

رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات CFRP

دکتر محمد رضا جواهری تفتی (عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد ، رئیس دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت)

تلفن: 03526228000 فاکس: 03526223241

آدرس پست الکترونیکی: DMR.JAVAHERITAFTI@YAHOO.COM

حسین انتظاری زارچ (عضو باشگاه پژوهشگران جوان ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد)

تلفن: 03923222567 فاکس: 03923226171

آدرس پست الکترونیکی: ENTEZARI_7681@YAHOO.COM

چکیده

نتایج حاصل از آزمایشات گوناگون انجام شده نشان می دهند که در اثر تقویت تیرهای بتن آرمه با صفحات CFRP ظرفیت برشی و خمشی این تیرها به میزان زیادی افزایش می یابد. اما عواملی مانند طرح تقویت این تیرها، تعداد لایه های صفحات CFRP ، نوع مهار کردن لبه صفحات CFRP و... بر روی عملکرد و کارایی صفحات CFRP در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه تاثیر می گذارند. در این مقاله به بررسی تاثیر عوامل زیر در ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات CFRP پرداخته می شود:

1- تعداد لایه های صفحات CFRP.

2- حضور یک لایه چسبنده نرم (لایه بافر) بین سطح رزین و سطح بتن.

3- استفاده از نوارهای U شکل در طول تیر.

4- استفاده از مهار بندی های U شکل، L شکل و X شکل جهت مهار کردن لبه صفحات CFRP.

کلید واژه ها: تیرهای بتن آرمه، مقاوم سازی، CFRP.

1- مقدمه:

در سراسر دنیا سازه هایی به زندگی و ترابری اختصاص دارند. این سازه ها کیفیت و کارکردهای متفاوتی دارند. اما با گذشت زمان و استفاده از آنها کیفیت و کارایی آنها کاهش می یابد. برخی از این سازه ها به علت فرسودگی باید جایگزینی بیابند اما به علت ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی جایگزینی تمامی سازه های فرسوده غیر ممکن است، پس ناگزیر به مقاوم سازی و به هنگام سازی این سازه ها هستیم. البته فرسودگی و خرابی تنها علل نیاز به مقاوم سازی سازه ها نیستند، بلکه عوامل دیگری مانند گسترش جمعیت، افزایش نیازهای اجتماعی و همچنین افزایش انتظارات جمعیت از سازه ها بحث مقاوم سازی سازه ها را مطرح می سازند.

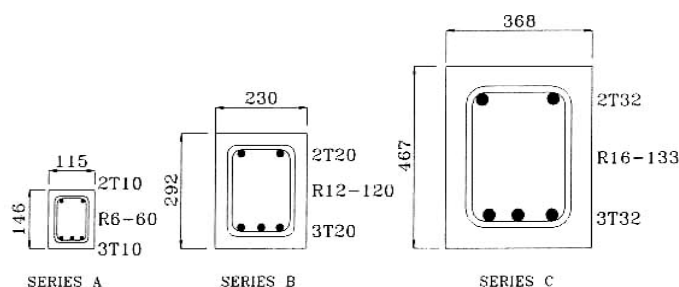
یکی از موثرترین تکنیک های مقاوم سازی سازه های بتن آرمه، استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) می باشد. این مواد پلیمری که به شکل صفحه و ورق می باشند، دارای ویژگی های ممتازی مانند نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و حملات شیمیایی، دوام مطلوب، مقاومت مکانیکی در دمای بالا، سهولت حمل و به کارگیری به علت انعطاف پذیری بالا و همچنین تاثیر هندسی ناچیز در اجزای تقویت شده می باشند.

چسباندن صفحات CFRP بوسیله رزین اپوکسی به سطح بیرونی تیرهای بتن آرمه موجب افزایش قابل توجهی در ظرفیت خمشی این تیرها می شود. اما در این میان عواملی مانند تعداد لایه های صفحات CFRP، مهار و یا عدم مهار صفحات CFRP با ورقه های CFRP و همچنین نوع مهار بندی و ... بر روی عملکرد و کارایی این صفحات در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه تاثیر می گذارند. در این مقاله به بررسی تاثیر عوامل مطرح شده در بالا می پردازیم.

2- بررسی آزمایشات :

تاکنون آزمایشات زیادی برای نشان دادن تاثیر اتصال صفحات CFRP بر روی ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه انجام شده است. در اکثر این آزمایشات یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی، تاثیر تعداد لایه های صفحات CFRP می باشد. در اینجا نیز برای واضح تر شدن تاثیر تعداد لایه های این صفحات نتایج آزمایشات انجام شده توسط آقای Leong و همکارانش را ارائه می دهیم. در این آزمایشات که بر روی 16 تیر بتن آرمه با سطح مقطع مستطیلی انجام شده بود، تیرها از لحاظ ابعاد به سه گروه متفاوت دسته بندی شده بودند. هدف از استفاده از تیرهای با ابعاد متفاوت نشان دادن تاثیر ابعاد این

تیرهای تقویت شده بر روی ظرفیت خمشی و خیز آنها بود. ابعاد سطح مقطع این تیرها در شکل 1 و ویژگیهای آن در جدول 1 آمده است.



شکل 1. ابعاد تیرها

جدول 1. ویژگی های تیرها

Series	Beam	Dimension (mm)		Internal reinforcements			External reinforcements (CFRP sheet)	
		D	L	Tensile	Comp.	Shear	No. of layers	Sheet thickness (mm)
				A_s/bd (%)	A_s/bd (%)	$A_v/b_w s$ (%)		
A	A1, A2	120	1500	1.71	1.14	0.82	0	0
	A3, A4	120	1500	1.71	1.14	0.82	1	0.165
	A5, A6	120	1500	1.71	1.14	0.82	2	0.330
B	B1, B2	240	3000	1.71	1.14	0.82	0	0
	B3, B4	240	3000	1.71	1.14	0.82	2	0.330
	B5, B6	240	3000	1.71	1.14	0.82	4	0.660
C	C1, C2	384	4800	1.71	1.14	0.82	0	0
	C3, C4	384	4800	1.71	1.14	0.82	3	0.495
	C5	384	4800	1.71	1.14	0.82	6	0.990

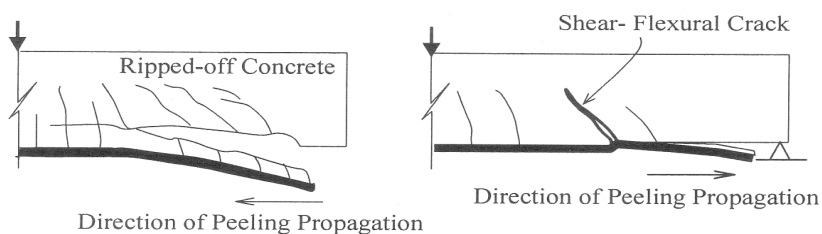
از انجام آزمایش بر روی این تیرها مشخص شد که با افزایش تعداد لایه های صفحات CFRP، ظرفیت خمشی تیرها افزایش و خیز و کرنش آنها کاهش می یابد (جدول 2). همچنین این آزمایشات نشان دادند که ابعاد تیرها تاثیر چشمگیری بر روی میزان افزایش ظرفیت و کاهش خیز تیرهای تقویت شده با صفحات CFRP ندارند. در این آزمایشات حالت گسیختگی در تیرهای کنترلی، خرد شدن بتن بود، در حالی که در تیرهای تقویت شده حالت گسیختگی پوسته شدن صفحات CFRP از سطح بتن بود، که باعث عدم استفاده از حداکثر توانایی صفحات CFRP جهت افزایش ظرفیت خمشی تیرهای تقویت شده، شده بود.

جدول 2. نتایج آزمایشات آقای LEONG

Series	Beam	Load at failure		Deflection at failure		Δ_{fail} / L (%)	ϵ_p^{fail}	Failure mode
		P_{fail} (kN)	% of ctrl.	Δ_{fail} (mm)	% of ctrl.			
A	A1 (ctrl)	60.4	-	38.6	-	2.57	-	CC
	A2 (ctrl)	60.7	-	46.4	-	3.09	-	CC
	A3	77.5	128	22.0	52	1.47	9910	ICID
	A4	75.5	125	21.8	51	1.45	8213	ICID
	A5	87.4	144	21.0	49	1.40	6745	ICID
	A6	85.8	142	20.9	49	1.39	6273	ICID
B	B1 (ctrl)	203.9	-	59.5	-	1.98	-	CC
	B2 (ctrl)	200.3	-	50.6	-	1.69	-	CC
	B3	263.5	130	35.0	64	1.17	7463	ICID
	B4	260.3	129	34.9	63	1.16	7995	ICID
	B5	294.7	146	32.2	59	1.07	5761	ICID
	B6	284.3	141	30.4	55	1.01	4691	ICID
C	C1 (ctrl)	520.0	-	76.2	-	1.59	-	CC
	C2 (ctrl)	519.1	-	74.3	-	1.55	-	CC
	C3	652.9	126	52.4	70	1.09	5824	ICID
	C4	669.3	129	56.4	74	1.17	7731	ICID

CC: خرد شدن، ICID: پوسته شدن CFRP به علت ترک خوردگی

مطابق مطالعات انجام شده توسط آقای Nanni و Arduini، پوسته شدن صفحات CFRP از سطح بتن ممکن است در یکی از دو حالت زیر رخ دهد. اولین حالت پوسته شدن برشی - خمشی می باشد (شکل 2- الف) که بر اساس ترک خمشی یا ترک برشی - خمشی آغاز می شود و به سمت تکیه گاه گسترش می یابد.



(ب) پوسته شدن لبه

(الف) پوسته شدن برشی - خمشی

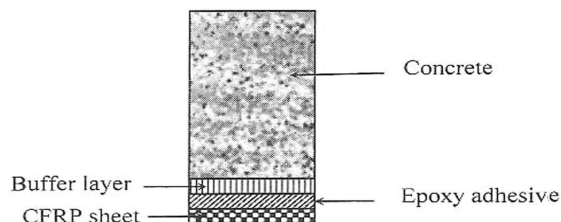
شکل 2. دو نوع رایج از پوسته شدن

دومین حالت پوسته شدن لبه صفحات CFRP از سطح بتن می باشد. (شکل 2- ب). این حالت در اثر ترکیب تنش های برشی و کششی نرمال قرار گرفته در مجاورت لبه صفحات رخ می دهد. یعنی هنگامی که تنش کششی به مقاومت کششی بتن می رسد، ترک خوردگی ایجاد می شود و به صورت افقی در سطح فولاد کششی گسترش می یابد و در نتیجه باعث گسیخته شدن پوشش بتنی می شود.

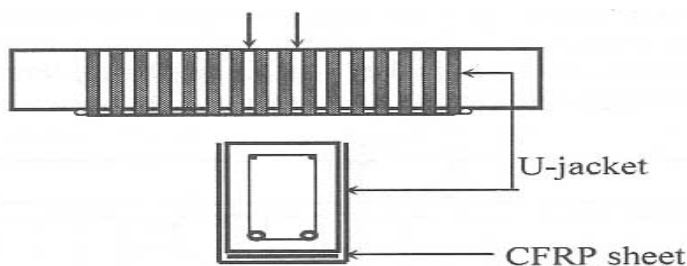
پوسته شدن صفحه از سطح بتن در اکثر آزمایشات انجام شده توسط محققین دیگر نیز قابل مشاهده است. آقای Takahashi و Sato در کشور ژاپن برای حل این مشکل دو راه حل زیر را پیشنهاد دادند و جهت بررسی آنها آزمایشاتی را انجام دادند.

1- استفاده از یک لایه چسبنده نرم (لایه بافر) در بین سطح بتن و سطح رزین (شکل 3).

2- استفاده از نوارهای U شکل از جنس ورقه های CFRP که در طول تیر و به فواصل یکسانی قرار می گیرند (شکل 4).



شکل 3. جزئیات سطح تقویت شده با صفحات CFRP و در حضور یک لایه بافر



شکل 4. طریقه استفاده از نوارهای U شکل

در این آزمایشات از 10 تیر بتن آرمه با سطح مقطع مستطیلی استفاده شده بود. این تیرها به 4 گروه دسته بندی شده بودند. ویژگیهای این تیرها و همچنین نتایج حاصل از انجام این آزمایشات در جدول 3 و نمودارهای شکل 5 نشان داده شده است. با مشاهده جدول و نمودارها متوجه می شویم که بار و خیز نهایی با استفاده از یک لایه بافر و صفحات CFRP افزایش می یابد. از طرفی با اضافه کردن نوارهای U شکل میزان خیز نهایی افزایش می یابد ولی بار نهایی آن نسبت به نمونه های دارای صفحات CFRP و لایه بافر افزایش زیادی نمی یابد.

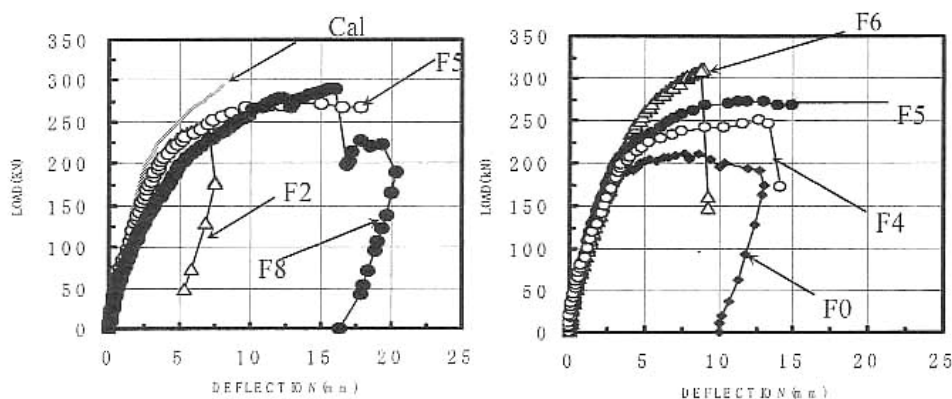
با افزایش در تعداد لایه های صفحات CFRP بار ماکزیمم افزایش می یابد اما با این حال خیز نهایی میل به کاهش دارد. همچنین با افزایش تعداد لایه های صفحات CFRP سختی تیرها کاهش می یابد که این کاهش در سختی تا حدی توسط نوارهای U شکل بهبود می یابد. بدون استفاده از لایه بافر، با افزایش تعداد لایه های صفحات CFRP خیز نهایی به سادگی افزایش نمی یابد اما خیز نهایی در نمونه های با لایه بافر و نوارهای U شکل 2/8 برابر بزرگتر از نمونه های بدون لایه بافر و پوشش U شکل می باشد.

جدول 3. ویژگی های تیرها و نتایج آزمایش

Group	No.	Ply of CFRP sheet	Ply of Buffer	U-jacket	f'_c (MPa)	Ultimate load (kN)	Remarks (failure modes)
A	F0	0	-----	-----	47.5	213	C.B, FTF
B	F1	1	-----	-----	35.8	227	P
	F2	2	-----	-----	40.2	244	P
	F3	3	-----	-----	39.0	270	P
C	F4	1	○	-----	50.3	254	BC
	F5	2	○	-----	50.3	278	FCC
	F6	3	○	-----	49.5	311	FCC
D	F7	1	○	○	50.1	249	BC
	F8	2	○	○	40.4	291	BU
	F9	3	○	○	46.3	330	BU

B.C: تیر کنترل، FTF: گسیختگی خمشی - کشی، P: پوسته شدن، FCC: گسیختگی پوشش

بتن، BC: گسیختگی ورقه CFRP، BU: گسیختگی پوشش U شکل

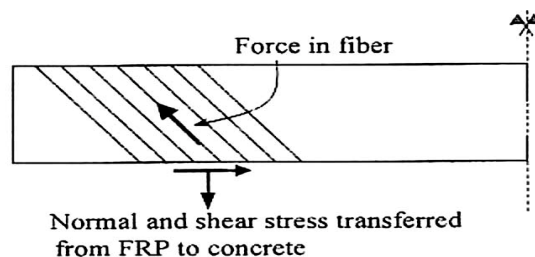


شکل 5. نمودارهای بار - خیز

همانطور که در جدول 3 نشان داده شده است، همانند آزمایشات دیگر، حالت گسیختگی در تیرهایی که برای تقویت آنها تنها از صفحات CFRP استفاده شده بود، پوسته شدن صفحات CFRP از سطح بتن بود و این نوع گسیختگی باعث کاهش کارایی صفحات شده بود. در تیر F4 که دارای یک لایه صفحه CFRP و لایه بافر بود، با پاره شدن صفحه CFRP گسیختگی رخ داد و این در حالی بود که در تیرهای F5 و F6 که به ترتیب دارای 2 و 3 لایه صفحه CFRP و یک لایه بافر بودند، به علت سختی زیاد صفحات CFRP، در پوشش بتنی تیرها گسیختگی رخ داده بود. در تیر F7 به علت بالا بودن میزان بار نهایی، صفحه CFRP توانایی تحمل این بار را نداشت و پاره شد، اما در تیرهای F8 و F9 به علت سختی زیاد صفحات CFRP و همچنین اتصال سخت این صفحات به تیرها، گسیختگی در نوارهای U شکل رخ داده بود.

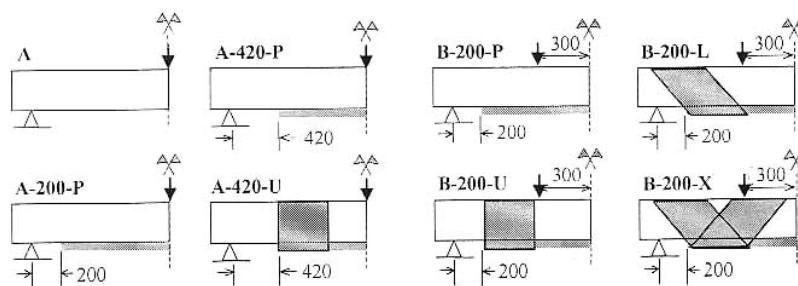
یکی دیگر از راه حل هایی که برای جلوگیری از پوسته شدن صفحات CFRP و در نتیجه افزایش ظرفیت خمشی تیرها وجود دارد، استفاده از نوارهای CFRP می باشد که در لبه های صفحات CFRP به دور تیر پیچیده می شوند. در اینجا نحوه پیچیدن نوارها به دور تیر در نوع جدا شدن صفحه CFRP و در نتیجه در ظرفیت باربری تیرها موثر می باشد. آقای Pimanmas و همکارانش سه نوع پیچیدن نوارهای CFRP به دور تیر یعنی U شکل، L شکل و X شکل را جهت مهار کردن لبه صفحات CFRP پیشنهاد کردند و برای مشاهده تاثیر این مهاربندی ها آزمایشاتی را انجام دادند.

در این آزمایشات پنداشته می شد که پوشش U شکل یک مهاربندی قائم را در برابر پوسته شدن ایجاد نماید. در حالی که پوشش های L شکل و X شکل یک مهاربندی قائم به همراه مهاربندی افقی را آماده سازند زیرا این دو قادر به خشی نمودن تنش های برشی و کششی در انتهای صفحه CFRP بودند (شکل 6).



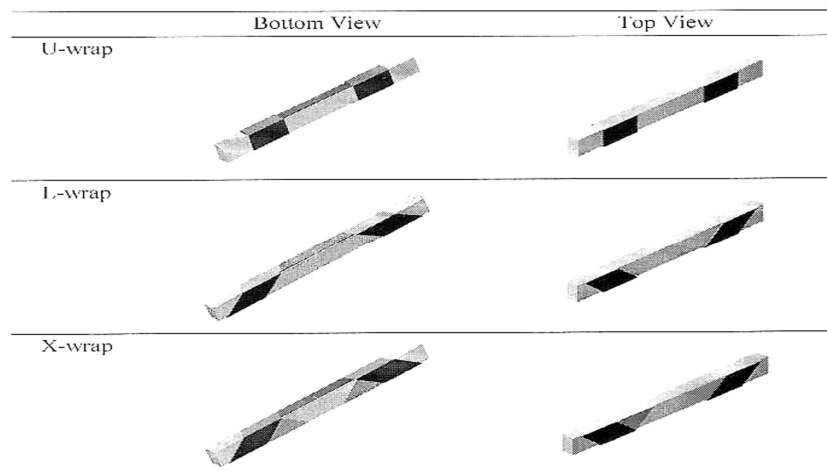
شکل 6. مقاومت پوشش L شکل و X شکل در برابر تنش های نرمال و برشی

این آزمایشات بر روی 8 تیر با جزئیات نشان داده شده در شکل های 7 و 8 انجام شد. نتایج این آزمایشات در جدول 4 نشان داده شده است.



شکل 7. جزئیات تیرهای آزمایش شده

تیرهای A-420-P و A-200-P دارای یک لایه صفحه CFRP و بدون هیچ گونه مهاربندی در لبه صفحه بودند. اعداد 200 و 420 فاصله لبه صفحه تا تکیه گاه را به میلیمتر نشان می دهند. از این تیرها برای بررسی تاثیر طول اتصال بر روی رفتار پوسته شدن صفحه استفاده شده بود.



شکل 8. تصویر سه بعدی از مهاربندی های U و L و X به شکل های U و L و X

با انجام آزمایشات مشاهده شد که صفحه CFRP در تیر A-200-P در اثر یک ترک برشی - خمشی شکل گرفته در فاصله 400mm از تکیه گاه پوسته شد، در حالی که صفحه CFRP در تیر A-420-P از لبه پوسته شد. از طرفی دیگر بار نهایی A-200-P بزرگتر از A-420-P می باشد که این نشان می دهد که فاصله بین لبه صفحه تا تکیه گاه بر روی حالت پوسته شدن و ظرفیت باربری تاثیر می گذارد.

جدول 4. نتایج آزمایشات آقای Pimanmas

Specimen	Loading capacity (kN)	Ultimate moment (kN.m)	Percentage of load increase ^a (%)	Failure mode
A (Control beam)	89.45	44.72	0.0	CC after yielding
A-200-P	105.66	52.83	18.13	SFP
A-420-P	95.68	47.83	6.96	EP
A-420-U	149.41	74.70	67.03	CC following EP
B-200-P	117.79	41.23	-7.82	EP
B-200-U	147.12	51.49	15.13	Premature CC and SFP
B-200-L	165.79	58.03	29.74	CC
B-200-X	176.44	61.76	38.08	CC

a: درصد افزایش بار نسبت به تیر کنترل محاسبه شده است. مقدار منفی کاهش در ظرفیت بار را نشان می دهد. CC: خرد شدن بتن، SFP: پوسته شدن برشی - خمشی، EP: پوسته شدن لبه

در اثر نزدیک کردن لبه صفحه به تکیه گاه، تنش های کششی و برشی نرمال در مجاورت لبه صفحه کوچکتر می شود که احتمالاً این پدیده به علت مهار عمودی حاصل از واکنش تکیه گاه می باشد. گر چه با نزدیک کردن لبه صفحه CFRP به تکیه گاه از پوسته شدن لبه صفحه جلوگیری می شود، اما تیر در برابر پوسته شدن برشی - خمشی ایمن نیست و اگر چه ظرفیت باربری بدست آمده در اثر پوسته شدن برشی - خمشی بزرگتر از ظرفیت بدست آمده در اثر پوسته شدن لبه می باشد اما پوسته شدن برشی - خمشی کاملاً نامطلوب می باشد زیرا پیش بینی موقعیت و بار پوسته شدن در این نوع پوسته شدن دشوار می باشد و در نتیجه جلوگیری از رخ دادن آن نسبت به پوسته شدن لبه صفحه دشوارتر می باشد.

تیر A-420-U دارای یک صفحه CFRP و نوار U شکل قرار گرفته در دو لبه صفحه CFRP بود. این تیر جهت مطالعه رفتار پوسته شدن لبه صفحه تحت مهاربندی قائم، آزمایش شده بود. نتایج آزمایشات نشان دادند که ظرفیت باربری این تیر 67٪ بیشتر از تیر کنترل و 56٪ بیشتر از تیر A-420-P بود. حالت گسیختگی در این تیر پوسته شدن لبه صفحه CFRP بود اما رشد آن توسط نوار U شکل کنترل شده بود. تیر B-200-P با یک لایه صفحه CFRP و بدون مهار بندی در لبه صفحه آماده شده بود در این تیر صفحه CFRP در باری برابر با 31٪ بیشتر از بار تیر کنترل از سطح بتن پوسته شد.

تیر B-200-U دارای یک لایه صفحه CFRP و نوار U شکل قرار گرفته در دو انتهای صفحه بود. بار نهایی این تیر به میزان 64٪ نسبت به تیر کنترلی A افزایش یافته بود. در این تیر یک ترک برشی قطری در لبه داخلی ورقه الیافی U شکل آشکار شد و به سوی ناحیه فشاری گسترش یافت که باعث خرد شدن ناگهانی بتن شد.

بار نهایی تیر B-200-L تقریباً 85/4٪ بیشتر از بار نهایی تیر کنترلی A بود، این تیر که با یک لایه صفحه CFRP و نوار L شکل قرار گرفته در دو انتهای صفحه آماده شده بود با خرد شدن بتن و بدون هیچ نشانه ای از پوسته شدن صفحه CFRP گسیخته شد. تیر B-200-X دارای بار نهایی تقریباً 97٪ بیشتر از بار تیر کنترلی بود و این تیر نیز همانند تیر B-200-L با خرد شدن بتن و بدون هیچ نشانه ای از پوسته شدن فرو ریخت.

نتیجه گیری :

در این مقاله به بررسی تأثیر تعداد لایه های صفحات CFRP در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه و تأثیر استفاده از یک لایه چسبنده نرم بین سطح بتن و سطح رزین ، استفاده از نوارهای U شکل قرار گرفته در طول تیر و مهار بندی لبه صفحات CFRP در

افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه و نوع گسیختگی آنها پرداخته شده است .
 نتایج حاصل از این بررسی ها در زیر آمده است :

1) در تیرهایی که تنها با صفحات CFRP تقویت شده بودند با افزایش تعداد لایه های صفحات CFRP بار نهایی افزایش و خیز نهایی کاهش می یابد .

2) در تیرهای دارای یک لایه چسبنده نرم (لایه بافر) و صفحات CFRP بار و خیز نهایی افزایش می یابد . حالت گسیختگی در این تیرها از پوسته شدن صفحات CFRP از سطح بتن به ازهم گسیختگی صفحات CFRP و گسیخته شدن پوشش بتنی تغییر کرد .

3) با استفاده از نوارهای U شکل در طول تیر میزان بار و خیز نهایی افزایش می یابد . حالت گسیختگی در تیرهای دارای این نوارها گسیختگی در نوارهای U شکل بود .

4) با مهاربندی لبه صفحات CFRP افزایش قابل توجهی در بارنهایی نسبت به تیرهای تقویت شده بدون این ویژگی مشاهده می شود . در تیرهای دارای مهاربندی X شکل میزان بار نهایی نسبت به تیرهای دارای مهار بندی L شکل و U شکل افزایش بیشتری یافته است . حالت گسیختگی در تیرهای دارای مهار بندی X شکل و L شکل خرد شدن بتن بود ، اما در تیرهای دارای مهار بندی U شکل حالت گسیختگی پوسته شدن CFRP بود ، که با نوارهای U شکل کنترل شد .

مراجع:

- 1.K.S.Leong,M.Maalej,“ Effect of Beam Size on Interfacial Shear Stresses and Failure Mode of FRP-Bonded Beams.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures,Voll.
- 2.M.Arduini,A.Nanni, “Parametric Study of Beams with Externanally Bonded FRP Reinforcement.ACI Structural Jurnal,94(5),1997,pp.493-501.
- 3.Y.Takahashi,Y.Sato, “Felexural Behavior of RC Beams Externally Reinforced with Carbon Fiber Sheets.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures.
- 4.P.Pornpongsaroj,A.Pimanmas, “Effect of End Wrapping on Peeling Behavior of FRP-Strengthened Beams.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures.
- 5.O.Joh,Z.Wang,H.Ibe, “Reinforcing Effects of CFRP and AFRP Sheets With Respect to Flexural Behavior of RC Beams.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures.
- 6.G.Camata,E.Spacone,V.Saouma, “Debonding Failure of RC Structural Members Strengthened with FRP Laminates.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures.
- 7.M.M.Lopez,A.E.Naaman, “Concrete Cover Failure or Tooth Type Failure in RC Beams Strengthened with FRP Laminate.”Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures.