

کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی ECC در سازه‌های بتنی

رضا سلطان‌آبادی^۱، کیاچهر بهفرنیا^۲، داود مستوفی‌نژاد^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران

۳- استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (R.soltanabadi@cv.iut.ac.ir)

چکیده

امروزه استفاده از سازه‌های بتنی در دنیا به طور گسترده رواج یافته و به عنوان یکی از سازه‌های پر کاربرد شناخته می‌شوند. در کنار تمام مزایایی که می‌توان برای المان‌های بتنی برشمرد، معایبی نیز به چشم می‌خورد که همین امر محققین را به رفع این معایب مجاب می‌کند. یکی از رویکردهایی که تا به امروز به طور جدی مورد توجه محققین قرار گرفته است استفاده از بتن‌های با قابلیت شکل پذیری، انعطاف پذیری و افزایش ظرفیت کششی آن‌ها است که استفاده از بتن‌های الیافی در انواع مختلف و بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی جامعی از بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی پرداخته شده است که بر پایه مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین می‌باشد. بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی یکی از ایده‌های نو و جذاب در صنعت بتن‌های سبک است که کلید اصلی آن استفاده از سنگدانه‌های ریز با قطر حداکثر ۱۰ میلی‌متر بجای سنگدانه‌های درشت دانه در بتن‌های معمولی است. همچنین به جهت افزایش قابلیت‌های آن از الیاف‌های پلی‌وینیل‌الکل (PVA) استفاده می‌شود. این نوع بتن با وزن کمتر و انعطاف پذیری بیشتر و کنترل عرض ترک به مقادیر قابل توجه به نسبت بتن‌های معمولی به طور جدی مورد توجه در صنعت ساختمان سازی قرار گرفته است. این نوع بتن با توجه به هزینه قابل توجهی که دارند بیشتر در بحث بهسازی و مقاوم سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. به دلیل عملکرد سازه‌ای مطلوبی که بتن ECC در بارگذاری چرخه‌ای از خود نشان داده است، این نوع بتن به عنوان یکی از بهترین تکنولوژی‌های موجود در زمینه ساخت بتن‌های نوین معرفی شده است.

کلمات کلیدی: شکل پذیری، بتن‌های الیافی، بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی، ECC، PVA.

۱- مقدمه

المان‌های بتنی علاوه بر مزایای بسیار زیادی که دارند با معایبی نیز همراه خواهند بود که از جمله آن می‌توان به ضعف در برابر کشش، تردی، شکل پذیری محدودتر و ... اشاره کرد. از این رو محققین در دهه‌های اخیر به دنبال تکنولوژی پیشرفته‌ای جهت رفع معایب ذکر شده بوده‌اند که حاصل برخی از این تحقیقات را می‌توان به بتن‌های الیافی^۱ در انواع مختلف و بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی^۲ اشاره کرد که به طور جدی در حال حاضر نیز مورد بررسی در رفتارهای لرزه ای آن‌ها در المان‌های سازه‌ای قرار دارند.

توسعه بتن‌های الیافی (FRC) در چندین مرحله توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در دهه ۱۹۶۰ میلادی تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای توسط رومولدی و همکاران [۱، ۲] انجام گرفت که در ذیل تحقیقات صورت گرفته، اثر بخشی الیاف‌های فولادی کوتاه در کاهش تردشکنی بتن‌ها بررسی گردید. همین رویکرد در تحقیقات بعدی نیز به کمک الیاف‌هایی با جنس‌های متنوع نظیر شیشه، الیاف‌های کربنی، الیاف‌های مصنوعی و طبیعی و در سال‌های اخیر استفاده از الیاف‌های هیبریدی که با سایر الیاف‌ها و با طول‌های مختلف ترکیب می‌شود مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش تحقیقات بر روی رفتار سازه‌ای بتن‌های الیافی، استاندارد Rilem TC [۳] استفاده از آن‌ها را به عنوان یک روش نوین جهت طراحی سازه‌های بتنی پیشنهاد کرده است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر روی بتن‌های الیافی مشخص شده است که این نوع بتن‌ها با رفتاری شبه-ترد^۳ و نرم شدگی^۴ همراه خواهند بود که نمونه آزمایش انجام شده بر روی این نوع بتن‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. با صرف نظر از شاخه نرم شدگی، بتن‌های الیافی FRC حتی با الیاف استفاده شده با حجم کم، ترک‌های ناشی از جمع شدگی بتن را به خوبی کنترل می‌کنند [۴]. در آغاز دهه ۱۹۸۰ میلادی محققین علاقمند به بهبود رفتار کششی بتن‌های الیافی FRC بودند. در بتن‌های الیافی FRC سختی مصالح افزایش می‌یابد لیکن هیچگونه تغییری در شکل پذیری دیده نمی‌شود. طبق تعریف، شکل پذیری ظرفیت تغییر شکل کششی (کرنش‌ها) با مشارکت آرماتورها در یک عضو بتنی است. تلاش‌های اولیه جهت دستیابی به شکل پذیری کششی توسط اوستون و همکاران [۵] و پس از آن توسط کرنچل و استنگ [۶] انجام شد که در نتیجه تحقیقات آن‌ها مشخص شد که چنانچه از الیاف‌های پیوسته و منظم استفاده شود، شکل پذیری این نوع بتن‌ها تا ۱۰۰ برابر بتن‌های معمولی قابل دستیابی است. از جمله الیاف‌های پیوسته تقویت کننده مدرن امروزه می‌توان به الیاف‌های نساجی اشاره کرد که گاهی می‌توان آن‌ها را پیش تنیده نیز کرد [۷، ۸]. همچنین برای این منظور تحقیقات بسیار گسترده‌ای جهت بهبود رفتار بتن‌های الیافی FRC انجام شده است.

با استفاده از مصالح مختلف جهت بهبود رفتار بتن‌های الیافی FRC ممکن است انواع مختلفی از بتن‌ها را با رفتار متفاوت تهیه کرد که عمده اختلاف رفتاری آن‌ها شکل پذیری کششی و اغلب همراه با سخت شدگی کرنشی بر خلاف رفتار نرم شدگی پس از تسلیم می‌باشد. نعمان و رینهارت [۹] همچنین مصالحی را به نام بتن کامپوزیت‌های سیمانی الیافی^۵ (HPFRCC) طبقه بندی کردند. این نوع بتن‌ها فاقد مصالح درشت دانه هستند که بنابراین باید به الیاف که نقش چسبنده یا ملات تقویتی دارد توجه ویژه‌ای شود چراکه رفتار عضو بتنی شدیداً وابسته به آن‌ها خواهد بود [۴].

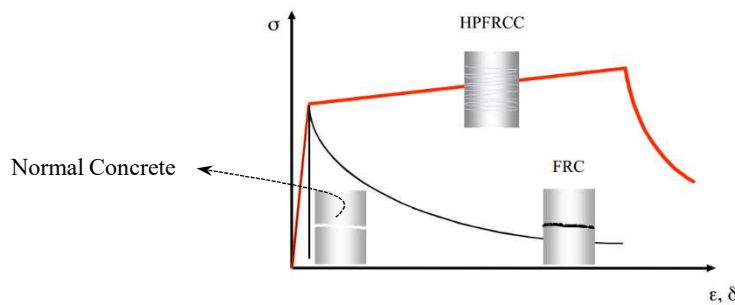
¹ Fiber Reinforcement Concrete (FRC)

² Engineered Cementitious Composite (ECC)

³ Quasi-Brittle

⁴ Softening

⁵ High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites



شکل ۱- نمودار تنش- کرنش تک محوره برای بتن‌های معمولی، بتن FRC و HPFRCC [۴]

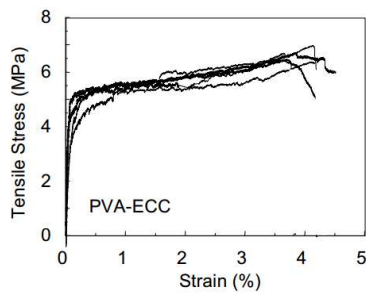
در شکل ۱ تفاوت بین رفتار کششی اعضای ساخته شده با بتن‌های معمولی، بتن‌های الیافی (FRC) و بتن‌های کامپوزیت سیمانی الیافی (HPFRCC) که نمونه‌ها تحت تنش کششی تک محوره قرار گرفته‌اند نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، رفتار تردشکنی بتن معمولی به شبه- ترد برای بتن الیافی و سپس به رفتار شکل پذیر توسط بتن‌های کامپوزیت سیمانی الیافی تبدیل می‌شود. همچنین رفتار ترد شکنی بتن معمولی به رفتار نرم شدگی توسط بتن‌های الیافی و سپس به رفتار سخت شوندگی بعد از تسلیم توسط بتن‌های کامپوزیت سیمانی الیافی تبدیل می‌شود.

همانطور که از شکل ۱ پیداست، بتن معمولی تحت تنش کششی تک محوره پس از تسلیم دچار گسیختگی می‌شود و شکل پذیری بسیار محدودی خواهد داشت. اما در بتن‌های الیافی FRC بعد از تسلیم با رفتار نرم شدگی همراه بوده و در نهایت با باز شدن ترک گسیختگی در یک ناحیه ضعیف اتفاق خواهد افتاد. اما در بتن‌های کامپوزیت سیمانی الیافی همانطور که مشخص است پس از تسلیم بر خلاف بتن‌های الیافی با سخت شدگی کرنشی مواجه شده و همین مسئله موجب افزایش شکل پذیری چندین برابر عضو و مانع از باز شدن عرض ترک (یا ترک‌ها) می‌شود و به اصلاح ریزترک‌هایی در عضو به وجود خواهد آمد [۴].

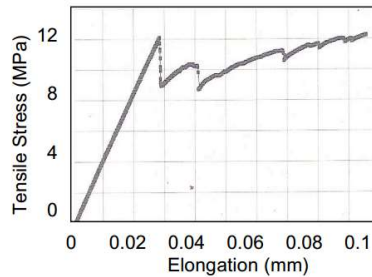
در سال‌های اخیر دو نوع از بتن‌های HPFRCC ظهور پیدا کرده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بتن‌های داکتال^۱ اشاره کرد. بتن داکتال دارای مقاومت کششی بالایی تا 12MPa و انعطاف پذیری (شکل پذیری) ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ درصد است [۱۰]. همچنین نوع دیگری از این بتن‌ها می‌توان به بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی ECC اشاره کرد. این نوع بتن‌ها که اولین بار در دانشگاه میشیگان امریکا توسعه یافت به طور متوسط دارای مقاومت کششی بین 4 تا 6MPa بوده و در مقابل نیز دارای شکل پذیری بسیار بالا بین ۳ تا ۵ درصد می‌باشد [۱۱، ۱۲]. در شکل ۲ نمودار تنش- کرنش برای این دو نوع بتن نمایش داده شده است. برای بتن داکتال از نمونه‌های مکعبی به ابعاد 70×70×160 mm استفاده شد [۱۰] که در شکل ۲-الف نمودار تنش- تغییر شکل برای آن نمایش داده شده است. همچنین در مدل بتن کامپوزیت سیمانی مهندسی ECC از نمونه مکعبی به ابعاد 76×13×305 mm استفاده شد [۱۲] که نمودار تنش- کرنش آن در شکل ۲-ب نمایش داده شده است.

توسعه و گسترش تحقیقات در زمینه بتن‌های ECC به علت مزایای منحصر به فردی که دارند همچنان جزئی از کارهای برتر دنیا در زمینه مهندسی سازه و زلزله شمردن می‌شوند. تعدادی از سازه‌های کاربردی ساخته شده با این نوع بتن با مقیاس واقعی توسط کشورهای نظیر ژاپن، کشورهای اروپایی و امریکا مورد آزمایش قرار گرفته شده‌اند. در این مقاله به صورت خلاصه به مطالعات انجام شده بر روی بتن‌های ECC پرداخته می‌شود که علاوه بر اینکه خصوصیات بنیادی بتن‌های ECC شرح داده خواهد شد، در یک بخش به رفتار سازه ای المان‌های بتن مسلح کامپوزیت سیمانی مهندسی R/ECC و در یک بخش به دوام و مقاومت بتن‌های ECC و R/ECC خواهیم پرداخت.

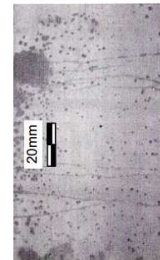
¹ Ductal



(ب)



(الف)



شکل ۲- نمودار رفتاری بتن‌های نوین، الف) بتن‌های *Ductal*، ب) بتن‌های *ECC*

۲- خصوصیات عمومی بتن‌های ECC

در این بخش به برخی از خصوصیات عمومی بتن‌های کامپوزیت سیمانی ECC پرداخته می‌شود که در ذیل آن می‌توان آگاهی بیشتری را نسبت به این نوع بتن‌ها کسب کرد. برای این منظور در ادامه به صورت جداگانه به برخی از این خصوصیت‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲ خانواده مصالح بتن‌های ECC

بتن‌های ECC را می‌توان به عنوان یک خانواده از مصالح با طیف گسترده‌ای از مقاومت کششی و شکل پذیری دانست که می‌تواند به واسطه تقاضای ساختمان‌های مورد نیاز هر یک از آن‌ها را انتخاب کرد. همچنین بتن‌های ECC نماینده یک خانواده از مصالح با عملکردهای مختلف و خصوصیات مشترک با شکل پذیری خیلی زیاد کششی (کرنشی) و ترک‌های خیلی ریز محسوب می‌شوند. در این نوع بتن‌ها بر خلاف بتن‌های معمولی، عرض ترک‌ها تحت بارگذاری‌های وارده به طور قابل توجهی کوچک‌تر خواهند بود. بتن‌های خود متراکم ECC که از جمله نمونه آن می‌توان به بتن ECC-M45 اشاره کرد، برای ساخت و ساز با مقیاس‌های بزرگ طراحی و برنامه ریزی شده است [۱۳، ۱۴]. بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی مقاومت اولیه بالا^۱ که به اختصار به آن بتن‌های HES-ECC می‌گویند برای کاربردی کردن آن‌ها در زیرساخت‌های حمل و نقلی طراحی شده است که به بازگشایی و راه اندازی آن‌ها برای عبور و مرور ماشین‌های عمومی در کم‌ترین زمان نیاز است [۱۵]. بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی سبک وزن^۲ که به اختصار به آن بتن‌های LW-ECC نیز می‌گویند برای مکان‌هایی که به بار مرده حداقل نیاز است طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶]. بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی سبز^۳ که به اختصار به آن G-ECC می‌گویند برای به حداکثر رساندن سبکی سازه و پایداری زیرساخت‌ها طراحی شده است [۱۷، ۱۸]. بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی خود ترمیم شونده^۴ که

¹ High Early Strength ECC

² Light Weight Concrete ECC

³ Green ECC

⁴ Self-Healing ECC

به اختصار به آن SH-ECC می‌گویند، یکی دیگر از خانواده این نوع بتن‌ها محسوب می‌شوند و برای بازسازی خصوصیات مکانیکی بعد از تجربه خسارت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹، ۲۰].

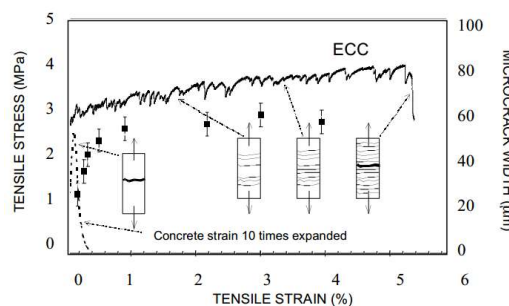
بتن‌های ECC با استفاده از ترکیب مصالح محلی در برخی از کشورها نظیر ژاپن، کشورهای اروپایی و افریقای جنوبی و به علاوه در امریکا به طور موفقیت آمیزی در حال ساخت است [۴]. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات فیزیکی و مکانیکی از بتن‌های ECC نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های ECC [۴]

مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت اولین ترک (MPa)	مقاومت نهایی کششی (MPa)	کرنش نظیر مقاومت نهایی کششی، (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت خمشی (MPa)
20-95	3-7	4-12	1-8	18-34	10-30

۲-۲ خصوصیات کششی بتن‌های ECC

همانطور که قبلاً اشاره شد، یکی از مهم‌ترین خصوصیت بتن‌های ECC شکل پذیری کششی بالای آن‌ها می‌باشد که توسط یک منحنی تنش-کرنش تک محوره نشان داده می‌شود که نمونه دیگری از این منحنی علاوه بر شکل ۲، در شکل ۳ نیز نمایش داده شده است. رفتار این نوع بتن‌ها در برابر تنش‌های کششی که مشابه رفتار فولادها است، یک خصوصیت نقطه تسلیم در انتهای حالت الاستیک را نمایش می‌دهد. نقطه تسلیم در این بتن‌ها متنابر با تشکیل اولین ریزترک^۱ در نمونه خواهد بود. همانطور که از شکل ۳ نیز مشخص است، افزایش تغییر شکل بر خلاف بتن‌های معمولی با افزایش بار مواجه است و این بیانگر کرنش سخت شدگی در این نوع بتن‌ها می‌باشد. شکست نهایی نمونه زمانی رخ می‌دهد که یکی از ریزترک‌ها در یک سطح گسترش کامل پیدا کند و گسیختگی سطحی ایجاد نماید. در خارج از محدوده حداکثر باربری، بتن‌های ECC رفتاری مشابه با بتن‌های الیافی FRC خواهند داشت.



شکل ۳ - نمودار تنش-کرنش تک محوره برای یک نمونه بتن ECC [۴]

تشکیل ریز ترک‌های متعدد برای دستیابی به شکل پذیری کششی بالا ضروری است. بین کرنش ترک خوردگی (حدوداً ۰/۰۱ درصد) و ۱ درصد بازشدگی ریزترک‌ها از صفر به تقریباً 60µm افزایش می‌یابد. با افزایش بارگذاری در خارج از محدوده

¹ Microcrack

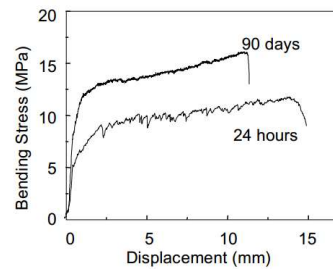
کرنش ۱ درصد، عرض ریز ترک‌ها همانطور که از شکل ۳ نیز مشخص است تقریباً ثابت و برابر $60\mu\text{m}$ خواهد بود. این خصوصیت بارز بتن‌های ECC به دلیل اندرکنش بین الیاف‌ها و ماتریس‌های بتن برای دوام نیز مهم است [۴].

۲-۳ خصوصیات خمشی بتن‌های ECC

در ادامه به بررسی خصوصیات خمشی بتن‌های ECC پرداخته می‌شود. توصیف رفتار خمشی این نوع بتن‌ها منعکس کننده شکل پذیری کششی است [۲۲]. تحت لنگر خمشی وارد شده ریز ترک‌های متعددی در تیر به جهت تحمل انحنای خیلی بزرگ به وجود می‌آید که به آن بتن انعطاف پذیر^۱ می‌گویند. مقاومت خمشی (یا مدول گسیختگی^۲) $10-15\text{MPa}$ به راحتی قابل دستیابی است که با یک تغییر شکل سخت شونده بزرگ همانند نمودار نمایش داده شده در شکل ۴-الف همراه است. تغییر شکل سخت شونده^۳ یک خصوصیت ذاتی از بتن ECC است که هیچگونه وابستگی به شکل هندسی نخواهد داشت. در شکل‌های ۴-ب فرم تغییر شکل زیاد تیر ساخته شده با بتن ECC نمایش داده شده است. همچنین بتن‌های ECC در بحث خستگی نیز تفاوت رفتاری قابل ملاحظه‌ای به نسبت بتن‌های معمولی دارند. مطابق مطالعات جامعی که در مرجع [۲۳] انجام شده است، طبق نتیجه گیری آن‌ها، مقاومت خستگی ناشی از بارگذاری خمشی بتن‌های ECC بیشتر از بتن‌های معمولی خواهد بود.



(ب)



(الف)

شکل ۴ - تیر ECC تحت آزمایش خمشی، الف) نمودار خمش-جابجایی، ب) شکل نمونه مورد آزمایش [۲۱]

۴- طرح اختلاط بتن‌های ECC

برای ساخت بتن‌های ECC تکنولوژی‌های متعددی توسط محققین ارائه شده است. بر خلاف بتن‌های معمولی، برای ساخت این نوع بتن‌ها باید دقت و حساسیت بیشتری را به خرج داد. به عنوان مثال در جدول ۲ یک نمونه از طرح اختلاط بتن ECC از نوع M45 نمایش داده شده است که همگی با فرض خشک بودن مصالح خواهند بود. همچنین این ترکیب با توجه به نوع و اندازه الیاف‌ها به گونه ای انتخاب شده است که قابلیت کنترل عرض ترک را داشته باشند. بتن ECC دارای ماسه سیلیسی^۴ ریز با نسبت ماسه به بیندر برابر 0.36 جهت حفظ سختی و پایداری حجم می‌باشد. همچنین برای بتن ECC-M45 نسبت آب به بیندر برابر 0.26 در نظر گرفته می‌شود تا تعادل خوبی بین مواد تازه و سخت به وجود آید. ماسه سیلیسی دارای ابعاد حداکثر برابر $250\mu\text{m}$ که ابعاد متوسط آن برابر $110\mu\text{m}$ می‌باشد [۱۲].

¹ Bendable Concrete

² Modulus of Rupture or MOR

³ Deflection Hardening

⁴ Silica Sand

جدول ۲- طرح اختلاط برای بتن ECC-45 بر اساس وزن هر مصالح [۴]

نوع بتن	سیمان (kg)	خاکستر بادی (kg)	ماسه سیلیسی (kg)	آب (kg)	الیاف (حجم، %)
ECC-M45	1.0	1.2	0.8	0.56	0.02

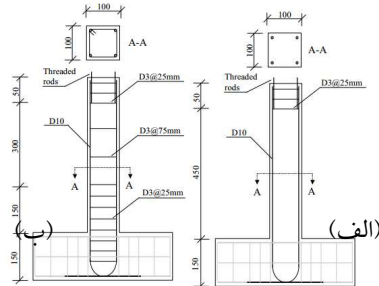
در حالی که انواع مختلفی از الیافها در تولید بتن ECC استفاده شده است، در بتن ECC-M45 که در حال حاضر دارای بیشترین داده‌های تجربی هستند، از الیاف پلی‌وینیل الکل^۱ استفاده کرده است. این الیاف دارای طول 12mm و قطر 39 μ m می‌باشد که مقاومت کششی اسمی، سختی و چگالی آن‌ها نیز به ترتیب برابر 1600MPa، 40GPa و 1300kg/m³ خواهد بود. شایان ذکر است که الیاف‌های PVA با یک عامل روغن اختصاصی (۱/۲ درصد وزن) به جهت کاهش سطح پیوند الیاف و ماتریس تهیه می‌شوند [۴].

۵- رفتار المان‌های سازه ای ساخته شده با بتن ECC

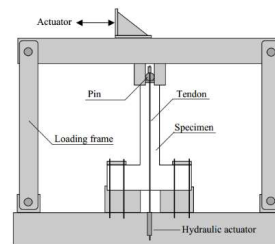
در این بخش به بررسی مطالعات انجام شده بر روی المان‌های سازه ای ساخته شده با بتن ECC پرداخته می‌شود. برنامه‌های آزمایشگاهی متعددی جهت ارزیابی عملکرد المان‌های سازه ای برای دو رفتار لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای انجام شده است. این آزمایش‌ها درک رفتاری در مورد چگونگی عملکرد بتن‌های ECC در پاسخ سازه را افزایش می‌دهند که در ادامه به طور نسبتاً جامع به این مطالعات پرداخته می‌شود.

۵-۱ المان‌های خمشی

در این بخش به برخی از مطالعات انجام شده بر روی المان‌های خمشی ساخته شده با بتن ECC پرداخته می‌شود. در سال ۲۰۰۲ میلادی مطالعات آزمایشگاهی توسط فیچر و لی [۲۴] بر روی یک اتصال T- شکل ساخته شده با بتن کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده به آرما تور با نام اختصاری R/ECC انجام شد. جزئیات دستگاه آزمایشگاهی و نمونه‌های ساخته شده توسط آن‌ها در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است. این محققین برای فراهم شدن بستر مناسب جهت ارزیابی بتن‌های R/ECC نمونه‌های ساخته شده با بتن‌های معمولی مسلح شده R/C را نیز تهیه و مورد آزمایش قرار دادند.



شکل ۶ نمونه‌های آزمایشگاهی توسط فیچر و لی [۲۴]

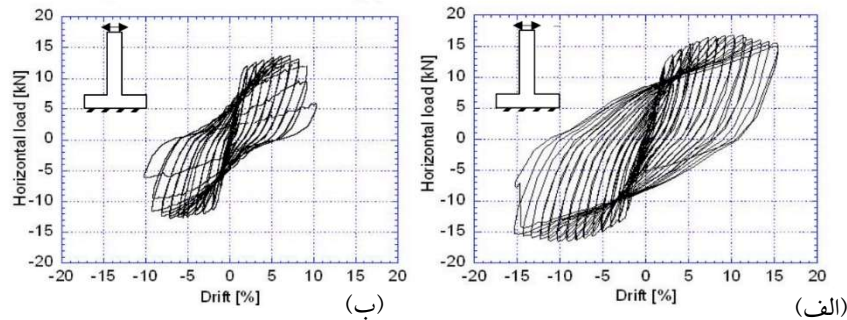


شکل ۵ دستگاه آزمایش توسط فیچر و لی [۲۴]

همانطور که از شکل ۶ مشخص است، دو نوع نمونه توسط این محققین ساخته شده است. در شکل ۶-الف نمونه اتصال ساخته شده با بتن R/ECC را نمایش می‌دهد که در آن نیز از هیچ خاموتی استفاده نشده است. در شکل ۶-ب نیز نمونه اتصال

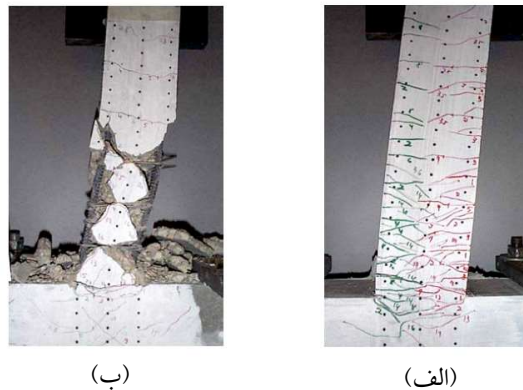
¹ Poly-Vinyl-Alcohol (PVA)

ساخته شده با بتن معمولی R/C را نمایش می‌دهد که در سراسر طول تیر از خاموت استفاده شده است. در شکل ۷ حلقه‌های هیستریزس ناشی از تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای^۱ وارده به اتصال را نمایش می‌دهد.



شکل ۷- حلقه هیستریزس ناشی از تاریخچه بارگذاری، الف) برای اتصال ساخته شده از R/ECC، ب) اتصال ساخته شده از R/C [۲۴]

همانطور که از شکل ۷ مشخص است، حلقه‌های هیستریزس حاصل شده از نتایج آزمایشگاه برای نمونه اتصال ساخته شده با بتن کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده به آرماتور R/ECC بسیار پایدار و با حجم بیشتر و چاق تر به نسبت اتصال ساخته شده با بتن معمولی مسلح R/C می‌باشد. در شکل ۸ خسارت وارده شده به دو اتصال در دررفت ۱۰ درصد (انتهای بارگذاری برای اتصال ساخته شده با بتن معمولی) نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۸ مشخص است، در دررفت ۱۰ درصد، اتصال ساخته شده با بتن معمولی R/C در محل تشکیل مفصل پلاستیک بتن ناحیه فشاری کاملاً از بین رفته و اتصال در این ناحیه ناپایدار شده است. در مقابل اتصال خمشی ساخته شده با بتن R/ECC در این میزان دررفت تنها تعدادی ریزترک در اطراف ناحیه مفصل پلاستیک دیده می‌شود و پایداری اتصال کاملاً حفظ و همچنان قابلیت انتقال بار را دارد.



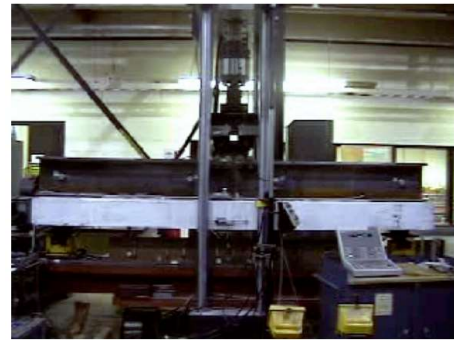
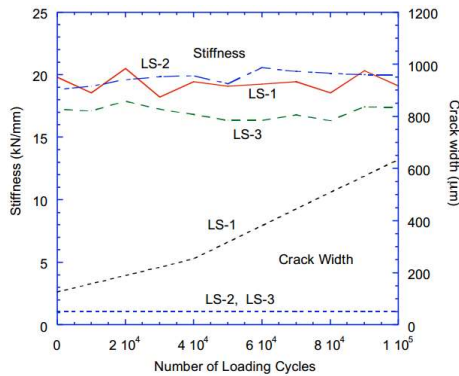
شکل ۸- خسارت وارده به اتصال در دررفت ۱۰ درصد، الف) برای اتصال ساخته شده از R/ECC، ب) اتصال ساخته شده از R/C [۲۴]

در سال ۲۰۰۴ کیم و همکاران [۲۵] رفتار المان‌های خمشی ساخته شده از R/ECC را برای بررسی خستگی تحت بارگذاری چرخه ای را مورد آزمایش قرار دادند. مطالعات آن‌ها بر روی یک عرشه پل که با یک دال رویه از جنس R/ECC ساخته شده است انجام شد. در شکل ۹ جزئیات نمونه ساخته شده توسط این محققین نمایش داده شده است که دال بتنی متصل شده به شاه‌تیر فولادی توسط برشگیر صورت گرفته بود.

برای انجام این آزمایش سه نمونه ساخته شد. نمونه اول که با بتن معمولی مسلح شده ساخته شده بود و با نام LS-1 و دو نمونه دیگر با بتن R/ECC و با جزئیات آرماتورگذاری متفاوت با نام‌های LS-2 و LS-3 ساخته شد. در طی بیش از ۱۰۰ هزار

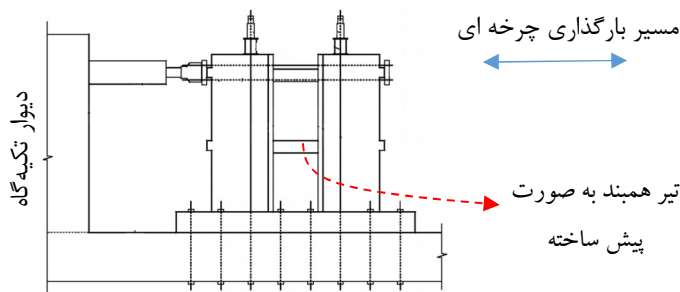
¹ Reversed Cyclic Loading

چرخه بارگذاری هیچگونه زوال سختی در هیچ کدام از نمونه‌ها دیده نشد. همانطور که از جزئیات نمایش داده شده در شکل ۱۰ مشخص است، عرض ترک در نمونه ساخته شده با بتن معمولی در آخرین چرخه بارگذاری تا حدوداً برابر 0.6mm رشد کرده است (نمونه LS-1 در شکل ۱۰)، این در حالی است که در دو نمونه LS-2 و LS-3 ساخته شده با R/ECC عرض ترک‌ها به 50µm محدود شده است.



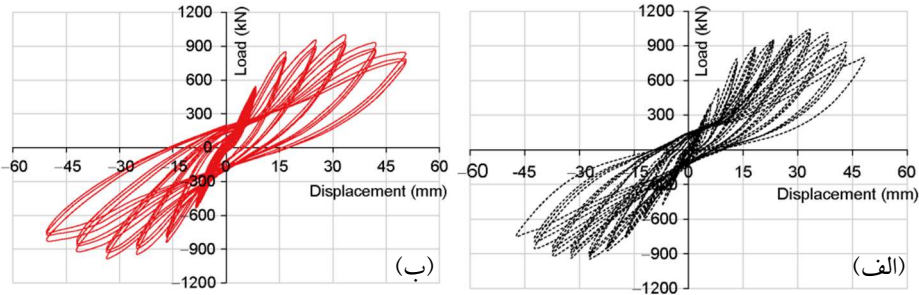
شکل ۹- جزئیات مدل آزمایشگاهی توسط کیم و همکاران [۲۵] شکل ۱۰- نتایج حاصل از آزمایش انجام شده توسط کیم و همکاران، سختی و عرض ترک در مقابل تعداد سیکل بارگذاری [۲۵]

در سال ۲۰۱۷ ژیان و همکاران [۲۶] تیرهای همبند در دیوارهای برشی پیش‌ساخته که به کمک بتن‌های R/ECC به دیوارها متصل شده و همچنین تیرهای همبند ساخته شده با بتن معمولی به صورت درجا مورد ارزیابی قرار دادند. جزئیات دستگاه آزمایش این محققین و نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- جزئیات دستگاه و نمونه آزمایشگاهی تیر همبند توسط ژیان و همکاران [۲۶]

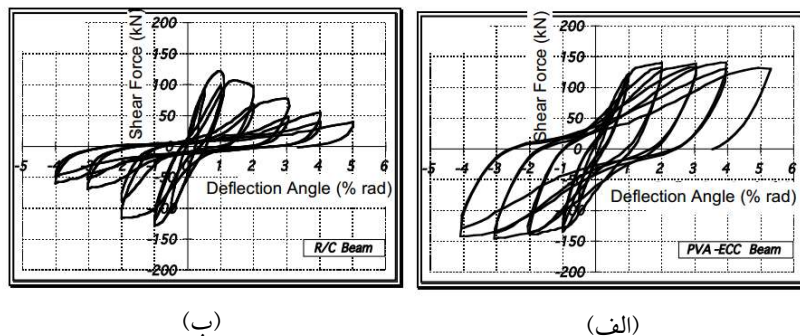
این محققین دو نمونه از دیوار برشی و تیر همبند پیش‌ساخته دو طبقه مشابه جزئیات نمایش داده شده در شکل ۱۱ را مورد بارگذاری چرخه ای استاتیکی (با سرعت ثابت) قرار دادند. در یکی از نمونه‌ها تیر همبند با استفاده از بتن معمولی R/C تهیه و نمونه دیگر تیر همبند پیش ساخته را با استفاده از بتن R/ECC به دیوار متصل کرده بودند. پس از بارگذاری نمونه‌ها تحت بار چرخه‌ای، نمودار هیستریزس آن‌ها همانند شکل ۱۲ می‌باشد. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، با اینکه نمونه تیر همبند پیش ساخته به وسیله بتن R/ECC به دیوار برشی متصل شده است، لیکن نمودار هیستریزس حاصل شده از آن حتی بهتر از نمونه با تیر همبند با بتن معمولی است و بیانگر رفتار بسیار خوب این نوع بتن‌ها حتی در محل اتصال دو عضو پیش ساخته می‌باشد.



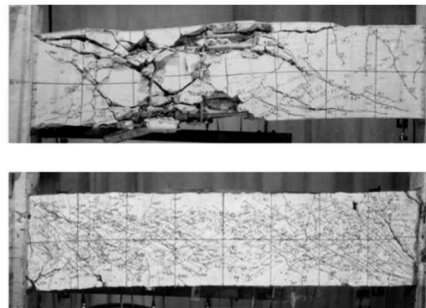
شکل ۱۲- نمودار هیستریزس نتیجه شده در آزمایش، الف) دیوار برشی با تیر همبند با بتن R/C ، ب) دیوار برشی با تیر همبند پیش ساخته متصل شده با بتن R/ECC [۲۶]

۵-۲ المان‌های برشی

در این بخش به مطالعات انجام شده به صورت آزمایشگاهی بر روی المان‌های تحت نیروی برشی پرداخته می‌شود. فوکویاما و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۲۷] مطالعات آزمایشگاهی بر روی المان‌های تحت برش را به صورت بارگذاری چرخه‌ای انجام داد. پس از اتمام بارگذاری چرخه‌ای، حلقه‌های هیستریزس نتیجه شده برای نمونه ساخته شده با بتن ECC و نمونه ساخته شده با بتن معمولی R/C همانند شکل ۱۳ می‌باشد. همانطور که از این شکل پیداست، حلقه‌های هیستریزس نتیجه شده برای نمونه‌های ساخته شده با ECC چاق تر، پایدارتر و با زوال مقاومت بسیار کمتر به نسبت نمونه ساخته شده با بتن معمولی برخوردار است.



شکل ۱۳- حلقه‌های هیستریزس، الف) نمونه ساخته شده با بتن ECC، ب) نمونه‌های ساخته شده با بتن معمولی R/C [۲۷]



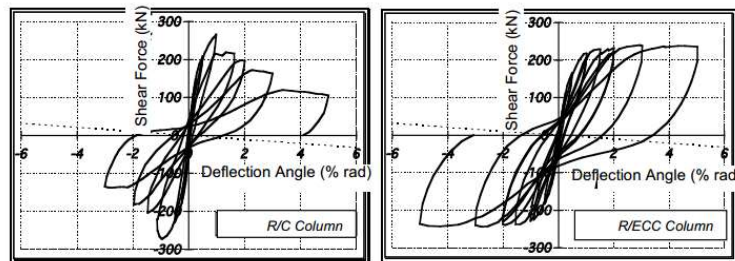
شکل ۱۴- خسارت وارده به نمونه‌ها در آخرین سیکل بارگذاری، الف) برای نمونه با بتن معمولی R/C ، ب) برای نمونه با بتن ECC [۲۷]

در نتایج بدست آمده برای سیکل‌های آخر بارگذاری، برای نمونه ساخته شده با بتن معمولی همانطور که در شکل ۱۴-الف نیز نمایش داده شده است با منهدم شدن بخشی از بتن و ریزش پوشش رویه آرماتورها و بروز ترک‌های قطری طویل مواجه شده

است، لیکن برای نمونه ساخته شده با بتن ECC خسارت وارده به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه با بتن معمولی است و علاوه بر عدم ریزش پوشش بتن، عرض ترک‌ها نیز محدود و صرفاً ریزترک‌هایی همانند شکل ۱۴-ب در نمونه آزمایش شده مشاهده گردید.

۵-۳ المان ستون

رفتار ستون‌های ساخته شده با بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده به آرماتور R/ECC و ساخته شده با بتن مسلح معمولی R/C در سال ۲۰۰۰ توسط فوکویاما و همکاران [۲۷] مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۵ منحنی هیستریزس برای دو نمونه ساخته شده با R/ECC و بتن مسلح معمولی R/C نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، در نمونه ساخته شده با بتن کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده حلقه‌های هیستریزس پایدارتر، چاق تر، با زوال مقاومت کمتر و با قابلیت جذب انرژی بیشتر به نسبت ستون ساخته شده با بتن معمولی برخوردار هستند.



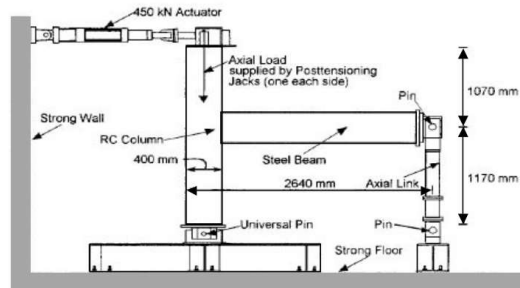
شکل ۱۵ حلقه‌های هیستریزس کسب شده از نتایج آزمایشگاه [۲۷]

در طی بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها، این محققین مشاهده کردند که در نمونه ساخته شده با بتن معمولی R/C علاوه بر بروز ترک‌های با عرض زیاد، شکست برشی در مقطع ستون قبل از اینکه آرماتورهای طولی آن تسلیم شوند اتفاق افتاد، در صورتی که در نمونه ساخته شده با بتن R/ECC صرفاً ریزترک‌ها رخ داده و هیچگونه شکست برشی در مقطع ستون رخ نداده است.

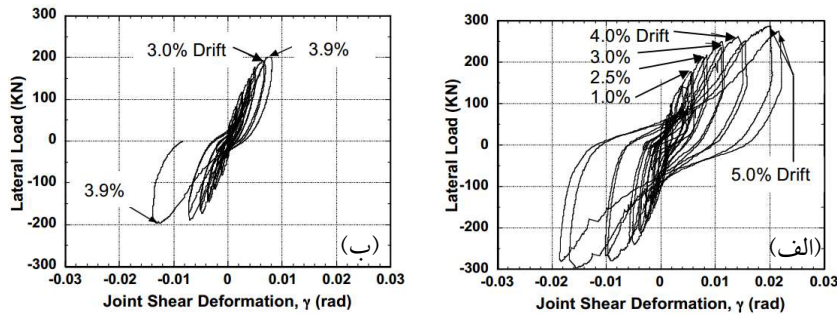
۵-۴ اتصال تیر به ستون بتنی

یکی دیگر از چالش‌های پیش روی مهندسين، چشمه اتصال در سازه‌های بتنی خواهد بود. از این رو کارهای تحقیقاتی گسترده ای نیز جهت بهبود رفتار این ناحیه و یا حتی جهت مقاوم سازی سازه‌های موجود ارائه شده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰ میلادی مطالعات تحقیقاتی نسبتاً جامعی توسط پارا و وایت [۲۸] بر روی رفتار اتصال تیر به ستون و به طور خاص در چشمه اتصال انجام شد. جزئیات نمونه و دستگاه آزمایش این محققین در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.

این محققین نمونه ساخته شده بتن معمولی همراه با خاموت را در نظر گرفتن و برای نمونه ساخته شده با بتن کامپوزیت سیمانی مهندسی از آرماتور برشی استفاده نکردند که همین مسئله یکی از چالش‌های پیش روی استفاده از این نوع بتن‌ها خواهد بود. چراکه محققین معتقدند که در صورت استفاده از بتن‌های ECC مقاومت برشی مقطع به نسبت بتن‌های معمولی افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. در شکل ۱۷ که منحنی هیستریزس برای بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها را نمایش می‌دهد به خوبی این نتیجه را دارد که در نمونه‌های ساخته شده با بتن R/ECC با اینکه هیچگونه خاموتی در چشمه اتصال به کار گرفته نشده است، اما حلقه‌های هیستریزس آن به طور قابل توجه‌ای به نسبت نمونه ساخته شده با بتن معمولی و به همراه خاموت پایدارتر، چاق تر و با قابلیت جذب انرژی بیشتر و همچنین بدون هیچگونه زوال سختی و مقاومت همراه است.



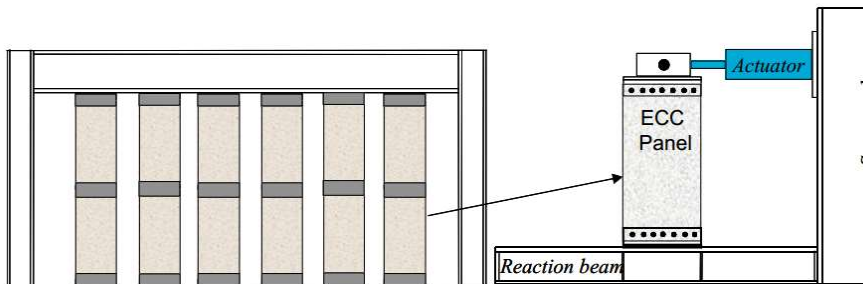
شکل ۱۶ جزئیات نمونه اتصال و دستگاه آزمایش توسط پارا و وایت [۲۸]



شکل ۱۷- منحنی هیستریزس نتیجه شده برای چشمه اتصال، الف) نمونه ساخته شده با R/ECC، ب) نمونه ساخته شده با R/C [۲۸]

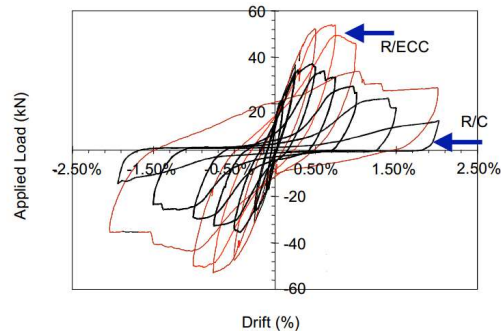
۵-۵ المان دیوار برشی

برای دیوارهای برشی ساخته شده با بتن‌های ECC نیز تحقیقاتی انجام شده است. در سال ۲۰۰۵ میلادی کسنر و بیلینگتون [۲۹] مطالعات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی ساخته شده با بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده R/ECC و بتن‌های مسلح معمولی R/C انجام دادند که جزئیات نمونه و دستگاه بارگذاری چرخه ای آن‌ها در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸ - جزئیات نمونه و دستگاه بارگذاری چرخه ای توسط کسنر و بیلینگتون [۲۹]

حلقه‌های هیستریزس حاصل شده از نتایج آزمایش این محققین در شکل ۱۹ نمایش داده شده است. همانطور که واضح است در صورت استفاده از بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده R/ECC می‌توان به ظرفیت بیشتر، قابلیت جذب انرژی به مراتب بالاتر، بهبود زوال مقاومت و پایداری بیشتر به نسبت دیوارهای ساخته شده با بتن معمولی R/C دست یافت.



شکل ۱۹- حلقه‌های هیستریزاس ناشی از بارگذاری چرخه ای برای دیوار برشی ساخته شده با بتن R/ECC و بتن معمولی R/C [۲۹]

۶- خلاصه و نتیجه گیری

بتن‌های ECC دارای خصوصیات منحصر به فردی هستند. از جمله مهم‌ترین این خصوصیات می‌توان به شکل پذیری تا ۱۰۰ برابر بتن‌های معمولی اشاره کرد، در حالی که مقاومت فشاری آن‌ها اختلاف قابل توجهی با بتن‌های معمولی و بتن‌های مقاومت بالا ندارد. رفتار بتن‌های ECC همانند فولادها یکی دیگر از خصوصیات بسیار مهم این نوع بتن‌ها در برابر تنش‌های کششی به شمار می‌آید. اگرچه بتن‌های ECC را می‌توان با حجم‌های مختلف الیاف‌ها ساخت، اما در صورت استفاده از حجم متوسط الیاف (۲ درصد یا کمتر به نسبت حجم بتن) می‌توان از این بتن به راحتی برای اجرای پروژه‌های اجرایی استفاده کرد. بتن ECC ثابت کرده است که به دلیل انعطاف پذیری که دارد قابلیت خود متراکمی را برای اجرا در محل نیز دارند.

شکل پذیری کششی زیاد بتن‌های ECC اجازه سازگاری و انتقال سازوکار تلاش‌های بیشتری را به آرماتورها می‌دهد. بنابراین آرماتورهای موجود در بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی مسلح شده با نام R/ECC در عملکرد سازه‌ها بهتر به کار گرفته می‌شوند. ضمناً به دلیل کنترل ترک‌ها و محدود شدن ترک‌ها در بتن‌های ECC، حفاظت از آرماتورها به مراتب بهتر از بتن‌های معمولی انجام می‌شود و این بیانگر کنترل دوام بهتر بتن‌های ECC به نسبت بتن‌های معمولی می‌باشد.

در سال‌های اخیر، تعداد کثیری از پروژه‌های با مقیاس واقعی در کشورهای مختلفی با استفاده از بتن‌های ECC انجام شده است. یکی دیگر از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از بتن ECC به صورت پیش ساخته در تیرهای همبند دیوار برشی در دو ساختمان بلند مرتبه در ژاپن اشاره کرد. هدف مهندسین طراح ژاپنی از به کار بردن این تکنولوژی در ساختمان‌های بلند مرتبه، افزایش قابلیت بازدهی و عملکرد مناسب لرزه ای ساختمان‌ها در یک کشور بسیار لرزه خیز می‌باشد. دیگر برنامه‌های کاربردی قابل توجه می‌توان به اتصال دال بتن ریزی شده در محل بر روی عرشه پل در آمریکا و ایتالیا، تیر کامپوزیت در عرشه پل در ژاپن، شاکریت کردن بتن ECC در تونلی در کره جنوبی، بازسازی سد میتاکا^۱ در ژاپن و بازسازی کانال‌های آبیاری در ژاپن و مواردی از این قبیل اشاره کرد. پروژه‌های زیادی در ساختمان سازی و همچنین در صنایع انرژی و هسته‌ای از بتن‌های ECC استفاده کرده‌اند.

بتن‌های ECC به دلیل انعطاف پذیری بسیار زیادی که دارند، در رفتار لرزه‌ای عملکرد بسیار مطلوبی را از خود به نمایش می‌گذارند که در بخش‌های قبلی به تفصیل به آن‌ها پرداخته شد. تحت بارهای چرخه‌ای این نوع بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی مسلح شده رفتاری مناسب‌تر و با کنترل خسارت در المان‌های سازه ای از خود به نمایش می‌گذارند و همین مسئله موجب افزایش بهره وری ساختمان، افزایش قابلیت جذب انرژی در سازه‌ها، افزایش قابلیت اعتماد و افزایش شکل پذیری کل سازه می‌شود. همچنین بتن‌های ECC به دلیل اندرکنش بین ماتریس‌ها و الیاف‌ها و جلوگیری از جدا شدن بتن با ترک‌ها عریض،

¹ Mitaka Dam

مقاومت برشی بسیار مناسبی را حتی در صورت عدم حضور آرماتورهای برشی از خود به نمایش می‌گذارند، لذا از این خاصیت می‌توان حتی جهت بهسازی و مقاوم سازی ساختمان‌های موجود استفاده کرد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بهسازی چشمه اتصال در سازه‌های بتنی اشاره نمود. چرا که یکی از خطرناک‌ترین شکست‌ها در سازه‌های بتنی، شکست برشی در محل چشمه اتصال در صورت ضعف آرماتوگذاری برشی می‌باشد که می‌توان با استفاده از بتن‌های ECC اقدام به بهسازی و مقاوم سازی آن‌ها کرد.

۷- مراجع

- [1] Romualdi, N. P. and Batson, G. B., "Mechanics of crack arrest in concrete", Proc. ASCE Eng. Mech. J, vol. 89, pp. 147-168., 1963.
- [2] Romualdi, J. P. a. M., J.A., "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement.", Proc. ACI.J, vol. 61, pp. 657-671, 1964.
- [3] Vandewalle, L. and Nemegeer, D. B., RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Materials and Structures, 2002.
- [4] Li, V. C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance," E. Nawy, Ed., ed in Concrete Construction Engineering Handbook: CRC Press, 2007.
- [5] Aveston, J., Cooper, G.A., and Kelly, A., "Single and multiple fracture," presented at the The Properties of Fiber Composites, Science and Technology Press Ltd, 1971.
- [6] Krenchel, H. a. S., H, "Stable microcracking in cementitious materials", Brittle Matrix Composites 2, pp. 20-33, 1989.
- [7] Reinhardt, H. W., Krüger, M. and Grobe, C.U., "Concrete prestressed with textile fabric", Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, pp. 231-239, 2003.
- [8] Curbach, M. a. J., F, "High-Performance Textile-Reinforced Concrete", Structural Engineering International, vol. 9, pp. 289-291, 1999.
- [9] Naaman, A. E. a. R., H.W., "Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites," presented at the High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 2003.
- [10] Chanvillard, G. a. R., S., "Complete characterization of tensile properties of ductal UHPFRC according to the French recommendations", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, pp. 21-34, 2003.
- [11] Li, V. C., "From Micromechanics to Structural Engineering – the design of cementitious composites for Civil Engineering applications.", JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering, vol. 10, pp. 37-48, 1993.
- [12] Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. , "Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements," presented at the Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw, Poland., 2003.
- [13] Kong, H. J., Bike, S. and Li, V.C., "Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. ", Cement and Concrete Composites, vol. 25, pp. 301-309, 2003.
- [14] Lepech, M. D. a. L., V.C., "Large scale processing of engineered cementitious composites", ACI Materials, 2007.

- [15] Wang, S. a. L., V.C., "High early strength engineered cementitious composites", ACI Materials, vol. 103, pp. 97-105, 2006.
- [16] Wang, S. a. L., V.C. , "Materials design of lightweight PVA-ECC", Proc., HPCFRCC, pp. 379-390, 2003.
- [17] Li, V. C., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M. and Keoleian, G., "Development of green ECC for sustainable infrastructure systems.," presented at the Int'l Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, China, Iowa State Univ, 2004.
- [18] Lepech, M. D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A., "Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability", ACI Materials, 2007.
- [19] Yang, E. H., Yang, Y. and Li, V.C. , "Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness", ACI Materials 2007.
- [20] Li, V. C. a. Y., E.H. , "Self-healing in concrete materials", Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science, Springer, pp. 161-193, 2007.
- [21] Wang, S. a. L., V.C., "Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances", RILEM SARL, pp. 65-73, 2006.
- [22] Kunieda, M. a. R., K., "Measurement of crack opening behavior within ECC under bending moment", RILEM SARL, pp. 313-322, 2006.
- [23] Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., and Kanda, T., "Flexural fatigue failure characteristics of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars", Materials, Conc. Struc. Pavements, vol. 718, pp. 121-134, 2002.
- [24] Fischer, G. a. L., V.C. , "Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions", ACI Structural, vol. 99, pp. 781-790, 2002.
- [25] Kim, Y. Y., Fischer, G. and Li, "Performance of bridge deck link slabs designed with ductile ECC", ACI Structural, vol. 1 , pp. 792-801, 2004.
- [26] ShuTing Liang, X. Z., ChongFang Sun, ZhengXing Guo, "Seismic behavior of precast concrete coupled shear walls with engineered cementitious composite (ECC) in the critical cast-in-place regions", Science China Technological Sciences, vol. 60, pp. 1244-1254, 2017.
- [27] Fukuyama, H., Matzuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H., "Structural performance of engineered cementitious composite elements," presented at the Composite and Hybrid Structures, 6th ASCCS Int'l Conf. on Steel-Concrete Composite Structures, 2000.
- [28] Parra-Montesinos, G. a. W., J.K. , "Seismic response of exterior RC column-tosteel beam connections", ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 126, pp. 1113-1121, 2000.
- [29] Kesner, K. E. a. B., S.L. , "Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit", ASCE Journal of Structural Engineering International, vol. 131, pp. 712-720, 2005.