

بررسی روش‌های مختلف تقویت برش اصطکاکی نمونه‌های بتن مسلح - کد B

میلاذ خاتمی راد^۱، محمد رضا توکلی زاده^۲

۱- دانشجوی دکترا دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی

۲- استاد یار دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی

چکیده

عملکرد برش اصطکاکی در انتقال برش در سطوح بتن‌ریزی شده مجزا و با تاخیر زمانی، مقاطع ترک‌خورده، درزهای انقطاع، نشیمن و قطعات پیش‌ساخته با استفاده از آرماتورهای انتظار شناخته شده و کاربرد وسیعی دارد. در تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی انتقال برش با استفاده از برش اصطکاکی حایز اهمیت می‌باشد. می‌توان تسلیحات خارجی بصورت ورق‌ها و نوارهای FRP را جایگزین تسلیحات بصورت میلگرد داخلی بتن نمود که امکان جاگذاری آنها در یک سازه موجود عملاً امکان پذیر نمی‌باشد. در این مقاله به بررسی روش‌های مختلف تقویت برشی نمونه‌های بتنی توسط ورق‌های فولادی و الیاف FRP بصورت میله‌های نصب شده در نزدیک سطح (NSM) و یا روی سطح خارجی (EB) پرداخته شده‌است. استفاده از الیاف FRP بصورت روش NSM نسبت به روش‌های دیگر برای تقویت برشی نمونه‌های بتنی توصیه می‌شود. طبق این روش، کرنش موثر الیاف FRP، مقاومت برشی نمونه‌ها و همچنین شکل‌پذیری نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته‌است. همچنین بر اساس روابط موجود در آیین‌نامه ACI و مقالات، رابطه‌ای برای ارزیابی مقاومت برش اصطکاکی ارائه شده‌است.

کلمات کلیدی: برش اصطکاکی، تقویت برشی، سازه‌های بتن آرمه، FRP، NSM، EB.

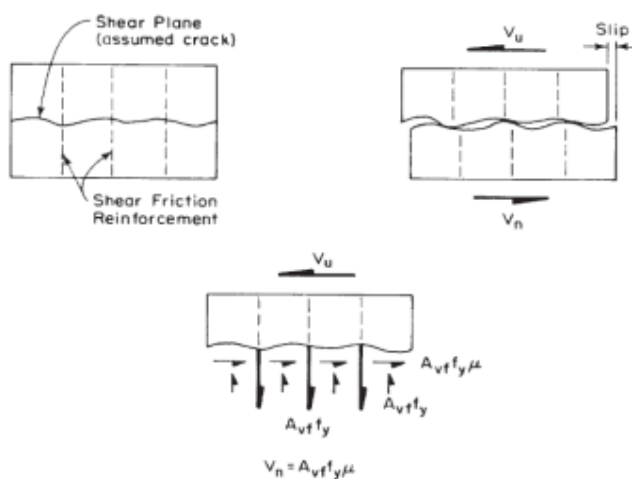
۱- پیشگفتار

ایده برش اصطکاکی بطور گسترده‌ای در بتن‌های مسلح مانند نشیمن، دیوار برشی کوپل، اتصال پی به دیوار و سازه پیش‌ساخته کاربرد دارد که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع در سطح اتصالات است. بیرکلند و بیرکلند در سال ۱۹۶۶ اتصالات در مقاطع بتنی پیش‌ساخته را مورد بررسی قرار داده و رفتار برشی در اتصال بتن به بتن و بتن به فولاد را بیان کردند و لزوم انجام آزمایش‌هایی را برای بررسی نمودن این پدیده ضروری دانستند [۱]. همانطور که اچ‌سو و همکاران در سال ۱۹۸۷ بررسی کرده‌اند، بحث برش اصطکاکی به دو بخش تقسیم بندی می‌شود: انتقال برش در امتداد صفحه بدون ترک و انتقال برش در امتداد صفحه ترک‌خورده. سازنر و همکاران تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه استفاده از نوارهای پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) جهت مقاوم‌سازی خارجی سازه‌های بتنی در برابر تنش‌های برشی در صفحه برش انجام دادند و نتایج آزمایشگاهی و تئوری بدست آمده را در قالب دو مقاله در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ منتشر کردند [۲ و ۳]. منصور و همکاران در سال ۲۰۰۸ جهت بررسی اثر مقاومت بتن و پارامتر تسلیحات و همچنین اندرکنش این دو در ظرفیت انتقال برش، ۱۹ نمونه ترک‌خورده را آزمایش کردند [۴]. محمد علی و همکاران در سال ۲۰۰۸ با انجام آزمایش بر روی ۱۴ نمونه پوش‌آو به بررسی انتقال برش در امتداد ترک در مقاطع بتن مسلح تقویت شده با FRP پرداختند. یک نمونه به عنوان مرجع و تعدادی نمونه بصورت تقویت شده با نوارها و یا ورق FRP کربنی بصورت تسلیحات خارجی (EB) و نصب نزدیک به سطح (NSM) انجام شده‌است [۵].

جایپراکاش و همکاران در سال ۲۰۰۹ با انجام آزمایش‌هایی بر روی ۶ نمونه بتن مسلح بصورت ترک‌خورده به بررسی اثر تقویت خارجی با FRP کربنی بر روی ظرفیت برشی پرداختند. افزایش تنش برشی در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های بدون تقویت بین ۷ تا ۵۶ درصد بوده است [۶].

۲- برش اصطکاکی:

همان گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، زمانی که یک سطح برش تحت نیرو قرار می‌گیرد نیروی برشی V تمایل به ایجاد لغزش در طول سطح برش دارد. به علت زبر بودن سطح ترک موجود، حرکت لغزشی باعث جداشدگی دو نیمه بتن می‌شود. این خود سبب ایجاد نیروی کششی T در مسلح کننده و رسیدن تنش موجود در آن به تنش حد نهایی و در نتیجه ایجاد یک نیروی منگنه‌ای خارجی روی بتن می‌شود. سپس مقاومت در برابر برش اعمال شده، توسط اصطکاک بین سطوح ترک (بوسیله مقاومت در برابر بریده شدن ناهمواری‌ها و عملکرد دوخت آرماتور گذرنده از عرض ترک) تامین می‌شود [۷].



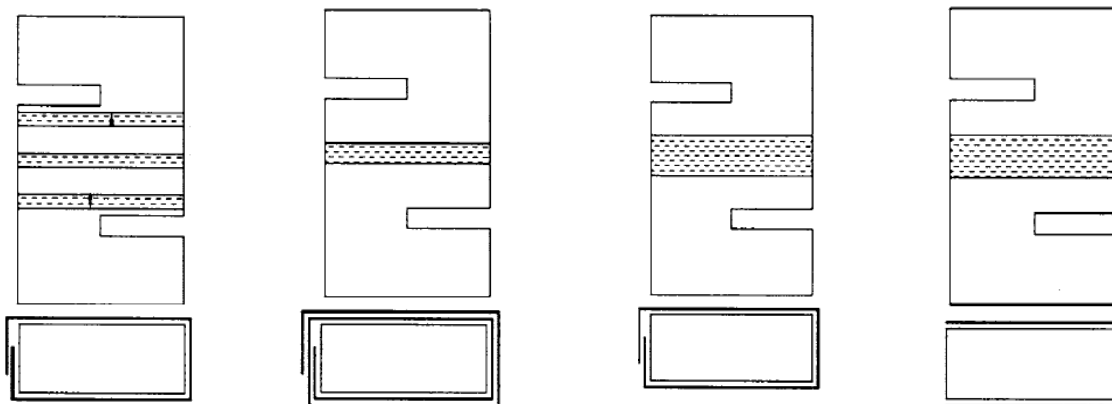
شکل ۱- ساز و کار برش اصطکاکی

در این مقاله به روش‌های مختلف تقویت برشی نمونه‌های بتنی برای انتقال برش، پرداخته می‌شود. تقویت برشی نمونه‌های به صورت‌های زیر انجام می‌شود:

- نمونه‌های تقویت شده با تسلیحات خارجی
- نمونه‌های تقویت شده با تسلیحات داخلی و خارجی
- نمونه‌های تقویت شده به روش‌های EB و NSM
- نمونه‌های تقویت شده با تسلیحات داخلی

۳- نمونه‌های تقویت شده با تسلیحات خارجی [۳]

سائز ۳۶ نمونه ترک‌خورده بدون آرماتور برشی را برای بررسی اثر تقویت با نوارهای FRP مورد آزمایش قرار داد. اولین عامل مورد بررسی اثر طرح‌های مختلف دورپیچ‌های FRP بود. در شکل ۲ انواع طرح‌های دورپیچ مورد بررسی نشان داده شده است.

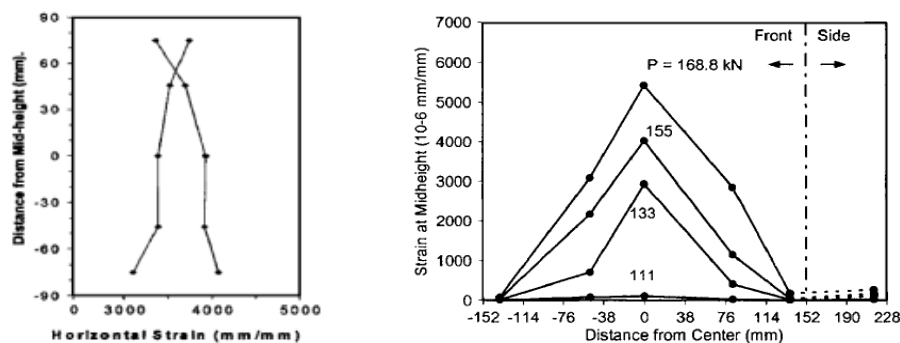


شکل ۲- گونه‌های مختلف چیدمان دورپیچ‌های CFRP بر روی نمونه‌های بتنی

نتایج نشان داده است که، افزایش مقاومت برشی قابل توجهی در نمونه‌های دورپیچ کامل نسبت به نمونه‌های تقویت شده از دو طرف وجود ندارد، تنها در نمونه‌های دورپیچ افزایش تغییر مکان برشی بخاطر اثرات مهار دورپیچ مشاهده شده است. دومین عامل مورد بررسی در این تحقیق نسبت تنش برشی به تنش قائم بود. بدین منظور نمونه‌ها با سه مقدار مختلف ارتفاع موثر برش ساخته شده و با نوارهای FRP تقویت شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت تسلیحات، ظرفیت برش اصطکاکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. که افزایش ظرفیت برش اصطکاکی تابعی از این نسبت است. در تمامی محدوده‌های این نسبت ظرفیت برش اصطکاکی نمونه‌ها بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۷ مقاومت فشاری بتن بود. شکست چسبندگی سطح بتن و الیاف، ظرفیت برشی را محدود می‌کنند.

مشاهدات نشان داد که نمونه‌ها در طی دو مرحله پی در پی برش را تحمل می‌کنند: (۱) تنش برشی به تنهایی توسط بتن تحمل می‌شود تا اینکه بتن به مقاومت برش اصطکاکی خود برسد. (۲) تنش اضافی توسط ورق‌های FRP بصورت نیروی گیره‌ای تحمل می‌شود.

همچنین مطابق شکل ۳ کرنش کششی ورق‌های تقویتی در ارتفاع میانی ورق در راستای افقی نسبت به صفحه برش متقارن است و بیشترین مقدار آن در محل صفحه برش بوده و با حرکت بسمت لبه‌های نمونه، بطور خطی کاهش می‌یابد (توزیع مثلی کرنش کششی). همچنین کرنش کششی در طول صفحه برش تقریباً یکنواخت است. کرنش در الیاف با پیچیدن دورپیچ ۱۹ درصد از کرنش در حالت دیگر بیشتر است. کرنش موثر الیاف در این آزمایش‌ها بین ۱۸ تا ۴۸ درصد کرنش نهایی FRP مشاهده گردید.



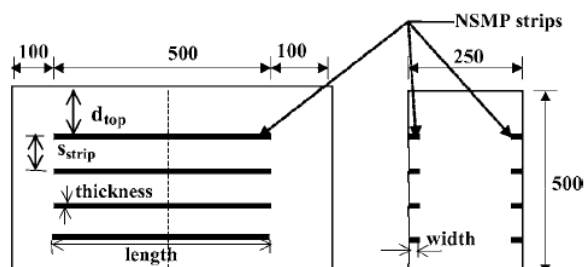
شکل ۳- توزیع کرنش کششی در ورق‌های تقویتی چسبیده بر روی بتن

۴- نمونه های تقویت شده با تسلیحات داخلی و خارجی [۶]

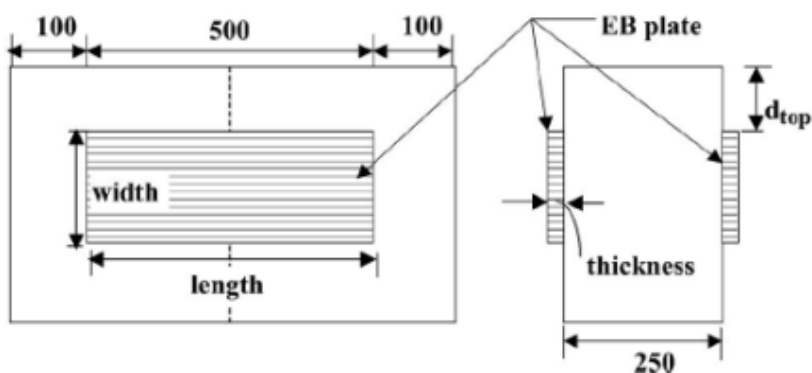
جایپراکاش و همکاران در سال ۲۰۰۹ با انجام آزمایش بر روی ۶ نمونه بتن مسلح ترک خورده به بررسی اثر تقویت خارجی با CFRP بر روی ظرفیت برشی پرداختند. افزایش تنش برشی در نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های بدون تقویت بین ۷ تا ۵۶ درصد بوده است. نتایج آزمایش ها نشان دادند با افزایش درصد تسلیحات خارجی مقدار مقاومت نهایی افزایش می یابد. اگرچه با افزایش درصد آرماتورهای داخلی اثر تقویت خارجی توسط FRP کربنی کاهش می یابد. مقدار لغزش و بازشدگی عرض ترک در نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های تقویت نشده در بار مشابه، کمتر می باشد اگرچه نمونه های تقویت شده در بار نهایی لغزش و بازشدگی عرض ترک بیشتری را تحمل می کنند. سختی نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های تقویت نشده بیشتر می باشد.

۵- نمونه های تقویت شده به روش های EB و NSM [۵]

محمد علی و همکاران در سال ۲۰۰۸ با انجام آزمایش بر روی ۱۴ نمونه بتن مسلح به بررسی انتقال برش در امتداد ترک در مقاطع بتن مسلح تقویت شده با FRP پرداختند. یک نمونه به عنوان مرجع و تعدادی نمونه بصورت تقویت شده با نوارها و یا ورق FRP کربنی و ورق های فولادی بصورت EB (شکل ۴) و NSM (شکل ۵) انجام شده است. نتایج نشان داد که ظرفیت برشی در امتداد ترک قطری بحرانی در بتن مسلح تقویت شده با FRP بصورت نوار یا ورق دو برابر می شود. افزایش در ظرفیت برشی بستگی به مقاومت جداشدگی نوار یا ورق FRP دارد. نتایج در نمونه های تقویت شده EB رفتار ترد و شکننده ای را از خود نشان داد در حالیکه تقویت بروش NSM رفتاری شکل پذیر را دارد. توصیه می شود برای تقویت بتن های مسلح با FRP از NSM استفاده شود.



شکل ۴- نصب FRP به روش نزدیک به سطح (NSM)



شکل ۵- نصب FRP به روش تسلیحات خارجی (EB)

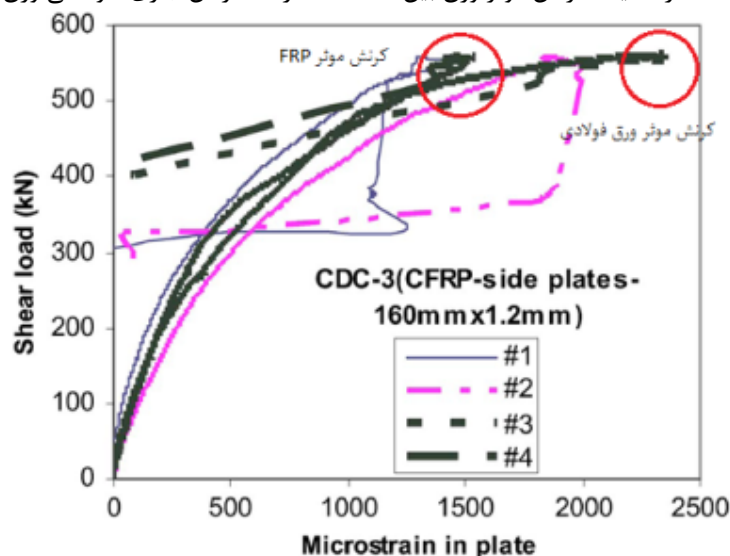
در روش تقویت به EB سطح مقطع ورق‌های فولادی $\frac{2}{5}$ برابر سطح مقطع ورق‌های پلیمری در نظر گرفته شده است. نمونه‌های تقویت شده با FRP کرنی، ۶۲ الی ۱۱۶ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه تقویت نشده دارند درحالی‌که نمونه‌های تقویت شده با ورق فولادی، ۸۶ الی ۱۴۳ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه تقویت نشده دارند. با وجود بکاربردن ورق‌های فولادی با سطح مقطع بیشتر نسبت به ورق‌های پلیمری، مقاومت برشی نمونه‌های تقویت‌شده با ورق‌های فولادی تنها ۱۵ درصد بیشتر می‌باشد.

در شکل ۶ شکست نمونه‌های تقویت شده به روش EB نشان داده شده‌است. همانطور که دیده می‌شود شکست نمونه‌های تقویت شده با FRP بصورت یک شکست ترد می‌باشد. همچنین شکست نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های فولادی با وجود رفتار شکل‌پذیر فولاد، ترد می‌باشد.



شکل ۶- شکست نمونه‌های تقویت شده به روش خارجی

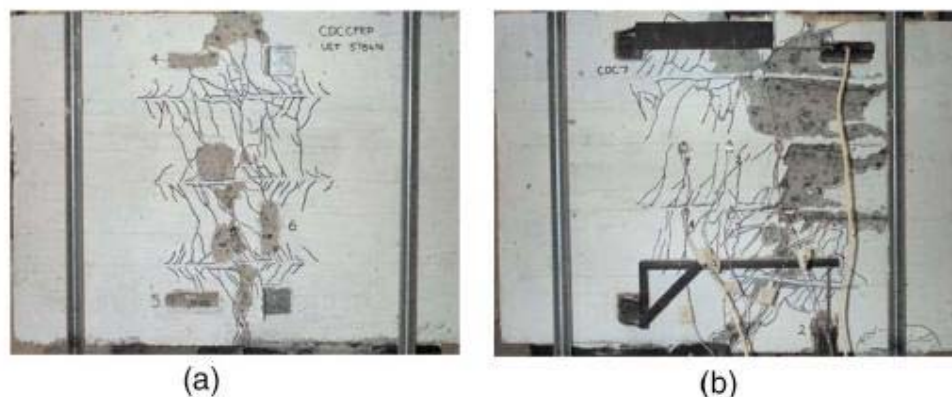
در شکل ۷ کرنش موثر الیاف و ورق‌های فولادی نشان داده شده‌است. در روش EB کرنش موثر الیاف بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کرنش نهایی الیاف می‌باشد. در حالی‌که کرنش موثر ورق بین ۲۵ تا ۴۰ درصد کرنش جاری شوندگی ورق می‌باشد.



شکل ۷- کرنش موثر ورق‌های فولادی و FRP

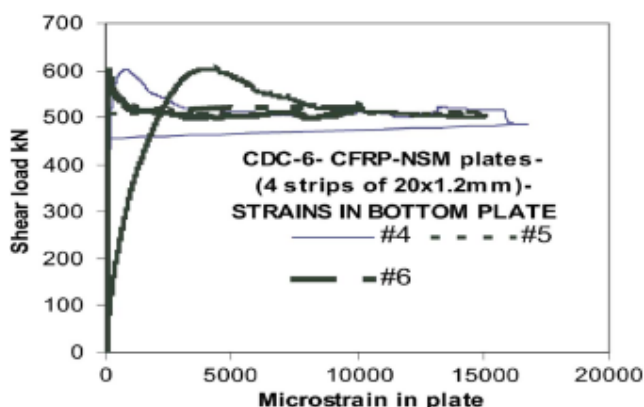
در تقویت به روش NSM توسط ورق‌های فولادی، افزایش مقاومت ۵۴ الی ۷۰ درصدی نسبت به نمونه‌های مرجع بدست آمده است. شکست این نمونه‌های نیز ترد می‌باشد.

در تقویت به روش NSM توسط FRP، افزایش مقاومت ۶۶ الی ۱۰۸ درصدی نسبت به نمونه‌های مرجع بدست آمده است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است توزیع و گسترش ترک اطراف سطح برش باعث ایجاد رفتار شکل پذیر در این نمونه‌ها می‌شود. در روش NSM سطح چسبندگی الیاف به بتن دو برابر سطح چسبندگی الیاف در روش EB می‌باشد.



شکل ۸- توزیع و گسترش ترک اطراف سطح برش

در شکل ۹ کرنش موثر الیاف نشان داده شده است. در روش NSM کرنش موثر ۵۵ الی ۹۰ درصد کرنش نهایی الیاف می‌باشد.



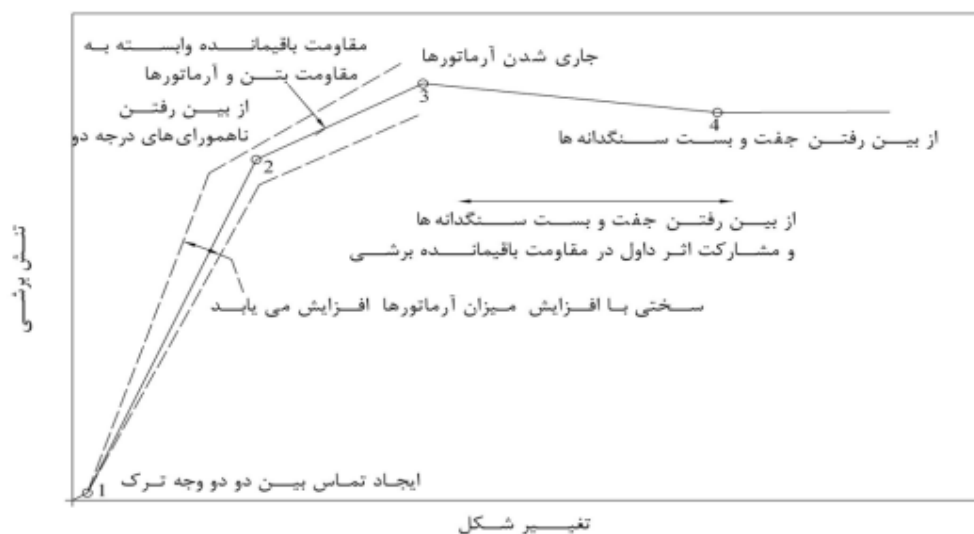
شکل ۹- کرنش موثر الیاف در روش NSM

۶- رفتار کلی نمونه‌های بتن آرمه تقویت نشده [۴]

منصور و همکاران در سال ۲۰۰۸ جهت بررسی اثر مقاومت بتن و پارامتر تسلیحات و همچنین اندرکرنش این دو در ظرفیت انتقال برش، ۱۹ نمونه ترک‌خورده را آزمایش کرد. با توجه به مشاهدات در حین آزمایش، همانند شکل ۱۰ رفتار لغزشی بتن با یک ترک اولیه در طی انتقال برش توسط ۴ نقطه مشخص می‌شود. منحنی با یک شیب ثابت بخاطر وجود یک شکاف (ترک) شروع می‌شود. نقطه ۱ متناظر با ایجاد یک تماس مناسب بین سطوح ترک، نقطه ۲ متناظر با خرد شدن نهایی ناهمواری‌های سطوح ترک، نقطه ۳ متناظر با تسلیم تسلیحات برشی و رسیدن به ماکزیمم ظرفیت برش، نقطه ۴ متناظر با خرد شدن فصل مشترک و در نتیجه از دست دادن کامل اثر قفل‌وبست دانه‌ای است. همچنین ظرفیت برشی باقیمانده بواسطه عملکرد دوخت تسلیحات برشی بخاطر امکان سخت‌شدگی کرنش است.

قابل ذکر است که شاخه یک (بین نقاط ۱ و ۲) با مقاومت بتن و پارامتر تقویت رابطه مستقیم دارد درحالی‌که شاخه دو (مابین

نقاط ۲ و ۳ ثابت است.



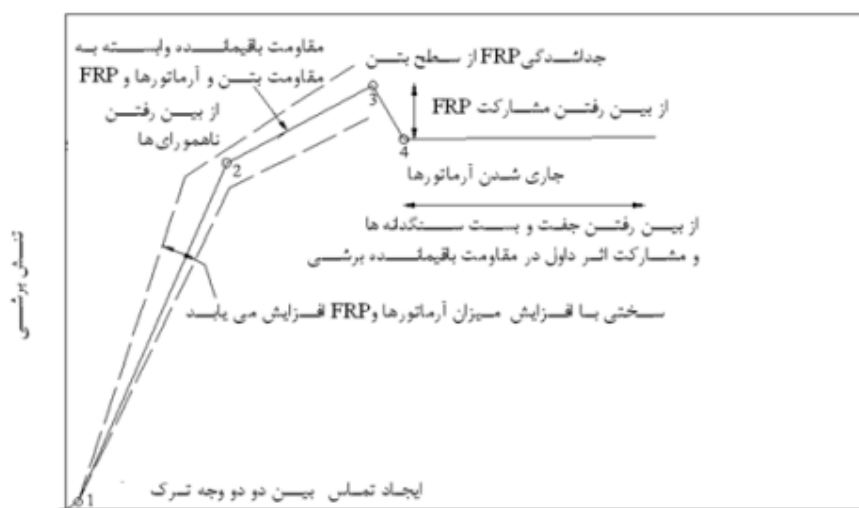
شکل ۱۰- نمودار بار- تغییر شکل برشی برای نمونه های تقویت نشده

۷- رفتار کلی نمونه های بتن آرمه تقویت شده با FRP

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، منحنی با شاخه سخت شونده گسی تدریجی به علت ترک موجود در نمونه های ترک خورده آغاز می شود. برای آنکه نمونه ها بتوانند بار تحمل کنند لازم است که سطح دو طرف ترک با هم تماس داشته باشند و این اتفاق به تدریج بین برآمدگی های دو سطح فاصله ایجاد می کنند. زمانی که تماس رخ داد، منحنی با شیب ثابتی ادامه پیدا می کند. رخداد اول به علت ایجاد تماس بین دو سطح ترک پدیدار می گردد. با افزایش بار، ناهمواری های سطح ترک شروع به تغییر شکل می کنند، بنابراین میلگردها و ورق های FRP سطح برش تحت تنش قرار گرفته و ترک را به هم وصل می کنند. تماس ناشی از میلگردها و FRP سخت تر از تماس بین ناهمواری های سطح ترک می باشد.

نمودار زمانی که ناهمواری های شروع به از بین رفتن می کند نرم می شود. بنابراین تماس در امتداد ترک ممکن می شود. زمانی که تماس در امتداد ترک ایجاد شد، این امکان وجود دارد که نیرو بر اصطکاکی موجود بین دو طرف ترک غلبه کرده و یک طرف ترک نسبت به طرف دیگر آن شروع به لغزش (لغزش اصطکاکی) کند. بازشدگی عرض ترک منجر به افزایش سرعت لغزش می گردد. این رخداد به علت از بین رفتن ناهمواری ها رخ می دهد.

منحنی با شیبی کمتر ادامه پیدا می کند، تا زمانی که ورق FRP از سطح بتن جدا شود. رسیدن به مقاومت نهایی رخداد سوم را منجر می شود. زمانی که ورق FRP از سطح بتن جدا می شود پدیده چفت و بست سنگدانه ها و اصطکاکی مهمترین مکانیزم موجود خواهد بود. در ادامه هرگونه تلاش برای افزایش بار منجر به تغییر شکل های بزرگ در میلگردها می شود. خردشدگی سطح تماس باعث کاهش قابل ملاحظه نیروی چفت و بست سنگدانه ها خواهد شد. بعد از جداسازی FRP از سطح بتن افت سریع منحنی بعد از رسیدن به بار نهایی رخ خواهد داد که دلیل آن ترد بودن رفتار مصالح FRP می باشد. از بین رفتن کامل پدیده چفت و بست سنگدانه ها و جاری شدن میلگردها با رخداد چهارم نامگذاری می شود. در نهایت مقاومت برشی پسماند که عمدتاً ناشی از عملکرد داول میلگردها به علت امکان وجود سخت شدگی کرنش می باشد، بوجود خواهد آمد.



تغییر شکل

شکل ۱۱- نمودار بار - تغییر شکل برشی برای نمونه‌های تقویت شده

۸- رابطه ظرفیت برشی نمونه‌های مسلح تقویت شده

برش در نمونه‌های آزمایشگاهی، توسط اصطکاک در دو وجه ترک، بتن، آرماتورهای سطح برش و اندرکنش بین بتن و ورق FRP در امتداد ترک انتقال پیدا می‌کند.

رابطه (۱)، رابطه‌ی ساده‌ای برای ارزیابی مقاومت برش اصطکاکی در مقاطع بتنی تقویت شده با FRP می‌باشد.

$$v_u = v_{con} + v_{bar} + v_{frp} \quad (1)$$

که در رابطه فوق:

v_{con} = مقاومت برش اصطکاکی ناشی از مقاومت بتن

v_{bar} = مقاومت برش اصطکاکی ناشی از میلگردها

v_{frp} = مقاومت برش اصطکاکی به علت برهم‌کنش بتن و ورق FRP

با ترکیب روابط ارائه شده توسط آیین‌نامه ACI، متاک و سائنز می‌توان رابطه (۲) را برای محاسبه مقاومت برشی مقاطع بتنی تقویت شده ارائه نمود [۷، ۳، ۸].

$$v_u = 0.11f'_c + 0.8\rho_{bar}f_y + 0.50\rho_f f_{fu}^* \quad (2)$$

۹- نتیجه‌گیری

تقویت توسط ورق‌های فولادی و FRP بصورت EB و NSM از جمله روش‌های تقویت برشی تیرهای بتن آرمه می‌باشد. در این مقاله با مروری بر ادبیات فنی به مقایسه این روش‌ها برای افزایش مقاومت برشی طبق آزمایش‌ها انجام گرفته، پرداخته شده‌است. نتایج زیر حاصل شده‌است:

- افزایش مقاومت برشی در نمونه‌های دورپیچ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ورق از دو طرف. تنها در نمونه‌های دورپیچ افزایش تغییر مکان برشی بخاطر اثرات مهار دورپیچ مشاهده شد.
- کرنش در ورق دورپیچ FRP حدود ۲۰ درصد از کرنش در ورق FRP نصب شده در دو طرف بیشتر است.

- در روش EB کرنش موثر الیاف بین ۲۰ تا ۵۰ درصد کرنش نهایی ورق می‌باشد. در حالیکه کرنش موثر ورق بین ۲۵ تا ۴۰ درصد کرنش تسلیم ورق می‌باشد. در روش NSM کرنش موثر ۵۵ تا ۹۰ درصد کرنش نهایی ورق FRP می‌باشد.
- در روش NSM سطح چسبندگی میله تقویت کننده به بتن دو برابر سطح چسبندگی در روش EB می‌رسد.
- شکست نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP به روش EB ترد می‌باشد. همچنین در نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های فولادی به روش EB و NSM با وجود رفتار شکل‌پذیر فولاد، شکست ترد اتفاق می‌افتد. در تقویت به روش NSM توسط میله‌های FRP، توزیع و گسترش ترک اطراف سطح برش باعث ایجاد رفتار شکل‌پذیر در این نمونه‌ها می‌شود.
- نتایج آزمایش‌ها نشان دادند با افزایش درصد تسلیحات خارجی مقدار مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. اگرچه با افزایش درصد آرماتورهای داخلی اثر تقویت خارجی توسط FRP کاهش می‌یابد.
- رفتار کلی نمونه‌های تقویت شده در چهار مرحله نشان داده می‌شود و رابطه زیر برای محاسبه مقدار افزایش مقامت برشی در ادبیات فنی برای ارایه شده‌است.

$$v_u = 0.11f_c' + 0.8\rho_{bar}f_y + 0.50\rho_f f_{fu}^*$$

۱۰- مراجع

- [1] Birkeland, P. W., Birkeland, H. W., 1966, "Connection in precast concrete construction." Journal of American Concrete Institute, 63(3): 345-368.
- [2] Saenz, N., Pantelides, C. P., and Reaveley, L. D., 2004, "Strut and tie model for shear friction of concrete with fiber-reinforced polymer composites." ACI Structural journal, 101(6): 863-871.
- [3] Saenz, N. Pantelides, C. P. 2005. "Shear friction capacity of concrete with external carbon FRP strips." Journal of Structural Engineering, 131(12): 1911-1919.
- [4] Mansur, M. A., Vinayagam, T., and Tan, K., 2008, "Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, 20(4):294-302.
- [5] Mohamed Ali, M. S., Oehlers, D. J., and Griffith, M. C., 2008, "Shear transfer across cracks in FRP strengthened RC member." Journal of Composite for Construction, 12(4): 416-424.
- [6] Jayaprakash, J., Abdul Samad, A. A., and Abbasvoch, A. A., 2009, "Experimental investigation on shear capacity of reinforced concrete pre-cracked push-off specimens with externally bonded bi-directional carbon fiber reinforced polymer fabrics." Canadian Center of Science and Education Journal (CCSE), 3(7): 86-98.
- [7] ACI Committee 318, 1999, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary." American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- [8] Mattock, A. H., and Hawkins, N. M., 1972, "Shear transfer in reinforced concrete-recent research." Portland Cement Association, PCI Journal, 17(2): 55-75.