

مدل خسارت های تجمعی ناشی از خستگی برای پلاستیک های مسلح با الیاف (FRP)

ایمان صفاریان، امیرحسین ذکریانی

دانشجویان کارشناسی ارشد عمران - مهندسی و مدیریت ساخت - دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات اهواز

e.saffarian@gmail.com

خلاصه

برای پیش بینی عمر خستگی سازه های تحت بار سیکلی مطمئناً قانونی برای خسارت های تجمعی مورد نیاز می باشد. اگر از قانون پالمگرن - ماینر برای FRP تحت بار سیکلی استفاده شود نتایج حاصل از مدل ها نشان میدهد که این پیش بینی ها معمولاً رضایت بخش نیستند. قانون P-M بطور گسترده ای برای پیش بینی عمر خستگی فلزات که فقط یک نوع آسیب اصلی تحت بار سیکلی دارند، استفاده می شود. در حالیکه چندین نوع خسارت در FRP ها مشاهده می شود. در این مدل از مقاومت پس ماند به عنوان معیاری کاربردی برای اندازه گیری خسارت تجمعی ناشی از خستگی در FRP ها و در نتیجه پیش بینی عمر خستگی آنها استفاده شده است.

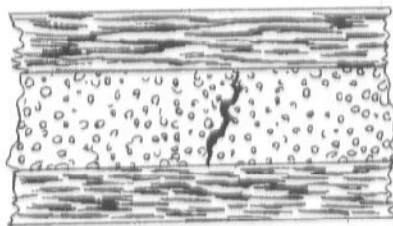
کلمات کلیدی: مدل خسارت تجمعی خستگی، قانون P-M، مقاومت پس ماند، بارگذاری بادامنه متفاوت.

مقدمه

برای پیش بینی عمر خستگی سازه های تحت بار سیکلی مطمئناً قانونی برای خسارت های تجمعی مورد نیاز می باشد. اگر از قانون پالمگرن - ماینر برای FRP تحت بار سیکلی استفاده شود نتایج حاصل از مدل ها نشان میدهد که این پیش بینی ها معمولاً رضایت بخش نیستند. قانون P-M بطور گسترده ای برای پیش بینی عمر خستگی فلزات که فقط یک نوع آسیب اصلی تحت بار سیکلی دارند، استفاده می شود. در حالیکه چندین نوع خسارت در FRP ها مشاهده می شود. دو دلیل اصلی روی خسارت تجمعی خستگی FRP در مدت بارگذاری خستگی موثر می باشند. (۱) تحت بارگذاری با دامنه متغیر خسارت خستگی به علت بارگذاری های متفاوت، نتیجتاً متفاوت هستند، زیرا خسارتها با توجه به دامنه های مختلف بارگذاری در دوره های مختلف متفاوت هستند و تاریخچه تنش - کرنش با بارگذاری مختلف بطور قابل توجهی متفاوت است و این مسائل بعلاوه خاصیت ویسکوالاستیسیته و پلاستیسیته FRP است. (۲) خصوصیات مواد، عامل بسیار مهمی در توسعه خسارت می باشند. دلایل اصلی که باعث عدم تائید قانون P-M برای FRP می شود عبارتند از: گوناگونی خسارات خستگی، غیر یکنواختی توسعه خسارت و رفتار غیر الاستیک FRP در طول مدت بارگذاری سیکلی. تعریف کردن خسارت خستگی در FRP مسئله ای نسبتاً پیچیده است. بعضی از محققین خسارت را بصورت فیزیکی یا میکروسکوپی (چگالی ترک، طول ترک، مساحت لایه تورق شده، تعداد فیبرهای پاره شده) و بعضی دیگر بصورت خصوصیات ماکروسکوپی از طریق مدول سکانت، مقاومت پس ماند، مدول خستگی تعریف کرده اند، که در این مدل از تعریف نوع دوم به دلیل مفهوم عملی و کاربردی آن استفاده می شود. (نوع اول به دلیل نداشتن یک نوع خسارت و مشکل بودن بررسی فیزیکی توسعه خسارت عملی نمی باشد).

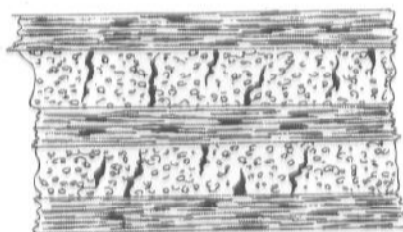
خرابی ناشی از خستگی در مواد مرکب (FRP)

مفالات متعددی در مورد خرابی، ترک و انتشار آن بر اثر خستگی در مواد مرکب نوشته شده است. این خرابی ها معمولاً در ماتریس و بر اثر اعمال بار در حالتی که الیاف با بارگذاری در یک راستا نباشند، اتفاق می افتاد. ایجاد تنشها و کرنشهای بالا نیز در لایه لایه شدن، جدایی الیاف و ایجاد ترک موثر می باشد. معمولاً ترک ایجاد شده به موازات الیاف و در بین لایه ها پیش می رود. شکل (۱) بطور نمایشی ایجاد ترک در یک صفحه با لایه های عمود بر هم را نشان میدهد. [۱].



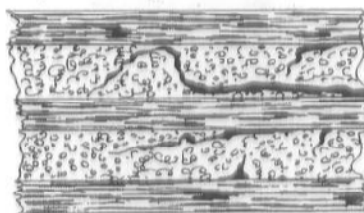
شکل (۱): ترک در لایه یک صفحه سه لایه بالا لایه های عمود بر هم

ترک معمولاً عمود بر جهت نیرو می باشد. ترکهای یک صفحه با لایه های عمود بر هم میتوانند در اولین سیکل بارگذاری و در تنشی حدوداً معادل ۲۰ درصد تنش قابل تحمل صفحه ایجاد شود. با افزایش سیکل‌های بارگذاری تعداد ترکها در ماتریس و در لایه های مختلف افزایش می یابد. شکل (۲).



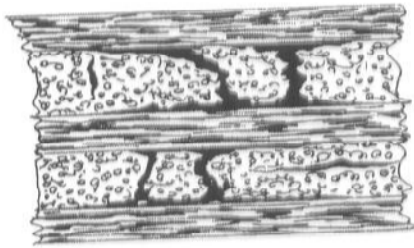
شکل (۲): ترک در یک صفحه چند لایه

در صفحاتی که لایه های آنها دارای زوایای مختلف می باشند، خرابی در لایه ها، مشابه حالت فوق می باشد. در آزمایش روی صفحه ای نازک با الیاف کوتاه و در هم، اولین ترک در تنش معادل ۳۰ درصد مقاومت نهایی ایجاد شده است. انتشار ترک در این نوع صفحات در هر جهت امکان پذیر می باشد. خرابی با جدایی الیاف و شکسته شدن چسب آنها اتفاق می افتد. بنابراین اولین خرابی در اینگونه صفحات با جدایی الیاف در جهت عمود بر جهت اعمال بار و یا در لایه ای که دارای بزرگترین زاویه با جهت نیرو می باشد، اتفاق می افتد.

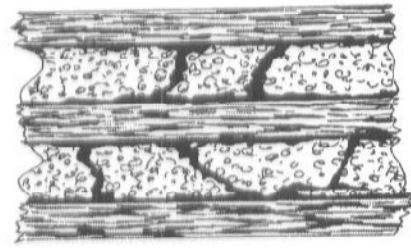


شکل (۳): شروع جدایی لایه ها

در صفحاتی که لایه های آن دارای زوایای عمود بر هم می باشد، همان طور که در شکل (۲) مشاهده شد، ترک ها در ماتریس و در جهت عمود بر جهت نیرو به وجود می آید. با افزایش نیرو، این ترکها به لایه های مجاور انتقال نمی یابند بلکه طبق شکل (۳) افزایش نیرو باعث ترک بین لایه ها و در جهت نیرو می شود. انتشار ترک در حقیقت باعث افزایش تنش بین لایه ای شده و در نتیجه ترکها بیشتر می شوند. با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، انتشار ترکها بیشتر و این ترکها به یکدیگر برخورد کرده و نواحی بحرانی طبق شکل (۴) بوجود می آید. به تدریج ترکها بیشتر و جدایی لایه ها از یکدیگر شدیدتر می شود و در نهایت یکی از ضعیف ترین لایه ها از لایه های مجاور خود جدا شده و در حقیقت صفحه به بار گسیختگی خود می رسد شکل (۵). [۱]



شکل (۴): تداخل ترکهای طولی و عرضی



شکل (۵): جدایی لایه هاونزدیک شدن به گسیختگی کامل

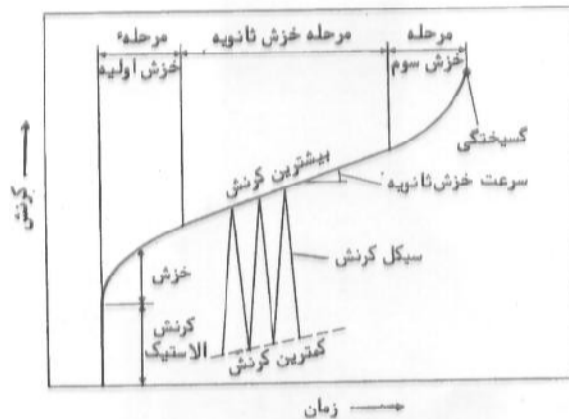
قانون پالمگرن - ماینر^۱

در عمل محدوده تغییرات تنش ثابت نمی باشد و عوض می شود که در این ارتباط تمام تاریخچه بارگذاری متناوب مطرح می باشد. در قانون " پالمگرن- ماینر " فرض می شود که گسیختگی هنگامی رخ میدهد که کل خسارتهای تجمع یافته M در تاریخچه بارگذاری ها برابر واحد شود [۲]. سهم خسارت جداگانه یک بارگذاری بخصوص، برابر نسبت تعداد سیکلهای آن n_i در یک سیکل داده شده از تنش σ_i ، به تعداد سیکلها در زمان گسیختگی N_i با همان تنش می باشد. بنابراین:

$$M = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

برای هر سیکل تنش σ_i ، مقدار N_i از منحنی S-N مناسب بدست می آید. ضعف قانون P-M در اینجاست. چون پراکندگی زیادی در ارتباط با منحنی های S-N وجود دارد و در نتیجه قانون P-M خیلی صحیح نمی باشد.

یک روش دیگر ارتباط دادن تعداد سیکلهای مختص به گسیختگی به سرعت خزش ثانویه است (شکل ۶)، که معیاری از خسارت موضعی واقعی درخستگی می باشد. به این ترتیب اگر چه پراکندگی خیلی کاهش می یابد، باید کرنش وابسته به زمان بطور پیوسته مشخص گردد. به نظر می رسد کاربرد قانون P-M بر اساس سرعت خزش ثانویه رضایت بخش تر می باشد که در آن M فقط کمی بالاتر از واحد می باشد و بنابراین به نظر می رسد $M=1$ معیار ایمنی برای طراحی باشد.



شکل (۶): تعریف سرعت خزش ثانویه برای بررسی خرابی های موضعی درخستگی

مدل خسارت تجمعی FRP [5]

در FRP، خسارت ناشی از خستگی در مدت بارگذاری سیکلی افزایش می یابد و در یک زمان ممکن است چند نوع خرابی بطور فیزیکی بوجود آید که در بارگذاری متفاوت و دوره های متفاوت، این خسارت ها متفاوت باشند. این آسیب ها خصوصیات مکانیکی مواد را مانند مقاومت و سختی متاثر می سازد. پس می توان از پارامتر ازدست دادن مقاومت بعنوان معیار اندازه گیری مدل خسارت خستگی در FRP استفاده کرد. بنابراین خسارت با از دست دادن مقاومت متناسب میباشد.

پس اولین تعریف مدل :

$$\Delta D_i = A[R(i-1) - R(i)] \quad (2)$$

ΔD_i : خسارت به علت i امین سیکل بارگذاری و $R(i)$: مقاومت پس ماند در i امین سیکل بارگذاری و A : ضریب تناسب هستند. خسارت بطور غیر یکنواخت در میان بارگذاری سیکلی توسعه می یابد، پس $\Delta D_i \neq \Delta D_j (i \neq j)$. خسارت به تاریخچه تنش - کرنش و چگونگی و حالت خسارت در آن لحظه مورد نظر بستگی دارد. دومین مسئله، مدل سازی خسارت تجمعی می باشد.

$$D_i = \sum_{j=1}^i \Delta D_j \Big|_{D_{j-1}} \quad (3)$$

D_i : خسارت تجمعی تا i امین سیکل بارگذاری

اگر دامنه بارگذاری ثابت باشد، موقعی که تعداد سیکل برابر N_f (عمر خستگی) شود، نمونه گسیخته می شود. بنابراین سومین مسئله بدین شکل بیان می شود :

$$D_{cr} = \sum_{j=1}^{N_f} A[R(j-1) - R(j)] \quad (4)$$

$$= A[R(0) - R(N_f)]$$

$$= A[R(0) - S]$$

S : حداکثر تنش و $R(0)$: مقاومت استاتیکی ماده و وقتی که $D_{cr} = 1$ شود نمونه گسیخته می شود. بنابراین:

$$A = \frac{1}{R(0) - S} \quad (5)$$

از معادله (5) نتیجه می شود:

$$\Delta D_i = \frac{R(i-1) - R(i)}{R(0) - S} \quad (6)$$

توجه به این نکته ضروری است که برای دامنه بارگذاری متفاوت نمی توان از معادله (4) استفاده نمود. موقعی که ΔD_i تحت تنش S_j تجمعی می باشد، رفتار و حالت خسارت باید معادل با دامنه ثابت S شود و این جایی است که سیکل های تا $j-1$ معادل j_{eff} هستند که این امر محتمل است. بدست آوردن این معادل سازی واقعا کار آسانی نیست. خسارت ناشی از خستگی با افزایش تعداد سیکل ها بطور یکنواخت افزایش و مقاومت پس ماند بطور یکنواخت کاهش می یابد. بنابراین در نظر گرفتن مقاومت پس ماند برای نشان دادن حالت و چگونگی خسارت، فرضی منطقی می باشد و فرض دیگر آن است که برای بیان حالت خسارت مقاومت های پس ماند را مساوی یکدیگر تلقی کنیم.

$$R(j-1) \Big|_{S_{j-1}} = R(j_{eff}) \Big|_{S_j} \quad (7)$$

$$R(j-1) \Big|_{S_{j-1}}: \text{مقاومت پس ماند مربوط به سیکل } j-1$$

$$R(j_{eff}) \Big|_{S_j}: \text{مقاومت پس ماند تحت دامنه ثابت } S_j \text{ و پس از سیکل های } j_{eff}$$

از رابطه (7) بدست می آید. نتیجتا در سیکل j ، خسارت ΔD_j می شود:

$$\Delta D_j = \frac{1}{R(0) - S_j} [R(j_{eff}) - R(j_{eff} + 1)] \quad (8)$$

با استفاده از این مراحل، خسارت خستگی را میتوان بصورت سیکل به سیکل تجمعی شده بدست آورد .

مقاومت پس ماند

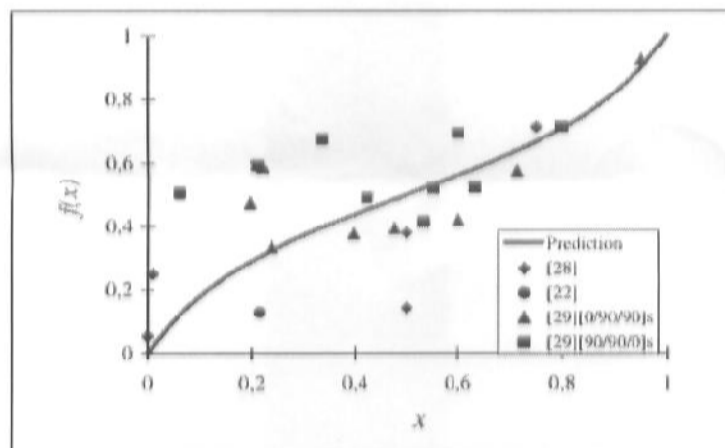
مقاومت پس ماند FRP تحت کنش بطور معمول شامل مراحل زیر می باشد [۳،۴]:

- (۱) در مرحله ابتدایی عمر خستگی، مقاومت پس ماند نسبتاً سریع کاهش می یابد. (به دلیل ایجاد ترکهای کوچک در ماتریس)
- (۲) در میانه های عمر خستگی مقاومت پس ماند بطور متعادل و یکنواخت کاهش می یابد. (به دلیل پارگی بعضی از فیبرها و پدیده تورق)
- (۳) در نزدیکی گسیختگی کامل، مقاومت پس ماند خیلی سریع کاهش می یابد. به آن "مرگ ناگهانی" می گویند. این رفتار لایه های FRP تحت کشش بصورت زیر بیان می شود:

$$R(i) = R(0) - [R(0) - S] \frac{\sin(\beta x) \cos(\beta - \alpha)}{\sin \beta \cos(\beta x - \alpha)} \quad (9)$$

که β و α از طریق آزمایش بدست می آیند. اگر نتایج آزمایشگاهی بر روی مقاومت پس ماند در دسترس نباشد، برای استفاده $\alpha = 0.5\beta$ و $\beta = 2\pi/3$ ، پیشنهاد می شوند.

شکل (۷) مقایسه ای بین مقاومت پس ماند بدست آمده از رابطه (۹) در حالت نرمال $f(x) = \frac{R(0) - R(i)}{R(0) - S}$ و نتایج آزمایشگاهی می باشد.



شکل (۷): رابطه مقاومت پس ماند و عمر نسبی خستگی برای FRP

نتیجه

مدل تجمعی خسارت خستگی ارائه شده براساس مقاومت پس ماند برای پیش بینی عمر خستگی FRP ها تحت تنش های پادامنه متغیر می باشد. این مدل براساس فرضیات اصولی است که "از دست دادن مقاومت" به طور پدیده ای (حادثه ای) خسارت در لایه های FRP را نتیجه می دهد و می تواند حالت رفتار خسارت در لایه ها را با مقاومت پس ماند بطور لحظه ای بیان کند. با مقایسه اطلاعات بدست آمده از آزمایش خستگی بر روی انواع FRP ها توانایی پیش بینی منطقی مدل به اثبات رسیده است.

مقاومت پس ماند در لایه هانقش مهمی را بازی می کند. توضیحات منطقی مقاومت پس ماند همراه با مکانیزم خسارت خستگی FRP ها بیان شد. البته آزمایشات بیشتری برای بررسی این توضیحات لازم می باشد.

منابع

۱. محسنی شکیب، س.م.، ۱۳۷۳، آنالیز و طراحی سازه های مرکب چندلایه، دانشگاه امام حسین (ع)
۲. نویل، آ.، مترجمین رضانیانپور، ع.ا.، وشاه نظری، م.ر.، ۱۳۸۴، تکنولوژی بتن، تهران، آذرننگ
۳. Curtis, P., T. (۱۹۸۹) The fatigue behavior of fibers composite materials, jour. Strain anal ۲۴, PP. ۱۳۵-۲۴۴.
۴. Dew-Hughes, D., and Way, J., L. (۱۹۷۳) Fatigue of fiber-reinforced plastics review, composite part A, PP. ۱۶۷-۱۷۳.
۵. Yao, W.X. Himmel, N. (۲۰۰۰) A new cumulative fatigue damage model for fibre-reinforced plastics, jour. Composites Science and Technology, No. ۶۰, PP. ۵۹-۶۴.