

ارزیابی تجربی رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه‌ی خودتراکم حاوی الیاف تحت بارگذاری سیکلی

حمیدرضا توکلی* (استادیار)

مسعود فلاح تبار (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۱۲۵-۱۳۳، یادداشت شنی)

تاکنون پژوهش‌های بسیاری به منظور ارزیابی رفتار تیرهای بتن آرمه‌ی الیافی تحت بارگذاری یکنواخت انجام شده است، ولی مطالعات محدودی بر روی رفتار آن‌ها تحت بارگذاری سیکلی انجام شده است. در این پژوهش، یک مطالعه‌ی جامع آزمایشگاهی برای بررسی خصوصیات مکانیکی تیرهای بتن آرمه‌ی خودتراکم الیافی صورت پذیرفته است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیر استفاده از الیاف در رفتار المان سازه‌ی تیر است. الیاف مورد استفاده شامل: الیاف فولادی^۱ و پلی‌فینیل سولفاید (PPS) بوده است. مقادیر انتخابی هر نوع الیاف برابر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ نسبت حجمی الیاف به بتن است، و بتن فاقد الیاف به عنوان بتن مرجع در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف موجب افزایش ظرفیت باربری و انرژی تلف شده و همچنین باعث کاهش عرض ترک در مقایسه با طرح مرجع می‌شود. مقایسه‌ی تأثیر استفاده از دو نوع الیاف مذکور نشان می‌دهد که بتن حاوی الیاف فولادی، مقادیر انرژی تلف شده‌ی تجمعی بیشتر و مقاومت بالاتری را نسبت به مقدار متناظر در بتن حاوی الیاف PPS نتیجه می‌دهد.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، خصوصیات مکانیکی، انرژی تلف شده‌ی تجمعی، ظرفیت باربری، الیاف.

۱. مقدمه

ساخت نمونه با مقیاس واقعی می‌تواند به عنوان یکی از مشکلات و موانع اجرایی تحلیل دینامیکی سازه مطرح باشد.^[۲] این نوع آزمایش‌ها نیز می‌توانند تقریب داشته باشند. از آنجایی که رفتار لرزه‌ی می‌تواند با یک سری از سیکل‌های بارگذاری متناوب با دامنه‌های مختلف شبیه‌سازی شود،^[۳] می‌توان با انجام آزمایش بارگذاری سیکلی روی اعضای سازه‌ی بر مشکلات ایجاد شده در آزمایش دینامیک غیرخطی سازه یا مجموعه‌ی از اجزاء سازه (مانند اتصال تیر - ستون) غلبه کرد.

بتن خودتراکم یک بتن با جریان پذیری بالاست، که برای اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار و بهبود سازه‌های بتنی در سال ۱۹۸۸ مطرح و مطالعات اولیه پیرامون کارایی بتن خودتراکم در سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۳ در دانشگاه توکیو انجام شده است.^[۴-۷] طبق نظریه‌ی ارائه شده در برخی مطالعات، بتن خودتراکم بتنی است که سیالیت داشته باشد، تا تراکم بدون نیاز به انرژی خارجی انجام شود و علاوه بر آن، در حین و پس از اتمام بتن‌ریزی به صورت یکپارچه باقی بماند و به راحتی در خلال آرماتورهای متراکم حرکت کند.^[۸-۱۱] از این رو به طور چشم‌گیری می‌توان در هزینه‌های نیروی انسانی و زمان ساخت صرفه‌جویی کرد.^[۱۲]

در هنگام وقوع زمین‌لرزه، انرژی لرزه‌ی از طریق حرکت زمین به سازه منتقل می‌شود و سازه در معرض بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد، که باعث خسارت در بتن می‌شود؛ لذا، انرژی لرزه‌ی باید تلف شود تا از فروپاشی سازه جلوگیری شود.^[۱۳، ۱۴] ماتریس شکننده‌ی مانند بتن، ظرفیت بارکششی خود را تقریباً بلافاصله پس

پاسخ دینامیکی یک سازه تحت ارتعاش آزاد یا اجباری به رفتار هیستریزس آن نیز بستگی دارد. اثرات دینامیک، زمانی به طور ویژه شدت می‌یابد که بسامد ارتعاش یک بار هارمونیک به بسامد تشدید سازه نزدیک باشد. آزمایش‌ها روی دینامیک سازه نشان داده است که حضور لوازم جانبی میرایی به طور مؤثر می‌تواند پاسخ دینامیک را محدود کند. محدود کردن پاسخ دینامیکی در یک سازه می‌تواند با عناصر گسسته‌ی میرایی به دست آید. در مهندسی عمران، خواص میرایی بتن آرمه در مهندسی زلزله بسیار مهم است؛ زیرا میرایی، اتلاف انرژی سازه را طی زمین‌لرزه‌های متوسط یا شدید فراهم می‌کند.^[۱۵]

به منظور ارزیابی پاسخ یک سازه‌ی تحت زلزله، تعیین خواص مکانیکی سازه از قبیل: سختی مماسی، مقاومت، شکل پذیری نیاز، و ظرفیت پسماند ضروری است. همچنین برای محاسبه‌ی پاسخ واقعی سازه شایسته است که از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی استفاده شود. با توجه به نقش پارامترهای مختلف در خواص مکانیکی سازه و اندرکنش میان آن‌ها و همچنین تفاوت میان سازه‌ی واقعی و سازه‌ی مدل‌سازی شده، تفسیر نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌تواند با عدم قطعیت و دشواری همراه باشد. علاوه بر این، هزینه‌های مرتبط با انجام آزمایش‌های تجربی و

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۱/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۴.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های مصرفی.

| الیاف | مدول کشسانی (GPa) | ابعاد (mm) | | | نسبت چگالی (Kg/m ³) |
|-------|-------------------|------------|-----|-----------|---------------------------------|
| | | طول | قطر | عرض ضخامت | |
| ST | ۱۶۰ | ۳۶ | ۰٫۷ | -- | ۷۸۰۰ |
| PPS | ۳٫۵ | ۵۰ | -- | ۲ | ۹۱۰ |

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی سیمان و پودر سنگ (%wt). [۳۵]

| نام مواد | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | CaCO ₃ | LO.I |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------|
| سیمان | ۲۱٫۹ | ۴٫۸۶ | ۳٫۳ | ۶۳٫۳۳ | ۱٫۱۵ | ۲٫۱ | -- | ۲٫۴ |
| پودر سنگ | ۰٫۴۵ | ۰٫۳۳ | ۰٫۰۲ | ۵۲٫۳۵ | ۰٫۰۲ | ۵۲٫۳۵ | ۹۹٫۳ | -- |

جدول ۳. طرح اختلاط بتن مرجع (بر حسب kg/m³).

| نام طرح | الیاف | شن | ماسه | پودر سنگ | سیمان | آب | فوق روان‌کننده |
|---------|-------|-----|------|----------|-------|-----|----------------|
| cont | -- | ۷۲۲ | ۸۲۶ | ۲۸۸٫۹ | ۴۱۳٫۱ | ۱۶۲ | ۷ |

خسارت‌های شدید می‌شود و حضور الیاف می‌تواند مقادیر کرنش را افزایش دهد و روی ترک‌ها پل ایجاد کند. [۳۱] مهم‌ترین ویژگی افزودن الیاف به بتن این است که مانع توسعه‌ی میکروتکرک‌ها می‌شود و انتشار ریزترک‌ها به فرم ترک را به تأخیر می‌اندازد و همچنین باعث شکل‌پذیری بهتری پس از شکل‌گیری ترک می‌شود. [۳۲] این تذکر نیز لازم است که انرژی سیستم ارتعاشی با ساز و کارهای مختلف تلف می‌شود و وقوع بیش از یک ساز و کار در یک زمان محتمل است. در ارتعاش یک ساختمان بتن آرمه، ساز و کارها می‌توانند شامل: ترک خوردگی، جاری شدن تسلیح‌کننده‌ها و اصطکاک میان بتن و تسلیح‌کننده‌ها در خلال لغزش باشند. در بتن آرمه‌ی الیافی، اصطکاک میان الیاف و ماتریس، جاری شدن الیاف و شکستن یا بیرون‌کشیدن الیاف از ماتریس نیز از جمله ساز و کارهای اضافی هستند. [۳۳]

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۲.۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش از فوق روان‌کننده‌ی نسل سوم بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلیک اتر با نام تجاری P ۱۰-۳R استفاده شده است. ماده‌ی مذکور کدررنگ با وزن مخصوص ۱٫۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در دمای ۲۰°C بوده است. الیاف‌های مصرفی شامل دو نوع فولادی و پلی‌فینیل سولفاید^۲ بوده است، که مشخصات آنها را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

شن مصرفی با بیشینه‌ی ابعاد ۱۲٫۵ میلی‌متر و ماسه‌ی مصرف‌شده زیرالک ۴٫۷۵ میلی‌متر با هم‌ارز ماسه‌یی به میزان ۸٪ بوده است. همچنین منحنی دانه‌بندی آن در محدوده‌ی استاندارد ASTM C۳۳ قرار داشته است. از سیمان پرتلند نوع II و پودر سنگ با وزن مخصوص ۲٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز استفاده شده است. خصوصیات سیمان و پودر سنگ مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است.

۲.۲. طرح اختلاط

در این پژوهش، ۹ طرح اختلاط شامل دو نوع الیاف (فلزی: ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۴ درصد حجمی، PPS: ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۳، ۰٫۴ و درصد حجمی) برای بررسی تأثیر نوع و مقدار الیاف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در تمام ۹ طرح اختلاط که در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند، به غیر از نوع و مقدار الیاف، تمامی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن ثابت در نظر گرفته شده‌است. نسبت آب به مواد پودری (سیمان و پودر سنگ) برابر با ۰٫۲۳ بوده و طرح cont، که بتن خودتراکم فاقد الیاف است، به‌عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که (% V_f) موجود

از اولین ترک از دست می‌دهد. [۱۵] انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ریزترک‌ها و ترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. با ایجاد ریزترک‌ها در اثر تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان، آن‌ها در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریزترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شوند. [۱۶] استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی^۲ سبب جبران ضعف مقاومت کششی بتن و نیز به‌عنوان گامی مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها محسوب می‌شود. [۱۷] افزودن الیاف انعطاف‌پذیر می‌تواند برخی از خصوصیات مکانیکی، مانند: مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، شکل‌پذیری، مقاومت ضربه و مقاومت خستگی را بهبود بخشد، به طوری که مهم‌ترین مشخصه‌ی بتن الیافی عبارت است از: خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری، و مقاومت در برابر ضربه. به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا می‌کند و به‌عنوان یک ماده‌ی جدید و اقتصادی در مسائل ساختمانی محسوب می‌شود. [۱۸-۲۴] هنگامی که ماتریس شکننده‌ی ترکیب‌شده با الیاف تحت بارگذاری خمشی قرار می‌گیرد، ترک‌ها توسط الیاف پل زده می‌شوند. [۲۵] وقتی که الیاف به همراه تسلیح‌کننده‌های طولی فولادی استفاده می‌شود، به دلیل ظرفیت بالای کامپوزیت (ترکیب)، تغییر شکل کششی بالا در تسلیح‌کننده‌های طولی دخالت می‌کند و به‌عنوان یک نتیجه، شکل‌پذیری اعضاء سازه‌یی بالاتر می‌رود. [۲۶]

تنش در عضو سازه‌یی تحت بارگذاری لرزه‌یی بدون تقویت کافی ممکن است منجر به یک پاسخ شکننده شود. اگر به هر صورتی کاهش شکنندگی میسر شود، رفتار شکست غیرخطی به نمایش گذاشته می‌شود، تا زمانی که کرنش در نقطه‌ی به‌خصوصی غالب شود. پس از این مرحله، مقاومت پسماند کافی نیاز است تا اطمینان حاصل شود که سازه می‌تواند در شرایط بارگذاری بعدی شامل تغییر شکل‌های بزرگ، که ممکن است نتیجه‌ی یک زمین‌لرزه باشند، ایستادگی کند. [۲۷] یک پارامتر مهم در عملکرد سازه تحت بارگذاری سیکنالی، توانایی سازه در اتلاف انرژی است. ظرفیت اتلاف انرژی به‌عنوان یک معیار توانایی عضو سازه‌یی برای تحمل بارگذاری سیکنالی غیرخطی استفاده شده است. [۲۸] به‌منظور ارتقاء عملکرد سازه‌ی تحت بارگذاری لرزه‌یی، استفاده از بتن مسلح‌شده به الیاف موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در سال‌های اخیر بوده است. [۲۹-۳۰] بتن تحت بارگذاری سیکنالی، دچار

جدول ۴. نوع و مقادیر الیاف مورد استفاده در طرح‌ها.

| نام طرح | Cont | ST۱° | ST۲° | ST۳° | ST۴° | PPS۱° | PPS۲° | PPS۳° | PPS۴° |
|--------------------------|------|--------|------|------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| نوع الیاف | — | فولادی | | | | پای فیئیل سولفاید | | | |
| مقدار الیاف (V_f (%)) | ۰ | ۰٫۱ | ۰٫۲ | ۰٫۳ | ۰٫۴ | ۰٫۱ | ۰٫۲ | ۰٫۳ | ۰٫۴ |

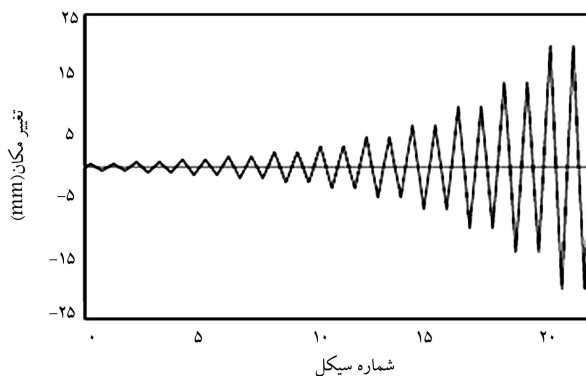
در جدول ۴، همان درصد حجمی الیاف (نسبت حجم الیاف به حجم بتن) است. شکل ۱، مربوط به آزمایش‌های بتن تازه بر روی طرح‌هاست.

۳.۲. شیوه و نمونه‌های آزمایش

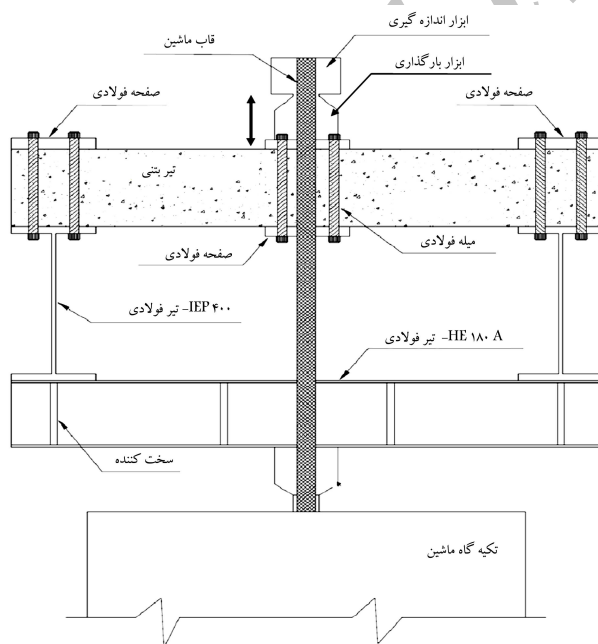
هر طرح اختلاط شامل تیر به ابعاد مقطع 150×200 میلی‌متر و طول ۱۳۰۰ میلی‌متر بوده است. ۴ میلگرد فولادی (۲ میلگرد کششی و ۲ میلگرد فشاری) به قطر ۸ میلی‌متر با مقاومت تسلیم (MPa) ۴۰۰ به عنوان تسلیح کننده‌های مرسوم استفاده شده است. شکست خمشی تیرها با فراهم کردن تسلیح برشی لازم ($6 \text{ mm } \phi @ 100 \text{ mm C/C}$) تضمین شده است. برای انجام این آزمایش از دستگاه UTM^۴ استفاده (شکل ۲) و آزمایش سیکلی خمشی با مکانیزم کنترل تغییر مکان^۵ انجام شده و سرعت بارگذاری دستگاه ۲ mm/min بوده است. الگوی بارگذاری سیکلی برای تمامی تیرهای مورد آزمایش یکسان بوده و براساس آیین‌نامه‌ی FEMA۴۶۱^[۳۲] انتخاب شده است. برای این منظور ابتدا یک نمونه از هر طرح اختلاط به روش بارگذاری یکنواخت مورد آزمایش قرار گرفته و براساس آن الگوی بارگذاری طرح شده است. تعداد کل دامنه‌های بارگذاری برابر ۱۱ دامنه بوده و هر

۴.۲. نگهداری و عمل‌آوری

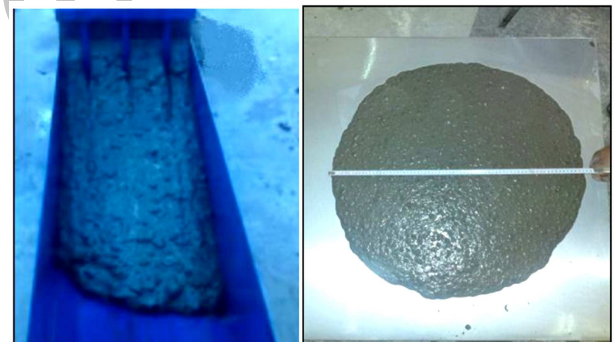
پس از فرایند اختلاط، بتن در داخل قالب‌ها ریخته و تا ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده‌اند. نمونه‌ها پس از این مدت از قالب‌ها جدا شده و در استخر آب با دمای ۲۲-۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند، تا زمان آزمایش فرا رسد (نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند).



شکل ۳. الگوی بارگذاری جهت آزمایش خمشی سیکلی.



شکل ۴. طرح کلی انجام آزمایش خمشی سیکلی بر روی تیر بتن‌آرمه.



الف) آزمایش SLUMP؛ ب) آزمایش I-BOX.

شکل ۱. آزمایش‌های بتن تازه.

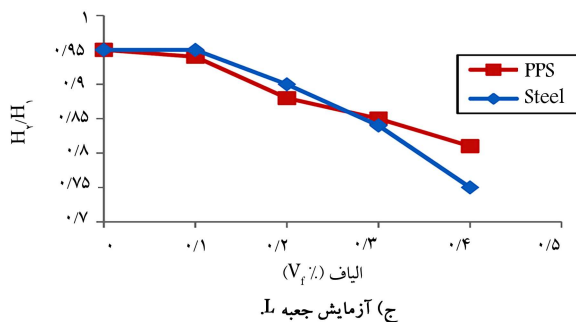
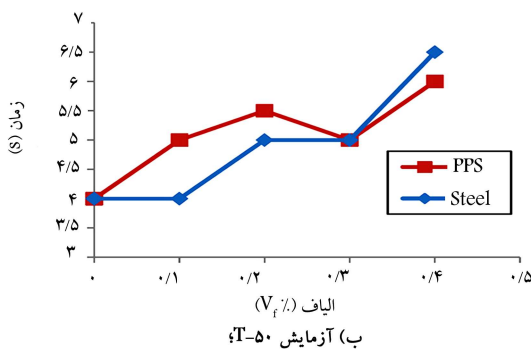
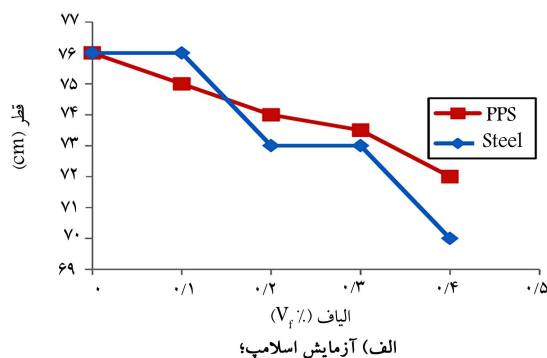


شکل ۲. نمای دستگاه بارگذاری یونیورسال.

۳. بررسی و تفسیر نتایج

۳.۱. بررسی خواص فیزیکی (رئولوژی) بتن خودتراکم تازه

در این پژوهش از طرح اختلاطی استفاده شده است که با وجود استفاده از الیاف در بتن، خواص خودتراکمی SCC حفظ شود؛ لذا برای سنجش کارایی بتن خودتراکم الیافی از پارامترهای سنجش بتن خودتراکم استفاده شده است. برای بررسی خواص مختلفی از قبیل: قابلیت عبور و پایداری بتن خودتراکم در برابر جدایش از آزمایش L-BOX و برای ارزیابی تغییر شکل پذیری یا روانی بتن خودتراکم از آزمایش اسلامپ و T50 استفاده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها (شکل ۵) نشان می‌دهد که بتن‌های ساخته شده در محدوده استاندارد بتن خودتراکم هستند و استفاده از انواع الیاف، اثرات منفی در خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارند و با افزایش مقدار الیاف، کارایی بتن کاهش می‌یابد؛ که این مسئله می‌تواند به دلیل قفل و بست بیشتر با حضور الیاف در بتن باشد. مطابق آیین نامه ی اروپا، [۲۶] جریان اسلامپ بتن خودتراکم باید در محدوده ۷۵-۶۰ سانتی‌متر و زمان T50 باید بین در محدوده ۳ الی ۶ ثانیه و کمینه نسبت در آزمایش L-BOX، ۰/۸ باشد؛ البته مشخصات دیگری برای بتن با کارایی کمتر نیز ارائه شده است.



شکل ۵. نتایج آزمایش‌های رئولوژی.

۳.۲. ترک خوردگی و خردشدن

بر اساس مشاهدات در نمونه‌ها، به علت سطح خشن بتن، یک باند خوب در ماتریس بتن ایجاد شده است. عمل الیاف بلافاصله بعد از ترک خوردگی شروع شده و سعی در توقف ترک با انجام عمل پل زدن کرده است. در نتیجه، به صورت بصری مشاهده شده است که در تیرهای حاوی الیاف فولادی، عرض ترک در یک جابجایی ثابت کمتر از تیر بدون الیاف بوده است. در هیچ یک از تیرها، ترک برشی مشاهده نشده و شکست خمشی در تمامی تیرها اتفاق افتاده است. در بازشدگی ترک بیشتر، در زمانی که تنش در الیاف بیش از مقاومت کششی می‌شود، الیاف فولادی می‌شکنند؛ در حالی که در الیاف PPS، عمل بیرون کشیدگی صورت می‌گیرد. سطح تقریباً صاف الیاف PPS، باعث مقاومت باند ضعیف با ماتریس بتن می‌شود، که موجب بیرون کشیدگی آن نیز می‌شود. این الیاف تا مقادیر خاصی از بازشدگی ترک عمل می‌کنند و در بازشدگی ترک بزرگ‌تر، از ماتریس بتن بیرون کشیده می‌شوند. در حالی که الیاف فلزی به علت داشتن قلاب در انتها، پیوند خوبی با ماتریس بتن برقرار می‌کنند و در بازشدگی ترک بزرگ‌تر نیز کارایی خود را از دست نمی‌دهند.

خردشدن پوشش بتنی یکی از مسائل شایع در عناصر سازه‌یی تحت بارگذاری سیکلی است، زیرا هر عنصر، پی در پی تحت فشار و کشش قرار می‌گیرد. در این پژوهش مشاهده شده است که خردشدگی بتن بدون الیاف در مقایسه با بتن الیافی شدید است، زیرا الیاف همیشه ماتریس بتن را در میان خود نگهداری می‌کند (شکل ۶)، و خردشدگی شدیدی در پوشش بتنی تیرهای بدون الیاف مشاهده می‌شود.



الف) طرح cont؛

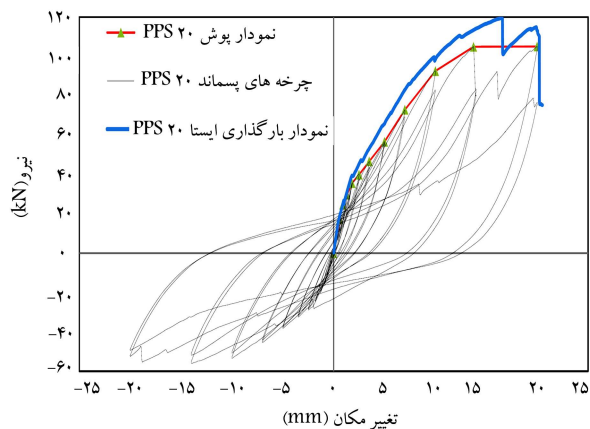


ب) طرح ۴۰ PPS؛

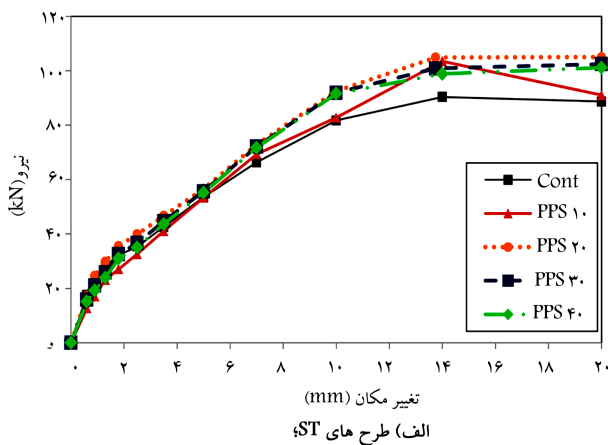


ج) طرح ۴۰ ST.

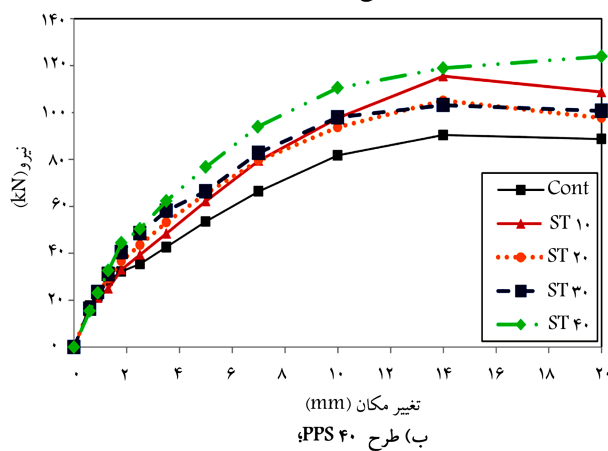
شکل ۶. خردشدگی پوشش بتن در طرح‌های اختلاط مختلف.



شکل ۷. رفتار هیستریزیس برای نمونه‌ی PPS 20.



الف) طرح های ST؛



ب) طرح PPS 40؛

شکل ۸. منحنی پوش بار - تغییر مکان حلقه‌های هیستریزیس.

۵.۳. انرژی تلف شده‌ی تجمعی

انرژی که در خلال یک زمین لرزه به سازه وارد می‌شود، باید از طریق ایمن تلف شود. قابلیت یک سازه برای اتلاف انرژی، البته به‌طور مناسب، نقش مهمی در کارایی سازه تحت بارگذاری سیکلی دارد. [۳۷] انرژی تلف شده‌ی بیشتر، نشان از عملکرد بهتر آن عضو دارد. [۳۸] انرژی تلف شده نیز یکی از پارامترهای مرتبط جهت تحلیل عملکرد اعضاء بتن‌آرمه تحت بارگذاری سیکلی است. [۳۹]

انرژی وارد شده به سازه دو فرم دارد: انرژی تلف شده، و انرژی قابل بازیابی.

این تذکر لازم است که کاهش خردشدگی بتن با استفاده از الیاف (به‌خصوص الیاف فولادی) در سازه‌های بتن‌آرمه‌ی تحت بارگذاری سیکلی منجر به کاهش هزینه‌ی تعمیر و نگهداری بعد از زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی کم تا متوسط می‌شود.

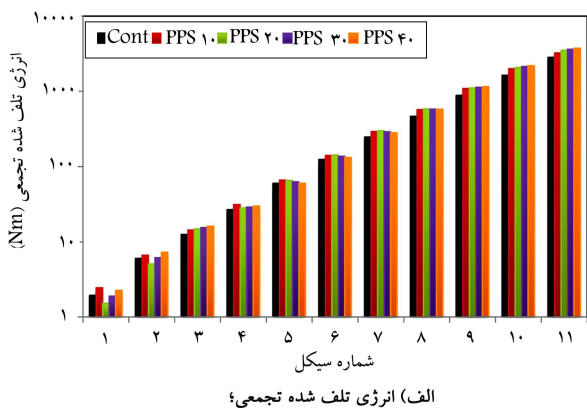
۳.۳. رفتار هیستریزیس

رفتار هیستریزیس، بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی بار - تغییر مکان سازه تحت بارگذاری لرزه‌ی است، که یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه است. در خلال زمین‌لرزه‌های قوی انتظار می‌رود سازه وارد محدوده‌ی کشسان‌خیمیری شود و حلقه‌های هیستریزیس می‌توانند درک خوبی برای تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ی کشسان‌خیمیری ارائه کنند. [۳۷] پاسخ بار - تغییر مکان هیستریزیس، ظرفیت اتلاف انرژی سازه را با در نظر گرفتن مساحت محدود به حلقه‌های هیستریزیس نشان می‌دهد. حلقه‌های هیستریزیس طرح PPS 20 به عنوان نمونه در شکل ۷ ارائه شده است. در این نمودار، منحنی پوش حلقه‌های هیستریزیس و منحنی بارگذاری یکنواخت این طرح نیز رسم شده است. این موارد را می‌توان با مشاهده‌ی حلقه‌های هیستریزیس بار - تغییر مکان تیرهای بتن‌آرمه‌ی خودتراکم، با و بدون الیاف استنباط کرد:

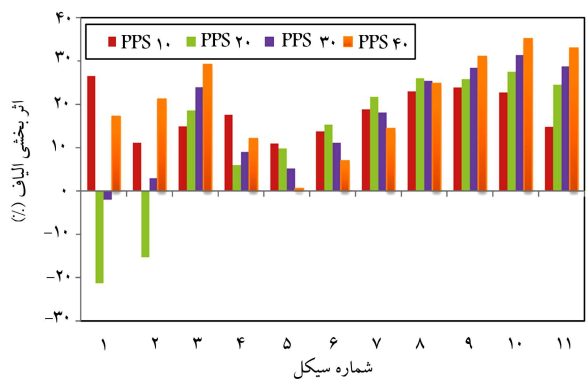
- رابطه‌ی میان بار و تغییر مکان برای تمامی تیرهای مورد آزمایش تا قبل از ترک‌خوردگی، خطی بوده است. پس از ترک‌خوردگی، شیب منحنی‌های هیستریزیس (سختی مماسی) با افزایش تغییر مکان افت کرده است.
- با مقایسه‌ی نیروهای بیشینه در دو نوع الیاف استنباط می‌شود که معمولاً با افزایش مقدار الیاف، مقادیر نیروهای بیشینه نیز افزایش می‌یابد (در برخی از سیکل‌ها، تیر طرح PPS 20 ظرفیت باربری بالایی ثبت کرده است) و نیز با مقایسه‌ی دو نوع الیاف می‌توان مشاهده کرد که در تغییر مکان‌های یکسان، در بیشتر موارد نمونه‌های بتن‌آرمه‌ی حاوی الیاف فولادی نیروهای بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن‌آرمه‌ی حاوی الیاف PPS ثبت کرده‌اند. در هیچ‌یک از تیرها پدیده‌ی Pinching مشاهده نشده است. در تمامی طرح‌ها، منحنی بارگذاری استاتیکی بر حلقه‌های هیستریزیس پوش بوده است.

۴.۳. ظرفیت باربری سیکلی (پوش حلقه‌های هیستریزیس)

حلقه‌های هیستریزیس می‌توانند درک خوبی برای تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ی کشسان‌خیمیری ارائه دهند. [۳۷] برای تمامی تیرها، بیشینه‌ی نیرو در خلال هر سیکل به همراه تغییر مکان وسط دهانه ثبت شده است. شکل ۸، نشان‌دهنده‌ی منحنی‌های پوش نیرو - تغییر مکان در اولین سیکل است. می‌توان مشاهده کرد که با حضور الیاف، ظرفیت باربری افزایش یافته است. علاوه بر این، جاری شدن میلگردهای فولادی در حضور الیاف به تعویق افتاده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رفتار تیرها تا ۱ میلی‌متر تقریباً شبیه به هم بوده است. این رفتار حاکی از آن است که الیاف تا قبل از ترک‌خوردگی، تأثیر چندانی در مقاومت نداشته‌اند. با مقایسه‌ی دو نوع الیاف، مورد استفاده می‌توان دریافت که تیرهای بتن‌آرمه‌ی خودتراکم حاوی الیاف فولادی، مقادیر نیرویی بالاتری را ثبت کرده‌اند. این برتری به دلیل مقاومت بالاتر و پیوند خوب الیاف فولادی با ماتریس بتن به دلیل قلاب‌های انتهایی آن بوده است. این الیاف در ترک‌ها پل می‌زنند و به این عمل تا رسیدن به مقاومت کششی نهایی خود ادامه می‌دهند. برعکس الیاف فولادی، الیاف PPS دارای سطح لغزنده هستند و عمل پل‌زدن را به خوبی انجام نمی‌دهند و دچار بیرون‌کشیدگی می‌شوند. البته بیشتر این نوع الیاف تا رسیدن به مقاومت کششی نهایی خود، عمل پل‌زدن را انجام می‌دهند و در نهایت گسیخته می‌شوند.

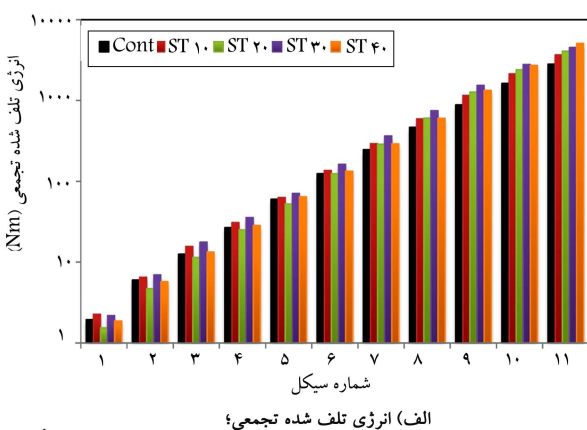


الف) انرژی تلف شده تجمعی؛

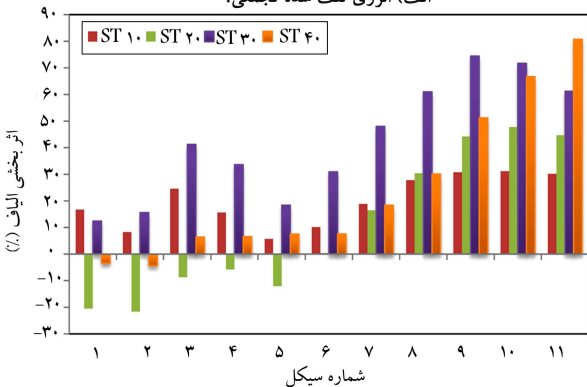


ب) درصد افزایش انرژی تلف شده ی تجمعی.

شکل ۹. اثر افزودن الیاف در اتلاف انرژی طرح‌های حاوی الیاف PPS.



الف) انرژی تلف شده تجمعی؛



ب) درصد افزایش انرژی تلف شده ی تجمعی.

شکل ۱۰. اثر افزودن الیاف در اتلاف انرژی طرح‌های حاوی الیاف فولادی.

کل انرژی جذب شده توسط سیستم برابر مجموع انرژی تلف شده و انرژی قابل بازیابی است. [۴۰] انرژی تلف شده در یک چرخه، مساحت محصور توسط حلقه‌ی هیستریزس متناظر با منحنی بار- تغییرمکان تیر است و بیانگر ظرفیت عضو سازه‌ی جهت کاهش اثرات غیرکشسان زمین‌لرزه در زمانی است که رفتار غیرکشسان فولاد مسلح‌کننده باعث ترک‌خوردگی زیاد و تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. در بتن آرمه‌ی الیافی، الیاف داخل بتن به دلیل رفتار غیرکشسان الیاف به‌عنوان تلف‌کننده‌ی انرژی عمل می‌کند. تغییرشکل الیاف، لغزش الیاف، شکستن یا بیرون‌کشیدگی الیاف و نیز عوامل اصلی مانند رفتار غیرکشسان میلگردهای فولادی و ترک‌خوردگی بتن، بخش اعظمی از انرژی وارد شده به سازه در خلال تحریک لرزه‌ی بتن را تلف می‌کنند. [۱۳]

انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی از طریق جمع انرژی تلف شده در چرخه‌های پیایی به دست می‌آید. انرژی تلف‌شده در هر سیکل بارگذاری با تعیین مساحت داخل حلقه‌ی هیستریزس بار- تغییرمکان توسط روش دوزنقه‌ی محاسبه شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰، انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی و نیز درصد افزایش انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی یا اثربخشی الیاف نسبت به طرح مرجع را به ترتیب برای الیاف PPS و فولادی نشان می‌دهند.

هنگام محاسبه‌ی انرژی تلف‌شده در چرخه‌های پیایی این نکته قابل توجه است که پس از چرخه‌ی اول هر تغییرمکان، مقادیر انرژی تلف‌شده کاهش یافته است. در برخی مطالعات، [۲۱] [۲۳] نیز مشاهدات مشابهی به دست آمده است و این به دلیل سهم الیاف در تمرکز در خلال چرخه‌ی هر تغییرمکان است. همچنین نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش تغییرمکان و افزایش مقدار الیاف، انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی بیشتر شده است. این بدان دلیل است که در تغییرمکان‌های بزرگتر، ترک‌ها گسترش یافته و انتشار ترک رخ داده است، که دلیل بر اتلاف انرژی بیشتر است. این تذکر لازم است که با افزایش مقدار الیاف در هر دو نوع الیاف مورد استفاده در این مطالعه، مقادیر انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی نیز افزایش یافته است، که این افزایش برای الیاف فولادی بیشتر از الیاف PPS است. دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که با افزایش مقدار الیاف، اجزاء تلف‌کننده‌ی انرژی و در پی آن اتلاف انرژی کل بیشتر شده است.

در الیاف PPS درصد افزایش انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی نسبت به نمونه‌ی شاهد معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بوده است، که این افزایش در تغییرمکان‌های دهم به ۳۵٫۲ برای طرح PPS۴۰ نیز رسیده است.

شکل ۱۰، بیانگر رفتار اتلاف انرژی در طرح‌های حاوی الیاف فولادی در مقایسه‌ی طرح شاهد است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۹ و ۱۰ این نکته به وضوح مشخص است که الیاف فولادی در کل عملکرد بهتری نسبت به الیاف PPS از خود نشان داده‌اند، به صورتی که بیشترین مقدار انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی برای الیاف PPS برابر ۳۷۳۲ نیوتن‌متر بوده است، در حالی که مقدار متناظر آن در الیاف فولادی ۵۰۷۳ نیوتن‌متر بوده است. همچنین با نگاه و مقایسه‌ی درصد افزایش در دو شکل مذکور نیز این نکته به وضوح مشخص است، به طوری که برای الیاف PPS درصد افزایش بیشینه، ۳۵٫۲ در تغییرمکان دهم و برای الیاف فولادی، ۸۰٫۸ در تغییرمکان یازدهم بوده است. دلیل این تفاوت می‌تواند این باشد که الیاف فولادی به دلیل مقاومت و سختی بیشتر و نیز درگیری بهتر با ماتریس سیمان مقادیر اتلاف انرژی را بیشتر افزایش داده است. البته در بیشتر سیکل‌ها، طرح ST۳۰ مقادیر بالاتری را نسبت به طرح ST۴۰ از خود نشان داده است.

۴. نتیجه‌گیری

بتن‌های حاوی این الیاف در مقدار انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی نسبت به بتن شاهد از خود نشان داده است، به طوری که به $۳۵/۲\%$ رشد رسیده است.

- افزودن الیاف فلزی باعث رشد چشم‌گیری در انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی نسبت به نمونه‌های بتن شاهد شده است. این افزایش با افزایش تغییرمکان بیشتر شده و در سیکل انتهایی برای طرح ST^{۴۰} به ۸۱% رسیده است.
- با مقایسه‌ی انرژی تلف‌شده‌ی تجمعی در طرح‌های حاوی دو نوع الیاف مورد مطالعه، این نکته را می‌توان دریافت که اتلاف انرژی در بتن‌های حاوی الیاف فولادی بالاتر از بتن‌های حاوی الیاف PPS در مقادیر یکسان الیاف بوده است و دلیل آن می‌تواند این باشد که الیاف فولادی به دلیل مقاومت و سختی بیشتر و نیز درگیری بهتر با ماتریس سیمان مقادیر اتلاف انرژی را بیشتر افزایش داده است.
- در منحنی هیستریزس، رابطه‌ی میان بار و تغییرمکان برای تمامی تیرهای مورد آزمایش تا قبل از ترک‌خوردگی خطی بوده است. پس از ترک‌خوردگی، شیب منحنی‌های هیستریزس (سختی سکانت) با افزایش تغییرمکان افت کرده است.
- در منحنی‌های هیستریزس با افزایش مقدار الیاف مقادیر نیروهای بیشینه افزایش یافته و نیز با مقایسه‌ی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و PPS می‌توان مشاهده کرد که در تغییرمکان‌های یکسان در بیشتر موارد نمونه‌های بتن‌آرمه‌ی حاوی الیاف فولادی نیروهای بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن‌آرمه‌ی حاوی الیاف PPS ثبت کرده‌اند.
- از نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه مشاهده می‌شود که افزودن الیاف، حتی در مقادیر کم می‌تواند ظرفیت باربری و ظرفیت اتلاف انرژی تیرهای بتن‌آرمه‌ی خودتراکم را بهبود بخشد.

در این مطالعه، تأثیر حضور دو نوع الیاف (فلزی و PPS) در بتن، روی مقادیر انرژی تلف‌شده نسبت به بتن خودتراکم فاقد الیاف بررسی شده است و از تحلیل نتایج و تفاسیر می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

- با توجه به نتایج آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم مشاهده شده است که استفاده از انواع الیاف، اثرات منفی در خواص رئولوژی بتن خودتراکم تازه دارند و با افزایش مقدار الیاف کارایی بتن کاهش می‌یابد.
- از طریق مشاهدات بصری، این نکته قابل توجه است که افزودن الیاف به بتن خودتراکم باعث کاهش عرض ترک خمشی در یک دامنه‌ی جابجایی شده و این کاهش در درصدهای الیاف بالاتر محسوس‌تر بوده است.
- افزودن الیاف به بتن خودتراکم، باعث کاهش چشم‌گیری در خردشدگی بتن شده است و دلیل آن نگرانی ماتریس بتن در میان الیاف است که مانع از خردشدن بتن می‌شوند و یکی از فواید بسیار مهم در هنگام وقوع زلزله است. علاوه بر این، به عنوان یک نتیجه از سطح خسارت پایین، هزینه‌ی کمتر بازسازی پس از زلزله باید مشاهده شود.
- برای تمامی تیرهای مورد آزمایش مقادیر انرژی تلف‌شده در خلال سیکل اول به‌طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر در سیکل دوم در یک جابجایی یکسان بوده است. که عمدتاً به دلیل افت در خصوصیات مکانیکی در سیکل دوم در جابجایی یکسان بوده است.
- در الیاف PPS، طرح PPS^{۴۰} در بیشتر سیکل‌ها بیشترین رشد را در میان

پانویس‌ها

1. steel
2. fiber reinforced concrete (FRC)
3. Polyphenylene Sulfide (PPS)
4. Hydraulic universal testing machine
5. displacement control

منابع (References)

1. Carneiro, J.O., deMelo, F.J.Q., Jalali, S., Teixeira, V. and Tomas, M. "The use of pseudo-dynamic method in the evaluation of damping characteristics of in reinforced concrete beams having variable bending stiffness", *Mech. Res. Communications*, **33**(5), pp. 601-613 (2006).
2. Durgesh, C.R. "Future trends in earthquake-resistance design of structures", *Current Science*, **79**(9), pp. 1291-1300 (2000).
3. Buyle-Bodin, F. and Madhkan, M. "Performance and modelling of steel fibre reinforced piles under seismic loading", *Engineering Structures*, **24**(8), pp. 1049-1056 (2002).
4. Ozawa, K., Maekawa, K. and Okamura, H. "Self-compacting high performance concrete", *Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering)*, **34**, pp. 135-149 (1996).
5. Okamura, H. "Self compacting high-performance concrete", *Concrete International*, pp. 50-54 (1997).
6. Okamura, H. and Ozawa, K. "Self-compactable high performance concrete in japan", *International Workshop on High Performance Concrete, SP169, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 31-44 (1994).

7. Ozyildirim, C. and Lane, D.S. "Evaluation of self-consolidating concrete", National Technical Information Service (2003).
8. Ouchi, M., Hibino, M. and Okamura, H. "Effect of super plasticizer on self-compact ability of fresh concrete", *TRR (Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board)*, **1574**, pp. 37-40 (1996).
9. Nehdi, M., El-Chabib, H. and El-Naggar, H. "Cost-effective SCC for deep foundations", *Concr. Int.*, **25**(3), pp. 95-103 (2003).
10. Khayat, KH. "Workability, testing, and performance of self-consolidating Concrete", *ACI Mater J.*, **96**(3), pp. 346-345 (1999).
11. Safiuddin, M.D., West, J.S. and Soudki, K.A. "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 973-978 (2011).
12. Gurjar, A. "Mix design and testing of self-consolidating concrete using florida materials", *Report No. BD 503, Daytona Beach, the Florida Department of Transportation* (2004).
13. Daniel, L. and Loukili, A. "Behaviour of high-strength fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading", *ACI Stru. J.*, **99**(3), pp. 248-256 (2002).
14. Atimtay, E. and Kanit, R. "Learning seismic design from the Earthquake itself", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **11**(3), pp. 149-160 (August 2006).
15. Fischer, G. and Li, V.C. "Effect of fiber reinforcement on the response of structural members", *Engineering Fracture Mechanics*, **74**(1-2), pp. 258-272 (2007).
16. Soroushian, P. "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", *ACI, Concrete International*, **19**(6), pp. 28-34 (1986).
17. Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S. and Koh, K.T. "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*, **34**(2), pp. 172-184 (2012).
18. Wei-ling, L. "Toughness behavior of fiber reinforced concrete", *Conference: Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International symposium*, University of Sheffield, UK, pp. 299-315 (1992).
19. Kang, S.-T., Lee, Y., Park, Y.-D. and Kim, J.-K. "Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) with steel fiber", *Composite Structures*, **92**(1), pp. 61-71 (2010).
20. Olivito, R.S. and Zuccarello, F.A. "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete", *Composites: Part B*, **41**(3), pp. 246-255 (2010).
21. Meddah, M.S. and Bencheikh, M. "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials", *Construction and Building Materials*, **23**(10), pp. 3196-3205 (2009).
22. Mohammadi, Y., Singh, S.P. and Kaushik, S.K. "Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state", *Construction and Building Materials*, **22**(5), pp. 956-965 (2008).
23. Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, S.P. and Kaushik, S.K. "Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio", *Construction and Building Materials*, **23**(1), pp. 183-189 (2009).
24. Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G. and Swamy, R.N. "Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties", *Composites: Part B*, **41**, pp. 17-24 (2010).
25. Carpinteri, A., Spagnoli, A. and Vantadori, S. "An elastic-plastic crack bridging model for brittle-matrix fibrous composite beams under cyclic loading", *International Journal of Solids and Structures*, **43**(16), pp. 4917-4936 (2006).
26. Campione, G. and Letizia Mangiavillano, M. "Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations", *Engineering Structures*, **30**(11), pp. 2970-2980 (2008).
27. Campione, G., Mindess, S. and Banthia, N. "Monotonic and cyclic flexural behaviour of medium and high strength fiber reinforced concrete", *Fiber Reinforced Concrete (FRC) BEFIB, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, pp. 461-470 (2000).
28. Sinha, S.N. and Naraine, K.S. "Energy dissipation in brick masonry under cyclic biaxial compressive loading", *Proc. Instn Civ. Engrs: Part 2*, **91**(1), pp. 173-181 (1991).
29. Filiatrault, A., Pineau, S. and Houde, J. "Seismic behaviour of steel-fiber reinforced concrete interior beam-column joints", *ACI, Structural Journal*, **92**(5), pp. 543-552 (1995).
30. Kimura, H., Ishikawa, Y., Kambayashi, A. and Takatsu, H. "Seismic behaviour of 200 MPa ultra-high-strength steel-fiber reinforced concrete columns under varying axial load", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **5**(2), pp. 193-200 (2007).
31. Daniel, L., Loukili, A. and Lamirault, J. "Experimental behaviour of high strength fiber concrete beams under cyclic and alternated loadings", *Conference: Fiber reinforced concrete (FRC) BEFIB 2000, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, pp. 577-586 (2000).
32. Holschemacher, K. and Muller, T. "Influence of fiber type and concrete composition on properties of steel fiber reinforced concrete", *Proceedings of International Conference on Advances in Cement Based Materials and Applications in Civil Infrastructure (ACBM-ACI)*, Lahore-Pakistan, pp. 633-642 (12-14 December 2007).
33. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hal (2006).
34. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA 461, pp. 13-24 (2007).
35. Razavi, M., "Survey mechanical properties of scc containing nano particle" MSc thesis, Mazandaran University of Science and Technology (in Persain) (2010).
36. The European Guideline for Self Compacting Concrete Specification, Production and Use (May 2005).

37. Xue, W., Li, L., Cheng, B. and Li, J. "The reversed cyclic load tests of normal and pre-stressed concrete beams", *Engineering Structures*, **30**(4), pp. 1014-1023 (2008).
38. Abdelsamine, S. and Tom, B. "Seismic behaviour of 150 MPa (22 ksi) concrete flexure elements", *ACI Structural Journal*, **107**(3), pp. 311-320 (2010).
39. Verderame, G.M. and et al. "Seismic response of r.c. columns with smooth reinforcement Part II: Cyclic tests", *Engineering Structures*, **30**, pp. 2289-2300 (2008).
40. Abdelsamine, S. and Tom, B. "Hysteresis energy and damping capacity of flexural elements constructed with different concrete strengths", *Engineering Structures*, **32**, pp. 297-305 (2010).
41. Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F. and Sellier, A. "Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre reinforced concrete", PhD thesis, University of Toulouse, France (2009).

Archive of SID