

کاربرد موثر کامپوزیت های (FRP) در مقاوم سازی تیرهای اصلی پل های بتنی T شکل

حامد رجب پور^۱، رضا الهیاری^۲، سپهر ساعدی^۳، رضا سرکن دیزجی^۴

۱- دانشجوی مهندسی عمران - عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند،

عضو باشگاه پژوهشگران جوان

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند (آموزشکده سماء)

۳- کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکترای معماری، دانشگاه معماری و عمران باکو

hamed.Rajabpour@gmail.com

خلاصه

در این مقاله کاربرد موثر کامپوزیت ها در مقاوم سازی تیرهای اصلی پل های بتنی T شکل مورد بررسی قرار گرفته است. پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن شیشه و کربن اشباع شده در رزین اپوکسی (GFRP-CFRP)، برای افزایش ظرفیت باربری پل مورد استفاده قرار گرفتند. سه تیر تقویت شده به طول ۵m تحت ۱۰^۶ آزمایش یکنواخت و دوره ای در یک دامنه تغییرات قرار گرفتند. تیر سپری تقویت شده با FRP تحت بار خستگی عملکرد عالی را از خود نشان می دهد، که پیش بینی می شود این از نتایج کاربرد صحیح طرح مقاوم سازی به وسیله پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه و کربن می باشد.

کلمات کلیدی: آزمایش، بتن مسلح، مقاوم سازی، پلیمر تقویت شده با الیاف، خستگی

۱. مقدمه

راهکار های مختلفی برای تقویت و تعمیر اعضای پل های بتنی ساخته شده وجود دارد. از بین راهکار هایی که بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، می توان به استفاده از فولاد، بتن مسلح و پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) که پوششی جهت محافظت بتن و افزایش مقاومت برشی ستون و استفاده ی فولاد و ورق های FRP برای افزایش مقاومت خمشی تیرها اشاره کرد. امروزه ورقه های FRP سطح مطلوبی از عملکرد را برای مقاوم سازی و تعمیر اعضاء ارائه نموده اند. در دو دهه ی اخیر، FRP ها که در اصل در صنایع دفاعی و هوا فضا مورد استفاده بودند، پتانسیل بالایی را برای استفاده در مهندسی سازه نشان دادند. اخیراً محققین رفتار برشی و خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با روکش FRP را به همراه استفاده از روش های تحلیلی و تجربی [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] مورد بررسی قرار دادند. مطالعات تجربی در درجه ی اول تیرهای کوچک مستطیلی با روکش FRP را که در معرض بارگذاری یکنواخت هستند را مطرح می کند. یک مشاهده ی متداول این بود که مقاومت برشی تیرها می تواند با استفاده از روکش FRP افزایش یابد، اما باید ایمنی خاصی اتخاذ شود تا در قسمت انتهایی از جدا شدن صفحات پلیمری که بتن را احاطه کرده اند، ممانعت به عمل آید. این مقاله قسمتی از یک سری تحقیقات در رابطه با رفتار خمشی و برشی شاه تیر تقویت شده ی پل های بتنی

^۱ دانشجوی مهندسی عمران - عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، عضو باشگاه پژوهشگران جوان

^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند (آموزشکده سماء)

^۳ کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

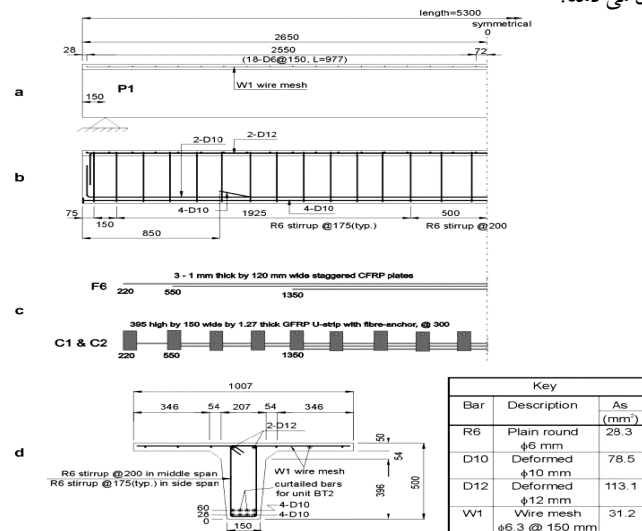
^۴ دانشجوی دکترای معماری، دانشگاه معماری و عمران باکو

تقویت شده باروکش FRP می‌باشد [۱۸]، [۱۹]. یک موضوع مهم، پیوند زدائی روکش CFRP چسبیده به سطح پایین شاه تیر T شکل پل در مرحله بار گسیختگی را مطرح می‌کند. نتایج نشان می‌دهند چسباندن نوارهای U شکل GFRP به طرفین تیر می‌تواند مقاومت سطح مشترک مابین بتن و روکش CFRP را افزایش دهد. بهر حال نتیجه حاصله براساس آزمایش تیرهایی می‌باشد که در معرض بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند. رویکرد قابل توجه این است که: همان طور که در عنوان این مقاله منعکس شده، باید تیر اصلی پل با روکش FRP را به یک وضعیت تناوبی بارگذاری نمود تا وضعیت حقیقی بارگذاری پل‌ها را نشان دهد. دقت بر روی دو سطح پیوسته بتن و روکش FRP که در معرض بار خستگی قرار گرفته، متمرکز شده بود.

۲. شرح مراحل آزمایش

۱.۲ شرح آزمایش

به جز تیر نمونه اولیه، چهار تیر T شکل به طول ۵m که به طور ساده تقویت شده بودند، تحت بارگذاری تناوبی آزمایش شدند. شکل ۱ جزئیات تقویت طرح اولیه فولاد و FRP را نشان می‌دهد. مدل نمونه‌ی اولیه‌ی P1 برای شناسایی عملکرد اصلی شاه تیرهای بزرگتر در مرحله‌ی بار گسیختگی، تحت بارگذاری آزمایشی قرار گرفت. تیر (F6) تقویت شده با CFRP برای افزایش مقاومت خمشی و دو تیر (C1, C2) با استفاده از روکش CFRP برای افزایش مقاومت خمشی و نوارهای U شکل GFRP برای افزایش مقاومت برشی تقویت شدند. جدول ۱ مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱

طرح اولیه عناصر تقویتی فولادی و FRP برای آزمایش نمونه های P1, F6, C1, C2

(a) : هندسه و سطح مقطع تیر های نمونه (b) : طرح مقاوم سازی

(c) : طرح FRP برای نمونه های مقاوم سازی شده (d) : سطح مقطع تیر های نمونه

جدول شماره ۱

Material	Area (mm ²)	E (GPa)	f'c at test (MPa)	fy (MPa)	fu (MPa)	esh (%)	eu (%)
Concrete	—	۲۱	۱۹	—	—	—	۰,۳
R6 steel stirrups	۲۸,۳	۲۰۳	—	۳۶۵	۵۰۴	۱,۲	۱۳
D10 steel bars	۷۸,۵	۱۹۲	—	۳۲۵	۴۵۸	۳,۲	۲۸
D12 steel bars	۱۱۳,۱	۱۹۷	—	۳۱۶	۴۷۰	۳,۲	۲۷
CFRP ^a	—	۶۵	—	—	۶۵۸	—	۱,۰
GFRP ^b	—	۲۰	—	—	۳۷۴	—	۱,۹

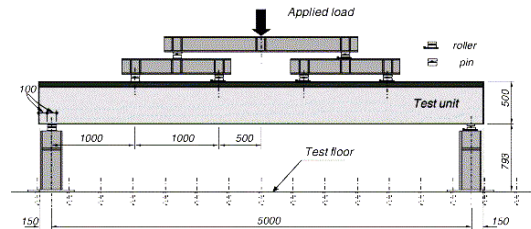
^a SCH-۴۱S fabric distributed by Fyfe Co. [۲۰].

^b SHE-۵۱ fabric distributed by Fyfe Co. [۲۰].

مفهوم طرح ایده آل برای تقویت شاه تیرهای پل برای افزایش ظرفیت تحمل بار، کنترل تضمینی گسیختگی در وضعیت حدنهایی را در بر می‌گیرد. در نتیجه حالت شکست تدریجی توسط خمش در محدوده لنگر خمشی ماکزیمم است. تیرهای طراحی شده برای گسیختگی خمشی در تیرهای C1, C2 نشان داده شده است. حالت دیگر گسیختگی نامطلوب را در تیر F6 نشان می‌دهد. جزئیات طرح مناسب برای افزایش مقاومت خمشی و برشی با استفاده از ورق های FRP در جای دیگر یافت می‌شود [۱۹]. هدف اصلی آزمایش مشاهده تفاوت بین تیرهای روکش‌داری است که در معرض بارگذاری یکنواخت و تناوبی هستند تا جوابگوی نیروهای نهایی باشند.

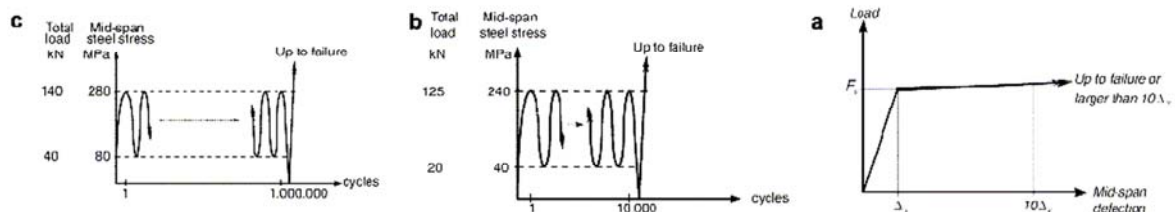
۲.۲ آزمایش ساختار و توالی بارگذاری

تمام واحدها در معرض شش نقطه نیرو قرار دارند تا بدقت شبیه سازی بارگیری یکنواخت را که در شکل ۲ نشان داده شده، انجام دهند. هنگام بارگذاری، مقدار خمش مرکز افقی بین دو پایه متوالی پل با استفاده از نوعی مبدل الکتریکی و تغییر شکل نسبی طولی بر روی روکش CFRP و سطح بتن کنار ورق‌ها با استفاده از اشل مکانیکی دستی اندازه‌گیری شده است. به جز برای تیر نمونه اصلی، تیر P1، همه واحدها در معرض بارگذاری متناوب نسبتاً کم قرار گرفتند که با استفاده از دستگاه کنترل خود کار، برای راه‌اندازی محرک هیدرولیکی ۲۵۰KN به دست آمده است.



شکل ۲ - تنظیم آزمایش

بارگذاری ۱۲ دور در دقیقه بود. بعد بارگذاری یکنواخت در تمام واحدها به کار رفت تا گسیختگی القا شود. یک چکش هیدرولیکی توخالی ۱۵۰۰KN در این قسمت از آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۳ توالی آزمایش بر روی تیرها را نشان می‌دهد. تیر P1 در حالت سکون زیر بارگذاری یکنواخت آزمایش شد (رجوع به شکل ۳a). بارگذاری متناوب که در شکل ۳b نشان داده شد، برای تیرهای F6, C1 می‌باشد که مورد آزمایش قرار گرفتند. این تیرها در معرض ۱۰,۰۰۰ دور بارگذاری متناوب قرار گرفتند. نیرو در محرک هیدرولیکی برای القای تنش برای فولاد تقویت شده به ترتیب حداکثر و حداقل ۲۴۰ و ۴۰ mpa که نشانگر یک دامنه تغییرات ۲۰۰MPa می‌باشد، تنظیم شد. بعد بارگذاری یکنواخت شبه - ایستا انجام گرفت که باعث گسیختگی شد.



(a) : بارگذاری یکنواخت برای نمونه P1 (b) : بارگذاری متناوب برای نمونه های F6 و C1 (c) : بارخستگی برای نمونه C1

شکل ۳

توالی بارگذاری در مراحل آزمایش

تیر C2 در معرض بیشتر از ۱۰۶ بارگذاری تناوبی قرار گرفته بود. که در این تناوب دامنه بارگذاری در فولاد تقویت شده با استفاده از یک دامنه تغییرات تنش ۲۰۰MPa با حداکثر و حداقل تنش‌های به ترتیب ۲۸۰, ۸۰MPa کنترل شد. بعد از انجام بارگذاری متناوب، بارگذاری یکنواخت شبه - ایستا موجب شکستگی تیر گردید. (رجوع شود به شکل ۳c)

۳.۲ کاربرد ورقه های FRP

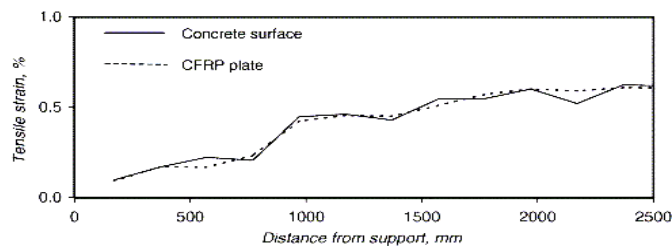
دو نوع ورق FRP مورد استفاده قرار گرفته بودند [۲۰]. ورق CFRP یک بافته شده جهت با پهنا $120\text{mm} \times$ ضخامت 1mm به عنوان تقویت کننده طولی برای افزایش مقاومت خمشی مورد استفاده قرار گرفتند. ورق GFRP یک جهت U شکل با پهنا $150\text{mm} \times$ ضخامت $1,2\text{mm}$ برای بالا بردن کیفیت اتصال ورق های CFRP و بالا بردن مقاومت برشی تیر مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش ورق های مذکور بعنوان روکش، باید روی بتنی که حداقل ۲۸ روزه باشد به کار برده شوند. روش استفاده به شرح زیر بود:

- ۱) قبل از روکش دادن ورق FRP، سطح بتن نمونه ها به منظور تنظیم کردن دامنه بین $1\text{mm} - 2$ به طور مکانیکی زبر شد.
- ۲) لبه های تیز و برآمدگی ها از سطح بتن برطرف شد.
- ۳) گردوغبار و خاک و شن روی سطح بتن با روغن و هوای پرفشار پاک شد.
- ۴) یک آستر با پوشش اپوکسی روی سطح بتن به کار رفته شد.
- ۵) قبل از به کار گیری ورق FRP یک آستر سریش چسبنده TYFOWS با ضخامت 2mm بر روی سطح پوشیده شده اپوکسی قبلی به کار برده شد. آستر به مدت چند ساعت همان طور که در دستور کاری سازنده مشخص شده باقی ماند.
- ۶) ورق FRP به قسمت پایین و کناره های تیر و با استفاده از فشار دست چسبانده شد.
- ۷) نمونه در دمای بیش از 15°C به مدت حداقل دو هفته عمل آوری شد.

۳. نتایج آزمایش

۱.۳ لغزش نسبی بین ورق CFRP و سطح بتن

اندازه گیری تغییر شکل نسبی ورق پوششی CFRP در پایین بتن، برای مشاهده لغزش نسبی بین بتن و CFRP، مرحله به مرحله با استفاده از اشل مکانیکی دستی انجام شد. نمونه F6 برای تحقیق انتخاب شد زیرا یک طرح اولیه خمشی CFRP مشخص برای نمونه های C1, C2 داشت. شکل ۴ نشانگر تغییر شکل نسبی طولی در ورق CFRP و سطح بتن در نزدیک CFRP در نمونه F6 در زمان رسیدن به بار گسیختگی است. واضح است که تغییر شکل نسبی اندازه گیری شده روی سطح بتن و روی ورق ها متناسب است. در نتیجه عملکرد مصداق های مشاهده شده، فرضیه عدم لغزش مابین بتن و ورق چسبانده شده (ورق پوشش) را برای طرح تائید می کند. احتمال این لغزش مابین بتن و ورق FRP چسبانده شده، در دامنه تغییرات بارگذاری پل مقاوم سازی شده وجود ندارد.



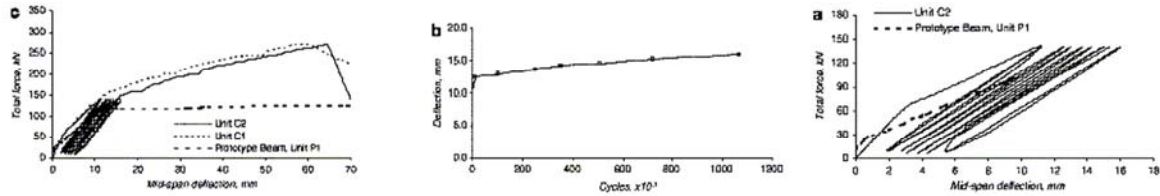
شکل ۴

اندازه گیری تغییر شکل طولی ورق ها FRP و سطح بتن برای نمونه F6 تحت بار گذاری ۲۱۱ KN

۴. آزمون در دامنه تغییرات بارگذاری

این آزمایش تاثیر بار خستگی روی تیر تقویت شده با ورق های FRP برای افزایش مقاومت خمشی و برشی را نشان می دهد. نمونه C2 کاملاً برابر نمونه C1 بود. این نمونه با فولاد تقویتی در معرض القاء بیش از ۱۰۶ دامنه تغییرات تنش 200MPa در طول ستون قرار داشت. سپس اعمال نیرویی یکنواخت باعث گسیختگی شد. تمامی اندازه های تغییر شکل نسبی روی تقویت فولادی، ورقه های CFRP و ورقه های U شکل GFRP با استفاده از اشل اندازه گیر DEMEC به دست آمده بود. خمش تیر جهت اطمینان با استفاده از یک سنچرگر مدرج طی بارگذاری متناوب اندازه گیری شد. جز شکستگی میلگرد فولادی بر اثر بار خستگی که ناشی از بارگذاری متناوب بود، پاسخ نیروی خمش بدست آمده برای نمونه C2 خیلی شبیه جوابی است که برای نمونه C1 بدست آمده است. همانطور که جزئیات در دنباله مطلب شرح داده است. شکل ۵، بار عمودی و مقدار اندازه گیری شده خمش

وسط دهانه بین دو پایه متوالی پل برای نمونه C۲ را در دامنه‌ی تغییرات بار را نشان می‌دهد. خمش مرکزی دهانه بین دوپایه متوالی پل بتدریج با تعداد تناوبهای مکرر افزایش یافته است (شکل ۵b) سختی تیر و تغییر شکل نسبی ورق های کربن در مرکز دهانه تیر افقی دو پایه متوالی پل برای نیروهای تناوبی متفاوت در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. باور براین است که کاهش سختی تیر و افزایش تغییر شکل نسبی ورق های CFRP ناشی از توسعه تدریجی تغییر شکل برشی و ترک خوردگی فولاد تقویتی در ناحیه‌ی مرکزی تیر افقی بین دوپایه متوالی پل می‌باشد.



(a) پاسخ به دامنه تغییرات بارگذاری (b) : خمش افزایشی دهانه وسط تیر در اوج بارگذاری برای نمونه C۲ (c) : واکنش کلی

شکل ۵

بارهای عمودی در برابر خمش دهانه وسط تیر برای آزمایش نمونه ها

Unit	Cycles	F'y,t _a (kN)	Δmb (mm)	F'y,t/Δmc (kN/mm)	epd (%)
P1	1	100	9,6	10,4	—
C1	1	120	9,7	12,9	0,13
C2	1	140	11,0	12,7	0,15
C2	12,250	140	12,6	11,1	0,17
C2	100,296	140	13,0	10,8	0,17
C2	247,322	140	13,7	10,2	0,18
C2	301,503	140	14,2	9,9	0,19
C2	508,540	140	14,5	9,7	0,20
C2	721,047	140	15,3	9,2	0,21
C2	1,067,852	140	16,0	8,8	0,22

a F'y,t = theoretical load corresponding to a stress of 0,75f_{sy} (240 MPa) for units P1 and C1, 0,85f_{sy} (280 MPa) for unit C2 in the longitudinal reinforcing steel.

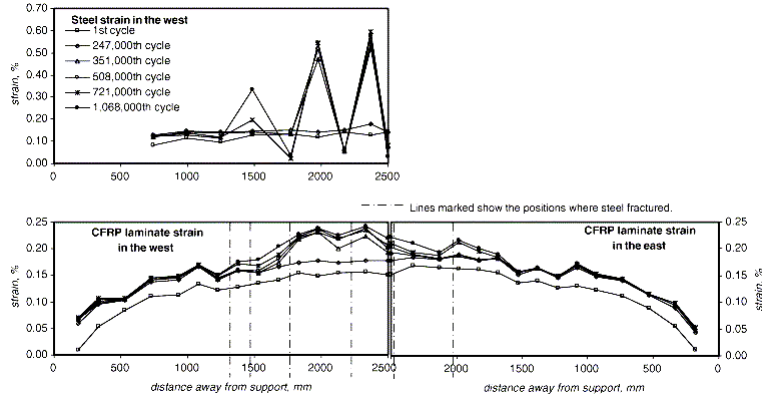
b Δm = mid-span deflection corresponding to F'y,t.

c Measured stiffness of the test unit.

d ep = measured CFRP strain at mid-span, corresponding to F'y,t.

جدول شماره ۲

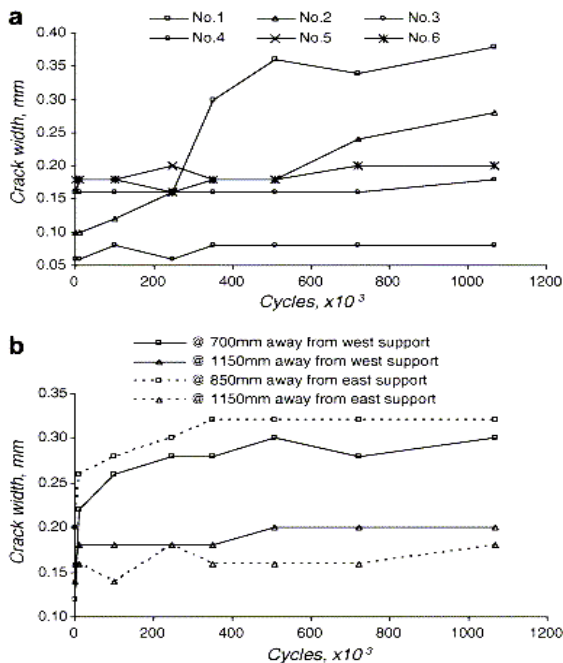
شکل ۶ نشانگر افزایش تغییر شکل نسبی تقویت فولاد و ورق های CFRP را نشان می‌دهد. توزیع نامنظم تغییر شکل نسبی در آرماتورهای فولادی در فاصله مرکزی تیر افقی بین دو پایه‌ی متوالی پل بعد از ۳۵۰,۰۰۰ دور رخ داد و باعث شکستگی تنها میلگردی که اشل اندازه گیر روی قسمت غربی تیر به آن جوش شده بود گردید. این میلگرد در چندین مرحله دیگر پیشرفت آزمایش نیز ترک خورده بود. ورق های CFRP برای جبران مقاومت هنگام شکستگی تقوینتهای فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۶

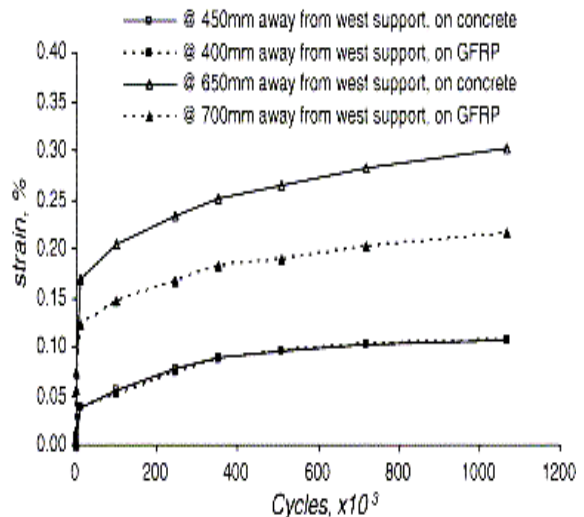
توزیع تغییر شکل نسبی در عناصر تقویتی فولادی و ورق های CFRP برای نمونه C۲

آشکار است که گرایش به پخش تغییر شکل نسبی CFRP در قسمت شرقی با آنچه که در قسمت غربی بعد از ۳۵۰,۰۰۰ دور وجود دارد، متفاوت است. دلیل آن این است که شکستگی میلگرد تیر در قسمت های جوشکاری شده اتفاق افتاده است. عرض ترک اندازه گیری شده طی بارگیری متناوب در شکل ۷ مشخص شده. ترک های خمشی در منطقه ی خمیدگی کامل اندازه گیری شدند و ترک های قطری روی پوشش بتن در دهنه ی برش برآورد شده اند. واضح است که عرض برخی ترک های خمشی بعد از ترک میلگرد فولادی بعد از ۳۵۰,۰۰۰ دور افزایش می یابد. انصافاً افزایش در عرض ترک های قطری بعد از ۱۰,۰۰۰ دور به طرز معقولی ثابت ماند و خیلی با ثبات تر از دور ۳۵۰,۰۰۰ به بعد بوده اند. یک روند آشکار مشابهی برای تغییر شکل عرضی نسبی اندازه گیری شده در سطح بتن و CFRP U شکل در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی وضعیت نمونه C۲ در پایان دور های متناوب نشان می دهد هیچ علامتی از فشار در هیچ کجای تیر غیر از نواحی مستقر شده یعنی جایی که ترک میلگرد D۱۰ مورد انتظار است. مشاهده نشده است. این آزمایش مشخص می کند که قطعاً سطح مشترک بین بتن و ورق های FRP توسط بار خستگی تحت تاثیر قرار نگرفته است.



شکل ۷

عرض ترک های اندازه گیری شده طی بارگذاری متناوب

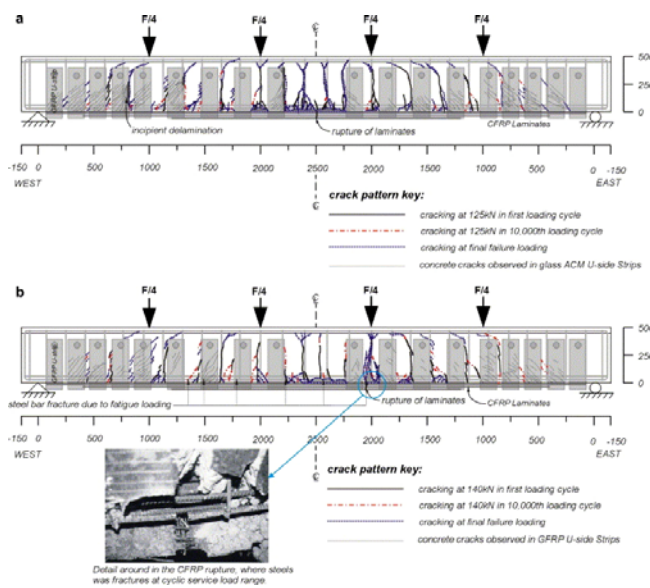


شکل ۸

اندازه گیری تغییر شکل نسبی مقاطع روی بتن و CFRP U شکل در اوج بارگذاری برای نمونه C۲

۵. نتایج آزمایش برای حد نهایی (تسلیم)

شکل ۵c پاسخ خمشی مرکزی تیر افقی بین دو پایه متوالی پل نسبت به بار عمودی کلی را برابر تیر C۲ نمایش می‌دهد. منحنی های نیروی خمشی اندازه‌گیری شده برای نمونه های P۱ و C۱ که برای مقایسه طرح ریزی شده بودند، رسم شدند. واضح است که رفتار نمونه های C۱, C۲ در حد نهایی تقریباً یکی هستند. حالت گسیختگی و رفتار نمونه C۲ نیز شبیه نمونه C۱ بود. پارگی ورق CFRP ناشی از کشش در وسط دهانه تیر پل در حد نهایی رخ داده است. نمونه‌ی ترک خورده در آخر آزمایش برای نمونه های C۱, C۲ در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همان طور که در بالا ذکر شد نمونه ترک خورده برای تیر C۲ خیلی شبیه نمونه ترک خورده تیر برای C۱ بود است. نقاط شکستگی فولاد تقویتی در اثر خستگی در شکل ۹b نشان داده شده است. عکس چگونگی نقاط شکستگی در CFRP و ترک نه میلگرد فولادی نشان می‌دهد، هیچ شکافتی در CFRP و GFRP U شکل در نمونه های C۱, C۲ پیدا نشد. پرواضح است که بارخستگی تأثیری در مقاومت نهایی شاه تیرهای پل تقویت شده با FRP ندارد. به عبارت دیگر کنترل طرح بحرانی ورق های FRP برای مقاومت خستگی شاه تیرهای پل بتنی مقاوم سازی شده هنوز بر مبنای روش بررسی دامنه‌ی تغییرات تنش فولاد است. خرابی ناشی از خستگی در روکش FRP یا سطح مشترک چسبیده بین روکش FRP و بتن نمی‌تواند رخ دهد.



(a) : نمونه C۱ ، بار شکست = ۲۲۰ KN ، خمشی مرکزی = ۶۰ mm

(b) : بار خستگی برای نمونه C۲ ، بار شکست = ۲۲۲ KN ، خمشی مرکزی = ۶۵ mm

شکل ۹

نمونه های ترک خورده از مراحل آزمایش در انتهای آزمایش

۶. نتیجه‌گیری

- (۱) نتایج اندازه‌گیری تغییر شکل نسبی روی سطوح پایینی بتن و ورق های CFRP مشخص می‌کند. که هیچ فرضی مبنی بر لغزش بین سطح بتن و ورق های FRP قابل قبول نیست.
- (۲) تعداد زیادی از ترک‌های موئی در تیرهای تقویت شده با ورق های CFRP طولی که در قسمت پایین تیرها به کار رفته‌اند، دیده می‌شود.
- (۳) فیبرهای U شکل GFRP برای بهبود مقاومت برش استفاده شده‌اند. این نوارها چسبندگی CFRP پوششی متصل شده به قسمت پایین تیرها را افزایش می‌دهد.
- (۴) نتایج آزمایش برای نمونه‌هایی که در معرض ۱۰۶ دور بارگیری متناوب قرار گرفته‌اند. نشان می‌دهد که رفتار تیر مقاوم سازی شده با CFRP و GFRP پوششی همانند عملکرد همان نوع تیر می‌باشد که در معرض بارگذاری یکنواخت در دامنه تغییرات بار قرار گرفته است بعلاوه CFRP پوششی، هنگامی که بار خستگی باعث شکستگی میلگرد فولادی می‌شود بار را ثابت نگه می‌دارد.

نتیجه‌ی آزمایش می‌نمایاند که FRP چسبانده شده با اپوکسی در برابر خستگی مقاومت بیشتری نسبت به عناصر تقویتی فولادی از خود نشان می‌دهد.

۷. مراجع

۱. M. Arduini and A. Nanni, Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement, *ACI Struct J* ۹۴ (۵) (۱۹۹۷), pp. ۴۹۳-۵۰۱
۲. Beukel A. Composite beams. HERON Research Report, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. ۱۹۷۸;۲۳(۲).
۳. M.J. Chajes, T.F. Januszka, D.R. Mertz, T.A. Thomson Jr. and W.W. Finch Jr., Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics, *ACI Struct J* ۹۲ (۳) (۱۹۹۵), pp. ۲۹۵-۳۰۳
۴. H.H. Charles and A.O. Scott, Cleaning and preparing concrete before repair, *ACI Concr Int* (۱۹۹۷), pp. ۶۰-۶۳.
۵. H.N. Garden and L.C. Hollaway, An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams, *Compos Struct* ۴۲ (۲) (۱۹۹۸), pp. ۱۷۵-۱۸۸
۶. M.N.S. Hadi, Retrofitting of shear failed reinforced concrete beams, *Compos Struct* ۶۲ (۱) (۲۰۰۳), pp. ۱-۶
۷. J. Lee, L. Hollaway and A. Thorne, Long-term static testing of an FRP prototype highway structure, *Compos Struct* ۲۸ (۴) (۱۹۹۴), pp. ۴۴۱-۴۴۸
۸. A.M. Malek, H. Saadatmanesh and M.R. Ehasani, Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, *ACI Struct J* ۹۵ (۱) (۱۹۹۸), pp. ۱۴۲-۱۵۲
۹. Meier U, Kaiser H. Strengthening of structures with CFRP laminates. In: Proceedings of the conference on advanced composite materials in civil engineering structures. ASCE ۱۹۹۱; p. ۲۲۴-۲۲.
۱۰. C. Nitereka and K.W. Neale, Analysis of reinforced concrete beams strengthened in flexure with composite laminates, *Can J Civil Eng* ۲۶ (۱۹۹۹), pp. ۶۴۶-۶۵۴.
۱۱. D.J. Oehlers, M.S. Mohamed Ali and W. Luo, Upgrading continuous reinforced concrete beams by gluing steel plates to their tension faces, *J Struct Eng ASCE* ۱۲۴ (۳) (۱۹۹۸), pp. ۲۲۴-۲۳۲
۱۲. H. Pham and R. Al-Mahaidi, Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites, *Compos Struct* ۶۶ (۱) (۲۰۰۴), pp. ۶۱۷-۶۲۵
۱۳. N. Plevris, T.C. Triantafillou and D. Veneziano, Reliability of RC members strengthened with CFRP laminates, *J Struct Eng ASCE* ۱۲۱ (۷) (۱۹۹۵), pp. ۱۰۳۷-۱۰۴۴.
۱۴. J. Purkiss and P. Blagojević, Comparison between the short and long term behaviour of fibre reinforced and unreinforced concrete beams, *Compos Struct* ۲۵ (۱-۴) (۱۹۹۳), pp. ۴۵-۴۹.
۱۵. T.M. Roberts, Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams, *The Struct Engr* ۶۷ (۱۲/۲۰) (۱۹۸۹), pp. ۲۲۹-۲۳۳.
۱۶. V. Sierra-Ruiz, J. Destrebecq and M. Grédiac, The transfer length in concrete structures repaired with composite materials: a survey of some analytical models and simplified approaches, *Compos Struct* ۵۵ (۴) (۲۰۰۲), pp. ۴۴۵-۴۵۴
۱۷. R.N. Swamy, R. Jones and A. Charif, Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates, *The Struct Engr* ۶۶ (۵) (۱۹۸۸), pp. ۸۵-۹۴.
۱۸. Y.C. Wang and J.I. Restrepo, Response of RC T-beams strengthened for flexure with staggered CFRP plates, *J Compos Constr* ۵ (۳) (۲۰۰۱), pp. ۱۸۸-۱۹۹.
۱۹. Y.C. Wang and C.H. Chen, Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates, *Compos Struct* ۵۹ (۲۰۰۳), pp. ۱۳۷-۱۴۸
۲۰. Fyfe Co. LLC. Design manual for Tyfo Fibrwrap System – Rev. ۱. San Diego, CA, USA; ۱۹۸۸.