



مطالعه تحلیلی تأثیر چشمه اتصال بر عملکرد لرزه ای اتصال صلب تقویت شده با لچکی

*فرزانه قلمزن اصفهانی^۱، نادر فنائی^۲

چکیده

یکی از انواع اتصال صلب در قاب های خمشی، اتصالاتی هستند که با استفاده از ورق های پوششی و ورق های لچکی اجراء می شوند. این مقاله تأثیر مقاومت چشمه اتصال و همچنین وجود ورق های پیوستگی را بر عملکرد لرزه ای این نوع اتصال با استفاده از آنالیز المان محدود در نرم افزار آباکوس مطالعه می کند. منحنی هیستریزس اتصال و چشمه اتصال برای حالت های مختلف چشمه اتصال ارائه شده و محل تشکیل مفصل پلاستیک با توجه به کرنش پلاستیک معادل اتصال به دست آمده است. مشاهده شد که در صورت وجود ورق های پیوستگی، انرژی جذب شده توسط اتصال به مقدار زیادی افزایش می یابد در حالی که چرخش چشمه اتصال به شدت کاهش می یابد. در صورت نبود ورق های پیوستگی، دوران پلاستیک در چشمه اتصال ایجاد شده و با توجه به کانتور کرنش پلاستیک معادل، در جان ستون در محل اتصال بال تیر و ورق های لچکی داخلی به ستون کرنش های پلاستیک در چشمه اتصال ایجاد شده است.

واژگان کلیدی:

قاب خمشی، اتصال تیر به ستون، ورق های لچکی، منحنی هیستریزس، چرخش چشمه اتصال

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، (f.ghalamzan@gmail.com)

^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، (fanaie@kntu.ac.ir)

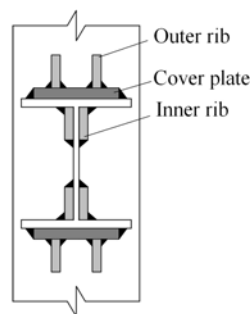


پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



مقدمه

زلزله نورث ریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵ باعث خرابی های گسترده ای در اتصالات قاب های خمشی فولادی گردید. به دنبال خرابی های غیر منتظره در اتصالات، تحقیقات قابل توجهی انجام شد و راه های متنوعی پیشنهاد گردید. تمامی اصلاحات و جزئیاتی که برای اتصالات خمشی مطرح شد، هدفشان برداشتن بیشترین ظرفیت پلاستیک شدن و یا تقاضای شکل پذیری از انتهای تیر یا ناحیه اتصال و انتقال تقاضای شکل پذیری به ناحیه ای در تیر و دور از ستون می باشد. رایج ترین راه حل های پیشنهاد شده شامل تقویت اتصال یا ضعیف کردن تیر می باشد (Lee et al, 2003; Chen et al, 1996). روند طراحی اتصالات تیر به ستون بر اساس ظرفیت تیر می باشد و اندازه المان های اتصال با توجه به ظرفیت تیر به دست می آیند. همچنین روند طراحی المان های اتصال بر اساس تئوری اوپلر برنولی می باشد که در آن فرض می شود لنگر توسط بال ها و برش توسط جان تیر منتقل می شود. البته تحقیقات انجام شده نشان داده است که فرضیات طراحی بالا واقع بینانه نیست (Lee et al, 1998; 2000). در واقع توزیع تنش، نزدیک منطقه اتصال در تئوری ساده شده تیر خمشی برای طراحی المان های اتصال به درستی بازتاب داده نمی شود. تحقیقات نشان داده است که در نزدیکی منطقه اتصال، برش تیر به سمت بال های تیر منحرف می شود که باعث تمرکز تنش در نقطه اتصال بال های تیر به بال ستون می شود. (Goel et al, 1996). با توجه به تمرکز تنش نزدیک بال ها، یک نمونه اتصال تقویت شده توسط ورق های پوششی و لچکی پیشنهاد گردیده است (شکل ۱) که در آن تمام المان های اتصال نزدیک بال های تیر قرار داده شده اند (Goel et al, 2000; Arlekar and Murty, 2004).



شکل ۱: اتصال تقویت شده با ورق های پوششی و ورق های لچکی درونی و بیرونی (Arlekar and Murty, 2004)

در این مقاله یک نمونه اتصال تقویت شده با ورق های پوششی و لچکی در نرم افزار ABAQUS (Hibbit et al., 2011) مدل سازی شده و تحت الگوی بارگذاری چرخه ای پیشنهاد شده در آیین نامه AISC (Seismic provision, 2010) قرار گرفته است. تأثیر وجود ورق های پیوستگی و ورق های مضاعف در رفتار لرزه ای اتصال و رفتار چشمه اتصال بررسی شده است. همچنین محل حداکثر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) برای چشمه های اتصال مختلف به دست آمده است.



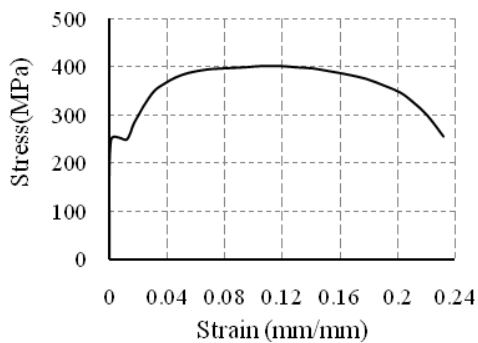
مطالعه تحلیلی اتصال

خصوصیات کلی

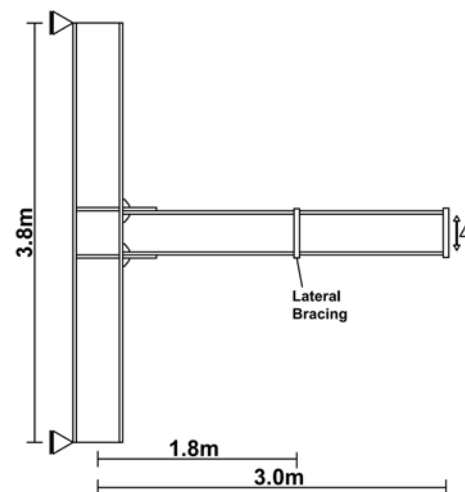
به منظور به دست آوردن منحنی های لنگر- دوران و محل بحرانی کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، مطالعه اجزاء محدود اتصال تقویت شده با ورق های پوششی و لچکی انجام شده است. در هر زیر سازه از مقطع $W12 \times 58$ برای تیر و از مقطع $W18 \times 114$ برای ستون استفاده شده است. خصوصیات این مقاطع در جدول ۱ نشان داده شده است. تکیه گاه ستون در دو انتهای آن به صورت مفصل می باشد. بال های تیر در فاصله $1.8m$ از محور مرکزی ستون به صورت جانبی مهار شده اند. این فاصله روابط آیین نامه AISC (Seismic provision, 2010) را ارضا می کند. هندسه و شرایط تکیه گاهی اتصال های مدل شده در نرم افزار در شکل ۲-الف نشان داده شده است. برای مقاطع فولادی به کار رفته در این تحقیق از فولاد ASTM A36 با منحنی تنش- کرنش نشان داده شده در شکل ۲-ب استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات تیر و ستون

مقطع	h (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
ستون ($W18 \times 114$)	469	301	25	15
تیر ($W12 \times 58$)	310	254	16	9



(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) هندسه و شرایط تکیه گاهی ب) منحنی تنش کرنش فولاد ASTM A36

المان های اتصال

به منظور طراحی المان های اتصال از روش طراحی بر اساس ظرفیت تیر استفاده شده است. در این روش حداکثر لنگر محتمل از رابطه (۱) به دست می آید:

$$M_{pr} = C_{pr} R_y M_p \quad (1)$$



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



در این رابطه $C_{pr} = (F_y + F_u) / 2F_y$ ، R_y فاکتور اضافه مقاومت و $M_p = F_y Z_b$ می باشد. طول ورق پوششی، l_c ، برابر نصف عمق تیر ($d_b / 2$) در نظر گرفته می شود. طول L_0 ، با فرض اینکه مفصل پلاستیک در انتهای تیر در فاصله نصف ارتفاع تیر از انتهای منطقه اتصال تقویت شده تشکیل شود با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید که در آن L فاصله بین مرکز ستون ها در دو انتهای تیر است و d_0 ارتفاع کل ستون می باشد. برای به دست آوردن ماکزیمم نیروی برشی محتمل روی اتصال، V_{pr} ، از رابطه (۳) استفاده می شود. اندازه ورق های پوششی و لچکی در جدول ۲ مشخص شده است (فنائی و قلمزن، ۱۳۹۲).

$$L_0 = L - \left(\frac{d_c}{2} + l_c + \frac{d_b}{2} + \frac{d_b}{2} + l_c + \frac{d_c}{2} \right) \quad (2)$$

$$V_{pr} = 2M_{pr} / L_0 \quad (3)$$

جدول ۲: مشخصات المان های اتصال

	l(mm)	b (mm)	t (mm)
ورق های پوششی	155	190	30
ورق های لچکی	25	40	16

روند بارگذاری

نمونه های اتصال مدل شده تحت پروتکل بارگذاری چرخه ای آیین نامه AISC (Seismic provision, 2010) مطابق جدول ۳ قرار گرفته اند. این بارگذاری به صورت تغییر مکان در انتهای تیر اعمال شده است. چرخش کلی تیر از تقسیم تغییر مکان نوک تیر به طول تیر به دست می آید. در تمام نمونه های اتصال، بارگذاری تا زاویه تغییر مکان نسبی ۰/۰۶ رادیان ادامه یافته است.

جدول ۳: پروتکل بارگذاری آیین نامه AISC

تعداد سیکل های بارگذاری	زاویه تغییر مکان نسبی طبقه (رادیان)
6	۰/00375
6	۰/005
6	۰/0075
4	۰/01
2	۰/015
2	۰/02
2	۰/03
2	۰/04
2	۰/05
2	۰/06



تغییر چشمه اتصال

به منظور بررسی تأثیر ضخامت چشمه اتصال، جان ستون با ورق های مضاعف به ضخامت ۸ و ۱۵ میلیمتر تقویت شده است. همچنین برای بررسی تأثیر وجود ورق های پیوستگی در چشمه اتصال، به نمونه ها ورق های پیوستگی به ضخامت ورق های پوششی اضافه شده است. نمونه ها به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شده اند.

جدول ۴: اتصالات با چشمه اتصال مختلف

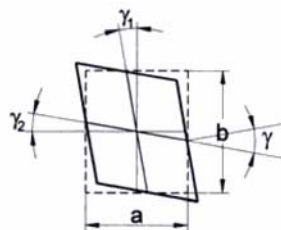
مدل ها	ضخامت ورق پیوستگی (mm)	ضخامت ورق های مضاعف (mm)
RIBTD0	0	0
RIBTD0C	30	0
RIBTD8	0	8
RIBTD8C	30	8
RIBTD15	0	15
RIBTD15C	30	15

نتایج آنالیز اجزاء محدود

به منظور صحت سنجی مدل های اجزاء محدود، یک نمونه اتصال مدل شده در تحقیق دکتر آرلکار و مورتی (Arlekar and Murty, 2004) تحت بارگذاری یکنواخت در نرم افزار ABAQUS قرار گرفته است. نتایج به خوبی با نتایج ارائه شده در تحقیق دکتر آرلکار و مورتی منطبق شده است (فنائی و قلمزن، ۱۳۹۲).

نیروهای برشی در چشمه اتصال در زاویه بین محور ستون و محور تیر متصل شده تغییری ایجاد می کند (شکل ۳). چرخش چشمه اتصال (γ) دو مؤلفه دارد (γ_1 و γ_2). به علت این که تخمین زدن جداگانه این دو مؤلفه مشکل می باشد به صورت ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma/2$) در نظر گرفته می شوند (Dubina et al., 2000; Deylami and Moslehi Tabar, 2004). زاویه چرخش چشمه اتصال (γ) از تغییر مکان های به دست آمده در چهار نقطه چشمه اتصال با استفاده از رابطه ۴ تعیین می شود:

$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2} (\delta_1 - \delta_2)}{2.ab} \quad (4)$$



شکل ۳: زاویه چرخش چشمه اتصال

که در این رابطه δ_1 و δ_2 تغییر طول چشمه اتصال به صورت قطری و a و b طول و عرض چشمه اتصال می باشند.

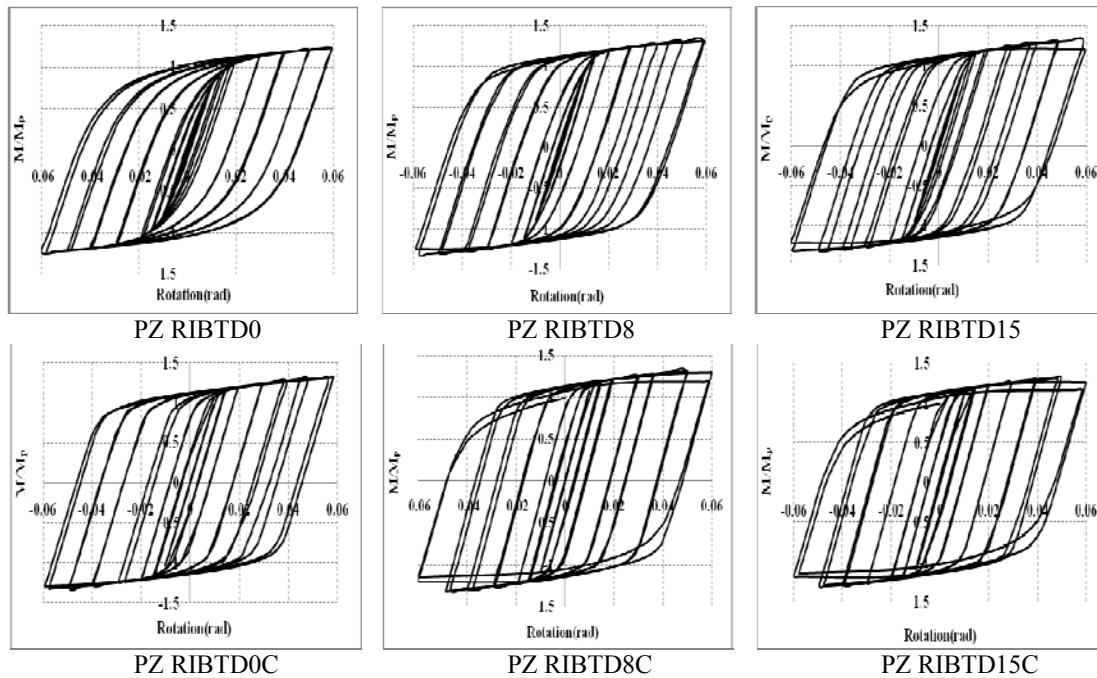
رفتار نمونه های اتصال



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



منحنی هیستریزس اتصالات با چشمه های اتصال مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. در این منحنی ها محور قائم لنگر قابل تحمل اتصال می باشد که نسبت به لنگر پلاستیک تیر نرمال شده است و محور افقی چرخش تیر را نشان می دهد که از تقسیم تغییر مکان نوک تیر به طول تیر به دست آمده است.



شکل ۴: منحنی هیستریزس نمونه ها با چشمه های اتصال مختلف

با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود این نوع اتصال زاویه تغییر مکان نسبی طبقه ۶٪ را براساس الگوی بارگذاری آیین نامه AISC (Seismic provision, 2010) بدون افت مقاومت قابل توجه تحمل کرده است. با تقویت چشمه اتصال مشاهده می شود لنگر قابل تحمل اتصال در طول بارگذاری افزایش یافته است. همچنین با توجه به جدول ۵، که در ستون سوم و چهارم آن درصد انرژی تلف شده و درصد چرخش چشمه اتصال نسبت به نمونه اتصال بدون ورق های پیوستگی و مضاعف ارائه شده است، مشاهده می شود با اضافه کردن ورق های پیوستگی و مضاعف به چشمه اتصال، انرژی تلف شده توسط اتصال به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یافته است به طوری که برای نمونه اتصال RIBTD15C نسبت به نمونه RIBTD0، انرژی تلف شده تقریباً دو برابر شده است. از طرف دیگر با تقویت چشمه اتصال، حداکثر چرخش چشمه اتصال به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد به طوری که با توجه به جدول ۵ مشاهده می شود برای نمونه اتصال RIBTD15C نسبت به نمونه RIBTD0، این مولفه ۹۰٪ کاهش یافته است.

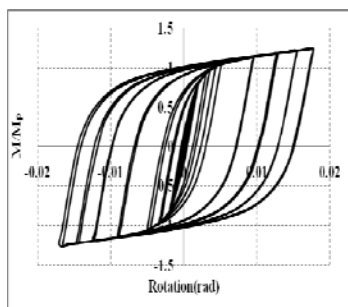
جدول ۵: انرژی کل، چرخش چشمه اتصال نمونه ها



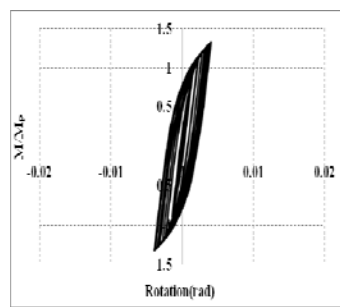
پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



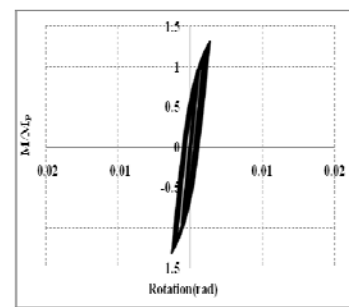
مدل ها	انرژی (kJ)	چرخش چشمه اتصال ($\times 10^{-3}$ rad)	درصد انرژی تلف شده	درصد چرخش چشمه اتصال
RIB TD0	51202	17/7102	•	•
RIB TD0C	61298	8/6518	19/72	-51/15
RIB TD8	63163	4/0892	23/36	-76/91
RIB TD8C	86152	1/4713	68/26	-91/69
RIB TD15	72167	2/7324	40/95	-84/57
RIB TD15C	93047	1/2497	81/73	-92/94



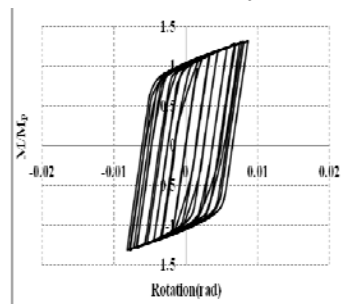
PZ RIBTD0



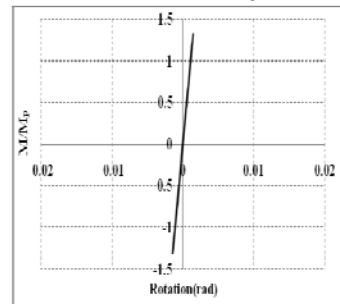
PZ RIBTD8



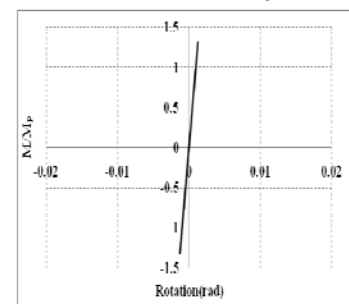
PZ RIBTD15



PZ RIBTD0C



PZ RIBTD8C



PZ RIBTD15C

شکل ۵: منحنی هیستریزس چشمه اتصال نمونه ها

منحنی هیستریزس چشمه اتصال

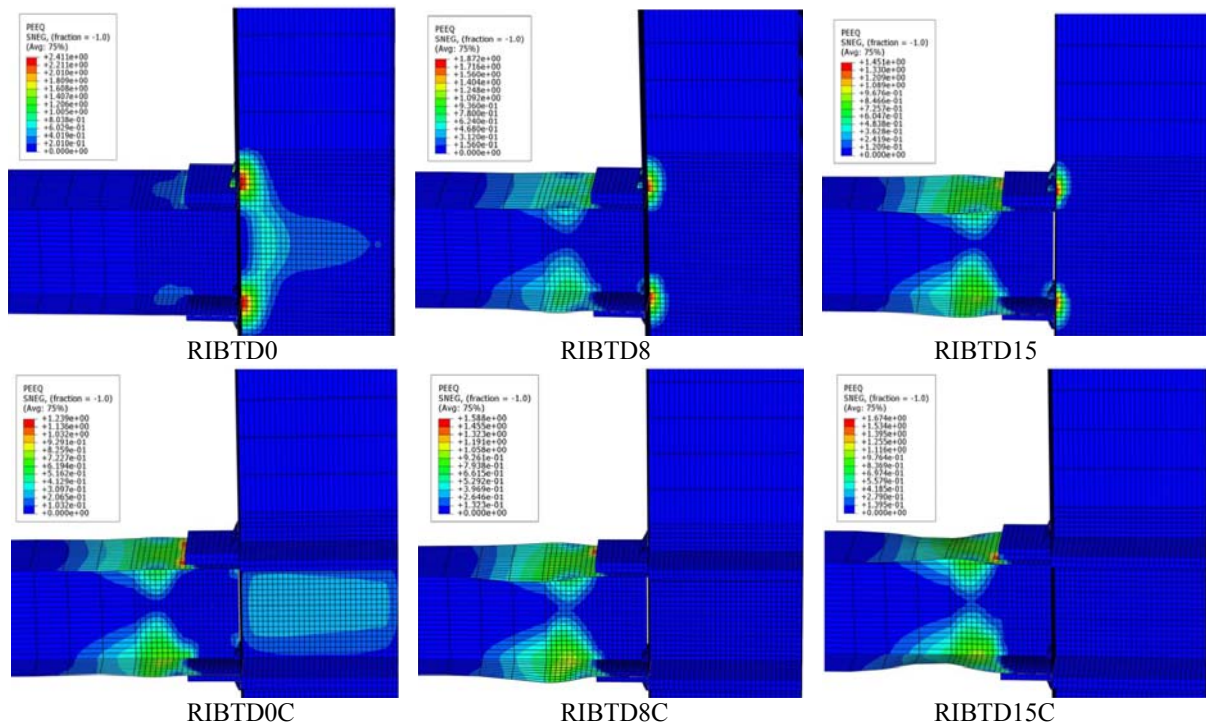
به منظور به دست آوردن منحنی هیستریزس چشمه اتصال که در شکل ۵ نشان داده شده است، محور افقی چرخش چشمه اتصال است که با توجه به رابطه ۴ از تغییر مکان های چشمه اتصال به دست آمده است و محور قائم لنگر تیر است که نسبت به لنگر پلاستیک نرمال شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش سختی چشمه اتصال و اضافه کردن ورق های پیوستگی، این منحنی به منحنی خطی نزدیکتر شده است. هنگامی که این منحنی خطی باشد یعنی چشمه اتصال در حالت الاستیک باقی مانده است و انرژی تلف شده توسط چشمه اتصال به علت پلاستیک شدن کاهش می یابد. با توجه به منحنی هیستریزس چشمه اتصال، هنگامی که ورق های پیوستگی استفاده نمی شود، این منحنی ها به صورت بیضی شکل می باشند که نشان دهنده ذخیره بخشی از انرژی در چشمه اتصال می باشد. در واقع در این حالت ها، با توجه به کانتور کرنش پلاستیک معادل که در شکل



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



۶ ارائه شده است در چشمه اتصال، قسمتی که بال تیر و لچکی های داخلی به ستون متصل شده اند کرنش پلاستیک به وجود آمده که باعث می شود منحنی هیستریزیس به دست آمده برای چشمه اتصال از حالت خطی خارج شده و بخشی از کرنش، به علت پلاستیک شدن در آن باقی می ماند.



شکل ۶: کانتور کرنش پلاستیک معادل اتصال با چشمه های اتصال مختلف

محل حداکثر کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)

کانتور کرنش پلاستیک اتصال با چشمه های اتصال مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل در نمونه اتصال RIBTD0، با توجه به نبود ورق های پیوستگی و مضاعف در چشمه اتصال، کرنش زیادی در جان ستون، محلی که تیر و ورق های پوششی به ستون متصل شده اند، ایجاد می شود. در حالیکه بلافاصله بعد از منطقه اتصال، در تیر کرنش های کمتری ایجاد می شود. در واقع نبود ورق های پیوستگی باعث می شود مفصل پلاستیک به جای تیر درون ستون تشکیل شود. اضافه کردن ورق های پیوستگی در نمونه اتصال RIBTD0C باعث کاهش کرنش در جان ستون می شود ولی با این حال در چشمه اتصال کرنش زیادی مشاهده می شود و وسط چشمه اتصال کرنش های پلاستیک دیده می شود. با اضافه کردن ورق های مضاعف به ضخامت برابر نصف ضخامت جان ستون یا برابر ضخامت جان ستون در حالیکه از ورق های پیوستگی استفاده نشده است (نمونه های RIBTD8 و RIBTD15) همچنان کرنش پلاستیک زیادی در جان ستون، محل اتصال بال تیر و ورق های پوششی، ایجاد شده است. در نمونه های اتصال RIBTD8C و RIBTD15C که در آنها از ورق های پیوستگی به همراه ورق های مضاعف استفاده شده است در چشمه اتصال کرنش پلاستیک ایجاد نشده و به صورت الاستیک باقی مانده، در حالیکه بلافاصله بعد از منطقه اتصال بیشترین



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



کرنش پلاستیک اتفاق می افتد و این نمونه ها شرایط آیین نامه AISC را که لازم می دارد مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شود، ارضاء می نماید.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله یک نمونه اتصال تقویت شده با ورق های پوششی و لچکی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل سازی شده است. تأثیر وجود ورق های پیوستگی و مضاعف در چشمه اتصال در رفتار هیستریزس اتصال، منحنی هیستریزس چشمه اتصال، کانتور کرنش پلاستیک معادل بررسی شده و نتایج به صورت زیر به دست آمده است:

۱- با توجه به منحنی هیستریزس به دست آمده برای این نوع اتصال با چشمه های اتصال مختلف مشاهده شد که این اتصال زاویه تغییر مکان نسبی طبقه ۶٪ را بر اساس الگوی بارگذاری آیین نامه AISC بدون افت مقاومت قابل توجه تحمل کرده است.

۲- با توجه به کانتور کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، در تمامی حالت های چشمه اتصال بدون ورق های پیوستگی، حداکثر کرنش پلاستیک در چشمه اتصال ایجاد شده است. در صورت وجود ورق های پیوستگی در چشمه اتصال، رفتار چشمه اتصال به حالت الاستیک نزدیک شده و برای حالت هایی که ورق های مضاعف به همراه ورق های پیوستگی در چشمه اتصال استفاده می شود، کرنش پلاستیک حداکثر در بال تیر به وجود آمده است.

۳- با تقویت چشمه اتصال، مقدار انرژی تلف شده توسط اتصال به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد در حالی که حداکثر چرخش چشمه اتصال به مقدار زیادی کاهش می یابد.

۴- با توجه به منحنی هیستریزس به دست آمده برای چشمه اتصال، مشاهده شد که در صورت وجود ورق های مضاعف در چشمه اتصال بدون ورق های پیوستگی، این منحنی از حالت خطی خارج شده و به حالت بیضی شکل نزدیک می شود که این حالت نشان دهنده آن است که بخشی از انرژی توسط چشمه اتصال اتلاف می شود.

منابع

- ۱- قلمزن اصفهانی، فرزانه، فنائی، نادر، (۱۳۹۲) " بررسی تحلیلی عملکرد لرزه ای یک اتصال صلب جدید قابل اجرا توسط ناودانی"، چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد، ۳۴-۴۱.
- 2- American Institute of Steel Construction (AISC). (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago.
- 3- Arlekar, J. N., & Murty, C. V. R. (2004). Improved Truss Model for Design of Welded Steel Moment-Resisting Frame Connections. Journal of Structural Engineering. 130(3), 498-510.
- 4- Chen, S.J., Yeh, C.H., & Chu J. M. (1996). Ductile Steel Beam to Column Connections for Seismic Resistance. Journal of Structural Engineering, 122(11), 1292-1299.
- 5- Deylami, A., & Moslehi Tabar, A., (2004). Effect of Column Panel Zone Characteristics on Instability of Beams with RBS Moment Resisting Connections. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- 6- Dubina, D., Ciutina, A.L., & Stretan, A. (2000). Influence of Loading Asymmetry on the Cyclic Behavior of Beam-to-Column Joints. Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, Mazzolani & Tremblay (eds), Balkema, Rotterdam.
- 7- Goel, S. C., Stojadinovic, B., & Lee, H. K. (1996). A new look at steel moment connections. Rep. No. UMCEE 96-19, The Univ. of Michigan College of Engineering.



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



- 8- Goel, S.C., Lee, K.H., & Stojadinovic, B. (2000). Design of Welded Steel Moment Connections Using Truss Analogy. Engineering Journal, First Quarter, University of Utah Interlibrary Loan.
- 9- Hibbitt, D., Karlsson, B., Sorensen, P., Inc.(HKS). (2012). ABAQUS: User information manual. revision 6.11.
- 10- Lee, C.H., Jung, J.H., Oh, M.H., & Koo, E.S. (2003). Cyclic Seismic Testing of Steel Moment Connections Reinforced with Welded Straight Haunch. Engineering Structures, 25(14), 1743–1753.
- 11- Lee, K. H., Goel, S. C., & Stojadiovic, B. (1998). Boundary Effects in Welded Steel Moment Connections. Proc., 6th US National Conference on Earthquake Engineering.
- 12- Lee, K.H., Goel, S. C., & Stojadinovic, B. (2000). Boundary Effects in Steel Moment Connections. Paper No. 1098, Proc., 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.