

تأثیر محصورشدگی فعال و عناصر برشگیر در رفتار خمشی تیرهای لوله‌ای فولادی پرشده با بتن

مرتضی نقی‌پور^{۱*}، مرضیه نعمتی^۲، جواد جلالی^۳ و مهدی نعمت‌زاده^۴

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۴ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۷/۱۸ پذیرش ۹۴/۱۲/۳

چکیده

در این تحقیق رفتار خمشی تیرهای مرکب فولادی پرشده با بتن به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی اثر لغزش بین لوله فولادی با هسته بتنی در رفتار خمشی تیرها بوده است. به منظور بهبود رفتار تیرهای مرکب فولادی پرشده با بتن، از دو روش نصب برش‌گیر در سطح داخلی لوله و محصورشدگی فعال هسته بتنی استفاده شده است. چهار تیر مرکب در این مطالعه آزمایش شدند. تعبیه برش‌گیرها و نوع محصورشدگی دو پارامتر اصلی متغیر در این تحقیق بودند. در نهایت، مقاومت خمشی نهایی، انعطاف‌پذیری، مود شکست، وضعیت ترک خوردگی مقطع در لحظه شکست و تغییرات سختی در مرحله الاستیک و پلاستیک تیرهای مرکب، پارامترهایی بودند که بررسی شدند. نتایج حاصله نشان می‌دهند که تعبیه برش‌گیر و محصورشدگی فعال، بر روی افزایش ظرفیت خمشی تیر مرکب اثر چشمگیری داشته است. همچنین، نصب برش‌گیر سبب افزایش بیشتری در ظرفیت خمشی نسبت به محصورشدگی فعال می‌گردد. به علاوه، تعبیه برش‌گیر و تغییر نوع محصورشدگی، منجر به رفتار تردتر نمونه‌ها شده است. ضمن این که نمونه‌ای که در آن برش‌گیر نصب شده است دارای رفتار بسیار تردتری نسبت به نمونه با محصورشدگی فعال می‌باشد. به علاوه، در اثر تعبیه برش‌گیر در نمونه، میزان جذب انرژی نمونه حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که تغییرات میزان انرژی جذب شده با تغییر در نوع محصورشدگی، قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

واژگان کلیدی: محصورشدگی فعال، برش‌گیر، رفتار خمشی، لوله فولادی پرشده با بتن، بتن تازه، ظرفیت خمشی نهایی.

۱- مقدمه

در مطالعات صورت گرفته، به طور گسترده‌ای، رفتار مقاطع مرکب، تحت بار محوری با و بدون خروج از مرکزیت بررسی شده است [۱۲، ۱۳، ۱۸-۴۲]. نتایج بررسی‌های صورت گرفته، حاکی از افزایش ظرفیت باربری این مقاطع بوده است [۱۲، ۱۳، ۱۸-۴۲]. با این که در مورد رفتار خمشی مقاطع مرکب نیز تحقیقات زیادی صورت گرفته است [۱۴، ۱۶-۱۸، ۲۲، ۳۱، ۴۰، ۴۱، ۴۳-۵۳]. اما، به طور نسبی مطالعات کمتری در رابطه با رفتار خمشی این مقاطع صورت گرفته است. Kang و همکاران [۵۰]، در تحقیق خود به بررسی رفتار خمشی یک مقطع مرکب بتن و فولاد جدید که قابلیت استفاده در شاه‌تیرهای پل را دارد، پرداختند. نتایج بررسی‌های Kang و همکاران [۵۰] نشان دادند که شاه‌تیرهای لوله‌ای فولادی پرشده با بتن، انعطاف‌پذیری خوبی داشته و مقاومت خود را تا پایان بارگذاری حفظ می‌کنند [۵۰].

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر روی مقاطع لوله‌ای پرشده با بتن، انجام شده است [۱۰-۱۰]. نتایج تحقیقات صورت گرفته بیانگر برتری مقطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن در مقایسه با اعضا بتن مسلح یا فولادی تنها می‌باشد [۱۱-۱۶]. این نوع مقطع دارای مزایای سازه‌ای متعددی نظیر افزایش ظرفیت باربری، افزایش میزان جذب انرژی، تغییر شکل انعطاف‌پذیر، مقاومت لرزه‌ای سازه و میرایی مناسب می‌باشد [۴ و ۱۷]. عملکرد مقاطع مرکب بتن و فولاد بدین گونه است که، کمانش جانبی لوله فولادی به دلیل حضور هسته بتنی به تعویق افتاده است. از طرف دیگر، به دلیل محصورشدگی هسته بتنی به وسیله لوله فولادی، مقاومت فشاری هسته، افزایش یافته است [۱۷، ۱۸].

فشار اولیه بر روی بتن تر و خروج آب اضافی آن می‌باشد [۵۶]-۵۸]. لازم به ذکر است که اعمال فشار اولیه بر روی بتن تر و خروج آب اضافی منجر به تغییر نوع محصورشدگی از حالت منفعل به فعال شده است [۵۶-۵۸].

Naghipour و همکاران [۵۹]، به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار خمشی تیرهای مرکب پر شده با بتن پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که محصورشدگی فعال تأثیری در مود شکست نمونه ندارد. هرچند، محصورشدگی فعال سبب کاهش میزان و شدت خردشدگی بتن در ناحیه فشاری و وسعت ناحیه ترک خورده و عمق ترک در ناحیه کششی نمونه می‌گردد. به علاوه، نتایج تحقیقاتشان نشان داد که محصورشدگی فعال هسته بتنی، بهترین بازدهی را در مقطعی با نسبت $D/t=30$ و مقاومت فشاری پایین هسته بتنی دارد. در مقطع با نسبت $D/t=30$ و مقاومت فشاری پایین هسته بتنی، میزان انرژی جذب شده و ظرفیت خمشی مقطع به طور همزمان افزایش می‌یابد.

در این تحقیق با استفاده از ایده‌های محققین پیشین، که مبنای اصلی آن‌ها افزایش مقاومت در برابر لغزش میان بتن و فولاد می‌باشد، به بررسی رفتار خمشی مقاطع مرکب پرداخته شده است. هدف اصلی در این تحقیق یافتن راهی مناسب برای افزایش مقاومت خمشی و بهبود رفتار مقاطع مرکب می‌باشد. بدین منظور، دو راهکار در نظر گرفته شده است. راهکار اول تعبیه برش‌گیر در طول نمونه می‌باشد. راهکار دوم، اعمال فشار اولیه بر بتن و خروج آب اضافی موجود در بتن می‌باشد (منظور از آب اضافی، آبی است که برای عمل هیدراتاسیون مورد استفاده قرار نمی‌گیرد). کلیه نمونه‌ها، با بارگذاری سه نقطه‌ای و به صورت استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. در این تحقیق، پارامترهای مقاومت فشاری هسته بتنی، نسبت طول به قطر (L/D)، نسبت قطر به ضخامت لوله (D/t)، مقاومت تسلیم لوله و میزان فشار اعمالی بر روی نمونه‌های با محصورشدگی فعال، ثابت می‌باشد. در نهایت، ظرفیت خمشی، میزان جذب انرژی، مود شکست و نحوه ترک‌خوردگی بتن در لحظه شکست، برای نمونه‌های با محصورشدگی فعال و نمونه‌های دارای برش‌گیر، با نمونه مرکب متداول مورد مقایسه قرار گرفتند.

۲- بررسی آزمایشگاهی

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر تعبیه برش‌گیر و پیش-تندیدگی بر روی رفتار خمشی مقاطع مرکب می‌باشد. بدین منظور، چهار نمونه مرکب با انتهای مفصلی شامل نمونه بدون

تحقیقات انجام شده توسط Tomii و Sakino [۵۴]، Lu و Kennedy [۴۳] و Rangan و Kilpatrick [۲۸]، در زمینه رفتار خمشی مقاطع مرکب، بیانگر انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه این مقاطع بوده‌اند. همچنین، به دلیل وجود هسته بتنی مود شکست لوله در ناحیه فشاری، از کماتش روبه داخل به کماتش روبه خارج، در بار وارده به مراتب بزرگ‌تری، تغییر یافته است [۱۷]. لازم به ذکر است که نتایج تحقیقات Probst و همکاران [۱۴] و Boehme و Prion [۳۱] نشان دادند که برای لوله‌های بسیار نازک، به دلیل کماتش موضعی دیواره‌های لوله، محصورشدگی کافی برای توسعه ظرفیت پلاستیک بتن فراهم نمی‌شود. به علاوه، نتایج تحقیقات گذشته [۱۹، ۳۱، ۳۳]، مشخص نموده که مقطع دایره‌ای مؤثرترین شکل مقطع این اعضا می‌باشد.

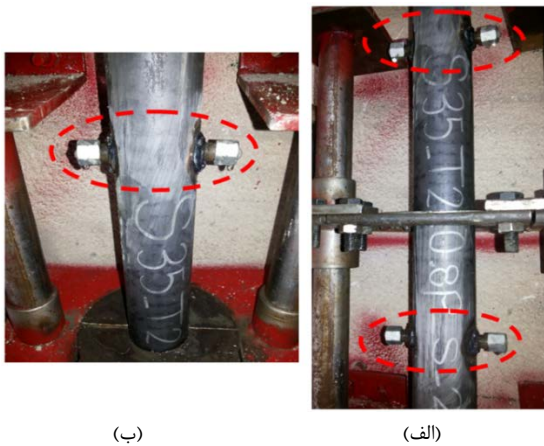
Shawkat و همکاران [۱۸]، به بررسی رفتار خمشی مقاطع مرکب با نسبت‌های مختلف دهانه برشی پرداخته‌اند. ایشان الگوی ترک، مود شکست و مقاومت این مقاطع را آزمایش نمودند. نتایج بررسی‌ها، با در نظر گرفتن دهانه برش بحرانی، نشان می‌دهند که الگوی ترک و اندازه آن به میزان زیادی وابسته به لغزش میان بتن و لوله می‌باشد.

برخی از محققین به منظور کاهش لغزش میان بتن و لوله، اقدام به تعبیه برش‌گیرهایی در طول نمونه نموده‌اند [۱۴، ۵۰، ۵۱]. نتایج تحقیقات صورت گرفته [۱۴، ۵۰، ۵۱] نشان می‌دهند که ظرفیت خمشی تیر مرکب و عملکرد مرکب بین بتن و فولاد، در اثر تعبیه برش‌گیرها، بهبود یافته است.

با دنبال کردن تاریخچه استفاده از پس‌تندیدگی در مقاطع مرکب، دیده می‌شود که برای اولین بار، از مفهوم پس‌تندیدگی هسته بتنی مقاطع مرکب، در ساخت پل قوسی در آنوروا استفاده شده است [۵۵]. Christopher و Tuan [۲۱] و Deng و همکاران [۱۶] نیز به بررسی اثر پس‌تندیدگی در رفتار خمشی مقاطع پرداخته‌اند. در این تحقیقات برای پس‌تندیدگی هسته بتنی، کابلی با مقاومت بالا در داخل لوله فولادی تعبیه شده است. سپس در داخل لوله بتن منبسط شونده پمپ شده است. پس از سخت شدن بتن، با کشیدن کابل، یک نیروی فشاری در هسته بتنی ایجاد شده است [۱۶، ۵۹]. نتایج تحقیقات حاکی از افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی مقطع، در اثر اعمال نیروی پس‌تندیدگی به هسته بتنی می‌باشد [۱۶، ۲۱].

نتایج تحقیقات Nematzadeh و Naghipour، بیانگر افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسته بتن در اثر اعمال

طراحی دستگاه پیش‌تنیدگی به گونه‌ای است که در هر آزمایش، فقط یک نمونه را می‌توان در آن قرار داد. به منظور اعمال فشار بر روی نمونه، یک جک هیدرولیکی در بالای دستگاه تعبیه شده است. یک قطعه فولادی استوانه‌ای شکل، عامل انتقال فشار از جک به هسته بتنی نمونه است. در اثر این فشار اعمالی، آب اضافی موجود در طرح اختلاط نمونه خارج می‌گردد. خروج آب اضافی از شیرهای طراحی شده در طول نمونه و فاصله اندک بین قطعه فوقانی و تحتانی دستگاه با نمونه، صورت می‌گیرد. به منظور جلوگیری از خروج دوغاب سیمان از شیرهای تعبیه شده، بر روی هر شیر، از فیلترهای مخصوصی استفاده شده است. عملکرد فیلترها به گونه‌ای است که فقط آب می‌تواند از آن عبور کند (شکل (۲)). به علاوه، فاصله اندک میان قطعات فوقانی و تحتانی دستگاه با نمونه، فقط امکان خروج آب را فراهم می‌کند. نمونه زمانی از دستگاه خارج می‌گردد که دیگر آبی از آن خارج نگردد.



شکل ۲- آب خارج شده از شیرها: الف) نمای دور، ب) نمای نزدیک

۲-۲- نمونه‌ها

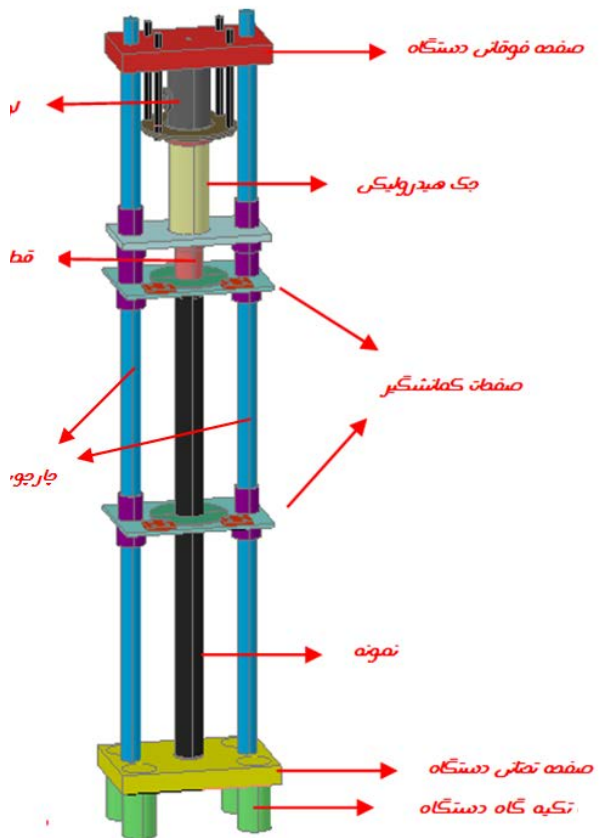
در این تحقیق، چهار نمونه به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. طول خالص و دهانه آزاد کلیه نمونه‌ها، به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۶۶۰ میلی‌متر می‌باشد. در برخی از نمونه‌ها، از برش‌گیر برای افزایش مقاومت در برابر لغزش و در برخی دیگر از اعمال فشار اولیه بر روی نمونه‌ها استفاده شده است. در نمونه‌هایی که بعد از ریختن بتن در لوله، بر آن‌ها فشار اولیه اعمال می‌شود، نوع محصورشدگی از حالت منفعل به حالت فعال تغییر می‌یابد. در نمونه‌های با محصورشدگی فعال، در طول نمونه به فواصل $L/3$ دو شیر برای خروج آب اضافی بتن تعبیه شده است. به منظور بررسی اثرات تعبیه برش‌گیر در طول نمونه، اعمال

برش‌گیر و با محصورشدگی منفعل، نمونه بدون برش‌گیر و با محصورشدگی منفعل، نمونه با برش‌گیر و با محصورشدگی منفعل و نهایتاً نمونه با برش‌گیر و با محصورشدگی فعال، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. در بخش‌های بعدی شرح مفصلي از دستگاه پیش‌تنیدگی، نمونه‌های آزمایش، مصالح استفاده شده و روش انجام آزمایش فراهم شده است.

۱-۲- دستگاه پیش‌تنیدگی

برای اعمال فشار اولیه بر نمونه‌ها و ایجاد محصورشدگی فعال، دستگاه پیش‌تنیدگی، طراحی و ساخته شد (شکل (۱)). نمونه‌های مرکب با هسته بتنی تر، در داخل دستگاه پیش‌تنیدگی قرار می‌گیرد. بر اثر فشار اولیه اعمالی بر نمونه‌های مرکب، نوع محصورشدگی هسته بتنی، از حالت منفعل به فعال تغییر می‌یابد.

دستگاه پیش‌تنیدگی در قسمت بالایی و میانی خود دارای صفحاتی می‌باشد که به عنوان تکیه‌گاه جانبی برای نمونه می‌باشد (شکل (۱)). بنا بر این، بار بحرانی نمونه افزایش یافته است. همچنین از کمانش نمونه جلوگیری شده است.



شکل ۱- دستگاه پیش‌تنیدگی

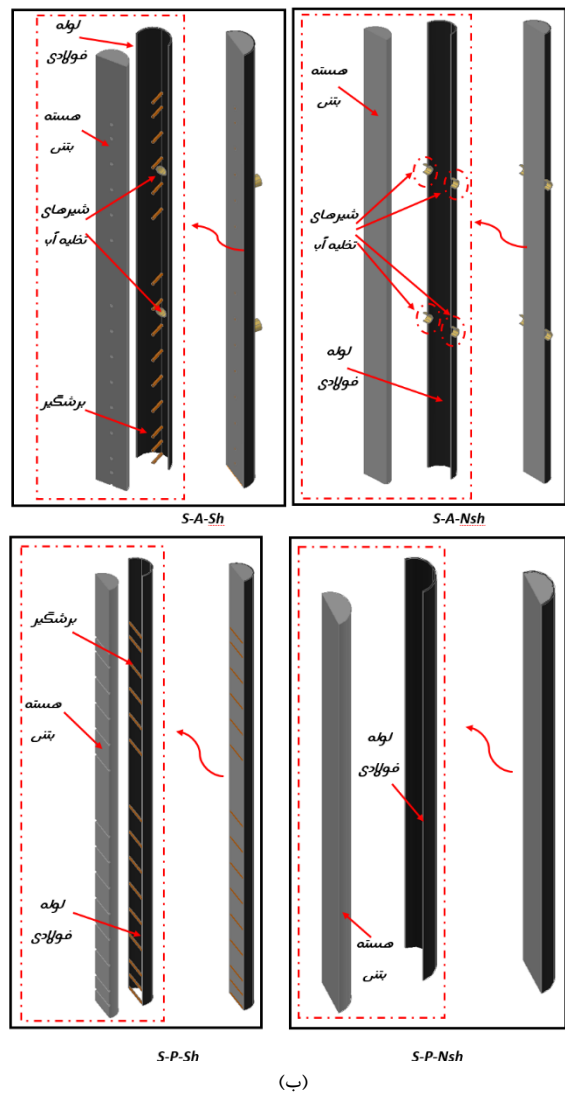
نیز تهیه شده است. نمونه‌های مکعبی، بعد از گذشت ۲ روز از قالب خارج می‌شوند. سپس، این نمونه‌ها در محیط کاملاً اشباع نگهداری می‌شوند. در زمان آزمایش خمشی نمونه‌های مرکب، تست فشاری نمونه‌های مکعبی نیز انجام می‌شود.

۲-۳- مصالح

در این تحقیق از لوله فولادی با قطر ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی لوله فولادی استفاده شده در این تحقیق، با انجام آزمایش کشش بر مبنای آیین نامه ASTM A370-10 [۶۰] بدست آمده است. و تنش‌های تسلیم و نهایی لوله فولادی به ترتیب برابرند با ۴۳۵ و ۵۰۰ مگاپاسکال. همچنین طرح اختلاط بتن به گونه‌ای است که فقط یک مقاومت فشاری (۱۲ مگاپاسکال) برای بتن بدست آید. طرح اختلاط بتن بر مبنای آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI) [۶۱] صورت گرفته است. قطر بزرگترین دانه شن در این طرح اختلاط برابر ۹/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در طرح اختلاط بتن، از ماسه با مدول نرمی ۲/۸۸ استفاده گردید. آب و سیمان پرتلند تیپ II سایر اجزا تشکیل دهنده بتن می‌باشند. در طرح اختلاط مورد نظر از هیچ ماده افزودنی استفاده نشده است تا عملکرد تعبیه برشگیر و اعمال فشار اولیه بر روی نمونه، تحت تاثیر قرار نگیرد.

۲-۴- روش انجام آزمایش

همان‌طور که در بخش (۲-۱) گفته شد، نیمی از نمونه‌ها تحت محصورشدگی فعال قرار گرفتند. این نمونه‌ها، بعد از بتن‌ریزی در داخل دستگاه پیش‌تنیدگی قرار گرفته‌اند. فشار اولیه توسط جک به نمونه‌ها اعمال شده است. سپس کلیه نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز، در شرایط آزمایشگاهی و به صورت ایستاده نگهداری شده‌اند. شرایط نگهداری به این گونه بوده که دو انتهای لوله به وسیله نایلون بسته شد تا از تبخیر آب بتن جلوگیری شود. بعد از گذشت ۲۸ روز، نمونه‌ها به وسیله دستگاه STM150 (تولید کشور ایران و شرکت سنتام) تحت بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفتند. در محل اعمال بار، از ورق‌هایی استفاده شد تا تمرکز تنش در محل بارگذاری کاهش یابد (شکل (۴)). بنابر این از شکست موضعی نمونه‌ها جلوگیری شده است. همچنین، تجهیزات نصب شده در دو انتهای نمونه به گونه‌ای است که شرایط تکیه گاه مفصلی را برای هر دو انتها فراهم می‌کند (شکل (۴)).



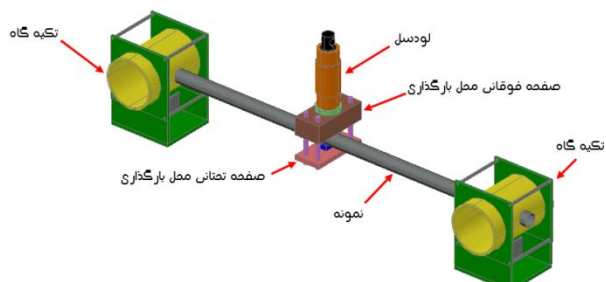
شکل ۳- (ادامه)

همچنین، از قرار دادن برشگیرها در ناحیه میانی لوله که بیشترین مقدار لنگر خمشی در آن رخ می‌دهد، اجتناب شد. بنابر این از ضعف نمونه در این منطقه جلوگیری گردید. در این صورت، نمونه در آزمایش خمش به علت شکست موضعی در محل برشگیر، تخریب نمی‌گردد.

بتن‌ریزی در کلیه نمونه‌ها، در حالت ایستاده انجام شده است. در نمونه‌های با محصورشدگی منفعل، بتن‌ریزی در سه لایه و کوبیدن ۲۵ ضربه‌ای هر لایه، صورت گرفته است. اما در نمونه‌های با محصورشدگی فعال، بتن‌ریزی بدون هیچ گونه تراکم یا ویبراسیونی صورت گرفته است. نمونه با محصورشدگی فعال بعد از بتن‌ریزی، در دستگاه پیش‌تنیدگی تحت فشار اولیه قرار می‌گیرد. قابل ذکر است برای تعیین مقاومت فشاری هسته بتنی، در زمان بتن‌ریزی نمونه‌های مرکب، تعدادی نمونه‌های مکعبی

لوله فولادی در ناحیه کششی رخ داده است (شکل (۶)). در اثر اعمال بار، در ناحیه فشاری لوله نیز کماتش موضعی رخ داده است. شدت کماتش موضعی در ناحیه فشاری، تابع نوع نمونه موردنظر است (شکل (۶)).

افزودن برش‌گیر باعث رفتار تردتر نمونه‌ها می‌شود (شکل (۵)). تغییر در نوع رفتار نمونه مستقل از نوع محصورشدگی می‌باشد. در نمونه با محصورشدگی منفعل که برش‌گیر نیز در آن تعبیه شده است (S-P-Sh)، در ناحیه فشاری لوله، کماتش موضعی کمی رخ می‌دهد. هرچند، مود شکست حاکم بر نمونه S-P-Sh، پارگی در ناحیه کششی می‌باشد. اما در نمونه با محصورشدگی منفعل و بدون برش‌گیر (S-P-Nsh)، رفتار انعطاف‌پذیر نمونه همراه با کماتش موضعی لوله در ناحیه فشاری بوده است.



شکل ۴- نمونه تحت بار به همراه تجهیزات الحاقی

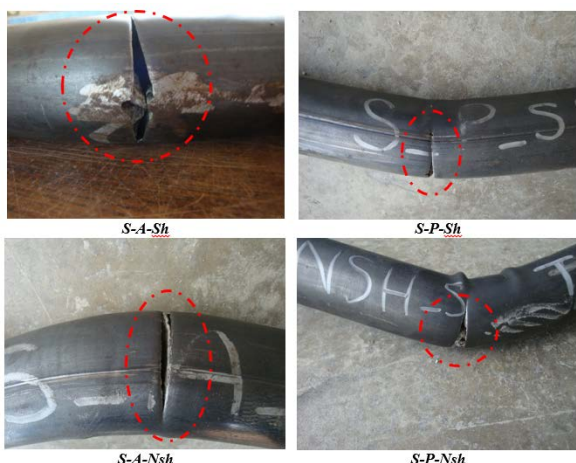
بارگذاری نمونه به صورت کنترل تغییر مکان با سرعت ۲ mm/min صورت گرفت. مقادیر بار و خیز وسط دهانه در فواصل مشخص اندازه‌گیری و ثبت شدند.

۳- نتایج آزمایشگاهی

در ادامه نتایج و مشاهدات حاصله در چند بخش ارائه شده‌اند. شکل (۵)، نمودار بار-جابجایی وسط دهانه کلیه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. ظرفیت خمشی نهایی نمونه‌ها، خیز نهایی، سختی الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها متفاوت بوده است (شکل (۵)). در قسمت‌های بعدی در مورد رفتار، مقاومت نهایی، مود شکست، الگوی ترک و سختی‌های الاستیک و پلاستیک و اثرات عوامل متعدد به طور مفصل بحث و بررسی شده است.

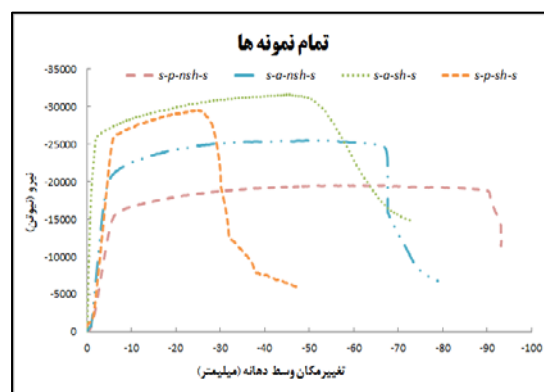


(الف)



(ب)

شکل ۶- مود شکست کلیه نمونه‌ها: الف) ناحیه فشاری، ب) ناحیه کششی



شکل ۵- نمودار بار تغییر مکان وسط دهانه همه نمونه‌ها

۳-۱- رفتار و مود شکست نمونه‌ها

همان‌طور که در نمودارهای شکل (۵) مشاهده می‌شود، رفتار کلیه نمونه‌ها انعطاف‌پذیر می‌باشد. می‌توان مشاهده نمود که نمونه با محصورشدگی منفعل و بدون برش‌گیر بیش‌ترین انعطاف‌پذیری را نسبت به سایر نمونه‌ها، از خود نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که شکست در کلیه نمونه‌ها با پارگی

در ناحیه فشاری نمونه، سطح بتن در تماس با ناحیه کمانش یافته لوله فولادی، خرد شده است (شکل (۷)). همچنین مشاهده می‌شود که بتن ناحیه کششی در نمونه‌های با محصورشدگی فعال، دچار ترک‌های با عمق کمتری نسبت به نمونه‌های با محصورشدگی منفعل می‌باشد. نمونه S-A-Sh، کمترین میزان ترک را نسبت به سایر نمونه‌ها داراست.

به علاوه می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از برش‌گیر منجر به بهبود رفتار بتن در ناحیه فشاری شده است. بنابر این، بتن در ناحیه کوچک‌تری دچار خردشدگی شده است. بدترین نوع ترک در ناحیه کششی، متعلق به نمونه با محصورشدگی منفعل و بدون برش‌گیر (S-P-Nsh) می‌باشد. به علاوه، از مقایسه نمونه‌های با محصورشدگی منفعل، با و بدون برش‌گیر (S-P-Sh و S-P-Nsh)، می‌توان نتیجه گرفت که تعبیه برش‌گیر تأثیر چندانی در کاهش ترک‌ها نداشته است. به طور کلی می‌توان گفت که محصورشدگی فعال نقش مؤثری در کاهش ترک‌های ناحیه کششی دارد. با این حال، افزودن برش‌گیرها تأثیری در کاهش ترک‌های ناحیه کششی ندارد.

۳-۳- ظرفیت خمشی و انرژی جذب شده

میزان انرژی جذب شده هر نمونه را با محاسبه سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه آن نمونه، می‌توان محاسبه نمود. در جدول (۲)، مقادیر بار نهایی، ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده برای هر نمونه آورده شده است. در بخش‌های بعدی، از اعداد این جدول، برای مقایسه اثرات ناشی از تعبیه برش‌گیر و تغییر نوع محصورشدگی استفاده شده است.

جدول ۲- ظرفیت خمشی نمونه‌ها

انرژی جذب شده	M_{max}	P_{max}	نام نمونه
	KN.m	KN	
۱۹۷۷/۹۶۷	۵/۲۱۷۳	۳۱/۶۲	S-A-Sh
۱۵۴۶/۱۲۷	۴/۲۱۵۸	۲۵/۵۵	S-A-Nsh
۹۰۶/۴۹۷	۴/۸۸۲۷	۲۹/۵۹	S-P-Sh
۱۵۳۷/۹۹۲	۳/۲۲۷۴	۱۹/۵۶	S-P-Nsh

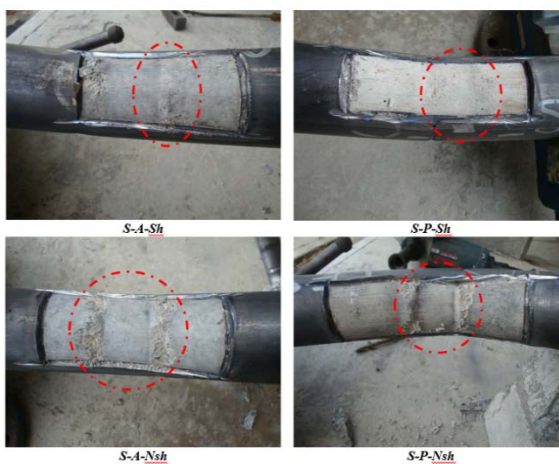
۳-۴- بررسی اثرات ناشی از نصب برش‌گیر

به منظور بررسی اثر تعبیه برش‌گیر در نمونه‌ها، نتایج حاصله برای دو حالت با و بدون برش‌گیر مقایسه شدند. این مقایسه در

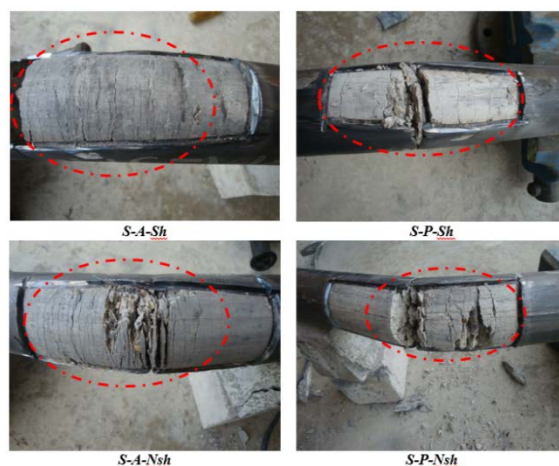
به علاوه، مود شکست حاکم در نمونه (S-P-Nsh)، پارگی لوله در ناحیه کششی توأم با خردشدگی بتن در ناحیه فشاری، می‌باشد. نهایتاً، در نمونه‌های با محصورشدگی فعال، کمانش موضعی کمتری در ناحیه فشاری لوله مشاهده می‌شود (شکل (۶)).

۳-۲- الگوی ترک خوردگی نمونه‌ها

برای بررسی نحوه گسترش ترک در نمونه‌ها، قسمتی از لوله فولادی در دو ناحیه فشاری و کششی، پس از آزمایش خمشی بریده شده است. لذا، خردشدگی بتن در ناحیه فشاری و توزیع ترک‌ها در ناحیه کششی آشکار شده و مورد بررسی قرار گرفتند (شکل (۷)).



(الف)



(ب)

شکل ۷- نمایش نحوه ترک خوردگی کلیه نمونه‌ها: (الف) ناحیه فشاری، (ب) ناحیه کششی

در حالی که تعبیه برش‌گیرها در نمونه‌های گروه فعال، تأثیر کمتری در افزایش ظرفیت خمشی مقطع نسبت به نمونه‌های گروه منفعل دارد. این بدان معناست که تعبیه برش‌گیر در نمونه‌های مقاطع مرکب متداول باعث افزایش چشمگیری در ظرفیت خمشی مقطع شده است.

در گروه فعال، تعبیه برش‌گیر سبب افزایش میزان انرژی جذب شده، می‌شود (جدول (۳)). در حالی که تعبیه برش‌گیر در گروه منفعل، سبب کاهش میزان انرژی جذب شده، می‌گردد (جدول (۳)).

با در نظر گرفتن میزان تغییر در ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده در نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که تعبیه برش‌گیر در نمونه‌های فعال مناسب‌تر از نمونه‌های منفعل است، زیرا سبب افزایش هر دو عامل می‌گردد.

در هر دو گروه، تعبیه برش‌گیرها باعث رفتار تردتر نمونه‌ها شده است (شکل (۸)). بنابر این، میزان خیز نهایی در نمونه‌های بدون برش‌گیر، بیشتر از میزان خیز نهایی در نمونه‌های با برش‌گیر می‌باشد.

جدول ۳- درصد تغییرات ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های با محصورشدگی فعال و منفعل

گروه	نام نمونه	نمونه مرجع	درصد تغییر لنگر خمشی	درصد تغییر میزان انرژی جذب شده
			%	%
فعال	S-A-Sh	خیر	۲۳/۷۶	۲۷/۹۳
	S-A-Nsh	بله	-	-
منفعل	S-P-Sh	خیر	۵۱/۲۹	-۴۱/۰۶
	S-P-Nsh	بله	-	-

دو گروه فعال و منفعل صورت گرفت. تنها عامل متغیر در دو گروه، وجود و یا عدم وجود برش‌گیرها می‌باشد. لذا می‌توان اثرات افزودن برش‌گیر برای هر دو نوع محصورشدگی فعال و منفعل را بررسی نمود. گروه فعال، شامل نمونه‌های با محصورشدگی فعال یعنی S-A-Nsh و S-A-Sh می‌باشد. همچنین، گروه منفعل، از نمونه‌های با محصورشدگی منفعل یعنی S-P-Sh و S-P-Nsh تشکیل شده است. شکل (۸)، نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه را برای هر دو گروه نشان می‌دهد.

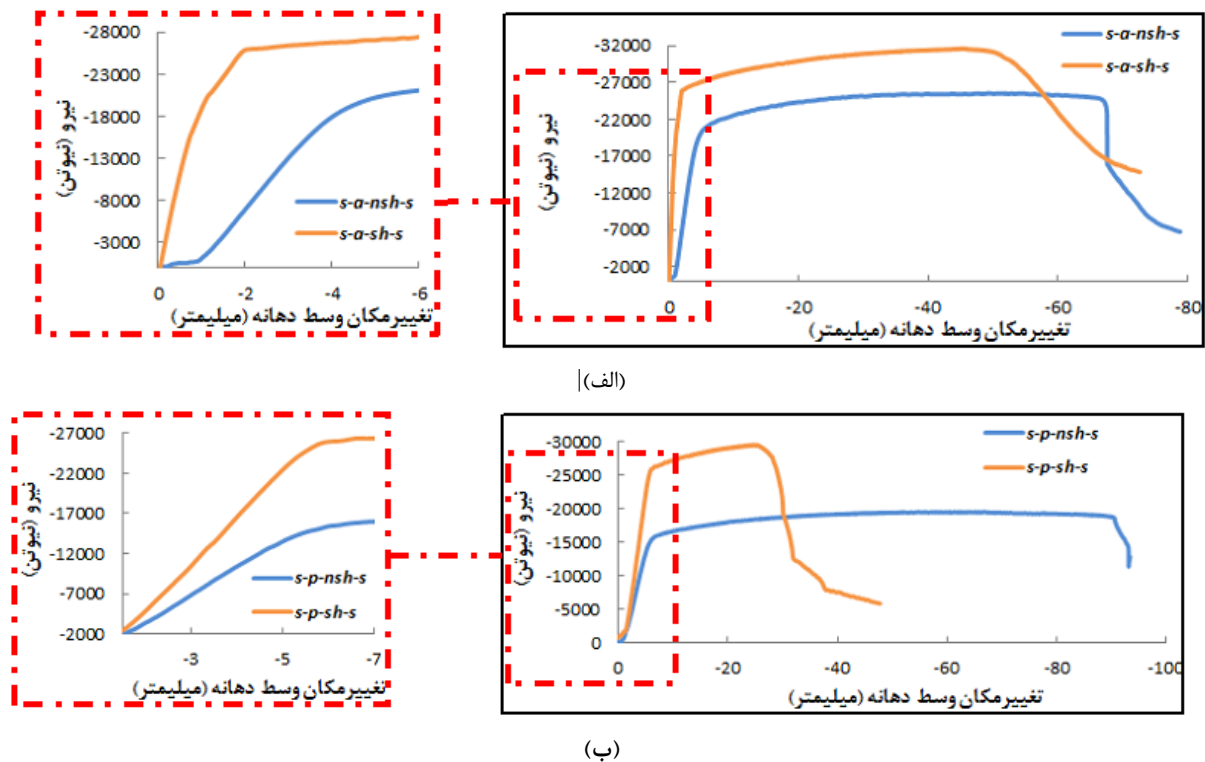
تعبیه برش‌گیر در طول نمونه سبب افزایش در سختی اولیه نمونه‌های هر دو گروه شده است (شکل (۸)). هر چند، شدت افزایش سختی الاستیک، در نمونه‌های فعال به مراتب بیشتر از نمونه‌های منفعل می‌باشد. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که قرار دادن برش‌گیر در طول نمونه، افزایش چندان در سختی پلاستیک نمونه‌های دو گروه ایجاد نمی‌کند.

شکست در کلیه نمونه‌ها با پاره شدن لوله در ناحیه کششی همراه بوده است (شکل (۷)). به علاوه، در اثر آزمایش خمشی نمونه‌ها، در ناحیه فشاری لوله، کماتش موضعی رخ داده است. میزان و شدت کماتش موضعی لوله‌ها، بر حسب نوع نمونه متفاوت است. برای هر دو گروه فعال و منفعل، تعبیه برش‌گیر در طول نمونه، باعث کاهش شدت موج‌های تشکیل شده در اثر کماتش موضعی لوله در ناحیه فشاری شده است. همچنین شدت پارگی لوله در نمونه‌های با برش‌گیر بسیار قابل ملاحظه می‌باشد (شکل (۷)).

جدول (۳)، درصد تغییر مقاومت خمشی و میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها، را نشان می‌دهد. عدد منفی در جدول فوق، بیانگر کاهش پارامتر مورد بررسی و عدد مثبت نشان دهنده افزایش پارامتر فوق می‌باشد. با توجه به جدول (۳) می‌توان دریافت که تعبیه برش‌گیرها در نمونه‌های گروه منفعل، نقش به‌سزایی در افزایش ظرفیت خمشی مقطع دارد.

جدول ۲- ظرفیت خمشی نمونه‌ها

نام نمونه	P _{max}	M _{max}	انرژی جذب شده
	KN	KN.m	
S-A-Sh	۳۱/۶۲	۵/۲۱۷۳	۱۹۷۷/۹۶۷
S-A-Nsh	۲۵/۵۵	۴/۲۱۵۸	۱۵۴۶/۱۲۷
S-P-Sh	۲۹/۵۹	۴/۸۸۲۷	۹۰۶/۴۹۷
S-P-Nsh	۱۹/۵۶	۳/۲۲۷۴	۱۵۳۷/۹۹۲



شکل ۸- نمودار بار - خیز: الف) نمونه‌های با محصورشدگی فعال، ب) نمونه‌های با محصورشدگی منفعل

۳-۵- بررسی اثرات نوع محصورشدگی

نمونه‌ها در دو گروه با برش‌گیر و بدون برش‌گیر قرار گرفتند. تنها پارامتر متغیر در هر گروه نوع محصورشدگی می‌باشد. گروه اول شامل نمونه‌هایی می‌باشد که در آن‌ها از برش‌گیر استفاده نشده است (S-A-Nsh و S-P-Nsh). گروه دوم نمونه‌های با برش‌گیر می‌باشند (S-A-Sh و S-P-Sh).

محصورشده‌گی فعال سبب افزایش سختی الاستیک نمونه‌ها، در هر دو گروه می‌گردد (شکل (۹)). در ضمن، میزان افزایش سختی الاستیک برای نمونه‌هایی که در آن برش‌گیر تعبیه شده است، به مراتب بیشتر است. همچنین، نوع محصورشدگی تأثیر چندانی بر روی سختی پلاستیک نمونه‌ها ندارد (شکل (۹)).

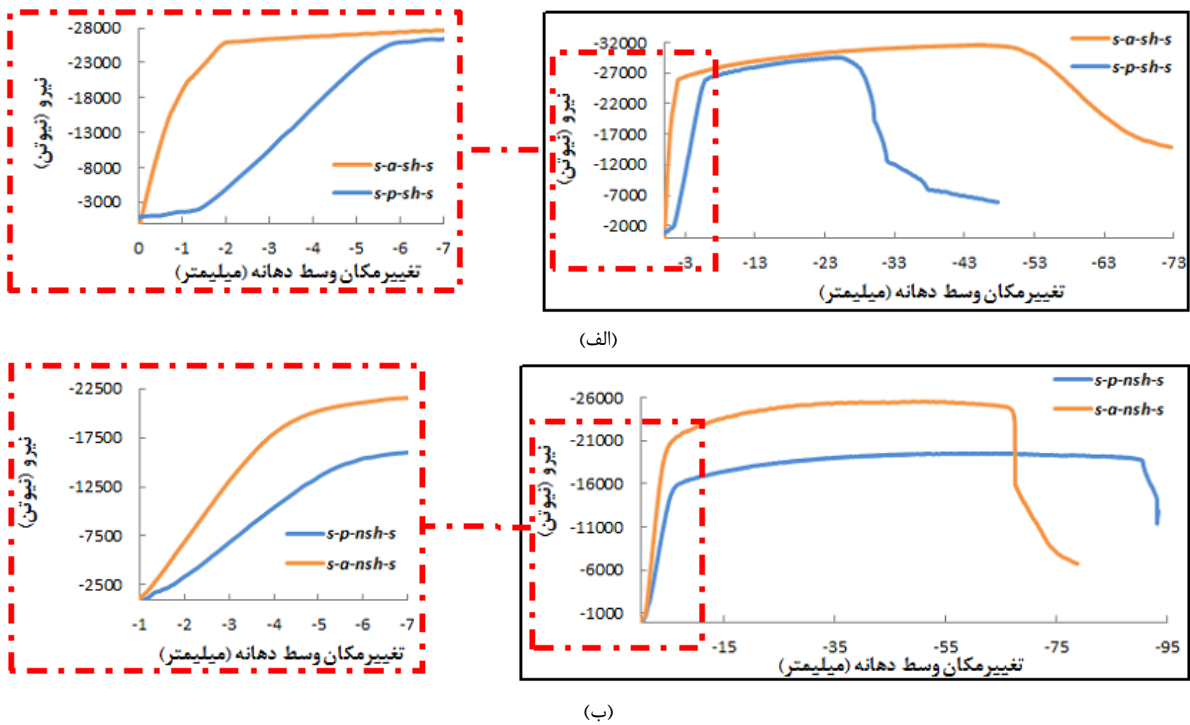
نوع محصورشدگی تأثیر بسزایی در شدت و میزان کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری نمونه‌ها دارد (شکل (۶)). تأثیر نوع محصورشدگی در کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری، در نمونه‌های بدون برش‌گیر محسوس‌تر می‌باشد. در نمونه بدون برش‌گیر، اعمال فشار اولیه بر روی نمونه، باعث می‌شود که از شدت کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری کاسته شود. با توجه به کاهش میزان کمناش موضعی نمونه‌ها در اثر اعمال فشار اولیه، شاید بتوان از مقاطع با نسبت D/t بزرگ‌تر نیز استفاده نمود.

محصورشده‌گی فعال منجر به افزایش ظرفیت خمشی نمونه‌ها

در هر دو گروه شده است (جدول (۴)). هر چند، تأثیر محصورشدگی فعال در افزایش ظرفیت خمشی نمونه‌های بدون برش‌گیر چشمگیرتر بوده است. همچنین، محصورشدگی فعال تأثیری بسیار قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب انرژی نمونه‌های با برش‌گیر دارد. در ضمن، تغییر نوع محصورشدگی در نمونه‌های بدون برش‌گیر، تأثیر ناچیزی در تغییر میزان انرژی جذب شده دارد. چنان‌که می‌توان از اثر محصورشدگی فعال در تغییر میزان انرژی جذب شده نمونه‌های بدون برش‌گیر صرف‌نظر نمود.

جدول ۴- درصد تغییرات ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های با و بدون برش‌گیر

گروه	نام نمونه	نمونه مرجع	درصد تغییر	درصد تغییر
			لنگر خمشی	میزان انرژی جذب شده
			%	%
بدون	S-P-Nsh	بله	-	-
برش‌گیر	S-A-Nsh	خیر	۳۰/۶۲	۰/۵۳
با	S-P-Sh	بله	-	-
برش‌گیر	S-A-Sh	خیر	۶/۸۶	۱۱۸/۲



شکل ۹- نمودار بار - نمودار بار - خیز: الف) نمونه‌های با برشگیر، ب) نمونه‌های بدون برشگیر

تعبیه برش‌گیر در نمونه، میزان انرژی جذب شده حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است. به علاوه، تغییر در نوع محصورشدگی باعث افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت خمشی می‌شود. در حالی که تغییر در میزان انرژی جذب شده در اثر تغییر در نوع محصورشدگی بسیار ناچیز بوده و قابل اغماض می‌باشد. با در نظر گرفتن هر دو عامل تعبیه برش‌گیر و محصورشدگی فعال، می‌توان محصورشدگی فعال را مؤثرتر از تعبیه برش‌گیر در نمونه دانست. زیرا علاوه بر این که سبب افزایش ظرفیت خمشی نمونه شده است، کاهش در میزان انرژی جذب شده، ایجاد نکرده است.

۳-۶- مقایسه اثر محصورشدگی فعال و برش‌گیر

برای شناسایی مؤثرترین روش بهبود رفتار خمشی تیر مرکب، دو نمونه S-P-SH و S-A-Nsh با نمونه S-P-Nsh که یک نمونه متداول مرکب می‌باشد، مقایسه شدند. هر دو نمونه دارای سختی الاستیک بیشتری نسبت به نمونه مرجع می‌باشند (شکل (۱۰)). همچنین، میزان سختی الاستیک در هر دو نمونه S-P-SH و S-A-Nsh برابر می‌باشد. در حالی که میزان سختی پلاستیک در هر سه نمونه تقریباً یکسان بوده و اختلاف چندانی میان آن‌ها وجود ندارد.

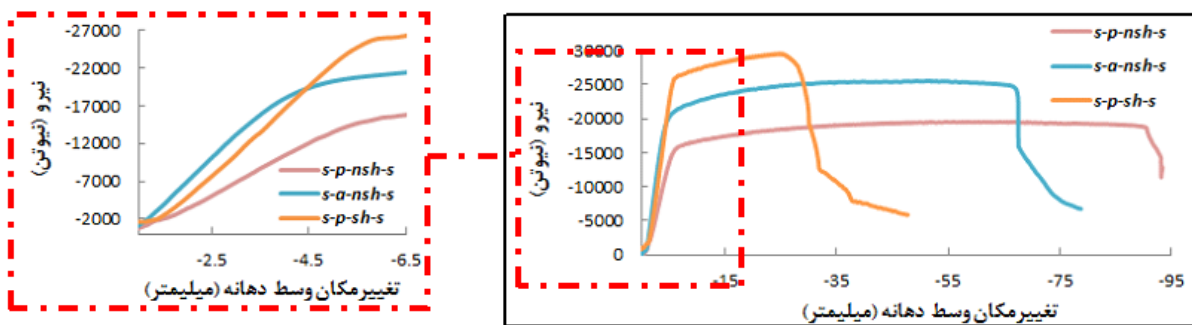
به علاوه مشاهده می‌شود که نمونه مرجع رفتار انعطاف‌پذیرتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد. این بدان معناست که تعبیه برش‌گیر و تغییر نوع محصورشدگی، از انعطاف‌پذیری نمونه می‌کاهد. تعبیه برش‌گیرها، سبب رفتار بسیار ترد نمونه شده است. در حالی که نمونه با محصورشدگی فعال رفتار انعطاف‌پذیری دارد (شکل (۱۰)).

نکته قابل توجه دیگر این است که مود شکست هر سه نمونه یکسان می‌باشد. همچنین شکست در هر سه نمونه به علت پارگی لوله در ناحیه کششی همزمان با خردشدگی بتن در ناحیه فشاری رخ داده است.

استفاده از برش‌گیر در نمونه، منجر به افزایش ۵۰ درصدی ظرفیت خمشی نمونه شده است (جدول (۵)). همچنین در اثر

جدول ۵- ظرفیت خمشی، انرژی جذب شده و درصد تغییر آن‌ها

نام نمونه	نمونه مرجع	درصد تغییر	درصد تغییر انرژی جذب شده
		لنگر	٪
S-P-Nsh	بله	-	-
S-A-Nsh	خیر	۳۰/۶۲	۰/۵۳ ^۱
S-P-Sh	خیر	۵۱/۲۸	-۴۱/۰۶ ^۲
عدد مثبت نشان‌دهنده افزایش			
عدد منفی نشان‌دهنده کاهش			



شکل ۱۰- نمودار بار - تغییر مکان وسط دهانه دو نمونه S-P-SH و S-A-Nsh با نمونه S-P-Nsh

۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به طور خلاصه به شرح

زیر می باشد:

- ۱- در اثر تعبیه برش گیر در سطح داخلی لوله فولادی و محصورشدگی فعال، رفتار نمونه تردتر می شود.
- ۲- شکست در کلیه نمونه ها به دلیل پارگی لوله در ناحیه کششی همزمان با خردشدگی بتن در ناحیه فشاری بوده است. تعبیه برش گیر در سطح داخلی لوله فولادی و یا محصورشدگی فعال هسته بتنی، باعث کاهش گسترش ترک ها و کمانش موضعی لوله در ناحیه فشاری می شود.
- ۳- سختی الاستیک با تعبیه برش گیر و یا محصورشدگی فعال نمونه افزایش می یابد. همچنین استفاده همزمان از برش-گیر و محصورشدگی فعال، به طور محسوسی سبب افزایش سختی الاستیک نمونه می گردد.
- ۴- تعبیه برش گیر در سطح داخلی لوله فولادی و محصورشدگی فعال هسته بتنی به ترتیب منجر به افزایش ۵۰ و ۳۰ درصدی ظرفیت خمشی نمونه می شود.
- ۵- در اثر تعبیه برش گیر در نمونه، میزان جذب انرژی در نمونه حدود ۴۰ درصد کاهش می یابد. در حالی که تغییر نوع محصورشدگی تغییر ناچیزی در میزان انرژی جذب شده ایجاد نموده که قابل صرف نظر کردن است.

۵- مراجع

- [2] Liu, Z., Goel, S. C., "Cyclic Load Behavior of Concrete-Filled Tubular Braces", ASCE Journal of Structural Division, 1988, 114 (7), 1488-1506.
- [3] Zhao, X. L., Grzebieta, R., Lee, C., "Void-Filled Cold-Formed RHS Braces Subjected to Large Deformation Cyclic Axial Loading", ASCE Journal of Structural Engineering, 2002, 128 (6), 746-753.
- [4] Hajjar, J., "Concrete-Filled Steel Tube Columns under Earthquake Loads", Journal of Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, (1), 1-10.
- [5] Roeder, C. W., "Overview of Hybrid and Composite Systems for Seismic Design in the United States", Engineering Structures, 1998, 20 (4-6), 355-363.
- [6] Fukumoto, Y., "Structural Stability Design-Steel and Composite Structures", Pergamon Press, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 1997.
- [7] Karbhari, V. M., Seible, F., Burgueno, R., Davol, A., Zho, L. "Structural Characterization of Fiber-Reinforced Composite Short and Medium Span Bridge Systems", The European Conference on Composite Materials (ECCM-8), Naples, Italy, June 3-6, 1998, pp 35-42.
- [8] Fam, A., Pando, M., Filz, G., Rizkalla, S., "Precast Composite Piles for the Route 40 Bridge in Virginia Using Concrete-Filled FRP Tubes", PCI Journal, 2003, 48 (3), 32-45.
- [9] Fam, A., Greene, R., Rizkalla, S., "SP-215-9: Field Applications of Concrete-Filled FRP Tubes for Marine Piles", In SP-215: Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, Ed. Rizkalla, S., Nanni, A., Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (ACI), 2003, pp 161-180.
- [10] Bondi, R., "Concrete Filled Tubular Flange Girder Bridge", Modern Techniques in Bridge
- [1] Hosaka, T., Umehara, T., Nakamura, S., Nishiumi, K., "Design and Experiments on a New Rail Way Bridge System Using Concrete Filled Steel Pipes", ASCCS Seminar, Concrete Filled Steel Tubes - A Comparison of International Codes and Practices, ASCCS Seminar, Innsbruck, Austria, 1997.

- [23] Gardner, J., Jacobson, R., "Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tubes", *ACI Journal of Structural Division*, 1967, 64 (7), 404-413.
- [24] Ge, H. B., Usami, T., "Strength Analysis of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Box Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 1994, 30, 607-612.
- [25] Han, L. H., "Concrete Filled Steel Tubular Structures", China Science Press, Beijing, China, 2004 [in Chinese].
- [26] Han, L. H., "Tests on Stub Columns of Concrete-Filled RHS Sections", *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58 (3), 353-372.
- [27] Kato, B., "Column Curves of Steel-Concrete Composite Concrete Columns", Research Report No. 1/97, School of Civil Engineering, University of Technology Western Australia, 1997.
- [28] Kilpatrick, A. E., Rangan, B. V., "Tests on High-Strength Composite Concrete Columns", Research Report No. 1/97; School of Civil Engineering, University of Technology Western Australia, 1997.
- [29] Matsui, C., Tsuda, K., Ishibashi, Y., "Slender Concrete Filled Steel Tubular Columns under Combined Compression and Bending", The 4th Pacific Structural Steel Conference, (PSSC95), Singapore, 1995, pp 29-36.
- [30] O Shea, M. D., Bridge, R. Q., "Behavior of Thin-Walled Box Sections with Lateral Restraint", Report No. R. 739, Department of Civil Engineering, University of Sydney, 1997.
- [31] Prion, H. G. L., Boehme, J., "Beam-Column Behavior of Steel Tubes Filled with High Strength Concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1994, 21, 207-218.
- [32] Rangan, B. V., Joyce, M., "Strength of Eccentrically Loaded Slender Steel Tubular Columns Filled with High-Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, 1991, 89 (6), 676-681.
- [33] Schneider, S. P., "Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1998, 124 (10), 1125-1138.
- [34] Shakir-Khalil, H., Mouli, M., "Further Tests on Concrete-Filled Rectangular Hollow-Section Columns", *Structural Engineering*, 1990, 68 (20), 405-413.
- [35] Tomii, M., Yashimaro, K., Morishita, Y., "Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Stub Column under Concentric Loading", The international Colloquium on Stability of Structures under Static and Engineering, The 6th New York City Bridge Conference, 25-26 July, 2011, pp 137-147.
- [11] Webb, J., Beyton, J. J., "Composite Concrete Filled Steel Tube Columns", The Structural Engineering Conference, Adelaide, The Institution of Engineers Australia, 1990, pp 181-185.
- [12] Han, L. H., Zhao, X. L., Tao, Z., "Tests and Mechanics Model of Concrete-Filled SHS Stub Columns, Columns and Beam-Columns", *Steel & Composite Structures*, 2001, 1(1), 51-74.
- [13] Neogi, P. K., Sen, H. K., Chapman, J. C., "Concrete Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading", *Journal of Structural Engineering*, 1969, 47 (5), 187-195.
- [14] Probst, A. D., Kang, T. H. K., Ramseyer, Ch., Kim, U., "Composite Flexural Behavior of Full-Scale Concrete-Filled Tubes without Axial Loads", *Journal of Structural Engineering*, 2010, 1401-12.
- [15] ACI Committee 211.1-91. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. Michigan (US): American Concrete Institute*, 2000, pp 38.
- [16] Deng, Y., Tuan, C. Y., Zhou, Q., Xiao, Y., "Flexural Strength Analysis of Non-post-tensioned and Post-tensioned Concrete-Filled Circular Steel Tubes", *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67, 192-202.
- [17] Tomii, M., Sakino, K., "Elasto-Plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns", *Transactions of Architectural Institute of Japan*, 1979, 280, 111-120.
- [18] Shawkat, W., Fahmy, W., Fam, A., "Cracking Patterns and Strength of CFT Beams under Different Moment Gradients", *Composite Structures*, 2008, 84, 159-166.
- [19] Knowles, R. B., Park, R., "Strength of Concrete Filled Steel Tubular Columns", *ASCE Journal of Structural Division*, 1969, 95, 1565-1587.
- [20] Mei, H., Kiiouisis, P. D., Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., "Confinement Effects on High Strength Concrete", *ACI Structure Journal*, 2001, 98 (4), 548-553.
- [21] Christopher, Y., Tuan, M., "Flexural Behavior of Nonpostensioned and Posttensioned Concrete-filled Circular Steel Tubes", *Journal of Structural Engineering*, 2008, 1057-1060.
- [22] Furlong, R. W., "Strength of Steel-Encased Concrete Beam-Columns", *ASCE Journal of Structural Division*, 1967, 93(ST5), 113-124.

- [48] Liao, F. Y., Han, L. H., He, Sh. H., "Behavior of CFST Short Column and Beam with Initial Concrete Imperfection: Experiments", *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67, 1922-1935.
- [49] Uenaka, K., Kitoh, H., "Mechanical Behavior of Concrete Filled Double Skin Tubular Circular Deep Beams", *Thin-Walled Structures*, 2011, 49 (2), 256-263.
- [50] Kang, J. Y., Choi, E. S., Chin, W. J., Lee, J. W., "Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members and Its Applications", *Steel Structures*, 2007, 7, 319-324.
- [51] Kim, Y. H., You, S. K., Jung, J. H., Yoon, S. J., "Strengthening Effects of the Shear Key on the Flexural Behavior of Concrete Filled Circular Tube", *Steel Structures*, 2006, 6, 183-190.
- [52] Hosaka, T., Umehara, T., Nakamura, S., Nishiumi, K., "Design and Experiments on a New Railway Bridge System Using Concrete Filled Steel Pipes", *ASCCS Seminar, Concrete Filled Steel Tubes: A Comparison of International Codes and Practice*, Austria, Innsbruck, 1997, pp 367-372.
- [53] Nakamura, S., Momiyama, Y., Hosaka, T., Homma, K., "New Technologies of Steel/Concrete Composite Bridges", *Journal of Civil Engineering*, 2002, 58, 99-130.
- [54] Tomii, M., Sakino, K., "Experimental Studies on the Ultimate Moment of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns", *Translation AIJ*, 1979, 275, 55-65.
- [55] Tuan, C. Y., "Aurora Arch Bridge- Confined Concrete System Speeds Construction of Walkway Span", *Concrete International*, 2004, 26 (4), 64-67.
- [56] Nematzadeh, M., Naghipour, M., "Compressing Fresh Concrete Technique and the Effect of Excess Water Content on Physical-Mechanical Properties of Compressed Concrete", *Materials and Design*, 2012, 37, 256-267.
- [57] Nematzadeh, M., Naghipour, M., "Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Freshly Compressed Concrete", *Construction and Building Materials*, 2012, 34, 476-485.
- [58] Naghipour, M., Nematzadeh, M., Jalali, J., Salari, A., Nemati, S. T., "Hardened Density of Freshly Compressed Concrete and Its Effect on Mechanical Properties", *European Journal of Environment and Civil Engineering*, 2015, 19 (6), 733-755.
- Dynamic Loads, (SSRC/ASCE), Washington, US, 1977, pp 718-741.
- [36] Uy, B., "Strength of Concrete Filled Steel Box Columns Incorporating Local Buckling", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2000, 126 (3), 341-352.
- [37] Uy, B., "Strength of Short Concrete Filled High Strength Steel Box Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57 (2), 113-134.
- [38] Varma, A. H., Ricles, J. M., Sause, R., Lu, L. W., "Seismic Behavior and Modeling of High-Strength Composite Concrete-Filled Steel Tube (CFT) Beam-Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58 (5-8), 725-758.
- [39] Wang, Y. C., "Tests on Slender Composite Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 1999, 49, 25-41.
- [40] Han, L. H., Huo, J. S., "Concrete-Filled HSS Columns after Exposure to ISO-834 Standard Fire", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2003, 129 (1), 68-78.
- [41] Uy, B., "Concrete-Filled Fabricated Steel Box Columns for Multistory Buildings: Behavior and Design", *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1998, 1 (2), 150-158.
- [42] Han, L. H., Yao, G., "Effects of Pre-stress in the Steel Tube on the Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns", *China Journal of Civil Engineering*, 2003, 36 (4), 8-18 [in Chinese].
- [43] Lu, Y. Q., Kennedy, D. J. L., "The Flexural Behavior of Concrete-Filled Hollow Structural Section", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1994, 21 (1), 111-130.
- [44] Elchalakani, M., Zhao, X. L., Grzebieta, R. H., "Concrete-Filled Circular Steel Tubes Subjected to Pure Bending", *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57 (11), 1141-1168.
- [45] Han, L. H., Lu, H., Yao, G. H., Liao, F. Y., "Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tubes", *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62, 554-565.
- [46] Han, L. H., "Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tubes", *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60, 313-337.
- [47] Elchalakani, M., Zaho, X. L., Grzebieta, R., "Concrete-Filled Steel Circular Tubes Subjected to Constant Amplitude Cyclic Bending", *Engineering Structures*, 2004, 26, 2125-2135.

- [59] Nemati, M., Naghipour, M., Jalali, J., Nematzadeh, M., "Investigating Effective Factors on the Behavior of Concrete Filled Steel Tube Beams", Submitted for the Review and Possible Publication.
- [60] ASTM A370-10, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM International, West Conshohocken, PA, US, 2010.
- [61] ACI Committee 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. Michigan (US): American Concrete Institute, 2000, pp 38.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Active Confinement and Shear Key Elements on the Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tube (CFST)

Morteza Naghipour^{*,a}, Marzieh Nemati^a, Javad Jalali^a, Mahdi Nematzadeh^b

^a Civil Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

^b Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Received: 10 October 2015; **Accepted:** 22 February 2016

Keywords:

Active confinement, Shear key, Flexural behaviour, Concrete-filled steel tube (CFST), Fresh concrete, Ultimate flexural capacity

1. Introduction

In recent years, extensive research has been carried out on concrete filled steel tubes (CFST). The subsequent results indicate the superiority of concrete filled steel tubes in relation to reinforced concrete or steel members. This section type offers multiple structural advantages such as increasing the loading capacity, higher value of absorbed energy, ductile deformation, seismic resistance, and sufficient damping.

Applying the initial pressure on the fresh concrete and removing the excess water increased the compressive strength and Elastic modulus of concrete [1-3]. The effective factors on the flexural behavior of CFST beams was investigated and it was concluded that the active confinement has no effect on the sample's failure mode. However, active confinement leads to reduction in the extent and intensity of concrete crushing in the compressive zone as well as reduction in the extent of the cracked region and crack depth in the sample's tensile zone. Furthermore, the results showed that the best performance for active confinement of the concrete core is obtained for a section with $D/t=30$ and low compressive strength of the concrete core. In this section, the value of absorbed energy and the flexural strength increase simultaneously.

In this study, the main goal is to discover an appropriate way to improve the flexural strength and enhance the behavior of CFST sections. For this purpose, two approaches were considered. The first one is to install shear keys along the sample, and the second one is to apply an initial pressure on the concrete to remove the excess water of the concrete core (excess water is referred to the water which is not used for the hydration process). In this paper, the parameters of concrete core's compressive strength, length to diameter ratio (L/D), tube's diameter to thickness ratio (D/t), yield strength of tube, and the level of applied pressure on the samples with active confinement are considered as constant.

2. Methodology

The main goal of this research is investigating the effect of installing shear keys and pre-tensioning on the flexural behavior of CFST sections. Hence, four simply supported CFST samples were examined experimentally. In some of the samples, shear keys were used to increase slip resistance, and in others, initial pressure were applied. In the samples with initial applied pressure, after concrete casting into the steel tube, the confinement type changes from passive to active. In order to apply initial pressure on the samples and obtaining active confinement, the pre-stress apparatus was designed and manufactured. Composite samples with fresh concrete core are placed in the pre-stress apparatus, and through initial applied pressure on the samples, the confinement type of the concrete core changes from passive to active.

In all samples, the concrete casting was performed in the standing position. In the samples with passive confinement, casting of concrete was carried out in three layers with each layer being compacted 25 times, whereas in the samples with active confinement, no vibration or compaction was carried out during the casting of the concrete core process. After casting the concrete core, the sample with active confinement undergoes an initial

* Corresponding Author

E-mail addresses: m-naghi@nit.ac.ir (Morteza Naghipour), marziehnemati1362@gmail.com (Marzieh Nemati), javad.jalali@nit.ac.ir (Javad Jalali), m.nematzadeh@umz.ac.ir (Mahdi Nematzadeh).

pressure in the pre-stress apparatus. It is worth mentioning that during the concrete casting, several cubic samples were also prepared with the purpose of determining the compressive strength of the CFST samples. The cubic samples were demolded after 2 days of aging, and then they were kept in a saturated environment. When performing the bending tests on the CFST samples, the compressive tests were also carried out on the cubic. After aging for 28 days, the samples underwent 3-point bending test using STM150 machine.

3. Results and discussion

The ultimate flexural capacity, ultimate deflection, elastic and plastic stiffness of all the samples were different. All samples demonstrate a flexible behavior. In addition, the results show that failure in all samples occurs with rupture in tensile zone of steel tubes. Also, under the loading condition, the tube's compressive zone experiences local buckling, the intensity of which depends on the considered samples.

Adding shear key results in a more brittle behavior of the samples. The change in the sample's behavior is independent from the confinement type. As the sample with passive confinement and installation of shear keys, experiences little local buckling in the tube's compressive zone. However, in the sample with passive confinement and having no shear key, flexural behavior of the sample occurs along with local buckling in the steel tube's compressive zone. Finally, less local buckling is observed in the samples with active confinement.

To investigate the manner of crack development in the samples, a section of steel tube in both compressive and tensile zones was cut after bending test, hence crushed concrete in the compressive zone as well as crack distribution in the tensile zone were revealed and investigated. In the sample's compressive zone, the concrete surface in contact with the steel tube's buckled region was crushed. Also, it is observed that the concrete in compressive zone of the actively confined samples experiences shallower cracks compared to the samples with passive confinement. In addition, it can be concluded that the employment of shear key leads to improvement of concrete behavior in the compressive zone, thus concrete crushing occurred in a smaller area. The worst crack type in the tensile zone belongs to the sample with passive confinement and no shear key installed. Generally, it can be said that active confinement has a significant role in reducing cracks in the tensile zone; however, adding shear keys has no sensible effect on reducing the tensile zone's cracks.

3.1. Shear key installation

Installing shear keys along the sample resulted in an increase in the stiffness of the samples in the both type of confinement. However, the intensity of increase in elastic stiffness is much greater for the active confinement samples in relation to passive confinement ones. Also, it may be concluded that the placement of shear key along the length of sample leads to negligible increase in plastic stiffness. However, for both types of active and passive confinement, placement of shear keys along the samples led to reduction in the severity of ripples formed during local buckling in the compressive zone of tubes. Moreover, the rupture intensity of tube in the samples with shear key is significant. Installing shear keys in the samples with conventional composite sections results in a considerable increase in the flexural capacity of the section. In the active group, shear keys increase the value of energy absorption, while in the passive group, this results in the value of energy absorption to be reduced. Considering the extent of variation in the flexural capacity and the value of absorbed energy of the samples, it can be deduced that shear key placement in active samples is a better choice in comparison with installing them in passive samples.

3.2. Confinement type effects

Active confinement causes the samples' elastic stiffness to increase, while the samples having shear keys experiencing much higher increase in the elastic stiffness. Also, the confinement type has no significant effect on the samples' plastic stiffness. The confinement type has a significant influence on the intensity and amount of local buckling of the tube in the compressive zone. The effect of the confinement type on the local buckling of the tube in the samples without shear keys is more tangible. In the sample with no shear key, applying the initial pressure results in reduction of the intensity of local buckling of steel tube in the compressive zone to be, hence considering this reduction, it may be possible to use section with even higher D/t ratios.

Active confinement increased the flexural capacity of the samples; however, the effect of active confinement on increasing the flexural strength of the samples with no shear keys was more significant. Therefore the effect of active confinement on the variation of the energy absorption by samples with no shear key could be neglected.

3.3. Comparing the effect of active confinement and shear key installation

In order to specify the most effective method for improving the flexural behavior of composite beam, a comparison between two samples, i.e. S-P-Sh and S-A-Nsh, and the sample S-P-Nsh as a common composite sample was made. Both samples have greater elastic stiffness than that of the reference sample. In addition, both samples of S-P-Sh and S-A-Nsh have an equal elastic stiffness. On the other hand, the three samples have almost the same plastic stiffness with the differences being negligible. Furthermore, installing shear keys and changing the

confinement type result in a reduction in the sample's flexibility. By installing shear keys, a much more brittle behavior is obtained, whereas the sample with active confinement has a flexible behavior. The failure in the three samples occurred with rupture in the tensile zone together with a simultaneous concrete crushing in the compressive zone.

By taking into account both factors of shear key installation and active confinement, it can be stated that active confinement is more effective than shear key installation, since active confinement not only increased the sample's flexural capacity, but also no reduction in the value of the absorbed energy of sample was resulted.

4. Conclusion

It concluded that by installing shear keys on the steel tube's inner wall and applying the active confinement type, more brittle behavior is obtained for the sample. Also failure in all samples occurred due to rupture of the tube in the tensile zone with the simultaneous crushing of concrete core. Installing shear keys on the steel tube's inner wall and/or active confinement of concrete core decrease crack development in tensile zone and local buckling in the tube's compressive zone. Moreover, the elastic stiffness increases by installing shear key and/or active confinement of the sample. Additionally, using shear keys and active confinement at the same time considerably increase the sample's elastic stiffness. Furthermore, shear key installation on the tube's inner wall and active confinement of the concrete core result in 50 and 30 percent increase in the flexural capacity, respectively. As a result of shear key installation in the sample, the value of the absorbed energy by the sample decrease around 40 percent, while changing the confinement type results in a small change in the energy absorbed which is negligible.

5. References

- [1] Nematzadeh, M., Naghipour, M., "Compressing Fresh Concrete Technique and The Effect of Excess Water Content on Physical-Mechanical Properties of Compressed Concrete", *Materials and Design*, 2012, 37, 256-267.
- [2] Nematzadeh, M., Naghipour, M., "Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Freshly Compressed Concrete", *Construction and Building Materials* 2012, 34, 476-485.
- [3] Naghipour, M., Nematzadeh, M., Jalali, J., Salari, A., Nemat, S. T., "Hardened Density of Freshly Compressed Concrete and Its Effect on Mechanical Properties", *European Journal of Environment and Civil Engineering*, 2015, 19 (6), 733-755.