



Delamination در تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP^۱ چیست؟

ایمان الیاسیان - کارشناس ارشد سازه

iman.elyasian@gmail.com

چکیده:

در تقویت ترکیبی اعضای بار بر بتن آرمه سازه‌ای با ورقه‌های FRP یا ورقه‌های فلزی یک اثر متقابل پیچیده^۲ بین آن دو وجود دارد، به عبارت دیگر بایستی رفتار مواد شامل مقاومت، تغییر شکل و کرنش نهایی، شکل پذیری، ... و مودهای شکست هر ۲ ماده (بتن آرمه + FRP) را برای تشخیص نحوه گسیختگی مقطع تقویت شده بررسی و تلفیق نمود. یکی از مودهای خطرناک شکست که در تقویت خمشی و سایر تقویت‌های اعضای بار بر سازه‌ای رخ می‌دهد، Delamination است و در این مقاله به دنبال شناخت این مود در تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP هستیم.

کلید واژه ها: بتن آرمه، Delamination، تقویت خمشی تیر، ورقه FRP

مقدمه :

به طور کلی در تقویت تیر بتن آرمه با ورقه FRP مدهای گسیختگی متنوعی وجود دارد که یکی از آنها مد ترد و ناگهانی delamination است که وقوع چنین مد مرسوم به طور کلی بستگی به پارامترهای مختلفی چون نحوه تقویت، خصوصیات مقطع بتن آرمه مانند دهانه تیر بتن آرمه، خصوصیات ورقه FRP و الگو و نحوه اتصال به تیر و نوع چسب چون ژاکت U شکل، تعداد و نوع لایه‌های FRP، ترتیب و محل قطع لایه‌ها و ... دارد.

۱- مدهای شکست تیر بتن آرمه تقویت خمشی شده با ورقه FRP

به طور کلی در تقویت خمشی تیر بتن آرمه با FRP مدهای گسیختگی را به ۲ بخش ۱- گسیختگی در تیر بتنی تقویت نشده ۲- گسیختگی در تیر تقویت خمشی شده با ورقه FRP تقسیم می‌کنیم.

گسیختگی‌های خمشی تیر معمولی بتن آرمه شامل ۱- گسیختگی نرم (تسلیم آرماتور) ۲- گسیختگی ترد (خرد شدگی بتن) است و همان طوری که می‌دانیم در گسیختگی نرم ابتدا آرماتور کششی تسلیم می‌شود، سپس به تدریج ناحیه فشاری بتن خرد می‌شود و در گسیختگی ترد بدون اخطار قبلی و ناگهانی قبل از تسلیم آرماتور کششی ناحیه فشاری بتن خرد می‌شود که بایستی جلوی این مد خطرناک را گرفت.

1 - Delamination in Flexural strengthening of RC beams with FRP

2-Complex interaction



در مورد مود های شکست ورقه FRP دو مود اصلی و موضعی وجود دارد که مود های اصلی شامل پارگی ورقه FRP^۱ و عدم پیوند ورقه FRP^۲ می باشد و مودهای موضعی اکثرآ زیر شاخه های مود عدم پیوند ورقه FRP می باشد مانند anchorage failure ، Delamination ، peeling off و ...

بر اثر تقویت ترکیب مدهای شکست خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP اتفاق می افتد و به دلیل پیچیدگی مسأله و امکان انتقال مود شکست از حالت خمشی به مد خطرناک تر برشی اکثر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است به بررسی حالاتی خاص با فرضیات ساده شونده و صرفاً یک یا چند پارامتر مؤثر پرداخته شده است.

به عنوان مثال سعادتمنش و ملک در سال ۱۹۹۸ به بررسی تأثیر فاکتور ضخامت در تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP^۱ با فرضیاتی چون ۱- استفاده از الگوی تقویتی ۲ طرفه یا U شکل ۲- صرف نظر کردن از مد گسیختگی عدم پیوند و مدهای موضعی ۳- سازگاری کرنش آرماتور، بتن و کامپوزیت ۴- باقی ماندن صفحات به صورت صفحه در خمش (اصل برنولی) ۵- صرف نظر کردن از مقاومت کششی بتن، مقاومت چسب و مقاومت فشاری FRP پرداخته اند و در آن مدهای گسیختگی ترکیبی در تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP بر اثر تغییر در ضخامت ورقه FRP به موارد زیر طبقه بندی شده اند:

- ۱- تسلیم آرماتور کششی و به دنبال آن پارگی ورقه FRP قبل از این که بتن ناحیه فشاری خرد شود (مد گسیختگی ایده آل برای تقویت خمشی با ورقه FRP) ۲- تسلیم آرماتور کششی و به دنبال آن خرد شدن بتن ناحیه فشاری؛ این ۲ مد گسیختگی فوق الذکر نرم بوده و با اخطار قبلی همراه است.
 - ۳- خرد شدگی بتن قبل از تسلیم آرماتور کششی؛ این مد گسیختگی ترد وبدون اخطار قبلی می باشد.
- سپس روابط ارزنده ای برای ارتباط ضخامت ورقه FRP با مد گسیختگی در حالت تقویت خمشی ارائه داده اند که با استفاده از این معادلات در حالات خاص می توان جلوی مد ترد سوم را گرفت. [۲]

۲- Delamination چیست؟

از حالت Laminate^۲ خارج شدن ورقه FRP و جدایش از سطح بتن را گویند که هم در تقویت خمشی و هم در سایر تقویتها چون برشی محتمل است و حالت خاصی از عدم پیوند ورقه FRP با بتن می باشد. FRP debonding به اشکال مختلف ممکن است بر اثر جدایش ورقه FRP از سطح بتن، کمانش ورقه FRP، قلوه کن شدن بتن^۲ و پارگی در نقاط اتصال و ... رخ دهد.

1- FRP Rupture

2-concrete separation

2- FRP Debonding

۱- از حالت ورق خارج شدن



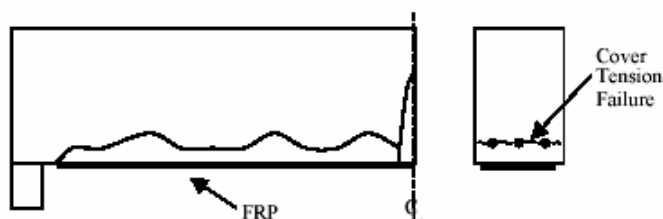
شکل ۱- نمایش حالات مختلفی از مود گسیختگی concrete cover delamination [۵]

در مکانیزم انتقال برش و نواحی موضعی کشش در سطح بین بتن و لایه FRP، جدایش ورقه FRP از سطح بتن بخاطر ضعف در سطح مشترک بین لایه FRP و بتن رخ می دهد. دلیل این پدیده پیچیده است ولی آنچه مسلم است برای تقویت بهینه بایستی جلوی این مکانیزم بدون اختار گسیختگی را گرفت. اگر لایه چسب اپوکسی بین بتن و ورقه FRP از مقاومت کششی خوبی برخوردار باشد (که اکثر اوقات چسب اپوکسی مقاومت کششی خیلی بیشتر از بتن دارد) با توجه به شکل و الگوی تقویت گسیختگی همراه با ترک خوردن قلوه کن شدن بتن است.

۳- دلایل ایجاد Delamination در حالت تقویت خمشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP :

۳-۱. گسیختگی کششی در پوشش بتنی : Cover Tension

این مکانیزم گسیختگی در محل ترکهای خمشی رخ می دهد و به سمت انتهای ورقه FRP گسترش می یابد و پیش می رود. در ورقه های فولادی تقویتی گسیختگی بر عکس است. معمولاً Delamination در انتهای ورقه فولادی در اثر تمرکز تنش آغاز می شود و به سمت مرکز تیر پیش می رود ولی در ورقه FRP گسیختگی از نواحی لنگر خمشی حداکثر (مرکز تیر در تیر دو سر مفصل) شروع شده و به سمت انتهای ورقه پیشروی می کند.



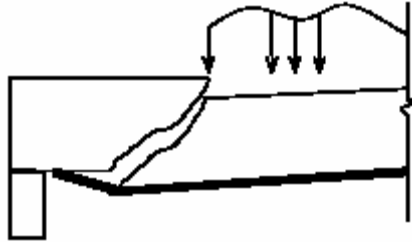
شکل ۲- Delamination در اثر گسیختگی کششی در پوشش بتنی [۱]



۲-۳. جدایش ورقه FRP در اثر باز شدن ترک برشی یا برشی - خمشی : Shear Beam

تیرهایی که بیش از حد برای خمش آرماتورگذاری شده‌اند بر اثر برش یا ترکیب خمش و برش گسختگی

می‌شوند؛ معمولاً در ناحیه برش حداکثر ترکهای برشی رخ می‌دهد. زمانی که ترکهای برشی باز می‌شوند جابجایی موضعی در وجه کششی منجر به جدایش ورقه FRP از سطح بتن می‌گردد.



شکل ۳- Delamination در اثر ترکهای برشی [۱]

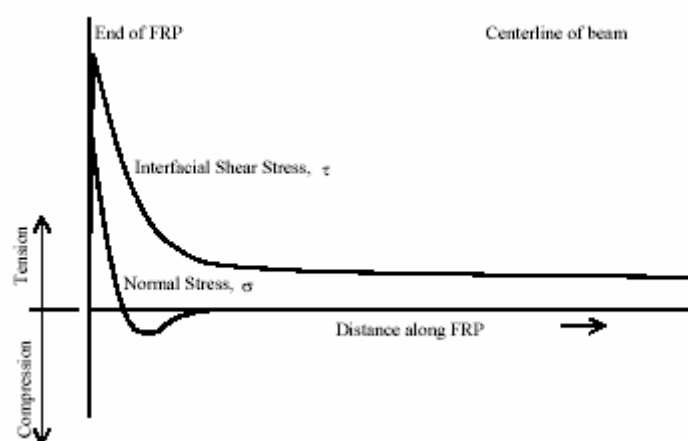
۳-۳. جدایش درون وجهی و کشش خارج از صفحه : Interfacial Shear and Peeling

بر اثر توزیع تنش متفاوت از سایر نقاط در مجاورت انتهای ورقه FRP و تنش یکنواخت و متوسط در سایر

نواحی منجر به جدایش ورقه FRP می‌گردد. به عبارت دیگر تفاوت بین تنش حداکثر و تنش متوسط منجر به جدایش

ورقه می‌گردد. خصوصاً نواحی قطع ناگهانی FRP به دلیل ضخامت کم چسب و ورقه FRP مستعد برای جدایش

است. لذا توصیه می‌شود قطع ورقه FRP به صورت پلکانی با رعایت طول قطع ۶ اینچ یا ۱۵ سانتیمتر برای هر لایه باشد.

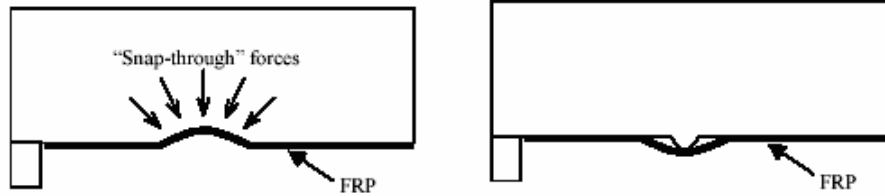


شکل ۴- دیاگرام توزیع تنش برشی درون وجهی و نرمال در طول ورقه FRP چسبیده شده [۱]



۴-۳. نامنظمی در سطح مسطح : Planar Surface Irregularities

اثرات انحنای تیر بتن آرمه بر اثر بار اعمالی و برآمدگی و فرورفتگی در سطح بتن منجر به جدایش ورقه FRP و Delamination می گردد.



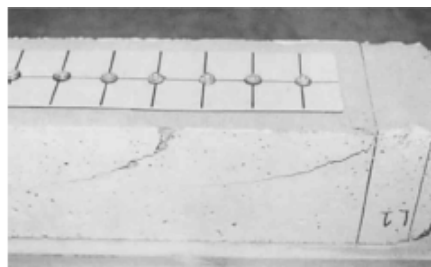
Snap-through behavior of FRP bonded to contour *FRP bridging over a protrusion*

شکل ۵- الف - فرورفتگی منجر به جدایش ورقه FRP از سطح بتن می شود
ب- برآمدگی منجر به جدایش ورقه FRP از سطح بتن می شود [۱]

۴- روشهای جلوگیری از Delamination :

۴-۱. استفاده از مهار مکانیکی Mechanical Anchorage :

در این حالت از بست مکانیکی یا Fastener استفاده می شود. در این روش انتهای ورقه را با دریل سوراخ کرده و با بست مکانیکی آن را به تیر بتن آرمه متصل می کنند. عیب این روش در این است که تنش لهیدگی در این حالت افزایش یافته، هزینه نصب افزایش یافته و دوام FRP کاهش می یابد.



شکل ۶- کاربرد بست مکانیکی برای اتصال ورقه FRP در تقویت خمشی به تیر بتن آرمه [۳]

۴-۲. رعایت طول گیرداری یا چسبندگی : Development Length

طول گیرداری بستگی به توزیع تنش چسبندگی، ضخامت، تعداد لایه های FRP و ماکزیمم تنش کششی در ورقه FRP دارد. معمولاً توزیع تنش چسبندگی FRP به صورت خطی و مثلثی شکل در نظر گرفته می شود که از تنش کششی موجود در FRP تا صفر کاهش می یابد سپس از صفر تا تنش کششی یک جهت بتن آرمه افزایش می یابد.



$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{df} &= \frac{f_{fu} t_f}{3\sqrt{f'_c}} \\ \lambda_{df} &= \frac{2f_{fu} t_f}{f_{ct}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{رابطه ۱-})$$

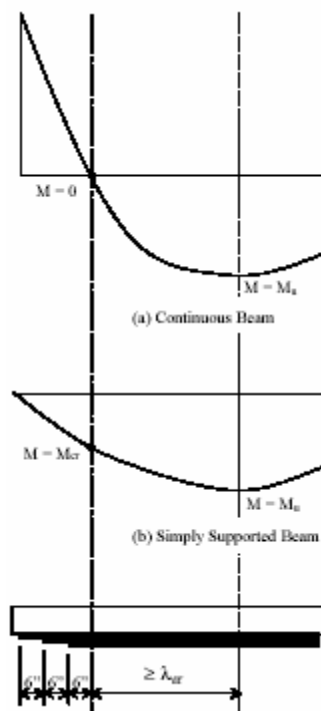
در رابطه فوق λ_{df} ضریب توزیع تنش چسبندگی، n تعداد لایه های FRP، f_{fu} تنش کششی نهایی در ورقه FRP، t_f ضخامت ورقه FRP، f'_c مقاومت بتن و f_{ct} مدول شکافت بتن است در رابطه ۱ ضریب توزیع تنش چسبندگی نبایستی از مقداری مشخص تجاوز کند.

۳-۴. وصله کردن : Splices

فرض بر این است که وصله پوششی (همپوشانی یا Lap Splices) در راستای الیاف FRP داشته باشد و در روند طراحی فرض بر این است که نیروی انتقالی در جهت عمود بر الیاف FRP وجود ندارد (بنابراین در این راستا همپوشانی و وصله پوششی نیاز نیست)

پیدا کردن محل قطع : (Cutoff Point)

قطع وصله ها مانند قطع آرماتور در تیر بتن آرمه به صورت یکجا و در یک محل انجام نشود، بلکه با رعایت یک طول مشخص ۶ اینچ یا ۱۵ سانتیمتر به صورت پله ای صورت گیرد.



شکل ۷- نمایش شماتیکی برای تعیین و ترتیب قطع ۳ لایه ورقه FRP [۱]



فرض بر این است که قطع لایه نهایی FRP ۶ اینچ بعد از نقطه عطف (محل ممان صفر) (مانند فاصله بین قطع تئوری و قطع اجرایی آرماتور) به صورت پله‌ای صورت گیرد (هر لایه با لایه قبلی ۱۵ سانتیمتر فاصله داشته باشد)

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد:

- ۱- بایستی در تقویت عضو بتن آرمه با ورقه‌های کامپوزیت همواره پارامترهای سازه‌ای مواد متشکله چون کرنش، تغییر شکل، شکل پذیری و ... هر ماده به صورت جداگانه و ترکیب آنها کنترل شود.
- ۲- پیش بینی مود گسیختگی عضو بتن آرمه تقویت شده با ورقه FRP به دلیل وابستگی به پارامترهای کلی چون خصوصیات عضو بتنی و خصوصیات FRP و چسب پیچیده بوده ولی همواره بایستی به مودهای شکست زود هنگام و ناگهانی توجه داشت و جلوی آنها را گرفت تا تقویت بهینه داشته باشیم.
- ۳- یکی از مودهای محتمل و پیچیده در تقویت اعضای بتن آرمه با ورقه FRP - Debonding است که جدایش ورقه FRP از سطح بتن یکی از حالات آن است که جای تحقیق بسیار دارد.
- ۴- پروسه مدل کردن و تحلیل غیرخطی اعضای بتن آرمه با ورقه FRP با نرم‌افزارهای اجزای محدود موجود چون ANSYS با در نظر مدهای شکست محتمل بسیار وقتگیر و پیچیده است، از اینرو ارائه روابط تحلیلی دقیق و با فرضیات ساده شونده کمتر ضروری به نظر می‌رسد.

منابع:

- [1]- Wabo Mbrace Composite Strengthening System Design Guide 2002
Chapter 10: Details of Reinforcement
- [2]- Saadatmanesh, H., and Malek, A. M. (1998). "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates." Journal of Composites for Construction, 2(4), 158-164.
- [3]- Anthony J.Lamanna, Lawrence C. Bank, and David W.Scott- "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips "- ACI Structural Journal June 2001
- [4]- Seyed Saeed Mahini -"Rehabilitation of exterior RC beam -column joints using web-bonded FRP sheets" - PHD Thesis - University of Queensland -December 2004



[5]- Gustavo Tumialan, Paola Serra, Antonio Nanni , Abdeldjelil Belarbi.." Concrete Cover Delamination in RC Beams Strengthened with FRP Sheets "SP 188 ACI Journal,4th International Symposium on FRP Reinforced Concrete Structures Nov 1999 pp725-735

[6]-Francois Buyle-Bodin "Use of carbon fiber textile to control premature failure of reinforced concrete beams strengthened with bonded CFRP plates"- Journal of Industrial textiles VOL.33- January2004-University of lille-France

[۷] ایمان الیاسیان – پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه یزد بهار ۱۳۸۴ – «بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه FRP به روش اجزای محدود وبه صورت پارامتریک»