تحقیقات بتن
سال هفتم، شمارهٔ اوّل
بهار و تابستان ۹۳
ص ۶۹-۵۵
تاریخ دریافت: ۱۰ /۹۳/۹
تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح خود متراکم با مقاومت بالا

امید رضایی فر
استادیار دانشگاه سمنان
امیر قدس [G]
دانشجو دکتری مهندسی سازه دانشگاه سمنان
محمد سعید کریمی
استادیار دانشگاه سمنان

چکیده:
در این تحقیق تأثیر بتن SCC با مقاومت بالا بر رفتار برشی، ممان ترک‌خوردگی و نحوهٔ ترک‌خوردگی تیرهای بتن مسلح مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای اصلی آزمایش نوع بتن، فاصله خاموت‌ها و تغییرات مقاومت بتن است. بدین منظور ۹ عدد تیر مورد آزمایش قرار گرفتند که تعداد ۳ عدد از تیرها دارای بتن معمولی با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال و ۶ عدد از آنها دارای بتن SCC مقاومت بالا با مقاومت های ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال بودند. برای هر کدام از گروهها از فواصل خاموت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ میلی‌متر استفاده شده است. تیرهای آزمایشی بر روی تکیه‌گاه های ساده و توسط دو بار متمرکز تحت بارگذاری قرار گرفتند. تحقیقات نشان می دهد که استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی، منجر به افزایش سختی، کاهش تغییر مکان‌ها و افزایش مقاومت برشی نهائی تیرها می‌گردد. الگوها و مدل‌های ترک‌خوردگی تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا در بار نهایی مشابه بودند. همچنین کاهش فاصلهٔ خاموت‌ها در دهانه برشی منجر به افزایش شکل پذیری و بار گسیختگی در کلیه تیرها گردید.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، پودر سنگ آهک، پودر میکرو سیلیس، جعبه L-BOX، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، لنگر ترک‌خوردگی، مقاومت برشی نهایی.

* نویسنده مسئول:Amir.ghods83@gmail.com

۱- مقدمه

توسعه بتن خود متراکم (SCC) یک موفقیت مطلوب در صنعت ساخت به منظور غلبه کردن بر مشکلات مربوط به بتن ریزی است. بتن خود متراکم توسط پارامترهایی از قبیل کارگران ماهر، شکل و میزان میلگردها یا آرایش یک سازه تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و به دلیل روانی بالای آن و مقاومت در مقابل جدا شدگی می تواند مسافت های خیلی طولانی پمپاژ شود. مفهوم بتن خود متراکم درسال ۱۹۸۶ به‌وسیله پروفسور هاجیمه اکامورا پیشنهاد شد، اما نخستین نمونه در ابتدا در سال ۱۹۸۸ در ژاپن توسط پروفسور ازاوا در دانشگاه توکیو ساخته شد و از آن هنگام، تحقیقات گوناگونی انجام شده است.

بتن خود متراکم، در حال حاضر می‌تواند به‌عنوان یک مصالح ساختمانی پیشرفته، طبقه بندی شود، همان‌طوری که از نام آن پیداست، لازم نیست برای رسیدن به حالت متراکم ویبره شود.

این بتن دارای مزایا و منافع زیادی نسبت به بتن معمولی می‌باشدکه به‌عنوان مثال می‌توان به بهبود کیفیت بتن، کاهش تعمیرات در محل، دوره‌های سریع‌تر ساخت، هزینه‌های کلی پایین تر و تسهیل فرآیند اتوماسیون در ساخت بتن اشاره کرد. همچنین باعث بهبود کلی شرایط بهداشتی و ایمنی به علت حذف استفاده از ویبراتورها و یک کاهش اساسی در میزان سر و صدای محیطی در اطراف کارگاه می‌شود. ترکیب مخلوط‌های بتنی SCC شامل نسبت های قابل توجهی از مصالح غیر آلی ریزدانه را شامل می‌شود که کاربرد مواد افزودنی را که به‌عنوان فرآورده‌های زاید و پسمانده در نظر گرفته شدند و هیچ‌گونه کاربرد عملی ندارند و همچنین هزینه های تخلیه و دفع آنها بسیار زیاد است را ممکن می سازد [۱].

کار تجربی در تحقیق حاضر شامل آزمایش تیرهای بتن مسلح ساخته شده از مخلوط‌های بتنی معمولی و SCC با مقاومت بالا است.

برنامهٔ آزمایش شامل ۹ عدد تیر است که ۳ عدد از این تیرها از مخلوط‌های بتن معمولی با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال و ۶ عدد دیگر از این تیرها از مخلوط‌های بتن SCC با مقاومت بالا با مقاومت‌های ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال ساخته شدند. در هر یک از گروه‌ها از فواصل خاموت گذاری ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ میلی‌متر استفاده شد. پس از ۲۸ روز، روی این تیرها آزمایش بارگذاری انجام شد تا زمانی که منجر به گسیختگی برشی در تیرها شد. پس از انجام آزمایش از آزمایش‌ها برای تیرهای معمولی و SCC با مقاومت بالا مقایسه صورت گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- خواص مصالح

سه مخلوط بتنی در این تحقیق مورد آزمایش قرارگرفتند: یک بتن معمولی با مقاومت مشخصه مکعبی ۴۰MPa و دو مخلوط بتن SCC مقاومت بالا با مقاومت مشخصه مکعبی ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال.

شن مصرفی از یک مصالح سنگی شکسته با اندازه ذرات اسمی ۲۰-۶ میلی‌متر و ماسه مصرفی از یک ماسه رودخانه ای شهر آمل با اندازه ذرات اسمی ۶-۰ میلی‌متر انتخاب گردید. شایان ذکر است ماسه مصالحی است که در کل از الک نمره چهار گذشته و روی الک شماره ۱۰۰ می ماند و شن سنگ‌دانه‌هایی است که کلاً روی الک نمره ۴ باقی می ماند. ضمناً، به دلیل وجود سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر در دپوی ماسه، ماسه موجود از الک نمره ۴ عبور داده شد. نسبت وزن مصالح خشک شده در گرمخانه (مصالح فاقد رطوبت جذب شده) به حجم مصالح، معرف وزن مخصوص مصالح می باشد که این مقدار برای ماسه و شن به ترتیب ۲۵۸۰/۱ و ۲۶۴۰/۲ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

در مخلوط‌های SCC مقاومت بالا غالباً مقادیر مصالح پودری بالا به دلیل رسیدن به یک مقدار تسلیم کافی و چسبندگی مخلوط تازه مصرف می‌شود. بنابراین، شیره دهی، جدا شدگی و ته نشینی کاهش می یابد. چون استفاده از مقادیر بالای سیمان هزینه را افزایش می دهد و منجر به بالا رفتن حرارت هیدراسیون می‌شود، لذا معمولاً مصالح سیمانی دیگری از قبیل پودرسنگ آهک (LSP)، سرباره آهنگدازی (GGBS) و خاکستر زغال سنگ (Fly Ash) بجای سیمان در مخلوط‌های گوناگون SCC استفاده می‌شود [۲]. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا ساخته شده در این تحقیق با سیمان پرتلند نوع دو، پودرسنگ آهک (LSP) و پودر میکرو سیلیس به‌عنوان پرکننده تهیه گردیدند و مخلوط‌های بتن معمولی فقط از سیمان پرتلند نوع دو استفاده کردند.

یکی از فرآورده‌های جدید فوق روان کننده بنام Viscocrete.1

که بر پایه کوپلیمر طراحی شده (پلی کربوکسیلیک اصلاح شده) برای مخلوط‌های SCC مقاومت بالا استفاده گردید.

۲-۲- معرفی ویژگی‌های نمونه‌ها

جهت سهولت در تشخیص مربوط به تیرها، از حروف اختصاری استفاده می‌شود که در این قسمت به توضیح آن‌ها می پردازیم. تیرهایی که بتن آن‌ها از نوع معمولی است با علامت NC و تیرهایی که بتن آن‌ها ازنوع SCC با مقاومتی ۶۰ مگا پاسکال می‌باشد با علامت SCC60 و تیرهایی که بتن آن‌ها از نوع SCC با رده مقاومتی ۸۰ مگا پاسکال می باشد، با علامت SCC80 نشان داده می‌شود. عددی که بعد از S نشان داده می‌شود نشان‌دهنده فاصله خاموت‌ها در طول دهانه برشی تیرها می باشد.

۲-۳- نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های SCC مقاومت بالا و بتن معمولی

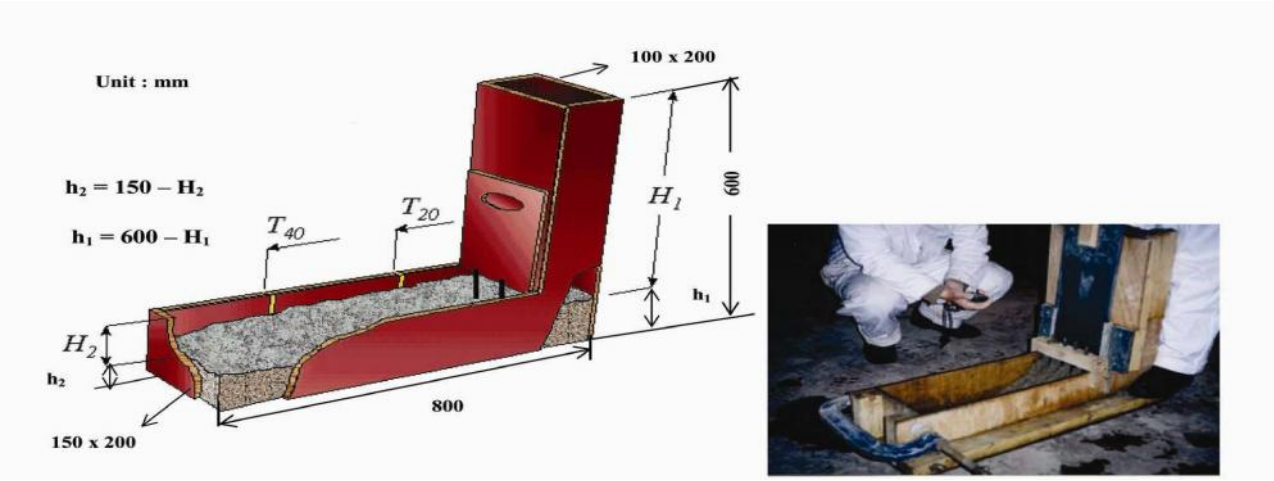
نسبت های اختلاط مخلوط‌های SCC مقاومت بالا استفاده شده در این تحقیق با آزمایش مخلوط‌ها و بر پایه گزارش های جامع از پروژه‌های مختلف تعیین گردیدند. نسبت های اختلاط مخلوط‌های NC و SCC60 و SCC80 در یک متر مکعب در جدول (۱) نشان داده می‌شوند. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا حاوی پودر سنگ آهک و پودر میکرو سیلیس بودند که روانی و چسبندگی و محدودیت تولید گرما را افزایش می‌دهند. عموماً چنین مصالحی واکنش کمتری نسبت به سیمان دارند و می توانند مشکلات حاصله از افت روانی بتن پر سیمان را کاهش دهند[۳].

جدول ۱- نسبت های اختلاط مخلوط‌های SCC و بتن معمولی

نسبت های اختلاط (kg/m^3)	مقادیر اجزای تشکیل دهنده بتن‌های مختلف (kg/m^3)		
	NC	SCC۶۰	SCC۸۰
سیمان	۴۵۰	۴۵۰	۴۹۵
پودرمیکروسیلیس	ــــ	۵۰	۵۵
پودرسنگ آهک	ــــ	۱۵۰	۱۶۵
شن بااندازه ذرات اسمی ۲۰ـ۶ میلی‌متر	۱۰۰۲/۵	۸۶۲/۵	۸۱۷/۹
ماسه بااندازه ذرات اسمی ۶- ۰ میلی‌متر	۶۹۳/۵	۶۶۳/۵	۶۲۹/۱
آب مؤثر	۲۰۴	۱۶۵	۱۷۷
فوق روان کننده (Viscocrete 1)	ــــ	۹	۱۱
نسبت آب مؤثربه سیمان	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۶
نسبت آب مؤثر به پودر	ــــ	۰/۲۶	۰/۲۵

۲-۴- روش‌های آزمایش برای بررسی خواص بتن تازه SCC

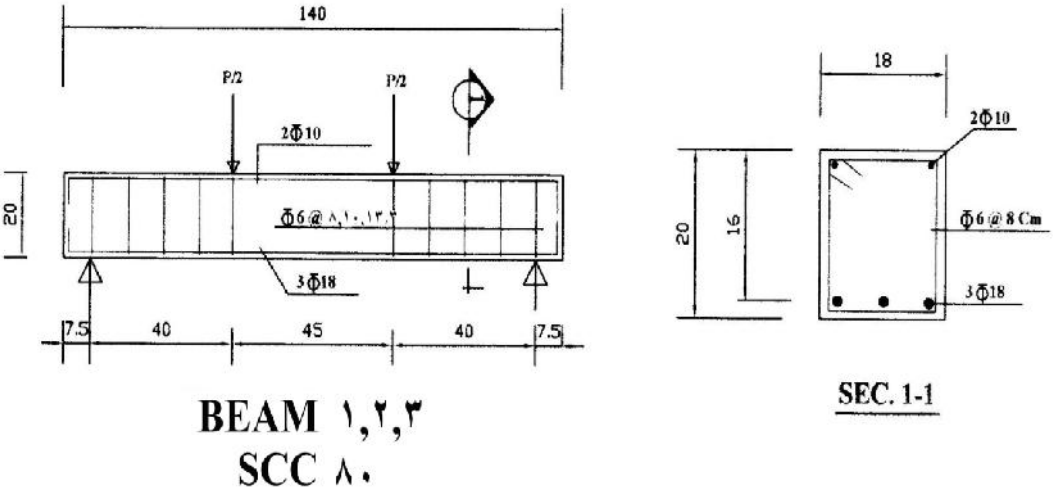
روش‌های آزمایش استفاده شده برای بررسی خواص تازه SCC، روانی اسلامپ، جعبه L شکل می باشد. آزمایش اسلامپ شامل تعیین قطر متوسط نمونه بتنی پخش شده روی یک صفحه ستون پس از انجام آزمایش اسلامپ بدون هیچ تراکمی می باشد. این آزمایش قابلیت تغییر شکل بتن را تحت اثر وزن خود در مقابل اصطکاک سطح صفحه ستون بدون وجود هیچ نیروی خارجی مورد بررسی قرار می دهد. به خاطر طبیعت لزج SCC، اندازه‌گیری جریان اسلامپ زمانی انجام شد که جابجایی قابل تشخیص زیادی از بتن مشاهده نشد. در این آزمایش، زمان T50 نیز اندازه‌گیری شد، T50 زمان رسیدن به پخش افقی ۵۰۰ میلی‌متر روی صفحه ستون می باشد. اندازه های جعبه L شکل استفاده شده در شکل (۱) نشان داده شده است. ممکن است اندازه‌گیری خواص مختلف از قبیل قابلیت‌های پر کردن و جا گرفتن و جدا شدگی سنگدانه ها با جعبه L شکل انجام شود. قسمت قائم جعبه با ۱۲/۷ لیتر بتن پر می‌شود و برای یک دقیقه به همان حال رها می‌شود که اجازه داده شود جدا شدگی در سنگدانه‌ها اتفاق بیفتد. پس از آن دریچه باز می‌شود و بتن از قسمت قائم جعبه به قسمت افقی و از بین میلگردها وارد می‌شود. ارتفاعات H1 و H2 بتن اندازه‌گیری شد و برای تعیین h_2/h_1 جعبه L شکل به‌کار می رود [۲].



شکل ۱-آزمایش جعبه L-BOX

۲-۵- طرح سازه‌ای تیرها در ابعاد واقعی

در این بررسی به تعداد ۹ عدد تیر با ابعاد یکسان مورد آزمایش بارگذاری قرار گرفتند. طول کلیه تیرها ۱۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که بر روی تکیه‌گاه‌هایی با دهانه ۱۲۵ سانتی‌متر (L=۱۲۵cm) مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند. عرض مقطع این تیرها ۱۸ سانتی‌متر (b=۱۸cm) و ارتفاع مقطع ۲۰ سانتی‌متر (h=۲۰cm)، عمق مؤثر ۱۶ سانتی‌متر (d=۱۶cm) و نسبت طول دهانه برشی به عمق مؤثر ۲/۵ (a/d=۲/۵) انتخاب گردید.(مود خمشی و برشی ترکیبی) مشخصات هندسی یکسان تیرها نسبت به بارهای وارده و نحوه آرایش میلگردها در شکل (۲) نشان داده شده است. برای هر رده ۴۰، ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال تعداد ۳ عدد تیر در نظر گرفته شد. تیرهای ساخته شده از بتن معمولی با سه میلگرد ۱۶ برای ناحیه کششی و ۲ میلگرد ۱۰ برای ناحیه فشاری مسلح شدند و تیرهای ساخته شده از SCC با مقاومت بالا دارای مقاومت های ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال، به ترتیب هر کدام با سه میلیگرد ۱۶ و ۱۸ برای ناحیه کششی (ρ=۰/۰۲۱) ۲ میلگرد ۱۰ برای ناحیه فشاری مسلح شدند.



شکل ۲- مشخصات هندسی تیرها نسبت به بارهای وارده و نحوه آرایش میلگردها

هر کدام از این گروه‌ها در طول دهانه برشی با استفاده از میلگردهای به قطر 6mm به فواصل ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ میلی‌متر خاموت گذاری گردیدند.

۲-۶- روش آزمایش تیرها

آزمایش کلیه تیرها پس از گذشت ۲۸ روز از تاریخ بتن‌ریزی انجام گرفت. قبل از اعمال بار بر روی تیرها، برای مشخص شدن مسیر ترک‌ها که بر اثر اعمال بار به وجود می‌آیند، سطح تیر با رنگ سفید پوشانده شده و پس از آن، محل دقیق اعمال بار، محل تکیه‌گاه‌ها، محل قرارگیری خیزسنج در مرکز تیر و نقاط مربوط به سنجش کرنش‌ها به‌طور دقیق تعیین و علامت‌گذاری شد . پس از قرار دادن تیر بر روی تکیه‌گاه‌ها، از موقعیت صحیح تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال بار و تراز بودن تیر و تکیه‌گاه‌ها اطمینان حاصل می‌شود. شکل (۳) طرح کلی دستگاه بارگذاری و شکل (۴) شکل مدل سازی شده تیر را همراه با موقعیت اعمال بار و دکمه‌های سنجش کرنش را نشان می‌دهد که بر روی میلگرد کششی و فشاری و در ناحیه بتن فشاری جهت انجام صحت ازمایش نصب گردید. همان‌طوری که مشاهده می شود، بار کل به‌وسیله یک تیر فولاد صلب به صورت دو بار متمرکز به صورت مرحله به مرحله (۱ تن)به تیرها وارد گردید و سلول بار کالیبره شده بین جک و تیر فولادی قرار دارد.

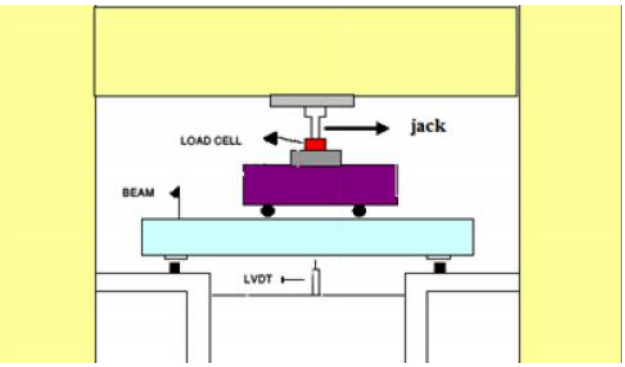
لازم به ذکر است که وقتی از بار گسیختگی صبحت می‌شود، منظور همان بار کل وارده از سلول بار است که ابتدا به تیر فولادی صلب وارد شده و از طریق آن به صورت دو بار متمرکز و متقارن به تیر بتنی وارد می‌گردد. کرنش سنج های B و C به ترتیب در نواحی دهانه های برشی سمت چپ و راست تیرها قرار گرفتند.

۳- نتایج حاصل از آزمایش

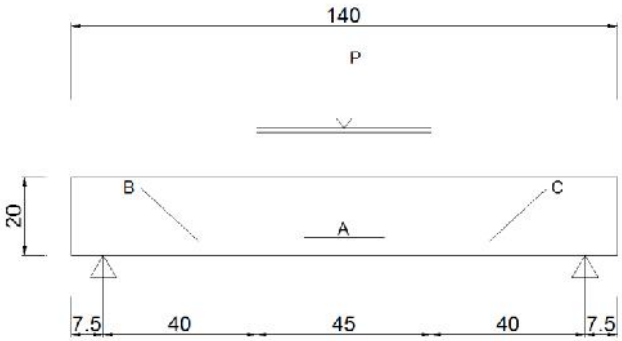
۳-۱- نتایج آزمایش‌ها روی بتن تازه مخلوط‌های SCC

برای کنترل طرح اختلاط و اهداف پذیرش لازم بود. روانی اسلامپ و L-box برای آزمایش کارایی SCC مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج آزمایش‌ها خواص تازه مخلوط‌های SCC مقاومت بالا و NC در جدول (۲) نشان داده شده است. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا روانی و کارایی بیشتری نسبت به مخلوط‌های بتن معمولی داشتند. مخلوط‌های بتن معمولی به‌وسیله آزمایش اسلامپ معمولی مورد سنجش قرار گرفته‌اند و خواص تازه آن‌ها قابل مقایسه با همان خواص در SCC نمی باشد. به‌طوری که، تفاوت اساسی خواص مخلوط‌های SCC آن‌ها را مجاب می‌سازد که قابلیت روانی و کارایی بالایی داشته باشند. نسبت حجم درشت دانه در مخلوط‌های مرجع بطور قابل توجهی بالاتر از مخلوط‌های SCC هست. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا طوری طراحی شدند که فیلر بیشتری داشته باشند. مخلوط‌های SCCهمچنین شامل ملات بیشتر و درشت دانه کمتر می باشند که این در افزایش کارایی مؤثر است. با این حال، افزایش در قابلیت روانی به‌شدت تحت اثر فوق‌روان‌کننده Viscocrete1 می‌باشد.



شکل ۳ - طرح کلی دستگاه بارگذاری



شکل ۴- نحوه اعمال نیرو بر تیرهای آزمایش و کرنش سنج‌ها

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها بر روی بتن تازه

آزمایش‌ها	گروه	NC	SCC۶۰	SCC۸۰
روانی اسلامپ	روانی اسلامپ (mm)	۸۳	۶۸۰	۷۱۰
	T50 (Sec)	_____	۳	۴
جعبه L شکل	نسبت h2/h1	_____	۰/۹۵	۱

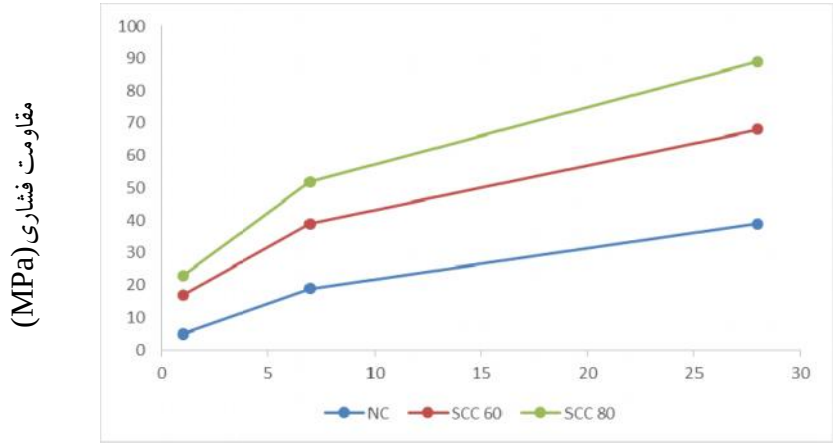
مقادیر روانی اسلامپ مخلوط‌های SCC مقاومت بالا به ترتیب برابر با ۶۸۰ و ۷۱۰ میلی‌متر بود. همچنین مقادیر T50 مخلوط‌های SCC مقاومت بالا به ترتیب ۳ و ۴ ثانیه قرار داشت. نتایج جعبه L شکل مخلوط‌های SCC مقاومت بالا قابلیت تغییر شکل و روانی مناسبی را نشان داد و نسبت انسداد h2/h1 بزرگتر از ۰/۸ بوده که مقدار ۰/۸ اغلب به‌عنوان حد بحرانی کوچکتر در نظر گرفته می‌شود [۲]. نسبت مقادیر برای مخلوط‌های SCC مقاومت بالا نزدیک به یک بود. این مقدار بالا قابلیت تغییر شکل بدون انسداد را در میان موانع نزدیک به هم (میلگردها) و قابلیت روانی بالای بتن SCC را نشان داد.

۳-۲- بررسی رفتار مقاومت فشاری

نمونه‌های مقاومت فشاری مکعبی با ابعاد ۱۰۰mm ×۱۰۰×۱۰۰ پس از گذشت یک روز قالب برداری شدند و سپس نمونه‌ها در آب بعمل آورده شدند تا زمانی که آزمایش ۱، ۷ و ۲۸ روزه انجام بشود. در شکل (۵) افزایش مقاومت تا ۲۸ روز برای مخلوط‌های بتنی SCC مقاومت بالاو معمولی نشان داده شده است و نسبت های افزایش نسبی مقاومت تا مقاومت های ۲۸ روز در شکل (۶) قابل مشاهده است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می‌دهندکه مقاومت های واقعی بتن‌های SCC بالاتر از مقاومت های مشخصه طراحی بودند، در حالی که مخلوط‌های بتن معمولی در محدوده طراحی قرار دارند. همان‌طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری به شدت به وسیله نسبت آب به سیمان و فیلر مورد استفاده (پودرسنگ آهک و میکروسیلیس) تحت تأثیر بودند به‌طوری‌که مخلوط‌های SCC با مقاومت بالا در سنین اولیه دارای مقاومت بالایی بودند که این امر می‌تواند به دلیل اثر تسریع کنندگی پودرسنگ آهک بر روی هیدراسیون سیمان باشد [۲]. نتایج موجود در شکل (۶) نشان می‌دهند که اختلاف قابل‌توجهی در نمودار افزایش رشد مقاومت در هیچ یک از مخلوط‌های مورد مطالعه وجود ندارد.

۳-۳- بررسی رفتار مقاومت کششی غیر مستقیم

مقاومت کششی غیر مستقیم در ۲۸ روز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰mm و طول ۲۰۰mm انجام شد و نمونه‌ها



زمان(روز)

شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش

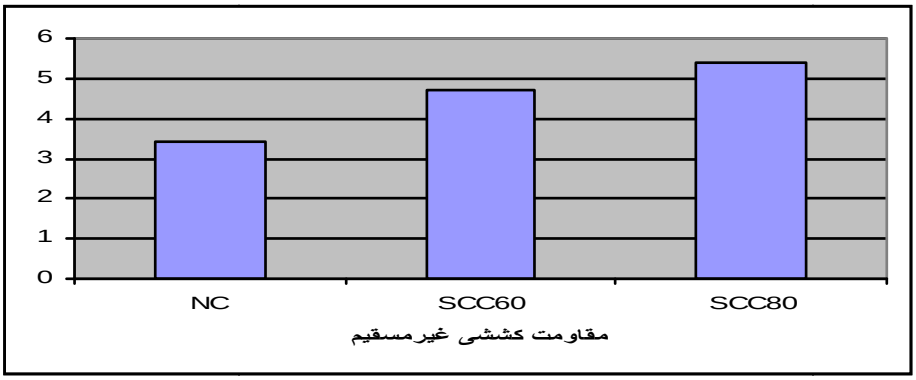
در آب تا زمانی که تاریخ آزمایش به اتمام رسید، به عمل آورده شد. مقایسه مقاومت‌های کششی غیر مستقیم ۲۸ روزه مخلوط‌های با مقاومت بالا و بتن معمولی در شکل (۷) نشان داده شده است. ملاحظه گردید که مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن NC بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ارتباط مقاومت فشاری با مقاومت کششی غیر مستقیم در مورد مخلوط‌های SCC مقاومت بالا و بتن معمولی تقریباً مشابه است.

۳- ۴- رابطهٔ بار- خیز

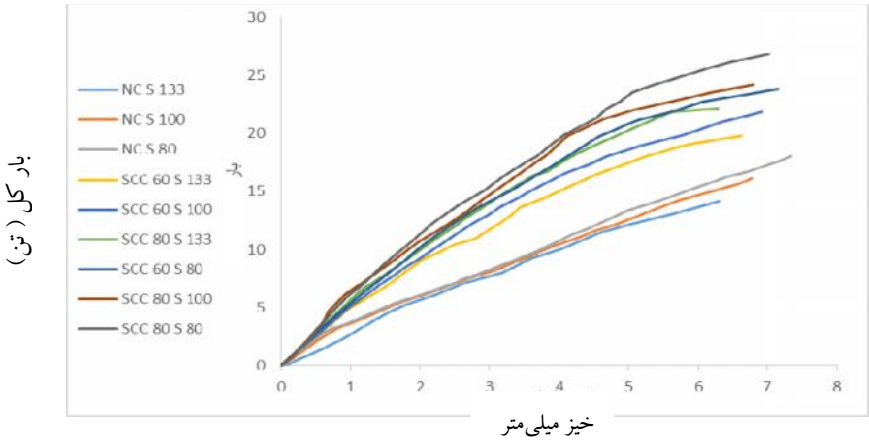
با ترسیم منحنی های تجربی بار- خیز، می توانیم سختی، تغییر مکان و تغییر شکل تیرها را مورد ارزیابی قرار دهیم. این منحنی‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است.

در ابتدا کلیه تیرها ترک نخورده و سالم بودند. با افزایش بارگذاری ترک در وسط دهانه اتفاق می‌افتد. شکل (۸) تأثیر استفاده از بتن SCC با مقاومت بالا روی واکنش‌های بار- خیز تیرها نسبت به بتن معمولی NC در فواصل خاموت گذاری متناظر نشان می‌دهند.

در شکل بالا مشاهده می‌شودکه استفاده از بتن SCC مقاومت بالا منجر به افزایش شیب منحنی های بار- خیز تیرها در مقایسه با بتن معمولی می گردد. تیرهای SCC مقاومت بالا دارای سختی بیشتر و تغییر مکان‌های کمتری در مقایسه با تیرهای بتن معمولی تحت بارگذاری یکسان می باشند (این امر مبین قابلیت جذب انرژی بیشتر تیرهای SCC مقاومت بالا در مقایسه با تیرهای بتن معمولی است). در منحنی‌های بار- خیز تیرهای SCC مقاومت بالا، در موقعیت انتهای حد خطی شکست قابل‌توجهی بوجود می‌آید. در تیر SCC80 به فاصله خاموت ۸۰ میلی‌متر علاوه بر افزایش مقاومت، می‌توان به سختی و قابلیت جذب انرژی بیشتر دست پیدا کرد. از سوی دیگر، تیر بتن معمولی با فاصله خاموت ۱۳۳ میلی‌متر دارای کمترین سختی در میان تیرهای مورد آزمایش است.



شکل ۷- مقاومت کششی غیر مستقیم (شکاف خوردگی) مخلوط‌های SCC و معمولی



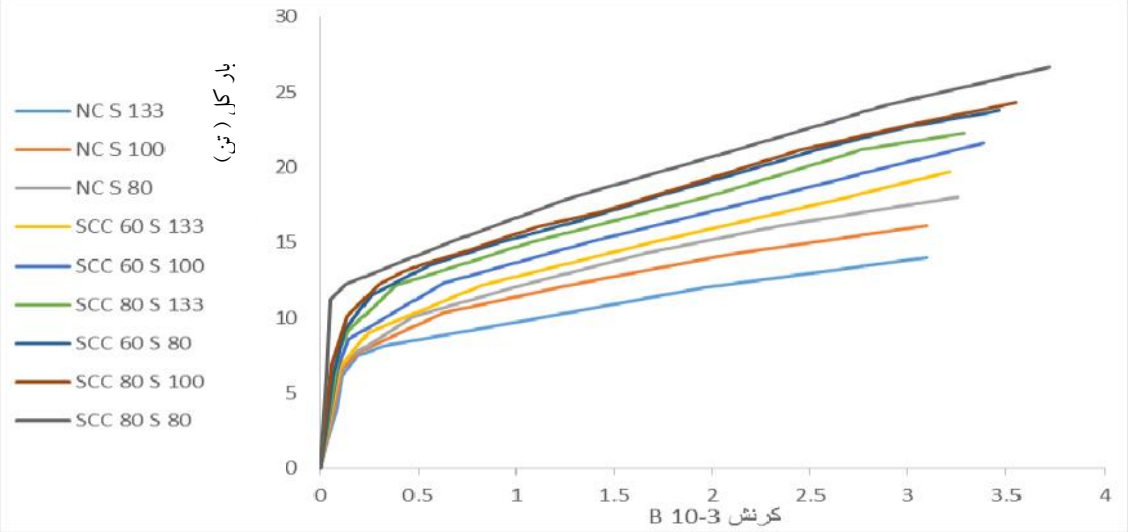
شکل ۸- منحنی تجربی بار- خیز تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا

همان‌طور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان می‌دهند که کاهش فاصله خاموت‌ها در هر یک از گروه‌ها منجر به افزایش شیب منحنی‌های بار- خیز تیرها می‌گردد. این امر مبین این است که کاهش فاصله خاموت‌ها سبب افزایش سختی و کاهش تغییر مکان‌های تیرها تحت بارگذاری یکسان می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند که کاهش فاصله خاموت‌ها در هر یک از گروه‌های آزمایشی منجر به مقیدتر کردن پیشرفت ترک‌خوردگی مایل و شکل‌پذیری بیشتر تیرها می‌شوند.

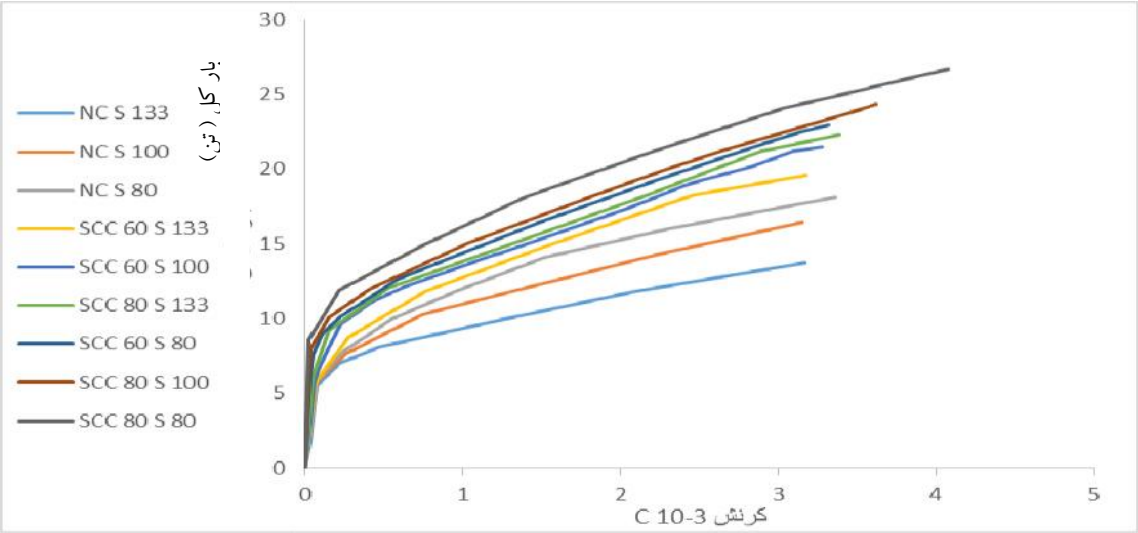
۳-۵- بررسی رفتار بار-کرنش B و C

کرنش سنج‌های B و C به منظور بررسی تأثیر نوع بتن، فاصله خاموت‌ها و مقاومت بتن بر بازشدگی ترک‌های قطری، با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کرنش سنج‌های مزبور کاملاً در نواحی برشی قرار داشتند، تأثیر استفاده از بتن SCC مقاومت بالا، فاصله خاموت‌ها و مقاومت بتن بر مقادیر ثبت‌شده از آنها نسبتاً قابل توجه است.

شکل (۹ و ۱۰) تأثیر استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی روی واکنش‌های بار- کرنش B و C تیرها در هر یک از فواصل خاموت گذاری متناظر نشان می‌دهند.



شکل ۹- منحنی‌های بار- کرنش B تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا



شکل ۱۰- منحنی‌های بار- کرنش C تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا

ملاحظه می‌شود کلیه تیرهای SCC مقاومت بالا و بتن معمولی رفتار مشابه‌ای را در واکنش‌های بار- کرنش B و C نشان می‌دهند. در منحنی‌های بار- کرنش B و C مشاهده می‌شود که کلیه تیرها در ابتدای بارگذاری، از نظر سختی اولیه رفتاری مشابه دارند. با افزایش بارگذاری، شکست قابل توجهی در منحنی‌های بار- کرنش B و C اتفاق می‌افتد که این امر نشان دهنده بازشدگی ترک‌های قطری تشکیل‌شده در دهانه های برشی است. ملاحظه می‌شود این شکست در تیرهای SCC مقاومت بالا به دلیل سختی و مقاومت فشاری بالاتر، دیرتر اتفاق می‌افتد. پس از تشکیل ترک‌های قطری، میلگردهای برشی شروع به کارکردند و مقاومت برشی را از طریق انتقال مستقیم نیروی برشی افزایش دادند و از توسعه ترک‌های قطری جلوگیری کردند و در ادامه ترک‌های قطری به سمت ناحیه فشاری گسترش یافتند. در نهایت با تسلیم میلگردهای برشی، قسمت بالای تیر به دلیل ترکیب تنش‌های برشی و فشاری شکسته شد.(با قرایت کرنش سنج های تعبیه شده در محل مورد نظر)

با مقایسه کلی منحنی‌های بار- کرنش تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا در فواصل خاموت گذاری متناظر ملاحظه می‌شود که تیرهای SCC مقاومت بالا به دلیل مقاومت فشاری و سختی بیشتر، شیب بیشتری در منحنی‌های بار - کرنش B و C نسبت به تیرهای بتن معمولی نشان می‌دهند. در شرایط بارگذاری یکسان، ترک‌های قطری تشکیل‌شده در تیر SCC80 با فاصله خاموت ۸۰ میلی‌متر، دارای کمترین عرض نسبت به تیرهای دیگر است؛ بنابراین، استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در تیرها سبب کاهش کرنش‌های B و C در مقایسه با تیرهای بتن معمولی در فواصل خاموت گذاری متناظر می‌شود.

۳-۶- رفتار ترک‌خوردگی و الگوی ترک‌ها

کلیه نمونه‌های تیر در برش گسیخته شدند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی، روی زمان تشکیل اولین ترک‌خوردگی (برشی و خمشی) و عملکرد بهتر بهره‌برداری تیرها در بارهای سرویس تأثیر دارد. مقادیر موجود در جدول (۳)، بار و لنگر ترک‌خوردگی متوسط در هر یک از گروه‌های مورد آزمایش در این تحقیق را نشان می‌دهند.

برای کلیه تیرها، در بارهای کم، وقتی که تنش کششی در بتن از مقاومت کششی (مدول گسیختگی) کمتر است تمام مقطع بتنی در مقابله با لنگر خمش مؤثر است. با افزایش تدریجی بار وارد بر تیرها، ترک‌خوردگی در دهانه خمشی عمدتاً از ترک‌های قائم عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر که به سبب لنگر خالص است، تشکیل می‌شوند. ترک‌خوردگی بیرون منطقه خمش خالص با ترک‌خوردگی خمشی شروع شد، اما هر قدر که بار افزایش می‌یافت ترک‌های دیگری تشکیل شدند و هر قدر تنش‌های برشی بزرگ‌تر شدند، ترک‌ها بیشتر به صورت ترک‌های قطری نمایان شدند. پس از آن، ترک‌خوردگی به سمت مجاورت نقاط بارگذاری در وجه فشاری تیرها پیش رفتند تا اینکه این ترک‌های ممتد برشی سبب گسیختگی تیرها شدند.

با مقایسه رفتار ترک‌خوردگی در تیرهای مورد آزمایش نتیجه می‌شود که الگوها و نمونه‌های ترک‌خوردگی در کلیه تیرها تحت بار نهایی مشابه‌اند. در تیرهای **SCC** مقاومت بالا، تعداد ترک‌خوردگی برشی بیشتری نسبت به تیرهای بتن معمولی وجود داشت. از این رو، استفاده از بتن‌های **SCC** با مقاومت بالا در تیرها منجر به عملکرد بهتر در بهره‌برداری و شروع اولین ترک برشی و خمشی و کاهش عرض ترک تحت بارگذاری یکسان می‌گردد. نحوه ترک‌خوردگی در تیرهای مورد مطالعه تحت اثر بار نهایی برشی در شکل‌های (۱۱) الی (۱۹) نشان داده شده است.

جدول ۳- بار و لنگر ترک‌خوردگی متوسط هر یک از گروه‌ها

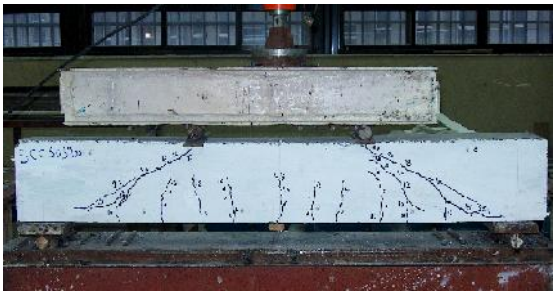
گروه	بار ترک‌خوردگی (Ton)	لنگر ترک‌خوردگی (Ton)
NC	۲/۸۵	۰/۵۷
SCC۶۰	۳/۸۵	۰/۷۶
SCC۸۰	۴/۴۵	۰/۸۸

شکل ۱۱ - نحوه ترک‌خوردگی آزمایش تیر NCS80

شکل ۱۲- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر NCS100

شکل ۱۳- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش NCS133

شکل ۱۴- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC60S80



شکل ۱۵- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC60S100

شکل ۱۶- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC60S133

شکل ۱۷- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC80S80

شکل ۱۸- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC80S100

شکل ۱۹- نحوه ترک‌خوردگی و آزمایش تیر SCC80S133

۳-۷- لنگر ترک‌خوردگی

با افزایش تدریجی بار وارد بر تیر از مقدار صفر تا مقداری که باعث خرابی تیر گردد، مراحل مختلفی از رفتار تیر قابل تشخیص است. در بارهای کم، وقتی که تنش کششی در بتن از مقاومت کششی (مدول گسیختگی) کمتر است. در این حالت، هر دو مصالح بتن و فولاد به صورت کِشسان (خطی) و یا نزدیک به آن رفتارمی کنند و در این وضعیت، تغییرات کرنش در ارتفاع تیر خطی است و هر دو مصالح بتن و فولاد از قانون هوک پیروی می‌کنند (تنش متناسب با کرنش است). با افزایش بیشتر بار، بتن به مقاومت کششی خود می‌رسد و در این مرحله ترک‌های کششی در نواحی کششی تشکیل می‌شود. بالأخره با افزایش بیشتر بار، ظرفیت نهایی برشی تیر فرا می‌رسد.

با توجه به فرضیات مربوط به تحلیل کِشسان مقطع، برای محاسبه تنش در فولاد و بتن، از ایده مقطع تبدیل یافته استفاده می‌شود. مقطع تبدیل یافته از کل مقطع بتنی و n برابر سطح مقطع فولاد تشکیل می‌یابد. n نسبت ضریب الاستیسیته فولاد به بتن است که به عنوان نسبت مدولی نامیده می‌شود ($n= E_S/E_C$)[۵].

لنگر ترک‌خوردگی تئوریک از فرمول خمش تیرهای همگن به دست می‌آید:

$$M_{cr}= \frac{frI}{y'} \qquad (۱)$$

که در آن:

fr: مدول گسیختگی بتن است و تنش کششی بتن به مدول گسیختگی fr محدود می‌شود.

I: ممان اینرسی مؤثر مقطع است که مساوی ممان اینرسی مقطع ترک نخورده تبدیل یافته است.

y': فاصله لایه کششی انتهایی مقطع تا مرکز سطح است [۵].

در محاسبات عملی، ممان اینرسی مقطع ترک نخورده را می‌توان با دقت خوب مساوی ممان اینرسی مقطع کلی بتنی یعنی Ig فرض نمود. در نتیجه لنگر ترک‌خوردگی در کارهای عملی طبق آیین‌نامهٔ بتن ایران به جای رابطهٔ (۱) رابطهٔ ساده‌تر زیر پیشنهاد شده است:.(البته در کارهای پژوهشی که نیازمند دقت بالاتر می‌باشند توصیه نمی شود.)

$$M_{cr} = \frac{frIg}{yt} \qquad (۲)$$

مدول گسیختگی بتن (مقاومت کششی خمشی بتن) در روابط فوق با استفاده از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:(رابطهٔ ۹-۱۷-۳)

$$f_r = 0.6\sqrt{fc} \qquad (۳)$$

که در آن:

fc: مقاومت مشخصه فشاری بتن (نیوتن بر میلی‌متر مربع)

fr: مدول گسیختگی بتن (مقاومت کششی خمشی بتن)

yt: فاصله تار خارجی کششی تا محور خنثی کل مقطع بتنی (میلی‌متر) است [۵].

آیین‌نامهٔ ACI 318-05 مدول گسیختگی بتن با وزن معمولی را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند:

$$f_r = 2\sqrt{f'c} \qquad (۴)$$

که در آن $f'c$ مقاومت فشاری مشخصه بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [4].

نتایج تجربی و تئوریک لنگرها در ابتدای ترک‌خوردگی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴) نشان می‌دهد که پیش‌بینی آیین‌نامهٔ بتن ایران و ACI 318-05 در برآورد لنگر ترک‌خوردگی در هر یک از گروه‌های آزمایشی NC و SCC مقاومت بالا نسبت به نتایج تجربی محافظه کارانه است. ملاحظه می‌شود که این اختلاف در مورد تیرهای بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است.

آیین‌نامهٔ ACI 318-05 رابطهٔ دیگری را برای بتن‌های با مقاومت بالا پیشنهاد می‌کند که به صورت زیر است:

$$f_r = 2.97\sqrt{f'c} \qquad (۵)$$

که در رابطهٔ بالا f'_c مقاومت مشخصه بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [4]. در جدول (۵) ممان ترک‌خوردگی حاصل از رابطهٔ (۵) برای مقایسه با لنگر ترک‌خوردگی به دست آمده از آزمایش‌های تیرهای SCC مقاومت بالا نشان داده شده است.

پیش‌بینی آیین‌نامهٔ ACI 318-05 در برآورد ممان ترک‌خوردگی تیرهای ساخته‌شده از بتن مقاومت بالا، نتایج نزدیک‌تری را نسبت به سایر روابط استفاده‌شده در تخمین لنگر ترک‌خوردگی تیرهای SCC مقاومت بالا به دست می‌دهد. از این رو، رابطهٔ پیشنهادشده توسط آیین‌نامهٔ ACI 318-05 در تخمین لنگر ترک‌خوردگی بتن مقاومت بالا، می‌تواند برای بتن SCC مقاومت بالا استفاده شود.

۳-۸- مقاومت برشی نهایی

علاوه بر تأمین مقاومت خمشی، تیرهای بتن مسلح باید در مقابل ایجاد ترک‌های کششی قطری که ناشی از ترکیب تنش برشی و تنش قائم خمشی می‌باشند، مقاوم باشند. اغلب تیرهای بتن مسلح در مناطقی که نیروی برشی زیاد است، توسط خاموت‌ها مسلح می‌شوند [۵].

طبق آیین‌نامهٔ بتن ایران، مقاومت برشی تأمین‌شده توسط بتن در اعضای تحت اثر برش و خمش از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_c = v_c\, b_w d \qquad (۶)$$

که در رابطهٔ فوق:

b_w: پهنای جان (میلی‌متر)

جدول ۴- نتایج تئوریک و تجربی لنگر ترک‌خوردگی در هر یک از گروه‌ها

تیرهای گروه آزمایشی	رابطهٔ (۴-۱) و (۴-۴) (t.m)	رابطهٔ (۴-۳) و (۴-۴) (t.m)	آیین‌نامهٔ ACI 318-05 (t.m)	متوسط نتایج آزمایش
NC	۰/۴۲۷	۰/۴۱۴	۰/۴۲۹	۰/۵۷
SCC۶۰	۰/۶۰۸	۰/۵۸۹	۰/۵۹۲	۰/۷۶
SCC۸۰	۰/۷۲۸	۰/۶۴۱	۰/۶۴۳	۰/۸۸

جدول ۵- ممان ترک‌خوردگی تیرهای SCC با مقاومت بالا با استفاده از رابطهٔ (۵)

تیرهای گروه آزمایشی	آیین‌نامهٔ ACI 318-05	متوسط نتایج آزمایش
SCC۶۰	۰/۸۷۸	۰/۷۶
SCC۸۰	۰/۹۵۵	۰/۸۸

d: فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح میلگرد کششی طولی (میلی‌متر)

v_c: تنش برشی قابل‌حمل توسط بتن در حالت نهایی که توسط رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$v_c = 0.2\Phi_c\sqrt{fc} \quad (۷)$$

که در آن، Φ_c ضریب جزئی ایمنی مقاومت بتن است و آیین‌نامهٔ بتن ایران این ضریب را برابر با ۰.۶ پیشنهاد کرده است [۵].

آیین‌نامهٔ ACI 318-05، مقاومت برشی تأمین‌شده توسط بتن در اعضای غیر پیش تنیده را که تنها تحت اثر برش و خمش قرار دارند، به صورت زیر پیشنهاد می‌کند:

$$vc = 0.53\sqrt{f'c}\, b_w d \quad (۸)$$

که در آن f'_c مقاومت فشاری مشخصه بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [4].

آیین‌نامهٔ بتن ایران نیروی برشی مقاوم نهایی میلگردها، v_s، وقتی که میلگرد برشی عمود بر محور عضو بکار برده شود، به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$v_s = \Phi_S A_v f_y \frac{d}{s} \quad (۹)$$

در رابطهٔ فوق، Φ_s، ضریب جزئی ایمنی مقاومت فولاد است که برابر با ۰.۸۵ پیشنهاد کرده است [۵].

آیین‌نامهٔ ACI 318-05، نیروی مقاوم برشی نهایی میلگردهای برشی عمود بر محور عضو را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند [۴]:

$$v_s = A_v f_y \frac{d}{s} \quad (۱۰)$$

در جدول (۶) مقاومت برشی نهایی به دست آمده از روابط استانداردهای بتن ایران، ACI 318-05 و نتایج آزمایش نشان داده شده است:

جدول (۶) نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده توسط روابط آیین‌نامه‌های ایران و ACI 318-05 برای تیرهایSCC مقاومت بالا نسبت به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها محافظه کارانه است (آیین‌نامهٔ ACI 318-05 نتایج نزدیک‌تری را در مقایسه با نتایج آیین‌نامهٔ بتن ایران در محاسبه مقاومت برشی نهایی برشی به دست می‌دهد). این امر می‌تواند به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی و تجارب عملی در مورد بتن‌های خود متراکم با مقاومت بالا توسط این آیین‌نامه‌ها باشد.

جدول ۶– نتایج تئوریک و تجربی مقاومت برشی نهایی تیرهای مورد آزمایش

تیر	مقاومت برشی نهایی به دست آمده از آیین‌نامهٔ بتن ایران (ton)	مقاومت برشی نهایی به دست آمده از آیین‌نامهٔ ACI 318-05 (ton)	مقاومت برشی نهایی حاصل از نتایج آزمایش (ton)
NCS۸۰	۴/۶۵	۵/۸۸	۹
NCS۱۰۰	۴/۱۵	۵/۳۱	۸
NCS۱۳۳	۳/۶۵	۴/۷۵	۷
SCC۶۰S۸۰	۵/۴۷	۶/۹۸	۱۱/۸۵
SCC۶۰S۱۰۰	۴/۹۷	۶/۴۱	۱۰/۷۵
SCC۶۰S۱۳۳	۴/۴۷	۵/۸۵	۹/۶
SCC۸۰S۸۰	۵/۷۸	۷/۳۴	۱۳/۲۵
SCC۸۰S۱۰۰	۵/۲۸	۶/۷۷	۱۲
SCC۸۰S۱۳۳	۴/۷۸	۶/۲۱	۱۱

۴- نتیجه‌گیری

۱- با استفاده از بتن SCC با مقاومت بالا، علاوه بر افزایش مقاومت برشی نهایی در تیرها، به سختی و قابلیت جذب انرژی بیشتری در مقایسه با بتن معمولی می‌توان دست یافت.

۲- با ثابت نگه‌داشتن میلگرد طولی و فاصله خاموت‌ها، استفاده از بتن SCC مقاومت بالا سبب افزایش مقاومت ترک‌خوردگی و مقاومت نهایی برشی تیرها می‌شود. این امر مبین آن است که بتن SCC مقاومت بالا روی زمان تشکیل اولین ترک‌خوردگی تأثیر دارد.

۳- با کاهش فاصله خاموت‌ها، کرنش‌ها و خیزهای تیر تحت بارگذاری یکسان کاهش می‌یابد. در حوزه بارهای سرویس چنین تأثیراتی مؤثرتر و مفیدتر است، زیرا علاوه بر کاهش عرض ترک‌ها، تغییر شکل‌ها و سختی برشی افزایش می‌یابد.

۴- در بار سرویس، ترک‌های بیشتر و عریض تری در تیرها بتن معمولی نسبت به تیرهای بتن با مقاومت بالا در فواصل خاموت گذاری متناظر تحت بارگذاری یکسان وجود دارند که می‌تواند به اختلاف مقاومت فشاری (مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۸/۷ مگا پاسکال در برابر ۷۳.۶ مگا پاسکال) نسبت داده شود.

۵- با مقایسه رفتار ترک‌خوردگی تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا می‌توان مشاهده نمود که الگوها و نمونه‌های ترک‌خوردگی در کلیه تیرها تحت بار نهایی مشابه بود.

۶- پیش‌بینی استاندارد ACI 318-05 در برآورد لنگر ترک‌خوردگی تیرهای ساخته‌شده از بتن مقاومت بالا، برای تیرهای ساخته‌شده از بتن SCC مقاومت بالا نیز می‌تواند استفاده شود.

۵-مراجع

[1]. Okamura, H, “Self-Compacting High-Performance Concrete”, Concrete International, pp.50-54 (1997).

[2]. Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Zhu, W., Gibbs, J., Tamimi, A., “Properties Of Hardened concrete”, Advanced Concrete Masonry Centre, University Of Paisley, Scotland, United Kingdom.

[3]. Pera, Husson, J., S. , Guilhot, B. “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, Cement & Concrete Composites, 1999 (21), 99-105.

[4]. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05 318-02) and commentary (ACI 318-05 318 R-02)

[۵]. طراحی ساختمان‌های بتن مسلح بر مبنای آیین‌نامهٔ بتن ایران (آبا) / شاپور طاحونی - تهران، دانشگاه تهران،موسسه انتشارات و چاپ، ۱۳۷۵.

An Observation into Shear Behavior of High Strength Self-Compacting Concrete

O. Rezayifar
Assistant professor of Semnan University
A. Ghods[G]
Structural engineering PhD student of Semnan University
M. S. Karimi
Assistant professor of Semnan University

(Received: 2014/1/12 - Accepted: 2015/4/29)

Abstract:
In this research, we observe the effect of high strength SCC concrete on shear behavior, cracking moment & condition. The main testing parameters are concrete type, stirrups distance and concrete strength variation. Therefore nine samples were casted which three of them are normal concrete with 400 MPa strength and the others were SCC with high strength of 60 and 80 MPa. Stirrup distances of 80, 100 and 133 millimeters used for each groups. The testing beams were loaded with simple supports under two concentrate loads. The results have appeared that stiffness and ultimate shear strength increased with using SCC concrete whereas the displacement decreased. Modes of cracking and patterns of normal and high strength SCC concrete were the same in ultimate load and ductility and ultimate load is increases by stirrups distance reduction in each beams.

Keywords: self-compacting concrete, limestone powder, micro silica powder, L box, compressive strength, splitting tensile strength, cracking moment, ultimate shear strength

* Corresponding author: Amir.ghods83@gmail.com