

یادداشت تحقیقاتی

بررسی عددی خستگی کم چرخه در اتصال خمشی فولادی با ورق انگشتی شکل

مهدی قاسمیه^{۱*} و میلاد افضلان^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تهران

۲- دانش آموخته ارشد سازه دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تهران

* m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۳/۰۷

تاریخ دریافت ۹۸/۰۲/۱۷

چکیده

در سیستم‌های قاب خمشی فولادی که شامل تیرهای عمیق است، تامین طول مورد نیاز برای جوش منجر به استفاده از ورق‌های تقویتی با طول زیاد می‌شود. مشکل اصلی استفاده از ورق با طول زیاد، افزایش تقاضای لنگر خمشی در محل وجه ستون و در نتیجه افزایش احتمال شکست ترد در اتصال است. یکی از روش‌های بهبود عملکرد اتصال در مقابل این پدیده، اصلاح هندسه ورق بدون افزایش طول آن است. در بارگذاری‌های با تعداد چرخه کم و دامنه بارگذاری بالا که اصطلاحاً به آن خستگی کم چرخه می‌گویند، احتمال شکست ترد یا شکل پذیر وجود دارد. در این پژوهش، با استفاده از روشی میکرومکانیکی برای تشخیص خرابی در فولاد، عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی تایید صلاحیت شده با ورق انگشتی در برابر ترک خوردگی شکل پذیر ارزیابی می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد این اتصال در برابر ترک خوردگی در بارگذاری کم چرخه با دامنه بالا عملکرد قابل قبول دارد.

واژه‌های کلیدی: خستگی کم چرخه، اتصال خمشی فولادی، مدل میکرومکانیکی، اجزای محدود

تجربه تغییر شکل‌های بزرگ امکان پذیر است. با وجود اینکه فولاد به طور کلی عملکرد مناسبی در برابر ترک خوردگی دارد، در بارگذاری با دامنه بالا احتمال رخداد چنین پدیده‌ای وجود دارد و در صورت عدم رسیدن به شکل‌پذیری بالا، مود غالب خرابی بر حسب تسلیم اعضا نخواهد بود [2]. آزمایش‌های انجام شده بر تعدادی از اتصالات مستقیم و شامل ورق [3] که تا پیش از زلزله نورتریج مورد تایید بودند، شکست ترد در این اتصالات را نشان می‌داد. با ایجاد اصلاحات در کیفیت

۱. مقدمه

قاب‌های خمشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر مطمئن در برابر زلزله محسوب می‌شود و اعضای فولادی تشکیل‌دهنده آن قابلیت تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ در خمش و برش را دارند. بر مبنای دیدگاه سنتی طراحی این سیستم سازه-ای، آسیب‌های وارد شده به اعضای فولادی در قاب خمشی تنها به صورت تسلیم اعضا خواهد بود [1]، در حالی که زلزله نورتریج و کوبه نشان داد، احتمال فروریزش اتصال قبل از

امری نامطلوب است و استفاده از ورق بلند نیز میزان دوران پلاستیک و لنگر پلاستیک را بر وجه ستون افزایش می‌دهد شکل (۱) و احتمال شکست ترد در وجه ستون زیاد می‌شود. به منظور حل این مشکل، طول ورق روسری و زیرسری به عمق تیر d_b باید محدود شود و محل تشکیل مفصل پلاستیک در فاصله d_b تا $1/5 d_b$ از وجه ستون باشد [22].

شکل ۱. دوران مفصل پلاستیک و لنگر وجه ستون برای ورق با طول‌های متفاوت

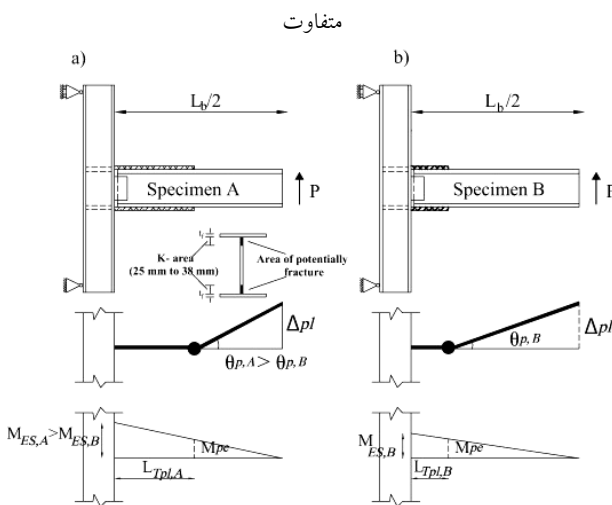


Fig. 1. Rotation of the plastic hinge

در طراحی ورق روسری، طول ورق از یک طرف بر مبنای تامین ظرفیت جوش گوشه و از طرفی ضوابط محدود کننده آیین‌نامه بر مبنای تشکیل مفصل پلاستیک تعیین می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که با افزایش طول ورق، احتمال کماتش ورق در فشار قبل از رسیدن به ظرفیت لنگر پلاستیک افزایش می‌یابد. در صورتی که تامین ظرفیت جوش مستلزم استفاده از ورق با طولی بیش از d_b باشد، می‌توان از جوش کام و انگشتانه به همراه جوش طولی و یا اصلاح هندسه ورق بهره برد. در اتصال پیشنهاد شده توسط صنعتی‌نیا و همکاران [21]، با اصلاح هندسه ورق از طریق برش ورق به شکل انگشتی و استفاده از جوش گوشه عرضی به همراه جوش گوشه طولی، تامین طول جوش بدون افزایش طول ورق فراهم شد. طراحی هندسه ورق نیز از طریق مطالعه تحلیلی و انتخاب بهینه نسبت جوش طولی به عرضی به دست آمد. نمونه‌های طراحی شده توسط صنعتی‌نیا و همکاران شامل اتصال مستقیم و غیرمستقیم، هرکدام در سه دسته به صورت تمام مقیاس ساخته

جوشکاری و هندسه ورق، امکان دستیابی به شکل پذیری بیشتر فراهم شد، هر چند امکان ترک خوردگی نرم در محل کماتش بال در این اتصالات امکان پذیر است [3-6]. ترک خوردگی نرم در قطعات فولادی در زلزله بر اثر پدیده‌ای با نام خستگی کم-چرخه رخ می‌دهد [7]. خستگی کم چرخه در زلزله حالتی از خرابی است که بر اثر تعداد محدود چرخه بارگذاری و تغییر شکل‌های زیاد رخ می‌دهد و منجر به خرابی در قطعات فولادی مانند اتصالات و مهاربند می‌شود [3, 8] و شکست اتصالات در مصداق خستگی کم چرخه است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که اتصالات شامل تیرهای عمیق بیشتر مستعد آغاز ترک خوردگی نرم در شکل پذیری بالا در ناحیه k (مجاورت شعاع اتصال تیر به ستون) هستند [3, 5]. امروزه با استفاده از روش‌های عددی میکرومکانیکی امکان پیش‌بینی ترک خوردگی در فولاد سازه‌ای وجود دارد [7]. این روش‌ها پیش‌بینی خرابی در فولاد را براساس تاریخچه تنش و کرنش پلاستیک تجمعی در فولاد تخمین می‌زنند. از جمله پژوهش‌های پیشین به بررسی ترک خوردگی در اتصالات با استفاده از روش‌های میکرومکانیکی و یا سایر روش‌ها می‌توان به مراجع [9-20] اشاره کرد. تمرکز این مقالات بیشتر بر اثر خستگی کم چرخه در محل اتصالات جوشی [11, 18]، اتصالات پیچ‌دار [13]، اتصال پای ستون [10]، و مهاربند [17] بوده است.

در این مقاله عملکرد نمونه اتصال فولادی خمشی پیشنهاد شده در بال تیر در برابر ترک خوردگی نرم بررسی شد. در مرجع [21]، کارایی این اتصال بیشتر در بار لرزه‌ای بررسی شده بود و در این مقاله تمرکز بر رفتار این اتصال در برابر خستگی کم چرخه است.

۲. جزئیات اتصال با ورق انگشتی نمونه آزمایشگاهی

یکی از متداول‌ترین نوع اتصالات غیر مستقیم در قاب خمشی، اتصال با ورق بال جوش داده شده است. بر خلاف اتصال با ورق پوششی که هم ورق‌ها و هم بال تیر به ستون جوش داده می‌شود، فقط ورق‌ها به بال ستون جوش داده می‌شود. در صورتی که طول ورق کوتاه باشد احتمال تشکیل مفصل پلاستیک در ستون افزایش پیدا می‌کند که برای پایداری سازه

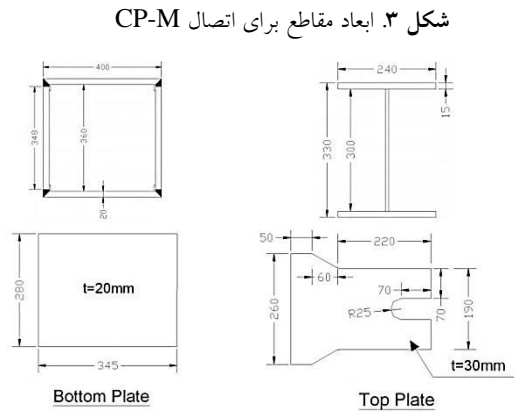


Fig. 3. Dimensions of sections for CP-M connection

۳. مدل های میکرومکانیکی برای تعیین خرابی در فولاد

روش هایی مانند انتگرال J و ضریب تمرکز تنش از روش های متداول در مکانیک شکست هستند. معادلات حاکم بر این روش ها بر مبنای محاسبه نرخ آزاد شدگی انرژی و پیش بینی وضعیت تنش در محل ترک است و با فرض تسلیم در مقیاس کوچک معتبر هستند. در نتیجه، استفاده از روابطی بر مبنای میدان تنش و کرنش، می تواند معیار واقع گرایانه تری برای پیش بینی شکست در نواحی که تسلیم شدگی قابل توجه است، باشد. در ادبیات فنی روش های متفاوتی برای پیش بینی شروع خرابی برای بارگذاری تک سویه مانند روش مدل رشد حفرات و مدل کرنش بحرانی تنش اصلاح شده موجود است و برای بارگذاری چرخه ای، مدل های کرنش پلاستیک اساسی کاهش یافته و مدل رشد چرخه ای حفرات (CVGM) موجود است [7]. وجه مشترک این روش ها در لحاظ کردن پارامتر طول مشخصه l^* برای پیش بینی شروع خرابی در فلز است. با توجه به اینکه آزمایش ها در حالت چرخه ای صورت گرفته است و نسبت سه محوری T به دلیل تغییر شکل زیاد تغییرات قابل توجهی دارد، در این پژوهش از روش CVGM برای پیش بینی آغاز خرابی در فولاد استفاده شده است.

مدل رشد چرخه ای حفرات، ایجاد ترک را مبنی بر رشد و به هم پیوستن حفرات در فلز می داند و از این روش در شبیه سازی ترک خوردگی نرم در خستگی کم چرخه استفاده می شود. در این مدل ترک خوردگی زمانی رخ می دهد که

شده اند و مورد آزمایش قرار گرفتند [21, 23]. رفتار اتصال تحت خستگی کم چرخه و پیش بینی ترک خوردگی نرم در این پژوهش برای اتصال غیرمستقیم (CP-M) بررسی شد. برای انجام آزمایش، نصف طول تیر و طول یک ستون کامل در نظر گرفته شد. طول ستون و تیر به ترتیب ۳ و ۵ متر انتخاب شد. برای تعیین مقاطع اتصال CP-M یک ساختمان مسکونی ۱۲ طبقه طراحی شد و تیر و ستون طراحی شده در یکی از محورهای طبقه اول هرکدام از ساختمان ها به عنوان معیار آزمایش در نظر گرفته شد. طول و عرض تیر I شکل به ترتیب ۳۰۰ و ۲۴۰ میلی متر و ضخامت بال و جان به ترتیب ۱۵ و ۸ میلی متر، و ابعاد ستون قوطی ۴۰۰×۴۰۰ و ضخامت آن ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد دو انتهای ستون مفصل بوده و به منظور کاهش آثار کمانش جانبی، به فاصله ۱ متری از نوک تیر مهار جانبی برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیر لحاظ شد. به منظور تعیین مشخصات فولاد اجزای مختلف، نمونه های کوچک استاندارد از ورق های تشکیل دهنده تیر، ستون و سایر اجزای اتصال انتخاب شده و تحت آزمایش کششی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول (۱) آمده است. شکل (۲) جزئیات اتصال و شکل (۳) ابعاد تیر و ستون و ورق های تقویت را ارائه نموده اند.

جدول ۱. مشخصات مصالح اتصال آزمایشگاهی CP-M [۲۱]

F_y (MPa)	F_u (MPa)	Elongatio n (%)	Sample
290.5	399.6	30.8	Web beam
252	482.5	27.5	Flange beam
252.9	364.3	35.0	Bottom plate
252.5	321.6	32.3	Continuity plate
217.6	363.4	29.7	Top plate

Table 1. Material spec. of CP-M connection [21]

شکل ۲. جزئیات هندسی اتصال [۲۱]

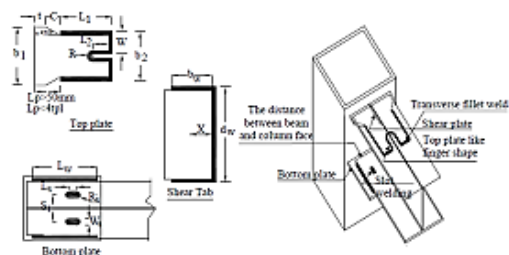


Fig. 2. Geometric details of the connection [21]

زبان برنامه‌نویسی FORTRAN محاسبه شده و مقادیر آن دوباره به نرم‌افزار آباکوس برگردد. به این منظور، یک زیربرنامه USDFLD که امکان تعریف پارامترهای مستقل (تعریف شده توسط کاربر) را می‌دهد، تهیه شده و روابط شاخص شکست در مدل رشد چرخه‌ای حفرات در هر نقطه انتگرال ده محاسبه می‌شود. روش حل به این شکل بوده از طریق محاسبه نسبت تنش فون میسرز به تنش میانگین، نسبت سه‌محوری محاسبه شده (بسته به اینکه علامت آن مثبت یا منفی باشد)، مقدار تقاضا از طریق جمع یا تفریق مقدار به دست آمده در هر نمو با مقدار تجمعی قبلی به روز رسانی می‌شود. مقدار ظرفیت هم از طریق به دست آوردن کرنش تجمعی پلاستیک از نرم افزار اجزای محدود در هر مرحله به روزرسانی می‌شود. در این زیربرنامه، روابط لازم برای محاسبه پارامترهای ذاتی از مرجع [25] استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است در مطالعه پیشین [26]، روش مورد نظر با استفاده از روش اجزای محدود با نمونه‌ای آزمایشگاهی مقایسه شد، و نتایج از نظر زمان شروع ترک خوردگی، محل شروع ترک، و مسیر رشد ترک هماهنگی داشت..

مدل اجزای محدود اتصال CP-M متشکل از بیش از هشتاد و یک هزار المان سه‌بعدی خطی شش‌وجهی مرتبه اول با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) است. دو سر ستون مفصلی در نظر گرفته شده و مهار جانبی برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیر در فاصله ۱ متری از نوک تیر لحاظ شد. مشخصات اجزای سازه‌ای مطابق اطلاعات جدول (۱) دیده شد و سخت‌شوندگی پلاستیسیته از نوع همسانگرد در نظر گرفته شد. در صورت وجود نقص در جوش، امکان شکست ترد پیش از رسیدن به تنش تسلیم وجود دارد. از آن جا که تمرکز این پژوهش بر ترک خوردگی شکل پذیر در مجاورت اتصال بوده، از وجود هرگونه نقص در جوش چشم‌پوشی شده است. همچنین، برای در نظر گرفتن پارامتر طول مشخصه، در مدل اجزای محدود، ابعاد مش در مجاورت محدوده ترک خوردگی در اتصال، معادل با طول مشخصه فولاد در نظر گرفته شده است. در نتیجه، معادلات حاکم بر CVGM در مدل اجزای محدود تحت بارگذاری دینامیکی در المان‌هایی معادل با

$$VGI_{cyclic} \geq VGI_{cyclic}^{critical} \quad (1)$$

که در آن تقاضا و ظرفیت به ترتیب این گونه است:

$$VGI_{cyclic} = \sum_{tensile\ cycles} \int_{\epsilon_r}^{\epsilon_1} e^{|\lambda \cdot \Delta T|} d\epsilon_p \quad (2)$$

$$- \sum_{compressive\ cycles} \int_{\epsilon_r}^{\epsilon_1} e^{|\lambda \cdot \Delta T|} d\epsilon_p - VGI_{cyclic}^{critical} = VGI_{critical} e^{-\lambda \epsilon_p} \quad (3)$$

که در این روابط T نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون میسرز، ϵ_p کرنش پلاستیک معادل، $d\epsilon_p$ نمو کرنش پلاستیک معادل و ϵ_1 و ϵ_r حدود انتگرال‌گیری متناظر با شروع و انتهای هر چرخه هستند. پارامترهای $VGI_{critical}$ و λ از طریق انجام آزمایش به دست می‌آیند و هر دو از مشخصات مصالح محسوب می‌شوند. پارامتر $VGI_{critical}$ مقاومت ماده در برابر ترک‌خوردگی در حالت تک‌سویه و تابع نمایی $e^{-\lambda \epsilon_p}$ نیز اثر تجمع آسیب‌های وارد شده به بافت فلز در حالت بارگذاری چرخه‌ای نسبت به حالت تک‌سویه را در نظر می‌گیرد. بررسی رابطه (۱) در ابعادی به طول مشخصه l^* انجام می‌شود. مقدار طول مشخصه برای انواع فولاد سازه‌ای در مراجع [7, 21] آمده است. در صورتی که VGI_{cyclic} را تقاضا و $VGI_{cyclic}^{critical}$ را ظرفیت بنامیم، می‌توان پارامتر شاخص شکست را مطابق رابطه ذیل تعریف نمود. زمانی که شاخص شکست واحد شود، شروع ترک‌خوردگی پیش‌بینی می‌شود.

$$FI = \frac{VGI_{cyclic}}{VGI_{cyclic}^{critical}} \quad (4)$$

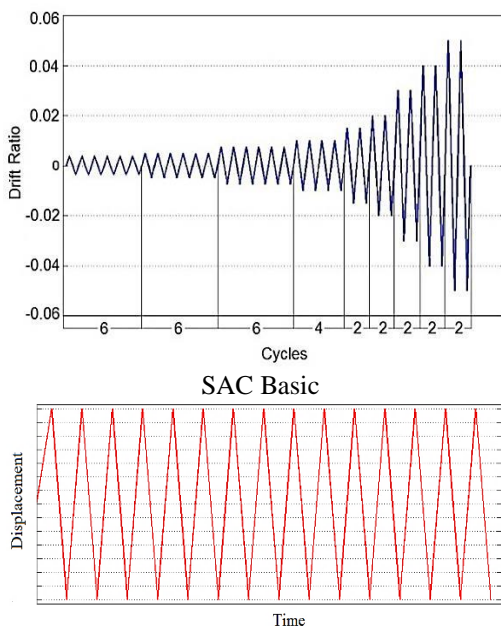
۴- شبیه‌سازی عددی

مدلسازی عددی به کمک نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است [24]. از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس به دلیل توانمندی بالا در مدلسازی رفتار غیرخطی فولاد و همچنین امکان تعریف زیربرنامه برای تعریف قابلیت‌های جدید استفاده شده است. از آن جا که پارامترهای مدل رشد چرخه‌ای حفرات به طور پیش‌فرض در نرم‌افزار آباکوس تعریف نشده است، لازم است در هر نمو زمانی مقادیر تنش و کرنش پلاستیک تجمعی از نرم‌افزار آباکوس گرفته شده، روابط مدل CVGM که در فصل پیش به آن اشاره شد، با استفاده از

خستگی در اتصال با استفاده از پارامتر شاخص شکست و مدل رشد چرخه‌ای حفرات، عمر اتصال خمشی تحت سطوح مختلف بارگذاری پیش‌بینی و منحنی S-N برای اتصال ارائه می‌شود. برای بررسی منحنی‌های S-N، نمونه تحت بارگذاری با جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای با دامنه ثابت ۰/۰۷، ۰/۰۶، ۰/۰۵ و ۰/۰۴ قرار گرفت. همچنین در شکل (۵) الگوی بارگذاری با جابه‌جایی ثابت را نشان می‌دهد. طبق گزارش [21]، مدل اتصال CP-M تحت بارگذاری SAC Basic و تا جابه‌جایی ۶ درصد قرار گرفته بود (مجموعاً ۳۴ چرخه بارگذاری) و برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات آزمایشگاهی به دلیل تغییر مکان جانبی بالا، آزمایش در این مرحله متوقف شد. شکل (۶) توزیع کرنش پلاستیک معادل در پایان بارگذاری و شکل (۷) منحنی هیستریزس حاصل از حل اجزای محدود و آزمایش را مقایسه می‌کند.

مطابق با [21]، نمونه اتصال CP-M تا پایان بارگذاری در هیچ نقطه‌ای دچار شکست نشد. در تحلیل عددی نیز شاخص شکست در هیچ قسمتی از مدل به یک نرسید و مقدار آن در بحرانی‌ترین نقطه در بال تیر و در جلوی ورق فوقانی برابر با ۰/۳۲ بود.

شکل ۵. الگوی بارگذاری های چرخه‌ای



Constant Amplitude
Fig. 5. Cyclic Loading protocols

طول مشخصه محاسبه و مدل سازی شده است. از آن‌جا که در نظر گرفتن طول مشخصه برای کل مدل بسیار زمان‌بر است و تحلیل عددی با استفاده از پردازنده‌های متداول غیر ممکن خواهد بود فقط در نواحی که مستعد ترک‌خوردگی هستند از شبکه‌بندی ریز استفاده شده است و با در نظر گرفتن سه ناحیه انتقال، شبکه‌بندی کوچک به شبکه‌بندی با ابعاد بزرگ‌تر تبدیل شده است. انتخاب این ناحیه بحرانی از طریق انجام یک تحلیل اولیه با ابعاد شبکه‌بندی بزرگ‌تر و بررسی نتایج صورت گرفت. کنترل کیفیت المان‌ها نیز از طریق محدود کردن زاویه داخلی المان‌ها در محدوده ۳۰ تا ۱۵۰ درجه صورت گرفته است. شکل (۴) مدل اجزای محدود، شبکه‌بندی مدل و ناحیه ریزشدگی را نشان می‌دهد.

شکل ۴. مدل اجزای محدود اتصال و ناحیه ریزشدگی المان‌ها

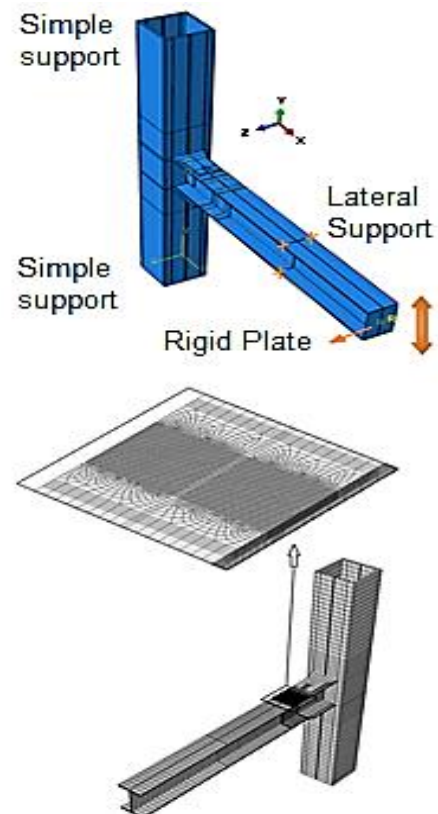


Fig. 4. Finite Element Model of connection and Elemental Zones

۵. بررسی نتایج

در این بخش ابتدا نتایج آزمایشگاهی مرجع [21] تحت پروتکل بارگذاری SAC Basic که در شکل (۵) ارائه شده، و با تحلیل عددی مقایسه می‌شود و سپس به منظور بررسی عمر

است.

شکل ۸ گسترش تقاضا و ظرفیت شاخص رشد حفرات برای پروتکل SAC Basic

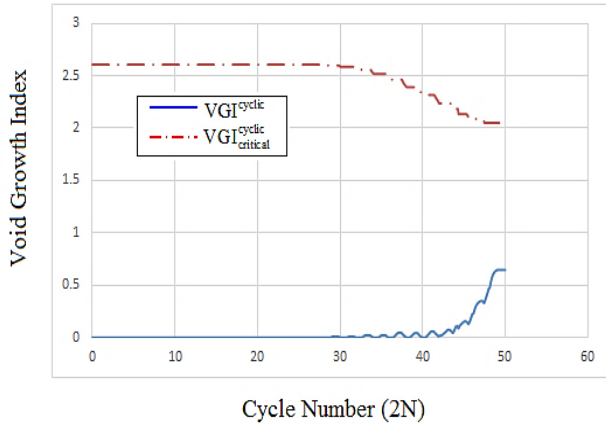


Fig. 8. Demand and Capacity of void growths index for the SAC Basic loading Protocol

به منظور به دست آوردن منحنی S-N برای خستگی کم چرخه با معیار ترک خوردگی نرم، بارگذاری از نوع تغییر مکان با دامنه ثابت ۷، ۶، ۵ و ۴ درصد بر نوک تیر اعمال شد. پیش-بینی آغاز ترک خوردگی بر مبنای مدل رشد چرخه‌ای حفرات به ترتیب در نیم چرخه‌های ۲۴، ۲۸، ۳۳ و ۳۷ به ازای دررفت ۷، ۶، ۵ و ۴ درصد به دست آمد و شاخص شکست در مسیر بال در نیم چرخه‌های ۳۳، ۳۸ و ۴۵ به ازای دررفت ۷، ۶ و ۵ درصد به مقدار واحد رسید. به ازای جابه‌جایی ۴ درصد تا پایان چرخه ۶۵، شاخص شکست در تمامی مسیر بال تیر به یک نرسید و تحلیل به دلیل کم‌انرژی بیش از حد بال و جان تیر متوقف شد. شکل (۹) نتایج تحلیل در دو مرحله مختلف بارگذاری از زمان شروع پیش‌بینی ترک خوردگی تا پایان تحلیل را نشان می‌دهد. المان‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، شاخص شکست در آن‌ها از یک بیشتر شده است. در شکل (۱۰) نمودارهای VGI_{Cyclic} و $VGI_{Critical}$ برای نقاطی که مرتبط به شروع ترک و پیش‌بینی پایان تحلیل است رسم شده است. محل تقاطع دو منحنی لحظه پیش‌بینی ترک خوردگی در نقطه انتگرال‌گیری شده را متناظر با شاخص شکست واحد نشان می‌دهد. در جدول (۲) نتایج لازم برای رسم منحنی S-N ارائه شده است.

شکل ۶. کرنش پلاستیک معادل CP-M تحت بارگذاری SAC

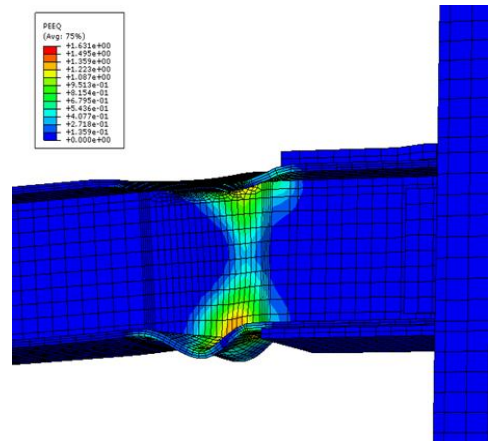


Fig. 6. Equivalent plastic strain in CP-M connection under SAC loading

شکل ۷. منحنی هیستریزیس اتصال CP-M

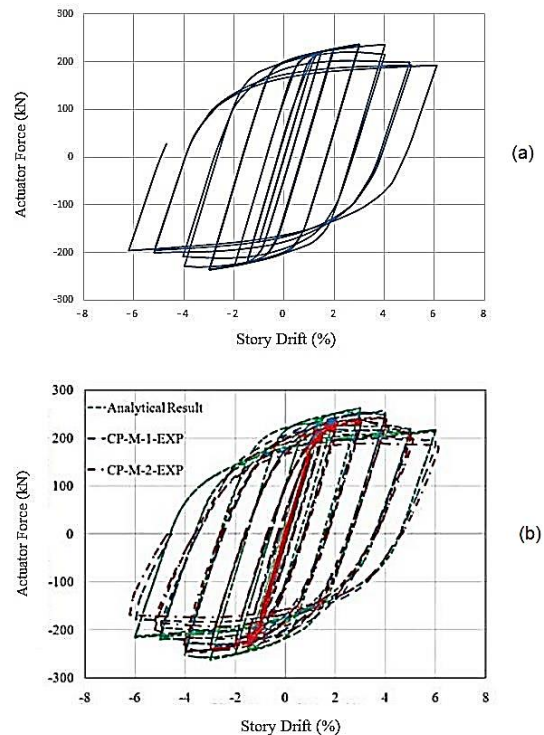


Fig. 7. Hysteresis curve of the CP-M connection: a) FEM, b) Experiment [21]

شکل (۸) نمودارهای VGI_{Cyclic} و $VGI_{Critical}$ را در بحرانی‌ترین نقطه نمایش می‌دهد. عدم تقاطع منحنی تقاضا و ظرفیت در طول تاریخچه بارگذاری بیانگر عدم آغاز ترک خوردگی است. مقایسه نتیجه به دست آمده با اتصالات شامل تیر عمیق که تحت پروتکل SAC، در دررفت‌های ۴ یا ۵ درصد دچار ترک خوردگی شدند بیانگر عملکرد مناسب اتصال با ورق انگشتی در برابر ترک خوردگی در خستگی کم چرخه

جدول ۲. اطلاعات منحنی S-N برای اتصال CP-M

Displacement (mm)	Drift (%)	2N _f	Log (drift)	Log (2N _f)
189	7	33	0.845	1.519
162	6	38	0.778	1.580
135	5	45	0.699	1.653

Table 2. S-N curve data of CP-M connection

شکل (۱۱) منحنی S-N را برای اتصال CP-M را در مقیاس عادی و در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودارها و با استفاده از روابط ساده‌شده مانند رابطه ماینر [27]، می‌توان عمر اتصال را برای بارگذاری‌های دلخواه پیش‌بینی نمود. لازم به ذکر است این نمودار برای جابه‌جایی‌های بین ۵ تا ۷ درصد به دست آمده است و برای استفاده از رابطه ماینر، بارگذاری با دامنه دلخواه در این محدوده معتبر است.

در شکل (۱۲) نتایج تحلیل به ازای آغاز خرابی و پایان تحلیل نشان داده شده است. به طور میانگین ۷۳ درصد کل عمر اتصال صرف ترک‌خوردگی اولیه و ۲۷ درصد برای به کار بردن ادامه تا پایان تحلیل می‌شود. مطابق انتظار، با افزایش دامنه بارگذاری مقاومت اتصال در برابر ترک‌خوردگی کاهش می‌یابد. روابط مدل رشد چرخه‌ای حفرات وابسته به پارامترهای ذاتی مصالح ($VGI_{critical}$ و λ) است. در مراجع [25, 7] مقادیر این پارامترها برای انواع مختلف فولادهای سازه‌ای آمده است. از آنجا که مصالح استفاده شده در اتصال مورد بررسی همگی از نوع فولاد St37 بوده و ضرایب مدل رشد چرخه‌ای حفرات در مراجع مورد بررسی در دسترس نیست، از ضرایب مرتبط به فولاد A36 که از نظر ویژگی‌های مکانیکی شباهت قابل قبولی با فولاد St37 در کشورمان دارد، استفاده شده است. با این وجود، به دلیل تعیین حساسیت جواب‌ها به پارامترهای ذاتی، تحلیلی دوباره با در نظر گرفتن رواداری $\pm 20\%$ درصد نسبت به مقادیر اولیه انجام گرفت. در تحلیل ابتدایی، مقدار $VGI_{critical}$ ، ۲۰ درصد افزایش و مقدار λ ، ۲۰ درصد کاهش (متناظر با وضعیت تاخیر ترک‌خوردگی) و در تحلیل ثانویه، مقدار $VGI_{critical}$ ، ۲۰ درصد کاهش و مقدار λ ، ۲۰ درصد افزایش (متناظر با وضعیت تسریع ترک‌خوردگی) در نظر گرفته شد. تحلیل‌های انجام گرفته برای بارگذاری بین طبقه‌های ۷ درصد انجام شد.

شکل ۹. مقایسه شاخص شکست

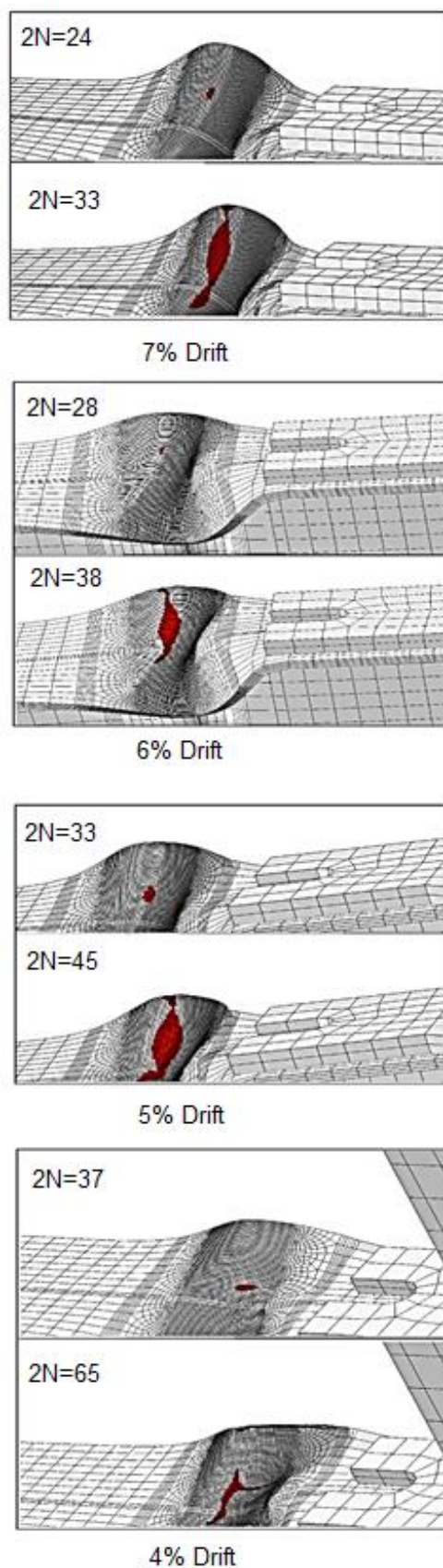


Fig. 9. Comparison of failure index

شکل ۱۰. گسترش تقاضا و ظرفیت شاخص رشد حفرات (نمودارهای سمت راست آغاز ترک خوردگی و نمودارهای سمت چپ پایان تحلیل است)

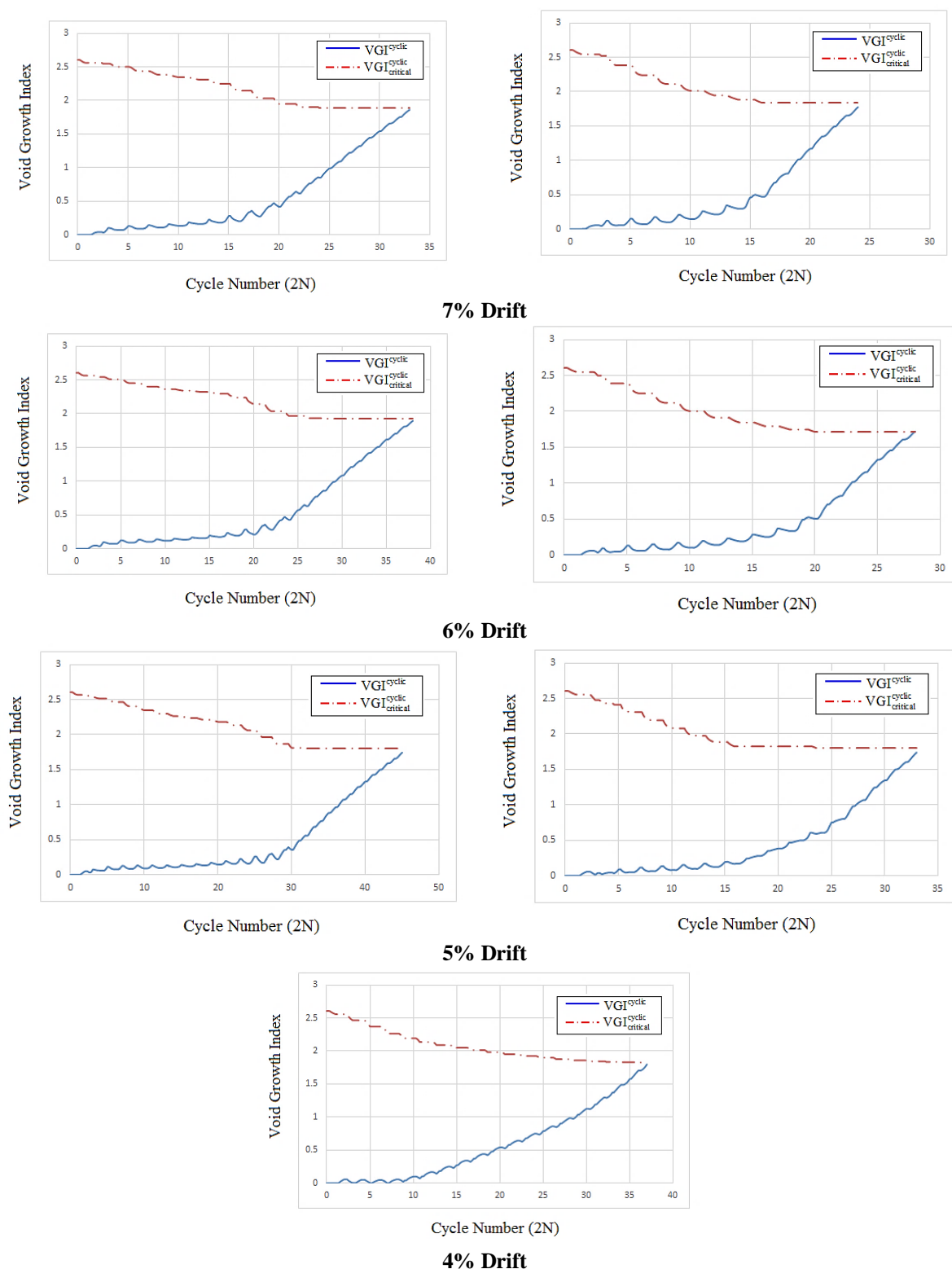


Fig. 10. Demand and Capacity of void growths index (Right diagrams denote the start of the cracking and left diagrams show the end of the analysis)

تحلیل دوم تعداد نیم چرخه‌های منجر به آغاز ترک خوردگی برابر با ۲۷ و تعداد نیم چرخه‌های ادامه یافته تا پایان تحلیل برابر با ۳۷ به دست آمد. مطابق با نتایج به دست آمده، پایان محاسبات عددی برای تحلیل اول ۱۵ درصد کاهش و برای تحلیل دوم ۱۲ درصد افزایش نسبت به تحلیل اصلی به ازای مقادیر مرتبط به فولاد A36 داشته است. همان گونه که نتایج در شکل (۱۳) نشان می‌دهد، با توجه به خطای احتمالی در مقادیر متغیرها، نغییرات در نتایج به صورت نسبی کم است.

شکل ۱۳. نتایج آزمایش حساسیت سنجی

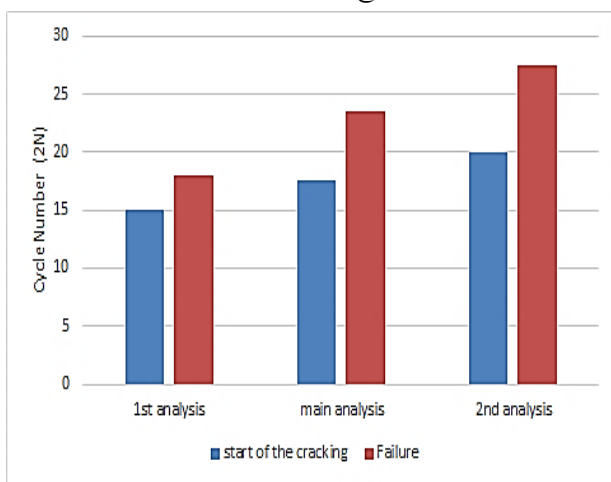


Fig. 13. Sensitivity Analysis results

۶. نتیجه گیری

یکی از چالش‌های غلبه بر شکست ترد و به تاخیر انداختن ترک خوردگی نرم در اتصالات در بارگذاری زلزله، در کنترل کیفیت جوشکاری، طراحی بهینه مقاطع اتصال و ابعاد ورق است. در ادبیات فنی، مدل‌های میکرومکانیکی برای پیش‌بینی ترک خوردگی در فلزات تحت خستگی کم چرخه وجود دارد که وجه مشترک آن‌ها در بررسی تاریخچه تنش و کرنش در ابعاد طول مشخصه فلز است. در این پژوهش عملکرد نوعی اتصال با ورق انگشتی در برابر ترک خوردگی نرم در خستگی کم چرخه بررسی شد. مدل‌سازی مدل اجزای محدود از طریق نرم‌افزار آباکوس و محاسبات مربوط به مدل میکرومکانیکی برای پیش‌بینی خرابی توسط زیربرنامه کامپیوتری انجام شد. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- اتصال پیشنهاد شده با ورق انگشتی در مقایسه با تعدادی از

شکل ۱۱. منحنی S-N

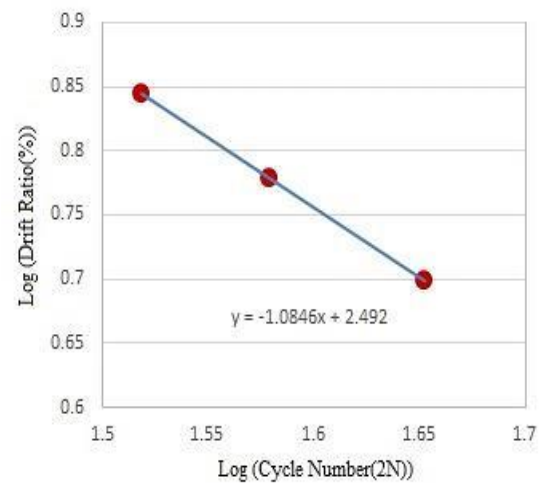
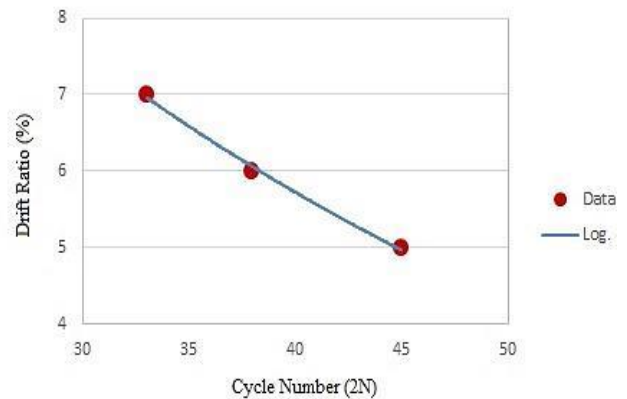


Fig. 11. S-N diagram

شکل ۱۲. طول عمر اتصال تحت سطوح مختلف بارگذاری

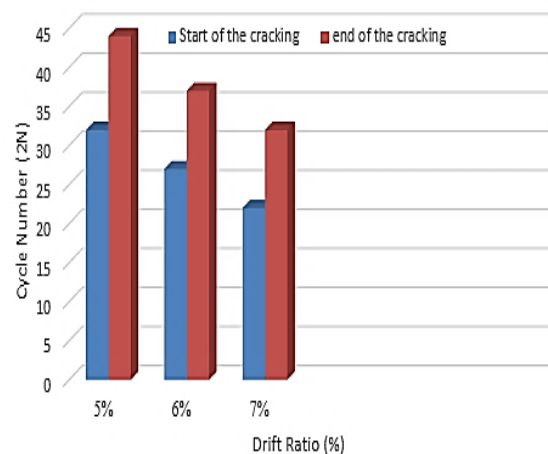


Fig. 12. Life cycle of the connection

شکل (۱۳) نتایج آزمایش حساسیت‌سنجی را به ازای جابجایی ۷ درصد با مقدار اولیه مقایسه می‌کند. در تحلیل اول تعداد نیم چرخه‌های منجر به آغاز ترک خوردگی برابر با ۲۱ و تعداد نیم چرخه‌های ادامه یافته تا پایان تحلیل برابر با ۲۸ و در

10. Amiri, H., Aghakouchak, A., Shahbeyk, S., Engelhardt, M.D. "Finite element simulation of ultra low cycle fatigue cracking in steel structures". *Journal of Constructional Steel Research*, **89**: p. 175-184 (2013).

11. Badrkhani Ajaei, B. and Ghassemieh, M. "Reinforcing fillet welds preventing cracks in partial joint penetration welds". *International Journal of Steel Structures*, **15**(2): p. 487-497 (2015).

12. Čermelj B, Može P, Sinur F. On the prediction of low-cycle fatigue in steel welded beam-to-column joints. *J Constr Steel Res*. 2016;117:49–63.

13. Lee DS, Kishiki S, Yamad S, Ishid T, Jiao Y. Experimental study of low-cycle fatigue behavior of a welded flange-bolted web connection in steel moment-resisting frames. *Earthq Spectra*. 2018;34(4):1829–46.

14. Ghassemieh M, Rezapour M, Taghinia A. Predicting Low Cycle Fatigue Life through Simulation of Crack in Cover Plate Welded Beam to Column Connections. *J Comput Appl Mech*. 2017;48(1):39–52.

15. Tong L, Huang X, Zhou F, Chen Y. Experimental and numerical investigations on extremely-low-cycle fatigue fracture behavior of steel welded joints. *J Constr Steel Res* [Internet]. 2016;119:98–112. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.015>

16. Kishiki S, Lee DS, Yamada S, Ishida T, Jiao Y. Low-cycle fatigue performance assessment of current Japanese steel beam-to-column connections determined by ductile fracture. *Eng Struct* [Internet]. 2019;182(June 2018):241–50. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.061>

17. Hoveidae N. Ultra-Low Cycle Fatigue Fracture Life of a Type of Buckling Restrained Brace. *J Rehabil Civ Eng*. 2018;6(2):30–44.

18. Qu W, Zhao E, Zhou Q. Refined Analysis of Fatigue Crack Initiation Life of Beam-to-Column Welded Connections of Steel Frame under Strong Earthquake. *Shock Vib*. 2017;2017.

19. Mirzahosseini M, Gerami M, Borhani E. Seismic Evaluation of Cumulative Low-Cycle Fatigue in Steel Moment Frame Connections. *Iran Soc Steel Struct*. 2014;11(17):25–34. (In Persian)

20. Badrkhani Ajaie B, Ghassemieh M. Comparison of Existing Criteria for Low-Fatigue Damage Accumulation In steel joint with coated sheets. *Iran Soc Steel Struct*. 2011;7:79–86. (In Persian)

21. Saneei Nia, Z., Mazroi A., and Ghassemieh. M. "Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate". *Journal of Constructional Steel Research*, **101**: p. 207-223 (2014).

22. "Seismic provisions for structural steel buildings". *American Institute of Steel Construction* (2002).

23. Saneei Nia, Z, Mazroi, A., Ghassemieh, M., Pezeshki, H. "Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints". *Earthquake*

اتصالات پیشتر آزمایش شده عملکرد مناسبی در برابر ترک خوردگی نرم در خستگی کم چرخه دارد.

- نتایج حاصل از منحنی S-N به ازای بارگذاری با جابجایی ثابت، به طور متوسط ۷۳ درصد عمر اتصال صرف ترک خوردگی اولیه شد.

- تحلیل حساسیت سنجی با رواداری ۲۰ درصد بر پارامترهای ذاتی مدل میکرو مکانیکی، تغییرات حداکثر ۱۵ درصدی، در جوابها را نشان داد.

References

۷. منابع

- Venture, SAC Joint. "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings". Federal Emergency Management Agency (2000).
- Youssef, N.F., Bonowitz, D. and Gross, J.L. "A survey of steel moment-resisting frame buildings affected by the 1994 Northridge earthquake". NIST (1995).
- Kim, T., Whittaker, A.S., Gilani, A.S.J., Bertero, VV. and Takhirov, SM. "Coverplate and flange-plate reinforced steel moment-resisting connections". *Rep No. PEER 2000/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Univ of California at Berkeley, Berkeley, California (2000).
- Ricles, J.M. "Development and evaluation of improved details for ductile welded unreinforced flange connections". SAC Joint Venture (2002).
- Ricles, J.M., Zhang, X., Fisher, J.W., and Lu, LW. "Seismic performance of deep column-to-beam welded reduced beam section moment connections". in *Proc. 5th International Workshop Connections in Steel Structures V: Behaviour, Strength and Design, Amsterdam, The Netherlands* (2004).
- Castiglioni, C.A. and R. Pucinotti. "Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading". *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(4): p. 751-765 (2009).
- Kanvinde, A.M. "Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures". Technical Rep. No 145, John A Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ. Stanford, California (2004).
- Fell, B.V., "Large-scale testing and simulation of earthquake-induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling" *Ph.D. Dissertation*, University of California Davis (2008).
- Badrkhani Ajaei, B. and Ghassemieh, M. "Applicability of damage indices for detection of cracking in steel moment connections". *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **1**(2): p. 1-9 (2013).

26. Afzalan M., Ghasemieh, M, "Finite element modeling of failure in steel moment connection subjected to ultra-low cycle fatigue loading," *ACEM15, Korea* (2015).

27. Miner, M.A. "Cumulative damage in fatigue". *Journal of applied mechanics*, **12**(3): p. 159-164 (1945).

Engineering and Engineering Vibration, **13**(4): p. 717-729 (2014).

24. Hibbett, Karlsson, and Sorensen, *ABAQUS/standard: User's Manual*. Vol. 1. Hibbett, Karlsson & Sorensen (1998).

25. Myers, A.T. "Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments". *Ph.D. Dissertation*. Stanford University (2009).

Low cycle fatigue failure of steel moment connections with finger shaped cover plates

M. Ghassemieh^{1*}, M. Afzalan²

1- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran

2- MS in Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

Abstract

Following Northridge earthquake, wide spread brittle cracking had been observed in steel moment connection, and this, was in contrast with the philosophy of designing steel moment frames which accounts for dissipating energy by forming plastic hinges at beams. This situation led to the development of improved connections to make them less prone to brittle fracture. However, studies have shown that these new connections, typically known as post Northridge connections, can still have the tendency to fracture but in a ductile manner when subjected to ultra low cycle fatigue loading. Ultra low cycle fatigue loading consists of limited cycles of loading with large amplitude which induce strains that are several times greater than yielding. Searching the literature, varied methods have been proposed to predict cracking in ductile steel for both monotonic and cyclic loading. In this research, a micro mechanical model called cyclic void growth model has been applied to predict the instance and location of cracking in the steel structure. For the purpose of predicting the low cycle fatigue failure, finger shaped steel moment type connections with top and bottom cover plates which their experimental data were available, used as a benchmark study. A micro mechanical model is integrated into the ABAQUS finite element program in order to simulate crack initiations in the cover plate welded beam to column connection. For this purpose, a Fortran code is linked with the ABAQUS software for simulating the crack and specifically to predict when and where the crack initiates. By understanding the crack initiation and the location of this crack, a trend line for low cycle fatigue under various constant drift angels are put together. The trend line provides a number of cycles for the crack to initiate by applying the specific drift angle. Therefore, a finite element model of a cover plate welded moment connection was developed and was used in order to simulate cracking in the connection model. Thus, each crack location and the number of cycles to initiate the crack were detected. Utilizing cyclic void micro mechanical model of growth analysis, which is a technique to predict fracture in a ductile material, different cover plate connections were modeled in the steel moment frame, and then their critical points to trigger the crack were identified. Finally, for the finger shaped cover plate moment connection, considering different loading curves data and in order to present the low cycle fatigue life prediction, displacement versus the number of half cycles diagram is produced. Finite element results demonstrated acceptable agreement with the experimental data. Furthermore, the low cycle fatigue life of connections under loading with constant amplitude is estimated, and S-N curves are proposed. It is demonstrated that the finger plate joint revealed a good performance against soft cracking in low cycle fatigue compared to a number of previously tested joints. The results of the S-N curve for a constant displacement loading averaged 73% of the lifetime of the initial cracking. Sensitivity analysis with 20% tolerance on the intrinsic parameters of the micro mechanical model showed a maximum change of 15% in the responses.

Keywords: Low cycle fatigue, steel moment connections, cyclic void growth model, finite element analysis.