

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی شکل پذیری حلقه‌ی فولادی

رضا عباس‌نیا (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد قاسم‌وتر (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

رسول احمدی (استادیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه زنجان

محمدعلی کافی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

سهولت و هزینه‌ی پائین اجرای مهاربندهای هم‌محور، موجب کاربرد زیاد آنها در سازه‌های فولادی شده است. این مزایا انگیزه‌ی انجام تحقیقات به‌منظور افزایش شکل‌پذیری آنها در طی دو دهه‌ی گذشته بوده است. یکی از روش‌های افزایش شکل‌پذیری آنها استفاده از المان شکل‌پذیر در مهاربندهای هم‌محور است. در این نوشتار میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری یک حلقه‌ی فولادی به‌عنوان المان شکل‌پذیر مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. حلقه‌ی فولادی را می‌توان به دو صفحه‌ی فولادی جوش کرد و به‌راحتی در انواع مهاربندهای هم‌محور تعبیه کرد. ظرفیت بار حلقه‌ی فولادی تابع طول، شعاع، ضخامت و تنش تسلیم آن است و این امر امکان طراحی آن را متناسب با ظرفیت مهاربند فراهم می‌کند. نتایج این بررسی بیان‌گر جذب انرژی و شکل‌پذیری بسیار خوب حلقه‌ی فولادی و پشتوانه‌ی ایده‌ی جدید این نوشتار در چگونگی استفاده از حلقه‌ی فولادی است.

abbasnia@iust.ac.ir
vetr@iiees.ac.ir
r_ahmadi@iust.ac.ir
mkafi@semnan.ac.ir

واژگان کلیدی: شکل‌پذیری، آزمایشگاهی، حلقه فولادی، مهاربند.

مقدمه

حلقه‌ی فولادی جوش شده به دو صفحه‌ی اتصال در مهاربند موجب تحت خمش قرارگرفتن حلقه‌ی فولادی می‌شود و عملکرد خمشی غیرکشسانی آن نیز به استهلاک انرژی زلزله خواهد انجامید. نتایج حاصل از این بررسی بیان‌گر عملکرد خوب و کارایی مناسب حلقه‌ی فولادی به‌عنوان یک المان شکل‌پذیر است؛ و نیز ارزش این نوشتار در نگاه نوین به چگونگی استفاده از حلقه‌ی فولادی در انواع مهاربندهای هم‌محور است.

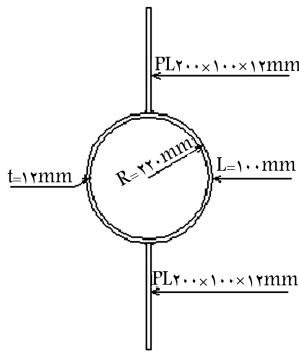
در ادامه روابط مقاومت مصالح حلقه در محدوده‌ی کشسانی و خمیری بیان شده و حلقه‌ی فولادی جوش شده به دو صفحه‌ی اتصال که نمونه‌ی مورد مطالعه در این نوشتار است با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحلیل شده است. سپس ضمن بیان نتایج و چگونگی انجام آزمایش حلقه، بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی حاصله مقایسه انجام شده است.

مهاربندهای هم‌محور یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی است که غالباً در قاب‌های با اتصالات مفصلی اجرا می‌شود. این سازه‌ها دارای سختی زیاد و تغییر شکل کم‌اند؛ مزیت آنها سهولت و هزینه‌ی پائین اجرا و سرعت بالای بازسازی آنها بعد از زلزله است. از طرف دیگر شکل‌پذیری کم آنها که متأثر از کماتش مهاربند فشاری قبل از رسیدن به مرحله‌ی غیرکشسانی و تأمین شکل‌پذیری مناسب است، از معایب اصلی آنها محسوب می‌شود. در دو دهه‌ی گذشته تحقیقاتی به‌منظور افزایش شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور انجام شده، و با تمهیدات مختلفی در هر یک از این تحقیقات به این هدف نائل آمده‌اند. تمهیداتی چون:

- استفاده از اتصالات اصطکاکی؛ [۱-۴]
 - استفاده از غلاف پوششی برای افزایش بارکمانش مهاربند و تسلیم شدن آن قبل از کمانش؛ [۵-۶]
 - استفاده از المان شکل‌پذیر با عملکرد خمشی - برشی در محلی از مهاربند. [۷-۱۳]
- در این مقاله شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی حلقه‌ی فولادی برای تعبیه در مهاربندهای هم‌محور مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. قرارگرفتن تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۸/۲، داوری ۱۳۸۶/۱۲/۲۰، پذیرش ۱۳۸۷/۷/۳۰.

روابط مقاومت مصالح کشسانی و خمیری حلقه

رابطه‌ی مقاومت مصالح نیرو - تغییر قطر حلقه و نیروهای داخلی آن در محدوده‌ی



شکل ۳. مشخصات حلقه‌های فولادی و صفحات اتصال.

مشخصات حلقه‌ی مورد مطالعه

قراردادن حلقه‌ی فولادی در مهاربند مستلزم جوش کردن آن به دو صفحه‌ی فولادی است. به این منظور یک حلقه‌ی فولادی به قطر خارجی ۲۲۰، ضخامت ۱۲ و طول ۱۰۰ میلی‌متر از یک لوله‌ی صنعتی و بدون درز تهیه و مطابق شکل ۳ به دو صفحه‌ی فولادی از نوع ST۳۷ جوش شده است. فولاد حلقه از نوع CT۲۰، با تنش تسلیم ۳۰۵ و تنش نهایی ۴۸۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع و کرنش نهایی ۲۱٫۵ درصد است. جوش حلقه از نوع گوشه با بعد ۷ میلی‌متر و با استفاده از الکتروود E۷۰۱۸ انجام شده است.

تحلیل رایانه‌ی حلقه‌ی فولادی

تحلیل نظری حلقه‌ی فولادی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و به صورت دوبعدی انجام شده است. المان مورد استفاده برای مدل‌سازی حلقه‌ی Solid ۸۲ هشت‌گه‌ی و منحنی تنش - کرنش فولاد ایزوتروپ سخت‌شونده‌ی سه‌خطی مطابق شکل ۴ است. بارگذاری حلقه به صورت کنترل - تغییر قطر حلقه انجام شده است.

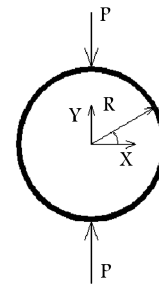
در شکل ۵ توزیع تنش نرمال حلقه‌ی فولادی جوش شده به دو صفحه‌ی اتصال در راستای X نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، بیشترین تنش در کنار خط جوش حلقه به صفحه‌ی اتصال آن و در حالت کششی رخ داده است. علامت پیکان موقعیت بیشینه تنش و پیش‌بینی محل شکست حلقه را مشخص می‌کند.

منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه در شکل ۶ نشان داده شده است. پهنای این منحنی بیانگر شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بالای حلقه‌ی فولادی است. در شکل ۷ نیز پوش هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه نشان داده شده است. بیشینه نیروی کششی و فشاری حلقه ۷۶٫۶۲ کیلو نیوتن است که با استفاده از معیار تنش فون مایسس مفصل خمیری حلقه در نقطه‌ی اتصال آن به صفحه‌ی اتصال به دست آمده است. ضریب شکل‌پذیری حلقه‌ی فولادی (μ_s) برابر است با:

$$\Delta P_{-max} = 19.6 \text{ mm}$$

$$\Delta_y = 4.4 \text{ mm} \Rightarrow \mu_s = \frac{\Delta P_{-max}}{\Delta_y} = 4.45$$

در شکل ۸ منحنی تجمعی انرژی - چرخه‌ی بارگذاری نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود مجموع انرژی جذب‌شده در انتهای ناحیه‌ی غیرکشسان و



شکل ۱. بارگذاری حلقه‌ی فولادی.

کشسانی^[۱۴] و تحت بار خطی P شکل ۱ عبارت است از:

$$M_{max}^+ = 0.3183 PR \quad \theta = \frac{\pi}{4}$$

$$M_{max}^- = 0.1817 PR \quad \theta = 0$$

$$I = \frac{1}{12} t^3 l$$

$$\delta_y = -0.149 \frac{PR^2}{EI}$$

$$\delta_x = +0.137 \frac{PR^2}{EI}$$

$$T = -\frac{1}{4} P \cos \theta$$

$$V = -\frac{1}{4} P \sin \theta$$

با افزایش بار، چهار مفصل خمیری مطابق شکل ۲ در حلقه ایجاد می‌شود که روابط تعادل آن در حالت حدی خمیری عبارت است از:

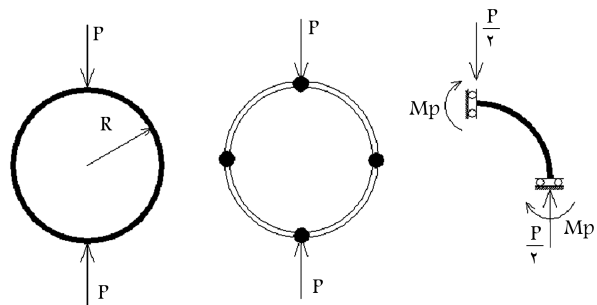
$$2M_P = \frac{PR}{4} \Rightarrow P = \frac{4M_P}{R}$$

$$M_P = \frac{t^3 l \sigma_y}{4}$$

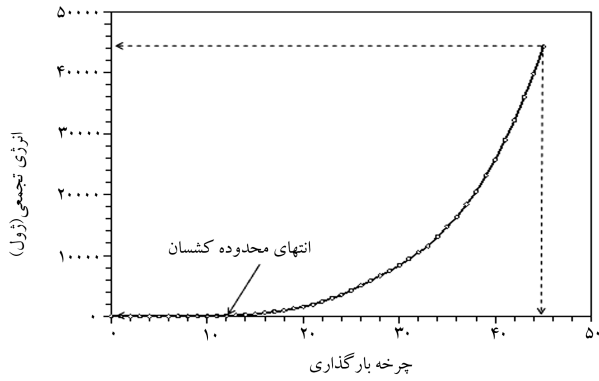
$$P = \frac{t^3 l \sigma_y}{R}$$

M_P : لنگر خمیری حلقه، l : طول حلقه

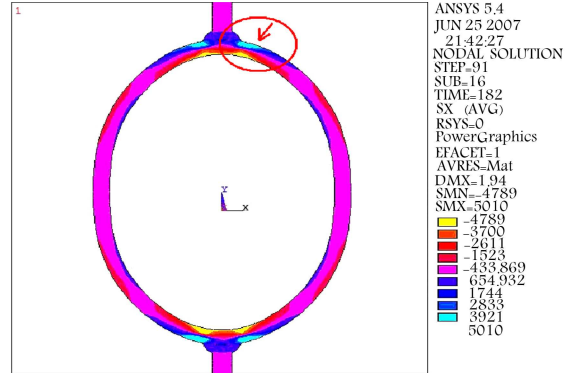
چنان که در روابط خمیری حلقه مشاهده می‌شود، ظرفیت بار حلقه با طول، تنش تسلیم و ضخامت حلقه با توان دو، رابطه‌ی مستقیم و با شعاع آن رابطه‌ی معکوس دارد.



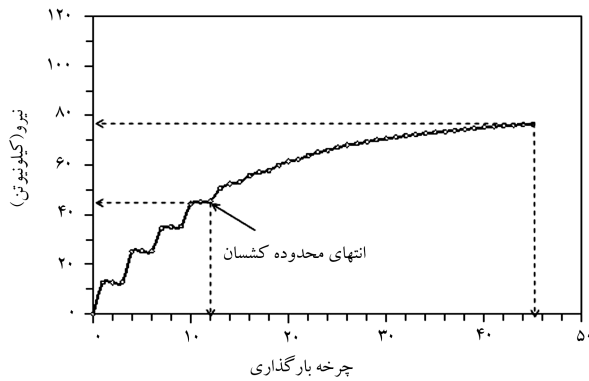
شکل ۲. محل تشکیل مفاصل خمیری در حلقه.



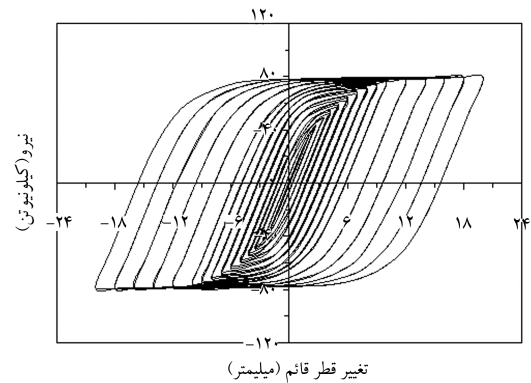
شکل ۴. منحنی تنش - کرنش فولاد.



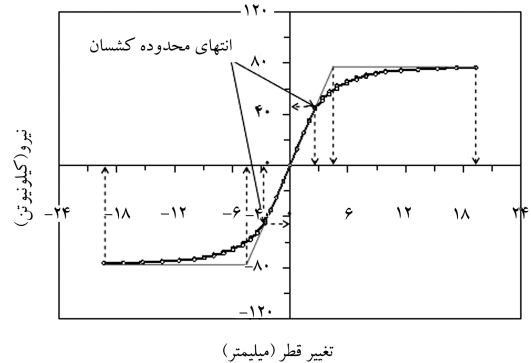
شکل ۵. توزیع تنش حلقه در جهت X.



شکل ۶. منحنی نیرو - چرخه بارگذاری.



شکل ۷. پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر حلقه.



شکل ۸. پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر حلقه.

کشسان، و تغییر قطر متناظر آنها برابر است با:

$$\Delta P_{-max} = 19,6mm \quad \Delta E_{-max} = 2,7mm$$

$$\sum_{i=1}^{45} E_i = 44262,88Joul \Rightarrow \bar{E}_P = 1338Joul$$

$$\sum_{i=1}^{12} E_i = 108,8Joul \Rightarrow \bar{E}_E = 9,06Joul$$

در شکل ۹ منحنی نیرو - چرخه بارگذاری نشان داده شده است. بیشینه نیروی حلقه در انتهای ناحیه کشسانی و خمیری به ترتیب ۴۵,۲ و ۷۶,۶ کیلو نیوتن است. این نتیجه بار حلقه فولادی در انتهای محدوده غیرکشسانی را ۱,۷ برابر بار انتهای محدوده کشسان نشان می‌دهد، در حالی که متوسط انرژی جذب شده در محدوده غیرکشسان ۱۴۷,۷ برابر متوسط انرژی جذب شده در محدوده کشسان است. این مقایسه نشان دهنده قابلیت جذب انرژی بسیار زیاد حلقه فولادی در محدوده غیرکشسان است.

آزمایش حلقه فولادی

حلقه فولادی مورد آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ابعاد حلقه و صفحات اتصال مطابق با مشخصات مورد مطالعه است. آزمایش حلقه فولادی در آزمایشگاه سازی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران انجام شده است. شکل ۱۱ نحوه قرارگرفتن حلقه در جک یونیورسال با ظرفیت ۷۰۰

در چرخه‌های قبل از شکست آن و در دو حالت کششی و فشاری نشان می‌دهد. بیشترین تنش حلقه در حالت کششی آن و در کنار خط جوش حلقه به صفحات اتصال رخ داده است. شکسته‌شدن حلقه از کنار خط جوش آن به صفحه‌ی اتصال بالایی با علامت پیکان در شکل ۱۳ مشخص شده است. شکستگی حلقه از سطح بیرونی آن و در چرخه‌ی ۴۶ با تغییر قطر ۲۰ میلی‌متر رخ داده است. چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، نتایج تحلیل نشان‌گر پیش‌بینی شکسته‌شدن حلقه از این نقطه بود.

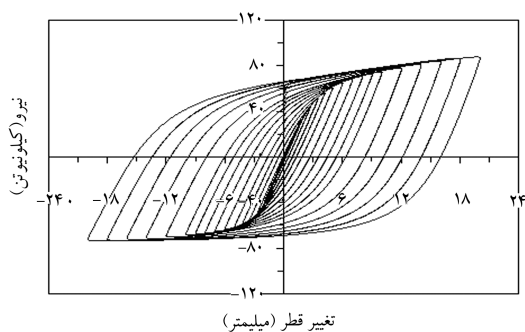
چنان‌که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، شکستگی حلقه به‌صورت طولی و از کنار خط جوش آن به صفحه‌ی اتصال رخ داده است. این موضوع بیان‌گر توزیع یکنواخت بار در طول حلقه، و مؤید صحت تحلیل دویعدی آن است. اگرچه در مشاهدات آزمایشگاهی هیچ آسیب‌دیدگی در جوش دیده نشد، جوش و محل اتصال آن مورد آزمایش نفوذ رنگ قرار گرفت، که نتیجه‌ی آن مؤید عدم آسیب‌دیدگی جوش بود. نقاط تیره‌رنگ روی حلقه در شکل ۱۴ نتیجه‌ی آزمایش نفوذ رنگ است که شکسته‌شدن طولی حلقه را نشان می‌دهد. در این شکل هیچ آسیب‌دیدگی در جوش مشاهده نمی‌شود. پهنای منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه در شکل ۱۵ و با ۴۵ چرخه بارگذاری بیان‌گر جذب انرژی بسیار خوب حلقه‌ی فولادی است. در شکل ۱۶ پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه نشان داده شده است. بیشینه نیروی کششی و فشاری حلقه به ترتیب ۸۷٫۷ و ۷۳٫۷ کیلونیوتن و در شکل ۱۶ تغییر قطر قائم ۱۹٫۸ میلی‌متر است. مطابق این شکل بیشینه تغییر قطر حلقه و تغییر قطر متناظر آن در انتهای محدوده‌ی کشسان، به ترتیب ۱۹٫۸ و ۴٫۲۵ میلی‌متر و مقدار ضریب شکل‌پذیری حلقه‌ی فولادی (μ_s) برابر است با:

$$\Delta P_{-max} = 19.8 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 4.25 \text{ mm} \Rightarrow \mu_s = \frac{\Delta P_{-max}}{\Delta y} = 4.66$$



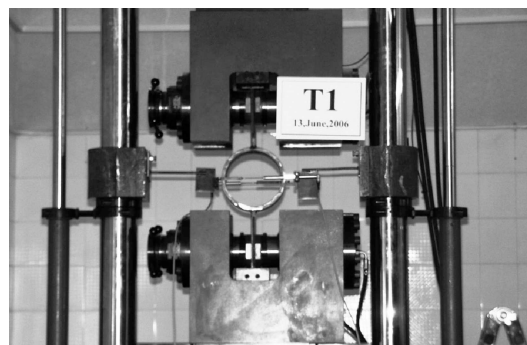
شکل ۱۴. ترک‌ها و نقاط آسیب‌دیده‌ی حلقه که پس از آزمایش PT رؤیت شد.



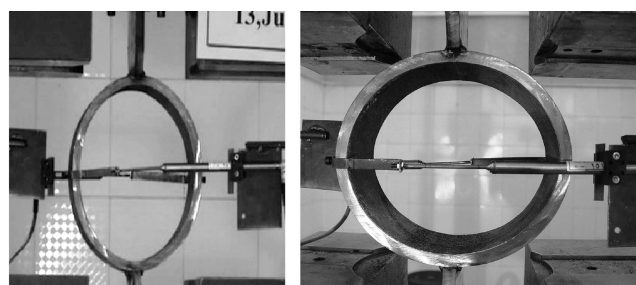
شکل ۱۵. منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه.



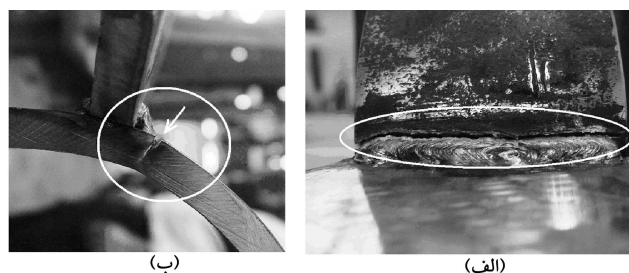
شکل ۱۰. حلقه‌ی فولادی جوش شده به صفحات اتصال.



شکل ۱۱. قرارگرفتن حلقه‌ی فولادی در جک یونیورسال.

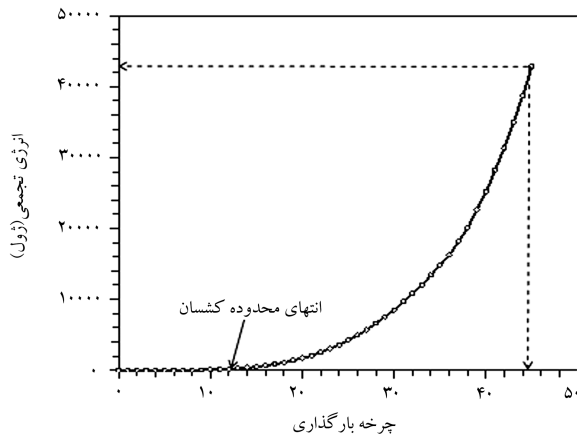


شکل ۱۲. حلقه‌ی فولادی در دو حالت کششی و فشاری.



شکل ۱۳. شکستگی حلقه از کنار خط جوش آن به صفحه‌ی اتصال.

کیلونیوتن کششی و فشاری را نشان می‌دهد. جک یونیورسال ضمن اعمال نیروی محوری تغییر قطر قائم حلقه را اندازه‌گیری می‌کند. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود برای اندازه‌گیری تغییر قطر افقی حلقه دو جابه‌جایی‌سنج در دو طرف آن نصب شده است. بارگذاری حلقه به‌صورت کنترل - تغییر قطر حلقه و براساس نتایج تحلیلی آن از تغییر قطر ۰٫۷ تا ۲۴ میلی‌متر و طی ۵۰ چرخه در سیستم بارگذاری جک پیش‌بینی شد. شکل ۱۲ حلقه‌ی فولادی را



شکل ۱۹. منحنی انرژی تجمعی - چرخه بارگذاری.

کشسان است، در حالی که انرژی آخرین چرخه غیرکشسان ۱۱۰ برابر انرژی آخرین چرخه کشسان است. منحنی انرژی تجمعی - چرخه بارگذاری در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مجموع انرژی جذب شده در انتهای محدوده‌ی غیرکشسان و کشسان برابر است با:

$$\sum_{i=1}^{25} E_i = 429021 \text{ Joule} \Rightarrow \bar{E}_P = 99473 \text{ Joule}$$

$$\sum_{i=1}^{12} E_i = 14754 \text{ Joule} \Rightarrow \bar{E}_E = 1273 \text{ Joule}$$

چنان که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود ظرفیت بار حلقه در محدوده‌ی کشسان برابر ظرفیت بار آن در محدوده‌ی غیرکشسان است درحالی که متوسط انرژی محدوده‌ی غیرکشسان حلقه ۸۰/۸ برابر متوسط انرژی محدوده‌ی کشسان است. این نتیجه بیان‌گر جذب انرژی بسیار خوب حلقه‌ی فولادی در محدوده‌ی غیرکشسان است.

مقایسه‌ی نتایج نظری و آزمایشگاهی

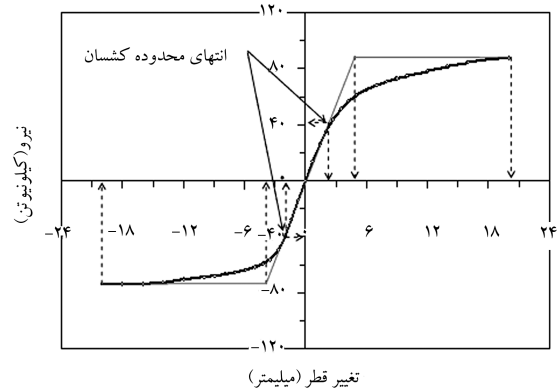
نتایج آزمایش حلقه‌ی فولادی نشان داد که ظرفیت کششی حلقه بیشتر از ظرفیت فشاری آن است. این اختلاف ظرفیت ناشی از تغییر قطری حلقه و تأثیر آن بر بازوی بار در معادله‌ی تعادل حلقه است. شکل ۲۰ تغییر بازوی بار حلقه در دو حالت کششی و فشاری را نشان می‌دهد. معادله‌ی تعادل حلقه در شرایط حدی نشان می‌دهد که ظرفیت بار با شعاع حلقه، که بازوی بار نامیده می‌شود، رابطه‌ی معکوس دارد. در صورت صرف‌نظر کردن از تغییر قطری حلقه، بازوی بار ثابت و برابر شعاع حلقه است. اما چنان که در آزمایش حلقه‌ی فولادی ملاحظه شد، بیشینه تغییر قطری حلقه ۹ درصد قطر آن به دست آمد و در نتیجه انتظار می‌رفت که اختلاف بیشینه نیروی کششی - فشاری حلقه به ۲ برابر این مقدار برسد. در نتایج آزمایش اختلاف بیشینه نیروی کششی - فشاری حلقه معادل ۱۹ درصد نشان داده شده که به مقدار مورد انتظار بسیار نزدیک است. در تحلیل نظری حلقه‌ی فولادی با نرم‌افزار ANSYS می‌توان از تأثیر تغییر شکل هندسی حلقه صرف‌نظر کرد که در این صورت ظرفیت کششی و فشاری آن مقداری یکسان خواهد بود. منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ مبتنی بر نتایج تحلیلی حلقه، بدون احتساب تغییر شکل هندسی آن است. بیشینه نیروی کششی و فشاری حلقه در این حالت

منحنی انرژی - چرخه بارگذاری در شکل ۱۷ و منحنی نیرو - چرخه بارگذاری در شکل ۱۸ نشان داده شده است. انرژی جذب شده در آخرین چرخه‌ی غیرکشسان و کشسان و نیروی متناظر آنها عبارت است از:

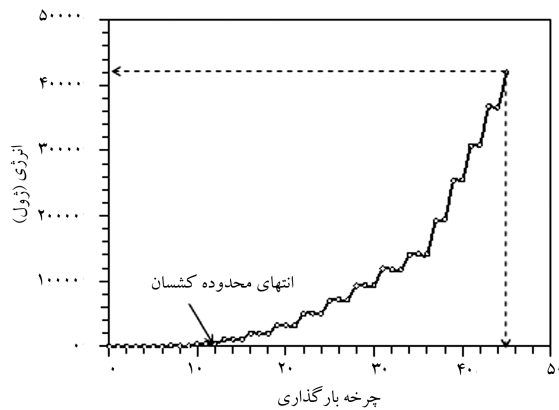
$$E_{P-max} = 41985 \text{ Joule} \quad E_{E-max} = 3786 \text{ Joule}$$

$$P_{P-max} = 8776 \text{ kN} \quad P_{E-max} = 438 \text{ kN}$$

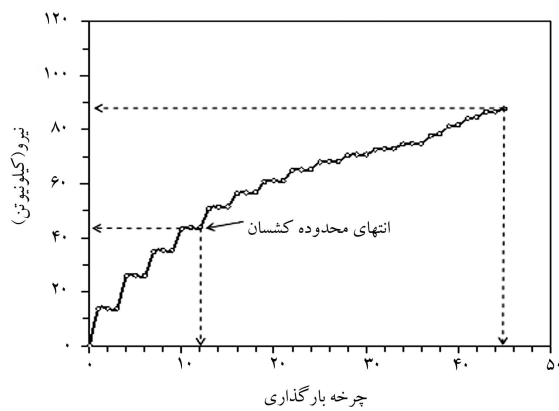
نیروی حلقه در آخرین چرخه‌ی غیرکشسان ۲ برابر نیروی حلقه در آخرین چرخه‌ی



شکل ۱۶. پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه.



شکل ۱۷. منحنی انرژی - چرخه بارگذاری.



شکل ۱۸. منحنی نیرو - چرخه بارگذاری.

در شکل ۲۲ پوش این منحنی‌ها مقایسه شده است. بیشینه نیروی کششی و فشاری حلقه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی برابر است با:

$$P_{EXP}^{max} = 87,7 kN \quad P_{EXP}^{min} = 73,7 kN$$

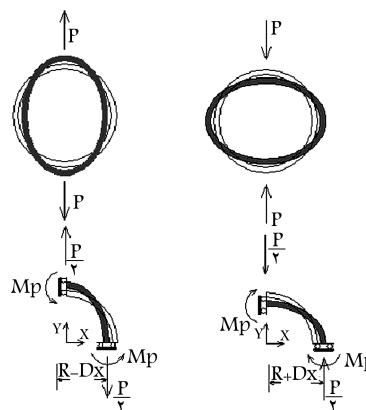
$$P_{ANSYS}^{max} = 79,1 kN \quad P_{ANSYS}^{min} = 70,2 kN$$

این نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو حالت تحلیلی و آزمایشگاهی ظرفیت کششی حلقه از ظرفیت فشاری آن بیشتر است. مشاهده می‌شود که ظرفیت بار کششی و فشاری تحلیلی حلقه به ترتیب ۹/۸ و ۴/۷ درصد از نتایج نظیر آزمایشگاهی کم‌تر است و در نتیجه طراحی حلقه‌ی فولادی براساس نتایج تحلیلی در جهت اطمینان است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مشاهده می‌شود و این انطباق در محدوده‌ی فشاری پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر حلقه بیشتر است. در شکل ۲۳ منحنی آزمایشگاهی و تحلیلی انرژی - چرخه‌ی بارگذاری حلقه مقایسه شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود در چرخه‌های ۳۵ تا ۴۵ انرژی تحلیلی مقادیر بیشتری را نسبت به انرژی آزمایشگاهی نشان می‌دهد. چاقی بیشتر منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر تحلیلی حلقه نسبت به منحنی آزمایشگاهی در شکل ۲۱ این نتیجه را تأیید می‌کند.

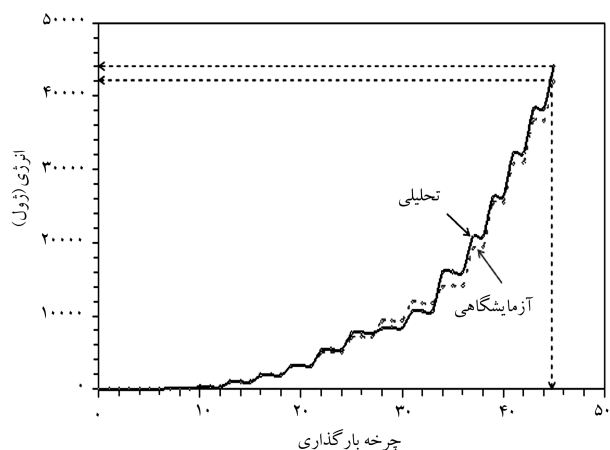
مطالعات انجام‌شده در این نوشتار بیان‌گر جذب انرژی و شکل‌پذیری بسیار بالای

۷۶/۶۲ کیلو نیوتن به دست آمده است که از بیشینه نیروی کششی ۱۲/۶ درصد کم‌تر و از بیشینه نیروی فشاری آزمایشگاهی ۴ درصد بیشتر است.

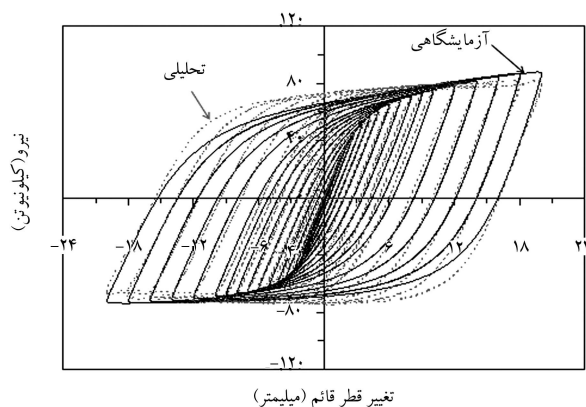
در شکل ۲۱ منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و تحلیلی نیرو - تغییر قطر حلقه‌ی فولادی با احتساب تغییر شکل هندسی آن نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین دو منحنی آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد.



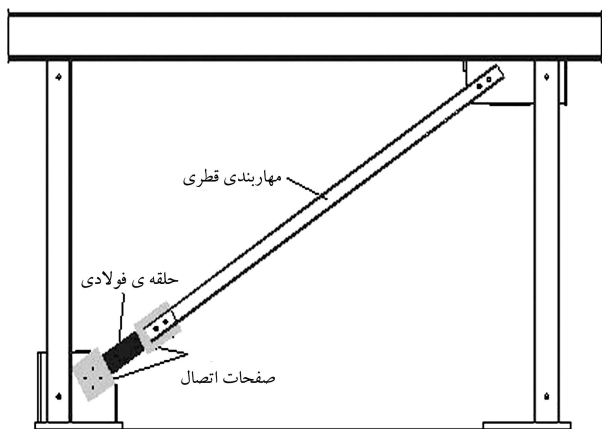
شکل ۲۰. تأثیر تغییر قطر افقی بر بازوی بار.



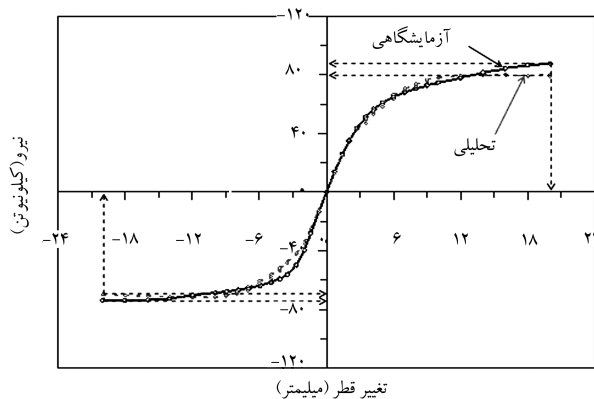
شکل ۲۳. مقایسه‌ی منحنی آزمایشگاهی و تحلیلی انرژی - چرخه بارگذاری.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و تحلیلی نیرو - تغییر قطر حلقه.



شکل ۲۴. چگونگی قرارگیری حلقه‌ی فولادی در مهاربند قطری.



شکل ۲۲. مقایسه‌ی پوش منحنی هیستریزس آزمایشگاهی و تحلیلی نیرو - تغییر قطر حلقه.

- مدل دوعبدهی حلقه‌ی فولادی با نرم‌افزار ANSYS از دقت لازم برخوردار است و نتایج آن بر عملکرد واقعی حلقه‌ی فولادی منطبق است.

فهرست علائم

E : انرژی

E_{E-max} : متوسط انرژی جذب شده در محدوده‌ی کشسان

E_{P-max} : متوسط انرژی جذب شده در محدوده‌ی خمیری

I : ممان اینرسی

l : طول حلقه

M : لنگر خمشی حلقه

P_{ANSYS}^{max} : بیشینه نیروی کششی تحلیلی حلقه

P_{ANSYS}^{min} : بیشینه نیروی فشاری تحلیلی حلقه

P_{EXP}^{max} : بیشینه نیروی کششی آزمایشگاهی حلقه

P_{EXP}^{min} : بیشینه نیروی فشاری آزمایشگاهی حلقه

R : شعاع حلقه

T : نیروی محوری حلقه

t : ضخامت حلقه

V : برش حلقه

δ_y : تغییر قطر قائم حلقه

δ_x : تغییر قطر افقی حلقه

σ_y : تنش تسلیم فولاد

μ_s : شکل پذیری

ΔE_{-max} : بیشینه تغییر مکان کشسان حلقه

ΔP_{-max} : بیشینه تغییر مکان خمیری حلقه

Δ_y : تغییر قطر متناظر حلقه در انتهای محدوده‌ی کشسان

حلقه‌ی فولادی است و مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، نشان‌دهنده‌ی دقت و قابلیت خوب نرم‌افزار ANSYS در تحلیل غیرخطی آن است. معادله‌ی تعادل حلقه‌ی فولادی در حالت حدی خمیری نیز نشان می‌دهد که ظرفیت بار حلقه‌ی فولادی، با تنش تسلیم، طول، ضخامت و شعاع آن مرتبط است. نقش این پارامترها در ظرفیت بار حلقه‌ی فولادی موجب طراحی حلقه‌ی متناسب با امکانات و نیازهای سازه می‌شود. بنابراین با توجه به ظرفیت مهاربند، می‌توان حلقه‌ی طراحی و مطابق شکل ۲۴ در انتهای مهاربند نصب کرد.

مطالعات این نوشتار مبنای نگاه نو به چگونگی استفاده از حلقه‌ی فولادی در انواع مهاربندهای هم‌محور است. وجود حلقه‌ی فولادی (شکل ۲۴) به‌عنوان فیوز کنترل کمانش مهاربند نیز عمل می‌کند. [۱۶، ۱۵] وجود حلقه‌ی فولادی موجب محدود شدن خرابی‌های سازه به آن و عدم آسیب دیدگی مهاربند و دیگر اعضاء سازه می‌شود و در نتیجه هزینه‌ی بازسازی بعد از زلزله تنها به تعویض حلقه محدود می‌شود.

نتیجه‌گیری

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی حلقه‌ی فولادی در این نوشتار نشان می‌دهد که:

- حلقه‌ی فولادی از قابلیت جذب انرژی بسیار بالا و شکل‌پذیری خوبی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان یک المان شکل‌پذیر در مهاربندهای هم‌محور استفاده شود.
- ظرفیت کششی حلقه از ظرفیت فشاری آن بیشتر و با ظرفیت کششی و فشاری مهاربندهای هم‌محور هم‌سو است.
- شکستگی طولی حلقه از کنار خط جوش بیان‌گر توزیع یکنواخت بار در طول آن است.

منابع

1. Pall, A.S. and Marsh, C. "Response of friction damped braced frames," *Journal of Structural Division ASCE*, **108**, No. ST6 (1982).
2. Grigorian, C.E.; Yang, T.S.; Popov, E.P. and M. EERE. "Slotted bolted connection energy dissipaters," *Journal of Earthquake Spectra*, **9**(3), (1993).
3. Butterworth, J. "Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints," *SESOC Journal*, **13**(1), (2000).
4. Mualla, I.H. and Belev, B. "Performance of steel frame with a new friction damper device under earthquake excitation," *J. Engineering Structures*, **24**, pp. 365-371, (2002).
5. Clark, W.; Tasia, K.; Aiken, I.D. and Kimura, I. "Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbounded braces for energy dissipation," *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, Upper Hutt, New Zealand, pp. 22-40, (2000).
6. Rezaieian, A. *Improving earthquake behavior of concentrically braced frames by being ductility them*, *Civil Engineering M.Sc. Thesis*, Civil Engineering Department, Science & Technology University of Iran, Iran, (1381).
7. Roufegarinejad, A. and Sabouri, S. "Nonlinear behavior of yielding damped bracing frames," *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Columbia University, New York, 2002.
8. Chen, C.C. and Lu, L.W. "Development and experimental investigation *proceedings of the 4th National Conference of a ductile CBF system*," *on Earthquake Engineering*, **2**, pp. 575-584 (1990).
9. Vetr, M.B. "Seismic behavior analysis and design of vertical sheering", Ph.D. Dissertation, T.U. Darmstadt Germany, (1997).

10. Maheri, M. R. and Akbari, R. "Seismic behavior factor ,R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings," *Engineering Structures*, **25**, pp. 1505-1513, 2003.
11. Thomopoulos, K. and Koltsakis, E. "Connections of CHS concrete-filled diagonals of X-bracings," *Journal of Constructional Steel Research*, **59**, pp. 665-678, (2003).
12. Malek, S.; Pabsang, P. and Lohghalam, A. "Introducing a new inactive dissipate system and comparing it with TADAS dissipate," First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2006).
13. Tehranizadeh M. "Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran", *J. Engineering Structures*, **23**, pp. 643-655 (2000).
14. Roark, R.J. "Formulas for stress and strain", McGraw-Hill Book Company (1990).
15. Abbasnia, R.; Vetr, M.G. and Kafi, M.A. "A study on functionality of ductiable element in ductility concentrically braces," 7th International Congress on Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (2006).
16. Vetr, M.G.; Abbasnia, R. and Kafi, M.A. "Energy absorption increase in braced frame with concentrically braces," First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2006).