

مطالعه عددی رفتار چرخه‌ای و خرابی مهاربندهای همگرای مرکب جفت نبشی

امین ایزدی^۱، علی اکبر آقاچوک^{۲*}

- ۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد مهندسی سازه دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

a_gha@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۰۷/۱۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۰۲/۰۲]

چکیده

قاب‌های مهاربندی همگرای مرکب جفت نبشی از جمله سامانه‌های متداول فولادی مقاوم در برابر بارهای جانبی است. ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC در مورد مهاربندهای مرکب همگرای ویژه الزام دارد که لاغری اجزای منفرد مهاربند بین اتصال دهنده‌ها از $0/4$ برابر لاغری حاکم بر عضو فراتر نرود. همچنین هر گونه جوشکاری برای اتصال اعضای مهاربند مرکب در محدوده یک چهارم میانی طول آزاد دهانه مهاربندی مجاز شمرده نشده است. در این پژوهش ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه‌های قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه قطری و ضربدری مرکب، با استفاده از زیر سازه‌ای متشکل از یک طبقه و یک دهانه و با اعمال بار چرخه‌ای، به صورت عددی مطالعه شده است. به منظور ارزیابی بهتر لرزه‌ای و شکل پذیری نهایی در نمونه‌های عددی، از مفهوم کرنش خمیری معادل برای پیش‌بینی شکست سامانه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد بست‌ها و یا کاهش فاصله بین آن‌ها در طول عضو مرکب، به دلیل تمرکز تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی اجزای تک در بین بست‌ها نمی‌تواند لزوماً باعث بهبود رفتار سامانه مهاربندی شود. همچنین رعایت ضابطه نسبت لاغری اجزای منفرد مهاربند بین اتصال دهنده‌ها به لاغری حاکم بر عضو در مهاربندهای همگرای ویژه مرکب، محافظه کارانه است. در مجموع در مهاربندهای جفت نبشی، اتصال مقاطع به صورت جلو به جلو از منظر چرخه‌ای و خرابی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به نمونه مشابه در حالت پشت به پشت نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: مهاربند همگرای ویژه مرکب، جفت نبشی، کرنش خمیری معادل، پشت به پشت، جلو به جلو

۱- مقدمه

طبق مطالعات انجام شده روی اعضای فشاری مرکب متشکل از ناودانی‌ها و نبشی‌ها به همراه اتصال دهنده‌های موازی یا مورب، آیین‌نامه‌ها مقرر می‌دارند که لاغری اجزای منفرد تشکیل دهنده‌ی یک عضو فشاری بین دو بست از $0/75$ برابر لاغری کل عضو فشاری فراتر نرود [2]. همچنین مطالعات آزمایشگاهی روی مقاطع جفت ناودانی پشت به پشت و جلو به جلو نشان داده است که حتی در حالت فراتر نرفتن لاغری اجزای منفرد بین دو بست از $0/75$ برابر لاغری کل، کاهش مقاومت فشاری محتمل است [3]. از این رو آیین‌نامه [4] AISC و همچنین مبحث دهم مقررات ملی

از مهمترین ویژگی‌های قاب‌های مهاربندی سختی مناسب و قابل توجه آن‌ها در مقابل بارهای جانبی و زلزله است. اساس طراحی لرزه‌ای بر مبنای ظرفیت در این گونه قاب‌ها این است که تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی فقط در مهاربندها رخ دهد و از ایجاد نیازهای غیر ارتجاعی در ستون‌ها و سایر اجزای قاب جلوگیری به عمل آید. در دهه‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی و عددی روی اعضای فشاری مرکب منجر به ارائه لاغری اصلاح شده برای این اعضا شده است [1] که هم اکنون در آیین‌نامه‌ها به کار می‌رود. بر

و مقطع Box4x4 با ضخامتی برابر با ضخامت نبشی L4x4 برای مهاربند قوطی شکل استفاده شده است. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [5] و ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه [6] AISC بررسی شده برای عضو مهاربند همگرای ویژه جفت نبشی، در زیر خلاصه شده است:

- (۱) مقاطع اعضای مهاربندهای جفت نبشی باید از نوع فشرده لرزه‌ای با شکل پذیری بالا باشند. $(b/t \leq 0.3\sqrt{E/F_y})$
- (۲) بیشینه لاغری در نظر گرفته شده برای اعضای مهاربندی نباید از ۲۰۰ تجاوز کند.
- (۳) بیشینه لاغری در نظر گرفته شده برای اعضای تک مهاربند مرکب در بین دو اتصال دهنده $(L_i/2_i)$ نباید از ۰/۴ برابر لاغری حاکم بر عضو مهاربند مرکب تجاوز کند.
- (۴) اتصال دهنده‌های اعضای مرکب نباید در محدوده $L/4$ میانی مهاربند واقع شوند (L طول آزاد عضو مهاربند قطری).
- (۵) ضوابط مربوط به منطقه محافظت شده در بخش‌های هاشور خورده مهاربندهای ضربردی مطابق شکل (۱) باید رعایت شود. در این مطالعه ضوابط بندهای ۳، ۴ و ۵ در مهاربندهای جفت نبشی قطری و ضربردی بررسی شده است.

شکل ۱. منطقه محافظت شده مهاربندهای مرکب ضربردی

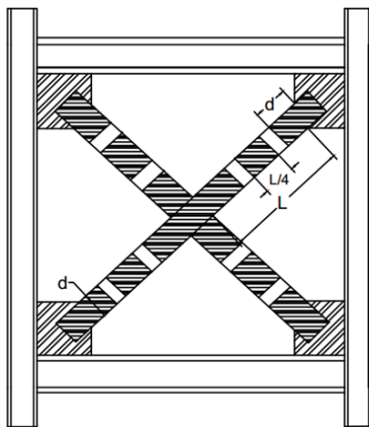


Fig. 1. Protected zones of X-braced models

۳- درستی آزمایشی و مدل سازی عددی

برای مدل‌سازی و درستی آزمایشی به دلیل در دسترس نبودن آزمایش‌های مهاربندهای مرکب جفت نبشی، از یک زیر سازه قاب مهاربندی همگرای ویژه شامل یک دهانه یک طبقه مهاربند قطری از

ساختمان [5]، مقرر می‌دارند چنانچه لاغری در فاصله بین متصل کننده‌ها از عدد ۴۰ بزرگتر باشد لازم است ضریب لاغری عضو فشاری اصلاح شود. ضمناً آیین‌نامه‌های عنوان شده در بخش ضوابط لرزه‌ای، الزام می‌دارند که در سامانه مهاربندهای همگرای ویژه (SCBF) نسبت لاغری اجزای منفرد بین اتصال دهنده‌ها نباید از ۰/۴ برابر لاغری حاکم بر طراحی مهاربند تجاوز کند [5,6].

فواصل بست‌ها در اعضای مرکب از جفت مقاطع، عامل بسیار مهمی در شکل‌پذیری، رفتار چرخه‌ای و کماتش خارج از صفحه مهاربندها به شمار می‌آید، به گونه‌ای که با افزایش فاصله بست‌ها در اعضای مهاربندی امکان وقوع کماتش تک عضو وجود خواهد داشت [7]. مطالعات آزمایشگاهی روی مهاربندهای مرکب جفت نبشی نشان داده است که انرژی مستهلک شده نبشی‌های جلو به جلو نسبت به نبشی‌های پشت به پشت تا دو برابر افزایش نشان می‌دهد [8]. همچنین تجربه شکل‌پذیری بالا در مقاطع مرکب دارای دو جفت نبشی جلو به جلو به همراه بست‌های مورب و با نسبت لاغری و عرض به ضخامت بالا وجود دارد [9]. مطالعات عددی روی نبشی‌های پشت به پشت نیز نشان داده است که با افزایش تعداد لقمه‌های اتصال، انرژی مستهلک شده و جابه‌جایی‌های جانبی وسط دهانه افزایش می‌یابد [10].

با وجود مطالب فوق، مطالعات جامع روی مهاربندهای جفت نبشی محدود بوده و به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در ساختمان‌های فولادی در کشور ضرورت انجام پژوهش در این راستا وجود دارد. در این پژوهش بررسی رفتار چرخه‌ای و خرابی این گونه مهاربندها در دو دسته مهاربندهای همگرای ویژه (SCBF) قطری و ضربردی انجام گرفته است و در هر بخش سعی شده است که ضوابط لرزه‌ای با دقت بررسی شود. برای پیش‌بینی شکست و تحلیل خرابی از معیار شاخص کرنش معادل خمیری استفاده شده است. معیاری که مقدار بحرانی آن از گزارش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی استخراج شده است.

۲- ضوابط لرزه‌ای مهاربندهای جفت نبشی

برای ارزیابی دقیق ضوابط لرزه‌ای و مطالعه عددی مهاربندهای همگرای ویژه (SCBF) جفت نبشی و مقایسه آن با مهاربند قوطی شکل، از مقاطع $L3x3x1/2$ و $L4x4x5/8$ برای مهاربند جفت نبشی

نسبت به سختی اولیه نمونه آزمایشگاهی خطا نشان می‌دهد. بنابراین نتایج تحلیل اجزا محدود بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است و قابلیت مدل عددی را تایید می‌کند.

شکل (۵) بیان گر این موضوع است که نتایج مدل عددی، در پیش بینی توزیع تنش و کرنش فرا ارتجاعی و کماتش موضعی میانه مهاربند و ورق اتصال نیز قابل اعتماد است.

شکل ۳. منحنی های نیرو-جابجایی آزمایش [13]

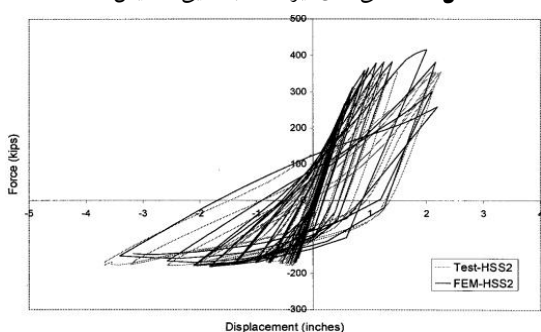


Fig. 3. Force-displacement curves from the pereiment

شکل (۴) منحنی های نیرو- جابه جایی اجزا محدود

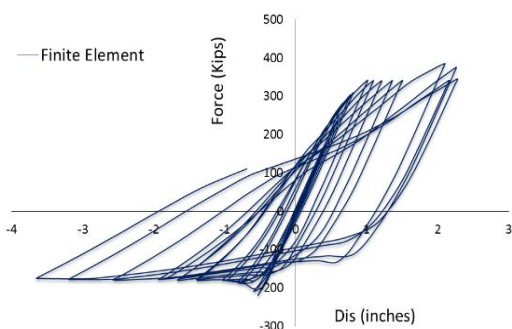


Fig. 4. Force-displacement curve from FE anglis

شکل ۵. مقایسه رفتار موضعی مدل درستی آزمایی شده با آزمایش

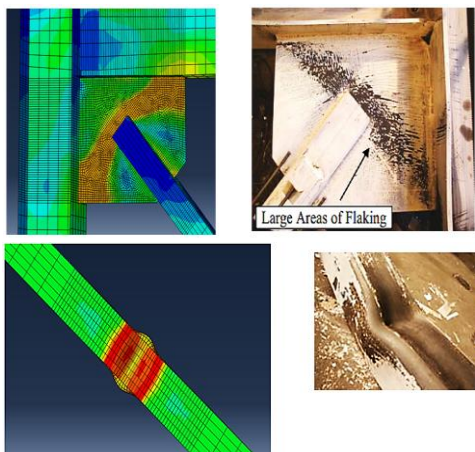


Fig. 5. Comparison of local behavior of experimental and FG models

مجموعه آزمایش های رودر و جانسون استفاده شده است [11]. طول و عرض دهانه قاب برابر با $3/65$ در $3/65$ متر است که متشکل از یک مهاربند قوطی شکل با ابعاد $5 \times 5 \times 3/8$ اینچ، دو تیر با ابعاد $(W16 \times 45)$ و دو ستون با ابعاد $(W12 \times 72)$ اینچ است. مهاربند قطری از طریق دو عدد ورق اتصال گوشه با رعایت فاصله آزاد خمش بیضی شکل شش برابر ضخامت ورق اتصال $(6t)$ به تیرها و ستون ها متصل شده است. بارگذاری به صورت جانبی در تراز تیر و بر اساس پروتوکل ATC-24 به سازه اعمال شده است [12].

مدل المان محدود این زیر سازه در شکل (۲) نشان داده شده است. برای مدل سازی از المان های پوسته ای ۴ گرهی استفاده شده که در هر گره ۶ درجه آزادی وجود دارد. انتهای ستون ها به صورت مفصلی مدل شده و از کماتش خارج از صفحه تیرها و ستون ها جلوگیری شده است. برای شبیه سازی کماتش در مهاربندها از ترکیبات غیر خطی هندسه و برای شبیه سازی رفتار غیرالاستیک چرخه ای، از مدل سخت شوندگی غیرخطی ترکیبی در نرم افزار تحلیل اجزا محدود Abaqus استفاده شده است.

شکل (۲) نمونه اجزا محدود مدل درستی آزمایی شده

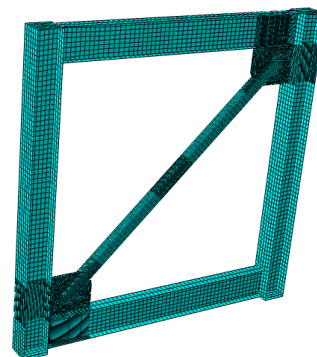


Fig. 2. Finite element model of Refrence specimen for verificat

شکل های (۳ و ۴) منحنی های نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش [13] و تحلیل اجزا محدود را نشان می دهند. مطابق این اشکال مقاومت کششی در چرخه آخر بارگذاری نمونه اجزا محدود خطایی برابر با $2/3$ درصد را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست می دهد. همچنین مقاومت فشاری در چرخه آخر بارگذاری برابر با $7/8/5$ کیلو نیوتن حاصل شد که این مقدار نیز خطایی برابر با ۱ درصد را نسبت به مقاومت پس کماتشی نمونه آزمایشگاهی نشان می دهد. سختی اولیه مدل اجزا محدود تنها حدود $0/7$ درصد

۴- معیار خرابی

در این پژوهش به منظور داشتن معیاری مناسب برای بررسی رفتار موضعی اجزا و پیش بینی رفتار نهایی سیستم از منظر خرابی، از معیار کرنش خمیری معادل (ε_e^{-pl}) در نواحی بحرانی استفاده شده است. ε_e^{-pl} از رابطه ی ۱ محاسبه می شود که در آن ε_0^{-pl} کرنش خمیری اولیه است.

$$\varepsilon_e^{-pl} = \varepsilon_0^{-pl} + \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}^{pl} : \dot{\varepsilon}^{pl} dt \quad (1)$$

با توجه به این که مقادیر کرنش معادل خمیری به شدت به ویژگی های مصالح، محل وقوع ترک و اندازه مش حساس است، در مدل های ساخته شده اندازه مش ها در ورق اتصال و مرکز مهاربند یکسان قرار داده شدند [14]. این متغیر در نرم افزار با عنوان PEEQ استخراج می شود. با توجه به گزارش های آزمایشگاهی در خصوص مقدار دریفت قاب در لحظه ترک خوردگی میانه مهاربند و گوشه

ورق اتصال [13]، با استفاده از نتایج تحلیل های عددی، مقدار شاخص PEEQ در نقاط متناظر به عنوان حد خرابی آن مورد در نمونه ها در نظر گرفته شده است. بر این اساس کرنش خمیری معادل متناظر با شروع ترک در میانه مهاربند برابر ۲/۴ و خرابی جوش در گوشه ورق اتصال و بست برابر ۱/۴۷ حاصل شده است.

۵- تشریح مدل های مورد مطالعه

مدل های مطالعه شده از نظر طول و ارتفاع دهانه قاب، مشابه قاب درستی آزمایی شده بخش ۳ بوده و مهاربندها در دو حالت قطری و ضربدری در نظر گرفته شده است. همچنین متغیرهای مختلفی اعم از چگونگی اتصال مقاطع جفت نبشی به یکدیگر (جلو به جلو و پشت به پشت)، تعداد و فاصله اتصال دهنده های مهاربند مرکب و نوع ورق اتصال روی مهاربندها اعمال شده است. در جدول (۱) ویژگی های مدل های عددی جفت نبشی به تفکیک آورده شده اند.

جدول ۱. مشخصات مدل های عددی






Model Designation	Connector Dimension (cm)	Connector Distances (L_i) (cm)	Governing Slenderness Ratio (L/r)	Individual Slenderness Ratio Between Connectors (L_i/r_i)	Slenderness Ratio ($(L_i/r_i)/(L/r)_{max}$)	Section Geometry
Hollow Steel Section (HSS) Brace						
Box4x4R	-	-	82.2	-	-	
Diagonal Toe-to-Toe Braces						
L4FSS3-6t	16.8x4.4x1.2	155.7	102.5	72.7	70%	
L4FSS4-6t	16.8x4.4x1.2	102.3	91	47.8	52%	
L4FSS5-6t	16.8x4.4x1.2	75.6	81.2	35.3	43%	
L4FSS6-6t	16.8x4.4x1.2	59.6	81.2	27.8	34%	
L4FSS7-6t	16.8x4.4x1.2	48.9	81.2	22.8	28%	
L3FSS5-2t	14.5x4.4x1.2	60.9	80.8	41.1	50%	
L3FSS7-2t	14.5x4.4x1.2	39.1	72.7	26.4	36%	
Diagonal Back-to-Back Braces						
L3BS4-6t-0.4	14.5x4.4x0.8	50	86.1	33.7	40%	
L3BS4-6t-0.55	14.5x4.4x0.8	71	89.3	48	55%	
L3BS4-6t-0.6-L4	14.5x4.4x0.8	81.1	90.3	54.8	60%	
L3BS4-6t-0.75	14.5x4.4x0.8	99	92.3	66.9	73%	
L3BS5-2t	14.5x4.4x0.8	60.9	73.4	41.1	55%	
L3BS7-2t	14.5x4.4x0.8	39.1	70.5	26.4	37%	
X-Braced Models						
L3FSS4-0.4	14.5x4.4x1.2	20	40.3	13.5	34%	
L3FSS2-0.65-L4	14.5x4.4x1.2	36.8	40.3	24.8	62%	
L3BS4-0.4	14.5x4.4x1	20	37.3	13.5	36%	
L3BS2-0.7-L4	14.5x4.4x1	36.8	37.3	24.8	66%	

Table 1. Description of the numerical models

(۲) و در قسمت نبشی‌های جلو به جلو آورده شده است. منحنی‌های نیرو-جابجایی دو نمونه قوطی شکل و جفت نبشی دارای ۳ لقمه نشان می‌دهد که مهاربند قوطی شکل از منظر مقاومت پس کمانشی، در چرخه‌های اولیه بارگذاری رفتار مطلوب‌تری نسبت به مهاربند نبشی جلو به جلو دارد (شکل ۸).

شکل ۷. مدل اجزا محدود Box4x4R و L4FSS3-6t

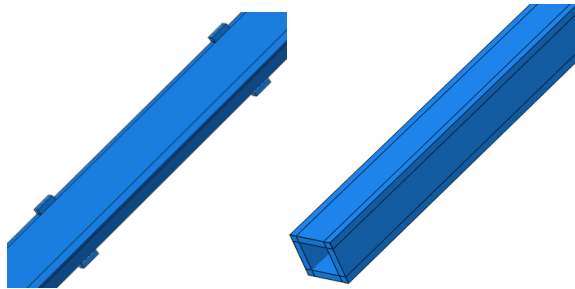


Fig. 7. FE models (Box4x4R and L4FSS3-6t)

شکل ۸. منحنی نیرو-جابجایی مدل‌های L4FSS3-6t و Box4x4R

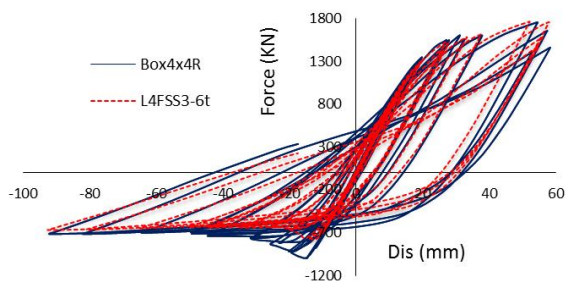


Fig. 8. Force-displacement curves (Box4x4R and L4FSS3-6t)

پوش منحنی‌های نیرو-جابجایی مدل‌های تحلیل شده نشان می‌دهد که شیب کاهش مقاومت پس کمانشی مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو در چرخه‌های اولیه بارگذاری اندکی بیشتر از مهاربند قوطی شکل مرجع است. بنابراین تبدیل مهاربند قوطی شکل به دو عدد نبشی جلو به جلو با تعداد اتصالات دهنده‌های مختلف، باعث کاهش مقاومت پس کمانشی مهاربندها می‌شود و به‌طور کلی رفتار چرخه‌ای سامانه را تضعیف می‌کند (شکل ۹). به دلیل فاصله ایجاد شده بین بال نبشی‌ها به هنگام کمانش دونبشی در بین دو لقمه به‌سادگی در هم فرو می‌روند و همین موضوع باعث پایین آمدن سختی اولیه نمونه‌های جلو به جلو نسبت به مهاربند قوطی شکل شده است (جدول ۲). با افزایش تعداد لقمه‌ها و کاهش فاصله بین

چگونگی نام گذاری مدل‌ها به این صورت است که عبارت L3 و L4 بیانگر نوع نبشی به کار رفته در مهاربند مرکب (L3x3x1/2 و L4x4x5/8)، اتصال جلو به جلو، B اتصال پشت به پشت، SS اتصال لقمه در نبشی‌های جلو به جلو، S اتصال بست در نبشی‌های پشت به پشت و عدد پس از آن نیز تعداد اتصالات دهنده‌ها را در طول عضو قطری یا نیم قطری نشان می‌دهد. در آخر عبارت نیز نوع ورق اتصال با فاصله آزاد خمش ۲t و ۶t آورده شده است. در مدل‌هایی که برای بررسی دقیق ضوابط لرزه‌ای در نظر گرفته شده‌اند، نسبت لاغری اجزای تک در بین بست‌ها به لاغری کل عضو در انتهای عبارت آورده شده است. عبارت L4 نیز مبنی بر قرار گرفتن بست‌ها درست در فاصله یک چهارم منطقه محافظت شده میانی است. مدل Box4x4R بیانگر مدل قوطی شکل با ابعاد 4x4 اینچ است که ۴۵ درجه چرخیده و به مانند نبشی‌های جلو به جلو به ورق اتصال گوشه متصل شده است. شکل (۶) نمونه‌ای از مدل عددی برای قاب دارای مهاربند قطری جفت نبشی پشت به پشت با بست را نشان می‌دهد.

شکل (۶) مدل اجزا محدود L3BS4-6t-0.75

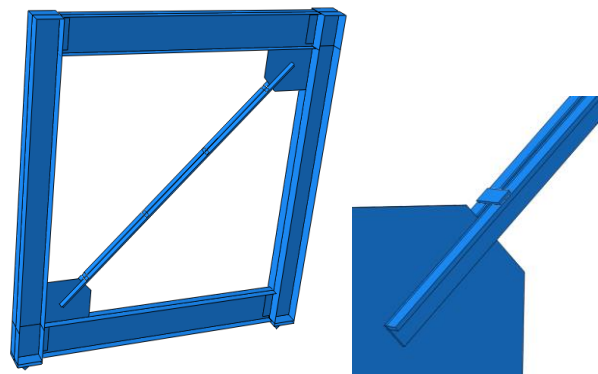


Fig. 6. FE model (L3BS4-6t-075)

۶- رفتار چرخه‌ای مدل‌ها

۶-۱- نبشی‌های جلو به جلو و پشت به پشت قطری

شکل (۷) مدل‌های اجزا محدود ساخته شده مهاربند قوطی شکل و جفت نبشی جلو به جلو را که از نظر هندسی مشابه هستند، نشان می‌دهد. نتایج مطالعه عددی رفتار چرخه‌ای مهاربند قوطی شکل از منظر سختی اولیه و مقاومت فشاری در چرخه آخر با نمونه‌های جفت نبشی جلو به جلو دارای ۳ تا ۷ لقمه، در جدول

منحنی‌ها هم منطبق‌اند. از طرفی مقاومت پس کمانشی نمونه‌ها در یک جابه‌جایی مشخص با شدت زیادی کاهش می‌یابد (شکل ۱۱).

آن‌ها، مقاومت کمانشی و پس کمانشی روندی رو به افزایش نشان می‌دهند.

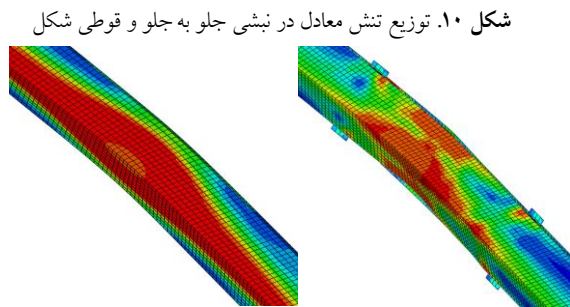


Fig. 10. Stress distributions (Box4x4R and L4FSS7-6t)

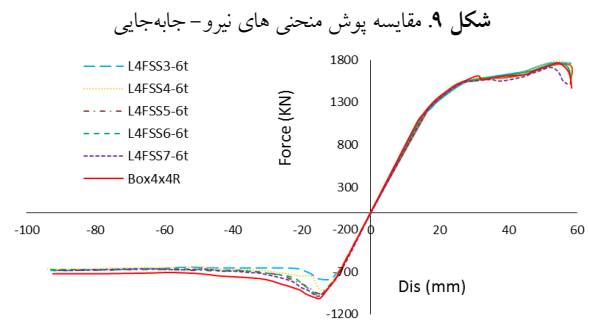


Fig. 9. Comparison of force-displacement curves

شکل ۱۱. پوش منحنی نیرو-جابه‌جایی نبشی‌های پشت به پشت

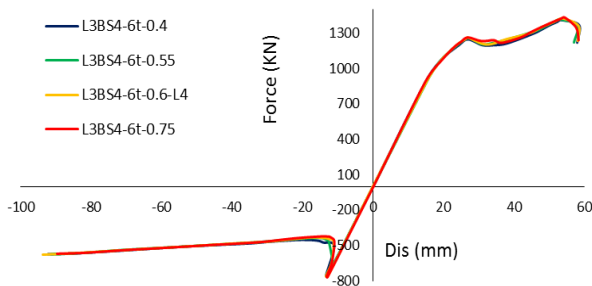


Fig. 11. Force-displacement envelope curves of models

توزیع تنش معادل حاصل از نرم‌افزار در مهاربند قوطی شکل و مهاربند جفت نبشی جلو به جلو با اتصال ۷ لقمه در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود توزیع تنش فرا ارتجاعی در بین لقمه‌های اتصال دهنده جفت نبشی‌ها، متمرکز می‌شود و این توزیع در مهاربند قوطی شکل وضعیت مطلوب‌تری دارد. پوش منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی در مدل‌های پشت به پشت دارای ورق اتصال ۶t و تعداد ۴ بست، نشان می‌دهد که رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها با تغییر لاغری بین بست‌ها تغییر نمی‌کند و

جدول ۲. نتایج چرخه‌ای مدل‌ها

Model Designation	Initial Stiffness (KN/cm)	Maximum Compressive Resistance (KN)	Maximum Tensile Resistance (KN)	Last Cycle Compressive Resistance (KN)	Last Cycle Tensile Resistance (KN)	Buckling Location
HSS Model and Diagonal Toe-to-Toe Braces						
Box4x4R	75.2	983	1756.8	713.7	1464	Brace Middle
L4FSS3-6t	70.4	776.7	1765.2	672	1478.9	Between Stitches
L4FSS4-6t	70.1	896.3	1788	653.8	1584.3	Brace Middle
L4FSS5-6t	72.2	942.2	1737.6	670.7	1514.2	Between Stitches
L4FSS6-6t	72.2	962.5	1765.9	665.2	1528	Brace Middle
L4FSS7-6t	72.1	974	1718.4	673	1522	Between Stitches
L3FSS5-2t	64.8	824	1491.8	605	1216	Between Stitches
L3FSS7-2t	65.1	824.3	1500.7	669.3	1241.2	Between Stitches
Diagonal Back-to-Back Braces						
L3BS4-6t-0.4	56.6	750	1405.3	570.8	1219.6	Brace Middle
L3BS4-6t-0.55	56.8	750.8	1410.4	569.7	1219.9	Brace Middle
L3BS4-6t-0.6-L4	58.1	751.7	1422.2	572.4	1235.7	Brace Middle
L3BS4-6t-0.75	57.5	753.8	1425	566.9	1238.8	Brace Middle
L3BS5-2t	62.1	813.9	1448.8	598.5	1242.2	Between Stitches
L3BS7-2t	62.1	813.2	1447.8	598.9	1229.1	Between Stitches
X-Braced Models						
L3FSS4-0.4	111.9	2042.5	2293.7	1873	2109	Out of Stitches
L3FSS2-0.65-L4	113.7	1988.3	2162.3	1948.7	2097.9	Between Stitches
L3BS4-0.4	99.8	1894.7	2144.8	1887.1	2101	Out of Stitches
L3BS2-0.7-L4	108.7	1886.4	2140.6	1855.6	2072.2	Out of Stitches

Table 2. Cyclic results of the SCBF models

۶-۲- جفت نبشی‌های ضربدری

در مدل سازی‌های این قسمت از ورق اتصال میانی مستطیل شکل با ابعاد $1/7 * 29 * 111$ سانتی‌متر استفاده شده که بر طبق ضوابط مرسوم آیین‌نامه‌ای برای مهاربندهای ضربدری جفت نبشی جلو به جلو طراحی شده است. مدل ضربدری نبشی جلو به جلو L3FSS4-0.4 و نبشی پشت به پشت L3BS2-0.7-L4 در شکل (۱۲) آورده شده است.

چگونگی توزیع تنش معادل حاصل از نرم افزار و کمناش موضعی مهاربند در مدل‌های ضربدری جفت نبشی پشت به پشت در مقایسه با مدل‌های جلو به جلو نیز در شکل (۱۳) آورده شده است. رفتار چرخه‌ای مدل جلو به جلو L3FSS2-0.65-L4 از منظر مقاومت کمناشی و مقاومت پس کمناشی، بهتر از منحنی مدل پشت به پشت L3BS2-0.7-L4 است.

شکل (۱۴) مقایسه منحنی نیرو-جابجایی مدل‌های ضربدری

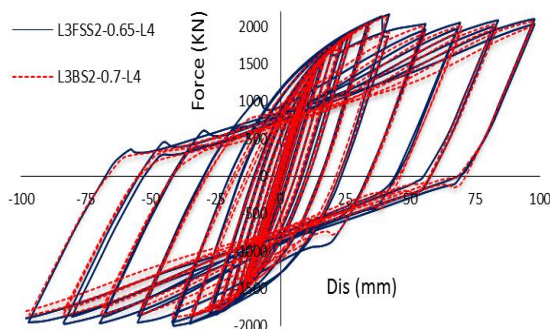


Fig. 14. Comparison of force-displacement curves

بر طبق نتایج جدول (۲) سختی اولیه، مقاومت فشاری پیشینه و مقاومت فشاری چرخه آخر نمونه‌های جفت نبشی ضربدری جلو به جلو بیشتر از نمونه‌های جفت نبشی پشت به پشت متناظر است. نتایج تحلیل مدل‌های این قسمت به مطلوب بودن منطقه محافظت شده $L/4$ میانی در مهاربندهای جفت نبشی ضربدری و محافظه کارانه بودن ضابطه لاغری بین دو بست $0/4$ برابر لاغری حاکم بر عضو نیم قطری، از منظر رفتار چرخه‌ای مطلوب اشاره دارند. با توجه به نتایج جدول (۲) لاغری اجزای تک بین دو بست $0/65$ برابر لاغری کل، برای نبشی‌های جلو به جلو پیشنهاد می‌شود.

۷- بررسی خرابی در مدل‌ها

رفتار خرابی مهاربندهای جفت نبشی مرکب در قالب مقاومت فشاری در چرخه متناظر با خرابی و ظرفیت شکل‌پذیری بررسی شده است. ظرفیت شکل‌پذیری از رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$\mu_c = \frac{\Delta_c}{\Delta_y} \quad (2)$$

Δ_c جابه‌جایی نهایی سامانه در چرخه متناظر با خرابی است و Δ_y جابه‌جایی تسلیم قاب است که برای محاسبه آن، نمونه‌ها را تحت بارگذاری یکنوا قرار داده و از دو خطی کردن پاسخ نیرو بر حسب جابه‌جایی استفاده شده است. در این روش سختی اولیه را منطبق بر منحنی پوش قرار داده و Δ_y را در نقطه‌ای که سطح زیر منحنی پوش نمونه با نمودار دو خطی برابر شود، تعیین می‌کنیم. نتایج مربوط به رفتار خرابی مدل‌های تحلیل شده در جدول (۳) آورده شده است.

شکل ۱۲. مدل اجزا محدود جفت نبشی‌های ضربدری

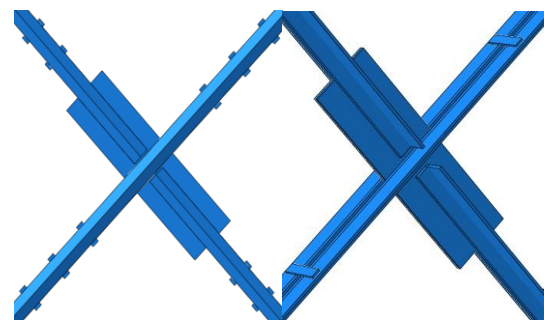


Fig. 12. X-braced models (L3FSS4-0.4, L3BS2-0.7-L4)

شکل ۱۳. توزیع تنش معادل در مهاربندهای ضربدری

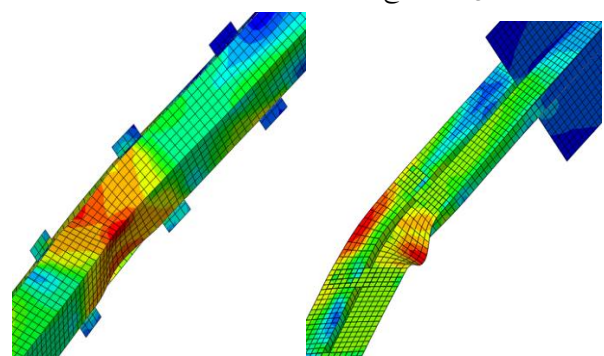


Fig. 13. Stress distributions (L3FSS4-0.4, L3BS2-0.7-L4)

اتصال دهنده‌ها در این دو مدل درست در فاصله $L/4$ مهاربندهای نیم قطری واقع شده‌اند و دو مدل فقط در چگونگی

جدول ۳. نتایج خرابی مدل‌ها

Model Designation	Failure Compressive Resistance (KN)	Failure Tensile Resistance (KN)	Ultimate Displacement (mm)	Yield Displacement (mm)	Ductility Capacity (μ_c)	Failure Location
HSS Model and Diagonal Toe-to-Toe Braces						
Box4x4R	714.4	1409.7	52.7	21.9	2.4	Gusset Plate
L4FSS3-6t	672	1478.9	54.8	21.7	2.5	Gusset Plate
L4FSS4-6t	653.8	1584.3	57.8	20.3	2.8	Gusset Plate
L4FSS5-6t	670	1565.2	56.4	19	2.9	Gusset Plate
L4FSS6-6t	665.2	1528	58.1	21.3	2.7	Gusset Plate
L4FSS7-6t	673	1522	57.2	20.2	2.8	Gusset Plate
L3FSS5-2t	611.5	1255.1	56.3	18.1	3.1	Gusset Plate
L3FSS7-2t	651	1251.8	56.2	17	3.3	Gusset Plate
Diagonal Back-to-Back Braces						
L3BS4-6t-0.4	488.3	1405.3	53.2	19	2.8	Brace
L3BS4-6t-0.55	489.1	1410.4	53.1	19.3	2.7	Brace
L3BS4-6t-0.6-L4	523.5	1360.6	58.1	18.1	3.2	Brace
L3BS4-6t-0.75	556.9	1224.6	56	18.8	3	Brace
L3BS5-2t	560.5	1243.6	38.3	16.3	2.3	Brace
L3BS7-2t	548.2	1229.4	37.7	16.1	2.3	Brace
X-Braced Models						
L3FSS4-0.4	1862.1	2053.1	69.9	10.3	6.7	Stitch Weld
L3FSS2-0.65-L4	1962.4	2048.8	69.3	7.1	9.7	Stitch Weld
L3BS4-0.4	1792.9	1934.9	41.5	11.5	3.6	Brace
L3BS2-0.7-L4	1760.4	1921.1	41.7	10.9	3.8	Brace

Table 3. Failure results of the SCBF models

به نبشی‌های جلو به جلو از خود نشان می‌دهند. از اینرو مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو تنها از منظر ظرفیت شکل پذیری مطلوب پیشنهاد می‌شوند که برای رسیدن به این مهم و شکست دیرتر عضو مهاربند، این نوع مهاربندها با تعداد لقمه کم پیشنهاد می‌شوند. در بین مهاربندهای نبشی پشت به پشت قطری دیده می‌شود که افزایش لاغری بین دو بست می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری چرخه خرابی، افزایش ظرفیت شکل پذیری و بهبود کرنش معادل خمیری در بال نبشی شود. برای نمونه مدل L3BS4-6t-0.75 با رعایت ضریب ۰/۷۵ برای لاغری بین دو بست نسبت به نمونه با رعایت ضریب ۰/۴ برای لاغری بین دو بست یعنی L3BS4-6t-0.4، افزایش مقاومت در حدود ۱۴ درصد را نشان می‌دهد جدول (۳). منحنی‌ها و نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که رضایت ضابطه آیین‌نامه AISC مبنی بر رعایت ضریب ۰/۴ برای لاغری بین هر دو بست در مهاربندهای همگرایی ویژه، محافظه کارانه است و برای بهبود رفتار خرابی جفت نبشی‌های پشت به پشت می‌تواند تا ضریب ۰/۷۵ افزایش یابد (شکل ۱۶).

۱-۷- نبشی‌های جلو به جلو و پشت به پشت قطری
با توجه به نتایج جدول (۳) دیده می‌شود که با افزایش تعداد لقمه در مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو، مقاومت متناظر با چرخه خرابی نیز افزایش می‌یابد. مهاربند با اتصال ۷ لقمه در بین نبشی‌های جلو به جلو دارای نزدیک‌ترین ظرفیت فشاری متناظر با خرابی به نمونه قوطی شکل مرجع است. ظرفیت شکل‌پذیری مدل‌های جفت نبشی 4x4 به مراتب از نمونه مرجع Box4x4R بزرگتراند و نشان می‌دهند که با تبدیل مهاربند قوطی شکل به جفت نبشی جلو به جلو، با وجود کاهش مقاومت خرابی، وضعیت شکل‌پذیری سامانه می‌تواند بهبود یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تبدیل مهاربند قوطی شکل به مهاربند جفت نبشی جلو به جلو با تعداد لقمه کم نیز می‌تواند وضعیت رشد منحنی شاخص کرنش معادل خمیری در عضو مهاربند را مطلوب سازد شکل (۱۵). در نتیجه‌گیری کلی باید عنوان کرد که از منظر رفتار کمانشی، پس‌کمانشی، سختی اولیه و ظرفیت فشاری چرخه آخر، مهاربندهای قوطی شکل عملکرد بهتری نسبت

نیز در بال نبشی مهاربندهای پشت به پشت در مقایسه با گوشه نبشی مهاربندهای جلو به جلو، مقادیر بیشتری دارد و رشد آن نیز سریع تر به مقدار بحرانی و شکست می‌رسد شکل‌های (۱۷ و ۱۸). دلیل این موضوع از آنجا برداشت می‌شود که پای نبشی‌های جلو به جلو تحمل کرنش‌های فشاری ناشی از رفتار پس کم‌انرژی را بیشتر از نبشی‌های پشت به پشت دارند. در مهاربندهای پشت به پشت، بال آزاد نبشی‌ها در معرض کرنش‌های فشاری شدیدی است.

شکل ۱۷. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربندهای نبشی جلو به جلو و پشت به پشت فطری دارای ۵ بست

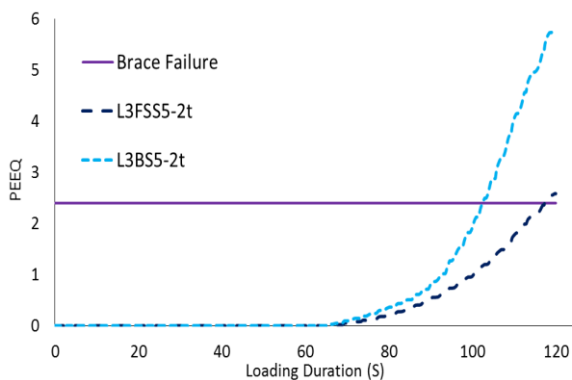


Fig 17. Comparison of PEEQ curves

شکل ۱۸. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربندهای نبشی جلو به جلو و پشت به پشت فطری دارای ۷ بست

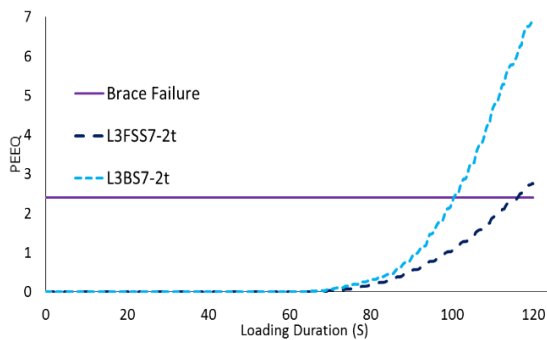


Fig. 18. Comparison of PEEQ curves

۲-۷- نبشی‌های جلو به جلو و پشت به پشت ضربدری

نتایج به دست آمده برای بررسی رفتار خرابی مدل‌های ضربدری نیز نشان می‌دهد که مقاومت فشاری متناظر با چرخه خرابی و ظرفیت شکل پذیری نمونه‌های جلو به جلو، بزرگتر از نمونه متناظر پشت به پشت خود هستند. به عنوان نمونه، مدل جلو به جلو L3FSS2-0.65-L4 دارای ظرفیت شکل پذیری ۹/۷ است و در عوض مدل متناظر پشت به پشت یعنی L3BS2-0.7-L4

از این منظر رعایت فاصله منطقه محافظت شده L/4 میانی مهاربند برای جفت نبشی‌های پشت به پشت فطری، منطقی به نظر می‌رسد. با تبدیل مهاربند جلو به جلو به مهاربند نبشی پشت به پشت فطری، شکست سامانه از گوشه ورق اتصال به شکست عضو مهاربند تبدیل می‌شود. مقاومت فشاری متناظر با چرخه خرابی در نمونه پشت به پشت L3BS5-2t نسبت به نمونه متناظر جلو به جلو خود یعنی L3FSS5-2t حدود ۸/۳ کاهش را نشان می‌دهد و همچنین مدل L3BS7-2t نسبت به نمونه متناظر جلو به جلو خود یعنی L3FSS7-2t حدود ۱۵/۸ درصد کاهش مقاومت فشاری چرخه خرابی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربند مدل‌های نبشی جلو به جلو

فطری (L4x4) در مقایسه با مهاربند قوطی شکل

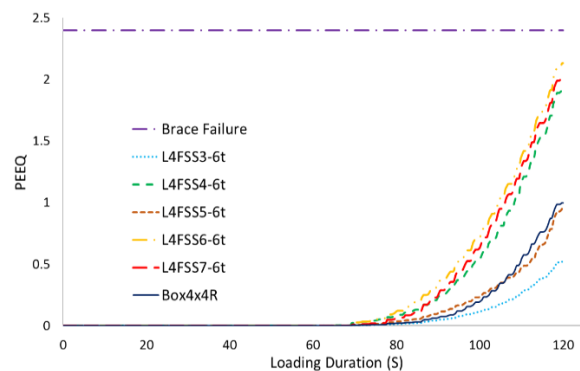


Fig. 15. PEEQ curves of toe-to-toe models

شکل ۱۶. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربند مدل‌های جفت نبشی پشت به پشت فطری

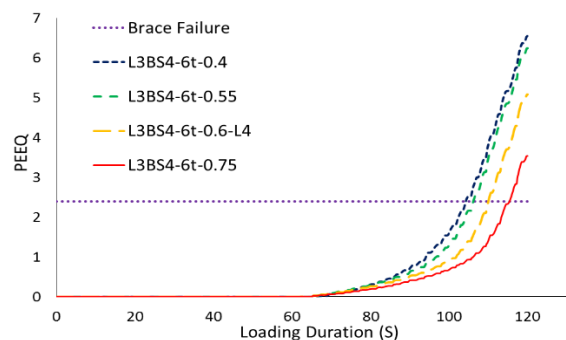


Fig. 16. PEEQ curves of back-to-back models

ظرفیت شکل پذیری مدل جلو به جلو L3FSS7-2t حدود ۳/۳ است در حالی که ظرفیت شکل پذیری مدل نبشی پشت به پشت متناظر آن یعنی L3BS7-2t حدود ۲/۳ است. کرنش معادل خمیری

۸- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های عددی انجام شده روی مدل‌های مهاربندهای مرکب از جفت نبشی نتایج زیر قابل ارائه است: تبدیل مهاربندهای قوطی شکل به مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو با تعداد مختلف اتصال دهنده، با وجود تضعیف رفتار چرخه‌ای و مقاومت فشاری در چرخه خرابی می‌تواند باعث افزایش ظرفیت شکل پذیری سامانه شود.

همان‌گونه که نتایج مطالعات آزمایشگاهی قبلی روی مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو قطری نشان داده بود که بست‌ها در فواصل نزدیک به هم می‌توانند باعث بهبود رفتار پس کمانشی سامانه شوند، مطالعه حاضر نیز این نکته را از نقطه نظر مقاومت تأیید می‌کند اما از دیدگاه رفتار خرابی نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد لقمه‌ها و کاهش فاصله بین آن‌ها، رشد کرنش معادل خمیری افزایش می‌یابد و ممکن است شکست مهاربند مرکب زودتر اتفاق افتد.

ضابطه لرزه‌ای آیین‌نامه AISC در مورد مهاربندهای همگرای ویژه مرکب، ضریب $0/4$ را برای لاغری اجزای تک بین اتصال دهنده‌ها نسبت به لاغری کل پیشنهاد می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که در مهاربندهای جفت نبشی پشت به پشت قطری، رفتار چرخه‌ای و خرابی نمونه‌ها با افزایش لاغری بین بست‌ها از $0/4$ تا $0/75$ برابر لاغری کل، بهبود می‌یابند. همچنین کرنش معادل خمیری در مهاربند کاهش می‌یابد و شکست بال نبشی به تعویق می‌افتد. بنابراین رعایت ضابطه نسبت لاغری اجزای تک مهاربند بین بست‌ها به لاغری کل عضو در مهاربندهای جفت نبشی، محافظه کارانه است.

در مهاربندهای جفت نبشی قطری و ضربدری، رعایت منطقه محافظت شده بر طبق ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC منطقی به نظر می‌رسد اما لاغری اجزای منفرد بین دو اتصال دهنده در این نوع مهاربندها می‌تواند با توجه به فاصله $L/4$ میانی دستخوش تغییر شود و افزایش یابد.

به طور کلی مهاربندهای جفت نبشی جلو به جلو قطری و ضربدری، رفتار چرخه‌ای و خرابی مطلوب‌تری نسبت به مدل‌های پشت به پشت متناظر خود با تعداد یکسان بست دارند و شکست

ظرفیت شکل پذیری $3/8$ را دارد که اختلاف قابل توجهی است. مقایسه بین رشد و توزیع کرنش معادل خمیری در عضو مهاربند در مدل‌های ضربدری جفت نبشی پشت به پشت و جلو به جلو متناظر در شکل‌های (۱۹ تا ۲۱) آورده شده است.

شکل ۱۹. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربندهای ضربدری جفت نبشی جلو به جلو در مقایسه با مدل پشت به پشت دارای ۲ بست

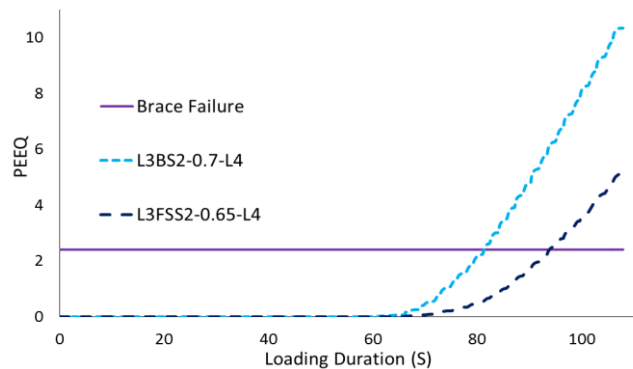


Fig. 19. Comparison of PEEQ curves

شکل ۲۰. رشد کرنش معادل خمیری در مهاربندهای ضربدری جفت نبشی جلو به جلو در مقایسه با مدل پشت به پشت دارای ۴ بست

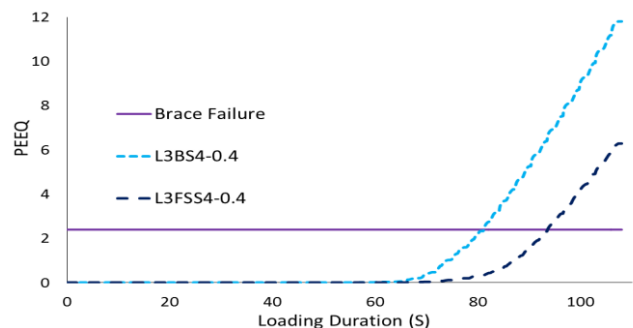


Fig. 20. Comparison of PEEQ curves

شکل ۲۱. توزیع کرنش معادل خمیری در مهاربندهای ضربدری

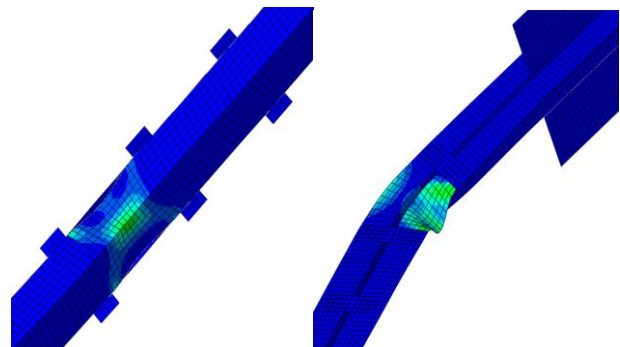


Fig. 21. PEEQ distributions (L3FSS4-0.4, L3BS4-0.4)

Journal of Structural Engineering, ASCE. 111(5): 1135-1153.

[8] Aslani, F. and S.C. Goel, Stitch Spacing and End Fixity in Seismic-Resistant Boxed Angle Braces. Journal of Structural Engineering, 1992. 118(10):p.2872-2889.

[9] Lee, K., Bruneau, M. (2008). Seismic vulnerability evaluation of axially loaded steel built-up laced members. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 7(2): 113-124.

[10] Jiang, Y., Tremblay, R., Tirca, L. (2012). Seismic assessment of deficient steel braced frames with built-up back-to-back double angle brace sections using OpenSees modeling. 15 conference WCEE. LISBOA

[11] Johnson, S.M., Improved seismic performance of special concentrically braced frames. 2005.

[12] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structure, 1992.

[13] Yoo, J.H., Analytical investigation on the seismic performance of special concentrically braced frames. 2006: ProQuest.

[14] Alipour, M. and A. Aghakouchak, Numerical analysis of the nonlinear performance of concentrically braced frames under cyclic loadings. International Journal of Steel Structures, 2013. 13(3): p. 401-419.

عضو مهاربند در آنها نسبت به مدل‌های متناظر پشت به پشت، دیرتر اتفاق می‌افتد. بنابراین استفاده از جفت نبشی‌های جلو به جلو در ساختمان‌ها فولادی پیشنهاد می‌شود.

References

۹- مراجع

[1] Aslani, F., & Goel, S. (1991). An analytical criterion for buckling strength of built-up compression members. Engineering Journal, AISC. 28(4), 159-168.

[2] AISC-360 A. Steel Construction Manual; American Institute of Steel Construction. Inc.; 2005.

[3] Liu, J., Lue, D., Lin, C. (2009). Investigation on slenderness ratios of built-up compression members. Journal of Constructional Steel Research. 65(1): 237-248.

[4] AISC-360, A. Steel Construction Manual; American Institute of Steel Construction. Inc.; 2010.

[5] Design and Performance of Steel Structures. Building and Urban Ministry, 2013 (In Persian).

[6] Seismic, A., Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, (ANSI/AISC 341-10). 2010, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

[7]- Astaneh-Asl, A., Goel, S., Hanson, R. (1985). Cyclic out-of-plane buckling of double angle bracing.

Numerical study of cyclic and failure behavior of built-up concentric braces containing double angle sections

A. Izadi¹, A.A. Aghakouchak^{2*}

1- M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Professor., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*a_gha@modares.ac.ir

Abstract:

The most important characteristic of brace frames is their significant stiffness as well as their compression strength against lateral forces. Built-up special concentrically braced frames (SCBFs), which contain double angle braces, are among the common steel structural systems resisting lateral loads. Along the built-up brace length, the stitch and connector distance plays an important role in cyclic and ductility behavior of braced frames due to possibility of out of plane buckling. The results of experimental studies of built-up double angle braces have shown that setting the stitches closer to each other can improve the post buckling behavior of systems, resulting in increasing the final compression strength, close to box-shaped brace strength. In addition, an individual member buckling is possible by increasing the stitch distances along built-up braces. According to AISC seismic provisions for built-up SCBFs, the slenderness ratio of individual elements between the connectors should not exceed 0.4 times the governing slenderness ratio of the built-up member. Also, connecting built-up members by the use of welding is not permitted within the middle one-fourth of the clear brace length. In fact, AISC seismic provision has prohibited the use of stitches and connectors in the protected zones of built-up specially concentrically braced frames such as the center one-fourth of the clear brace length and a zone adjacent to each connection equal to the brace depth in the plane of buckling. In this research, seismic provisions related to built-up diagonal and X-braced SCBFs are investigated numerically under cyclic loading using a single-bay single-story frame. The numerical study is performed on models, which contains parameters such as back-to-back and face-to-face connection types of built-up members. Seismic behavior of these braces are investigated from the view points of cyclic and failure behavior. This investigation is performed on both types of diagonal and X-braced steel frames. The cyclic behavior of systems is studied based on post buckling capacity, structure initial stiffness, and final compression strength. Failure behavior of systems is investigated with regard to failure cycle and ductility capacity. In order to evaluate seismic behavior and ultimate ductility of the numerical models, regarding to initiation and propagation of cracks, the concept of plastic equivalent strain is used to predict system failure. The results of this study show that increasing the number of stitches or decreasing their distances along the length of the built-up members may not necessarily improve behavior of braced systems. That means inelastic deformation concentration can occur in individual elements between stitches resulting in earlier failure of braces. Therefore, current seismic provisions such as limiting the slenderness ratio of individual elements between stitches from 0.4 times of the governing slenderness ratio of the built-up member for compression sections, are conservative in SCBFs and can be changed according to the type of braces. In addition, Failure of double angle back-to-back diagonal braces occurs earlier in comparison to face-to-face braces. Also, in X-braced frames, cyclic and failure behavior of built-up face-to-face braces are more desirable than the similar back-to-back braces in general.

Keywords: Built-up concentrically braced frames, double angle, plastic equivalent strain, back-to-back, face-to-face.