

اصلاح منحنی رفتاری اتصالات گیردار تیر به ستون با ورق روسری و زیرسری با نقص عدم نفوذ در جوش به روش تحلیلی

حامد محمدلو^۱، کیارش ناصر اسدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشگاه زنجان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

nasserasadi@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۷/۰۲]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۳۰]

چکیده

یکی از مهم‌ترین و آسیب‌پذیرترین اجزای سازه‌های فولادی، اتصالات تیر به ستون است، که خرابی آن‌ها در زلزله ممکن است خسارات جبران‌ناپذیری را به سازه تحمیل نماید. به علت خطاهای موجود در اجرای اتصالات سازه‌های فولادی نقص‌هایی در این اجزا بوجود می‌آید که در ارزیابی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها، عموماً در نظر گرفته نمی‌شود. به همین علت، شناخت رفتار واقعی اتصالات دارای نقص به منظور استفاده در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه، به بررسی رفتار اتصالات فولادی دارای نقص عدم نفوذ پرداخته شده و روابط رفتاری آنها با توجه به وجود نقص، اصلاح شده است. بدین منظور، سه نمونه اتصال تیر به ستون با مقاطع مختلف، از نوع اتصال با ورق روسری و زیرسری در نظر گرفته شده است. سپس در دو حالت بدون نقص عدم نفوذ و دارای نقص عدم نفوذ در سه حالت خرابی جوش فوقانی، تحتانی و هر دو، در نرم‌افزار اجزای محدود مدل سازی شده است. به منظور مدلسازی گسترش ترک از روش اجزای محدود گسترش یافته استفاده شده است. منحنی‌های رفتاری اتصالات استخراج شده و از مقایسه آن‌ها، روابط اصلاح رفتاری برای سه حالت خرابی تعیین شده است. نتایج نهایی نشان می‌دهد که وجود نقص عدم نفوذ در جوش فوقانی تأثیر بیشتری در کاهش عملکرد اتصال داشته و مقاومت و دوران اتصال را بطور متوسط به ترتیب ۳۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: اتصالات گیردار، ترک در جوش، عدم نفوذ، منحنی رفتاری، اجزای محدود گسترش یافته.

۱- مقدمه

معیاب می‌توان به مقاومت پایین در برابر آتش‌سوزی، عدم وجود جوشکارهای ماهر و وجود نقص در جوش‌های اتصالات این سازه‌ها اشاره نمود. بررسی نتایج آسیب‌های وارد شده به سازه‌های فلزی در زلزله نورتریج و کوبه نشان می‌دهند که برخی از موارد طراحی و اجرای اتصالات گیردار فلزی دارای نقص بوده که باعث ضعف در رفتار اتصالات شده است

امروزه استفاده از سازه‌های فلزی به خاطر زمان کمتر ساخت، فضای پایین اشغال شده توسط اجزای سازه‌ای، شکل‌پذیری بالا و سایر مزایای این نوع سازه‌ها رو به پیشرفت است. اما سازه‌های فلزی در کنار مزایای زیادی که دارند، دارای نقص‌های قابل توجهی نیز هست که هریک از این نقص‌ها می‌تواند رفتار این سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. از جمله این

آن‌ها در اینجا بررسی می‌شود. آزوما^۳ و همکارانش [9]، با ساخت چهار نمونه آزمایشگاهی از اتصالات دارای نقص عدم نفوذ و ترک و هانچی و همکارانش [10]، با ساخت چهار نمونه از اتصالات جوشی دارای نقص عدم نفوذ به بررسی رفتار این اتصالات تحت بارگذاری رفت و برگشتی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات سازوکار تولید و گسترش ترک‌ها در اتصالات دارای عدم نفوذ را نشان داده است.

در خصوص چگونگی رشد ترک‌های میکروسکوپی و ارائه مدل برای رشد آنها، امیری و همکارانش در سال ۲۰۱۳، مدلی ارائه داده‌اند که هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایش‌های مربوط داشته است [10]. بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون در خصوص چگونگی تغییر رفتار اتصالات در حالت دارای نقص عدم نفوذ مطالعه ای صورت نگرفته است.

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار اتصالات متداول در ایران با عدم نفوذ و ارائه مدلی برای اصلاح رفتار اتصالات بدون نقص به منظور دستیابی به رفتار اتصال معیوب، سه نمونه اتصال با ابعاد مختلف با ورق روسری و زیرسری در نظر گرفته شده و رفتار آن‌ها در دو حالت با جوش نفوذ کامل و جوش دارای عدم نفوذ پرداخته شده و منحنی رفتاری آن‌ها برآورد و مقایسه شده است.

۲- روش انجام مطالعه

برای مقایسه رفتار اتصالات بدون نقص عدم نفوذ با نمونه‌های دارای نقص سه اتصال گیردار با ورق روسری و زیرسری با سه مقطع مخت لف (سبک، متوسط و سنگین) طراحی شده‌اند که جزئیات آن‌ها در جدول و شکل (۱) ارائه شده است. تیرهای بررسی شده به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تاثیر هندسه تیرها روی نتایج بررسی شوند.

[1, 2]. در ایران، تاکنون ساختمان‌هایی که دارای اتصال گیردار باشند مورد محک جدی زلزله‌های قرار نگرفته است و در این خصوص اطلاعات میدانی در دسترس نیست و مطالعات به مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی محدود شده است.

اتصال گیردار با ورق زیرسری و روسری یکی از اتصالات پرکاربرد توصیه شده در آیین‌نامه اتصالات در سازه‌های فولادی ایران است [3]. این آیین‌نامه برای ایجاد نفوذ کامل در جوش‌های نفوذی این اتصالات دو روش استفاده از ورق پشت‌بند و جوشکاری دوطرفه را توصیه کرده است. نواقص در جوش اتصالات گیردار به دلایل متعددی مانند عدم تطبیق اتصال طرح شده با اتصال اجرایی، عدم رعایت موارد توصیه شده در آیین‌نامه‌ها و عدم مهارت کافی جوشکار می‌تواند رخ دهند. از جمله مهم‌ترین نواقص موجود در جوش می‌توان به بریدگی یا سوختگی کنار جوش^۱، سررفتن یا عدم تقارن جوش^۲، ناخالصی گل جوش یا سرباره^۳، عدم ذوب^۴، عدم نفوذ کامل جوش^۵، وجود ترک در جوش^۶ و تخلخل^۷ اشاره نمود. یکی از رایج‌ترین نواقص موجود، عدم نفوذ در جوش نفوذی است. بنابراین لازم است که برآوردی از رفتار این اتصالات انجام شده که از نتایج آن در ارزیابی رفتار غیر خطی سازه‌ها استفاده شود.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و عددی وسیعی در ارتباط با بررسی رفتار چرخه‌ای اتصالات گیردار جوشی تیر به ستون فولادی و ارائه جزئیات برای بهبود آن انجام گرفته است از این جمله می‌توان به مطالعات اینگل هارت^۸ و همکارانش [4]، بهاتی و هینگتن^۹ [5]، ال توپل^{۱۰} و همکارانش [6]، لی^{۱۱} و همکارانش [7] و ماشالی و همکارانش^{۱۲} [8] اشاره نمود.

در زمینه خرابی و نواقص جوش و چگونگی مدل‌سازی آن‌ها مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است که تعدادی از

- 1 Under cut
- 2 Over lap
- 3 Slag inclusion
- 4 Lack of fusion
- 5 Lack of pentertation
- 6 crack
- 7 Prosimy
- 8 Engelhardt
- 9 Bhatti, Hingtgen
- 10 El-Tawil
- 11 Lee
- 12 Mashaly et al

شکل ۱. پارامترهای ابعادی اتصالات

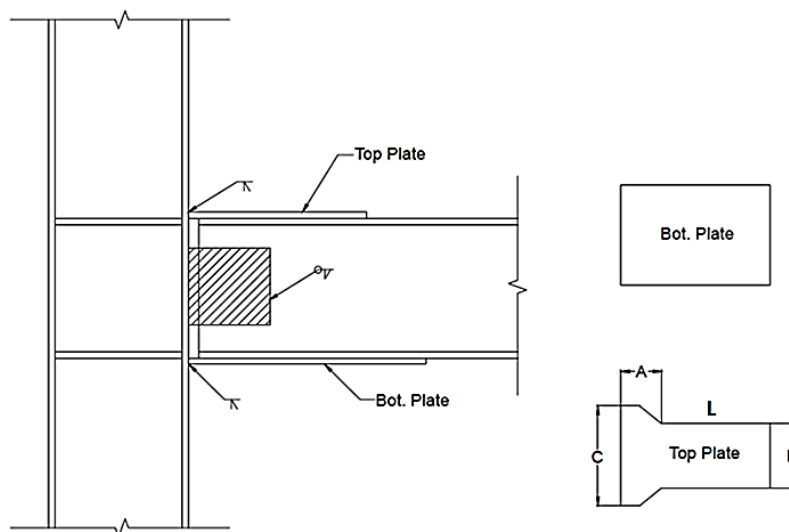


Fig. 1. Schematic details of connections

جدول ۱. جزئیات اتصالات

| Bot. plate (mm) section | (mm) Top plate sec. | | | | | column | Beam sec. | | beam | connection s |
|----------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|---------|-------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------|
| | thickn ess | A | C | B | L | | S (Cm ³) | moment (Cm ⁴) | | |
| PL130x110x10 | 18 | 100 | 100 | 70 | 50 | IPB 300 | 95.15 | 1325 | PB 250x8x100x10 | 1 |
| PL200x110x7 | 15 | 75 | 70 | 50 | 125 | IPB 300 | 109 | 869 | IPE 160 | 2 |
| PL280x220x22 | 28 | 350 | 300 | 220 | 50 | IPB 320 | 264 | 4616 | PB 300x 8x 250x25 | 3 |

Table 1. detail of designed connections

رفتاری اتصالات و مقایسه آن‌ها ضرایب اصلاح رفتار اتصالات دارای نقص عدم نفوذ برآورد شده است.

۳- مدل سازی نمونه‌ها

برای اطمینان درستی روش مدل سازی، در ابتدا به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی تحلیل

در اعتبارسنجی مدل سازی از مدل اتصال گیردار BH-1 آزمایش شده به وسیله آزوما و همکارانش [9] که چگونگی انجام آزمایش آن و مدل ایجاد شده در نرم افزار به منظور درستی آزمایشی در شکل (۲) نشان داده شده، استفاده شده است. در پژوهش آزوما، بعد از انجام آزمایش شکست جوش، مدل سازی ترک با روش انتگرال گیری انجام شده است. در

برای انجام این مطالعه به ترتیب زیر عمل شده است:
۱- به منظور بررسی تاثیر وجود نقص عدم نفوذ در اتصالات گیردار، اتصالات بررسی شده در نرم افزار اجزای محدود آباکوس^۱ در دو حالت سالم و دارای نقص مدل سازی شده‌اند.

۲- برای بررسی تاثیر محل وجود خرابی عدم نفوذ، خرابی در حالت‌های جوش فوقانی، تحتانی و هردو در نظر گرفته شده است. همچنین در این پژوهش برای مدل سازی ترک ناشی از عدم نفوذ از روش اجزای محدود گسترش یافته^۲، استفاده شده است.

۳- در پایان با بررسی نمودارهای چرخه‌ای و منحنی‌های

1 ABAQUS

2 Extended Finite Element Method (XFEM)

پلاستیک مقطع است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدلسازی انجام شده به میزان بسیار قابل قبولی از نظر مقاومت و تغییر شکل با نتیجه آزمایش همخوانی دارد و اختلاف جزئی موجود بین دو نمودار به دلیل عدم دقت کافی مدل ریاضی در لحاظ کردن تمامی پارامترهای واقعی است.

شکل ۳. سازگاری مدل تحلیلی با مدل آزمایشگاهی

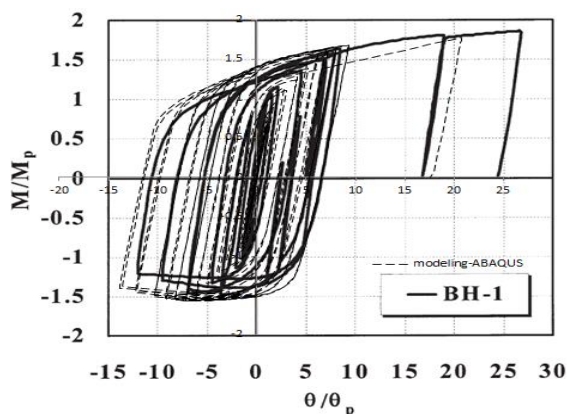


Fig. 3. Comparison of hysteresis loops of experiment and FEM model for verification

۳-۲- مدل‌سازی نمونه‌های مطالعه شده

طول ستون در تمامی مدل‌سازی‌های انجام شده سه متر است که در هر دو طرف در فاصله بیست سانتی‌متری از انتها به صورت گیردار مقید شده است. تیر به شکل طره‌ای به طول یک و نیم متر مدل شده است. جابه‌جایی اعمال شده به نمونه، به انتهای تیر وارد می‌شود که بر اساس پروتکل دستورالعمل SAC است [12]. در شبکه‌بندی اتصالات بدون خرابی عدم نفوذ از المان‌های هرمی چهار گرهی (C3D4) برای تیر، ستون و صفحات بالا و پایین و از المان‌های هرمی شش گرهی (C3D6) برای جوش‌ها استفاده شده و در شبکه‌بندی اتصالات معیوب از المان‌های هرمی چهار گرهی (C3D4) برای تیر، ستون و صفحات بالا و پایین و از المان‌های مکعبی هشت گرهی (C3D8R) استفاده شده است. ابعاد المان بر اساس شبکه‌بندی اتوماتیک و با ابعاد حدودی ۵ سانتی‌متر در بخش‌های کلی المانها بوده و در بخش‌های اتصال و جوش‌ها، شبکه‌ها به صورت اتوماتیک ریزتر شده و در محدوده‌هایی به حد میلی‌متر رسیده است. تحلیل حساسیت انجام شده با المان‌های با ابعاد ۲ سانتی‌متر نشان می‌دهد که اختلاف نتایج در

مطالعه حاضر، ترک‌ها با روش XFEM مدلسازی شده و نتایج با نتایج آزمایش آزوما و همکارانش [9] مقایسه شده است. به منظور مطالعه رفتار چرخه‌ای، جابه‌جایی اعمال شده به این نمونه طبق الگوی توصیه شده در دستورالعمل SAC [12] در محل اعمال P به نمونه وارد می‌شود. برای فولاد مصرفی در این آزمایش از فولادی با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) استفاده شده است. مشخصات جوش اتصال از نوع E60 در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مشخصات فولاد مصرفی در آزمایش آزوما [۹]

| σ_y (MPa) | σ_u (MPa) | ϵ_u (%) | E (GPa) |
|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 259.9 | 454.7 | 16.17 | 204.7 |

Table 2. Properties of steel material in the Azuma specimens tested [9]

شکل ۲. جزئیات اتصال گیردار در نمونه آزمایشی [۹] و مدل ایجاد شده در نرم‌افزار. محل اعمال جابه‌جایی در نقطه اعمال بار P است

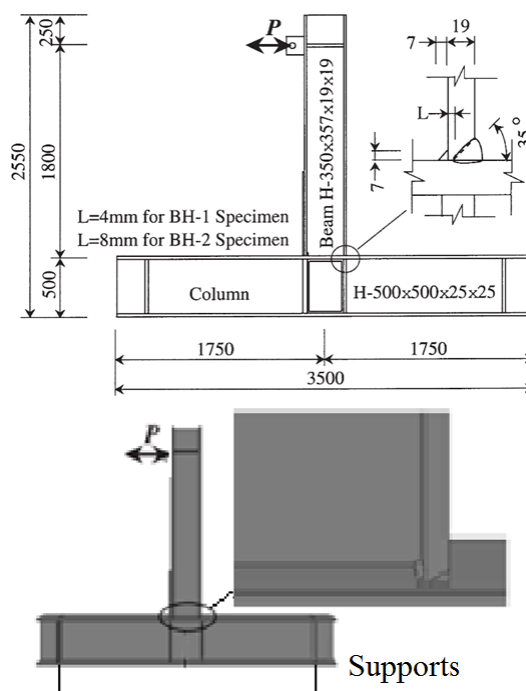


Fig. 2. Test setup of experimental study and FEM modeling [9]

برای انجام درستی آزمایشی منحنی‌های چرخه‌ای لنگر دوران نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در شکل (۳) مقایسه شدند. در این نمودار، M و M_p به ترتیب لنگر وارد شده و لنگر پلاستیک مقطع و θ و θ_p به ترتیب چرخش و چرخش

محل این خرابی‌ها و گسترش این ترک به سمت سطح جوش می‌شود [9, 10]، در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن امکان شروع و گسترش ترک در اتصال، از روش اجزای محدود گسترش یافته استفاده شده است [14]. برای مدل‌سازی این اتصالات از اثر متقابل^۱ tie بین اجزا و جوش استفاده شده است. صفحه ترک اولیه به طول سه میلی‌متر در محل وجود خرابی یعنی ریشه جوش قرار داده شده است. از آنجایی که در روش XFEM مسیر گسترش خرابی با توجه به معیار بیشینه تنش اصلی توسط نرم‌افزار مشخص می‌شود، این فرض محلی است برای شروع ترک خوردگی ریشه جوش، بنابراین طول این صفحه تاثیر چندانی در نتیجه حاصل نخواهد داشت. با توجه به نوع المان و نوع هندسه جوش همچنین نوع تحلیل مسئله در روش مورد استفاده برای رسیدن به همگرایی کامل از دو المان در مسیر عمود بر جوش استفاده شده است. اندازه شبکه‌ها در المان تیر و ستون ۷ میلی‌متر و در محل جوش سالم ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در محل جوش دارای خرابی با توجه به تکرارهای صورت گرفته اندازه شبکه‌بندی برای رسیدن به همگرایی در نمونه‌های مختلف متفاوت است. چون المان‌های تیر و ستون در تحلیل رفتار از اهمیت کم‌تری نسبت به المان‌های جوش برخوردار بودند به همین دلیل ابعاد در این المان‌ها اندکی بیشتر در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه، از معیار حداکثر تنش اصلی^۲ و انرژی ترک [15] استفاده شده است. با توجه به ترد بودن ماده جوش مقدار بیشینه تنش اصلی شروع ترک برابر $0.8 F_u = 3820 \frac{kg}{cm^2}$ در نظر گرفته شده است. صفحه ترک اولیه به طول سه میلی‌متر در محل وجود خرابی یعنی ریشه جوش قرار داده شده است. در شکل (۶) شکل طرح واره رشد ترک از محل وجود عدم نفوذ که ریشه جوش است، نشان داده شده است. همچنین در شکل (۷) نمونه‌هایی از رشد در ترک در تحلیل اجزا محدود نشان داده شده است. در این شکل‌ها ترک از محل ریشه جوش و محل عدم نفوذ شروع شده و با توجه به تنش‌های ترک خوردگی به سمت سطح جوش گسترش پیدا می‌کند.

حدود ۱ درصد است که می‌توان شبکه‌بندی را قابل قبول دانست. نمونه‌ای از شبکه‌بندی استفاده شده در اتصالات و محل جوش در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. نمونه‌ای از شبکه‌بندی در اتصالات و محل جوش

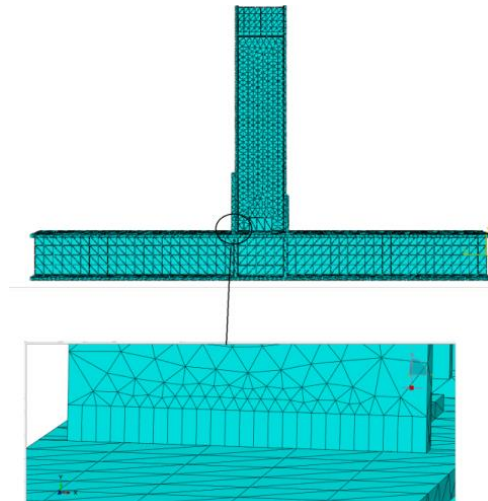


Fig. 4. Mesh size in the modelling of connection and welds in FEM

رفتار فولاد مصرفی st37 برای نمونه‌ها به صورت دوخطی مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی، مصالح جوش الکتروود E60 با ضرایب الاستیسیته $E = 2.06 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، تنش تسلیم $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ، تنش نهایی $F_u = 4900 \text{ kg/cm}^2$ و کرنش نهایی این نوع جوش ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [13].

شکل ۵. منحنی تنش - کرنش فولاد [۱۳]

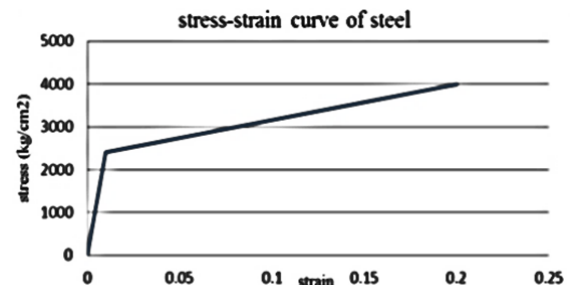
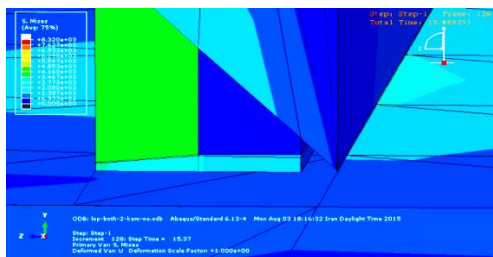


Fig. 5. Stress-strain curve of steel [13]

با توجه به این‌که بر اساس نتایج مطالعات گذشته، عدم نفوذ موجود در ریشه جوش‌های نفوذی موجب ایجاد ترک در

ب. مسیر گسترش ترک در المان جوش براساس حداکثر تنش که در شکل نمایش داده شده است. ترک در المانها نسبت به شکل الف توسعه یافته است.



b. The path of expanded crack in the weld based on the maximum stress

Fig. 7. Example of expansion of crack in FEM model

۴- بررسی عملکرد و رفتار نمونه‌ها

با تغییر مکان با رژیم ارائه شده، نمودارهای چرخه‌ای نیرو جابه‌جایی اتصالات برآورد شده است. سپس با تبدیل این منحنی به منحنی‌های لنگر دوران عضو امکان ترسیم منحنی‌های رفتاری برای نمونه‌های مختلف فراهم می‌شود. با مقایسه این نمودارها می‌توان مقادیر ضرایب اصلاح منحنی رفتاری را برای اتصالات دارای نقص محاسبه نمود. در ادامه نتایج مربوط به اتصالات بدون نقص، عدم نفوذ در جوش ورق فوقانی، تحتانی و هردو ورق ارائه شده است.

۴-۱- اتصال بدون نقص عدم نفوذ

نمودار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی مربوط به نمونه بدون نقص عدم نفوذ اتصال اول در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۸. منحنی چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی نمونه بدون نقص عدم نفوذ

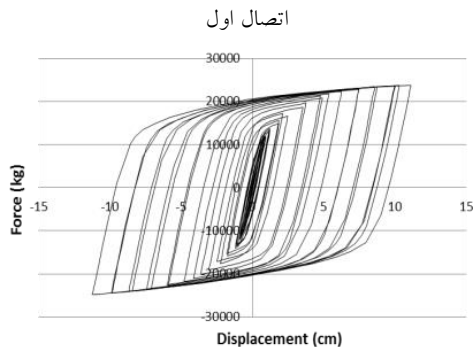


Fig. 8. Hysteresis loop of perfect connection of specimen 1

از آنجایی که نیروی وارد شده به ورق‌های بالا و پایین یکسان است، نمودار چرخه‌ای این نمونه‌ها رفتار مقارنی را از

گسترش ترک در این المان از جایی شروع می‌شود که تنش موجود از تنش ترک خوردگی جوش فراتر می‌رود در این حالت المان اول از صفحه فرضی اولیه که در شکل (۷-الف) نشان داده شده است، ترک می‌خورد. مزیت روش اجزا محدود گسترش یافته نسبت به روش اجزا محدود کلاسیک در این است که در این روش ترک خوردگی از سطح المان امکان پذیر است و نیازی به تغییر مداوم شبکه‌بندی و سازگار کردن مش‌ها با شرایط هندسی مدل ندارد [16]. از این رو، در ادامه روند ترک‌خوردگی، ترک در المان مطابق شکل (۷-ب) در المان پیشرفت می‌کند. در نهایت المان‌های مجاور نیز ترک خورده و موجب گسیختگی کامل المان جوش می‌شود. بعد از گسیختگی جوش ناحیه گسیخته شده قادر به تحمل جابه‌جایی اعمال شده نیست و به همین دلیل جوش در این نواحی بدون تنش است.

شکل ۶. شکل طرح واره رشد ترک از ریشه جوش

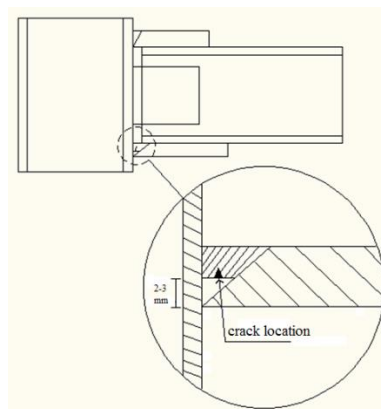
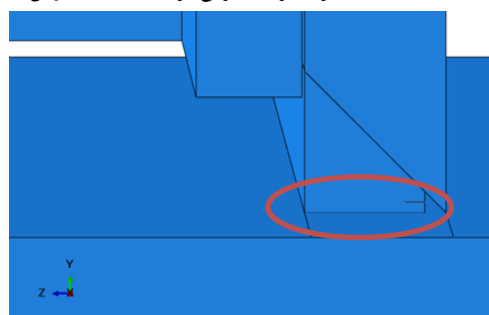


Fig. 6. Schematic diagram of weld crack expansion in the welds.

شکل ۷. نمونه‌هایی از چگونگی گسترش ترک در نمونه اجزای محدود

الف. صفحه اولیه ترک برای معرفی ترک در المان جوش



a. Location and dimension of crack before loading.

نشان نمی‌دهد. با تغییر جهت بارگذاری و تحت فشار قرار گرفتن جوش فوقانی، بعد از بسته شدن درز ترک، جوش در برابر نیروی وارده مقاومت می‌نماید. در این نمونه‌ها بعد از ترک خوردن جوش فوقانی نیروی وارد به اتصال، توسط جوش تحتانی تحمل می‌شود و تحلیل تا مرحله‌ای ادامه می‌یابند که جوش تحتانی نیز دچار گسیختگی شود و اتصال سازو کار شود. بر این اساس، منحنی رفتاری اتصالات بدون نقص مورد بررسی در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌گونه که در این نمودارها دیده می‌شود اتصال سوم در حالت عدم نفوذ جوش فوقانی دارای شکل پذیری و مقاومت بیشتری است که دلیل این رفتار را می‌توان، بعد بیشتر جوش تحتانی در اتصال سوم دانست.

شکل ۱۱. مقایسه منحنی رفتار نمونه‌های دارای خرابی در جوش فوقانی

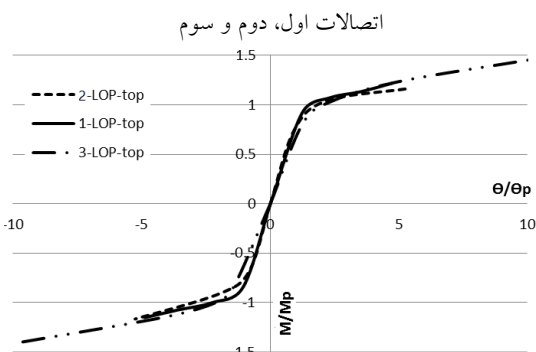


Fig. 11. Comparison of backbone curves of three specimens with LOP defect in the weld of top plate

۳-۴- اتصال دارای عدم نفوذ در جوش تحتانی

نمودار چرخه‌ای نیرو-جابجایی مربوط به نمونه دارای نقص عدم نفوذ جوش تحتانی اتصال اول در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

شکل ۱۲. منحنی چرخه‌ای نیرو-جابجایی نمونه دارای نقص عدم

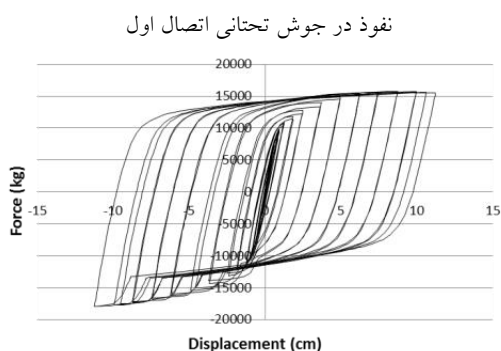


Fig. 12. Hysteresis loop of specimen 1 with LOP defect in the weld of bottom plate

خود نشان داده است. بر این اساس، منحنی رفتاری اتصالات بدون نقص بررسی شده که بر اساس منحنی لنگر-دوران با روش ارائه شده در FEMA 440 [17] ترسیم شده در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود این اتصالات دارای رفتار پایدار و حالت متقارن است. اتصالات ۱ و ۳ دارای مقاومت بالاتری نسبت به اتصال ۲ می‌باشند که این به دلیل قوی‌تر بودن مقاطع اتصالات اول و سوم است.

شکل ۹. مقایسه منحنی رفتار نمونه‌های بدون نقص عدم نفوذ اتصالات

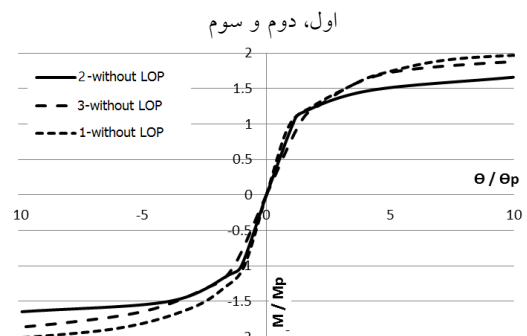


Fig. 9. Comparison of backbone curves of three original specimens

۴-۲- اتصال دارای عدم نفوذ در جوش فوقانی

نمودار چرخه‌ای نیرو-جابجایی مربوط به نمونه دارای نقص عدم نفوذ جوش فوقانی اتصال اول در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل ۱۰. منحنی چرخه‌ای نیرو-جابجایی نمونه دارای نقص عدم نفوذ در

جوش فوقانی اتصال اول

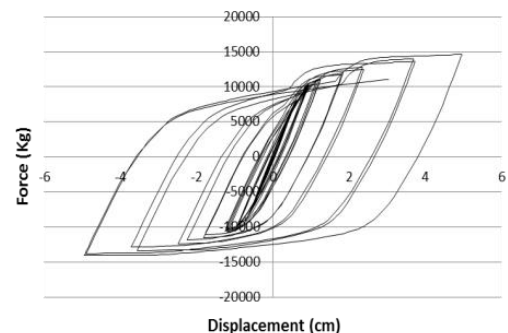


Fig. 10. Hysteresis loop of specimen 1 with LOP defect in the weld of bottom plate

در اتصال دارای خرابی در جوش فوقانی مشاهده می‌شود که نمونه قبل از رشد ترک هم‌چون حالت بدون نقص عدم نفوذ عمل می‌کند اما زمانی که جوش فوقانی تحت کشش قرار می‌گیرد ترک شروع به گسترش نموده و هیچ مقاومتی از خود

و بعد از بازشدگی ترک در جوش تحتانی تمامی نیرو به جوش فوقانی منتقل می‌شود که این عامل باعث رشد سریع‌تر ترک در جوش فوقانی و سازوکار شدن اتصال می‌شود. با توجه به نمودار چرخه‌ای اتصالات در این حالت، می‌توان منحنی‌های رفتاری این اتصالات را ترسیم نمود که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که اتصال اول دارای کم‌ترین ظرفیت دوران و بیشترین مقاومت است. اتصال دوم و سوم رفتار مشابهی داشته است.

شکل ۱۵. مقایسه منحنی رفتار نمونه‌های دارای خرابی در هر دو جوش

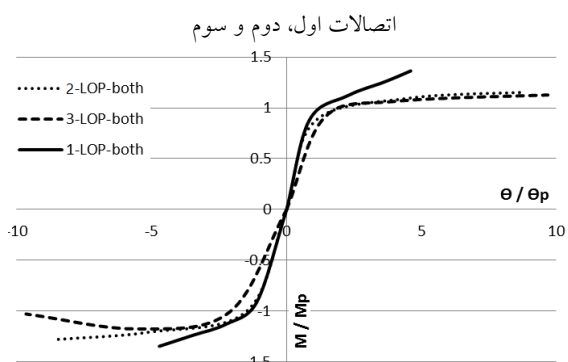


Fig. 15. Comparison of backbone curves of three specimens with LOP defect in the weld of both top and bottom plates

باتوجه به شکل‌های (۱۱، ۱۳ و ۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که شکل‌پذیری نمونه‌های دارای عدم نفوذ در جوش تحتانی بیشتر از نمونه‌های دارای این نقص در جوش فوقانی است که دلیل آن را می‌توان بعد بزرگ‌تر جوش فوقانی و قابلیت تحمل بیشتر نیرو توسط این جوش بعد از گسیختگی جوش تحتانی دانست. با مقایسه شکل (۱۱ و ۱۵) مشاهده می‌شود که اتصال دارای دو نقص جوش، مقاومت بیشتری نسبت به اتصال دارای یک نقص در جوش فوقانی دارد. این امر در خصوص اتصال شماره ۱ روشنتر است. با بررسی انجام شده در رفتار اتصالات در مدل اجرا محدود و منحنی‌های چرخه‌ای شکل (۱۴) مشخص شد که کمی از تغییر مکان ایجاد شده در مدل صرف باز و بسته کردن درز ترک شده و نمونه بعد از بسته شدن درز اتصال دوباره شروع به مقاومت نموده است این فرآیند در پرش‌های موجود در نمودار چرخه‌ای شکل (۱۴) قابل مشاهده است.

همان‌گونه که در نمودار چرخه‌ای مشخص است، در حالی که

رفتار اتصال دارای خرابی در جوش تحتانی مانند حالت دارای خرابی در جوش فوقانی است با این تفاوت که پرش‌ها در نمودار چرخه‌ای این نمونه در نقطه مقابل آن اتفاق افتاده است. در این نمونه به علت بیشتر بودن بعد جوش فوقانی بعد از بازشدن ترک جوش تحتانی بیشتر مقاومت می‌کند. در شکل (۱۳) نمودار رفتاری اتصالات دارای خرابی در جوش تحتانی مقایسه شده است. بر اساس این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که این اتصالات دارای رفتاری مشابه است.

شکل ۱۳. مقایسه منحنی رفتار نمونه‌های دارای خرابی در جوش تحتانی

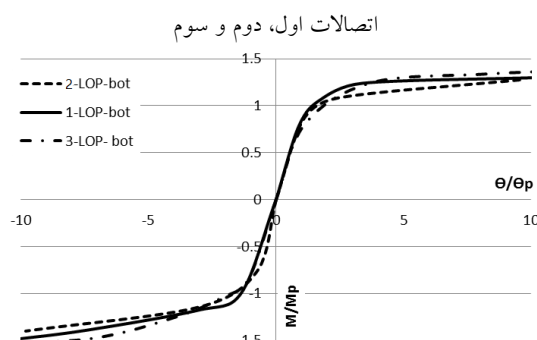


Fig. 13. Comparison of backbone curves of three specimens with LOP defect in the weld of bottom plate

۴-۴- اتصال دارای عدم نفوذ در هر دو جوش

نمودار چرخه‌ای نیرو-جابجایی مربوط به نمونه دارای نقص عدم نفوذ در هر دو جوش اتصال اول در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

شکل ۱۴. منحنی چرخه‌ای نیرو-جابجایی نمونه دارای نقص عدم نفوذ

در هر دو جوش اتصال اول

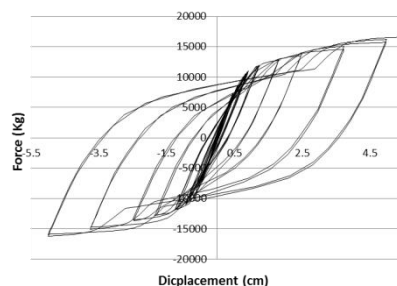


Fig. 14. Hysteresis loop of specimen 1 with LOP defect in the weld of both top and bottom plates

درحالت وجود خرابی دوطرفه به علت کم بودن بعد جوش تحتانی ترک در این جوش سریع‌تر شروع به گسترش می‌نماید

نقص عدم نفوذ بطور کلی موجب کاهش مقاومت خمشی و ظرفیت دورانی اتصالات می‌شود. بر این اساس می‌توان نمودار کاهش ظرفیت اتصالات را بصورت ساده شده دو خطی مطابق شکل (۲۰) نمایش داد که در آن کاهش مقاومت و دوران در نقطه جاری شدن و نهایی بوجود آمده است.

در کارهای عملی، لازم است که اثر وجود خطای ساخت در رفتار اتصالات در نظر گرفته شود. در این صورت، می‌توان منحنی رفتاری اتصالات سالم را تصحیح نموده و اقدام به تحلیل غیر خطی سازه نمود. بدین منظور، می‌توان ضریبی خطی را برای اصلاح کاهش ظرفیت و شکل پذیری لنگر ارائه داد. براین اساس، روابط اصلاح لنگر برای حالت جاری شدن و نهایی را می‌توان مطابق روابط (۱ و ۲) ارائه داد. همچنین رابطه اصلاح دوران جاری شدن و نهایی اتصالات را می‌توان مطابق روابط (۳ و ۴) ارائه کرد.

شکل ۱۷. مقایسه منحنی رفتار نمونه بدون نقص عدم نفوذ با نمونه‌های

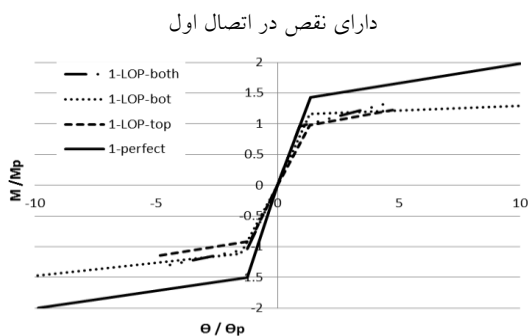


Fig. 17. Comparison of backbone curves of the perfect and LOP defect connection in specimens 1

شکل ۱۸. مقایسه منحنی رفتار نمونه بدون نقص عدم نفوذ با نمونه دارای

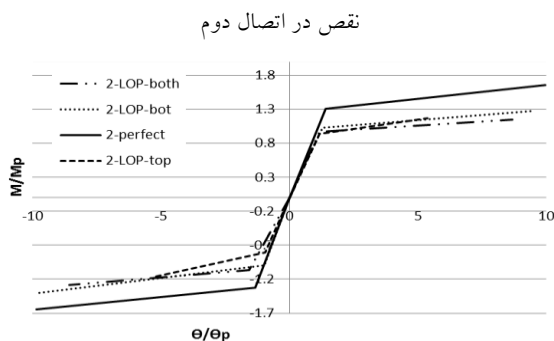


Fig. 18. Comparison of backbone curves of the perfect and LOP defect connection in specimens 2

در قسمت بارگذاری نمودار افزایش مقاومت رخ داده است، در بخش بار برداری، مقاومت به مراتب کمتری رخ می‌دهد. این امر باعث کاهش سطح زیر منحنی چرخه‌ای و انرژی تلف شده می‌شود. به منظور بیان بهتر این موضوع، نمودار کاهش نسبی سطح زیر منحنی چرخه‌ای اتصالات در شکل (۱۶) ارائه شده است. در این نمودار، اتصال بدون نقص با فرض سطح کامل در نظر گرفته شده و سطح زیر منحنی بقیه حالات به نسبت آن محاسبه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان انرژی تلف شده در خرابی هر دو جوش از بقیه حالات که دارای تک خرابی است کمتر است. به عبارت دیگر، رفتار چرخه‌ای اتصالات با خرابی مختلف مشابه نبوده و در هر حالت خرابی، رفتار مناسب آن حالت باید در مدلسازی در نظر گرفته شود.

شکل ۱۶. نمودار کاهش نسبی سطح زیر منحنی چرخه‌ای اتصالات نسبت به اتصال بدون نقص.

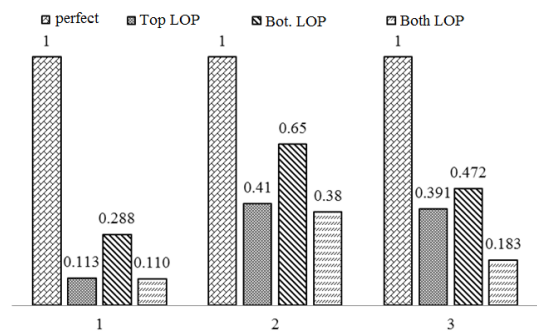


Fig. 16. The relative decrease of the area under the hysteresis loop of the specimen with LOP from the perfect connection

۵- اصلاح منحنی رفتاری اتصالات

مقایسه نمودار رفتاری دو خطی شده اتصالات سالم و دارای نقص عدم نفوذ در شکل‌های (۱۷ تا ۱۹) به ترتیب برای اتصالات اول تا سوم نشان داده شده است. چگونگی دو خطی نمودن نمودار بر اساس روش کلی ارائه شده در FEMA 440 مورد دو خطی کردن نمودار انجام شده است که در آن، منحنی دوخطی به گونه‌ای بدست می‌آید که ابتدا و انتهای منحنی روی دیاگرام هماهنگ بوده و مساحت زیر منحنی و بالای منحنی یکسان باشد و مقدار M_y به گونه‌ای انتخاب شده که منحنی را در $0.6 M_y$ قطع کند. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که

اتصال است پس می‌توان ضریب اصلاح رفتار را برای تمامی اتصالات با توجه نوع خرابی بر اساس میانگین آنها تعمیم داد که مقادیر در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول، ابتدا مقادیر ضریب اصلاح رفتار برای اتصالات با توجه به محل خرابی که می‌تواند در ورق فوقانی، تحتانی و یا هر دو باشد، ارائه شده است. این اعداد زمانی قابل استفاده هستند که بتوان محل احتمالی خرابی در اتصال را با توجه به نوع اجرا و خطاهای محتمل تعیین نمود. در زمانی که محل آسیب‌های احتمالی مشخص نباشد، می‌توان از متوسط ضرایب اصلاح که در ستون آخر جدول (۴) ارائه شده است استفاده نمود.

از مقادیر ضرایب متوسط در جدول (۴) می‌توان نتیجه گرفت که وجود نقص عدم نفوذ در نمونه‌های بررسی شده باعث کاهش ۳۰ درصدی در ظرفیت لنگر (جاری شدگی و نهایی) و کاهش ۲۰ درصدی دوران (جاری شدگی و نهایی) اتصالات می‌شود. به علاوه، با توجه به نزدیکی مقادیر در انواع اتصالات، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اندازه تیر در این مقادیر نقش کمی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی تاثیر وجود نقص عدم نفوذ و اصلاح رفتار اتصالات بر اساس نقص مورد نظر در آنها است. به این منظور سه نمونه اتصال با ابعاد مختلف طراحی و در نرم‌افزار اجزای محدود با حالات بدون نقص، دارای عدم نفوذ در جوش فوقانی، تحتانی و هردو جوش مدلسازی شده‌اند. مقاطع مختلف به منظور بررسی تاثیر ابعاد و هندسه در رفتار اتصال در نظر گرفته شد که نهایتاً مشاهده شده است که نت ابعاد مختلف تاثیری بر نتایج ندارد. در جوش دارای عدم نفوذ، ایجاد و گسترش ترک با استفاده از روش اجزاء محدود گسترش یافته مدل سازی شده است. مشاهده شد که در اتصالات دارای عدم نفوذ، کاهش در مقاومت و دوران اتصالات بوجود می‌آید. از رفتار اتصالات دارای نقص می‌توان نتیجه گرفت که وجود نقص در جوش فوقانی دارای بیشترین اثر بر کاهش میزان ظرفیت و چرخش ایجاد کرده است. پس به نظر می‌رسد که در هنگام ساخت اتصال باید جوش فوقانی با دقت بیشتری اجرا شود.

شکل ۱۹. مقایسه منحنی رفتار نمونه بدون نقص عدم نفوذ با نمونه

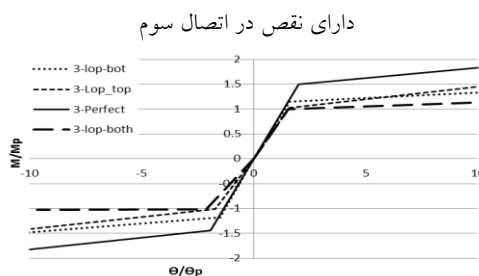


Fig. 19. Comparison of backbone curves of the perfect and LOP defect connection in specimens 3.

شکل ۲۰. مقادیر لنگر و دوران جاری شدگی و نهایی در نمونه‌های ایده‌آل و دارای نقص

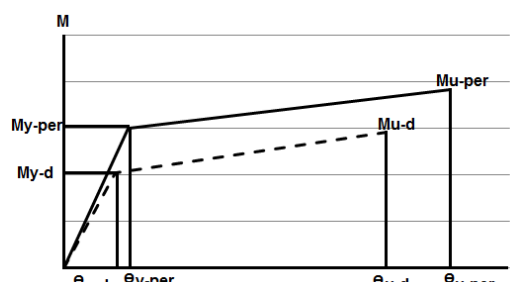


Fig. 20. Schematic diagram of moment-rotation of the original and LOP defected connections.

$$M_{yd} = \alpha_1 M_{yper} \quad \text{رابطه ۱-}$$

$$M_{ud} = \alpha_2 M_{uper} \quad \text{رابطه ۲-}$$

$$\theta_{yd} = \beta_1 \theta_{yper} \quad \text{رابطه ۳-}$$

$$\theta_{ud} = \beta_2 \theta_{uper} \quad \text{رابطه ۴-}$$

در این روابط M_{ud} ، M_{yd} به ترتیب لنگر جاری شدن و نهایی، θ_{ud} و θ_{yd} به ترتیب دوران جاری شدن و نهایی در نمونه دارای نقص عدم نفوذ، M_{uper} ، M_{yper} به ترتیب لنگر جاری شدن و نهایی، θ_{uper} و θ_{yper} به ترتیب دوران جاری شدن و نهایی در نمونه سالم است. ضرایب α_1 ، α_2 ، β_1 و β_2 به ترتیب برای اصلاح لنگر جاری شدن و نهایی و دوران جاری شدن و نهایی استفاده می‌شوند.

ضرایب α_1 ، α_2 ، β_1 و β_2 را می‌توان برای هر اتصال و حالت خرابی بر اساس مقایسه نمودارهای اتصال آسیب دیده و سالم محاسبه نمود که در جدول (۳) ارائه شده است. این مقادیر را می‌توان برای اصلاح رفتار چرخه‌ای اتصالات دارای نقص استفاده کرد.

با مقایسه مقادیر جدول مشاهده می‌شود که مقادیر بدست آمده برای هر نوع خرابی نزدیک به هم بوده و مستقل از نوع

می‌توان گفت ضرایب اصلاح رفتار برای حالت بارگذاری بوده و معرفی رفتار چرخه‌ای در تحلیل دینامیکی در حالت باربرداری نیاز به معرفی روند بازگشت رفتار دارد. نتایج حاصل از این مطالعه با توجه به بررسی تحلیلی تعداد محدودی از اتصالات بدست آمده است و به منظور تدقیق نتایج، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بیشتری لازم است.

در این مقاله، ضرایب اصلاح رفتاری اتصالات دارای نقص برای حالت های مختلف ارائه شده است که می‌تواند در هنگام مدلسازی سازه‌های فولادی با اتصالات دارای نقص مورد استفاده قرار بگیرد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که وجود نقص عدم نفوذ موجب کاهش ۳۰ درصدی لنگر(جاری شدگی و نهایی) و ۲۰ درصدی دوران (جاری شدگی و نهایی) اتصال می‌شود. با توجه به نمودارهای چرخه‌ای اتصالات بررسی شده

جدول ۳. ضرایب اصلاح رفتاری نمونه‌های معیوب

| Defect location in specimen3 | | | Defect location in specimen 2 | | | Defect location in specimen1 | | | Correction factor |
|------------------------------|-----------|----------|-------------------------------|-----------|----------|------------------------------|-----------|----------|-------------------|
| Both top and bot weld | Bot. weld | Top weld | Both top and bot weld | Bot. weld | Top weld | Both top and bot weld | Bot. weld | Top weld | |
| 0.56 | 0.79 | 0.692 | 0.777 | 0.77 | 0.66 | 0.68 | 0.777 | 0.643 | α_1 |
| 0.688 | 0.756 | 0.744 | 0.736 | 0.81 | 0.703 | 0.671 | 0.702 | 0.596 | α_2 |
| 0.938 | 0.79 | 0.844 | 0.828 | 0.822 | 0.785 | 0.828 | 0.987 | 0.971 | β_1 |
| 0.759 | 0.971 | 0.823 | 0.863 | 0.968 | 0.532 | 0.469 | 1 | 0.485 | β_2 |

Table 3. Correction factor for behavior of connections with LOP defect.

جدول ۴. متوسط ضرایب اصلاح رفتار اتصال دارای عدم نفوذ

| Average correction factor | Weld defect location | | | Correction factor |
|---------------------------|----------------------|-----------|-----------------------|-------------------|
| | Top weld | Bot. weld | Both top and bot weld | |
| 0.7 | 0.672 | 0.779 | 0.665 | α_1 |
| 0.71 | 0.689 | 0.756 | 0.681 | α_2 |
| 0.86 | 0.864 | 0.866 | 0.867 | β_1 |
| 0.76 | 0.71 | 0.979 | 0.614 | β_2 |

Table 4. Average correction factor for behavior of connections with LOP defect.

Engineering.

5- Bhatti, M.A. and J.D. Hingtgen, 1995, Effects of connection stiffness and plasticity on the service load behavior of unbraced steel frames. Engineering Journal, 32(1)

6- El-Tawil, S., T. Mikesell, and S.K. Kunnath, 2000, Effect of local details and yield ratio on behavior of FR steel connections. Journal of Structural Engineering, 126(1): p. 79-87.

7- Lee, C.-H. and J.-H. Kim, 2004, Seismic Design of Reduced Beam Section (RBS) Steel Moment Connections with Bolted Web Attachment. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 8(3): p.

References

۷- مراجع

1- R. Trovblary, P.T., M. Braneau, A. Filiatralt, performance of steel structures during the 1994, Northridge earthquake.

2- Nagao, T., 2004, Performance of beam – column connections in steel structures, in 13th world conference on earthquake engineering.

3-Code 264, 2006, Connections in steel structures. (In persain)

4- Engelhardt, M.D. and A. Husain, 1992, Cyclic tests on large scale steel moment connections. in Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake

- 12- SAC. Interim Guidelines Advisory No. 1. Supplement to FEMA -267 Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Welded Steel Moment Frame Structures. SAC Joint Venture. Vol. Report No. SAC-96-03, Sacramento, CA. 1997.
- 13-dariyan,A.S, 2011, Abaqus User's Manual, Tehran City. (In persaion).
- 14- Abaqus/CAE User's Manual.
- 15- Dolbow, J. and T. Belytschko, 1999, A finite element method for crack growth without remeshing. Int. J. Numer. Meth. Eng, 46(1): p. 131-150.
- 16- Al Laham, S., S.I. Branch, and R. Ainsworth, 1998, Stress intensity factor and limit load handbook. British Energy Generation Limited.
- 17- FEMA A. 440, 2005, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Redwood City.
- 87-96.
- 8- Mashaly E, El-Heweity M, Abou-Elfath H, Osman M. 2011, Finite element analysis of beam-to-column joints in steel frames under cyclic loading. Alexandria Engineering Journal;50(1):91-104.
- 9- Azuma, K., Y. Kurobane, and Y. Makino, 2000, Cyclic testing of beam-to-column connections with weld defects and assessment of safety of numerically modeled connections from brittle fracture. Engineering Structures. 22(12): p. 1596-1608.
- 10- Hanji, T., K. Saiprasertkit, and C. Miki, 2011, Low- and high-cycle fatigue behavior of load-carrying cruciform joints with incomplete penetration and strength under-match. International Journal of Steel Structures, 11(4): p. 409-425.
- 11- H.R. Amiri , A. Aghakouchak., S. Shahbeyk , M.D. Engelhardt, 2013, Finite element simulation of ultra low cycle fatigue cracking in steel structures. Constructional Steel Research. 89.

Modification of seismic behavior of steel moment resisting connection with top and bottom plate with lack of penetration in the welds by analytical method

Hamed mohammadloo ¹, kiarash naserasadi ^{*2}

1- M.Sc. Student of Structure Engineering, University of Zanjan.

2- Assistant Professor, School Civil Engineering, University of Zanjan.

naserasadi@znu.ac.ir

Abstract:

The experience of Northridge and Kobe earthquakes have demonstrated the poor behavior of welded beam-column connections due to deficiency of welds. The proper method for welding has been proposed after numerous studies. The appropriate procedure and detailing usually do not follow in the practice due to the inadequate supervision. Therefore deficiency in the connection of real steel structures is expected. One of the most common moment resisting connections is top and bottom plates which is the subject of this study. Among the possible deficiency in the welds, lack of penetration (LOP) and the lack of fusion (LOF) are two primary deficiencies in these connections. In this study, the cyclic behavior of three steel moment-resistant connections with LOP deficiency in the weld has been studied by the analytical method. The defect was considered on the top, bottom and both top and bottom plates and results are compared with the original connection. The connections are selected from three different sizes (small, medium and large) to evaluate the effect of size on the results. The initiation and growing of cracks in the connections are modeled by the extended finite element technique (XFEM). In the beginning, to examine the efficiency and accuracy of modeling, an experimental study was used for verification of FEM model. The hysteretic behavior of specimens was studied under the typical loading protocol of SAC. Based on that, the constitutional relationship and the backbone curve of each connection were obtained. The effect of each deficiency on the results was compared with each other and the original connection.

Results show that in LOP, the crack is formed and grow in the welds which ultimately lead to rupture in the welds. In general, the deficiency in connections reduces energy absorption, moment and ductility capacity. The result of different beams size is very close which suggest that the size of the beam does not affect the reduction of the moment and ductility capacity. Reduction coefficient is introduced to obtain the reduced value of yield and ultimate moment and rotation. In general, it can be concluded that LOP cause 30% reduction in the yielding and ultimate moment capacity of connections and 20% reduction in the yielding and ultimate rotation of the connection. Also, the area under the hysteresis curve is calculated and compared to study the effect of different deficiencies on the reduction of absorbed energy. The results indicated that the connection with LOP in both plates has the highest reduction in the observed energy which follows by the LOP in the top and the bottom plate. This results in addition to the value of the decrease in capacity and ductility of connections indicated that LOP in the top plate causes the connection to fail in shorter cycles compare to other cases. Therefore, it is better to pay particular attention to prevent the LOP in the top plate. Since this plate is welded in the workshop and during the erection of the structure, the strict non-destructive test should be conducted on the weld of the top plate.

Keywords: moment resistant connections, top and bottom plates, groove weld, crack, Lack of penetration, hysteresis curves.