مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۷، شماره‌ی ۲، ص. ۳۱-۴۱

اثرات آرایش میلگرد بر فواصل و عرض ترک‌های خمشی در تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات CFRP

محمدرضا افتخار (دانشجوی دکتری)
داود مستوفی‌نژاد (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

در این تحقیق اثرات آرایش میلگرد بر فواصل و عرض ترک‌های خمشی در تیرهای بتن‌آرمه و تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های صفحات پلیمری مرکب (CFRP) مورد بررسی قرارگرفته است. برای این منظور ۹ تیر بتن‌آرمه در مقیاس واقعی، با مشخصات یکسان ــ ازلحاظ ابعاد و میزان میلگردهای کششی و فشاری ــ و با سه آرایش مختلف آرماتورکششی ساخته شد و در سه دسته‌ی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. سه عدد از تیرها در دسته‌ی اول بدون تقویت و به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظرگرفته شدند. تیرهای دسته‌ی دوم پس از تقویت توسط دو لایه ورقه‌ی صفحات پسپاری مرکب(CFRP)[1] به‌صورت خمش سه‌نقطه‌یی تا مرحله‌ی شکست بارگذاری شدند. به‌منظور بررسی اثرات پیش‌ترک در بار جداشدگی و سازوکار انتشار ترک، ابتدا تیرهای دسته‌ی سوم به‌میزان ۷۰٪ بار ناحیه‌ی خطی منحنی بار ـ تغییر مکان، بارگذاری شد و پس از ایجاد ترک‌های متعدد خمشی و خمشی ـ برشی، باربرداری از نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها پس از تقویت، توسط دو لایه ورقه‌ی CFRP مجدداً تا مرحله‌ی شکست بارگذاری شدند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که استفاده از میلگردهای کم‌قطر در ناحیه‌ی کششی تیر باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک در طول تیر می‌شوند. این توزیع یکنواخت ترک، بازشدگی کم‌عرض‌تری را نیز ایجاد می‌کند. به‌عکس، امکان وقوع توزیع یکنواخت‌تر کرنش محوریِ ورقِ تقویتی در طول بیشتر تیر، که عامل مهمی در جلوگیری از جداشدگی ورق تقویتی است، در تیرهای با تعداد آرماتور خمشی کم‌تر، بیش‌تر است. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که آرایش میلگردهای داخلی اثرات قابل توجهی بر بار جداشدگی ورق تقویتی ندارد.

واژگان کلیدی: آرایش میلگرد، جداشدگی، عرض ترک، فاصله‌ی ترک، تقویت، بتن‌آرمه، ورق FRP.

eft@cc.iut.ac.ir
dmostofi@cc.iut.ac.ir

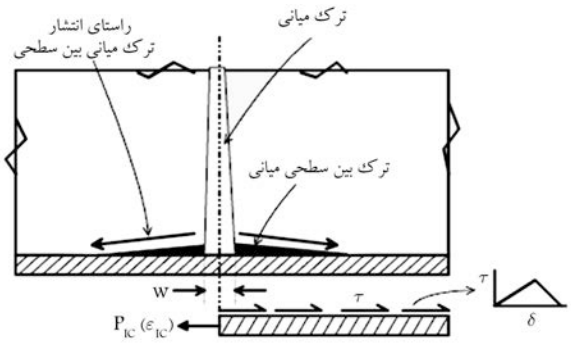
مقدمه

در مسئله‌ی قابلیت بهره‌برداری سازه‌های بتن‌آرمه، ترک‌خوردگی و تغییر مکان (خیز) از مهم‌ترین پارامترها به‌شمار می‌آیند. ایجاد ترک و بازشدن آن در عضو بتن‌آرمه، نفوذ رطوبت و همچنین نفوذ یون‌های مخرب را ممکن می‌سازد و خوردگی میلگردها را به دنبال خواهد داشت. گذشته از مسئله‌ی خوردگیِ میلگرد، وجود ترک یا ایجاد آن ــ به‌ویژه در تیرها و دال‌های بتن‌آرمه ــ از نقطه‌نظر ظاهری، امنیت و آرامش روانی استفاده‌کنندگان را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این موضوع به‌قدری حائز اهمیت است که برخی از محققین، تأثیر ترک بر خوردگی میلگرد را در مقایسه با جنبه‌ی ظاهری آن از دید مسائل روانی، کم‌اهمیت ارزیابی کرده‌اند، و به‌بیان گرگلی[1] «تنها دلیل واقعی برای محدودکردن ترک‌های سطحی در بسیاری از سازه‌ها ظاهرِ عضو بتن‌آرمه است.»

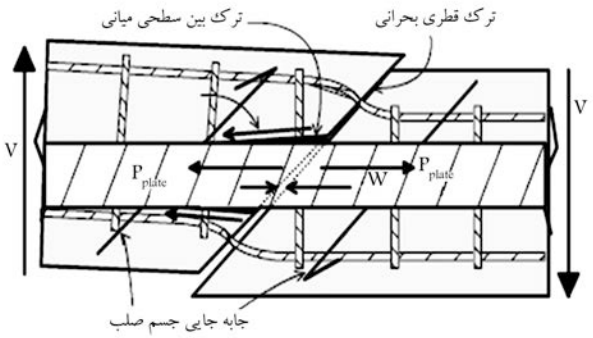
درمورد سازه‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات الیاف مسلح پلیمری (FRP)[2]، اهمیت ترک‌خوردگی دوچندان می‌شود. به‌عبارت دیگر مسائل مرتبط با خوردگی میلگرد و جنبه‌ی ظاهریِ موضوع از یک طرف و مسئله‌ی تأثیرات ترک‌خوردگی بر جداشدگی[3] ورق تقویتی و تأثیر بر بار نهایی گسیختگی عضو از طرف دیگر، مسئله‌یی است که باید در طراحی سازه به‌دقت مورد توجه قرارگیرد. در شکل ۱ دو نوع از جداشدگی‌های نابه‌هنگام و زودرس که در سازه‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات FRP به وقوع می‌پیوندد و ترک عامل اصلی ایجاد آن است، نشان داده شده است. نوع اول که جداشدگی ناشی از ترک میانی[4] است (شکل ۱الف)، با

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۱/۱۴، اصلاحیه ۱۳۸۸/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۴/۱۶.

Archive of SID
www.SID.ir



الف) جداشدگی ناشی از ترک میانی؛



ب) جداشدگی ناشی از ترک بحرانی فطری.[۲]

شکل ۱. دو نوع جداشدگی محتمل در تیرهای تقویت شده با صفحات تقویتی.

تشکیل ترک‌های خمشی یا ترک‌های خمشی ـ برشی در مجاورت ورق تقویتی ایجاد می‌شود. نوع دوم که از آن با عنوان «جداشدگی ناشی از ترک قطری بحرانی[۵]» یاد می‌کنند، به‌دلیل تغییر شکل‌های برشی ـ قائم در تیر به وقوع می‌پیوندد (شکل ۱ ب). در هر دو نوع جداشدگی، ایجاد ترک و عریض‌شدن آن نقشی اساسی در گسیختگی و بار نهایی عضو دارد. به‌دلیل اهمیت موضوع، مباحثِ کنترل ترک‌خوردگی، عرض ترک، فواصل بین ترک‌ها و همچنین میزان تغییر مکان (خیز) ــ که ارتباط بسیار نزدیکی با بحث ترک‌خوردگی دارد ــ به‌عنوان یکی از مباحث اساسی و در قالب بخش‌هایی از آیین‌نامه‌های سازه‌های بتن‌آرمه گنجانیده شده است. در این رابطه، دیدگاه آیین‌نامه‌های مختلف برای کنترل عرض ترک متفاوت است. مثلاً آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۹۵، یک حد بالایی را برای تنش فولاد در مقطع ترک‌خورده در نظر می‌گیرد و در محاسبه‌ی این حد، از روابطی استفاده می‌کند که وابسته به فواصل آرماتور و مقدار پوشش بتن روی آرماتور است.[۳] همچنین آیین‌نامه‌ی استرالیا، (۲۰۰۱) AS ۳۶۰۰، دو مجموعه از مقادیر حدی را برای تنش آرماتور لحاظ می‌کند که در یکی مقادیر متفاوت قطر آرماتور و در دیگری، فواصل مختلف آرماتورها در نظر گرفته شده است.[۴] استاندارد انگلیس، BS ۸۱۱۰، فاصله‌ی آزاد بین آرماتورهای کششی را برای مقادیر مختلف بازتوزیع لنگر اعمال‌شده در یک مقطع، مشخص می‌سازد.[۵]

علت تفاوت در توصیه‌های آیین‌نامه‌های مختلف، بیشتر ناشی از این واقعیت است که برای کنترل مسئله‌ی ترک‌خوردگی از روابط متفاوتی استفاده می‌شود. تحقیق در روابط محاسبه‌ی عرض ترک که توسط محققین مختلف انجام شده نشان می‌دهد که هر رابطه شامل مجموعه‌ای متفاوتی از متغیرهاست. تقریباً بیشتر محققان در این زمینه، تنش (یا کرنش) آرماتور را به‌طریقی در روابط خود گنجانده‌اند ولی سایر متغیرها ــ مثل قطر آرماتور، پوشش بتن، نسبت آرماتور (ρ)، عمق مؤثر و سایر پارامترها که در هر رابطه لحاظ شده ــ مشابه یکدیگر نیست. به‌علاوه نحوه‌ی تأثیر این پارامترها نیز در هر رابطه به‌گونه‌یی متفاوت بوده، و بنابراین در محاسبه‌ی عرض ترک محاسباتی توسط این روابط تأثیرگذار است.

در این تحقیق، اثرات آرایش‌های مختلف میلگردهای کششی در بحث ترک‌خوردگی و فواصل بین ترک‌های ایجادشده در تیرهای بتن‌آرمه (بدون تقویت و تقویت شده با صفحات FRP)، به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرارگرفته است. در این ارتباط، نتایج حاصل از مشاهدات تجربی انجام شده در این تحقیق با برخی از روابط پیشنهادی سایر محققان نیز مقایسه شده است.

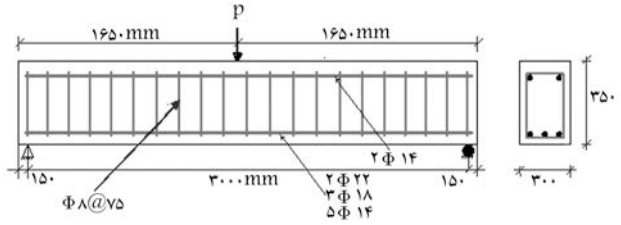
اهمیت موضوع

در مسئله‌ی تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه با استفاده از ورقه‌های FRP، گسیختگی‌های موضعی بین صفحات تقویتی و آرماتورهای کششی حادث می‌شود. این گسیختگی‌ها تیر را از رسیدن به ظرفیت خمشی بیشینه بازمی‌دارد و باعث ایجاد گسیختگی‌های زودهنگام در تیر می‌شود که باید در روند طراحی لحاظ شود. برخی از پارامترهای دخیل در این موضوع، همانند اثرات تعداد و ضخامت لایه‌های ورق تقویتی، محل قطع ورق، نحوه‌ی قطع و... توسط محققان مختلف بررسی و در روابط طراحی گنجانده شده است. در این تحقیق اثرات آرایش داخلی میلگردهای خمشی اصلی بر نحوه‌ی ایجاد ترک، فواصل ترک و عرض بازشدگی ترک و اثرات آن‌ها بر جداشدگی ورق تقویتی مورد بررسی قرارگرفته است.

مشخصات نمونه‌های آزمایشی

در این تحقیق جمعاً ۱۲ آزمایش خمشی بر روی ۹ تیر بتن‌آرمه در مقیاس واقعی انجام شد. تیرها هریک به‌طول ۳٫۳ متر و به‌ابعاد مقطع ۳۵۰ × ۳۰۰ میلی‌متر، مطابق شکل ۲، به‌صورت خمش سه‌نقطه‌یی در وسط دهانه مورد آزمایش قرار گرفتند. در این شکل همچنین جزئیات آرماتورگذاری تیر نشان داده شده است.

معرفی تیرهای مورد آزمایش به‌همراه مشخصات فولادهای تسلیح داخلی و تقویت خارجی در جدول ۱، و مشخصات مصالح به‌کار رفته در تیرها در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق جدول ۱، سه عدد از نمونه‌ها (I۵۰۰، I۳۰۰ و I۲۰۰) نمونه‌های بدون تقویت است. این نمونه‌ها به‌عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شد. تیرهای I۲۲۱، I۳۲۱، و I۵۲۱ نیز هرکدام توسط دو لایه ورق تقویتی CFRP به‌ضخامت ۰٫۱۲ میلی‌متر و عرض ۱۵۳ میلی‌متر به‌صورت خارجی در وجه زیرین تیر و به‌صورت روش لایه‌یی مرطوب[۶] تقویت شدند. تیرهای I۲۲۱-CR، I۳۲۱-CR و I۵۲۱-CR از لحاظ تقویت دقیقاً مشابه نمونه‌های قبلی بوده و فقط پس از اعمال باری معادل بار سرویس و ایجاد ترک‌های ناشی از بارگذاری اولیه تقویت شده‌اند. لازم



شکل ۲. جزییات تیر و آرماتورگذاری.

Archive of SID
www.SID.ir

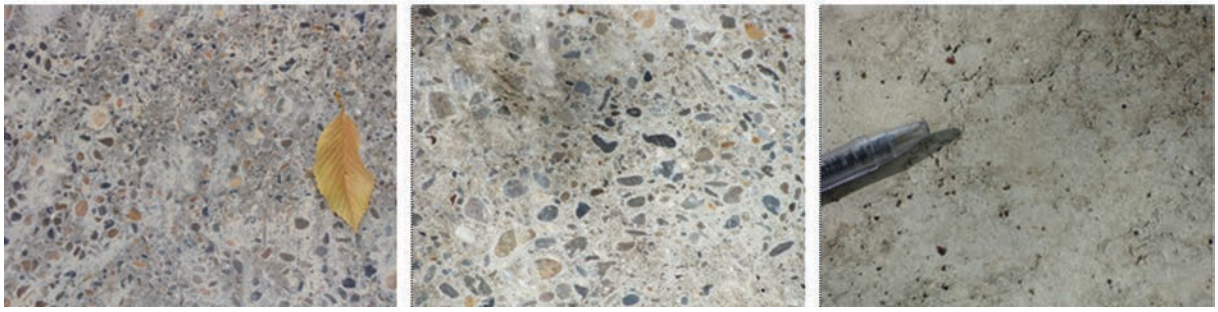
جدول ۱. تعریف نمونه‌های مورد آزمایش.

نمونه‌ها	فولاد کششی	A_s (mm^2)	f_y (MPa)	تعداد لایه‌ها	A_f(mm^2)***	بار اعمالی
I۲۰۰	۲Φ۲۲	۷۶۰	۴۲۳	-	-	P_u*
I۳۰۰	۳Φ۱۸	۷۶۳	۴۴۴	-	-	P_u
I۵۰۰	۵Φ۱۴	۷۷۰	۴۳۵	-	-	P_u
I۲۲۱	۲Φ۲۲	۷۶۰	۴۲۳	۲	۳۶/۷۲	P_u
I۳۲۱	۳Φ۱۸	۷۶۳	۴۴۴	۲	۳۶/۷۲	P_u
I۵۲۱	۵Φ۱۴	۷۷۰	۴۳۵	۲	۳۶/۷۲	P_u
I۲۰۰-CR	۲Φ۲۲	۷۶۰	۴۲۳	-	-	٪۷۰ P_L **
I۳۰۰-CR	۳Φ۱۸	۷۶۳	۴۴۴	-	-	٪۷۰ P_L
I۵۰۰-CR	۵Φ۱۴	۷۷۰	۴۳۵	-	-	٪۷۰ P_L
I۲۲۱-CR	۲Φ۲۲	۷۶۰	۴۲۳	۲	۳۶/۷۲	P_u
I۳۲۱-CR	۳Φ۱۸	۷۶۳	۴۴۴	۲	۳۶/۷۲	P_u
I۵۲۱-CR	۵Φ۱۴	۷۷۰	۴۳۵	۲	۳۶/۷۲	P_u

* بار نهایی؛ ** بار ناحیه‌ی کشسان؛ *** سطح مقطع ورق تقویتی.

جدول ۲. مشخصات مصالح مصرفی.

کرنش پارگی (mm/mm)	مدول کشسانی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت هر لایه (mm)	نوع ورق	مشخصات ورق تقویتی الیاف تک‌جهته
۰/۰۱۷	۲۳۱	۴۱۰۰	۰/۱۲	SikaWrap Hex-۲۳۰C	
مدول خمشی (MPa)	**مدول کششی (MPa)**	**مقاومت کششی (MPa)**	**ضخامت هر لایه (mm)**	**نوع چسب**	**مشخصات چسب**
۳۰۰۰	۳۵۰۰	۴۵	۰/۴	Epoxy dur-۳۰۰	
مقاومت کششی برزیلی (MPa)	**مدول کشسانی (MPa)**	**f'_c زمان آزمایش (MPa)**	**f'_c زمان ساخت (MPa)**	**بزرگ‌ترین اندازه‌ی دانه (mm)**	**مشخصات بتن**
۲/۲	۲۶۵۸۷	۳۲	۳۰	۱۰	



شکل ۳. وضعیت سطح بتن (به‌ترتیب از راست به‌چپ)، قبل از آماده‌سازی، پس از زدن ساب و پس از پرکردن حفره‌ها.

به ذکر است که در تمام نمونه‌های تقویت‌شده با CFRP، ابتدا شیره‌ی سطحی بتن توسط دستگاه ساب، به‌میزان ۲ میلی‌متر برداشته شده است. سپس محل حفره‌های ایجادشده در سطح بتن، به‌کمک ملات تعمیری Epoxy Dur ۳۱ N، ترمیم شد و پس از گیرش آن، ورقه‌های CFRP به سطح بتن چسبانده شدند. در شکل ۳ وضعیت سطح بتن قبل از ساب‌زنی، پس از ساب و بعد از پرکردن حفره‌ها نشان داده شده است.

مقدار آرماتور کششی موجود در نمونه‌ها براساس طرح بتن‌های تحت مسلح[۷] انجام شده است تا از هرگونه گسیختگی ترد بتن در ناحیه‌ی فشاری اجتناب شود. این مقدار آرماتور به‌گونه‌یی است که نسبت فولاد، ρ، برای کلیه‌ی تیرها حدود ۰/۰۰۸ رعایت شود. این مقدار تقریباً معادل $0/25\rho_b$ در تیرهاست (ρ_b درصد فولاد متوازن مقطع است). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار آرماتور کششی به‌لحاظ سطح مقطع برای کلیه‌ی تیرها یکسان است و فقط از نظر آرایش آرماتورگذاری

www.SID.ir

تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌ها وجود دارد. همچنین مقدار آرماتور برشی تیرها به‌گونه‌یی است که پس از تقویت و تحت بارهای افزایش یافته، گسیختگی برشی در نمونه‌ها ایجاد نشود.

از نقطه‌نظر ظاهری و نگرش مقاومتی، آرایش مختلف آرماتورگذاری اثر چندانی بر بار نهایی تیر ندارد و فقط به‌لحاظ رفتاری و به‌خصوص وضعیت تغییر شکل و نحوه‌ی ترک‌خوردگی ممکن است تفاوت‌هایی در نمونه‌ها حاصل شود. این موضوع در ادامه‌ی بحث به‌تفصیل مورد توجه قرار خواهد گرفت.

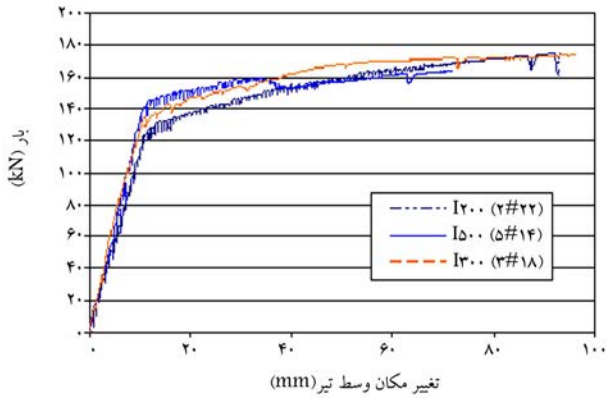
روش انجام آزمایش و تجهیزات مورد استفاده

کلیه‌ی تیرها به‌صورت دو سر مفصل با بارگذاری ایستا در وسط دهانه مورد آزمایش قرار گرفتند. برای حصول اطمینان از مفصلی‌بودن تکیه‌گاه، از یک سیستم غلتکی در محل نشیمن تیر استفاده شده است. همچنین به‌منظور توزیع مناسب بار و اجتناب از تمرکز تنش ناشی از بارهای اعمالی، سه ورق فولادی به‌طول ۲۰۰ میلی‌متر و عرضی معادل عرض مقطع تیر و به‌ضخامت ۲۰ میلی‌متر در وسط دهانه و نیز در ناحیه‌ی تکیه‌گاه‌ها قرار داده شده است. قبل از اعمال بار، ورق ناحیه‌ی بارگذاری با استفاده از گروت (آراکس ۵۱۹) تراز شده است. بارگذاری به‌شیوه‌ی کنترل تغییر مکان[8] با استفاده از نرم‌افزار سیستم کنترل فراگیریِ اطلاعات (DACS)[9] و به‌صورت دونرخی در طول مدت آزمایش انجام شده است. نرخ بارگذاری در ابتدای آزمایش و تا قبل از تغییر مکان ۲۵ میلی‌متری در وسط دهانه به‌صورت ۱ میلی‌متر در ۱۰۰ ثانیه، و در ناحیه‌ی غیرخطی پس از مرحله‌ی تسلیم آرماتورهای کششی، با نرخ ۱ میلی‌متر در ۳۰ ثانیه منظور شد.

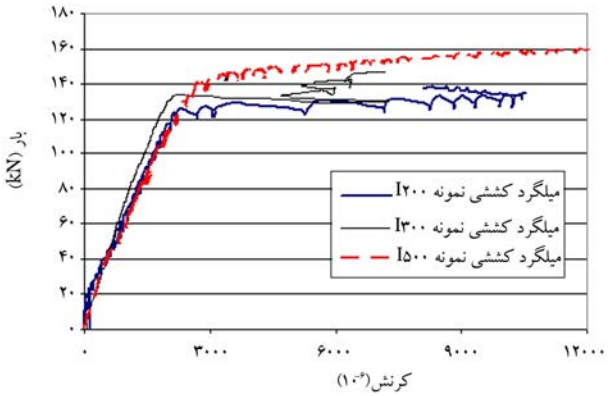
برای اندازه‌گیری تغییر مکان در وسط تیر و نیز در طول تیر و ناحیه‌ی تکیه‌گاه‌ها، از ۵ عدد مبدل تغییر مکان بی‌ثبات خطی (LVDT)[10] استفاده شده است. میزان کرنش در ناحیه‌ی وسط تیر در قسمت فشاری بتن، کرنش آرماتور کششی و کرنش آرماتور فشاری، و همچنین کرنش حداقل در ۹ نقطه از طول ورق تقویتی، با استفاده از نصب کرنش سنج‌های الکتریکی در طول زمان آزمایش اندازه‌گیری شد. علاوه بر کرنش سنج الکتریکی در وسط تیر، از کرنش سنج مکانیکی[11] نیز در ناحیه‌ی فشاری بتن، استفاده شده است. در ناحیه‌ی اعمال بار در زیر جک هیدرولیکی، از یک بارسنج[12] ۵۰ تنی استفاده شد. برای اطمینان از درستی توزیع بار در تکیه‌گاه‌ها نیز از دو عدد بارسنج ۳۰ تنی استفاده شد.

پاسخ کلی نمونه‌های تقویت نشده

چنانچه در قسمت تعریف نمونه‌ها بیان شد، سه عدد از نمونه‌ها (I۲۰۰، I۳۰۰ و I۵۰۰) تا حد بار نهایی، به‌شیوه‌ی کنترل تغییر مکان تحت بارگذاری قرار داده شدند. رفتار هر سه نمونه مطابق شکل ۴الف و به‌صورت کاملاً انعطاف‌پذیر انجام شد، به‌طوری که پس از ایجاد تغییر شکل‌های بسیار بزرگ در تیر و در مجاورت گوشه‌های صفحه‌ی بارگذاری خردشدگی بتن حادث شد. اولین ترک در همه‌ی نمونه‌ها در بار ۲۳ تا ۲۵ کیلونیوتن مشاهده شده است. تسلیم آرماتورهای کششی در ناحیه‌ی وسط تیر نیز در بار ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلو نیوتن، انجام شده است (شکل ۴ب). لازم به ذکر است که در باری بین دو حد بار ترک‌خوردگی و بار تسلیم آرماتورها، ترک‌های خمشی دیگری در تیرها به وقوع پیوست که برای هریک از نمونه‌های مورد آزمایش، به‌صورت هم‌زمان، ترک ایجادشده در هر مرحله از بارگذاری به‌همراه میزان بار مربوطه ثبت شد.



الف) منحنی بار-تغییر مکان وسط نمونه های شاهد؛



ب) منحنی بار-کرنش آماتور کششی نمونه های شاهد.

شکل ۴. منحنی های بار - تغییر مکان و بار - کرنش آرماتور کرنش در نمونه های شاهد.

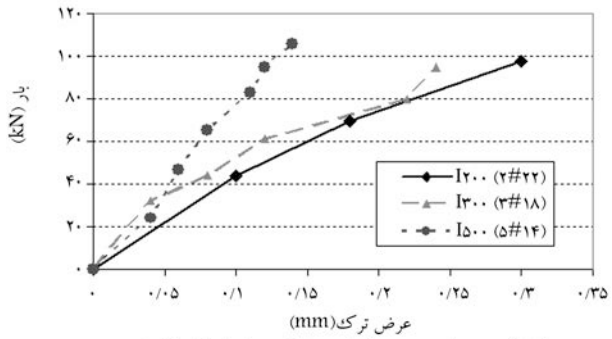
نمودار فاصله‌ی متوسط ترک‌های ایجادشده در طول ۲ متر وسط تیر، تا حد ۷۰٪ بار خطی ناحیه‌ی کشسان، در شکل ۵الف نشان داده شده است. بار ۷۰٪ ناحیه‌ی کشسان، حدوداً معادل بار شرایط بهره‌برداری سازه‌های بتن‌آرمه است. با توجه به‌این منحنی، با زیادشدن تعداد آرماتورها و در یک‌درصد ثابت فولاد کششی، فواصل ترک در یک بار ثابت کاهش می‌یابد. این مطلب، با توجه به یکسان بودن میزان تغییر شکل‌های ایجادشده در تیر، به‌معنای بازشدگی بیشتر عرض ترک در تیرهای با تعداد آرماتور کم‌تر است.

شکل ۵ب عرض بازشدگی بزرگ‌ترین ترک خمشی را در بارهای کشسان برای تیرهای مورد نظر نشان می‌دهد. مقادیر عرض ترک در لحظه‌ی ایجاد و در فواصل زمانی مختلف از شروع آزمایش، توسط دستگاه ریزسنج با دقت ۰٫۰۲ میلی‌متر در ارتفاع ۳۰ میلی‌متری از دورترین تار کششی تیر اندازه‌گیری شد و به‌همراه ارتفاع پیش‌رَوی ترک و بار مربوطه، در مراحل مختلفِ بارگذاری ثبت شد. سپس با فرض خطی‌بودن کرنش در ارتفاع مقطع عضو خمشی، عرض ترک در سطح زیرین تیر محاسبه شد. برای این منظور عرض ترک اندازه‌گیری شده در ضریب بزرگ نمایی β طبق رابطه‌ی ۱ ضرب شده است (شکل ۶الف).

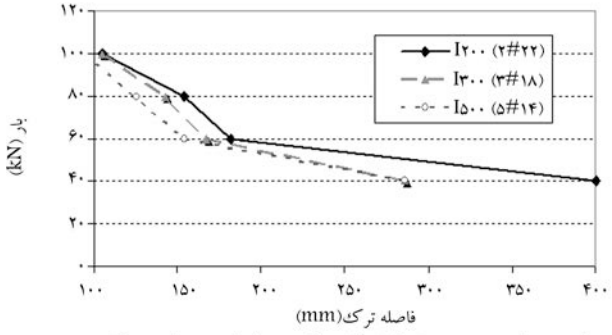
$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{h-c}{h-c-d_1} \qquad (1)$$

در این رابطه ε_2 و ε_1 به‌ترتیب کرنش در سطح زیرین تیر و در محل اندازه‌گیری عرض ترک، h ارتفاع مقطع تیر، c فاصله‌ی محور خنثی تا دورترین تار فشاری و

Archive of SID
www.SID.ir

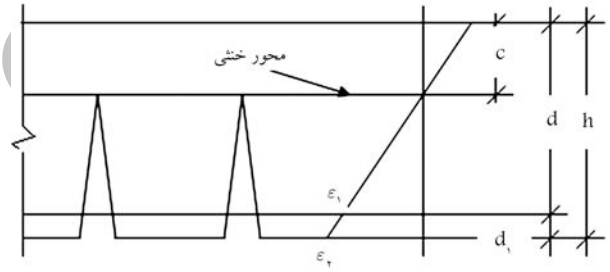


الف) منحنی بار برحسب فاصله ی ترک در نمونه های شاهد؛

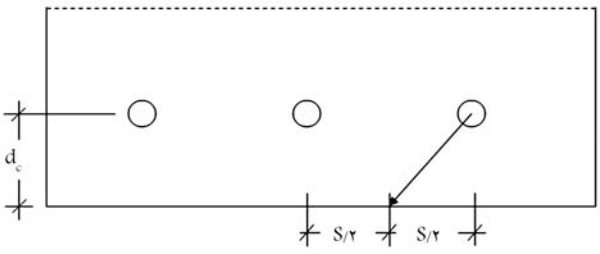


ب) منحنی بار برحسب عرض بازشدگی ترک در ۳۰ میلی متری از وجه کششی تیر.

شکل ۵. منحنی بار - فاصله ترک و بار - عرض بازشدگی ترک در نمونه های شاهد.



الف) فرض تغییرات خطی کرنش برای محاسبه ی عرض ترک در وجه کششی تیر؛



ب) فاصله ی پوشش کنترل کننده ی فواصل ترک.[۷]

شکل ۶. تغییرات خطی کرنش و فاصله پوشش کنترل کننده و فواصل ترک.

d_1 فاصله‌ی محل اندازه‌گیری عرض ترک تا دورترین تار کششی مقطع تیر (در این تحقیق ۳۰ میلی‌متر) است. چنانچه در شکل ۵ب مشاهده می‌شود، در بارهای مساوی مقدارِ بازشدگیِ عرض بزرگ‌ترین ترک خمشی در تیرهای با تعداد آرماتور کم‌تر، بیشتر است. در جدول ۳ خلاصه‌یی از نتایج آزمایشات مربوط به وضعیت ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تقویت‌نشده آورده شده است.

چنانچه مشاهده می‌شود، ترک بحرانی ایجادشده در نزدیکی ناحیه‌ی میانی

جدول ۳. خلاصه‌یی از مشخصات ترک‌خوردگی نمونه‌های شاهد.

نوع نمونه	d^a_{cr}	$\varepsilon^b_{\%۶۰}$	P^c_e	w^d_{cr}	S^e_{cr-l}	S^f_{cr-u}
I۲۰۰	۰	۱۲۶۹	۸۱	۰٫۲۸	۱۵۲	۹۵
I۳۰۰	۲۰۰	۱۵۳۷	۹۵	۰٫۲۶	۱۱۵	۸۷
I۵۰۰	۳۰۰	۱۶۳۳	۷۹	۰٫۱۲	۱۲۴	۸۳

a: فاصله‌ی ترک بحرانی از وسط تیر (mm)

b: کرنش متناظر با تنش f_y ۶۰٪ در آرماتور کششی (میکرو استرین)

c: بار ایجاد کننده‌ی تنش f_y ۶۰٪ (kN)

d: عرض بازشدگی ترک در پایین تیر در بار ایجاد کننده‌ی تنش f_y ۶۰٪ (mm)

e: فواصل متوسط بین ترک‌ها متناظر با تنش f_y ۶۰٪ (mm)

f: فواصل متوسط بین ترک‌ها در بار نهایی (mm)

تیرها که دارای مقادیر بیشینه‌ی لنگر خمشی و نیروی برشی است، حاکی از رفتار درست نمونه‌هاست. همچنین عرض بازشدگی ترک بحرانی در وجه کششی تیر (ستون ۵ جدول)، مشابه عرض ترک در وجه جانبی تیر، برای نمونه‌های با قطر میلگرد بزرگ‌تر دارای مقدار بیشتری است. مقایسه‌ی فاصله‌ی متوسط ترک در بار ایجاد کننده‌ی ۶۰٪ تنش تسلیم میلگردها و بار نهایی (ستون ۶ و ۷ جدول)، نشان می‌دهد که با اعمال بارهای بزرگ‌تر از بار سرویس، امکان کاهش فاصله‌ی بین ترک‌ها نیز وجود دارد. در این خصوص پژوهش‌گران بر این باورند که برای پوشش بتن تا حدود ۷۵ میلی‌متر، یک تنش بحرانی برای آرماتورهای کششی وجود دارد که در آن، فواصل بین ترک‌ها ثابت می‌شود.[۶] این مقدار تنش را حدود ۱۴۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال (ksi ۳۰-۲۰) ذکر کرده‌اند. با توجه به شکل ۴ب مقدار تنش فوق در محدوده‌ی بار ۴۵ تا ۶۵ کیلو نیوتن قرار می‌گیرد. در این محدوده‌ی بار نیز، چنانچه در شکل ۵الف مشاهده می‌شود، وضعیت فاصله‌ی بین ترک‌ها هنوز به حالت پایدار نرسیده است. بررسی ترک‌های ایجادشده در تیرهای با آرایش مختلف میلگردهای کششی نشان می‌دهد که در حدود تنش تسلیم آرماتورهای کششی، فواصل بین ترک‌های خمشی، به حالت تقریباً پایدار می‌رسند.

تحلیل ترک در تیرهای بتن‌آرمه

مسئله‌ی کنترل ترک‌های خمشی با استفاده از روش کمیت z، از سال ۱۹۷۱ در آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا، ACI ۳۱۸ لحاظ شد. این روش از رابطه‌ی اصلاح شده‌ی گرگلی ـ لوتز (رابطه‌ی ۲)، که براساس یک ارزیابی آماری از اطلاعات مربوط به عرض ترک‌های حاصل از آزمایشات به دست آمد،[۷] گرفته شده است.

$$w_b = ۱٫۱۰۲ \times ۱۰^{-۵} \beta / f_s \sqrt[۳]{d_c A} \qquad (۲)$$

در این رابطه w_b بیشترین عرض بازشدگی پایین ترک به میلی‌متر، β نسبت فاصله‌ی محور خنثی از دورترین تار کششی مقطع به‌فاصله‌ی محور خنثی تا مرکز آرماتورهای کششی، f_s تنش میلگرد برحسب مگاپاسکال، d_c پوشش محافظ بتن در ناحیه‌ی آرماتورهای کششی محاسبه‌شده از مرکز آرماتور برحسب میلی‌متر و A مساحت مؤثر متوسط بتنِ اطراف میلگردهای کششی برحسب $mm^۲$ است. چنانچه مشاهده می‌شود، در رابطه‌ی فوق پوشش بتن نقش اساسی در کنترل عرض ترک دارد و طراحان برای کاهش عرض ترک، ترغیب به کاهش پوشش بتن می‌شوند. محققین

Archive of SID
www.SID.ir

از رابطه‌ی ۳ برای محاسبه‌ی بیشترین عرض بازشدگی پایین ترک استفاده کردند که همه‌ی متغیرهای آن مشابه رابطه‌ی ۲ است.[۸]

$$w_b = ۸/۴۰۷ \times ۱۰^{-۵}\beta/f_s\sqrt[۴]{A} \qquad (۳)$$

طبق تحقیقات اخیر ثابت شده که پوشش بیشتر بتن بر روی آرماتورها، باعث بهبود شرایط دوام بتن می‌شود. به‌همین دلیل در روابط جدیدِ محاسبه‌ی عرض ترک، سعی شده این مسئله لحاظ شود. در یک رویکرد فیزیکی، بازشدگی عرض ترک در سطح آرماتورهای کششی با رابطه‌ی ۴ نشان داده شده است:[۷]

$$w_c = \varepsilon_s/S_c \qquad (۴)$$

که در آن w_c عرض ترک، $\varepsilon_s = f_s/E_s$ کرنش فولاد کششی، S_c فاصله‌ی بین ترک‌ها، f_s تنش فولاد کششی و E_s مدول ارتجاعی آرماتور کششی است. در رابطه‌ی ۴ فرض بر آن است که آرماتور کششی در طول فاصله‌ی ترک به‌صورت یکنواخت کشیده می‌شود. همچنین از کرنش کششی بتن در مقابل کرنش کششی آرماتور، به‌دلیل مقدار کم آن، صرف نظر شده است. صرف نظر از کرنش کششی بتن، منجر به تخمین محافظه‌کارانه‌تری از عرض ترک می‌شود.

براساس تحقیقات تجربی و تحلیلی انجام‌شده،[۹] فواصل بین ترک‌ها به بیشینه پوشش بتن بستگی دارد. کم‌ترین فاصله‌ی ترک‌های نظری برابرِ فاصله‌ی نقطه‌ی شروع ترک‌خوردگی تا مرکز نزدیک‌ترین آرماتور در نظر گرفته شد. همچنین نسبت بین فواصل بیشینه به کمینه‌ی ترک‌ها را معادل ۲ در نظر گرفت. با توجه به توضیح فوق، فواصل بین ترک‌ها به شکل رابطه‌ی ۵ نشان داده شد:

$$S_c = \Psi_s \cdot d^* \qquad (۵)$$

که در آن، S_c فاصله‌ی ترک‌خوردگی، d^* فاصله‌ی پوشش کنترل‌کننده (مطابق شکل ۶ب) و Ψ_s ضریب فاصله‌ی ترک ($\Psi_s = ۱/۰$ برای کم‌ترین فاصله‌ی ترک، ۱/۵ برای متوسط فاصله‌ی ترک و ۲ برای بیشترین فاصله‌ی ترک) است. بیشینه‌ی بازشدگی عرض ترک در وجه کششی تیر با استفاده از رابطه‌ی ۴ به‌صورت رابطه‌ی ۶ بیان شد. در این رابطه $\beta = ۱/۰ + ۰/۰۸d_c$ است.

$$w_c = ۲\frac{f_s}{E_s}\beta\sqrt{d_c^۲ + \left(\frac{s}{۲}\right)^۲} \qquad (۶)$$

در یک مطالعه‌ی تحلیلی، رابطه‌ی تجربی ۷ برای محاسبه‌ی فواصل بین ترک‌ها در تیرهای بتن‌آرمه با عمق مؤثر دست‌کم ۳۰۰ میلی‌متر ($d \geq ۳۰۰\,\text{mm}$) پیشنهاد شد.[۲]

$$l_c = \left[\frac{۲۰۰}{f_s} + ۰/۵\right] l_f \qquad (۷)$$

که در آن l_c فاصله‌ی بین ترک‌ها به mm و f_s تنش در آرماتور کششی به MPa است. در این رابطه برای محاسبه‌ی l_f از روابط ۸الف و ۸ب استفاده می‌شود:

$$l_f = ۹e' + (۰/۶۵ + ۰/۳۵e')(\Phi - ۱۰) \quad if\ \ \Phi > ۱۰\ \text{mm} \qquad (۸\text{الف})$$

$$l_f = ۹e' \quad if\ \ \Phi \leq ۱۰\ \text{mm} \qquad (۸\text{ب})$$

در رابطه‌ی ۸، Φ قطر آرماتور به میلی‌متر و $e' = (۰/۸ + ۰/۲c')e$، $c' = c/\Phi$ و $e = b/(m\Phi)$ است که در آن c پوشش خالص بتن به میلی‌متر، b عرض مقطع تیر به میلی‌متر و m تعداد میلگرد کششی تیر است. همچنین برای محاسبه‌ی عرض ترک در تیرها ($d \geq ۳۰۰\,\text{mm}$) رابطه‌ی ۹ پیشنهاد شد:[۱۰]

$$W_{s,\max} = ۲W_f\left[۱ - \frac{۴۰۰ - f_s}{۴۰۰ + ۵۰۰W_f}\right] \quad (\text{mm}) \qquad (۹)$$

که در آن $W_{s,\max}$ بیشینه‌ی بازشدگی عرض ترک در تراز میلگردهای کششی است. W_f نیز از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$W_f = ۰/۰۰۷\left\{e' + ۰/۲\Phi(۱ + ۰/۴e')\right\} \quad (\text{mm}) \qquad (۱۰)$$

حداکثر عرض بازشدگی ترک در سطح کششی تیر ($W_{t,\max}$)، از رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آید؛ که h، عمق کلی تیر به میلی‌متر است.

$$W_{t,\max} = W_{s,\max}\left\{۱/۴۳(h/d) - ۰/۴۳\right\} \qquad (۱۱)$$

با توجه به موارد فوق، مقادیر عرض بازشدگی ترک‌ها در نمونه‌های شاهد، در باری معادل ۶۰٪ تنش تسلیم آرماتورهای کششی و مقادیر عرض ترک که توسط روابط ۲، ۳، ۶ و ۱۱ که در این تحقیق به آن‌ها اشاره شده است، در جدول ۴ نشان داده شده است. چنانچه از نتایج ارائه‌شده در این جدول مشاهده می‌شود، روابط ۲ (گرگلی ـ لوتز) و ۳ (کارومانک) نسبت به روابط ۶ (برس) و ۱۱ (پیاسنا)، برای پیش‌بینی عرض ترک، نتایج غیر واقعی‌تری را ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که در آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۹۵ و نسخه‌های قبل از آن، برای پیش‌بینی عرض بازشدگی ترک، از نتایج تحقیقات گرگلی-لوتز استفاده می‌شد ولی در ویرایش جدید آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۰۲، از یافته‌های برس برای پیش‌بینی عرض ترک استفاده شده است.

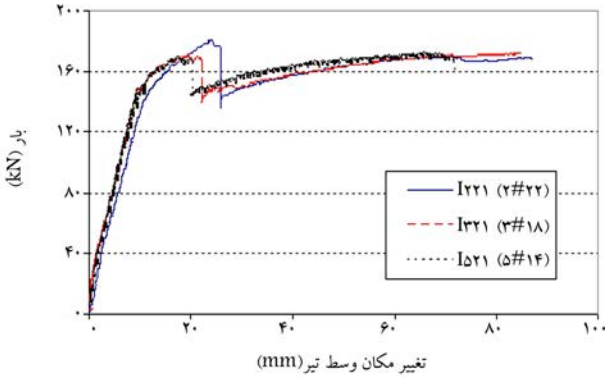
پاسخ کلی نمونه‌های تقویت‌شده

منحنی‌های بار ـ تغییر مکان وسط تیر برای نمونه‌های تقویت شده در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷الف نشان‌دهنده‌ی منحنی بار ـ تغییر مکان برای نمونه‌هایی است که قبل از اعمال هرگونه بار، ورق‌های CFRP بر روی وجه زیرین

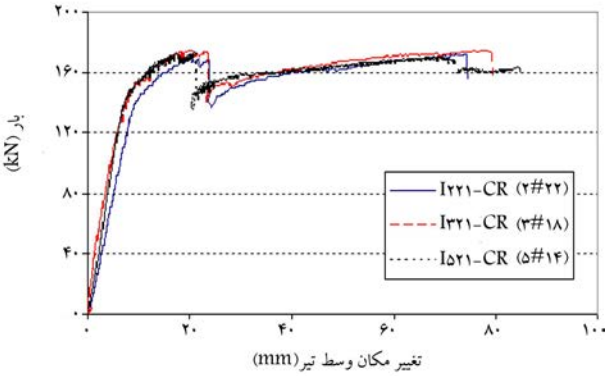
جدول ۴. مقایسه‌ی پیش‌بینی عرض ترک در نمونه‌های شاهد با روابط سایر محققان (mm).

نوع نمونه	عرض ترک (mm)	رابطه‌ی ۲ (گرگلی-لوتز)	در صد خطا	رابطه‌ی ۳ (کارومانک)	در صد خطا	رابطه‌ی ۶ (برس)	درصد خطا	رابطه‌ی ۱۱ (پیاسنا و همکاران)	در صد خطا
I۲۰۰	۰/۲۸	۰/۳۴۸۲	۲۴	۰/۳۲۶۴	۱۷	۰/۳۲۹۱	۱۸	۰/۳۱۴۵	۱۲
I۳۰۰	۰/۲۶	۰/۳۰۵۸	۱۶	۰/۳۰۱۵	۱۶	۰/۲۱۳۳	۱۸	۰/۲۴۷۱	۵
I۵۰۰	۰/۱۲	۰/۲۴۱۶	۱۰۱	۰/۲۵۳۲	۱۱۱	۰/۱۵۵۳	۲۹	۰/۱۷۶۲	۴۷
متوسط خطا			۴۷		۴۸		۲۲		۲۱

Archive of SID
www.SID.ir



الف) بدون اعمال بار سرویس قبل از تقویت؛

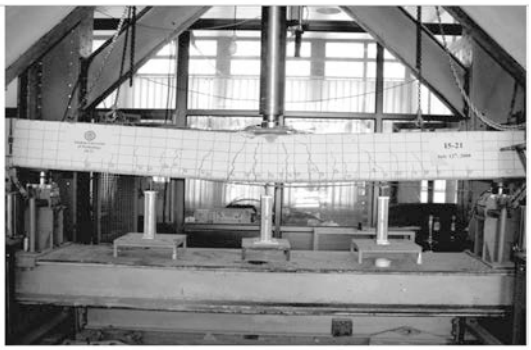


ب) با اعمال بار سرویس.

شکل ۷. منحنی بار ـ تغییر شکل برای تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت شده.

آن‌ها چسبانده شده‌اند. شکل ۷ب منحنی بار ـ تغییر مکان را برای نمونه‌هایی نشان می‌دهد که قبل از تقویت، حدود ۷۰٪ بار ناحیه‌ی کشسان را تجربه کرده و در آن‌ها، ترک‌های خمشی ایجاد شده است. عرض ترک‌های خمشی ایجادشده در این تیرها قبل از باربرداری به حدود ۰٫۳ میلی‌متر می‌رسد. جداشدگی در کلیه‌ی نمونه‌ها، از نوع جداشدگی میانی و در باری حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ کیلو نیوتن انجام شده است. هنگام جداشدگی ورق تقویتی، معمولاً لایه‌یی از پوشش بتن به‌ضخامت حداقل ۳ میلی‌متر و در مواردی تا ضخامت ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر به سطح ورق تقویتی متصل می‌ماند، که نشان می‌دهد گسیختگی در لایه‌ی بتن انجام شده است. در شکل ۸الف، نمایی کلی از تیر بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات CFRP به‌همراه تجهیزات جانبی متصل به آن، در لحظه‌ی جداشدگی ورق تقویتی نشان داده شده است. در شکل ۸ب نیز نمایی نزدیک از جداشدگی میانی ورق نشان داده شده است.

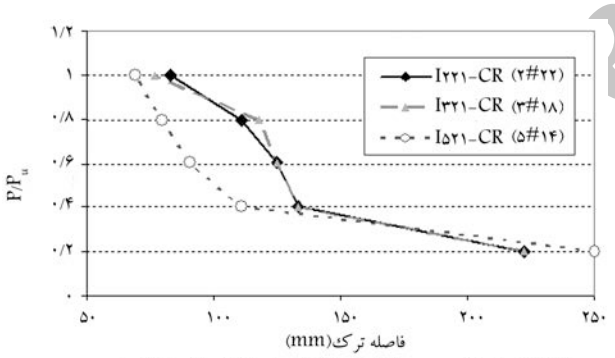
فاصله‌ی متوسط ترک‌های ایجادشده در طول ۲ متری وسط تیرهای تقویت‌شده در شکل ۹الف نشان داده شده است. مقایسه‌ی این شکل با منحنی شکل ۵الف نشان می‌دهد که فاصله‌ی بین ترک‌ها در تیر تقویت‌شده در باری معادل بارهای بهره‌برداری، نسبت به‌فاصله‌ی بین ترک‌ها در تیر تقویت‌نشده در همان مقدار بار تقریباً مساوی است. به‌عبارت دیگر ترک‌های جدیدی غیر از آنچه که قبلاً در بارهای بهره‌برداری و قبل از تقویت در تیر ایجاد شده بود، در تیر تقویت‌شده ایجاد نمی‌شود. البته این واقعیت را می‌توان از شیب خطی شاخه‌ی صعودی منحنی بار ـ تغییر شکل (شکل ۷ب) استنباط کرد. چنانچه در منحنی شکل ۷الف مشاهده می‌شود، در باری حدود ۴۰ کیلو نیوتن کاهشی اندک در شیب منحنی بار ـ تغییر مکان وسط تیر ایجاد شده است که بیانگر ایجاد اولین ترک‌ها در نمونه‌های تقویتی است. مقایسه‌ی این منحنی با منحنی شکل ۷ب به‌وضوح نشان می‌دهد که تیر تقریباً هیچ‌گونه کاهش سختی ندارد و به‌عبارت دیگر، بارگذاری مجدد تیرهای تقویت‌شده که قبل از تقویت



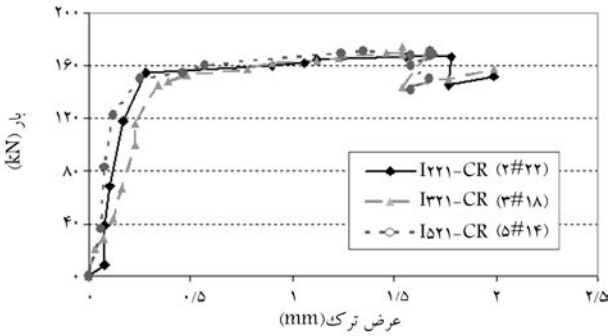
الف) نمایی از تیر بتن آرمه ی تقویت شده پس از جداشدگی ورق FRP؛

ب) نمای نزدیک از جدا شدگی میانی ورق تقویتی.

شکل ۸. نمای کلی از تیرهای مورد آزمایش و نمای نزدیک از جداشدگی ورق تقویتی.



الف) منحنی بار برحسب فاصله ی ترک در نمونه های تقویت شده؛



ب) منحنی بار برحسب عرض بازشدگی ترک بحرانی در نمونه های تقویت شده.

شکل ۹. منحنی‌های بار - فاصله ترک و بار - عرض بازشدگی ترک در نمونه های تقویت نشده.

www.SID.ir

جدول ۵. خلاصه‌ی نتایج مستخرج از آزمایشات انجام شده در لحظه‌ی جدا شدن ورق تقویتی.

نمونه	P_d^{1} (kN)	Δ^{2}_{max} (mm)	$\varepsilon^{3}_{f\,max}(\mu s)$	D_a^{4} (mm)	W^{5}_{max} (mm)	G^{6} (kN.mm)
I۲۲۱	۱۸۰	۲۴٫۱	۹۹۱۰	N.A.	N.A.	۳۲۶۱
I۳۲۱	۱۷۰٫۲۵	۲۲٫۱	۶۸۶۷	N.A.	N.A.	۲۸۹۴
I۵۲۱	۱۶۹٫۵	۱۹٫۹	۶۱۹۰	N.A.	N.A.	۲۴۷۳
I۲۲۱-CR	۱۶۸٫۷۵	۲۳٫۹	۵۵۸۴	۸۳	۱٫۷۸	۳۰۰۴
I۳۲۱-CR	۱۷۳٫۷۵	۲۳٫۵	۶۵۲۰	۷۷	۱٫۵۴	۳۲۲۱
I۵۲۱-CR	۱۷۳	۲۱٫۱	۵۹۴۰	۶۹	۱٫۳۵	۲۷۶۶

۱. بار نهایی جداشدگی؛ ۲. تغییر مکان بیشینه در وسط تیر؛ ۳. بیشترین کرنش‌طولی ورق تقویتی؛ ۴. فاصله‌ی متوسط بین ترک‌ها؛
۵. بیشینه بازشدگی عرض بزرگ‌ترین ترک خمشی؛ ۶. سطح زیر منحنی بار ـ تغییر مکان وسط تیر.

بارهای بهره‌برداری به آن‌ها وارد شده است، ابتدا منجر به بازشدگی ترک‌های پیشین در تیر می‌شود و ایجاد ترک‌های جدید، منوط به افزایش بارگذاری پس از ناحیه‌ی خطی و کشسان تیر است.

با توجه به مقادیر ثبت شده در مورد کرنش‌ها، تغییر شکل‌ها و مشخصات ترک، مقادیر مرتبط با لحظه‌ی جداشدگی ورق تقویتی از سطح بتن، به‌صورت خلاصه در جدول ۵ نشان داده شده است.

چنانچه از موارد مندرج در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، مقادیر مربوط به عرض بازشدگی ترک در تیرهای تقویت‌شده با صفحات CFRP از قواعد مربوطه در تیرهای بتن‌آرمه‌ی بدون ورق تقویتی تبعیت می‌کند. به‌عبارت دیگر در تیرهای بتن مسلح، انتظار می‌رود در صورت استفاده از میلگردهای کم‌قطرتر، ترک‌ها در طول تیر بهتر توزیع شوند و با توزیع مناسب ترک در طول، از عرض بازشدگی ترک نیز کاسته شود. درمورد نتایج حاصله نیز با کاهش قطر میلگرد از ۲۲ به ۱۴، فواصل متوسط بین ترک از ۸۳ به ۶۹ میلی‌متر کاهش یافته که نشان‌دهنده‌ی توزیع بهتر ترک در طول تیر است. همچنین با کاهش قطر میلگرد، عرض ترک نیز از ۱٫۷۸ میلی‌متر به ۱٫۳۵ میلی‌متر کاهش یافته است. مقایسه‌ی بار بیشینه‌ی قابل تحمل تیرها (شکل ۷)، تفاوت معنی‌داری در بار جداشدگی ورق بر اثر تغییر در آرایش آرماتورهای خمشی نشان نمی‌دهد. بدیهی است نتیجه‌ی قطعی منوط به انجام آزمایشات تکمیلی است.

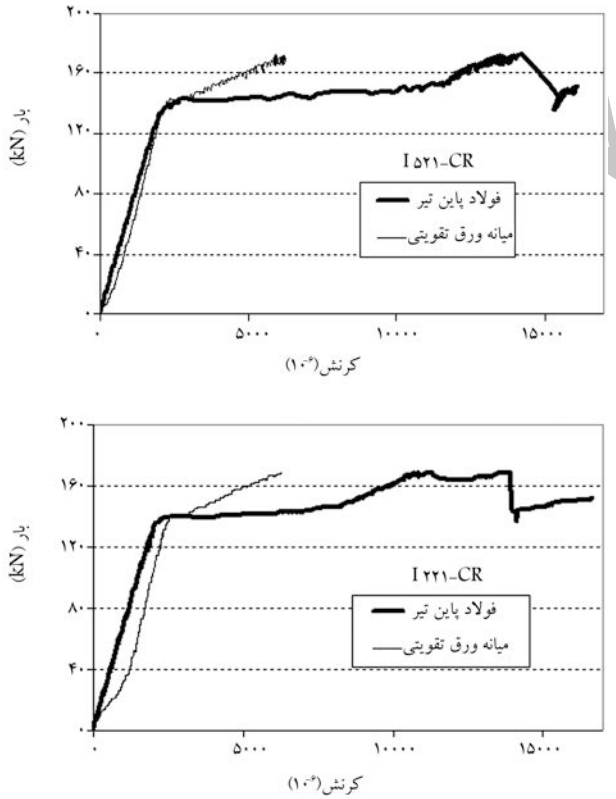
تحلیل ترک در تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده

پس از تسلیم آرماتورهای کششی و در ادامه‌ی بارگذاری، پتانسیل ایجاد ترک‌های افقی بین سطحی در مجاورت ورق تقویتی در تیر ایجاد می‌شود. این ترک‌ها بر اثر تعریض غیرخطی ترک‌های خمشی در میانه‌ی تیر احتمال وقوع می‌یابند. پس از تسلیم میلگردهای کششی، تعریض ترک‌های خمشی با نرخ فزاینده‌یی ادامه یافته و در روند افزایش کرنش در آرماتور کششی و ورق تقویتی به‌صورت ناگهانی تغییراتی حادث می‌شود. این تفاوت فاحش، ناگهانی و غیرخطی کرنش در آرماتور کششی و ورق تقویتی در میانه‌ی تیر و در لحظه‌ی جدایش ورق FRP در تمامی نمونه‌های تقویت‌شده در هنگام آزمایش ثبت شده است. شکل ۱۰ این تفاوت کرنش را به‌وضوح در دو نمونه از تیرهای تقویت‌شده نشان می‌دهد. همان‌طورکه در این دو شکل دیده می‌شود، تسلیم آرماتورهای کششی در کرنشی معادل ۲۰۰۰ میکرواستراین حاصل می‌شود. در این حال کرنش ورق FRP نیز تقریباً در همین حدود است. پس از این ناحیه و در حدود کرنش ۳۰۰۰ میکرواستراین، نرخ افزایش کرنش در میلگرد و در ورقه‌ی تقویتی کاملاً متمایز و منحنی‌های بار-کرنش برای این دو ماده از یکدیگر متمایز می‌شوند؛ وجود این تمایز که با باز شدن و عریض‌شدن ترک‌های خمشی در وجه زیرین تیر و در مجاورت ورق تقویتی همراه است، می‌تواند نشانه‌یی برای آغاز جداشدگی‌های موضعی در ورق تقویتی باشد.

به‌منظور بسط رابطه‌یی تحلیلی برای پیش‌بینی کنترل مشخصات ترک در تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات CFRP از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شده است. از این رابطه برای محاسبه‌ی فواصل بین ترک‌ها در جداشدگی انتهایی ورق[13] در مدل‌های بتن دندانه‌یی[14] هم استفاده می‌شود.[11و12]

$$a_{\min}\left(u_s\sum O_{bars}+u_p\cdot b_p\right)=A_e\,f_{ru} \qquad (۱۲)$$

که در آن $a_{\min}$ کمینه فاصله‌ی بین ترک‌های خمشی، u_s تنش چسبندگی بین آرماتور و بتن، O_{bars} محیط آرماتورهای کششی، b_p و u_p به‌ترتیب عرض ورق تقویتی و



شکل ۱۰. منحنی بار- کرنش آرماتور کششی و ورق FRP در وسط دو نمونه از تیرهای تقویت‌شده.

www.SID.ir

تنش چسبندگی صفحات CFRP و بتن، A_e سطح مؤثر بتن در اطراف میلگرد کششی (هم‌مرکز با مرکز سطح میلگردهای کششی مقطع) و f_{ru} مقاومت خمشی بتن است که طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318 برابر $0/7\sqrt{f'_c}$ در نظرگرفته می‌شود. با در نظرگرفتن مقادیر $0/28\sqrt{f'_c}$ و 5 مگاپاسکال به‌ترتیب برای u_s و u_p،[13] در تحقیق حاضر با الهام از تنش نهایی چسبندگی بین میلگردهای آج‌دار و بتن در مبحث طول مهاری میلگردهای تحت کشش، رابطه‌ی 13 برای مقدار u_s پیشنهاد می‌شود:

$$u_s = \frac{\left(\frac{C+K_{tr}}{d_b}\right) \times 1/1\sqrt{f'_c}}{4\gamma} \qquad (13)$$

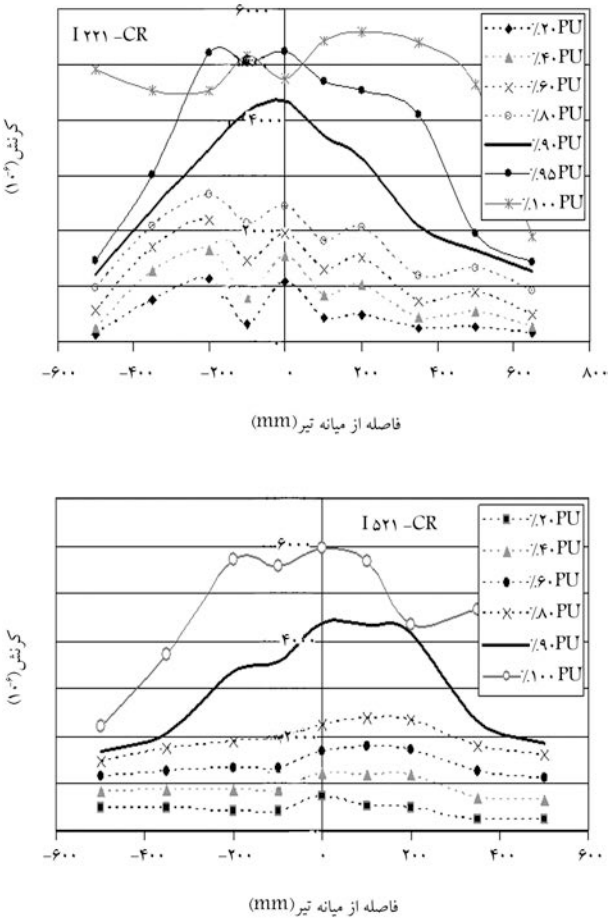
که در آن جمله‌ی داخل پرانتز را نباید از 2/5 بزرگ‌تر در نظر گرفت. در رابطه‌ی 13، C، برابرکمینه‌ی: 1. نصف فاصله‌ی مرکز تا مرکز میلگردهای کششی؛ 2. فاصله‌ی مرکز میلگرد تا نزدیک‌ترین وجه بتن است. K_{tr} شاخص آرماتور عرضی، و برابر با $A_{tr}f_{yt}/10sn$ است. در این رابطه همچنین A_{tr} و f_{yt} به‌ترتیب سطح مقطع و مقاومت مشخصه‌ی تسلیم فولادهای عرضی، s بیشینه فاصله‌ی مرکز تا مرکز فولادهای عرضی و n تعداد میلگردهای کششی است. برای ساده‌سازی، (و حتی درصورت وجود آرماتور عرضی) می‌توان K_{tr} را برابر صفر در نظر گرفت.[3] d_b قطر میلگرد و γ نیز ضریب اندازه‌ی آرماتور است که برای میلگردهای با قطر 18 میلی‌متر و کم‌تر، برابر 0/8 و برای میلگردهای بزرگ‌تر معادل 1/0 در نظر گرفته می‌شود. کلیه‌ی متغیرها برحسب نیوتن و میلی‌متر در روابط 12 و 13 جایگزین می‌شوند.

تغییر طول بین ورق تقویتی و بتن در حد فاصل دو ترک مجاور را می‌توان به‌عنوان عرض ترک در نظرگرفت. بنابراین بیشینه‌عرض بازشدگی ترک ($w_{\max}$) را می‌توان از روی بیشترین فاصله‌ی بین دو ترک مجاور ($a_{\max}$) و کرنش ورق (ε_p)، مطابق رابطه‌ی 14، محاسبه کرد. در این روابط معمولاً فاصله‌ی بیشینه‌ی ترک، 2 برابر فاصله‌ی کمینه‌ی ترک در نظرگرفته می‌شود.[11]

$$w_{\max} = a_{\max}\,\varepsilon_p \qquad (14)$$

بدیهی است عرض بیشینه‌ی بازشدگی ترک که به‌صورت نظری در تیر می‌تواند ایجاد شود، با جایگزین‌کردن مقدارکرنش نهایی ورق در رابطه‌ی 14 محاسبه می‌شود، ولی به‌دلیل جداشدگی زودرس ورق تقویتی از سطح بتن و نرسیدن کرنش طولی ورق به کرنش نهایی، این مقدار بازشدگی قابل حصول نیست. در شکل 11 توزیع کرنش‌های طولی ثبت شده در یک‌متر از ناحیه‌ی میانی تیر برای ورق تقویتی CFRP، در دو نمونه‌ی‌مختلف تقویت شده نشان داده شده است.

چنانچه از نمودار توزیع کرنش طولی ورق تقویتی در سطوح مختلف بارگذاری مشاهده می‌شود، در سطوح بارهای بیش از 80٪ بار نهایی نمونه‌ها، پروفیل کرنش از حالت تقریباً یکنواخت قبلی خود خارج می‌شود و در نواحی زیادی از طول ورق، نرخ کرنش به‌شدت افزایش می‌یابد. مثلاً در تیر تقویت‌شده‌ی I221-CR، با افزایش مقدار بار از 80٪ به 90٪ بار نهایی، کرنش طولی ورق تقویتی از حدود 2500 میکرواستراین در میانه‌ی تیر به‌حدود 4500 میکرواستراین افزایش یافته است، در حالی که با افزایش بار از 70٪ به 80٪ بار نهایی، کرنش طولی ورق فقط 500 میکرواستراین بیشتر شده است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی شروع جداشدگی ورق و آغاز رفتار غیرخطی در نمونه‌هاست. این رفتار در مشاهدات دیگر محققین نیز ثبت شده است.[14,15] دقت نظر در منحنی توزیع کرنش‌های طولی (شکل 11) نشان می‌دهد که در بار نهایی، میزان کرنش طولی ورق تقویتی در طول 1 متری از میانه‌ی تیر تقریباً مساوی و در حدود 5000 تا 5500 میکرواستراین است؛ اما این طول در



شکل 11. توزیع کرنش‌های طولی در ورق تقویتی در سطوح مختلف بارگذاری.

تیر با تعداد میلگردهای خمشیِ بیشتر (I521-CR)، کم‌تر از یک‌سومِ طول قبلی و فقط حدود 0/30 متراست. این موضوع نشان می‌دهد که با کاهش تعداد آرماتورهای کششی، پروفیل کرنش طولی ورق FRP در بارهای نهایی، در طول بیشتری از تیر ثابت و یکنواخت می‌شود. به‌عبارت دیگر، طول بیشتری از ورق تقویتی به کرنش‌های بیشینه‌ی قبل از جداشدگی می‌رسد و شاید به‌همین دلیل، مقدار تغییر مکان وسط تیر در نمونه‌های با تعداد آرماتور طولی کم‌تر، در لحظه‌ی جداشدگی ورق تقویتی بیشتر از دیگر نمونه‌ها به دست آمده است. همگنی بیشتر بتن در ناحیه‌ی بالایی و پایینی آرماتورهای کششی ــ در حالتی که تعداد میلگردهای خمشی کم‌تری در تیر استفاده می‌شود ــ می‌تواند دلیلی بر رفتار بهتر تیر و یکنواختی کرنش در طول بیشتری از میانه‌ی تیر باشد.

کرنش‌های طولی بیشینه‌ی ثبت‌شده برای ورق FRP در ناحیه‌ی اتصال ورق تقویتی به سطح بتن نشان می‌دهد که ورق تقویتی تا کرنش 5500 میکرواستراین را به‌خوبی تحمل کرده، ولی کرنش‌های طولی بیشتر منجر به جدایش ورق از سطح بتن شده است. بر این اساس، محققین مختلف درخصوص جلوگیری از پدیده‌ی جدایش ورق تقویتی، محدودیت‌هایی را برای کرنش طولی ورق پیشنهاد کرده‌اند. در این خصوص، عده‌یی برای نواحی دارای نیروی بزرگ برشی و هم‌زمان نواحی لنگر بزرگ خمشی عدد 0/006، و عده‌یی کرنش 0/005 را پیشنهاد کرده‌اند.[16,17] لازم به ذکر است که فقط محدودکردن میزان کرنش محوری ورق تقویتی درکنترل پدیده‌ی جداشدگی به‌تنهایی کافی نیست، بلکه یکنواختی پروفیل کرنش در طول بیشتری

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۶. مقادیر عرض ترک و فواصل بین ترک در نمونه‌های تقویت شده.

نمونه	فواصل بین ترک (mm)			عرض ترک بحرانی (mm)		
	آزمایشگاهی	رابطه‌ی ۱۲	درصد خطا	آزمایشگاهی	رابطه‌ی ۱۴	درصد خطا
I۲۲۱-CR	۸۳	۹۴/۱	۱۳	۱/۷۸	۱/۲۳	۳۱
I۳۲۱-CR	۷۷	۷۰/۲	۱۰	۱/۵۴	۱/۰۲	۳۴
I۵۲۱-CR	۶۹	۶۸/۴	۱	۱/۳۵	۰/۸۷	۳۶
متوسط خطا			۸			۳۴

از تیر باعث کاهش تنش‌های برشی بین بتن و ورقه‌ی تقویتی می‌شود و از این رو می‌تواند اهمیت بیشتری در مهار جداشدگی ورق داشته باشد. در جدول ۶ مقادیر عرض ترک و فواصل بین ترک در نمونه‌های تقویت‌شده، با مقادیر پیش‌بینی‌شده از روابط ۱۲ و ۱۴ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار اثرات آرایش آرماتورهای کششی تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با صفحات CFRP بر وضعیت ترک‌خوردگی تیر مورد بررسی قرار گرفت. موارد قابل استنتاج، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، عبارت‌اند از:

- استفاده از میلگردهای کم‌قطر، باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک‌خوردگی در طول تیر می‌شود. این نوع توزیع یکنواخت ترک، عرض بازشدگی کم‌تری را نیز ایجاد می‌کند.
- در مراحل ابتدایی بارگذاری و در ناحیه‌ی خطی منحنی بار ـ تغییر مکان، عرض ترک متاثر از آرایش میلگردهای کششی است. به‌عبارت دیگر قطر کم‌تر میلگرد، عرض بازشدگی کم‌تری را در این ناحیه به دنبال دارد؛ ولی پس از ناحیه‌ی خطی، آرایش‌های مختلف میلگرد کششی تأثیری بر عرض بازشدگی ترک ندارد.
- در تنش‌های کششی در حد تسلیم آرماتور، تقریباً فواصل بین ترک‌ها ثابت شده و آرایش میلگرد تأثیری بر فواصل نهایی ترک پس از تسلیم میلگرد ندارد.
- بارگذاری مجدد تیرهای تقویت‌شده که قبل از تقویت تحت بارهای در حد بار بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، ابتدا منجر به بازشدگی ترک‌های پیشین در تیر می‌شود و ایجاد ترک‌های جدید منوط به افزایش بارگذاری به میزان بیشتر از بار بهره‌برداری است.
- توزیع کرنش محوری در ورق تقویتی برای تیرهای با تعداد آرماتور کششی کم‌تر، از یکنواختی بیشتری برخوردار است.
- پدیده‌ی جداشدگی ورق FRP از سطح بتن، تقریباً از کرنش‌های محوری حدود ۲۰۰۰ میکرواستراین شروع، و احتمال وقوع آن در کرنش حدود ۵۵۰۰ میکرواستراین بیشتر است.
- محدودکردن میزان کرنش محوری ورق FRP در کنترل پدیده‌ی جداشدگی ورق به‌تنهایی کافی نیست. یکنواختی پروفیل کرنش در طول بیشتری از تیر، اهمیت بیشتری در مهار جداشدگی ورق تقویتی دارد.
- آرایش تسلیح داخلی تیرهای بتن‌آرمه، اثرات قابل توجهی در بار جداشدگی ورق تقویتی ندارد.

پانوشت

1. carbon fiber reinforced polymer
2. fiber reinforce polymer
3. debonding
4. intermediate crack debonding (IC)
5. critical diagonal crack debonding (CDC)
6. wet lay up
7. under reinforced concrete
8. displacement control
9. data acquisition control system
10. linear variable displacement transducer
11. demec gauge
12. load cell
13. plate end debonding
14. tooth concrete models

منابع

1. Gergely, P. "Role of cover and bar spacing in reinforced concrete," *Significant Development in Engineering Practice and Research: A Tribute to Chester P. Siess,* SP-75, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 133-147 (1981).
2. Design Guidelines for RC Structure Retrofitted with FRP and Metal Plates: Beam and Slabs, Center for Infrastructures Diagnosis Assessment and Rehabilitation (CIDAR), The University of Adelaide, http://www.civeng.adelaide.edu.au/ Index. Html, (1995).
3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95),* American Concrete Institute, Detriot (1995).
4. Standard Association of Australia (AS 3600), *Concrete Structures*, Standards Association, Sydney, Australia (2001).
5. British Standard Institute, *Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction, BS 8110: Part 1,* British Standard Institute, England (1997).
6. Frosch, R.J. "Another look at cracking and crack control in reinforced concrete," *ACI Structural Journal,* **96**(3), pp. 437-442 (1999).

Archive of SID
www.SID.ir

7. Gergely, P. and Lutz, L.A. "Maximum crack width in reinforced concrete flexural members," Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete, SP-20, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 87-117 (1968).
8. Kaar, P.H. and Mattock, A.H. "High-strength bars as concrete reinforcement", *Part 4: Control of Cracking, Journal of Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, **7**, (1), pp.42-53 (1963).
9. Broms, B.B. "Crack width and crack spacing in reinforced concrete members," *ACI Journal, Proceeding,* **62**(10), pp. 1237-1255 (1965).
10. Piyasena, R.; Loo, Yew-Chaye and Fragomeni, S. "Factors influencing spacing and width of cracks in reinforced concrete; New prediction formulae," *Advances in Structural Engineering,* **7**(1), pp. 49-60 (2004).
11. Smith, S.T. and Teng, J.G. "FRP-strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models," *Engineering Structures,* **24**, pp. 385-395 (2002).
12. Wang, C.Y. and Ling, F.S. "Prediction model for the debonding failure of cracked RC beams with externally bonded FRP sheets", *Proceedings of the Second International Conference of Composites in Infrastructure (ICCI 98),* Tucson, Arizona, USA, pp. 548-562 (1998).
13. Oh, H.S. and Sim, J. "Interface debonding failure in beams strengthened with externally bonded GFRP", *Composite Interfaces,* **11**(1), pp. 25-42 (2004).
14. Yao, J.; Teng, J.G. and Chen, J.F. "Experimental study on FRP- to-concrete bonded joints", *Composites: Part B,* **36**, pp. 99-113 (2005).
15. Yuan, H.; Teng, J.G.; Seracino, R.; Wu, Z S. and Yao, J. "Full range behavior of FRP-to-concrete bonded joints", *Eng. Struct.,* **26**(5), pp. 553-564 (2004).
16. Arya, C. and Farmer, N. "Design guidelines for flexural strengthening of concrete plastics for reinforced concrete structures", UK (2001).
17. Shehata IAEM. "Strengthening of RC beams in flexure and shear using CFRP laminate", FRPRCS-5, Fiber Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, UK (2001).

Archive of SID

www.SID.ir