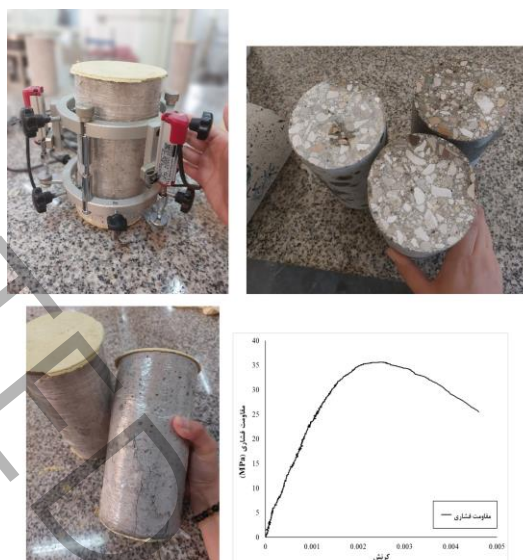


شکل ۳: جزئیات گل‌میخ‌های برشی

۲-۱- مشخصات مصالح

بتن تیر و ستون به صورت یکپارچه و درجا انجام شده است. بتن آن با سیمان پرتلند تیپ II و با ماسه شکسته با اندازه ۹/۵ mm ساخته شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ mm از بتن گرفته و عمل‌آوری شده و بعد از ۲۸ روز مورد آزمایش

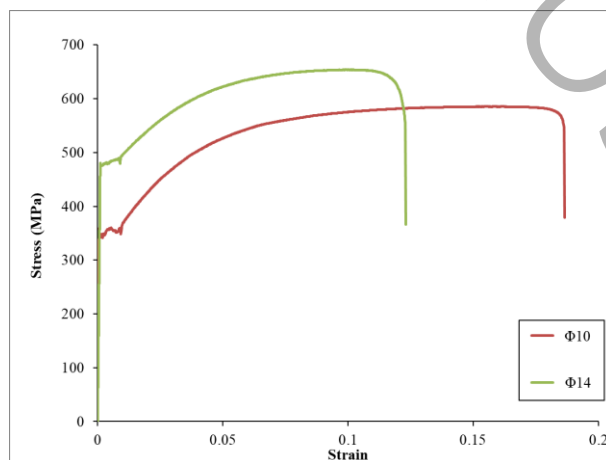
مقاومت فشاری با دستگاه Universal (شکل ۴) و مطابق استاندارد ASTM-C39-8 [۴۹] قرار گرفته است. مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها به طور میانگین ۳۵ MPa بوده است. مشخصات مکانیکی آرماتورهای طولی و عرضی که از نوع AIII هستند، شامل تنش تسلیم، تنش نهایی و مدول الاستیسیته، مطابق استانداردهای معتبر ارائه شده و در جدول ۳ درج گردیده است. علاوه بر آن، نمودار تنش-کرنش آرماتورها در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش بتن

جدول ۳: مشخصات مکانیکی آرماتورها

| مدول الاستیسیته (GPa) | تنش نهایی (MPa) | تنش تسلیم (MPa) | طول نمونه (mm) | قطر آرماتور (mm) |
|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| ۱۶۶ | ۵۴۷ | ۳۵۹,۲ | ۲۴۰ | Φ10 |
| ۲۱۵,۸۷ | ۵۶۱,۸ | ۴۸۰ | ۲۸۰ | Φ14 |

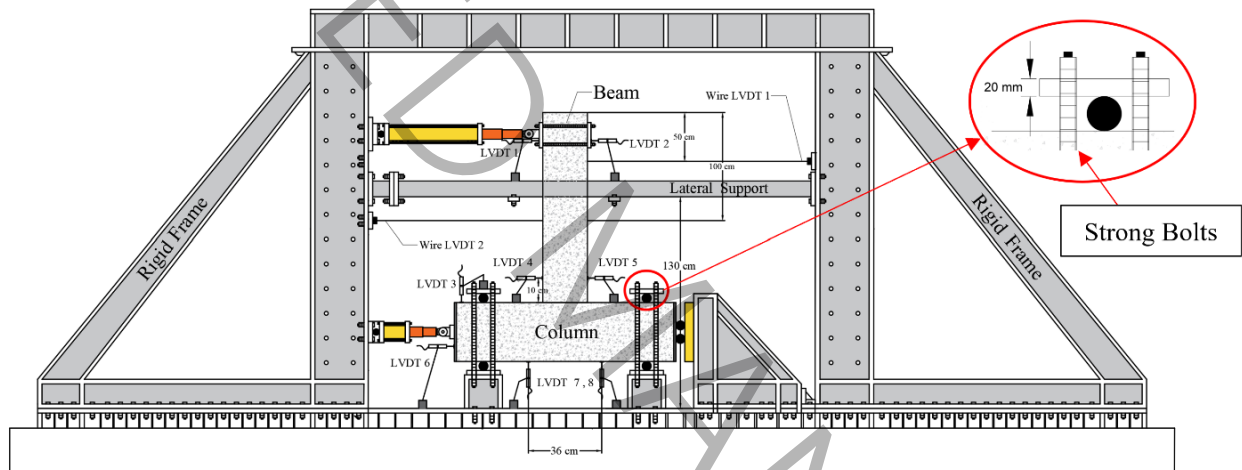


شکل ۵: نمودار تنش-کرنش آرماتور

لازم به ذکر است که اتصالات تیر به ستون مورد بررسی در این مطالعه، به صورت درجا و یکپارچه اجرا شده‌اند. از این رو، برخلاف اتصالات متداول فولادی، ناحیه‌ای با مرز مشخص و قابل تفکیک به عنوان چشمه اتصال برشی به صورت مستقل وجود ندارد. در این نوع اتصال، مقاومت برشی و انتقال نیرو در ناحیه اتصال از طریق مشارکت همزمان بتن، نحوه قرارگیری آرماتورها و مقطع فولادی محاط در بتن آرمه تأمین می‌شود. بر این اساس، ارزیابی رفتار برشی ناحیه اتصال در این مطالعه به صورت کلی و مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.

۲-۲- جزئیات بارگذاری

نحوه بارگذاری و جزئیات ستاپ آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است. بار محوری فشاری ۴۰۰ کیلونیوتن به روی ستون نمونه‌ها اعمال شده است. بارگذاری جانبی رفت و برگشتی تحت پروتکل بارگذاری بر روی نقطه‌ای به فاصله ۱۲۵ mm از لبه انتهایی تیر اعمال شده است. تکیه‌گاه ستون به کف قوی آزمایشگاه، به صورت مفصلی می‌باشد و همچنین با استفاده از ورق‌های فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و پیچ‌های قوی، به پایه‌های متصل به کف قوی آزمایشگاه مهار شده است. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه نمونه، از دو تیر قوی فولادی در دو طرف نمونه به ارتفاع ۱۷۵۰ mm از اتصال تیر به ستون که متصل به قاب صلب آزمایشگاه بوده، استفاده گردیده است.



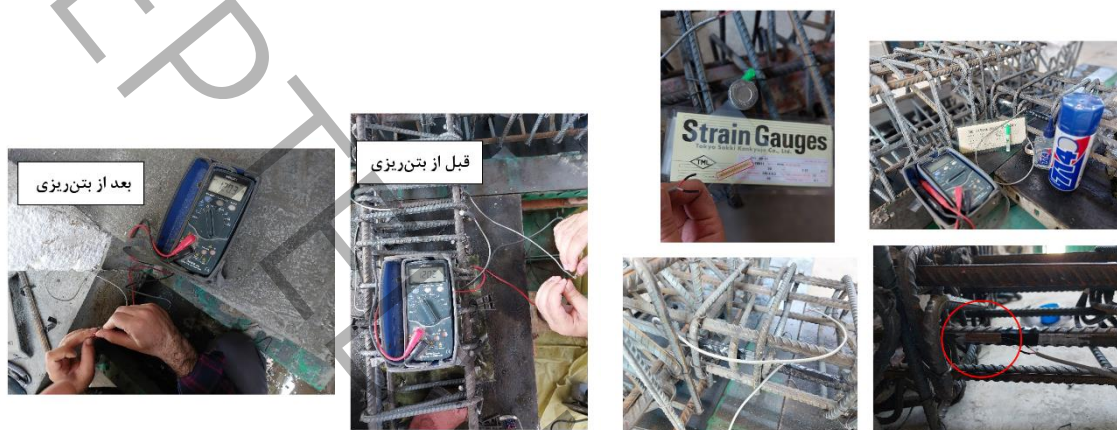
(الف) طراحی جزئیات ستاپ آزمایشگاه



(ب) جزئیات ستاپ آزمایشگاه

شکل ۶: نحوه بارگذاری و جزئیات ستاپ آزمایش

برای اندازه‌گیری کرنش آرماتورهای طولی تیر، بر روی هر نمونه ۴ کرنش‌سنج در مقطع تیر به فاصله ۵۰ میلی‌متری از یکدیگر بر روی آرماتور طولی میانی تیر قرار گرفته است. همچنین اولین کرنش‌سنج به فاصله ۵۰ میلی‌متری از لبه چشمه اتصال می‌باشد. با توجه به مشخصات کرنش‌سنج‌ها مقاومت آن ۱۲۰ اهم می‌باشد که مقاومت هر یک در مراحل مختلف ساخت و نصب و هنگام انجام آزمایش با استفاده از اهم‌سنج، بررسی شده است (شکل ۷). برای اندازه‌گیری و بررسی جابه‌جایی و دوران هر یک از نمونه‌ها در نقاط مختلف آن، از LVDT استفاده شده که در شکل ۶-الف جزئیات قرارگیری هر یک نشان داده شده است. برای اعمال بار چرخه‌ای به انتهای تیر هر یک از نمونه‌ها، از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن و برای اندازه‌گیری بار اعمالی از یک بارسنج (LoadCell) با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. برای اعمال نیروی محوری به هر یک از ستون‌ها از جک هیدرولیکی و بارسنج، هر یک با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن استفاده گردیده است.

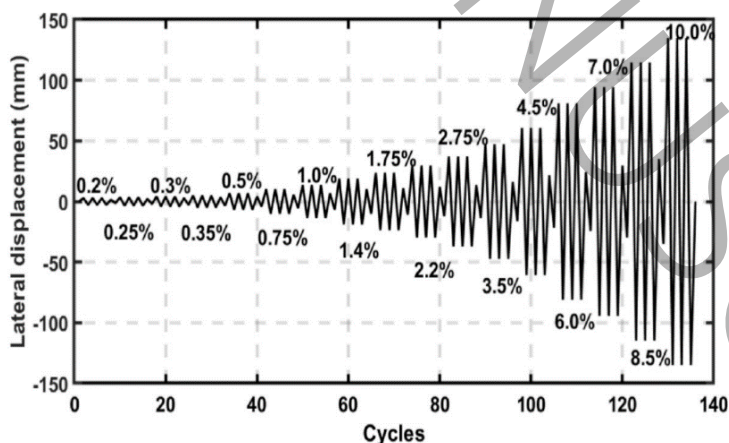


(ب) عملکرد کرنش‌سنج‌ها قبل و بعد از بتن‌ریزی

(الف) مشخصات و جزئیات اجرایی کرنش‌سنج‌ها

شکل ۷: جزئیات کرنش‌سنج‌ها

ستون‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای وارد بر تیر، تحت بار محوری فشاری ثابت ۴۰۰ کیلونیوتن قرار گرفته‌اند. پروتکل بارگذاری وارد بر تیر، براساس استاندارد ACI374-1-05 [۵۰] می‌باشد. روند بارگذاری تا زمانی که یکی از دو شرط، ظرفیت باربری جانبی نمونه به میزان ۱۵٪ کاهش یافته و یا آرماتورهای طولی گسیخته شوند (هر کدام زودتر رخ دهد) ادامه می‌یابد. الگوی بارگذاری چرخه‌ای و نحوه اعمال و محل اعمال بار بر روی نمونه در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: پروتکل بارگذاری [۵۰]

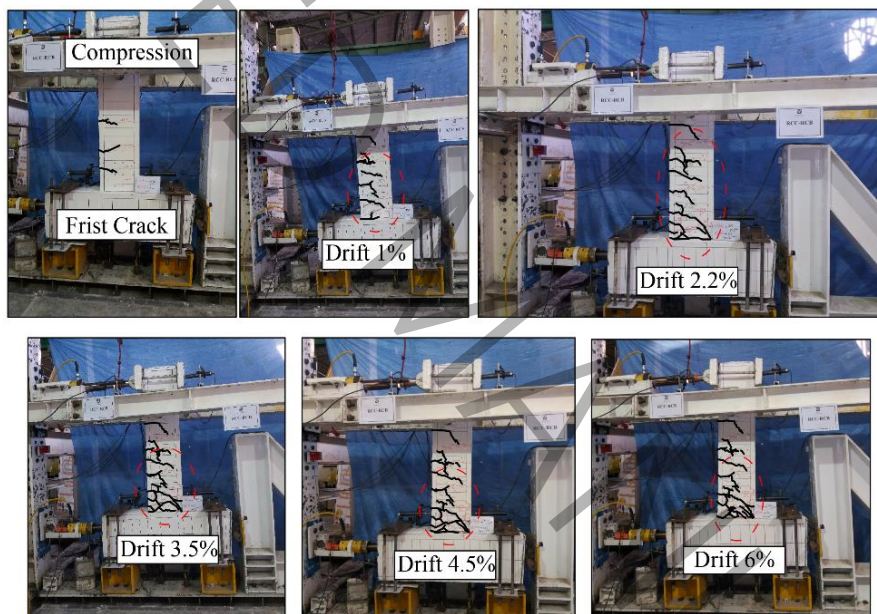
۳- نتایج آزمایشگاهی

نحوه ترک‌خوردگی، نحوه و محل شکست نمونه، استفاده از قطعه انتقالی (TP) و تاثیر آن بر تشکیل مفصل پلاستیک، ظرفیت باربری جانبی، نمودار هیستریزس (نیرو-جابه‌جایی)، سختی سکانتی، میزان انرژی جذب شده هر یک از نمونه‌ها با توجه به شرایط آن‌ها تحت

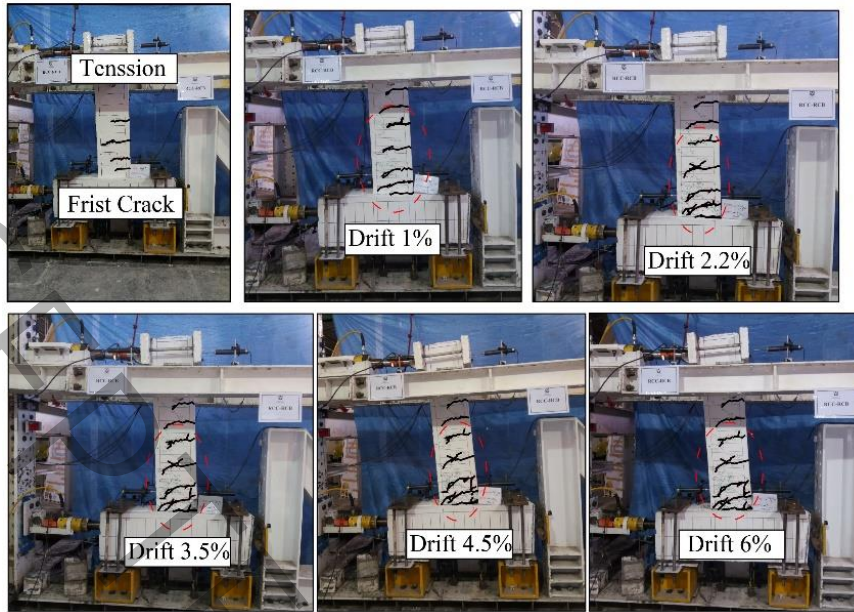
بارگذاری چرخه‌ای، و بررسی تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی تیر با توجه به نتایج کرنش‌سنج‌ها از جمله پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه می‌باشد.

۳-۱- نحوه و الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌ها

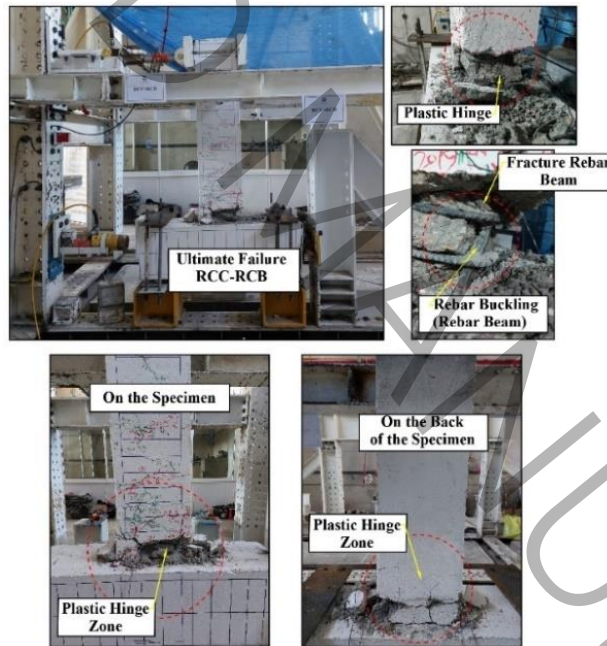
الگوی ترک‌خوردگی و پخش ترک و شکست نهایی نمونه RCC-RCB تحت فشار و کشش در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شده است. عمده ترک‌های ایجاد شده در نمونه RCC-RCB در انتهای تیر و نزدیک به ناحیه اتصال محدود به فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از بر اتصال می‌باشد و در چشمه اتصال و ستون ترک و یا خرابی ایجاد نشده است، که نشان دهنده اصل ستون قوی-تیر ضعیف می‌باشد. ترک‌های خمشی اولیه ایجاد شده در تیر در جابه‌جایی ۰/۲٪ در نیمه انتهایی تیر (۱/۲ انتهایی تیر) نزدیک به ناحیه اتصال و به ترتیب تحت بارهای کششی و فشاری ۲۰/۹ kN + و ۱۳ kN - ایجاد شده است. سپس با ادامه روند بارگذاری، ترک‌ها گسترش یافته و عمق آن‌ها افزایش یافته است. در ابتدا پوشش اولیه بتن ترک خورده و سپس با افزایش بارگذاری چرخه‌ای، آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی، ۲/۲٪ تسلیم شدند. همچنین با گسترش ترک‌ها و افزایش عمق ترک و افزایش بارگذاری آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۴/۵٪ نیز گسیخته شده است. با توجه به نتایج و طراحی اولیه نمونه براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف ناحیه چشمه اتصال و ستون بدون ترک‌خوردگی و آسیب باقی ماند.



(الف) الگوی ترک‌خوردگی نمونه RCC-RCB تحت فشار

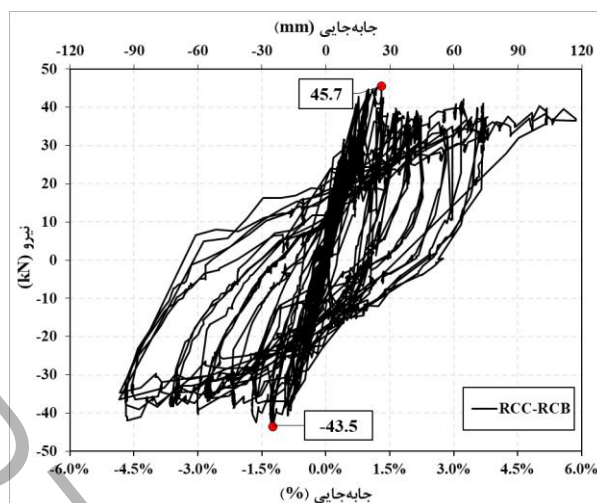


شکل ۹: روند گسترش ترک خوردگی نمونه RCC-RCB تحت کشش
(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه RCC-RCB تحت کشش



شکل ۱۰: شکست نهایی نمونه RCC-RCB

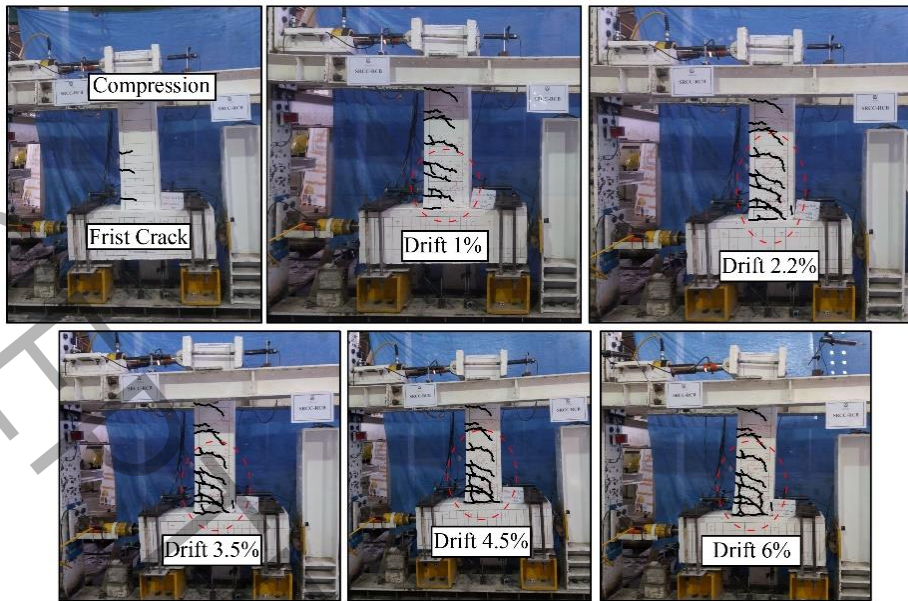
در جابه‌جایی ۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۲/۷۵٪ و ۳/۵٪ کمانش در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزس نمونه RCC-RCB در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱، نمودار هیستریزس نمونه -RCC س RCB نمودار تقریباً متقارنی می‌باشد.



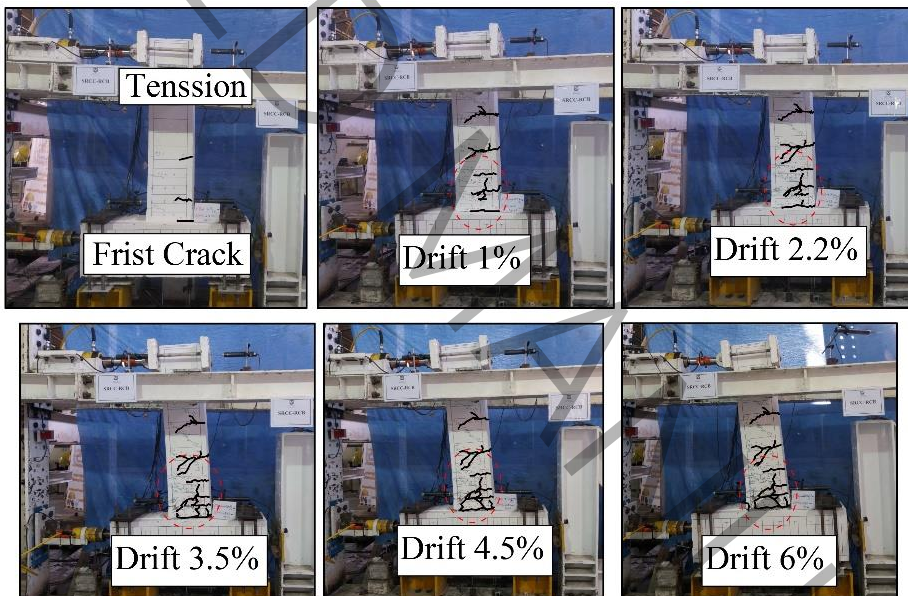
شکل ۱۱: هیستریزیس نمونه RCC-RCB

حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه RCC-RCB در جابه‌جایی ۰.۱٪ به ترتیب برابر با $43/5 \text{ kN}$ و $45/7 \text{ kN}$ می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۰.۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کمانش آرماتورهای طولی تیر نیز افزایش یافته است. آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۰.۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۰.۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۰.۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.

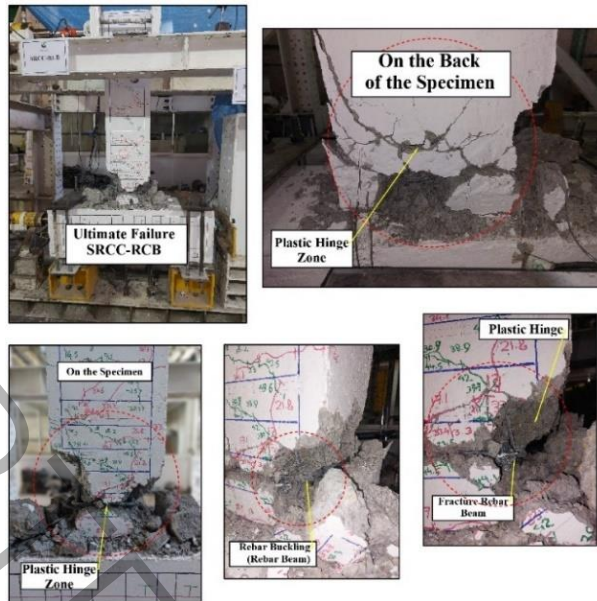
انتشار ترک و فرآیند شکست نهایی نمونه SRCC-RCB تحت فشار و کشش در شکل ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. عمده ترک‌های ایجاد شده در نمونه SRCC-RCB در انتهای تیر و دور از ناحیه اتصال در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از محل اتصال محدود می‌شود و در چشمه اتصال و ستون ترک و یا خرابی ایجاد نشده است، که نشان دهنده اصل ستون قوی-تیر ضعیف می‌باشد. ترک‌های سطحی اولیه در جابه‌جایی ۰/۲ و تحت بارهای کششی و فشاری به ترتیب 13 kN و $16/5 \text{ kN}$ ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۰.۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۰.۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۰.۲/۷۵٪ و ۰.۳/۵٪ کمانش در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزیس نمونه SRCC-RCB در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۴، نمودار هیستریزیس نمونه SRCC-RCB تقریباً متقارنی می‌باشد.



(الف) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB تحت فشار

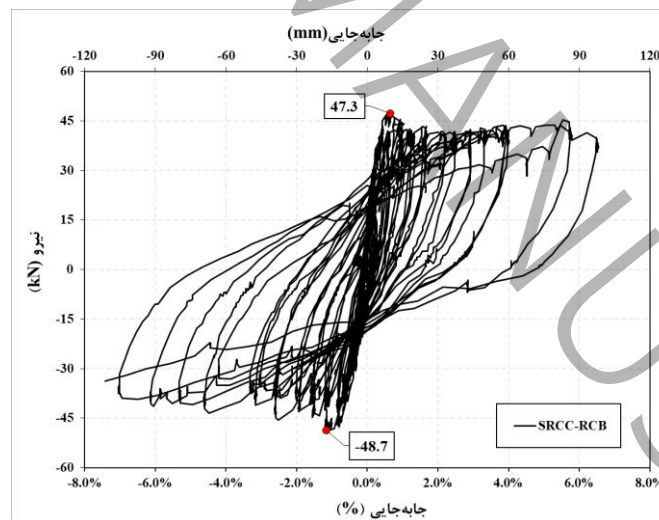


(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB تحت کشش
 شکل ۱۲: روند گسترش ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB



شکل ۱۳: شکست نهایی نمونه SRCC-RCB

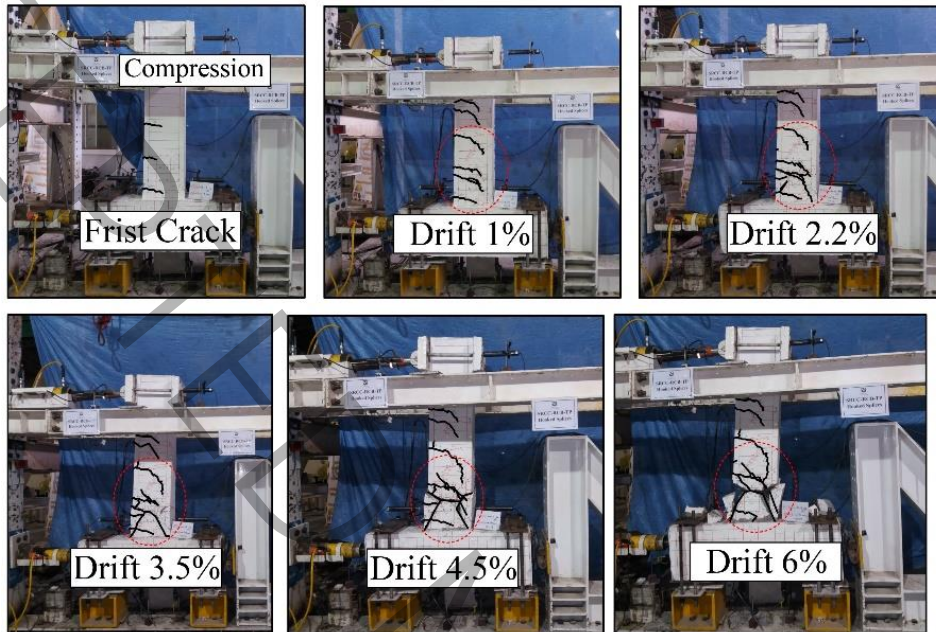
حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه SRCC-RCB در جابه‌جایی ۱٪ به ترتیب برابر با $50/1 \text{ kN}$ و $38/8 \text{ kN}$ می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کمانش آرماتورهای طولی تیر نیز افزایش یافته است. آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.



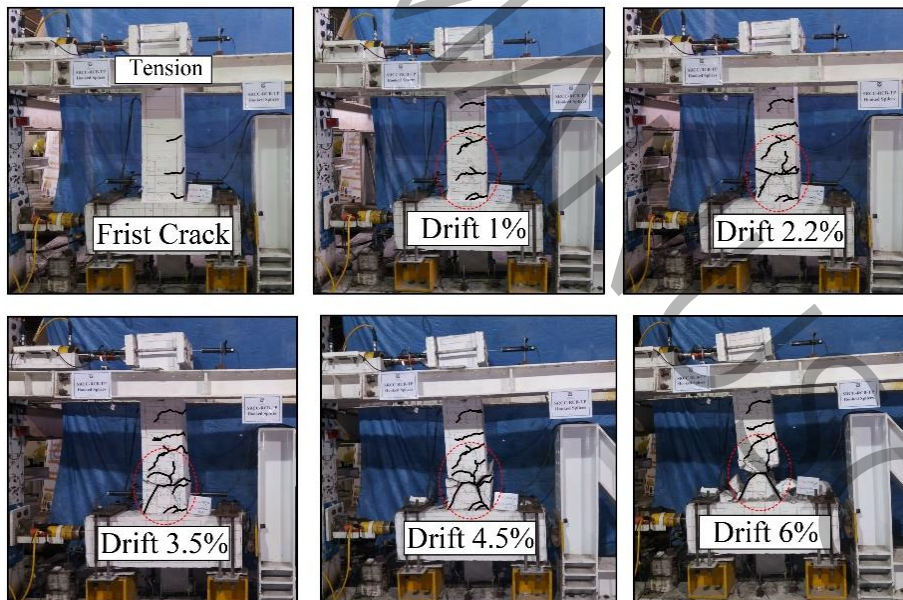
شکل ۱۴: هیستریزیس نمونه SRCC-RCB

الگوی ترک‌خوردگی و شکست نهایی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در شکل ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked شامل تیر و ستون بتن‌آرمه می‌باشد. ترک‌های سطحی اولیه تحت بارهای کششی و فشاری به ترتیب $15/5 \text{ kN}$ و 18 kN و در جابه‌جایی ۰/۲ ایجاد شده و سپس با ادامه روند بارگذاری ترک‌ها گسترش یافته و عمق آن‌ها افزایش یافته است. در ابتدا پوشش اولیه بتن ترک خورده و سپس با افزایش بارگذاری چرخه‌ای، آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی، ۲/۲٪ تسلیم شد. همچنین با گسترش ترک‌ها و افزایش عمق ترک و افزایش بارگذاری آرماتورهای طولی تیر در جابه‌جایی ۴/۵٪ نیز گسیخته شده است. با توجه به نتایج و طراحی اولیه نمونه براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف ناحیه چشمه اتصال و ستون بدون ترک‌خوردگی و آسیب باقی ماند. در

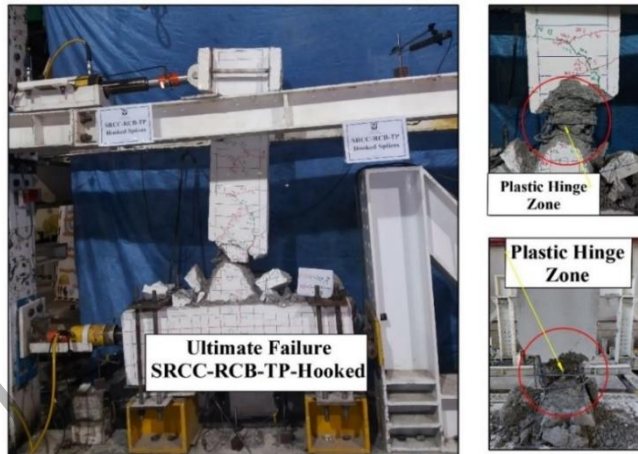
جابه‌جایی ۱٪ ترک‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون ایجاد و با افزایش روند بارگذاری جانبی، عمق ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین با افزایش جابه‌جایی و بارگذاری جانبی ترک‌های خمشی در تیر گسترش یافته و در گوشه‌های ناحیه اتصال تیر به ستون هم در فشار و هم در کشش خرابی عمده ایجاد شده است. در جابه‌جایی ۲/۲٪ آرماتورهای طولی تیر تسلیم شده و در جابه‌جایی‌های ۲/۷۵٪ و ۳/۵٪ کم‌اندک در آرماتورها مشاهده شد. نتایج نمودار هیستریزس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در شکل ۱۷ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۷، نمودار هیستریزس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نمودار تقریباً متقارنی می‌باشد.



(الف) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked تحت فشار

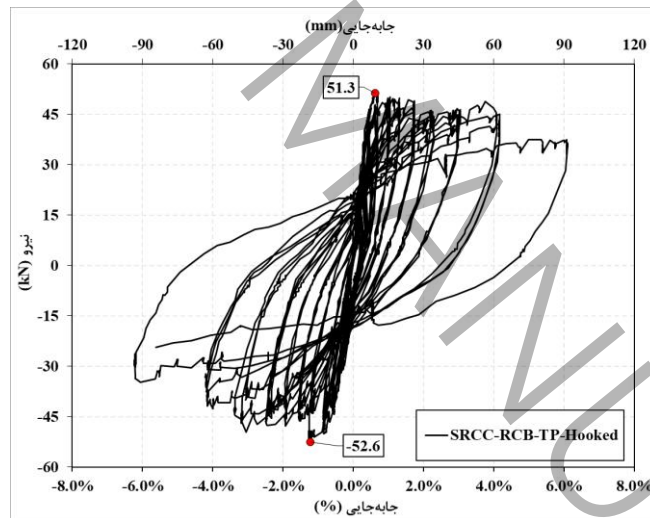


(ب) الگوی ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked تحت کشش
 شکل ۱۵: روند گسترش ترک خوردگی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked



شکل ۱۶: شکست نهایی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked

حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در جابه‌جایی ۱٪ به ترتیب برابر با $54/6 \text{ kN}$ و $45/3 \text{ kN}$ می‌باشد که با افزایش جابه‌جایی جانبی به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته است. در جابه‌جایی جانبی ۴/۵٪ عمق ترک‌های پوشش بتن در ناحیه اتصال و مفصل پلاستیک زیاد شده و کمانش آرماتورهای طولی تیر نیز افزایش یافته است. آرماتورهای برشی تیر در جابه‌جایی ۶٪ و آرماتورهای طولی آن در جابه‌جایی ۷٪ گسیخته شده است. روند بارگذاری تا مرحله ای که ظرفیت باربری در فشار و کشش به میزان ۸۵٪، حداکثر ظرفیت باربری رسیده باشد، ادامه داشته است. در انتهای بارگذاری، در ناحیه چشمه اتصال و ستون هیچ ترک و یا خرابی مشاهده نشده است.



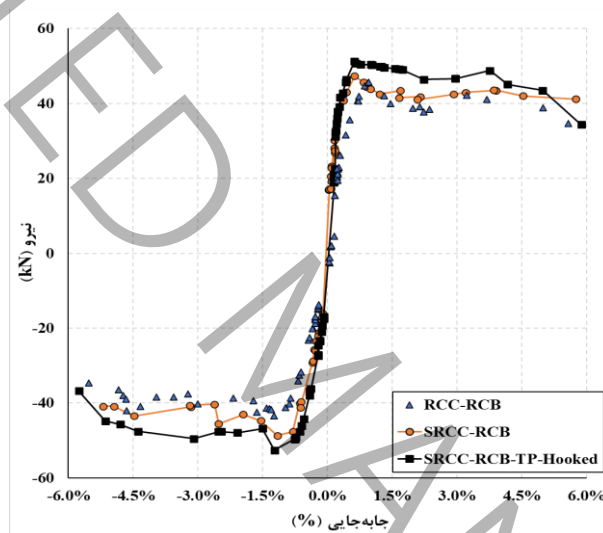
شکل ۱۷: هیستریزیس نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked

نتایج نشان می‌دهد مفصل پلاستیک و خرابی‌های ایجاد شده، براساس اصل ستون قوی-تیر ضعیف، در تیر تشکیل شده است. الگوهای ترک‌خوردگی، خرابی‌ها و ظرفیت باربری در هر سه نمونه SRCC-RCB، RCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked با یک دیگر متفاوت می‌باشد. به دلیل استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه در دو نمونه SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked، ظرفیت باربری فشاری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه RCC-RCB افزایش یافته است. همچنین پخش ترک‌خوردگی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بهتر و بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. طول مفصل پلاستیک در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نسبت به دو نمونه دیگر افزایش یافته است. عمده ترک‌های خمشی ایجاد شده در نمونه SRCC-RCB-TP بعد از طول TP (۵۰۰ میلی‌متر) و در نمونه SRCC-RCB نیز در طول تیر پخش شده است و محدود به ۱/۲ پایین تیر نمی‌باشد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه RCC-RCB عمده ترک‌ها در نزدیکی ناحیه اتصال تیر به ستون می‌باشد.

۳-۲- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها

نمودار نیرو-جابجایی هر سه نمونه در شکل‌های ۱۱، ۱۴ و ۱۷ ارائه شده است. نمودار پوش‌آور نمونه‌های آزمایشگاهی RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked با یکدیگر مقایسه شده و در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با توجه به منحنی هیستریزس نمونه‌ها می‌توان حداکثر ظرفیت باربری جانبی، ظرفیت تسلیم و ظرفیت نهایی را تعیین کرد. با استفاده از هر یک از این پارامترها می‌توان شکل‌پذیری، سختی نمونه و انرژی جذب شده را محاسبه نمود.

نمودار هیستریزس هر کدام از نمونه‌ها مشابه یکدیگر می‌باشد اما، به دلیل نحوه ترک‌خوردگی و گسترش ترک در سطح تیر در ناحیه کشش و فشار، نامتقارن شده و با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به ظرفیت باربری فشاری و کششی نمونه RCC-RCB مشاهده می‌شود که نمودار هیستریزس آن تقریباً متقارن می‌باشد. نتایج نمونه SRCC-RCB نشان می‌دهد که ظرفیت باربری در ناحیه فشاری ۲۳٪ بیشتر از ناحیه کششی بوده در نتیجه باعث عدم تقارن نمودار هیستریزس شده است که جذب انرژی در ناحیه فشاری بیشتر از ناحیه کششی می‌باشد. در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked ظرفیت باربری در ناحیه فشاری ۱۷٪ بیشتر از ناحیه کششی می‌باشد که باعث ایجاد عدم تقارن کمی در نمودار هیستریزس شده است. همچنین سبب افزایش جذب انرژی در ناحیه فشاری می‌شود.



شکل ۱۸: نمودار پوش‌آور (BackBone) نمونه‌ها

با توجه به منحنی‌های پوش‌آور، مشاهده می‌شود که نمونه RCC-RCB در ناحیه کششی، نمونه SRCC-RCB در ناحیه فشاری و نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در هر دو جهت عملکرد خوبی داشته است. با توجه به الگوهای ترک‌خوردگی و شکست نمونه‌ها، نمودارهای هیستریزس و پوش‌آور و ظرفیت باربری جانبی آن‌ها مشاهده می‌شود که خرابی در نمونه RCC-RCB در ناحیه کششی آن بیشتر، در نمونه SRCC-RCB عمده ترک‌ها و آسیب‌ها در ناحیه فشاری ایجاد شده و در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked با توجه به پخش گسترده ترک‌ها در سطح تیر نمونه و به دور از ناحیه اتصال مشاهده می‌شود که در هر دو جهت فشار و کشش عملکرد مناسبی داشته است. همچنین با توجه به شیب اولیه نمودار پوش‌آور نمونه‌ها (شکل ۱۸) سختی اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بیشتر از نمونه SRCC-RCB و بیشتر از نمونه RCC-RCB می‌باشد که نشان می‌دهد در صورت استفاده از یک مقطع فولادی در ناحیه اتصال و محصور در تیر بتن‌آرمه به همراه ستون SRC، سختی اولیه افزایش یافته و جذب انرژی بالاتری دارد.

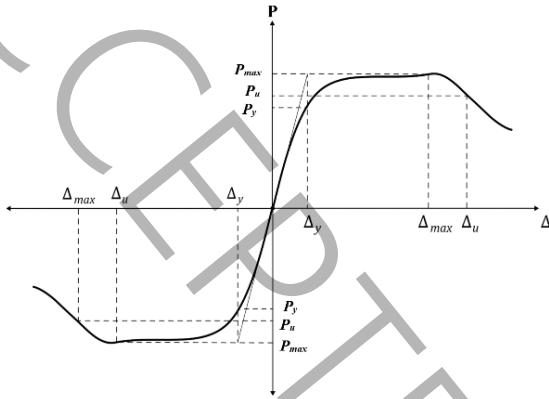
۳-۳- شکل‌پذیری و کاهش و سختی

شکل‌پذیری جانبی به عنوان نسبت حداکثر جابجایی به جابجایی در نقطه تسلیم نمونه تعریف می‌شود (رابطه ۳). با توجه به تعریف شکل‌پذیری جانبی، حداکثر جابجایی برای نمونه‌ها به عنوان جابجایی مربوط به نیروی ۸۵ درصد نیروی تسلیم در نظر گرفته می‌شود که از شیب ناحیه خطی (الاستیک) منحنی ستون فقرات به دست می‌آید. در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۵۱].

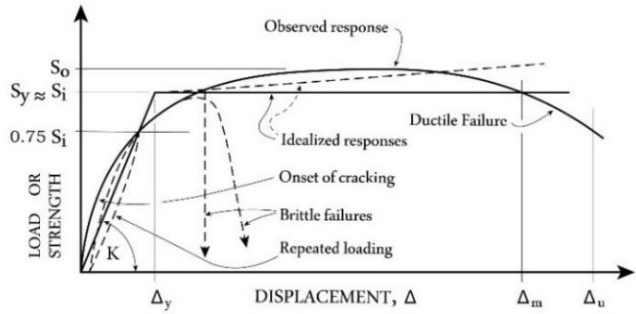
$$\mu = \frac{\Delta_y}{\Delta_u}$$

(۳)

که در آن، Δ_u برابر با بیشترین جابه‌جایی و Δ_y نشان‌دهنده جابه‌جایی نقطه تسلیم می‌باشد.



شکل ۱۹: نمودار پوش‌آور (ب)



شکل ۱۹: منحنی نیرو-جابه‌جایی عضو بتن‌آرمه [۵۲]

شکل ۱۹: نمودار پوش‌آور

شکل‌پذیری جانبی نمونه برابر با میانگین شکل‌پذیری جانبی در جهت فشاری و کششی می‌باشد. مقادیر مربوط به جابه‌جایی شکل‌پذیری نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. شکل‌پذیری RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP به ترتیب ۶/۹، ۹/۳ و ۱۲/۳ می‌باشد.

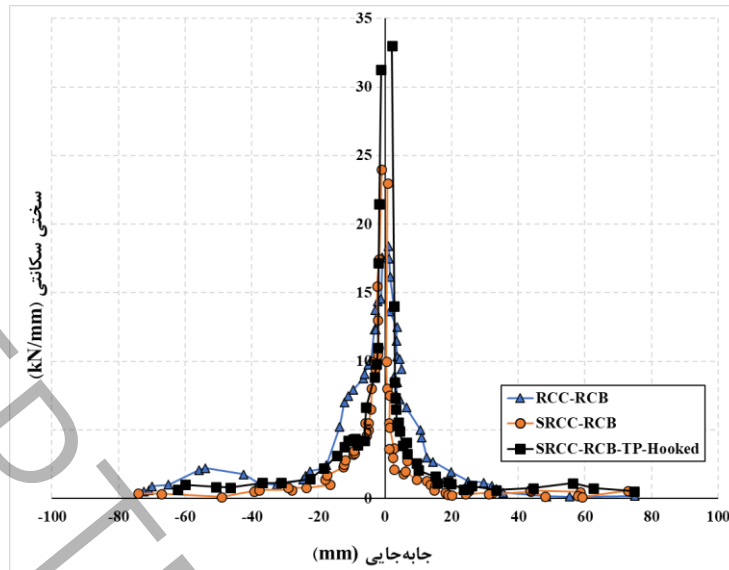
جدول ۴: شکل‌پذیری نمونه‌ها

| μ_{avg} | $(-)\mu$ | Δ_u (فشار- mm) | Δ_y (فشار- mm) | $(+)\mu$ | Δ_u (کشش- mm) | Δ_y (کشش- mm) | نمونه‌ها |
|-------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | | | | | | | |
| ۶/۹ | ۵/۱۸ | -۷۲/۶ | -۱۴ | ۸/۶۳ | ۸۸ | ۱۰/۲ | RCC-RCB |
| ۹/۳ | ۱۱/۲۱ | -۹۰/۸ | -۸/۱ | ۷/۳۶ | ۴۳/۸ | ۵/۹۵ | SRCC-RCB |
| ۱۲/۳ | ۱۰/۱۶ | -۵۰/۸ | -۵ | ۱۴/۴ | ۶۵ | ۴/۵ | SRCC-RCB-TP-Hooked |

سختی سکانتی برای هر چرخه با استفاده از رابطه ۴ [۵۳] محاسبه می‌شود و نمودار سختی سکانتی در مقابل جابه‌جایی جانبی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

$$K_e = \frac{\sum_{i=1}^n F_i^j}{\sum_{i=1}^n \Delta_i^j} = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (۴)$$

در این معادله، $+F_i$ و $-F_i$ به ترتیب بیشترین نیروی کششی و فشاری جانبی در هر چرخه و $+\Delta_i$ و $-\Delta_i$ به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی کششی و فشاری متناظر با بیشترین نیروی جانبی در هر چرخه می‌باشند. سختی سکانتی با استفاده از تحلیل پوش‌آور و به ترتیب در هر دو جهت کششی و فشاری به دست می‌آید. با مقایسه کاهش سختی نمونه‌ها می‌توان مشاهده کرد که با توجه به توسعه و گسترش تدریجی ترک‌ها در نمونه‌ها، کاهش سختی نیز به تدریج رخ می‌دهد.



شکل ۲۰: سختی سکانتی

همچنین، با توجه به آن که ستون در تمامی نمونه‌ها در محدوده الاستیک قرار دارد، ترک خوردگی در تیر رخ داده و منحنی کاهش سختی در همه نمونه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. نمونه RCC-RCB شیب کمتری در هر دو جهت کشش و فشار در مقایسه با نمونه SRCC-RCB دارد، که نشان می‌دهد شیب اولیه نمونه SRCC-RCB بیشتر بوده و سختی اولیه بالاتری دارد. دلیل این افزایش سختی را می‌توان تفاوت نوع ستون‌ها در هر دو نمونه نسبت داد. نمونه SRCC-RCB با ستون فولادی محاط در بتن آرمه، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی، سختی اولیه بالاتری دارد. همچنین نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked شیب اولیه مشابهی با نمونه SRCC-RCB دارد اما از نظر مقدار، نسبت به نمونه SRCC-RCB افزایش یافته است. به دلیل وجود یک مقطع فولادی در ناحیه اتصال تیر به ستون، ظرفیت باربری و جذب انرژی نمونه افزایش یافته و در نتیجه بیشترین مقدار سختی سکانتی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked به دست آمده است.

با افزایش بارگذاری و کاهش مقاومت جانبی نمونه‌ها، می‌توان مشاهده کرد که سختی سه نمونه کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارهای پوش‌آور نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که شیب اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked از دو نمونه دیگر بیشتر است. این افزایش سختی در مقایسه با نمونه‌های SRCC-RCB و RCC-RCB به دلیل وجود مقطع فولادی در ناحیه اتصال و تیر بتن آرمه است.

با توجه به نمودار پوش‌آور نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که شیب اولیه نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked بیشتر از دو نمونه دیگر است که دلیل این افزایش سختی نسبت به نمونه SRCC-RCB و نمونه RCC-RCB وجود مقطع فولادی در ناحیه اتصال و در تیر بتن آرمه است. المان ستون نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked همانند نمونه SRCC-RCB دارای مقطع فولادی محاط در بتن آرمه می‌باشد. نتایج نمودارهای هیستریزس و انرژی جذب شده نمونه‌ها، نشان می‌دهد وجود مقطع فولادی محاط در بتن آرمه ستون و بخشی از تیر، سبب افزایش جذب انرژی در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نسبت به دو نمونه دیگر شده است. همچنین در این نمونه با افزایش روند بارگذاری و کاهش مقاومت جانبی آن، روند کاهش سختی نسبت به دو نمونه دیگر با شیب کمتری، کاهش یافته است.

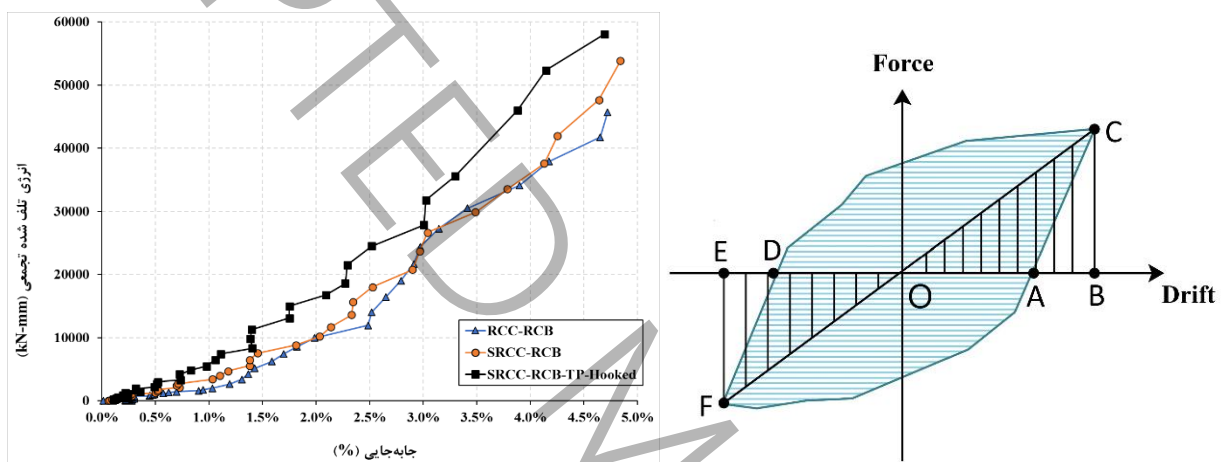
براساس منحنی سختی سکانتی مشاهده می‌شود نمونه RCC-RCB در جهت بارگذاری کششی سختی بیشتری دارد و نمونه SRCC-RCB در هر دو جهت بارگذاری کششی و فشاری نسبت به نمونه RCC-RCB سختی $13/5\%$ و $37/5\%$ افزایش یافته است که به دلیل استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه می‌باشد. همچنین نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked نیز سختی در هر دو جهت بارگذاری کششی و فشاری نسبت به نمونه RCC-RCB به ترتیب 50% و 45% و نسبت به نمونه SRCC-RCB در هر دو جهت به ترتیب 46% و 12% افزایش یافته که نشان دهنده تاثیر به سزای مقاطع فولادی محاط در ستون و بخشی از تیر بتن آرمه می‌باشد.

۳-۴- انرژی تلف شده و میرایی معادل

انرژی تلف شده بیانگر سطح زیر منحنی هیستریزس می‌باشد. هر چه سطح زیر منحنی هیستریزس بزرگ‌تر باشد، انرژی تلف شده بیشتر است که نشان می‌دهد المان مورد نظر انرژی بیشتری جذب کرده در نتیجه شکل پذیری بیشتری دارد. همچنین انرژی تلف شده معادله مستقیمی با عملکرد لرزه‌ای المان دارد. انرژی تلف شده تجمعی از محاسبه سطح زیر هر چرخه منحنی هیستریزس محاسبه می‌شود. در شکل ۲۱ انرژی تلف شده در هر چرخه را نشان می‌دهد که از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد و منحنی شکل ۲۱-ب انرژی تلف شده تجمعی سه چرخه در مقابل جابه‌جایی جانبی می‌باشد.

$$E_{Dissipation} = \frac{S_{DCA} + S_{AFD}}{S_{OCB} + S_{OFE}} \quad (5)$$

که در این معادله؛ S_{DCA} و S_{AFD} سطح محصور DCA و AFD و S_{OFE} و S_{OCB} سطح محصور OFE و OCB می‌باشد.



(ب) انرژی تلف شده تجمعی نمونه‌ها

(الف) سطح محصور هر چرخه از نمودار هیستریزس

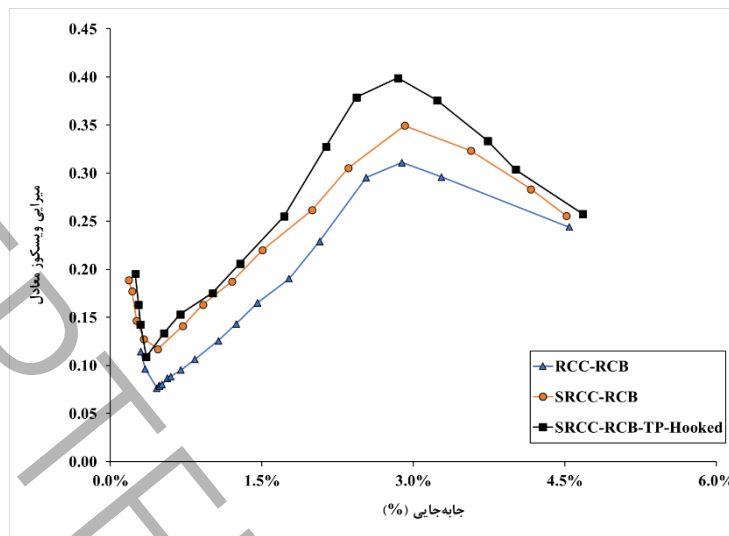
شکل ۲۱: انرژی تلف شده نمونه‌ها

با افزایش روند بارگذاری در منحنی هیستریزس مشاهده می‌شود که مقاومت و سختی در نمونه کاهش می‌یابد که منجر به کاهش شیب منحنی هیستریزس می‌شود. هر چه سطح زیر نمودار هیستریزس کمتر باشد و سختی و مقاومت نمونه تحت بارگذاری به یکباره کاهش یابد، پدیده جمع‌شدگی (Pinching) رخ می‌دهد. برای جلوگیری از پدیده جمع‌شدگی (Pinching) که یکی از عوامل موثر بر شکل‌پذیری نمونه بتن‌آرمه می‌باشد، طراحی و محاسبه صحیح المان‌های بتن‌آرمه می‌باشد که می‌توان علاوه بر داشتن سختی، مقاومت و شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی نمونه را افزایش داد. پدیده جمع‌شدگی (Pinching) هنگامی رخ می‌دهد که سطح زیر نمودار هیستریزس در چرخه‌های بالاتر و سختی نمونه به یکباره کاهش می‌یابد. عوامل موثر بر Pinching نیروهای برشی زیاد، لغزش آرماتورهای طولی و یا نرم‌شدگی اتصالات می‌باشد. برای محاسبه Pinching که به آن ضریب میرایی معادل گفته می‌شود، از نتایج منحنی انرژی تلف شده تجمعی استفاده می‌گردد، با توجه به رابطه ۶، استفاده می‌شود.

$$Equivalent Damping Coefficient = \frac{E_D}{2\pi} \quad (6)$$

در این رابطه E_D برابر با سطح زیر منحنی هر یک از چرخه‌های نمودار هیستریزس است. در شکل ۲۲ نتایج میرایی معادل نمونه‌های شبیه‌سازی شده در آزمایش نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked مقدار ضریب میرایی معادل بیشتری نسبت به دو نمونه SRCC-RCB و RCC-RCB دارد. همچنین ضریب میرایی معادل نمونه SRCC-RCB از نمونه RCC-RCB بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت در صورت استفاده از یک مقطع فولادی در ستون بتن‌آرمه (SRCC) انرژی جذب شده (تلف شده) افزایش می‌یابد و سبب افزایش سطح زیر منحنی هیستریزس می‌شود. همچنین در صورت استفاده از یک

مقطع فولادی در ناحیه اتصال تیر به ستون و اتصال آن به مقطع فولادی نیز می‌تواند انرژی جذب شده را افزایش دهد و در نتیجه در هر دو حالت ضریب میرایی معادل افزایش یابد.



شکل ۲۲: میرایی معادل نمونه‌ها

۴- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از مقطع فولادی محاط در ستون بتن آرمه و تاثیر استفاده همزمان از قطعه فولادی محاط در تیر بتن آرمه تحت برگذاری چرخه‌ای، پرداخته است. سه نمونه آزمایشگاهی RCC-RCB، SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP نمونه مورد بررسی می‌باشد که نمونه اول تیر و ستون هر دو بتن آرمه، نمونه دوم ستون با مقطع فولادی محاط در بتن آرمه و تیر بتن آرمه و نمونه سوم، ستون با مقطع فولادی محاط در بتن آرمه و ستون دارای قطعه فولادی در بتن آرمه می‌باشد که در هر سه نمونه آرماتورهای طولی تیر در داخل ستون ادامه یافته و داخل ستون مهار شده‌اند. با توجه به شرایط هر یک از نمونه‌ها و بررسی‌های انجام شده در این مقاله، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- نمودارهای هیستریزس نشان می‌دهند که نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB از نظر ظرفیت باربری جانبی و جذب انرژی دارد. به‌طور مشخص، ظرفیت باربری جانبی نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked در جهت کششی به ترتیب ۱٪ و ۱۵٪ و در جهت فشاری ۲۰٪ و ۸٪ نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB افزایش یافته است. حضور مقاطع I شکل در ستون بتن آرمه و قطعه انتقالی در تیر بتن آرمه باعث افزایش جذب انرژی در این نمونه شده است. در نمونه RCC-RCB ظرفیت باربری در هر دو جهت کششی و فشاری تقریباً یکسان است، اما در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked نمودار هیستریزس در جهت فشاری بالاتری نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از افزایش سختی و محصورشدگی تأمین شده توسط پروفیل فولادی و قطعه انتقالی است که عملکرد پس از تسلیم و جذب انرژی اتصال کامپوزیت را بهبود می‌بخشد.

- نتایج نشان می‌دهد که نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به نمونه‌های RCC-RCB و SRCC-RCB از خود نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که میانگین شکل‌پذیری این نمونه نسبت به RCC-RCB و SRCC-RCB به ترتیب ۴۴٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است. استفاده از مقطع فولادی I شکل محاط در ستون بتن آرمه و همچنین مقطع فولادی I شکل به طول ۵۰۰ میلی‌متر در تیر بتن آرمه باعث افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی و در نتیجه بهبود شکل‌پذیری و سختی نمونه شده است.

- مهم‌ترین عامل مؤثر در افزایش سختی، به‌ویژه سختی اسکانتی با توجه به فرمول مربوطه، مقدار نیروی وارده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از قطعه انتقالی (TP) در تیر بتن‌آرمه همراه با ستون SRC، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای، سبب افزایش سختی اسکانتی نمونه نسبت به حالتی می‌شود که تنها ستون SRC موجود است یا نمونه‌ای که شامل تیر و ستون بتن‌آرمه است. به‌طور مشخص، سختی اسکانتی نمونه SRCC-RCB-TP- Hooked نسبت به نمونه‌های SRC-RCB در جهت کشش و فشار به ترتیب $46/5\%$ و $12/1\%$ و نسبت به نمونه RCC-RCB در جهت کشش و فشار به ترتیب $51/2\%$ و 45% افزایش یافته است.
- در نمونه RCC-RCB، عمده ترک‌ها در ناحیه نزدیک به محل اتصال تمرکز یافته و در طول تیر گسترش نیافته‌اند. در حالی که در نمونه SRCC-RCB، ترک‌ها و آسیب‌ها تا فاصله تقریباً ۱۰۰ میلی‌متر از ناحیه اتصال گسترش یافته‌اند و در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked، ترک‌ها تا فاصله حدود ۲۰۰ میلی‌متر و پس از ناحیه قرارگیری قطعه انتقالی (TP) در تیر بتن‌آرمه ایجاد شده‌اند. همچنین، در نمونه‌های SRCC-RCB و SRCC-RCB-TP-Hooked، گسترش ترک‌ها و آسیب‌ها در طول تیر و دور از ناحیه اتصال تیر به ستون رخ داده است، که منجر به افزایش طول مفصل پلاستیک در این نمونه‌ها نسبت به نمونه RCC-RCB شده است.
- وجود مقاطع فولادی محاط در ستون بتن‌آرمه و بخشی از تیر در نمونه SRCC-RCB-TP-Hooked باعث افزایش جذب انرژی شده و در نتیجه، نیروی برشی وارد بر ناحیه چشمه اتصال نیز افزایش یافته است.

مراجع

- [1] Z.-H. Xu, G.-L. Bai, J.-Q. Zhao, B. Liu, Study on seismic performance of SRC leaning beam-column exterior joints in the main workshop of CAP1400 nuclear power plant, Structures, 34 (2021) 2721-2734.
- [2] XUE Yicong YU Yunlong, YANG Yong, Theoretical model on shear strength of steel reinforced concrete short columns, JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES, 41(S1) (2020) 162-170.
- [3] K. Wardhana, F.C. Hadipriono, Study of recent building failures in the United States, Journal of performance of constructed facilities, 17(3) (2003) 151-158.
- [4] K. Liu, J. Chen, Y. Cai, C. Liu, Seismic Performance of a Novel Partially Embedded Transfer Connection with Wing Wall in Steel-Concrete Vertical Irregular Structures: Physical Tests and Theoretical Model, Journal of Structural Engineering, 151(9) (2025) 04025120.
- [5] J. Wei, J. Xue, Z. Hu, L. Qi, J. Xu, Experimental study on dynamic shear-behavior of H-shaped SRC columns under lateral impact loading, Journal of Constructional Steel Research, 213 (2024) 108396.
- [6] X. Zhu, Q. Zhang, D. Zhang, Y. Du, Q. Zhang, Experimental and numerical study on the dynamic response of steel-reinforced concrete composite members under lateral impact, Thin-Walled Structures, 169 (2021) 108477.
- [7] L. Zhou, S. Yi-sheng, Experimental study on seismic behavior of SRC deep beam-to-CFST column frames, Journal of Constructional Steel Research, 155 (2019) 157-175.
- [8] C. Zhou, J. Xue, Z. Hu, Z. Liu, Coupled translational-torsional response for SRC frame with special-shaped columns under earthquake, Journal of Building Engineering, 31 (2020) 101440.
- [9] C. Xu, X. Liu, X. Zha, S. Peng, Experimental research on seismic damage of a full-web SRC frame structure, Journal of Building Engineering, 27 (2020) 100959.
- [10] H. Zhang, P. Cao, K. Wu, L. Ren, C. Xu, Two-step seismic calculating method and seismic features of SRC-RC hybrid frame structure, Journal of Performance of Constructed Facilities, 33(5) (2019) 04019050.
- [11] X. Lan, Y. Wang, B. Tan, Y. Zhang, An assessment of application of the component-based method to full range behaviour of joints between steel beam to concrete filled steel tube columns under extreme loading conditions, Engineering Structures, 309 (2024) 118057.

- [12] E. Tavasoli, O. Rezaifar, A. Kheyroddin, Seismic performance of RC joints retrofitted by external diagonal bolts, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103691.
- [13] e. Tavasoli, O. Rezaifar, a. Kheyroddin, Experimental study of shear retrofit of RC beam-column joints using external post-tensioned bolts (In Persian), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3) (2023) 681-700.
- [14] H. Dabiri, K. Rahimzadeh, A. Kheyroddin, A comparison of machine learning-and regression-based models for predicting ductility ratio of RC beam-column joints, in: *Structures*, Elsevier, 2022, pp. 69-81.
- [15] Y. Zhang, D. Li, Development and testing of precast concrete-filled square steel tube column-to-RC beam connections under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 280 (2021) 122540.
- [16] V.-P. Nguyen, Q.-H. Nguyen, M. Couchaux, J. Aribert, M. Hjiat, Hybrid steel beam to exterior RC column joints with encased steel profile, *Engineering Structures*, 306 (2024) 117624.
- [17] P. Javadi, M. Askari, S. Vahedi, A. GhafourianHesami, A. Tizchang, Retrofit of RC buildings using vertical shear links and hybrid connections, in: *Structures*, Elsevier, 2023, pp. 1788-1807.
- [18] B.-L. Lai, R.-L. Bao, M.-Y. Zhang, Y.-H. Wang, J.R. Liew, Evaluation on the static and seismic performance of steel reinforced concrete composite columns with high strength materials, *Journal of Building Engineering*, 79 (2023) 107886.
- [19] J. Zhou, Z. Chen, W. Zheng, H. Liao, Seismic behavior of steel reinforced concrete column with welded studs subjected to combined action of compression-bending-shear-torsion, *Engineering Structures*, 252 (2022) 113727.
- [20] C. Wu, Z. Liu, J. Men, Z. Li, H. Ding, C. Xiong, X. Wang, Analysis of stress mechanism in a new prefabricated SRC composite column, *Structures*, 59 (2024) 105695.
- [21] J. Zhang, X. Zhao, X. Rong, Y. Li, Experimental study of high-strength steel fiber concrete exterior beam-column joints with high-strength steel reinforcements, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(5) (2023) 2785-2815.
- [22] H. Dabiri, A. Kheyroddin, An experimental comparison of RC beam-column joints incorporating different splice methods in the beam, *Structures*, 34 (2021) 1603-1613.
- [23] G. Cheng, X. Zhou, J. Liu, Y.F. Chen, Seismic behavior of circular tubed steel-reinforced concrete column to steel beam connections, *Thin-Walled Structures*, 138 (2019) 485-495.
- [24] J. Zhang, J. Jia, Experimental study on seismic behavior of composite frame consisting of SRC beams and SRUHSC columns subjected to cyclic loading, *Construction and Building Materials*, 125 (2016) 1055-1065.
- [25] B. Rong, M. Xu, J. Sun, R. Zhang, Y. Sun, W. Zhang, H. Wu, Experimental and numerical research on seismic behavior and shear capacity of SRC column-RC beam composite joints, *Journal of Building Engineering*, 50 (2022) 104181.
- [26] X. Liu, Y. Yang, Y. Yu, N. Hao, Shear performance of prestressed partially-precast steel reinforced concrete beam: Experiments and analyses, *Structures*, 62 (2024) 106329.
- [27] B. Rong, J. Sun, M. Xu, R. Zhang, Y. Sun, W. Zhang, W. Zhang, Experimental and numerical research on seismic performance of S-RC-SRC composite frame, *Journal of Building Engineering*, 43 (2021) 103119.
- [28] C.-H. Li, X.C. Liu, A.-L. Zhang, X. Chen, D. Zhang, Y.-Z. Ren, J. Zhang, Z. Li, Axial compressive strength of concrete encased extended T-shaped steel composite columns with less reinforcement, *Journal of Building Engineering*, 82 (2024) 108207.
- [29] N.E. Shanmugam, B. Lakshmi, State of the art report on steel-concrete composite columns, *Journal of constructional steel research*, 57(10) (2001) 1041-1080.
- [30] Y. Li, M. Fan, H. Song, C. Wu, Q. An, X. Wang, J. Ren, Restoring force model of a modular steel-concrete composite column, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e03128.

- [31] P. Derakhshesh, S.R. Mirghaderi, G. Nouri, M. Farzam, Behavior of new hybrid connection between steel beam and concrete-encased composite column, *Journal of Constructional Steel Research*, 210 (2023) 108043.
- [32] I.-S. Yang, D. Lee, H. Ju, S.-J. Lee, J.-Y. Oh, Steel-concrete composite beam-column connections utilizing prefabricated permanent steel form, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103836.
- [33] X. Wang, Y. Liu, F. Yang, Y. Lu, X. Li, Effect of concrete cover on the bond-slip behavior between steel section and concrete in SRC structures, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116855.
- [34] Y. Wei, B. Wang, B. Han, J. Wu, G. Huo, Hysteretic model and numerical simulation method of T-shaped SRC column–steel beam joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 219 (2024) 108754.
- [35] M. Pan, D. Wang, H. Bai, T. Yu, Axial compression behavior of FRP-confined steel-reinforced columns with a flange-broadened cross-shaped steel, *Thin-Walled Structures*, 189 (2023) 110898.
- [36] F. Yu, Y. Fang, C. Feng, S. Tan, Y. Wang, Shear capacity of PVC-CFRP confined concrete column-RC beam interior joint strengthened with core steel tube, *Thin-Walled Structures*, 193 (2023) 111213.
- [37] X. Mu, Y. Yang, J. Liu, K. Shen, Y.F. Chen, Seismic performance of full-scale prefabricated semi-rigid bolted connection between RC column and composite beam, *Journal of Constructional Steel Research*, 212 (2024) 108176.
- [38] M. Moharram, D. Bompa, B. Xu, A. Elghazouli, Behaviour and design of hybrid RC beam-to-steel column connections, *Engineering Structures*, 250 (2022) 113502.
- [39] H. Bai, J. Xu, C. Demartino, X. Zhao, Probabilistic code-based shear capacity model for I-shaped steel reinforced concrete (SRC) beams, *Engineering Structures*, 301 (2024) 117180.
- [40] C.-C. Chen, B. Suswanto, Y.-J. Lin, Behavior and strength of steel reinforced concrete beam–column joints with single-side force inputs, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8-9) (2009) 1569-1581.
- [41] L. Chu, Y. Tian, D. Li, Y. He, H. Feng, Shear behavior of steel reinforced concrete column-steel beam joints with or without reinforced concrete slab, *Journal of Building Engineering*, 35 (2021) 102063.
- [42] F.-Y. Liao, L.-H. Han, Z. Tao, Behaviour of composite joints with concrete encased CFST columns under cyclic loading: Experiments, *Engineering Structures*, 59 (2014) 745-764.
- [43] C. Wu, J. Liu, W. Shi, Seismic performance of composite joints between prefabricated steel-reinforced concrete columns and steel beams: experimental study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020) 3817-3841.
- [44] W. Guangyong, Z. Dongming, Experimental research on the post-fire seismic performance of steel reinforced concrete columns, *Procedia engineering*, 210 (2017) 456-463.
- [45] C. Xu, S. Peng, C. Wang, Z. Ma, Influence of the degree of damage and confinement materials on the seismic behavior of RC beam-SRC column composite joints, *Composite structures*, 231 (2020) 111002.
- [46] M. Moharram, D. Bompa, A. Elghazouli, Experimental and numerical assessment of mixed RC beam and steel column systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 131 (2017) 51-67.
- [47] P. Pan, X. Lin, A. Lam, H. Chen, L. Ye, Monotonic loading tests of ring-beam connections for steel reinforced concrete columns and RC beams, *Journal of Structural Engineering*, 140(4) (2014) 04013092.
- [48] A.-A.C. Institute), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), in, ACI, 2019.
- [49] A. C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, in, ASTM international, 2015.

[50] A. 374:1-5, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, in: ACI, 2005, pp. 1-05.

[51] R. Park, Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, Bulletin of the new Zealand society for earthquake engineering, 22(3) (1989) 155-166.

[52] T. Paulay, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Willey & Sons, (1992).

[53] J. Zhang, Z. Pei, X. Rong, Experimental seismic study of an innovative precast steel–concrete composite beam–column joint, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 161 (2022) 107420.

Experimental Investigation of the Seismic Performance of the Joint between a Steel Encased in Reinforced Concrete Column and a Reinforced Concrete Beam

ABSTRACT

In recent years, the use of steel-reinforced concrete (SRC) columns, including composite connections, in high-rise structures has increased significantly. One of the key issues in connection design is the proper detailing of the interface between the steel section embedded in the concrete column and the reinforced concrete beam. This study experimentally investigates the seismic performance of the connection between a reinforced concrete beam with a transition steel part (TP) and an SRC column, and compares it with other types of connections. Three experimental specimens were constructed: (i) a reinforced concrete beam (RC)–column joint, (ii) an reinforced concrete beam–steel reinforced concrete (SRC) column joint, and (iii) an reinforced concrete beam with a transition part (TP)–SRC column joint. All specimens were subjected to cyclic lateral loading on the beams and axial loading on the columns. The main experimental parameters include the effects of the steel section on load-bearing capacity, ductility, and stiffness, as well as the influence of the transitional part on ductility and stiffness. The results indicate that the incorporation of the TP substantially enhances the performance of the beam–column joint. Specifically, lateral load capacity increased by 1% and 15% in tension, and by 20% and 8% in compression, compared to the reinforced concrete beam–column and reinforced concrete beam–SRC column specimens, respectively. Additionally, ductility improved by 44% and 24%, respectively, compared to the same specimens. The results highlight the effectiveness of the TP in enhancing the load-bearing capacity and ductility of RC beam–SRC column joints.

KEYWORDS

Composite Connections, Seismic Performance, Transition Part (TP), SRC Column, Cyclic Load