به نام خدا

پایداری خارج از صفحه مهاربند های کمانش ناپذیر با قابلیت انتقال لنگر (ترجمه: امین رحیمی)

چکیده

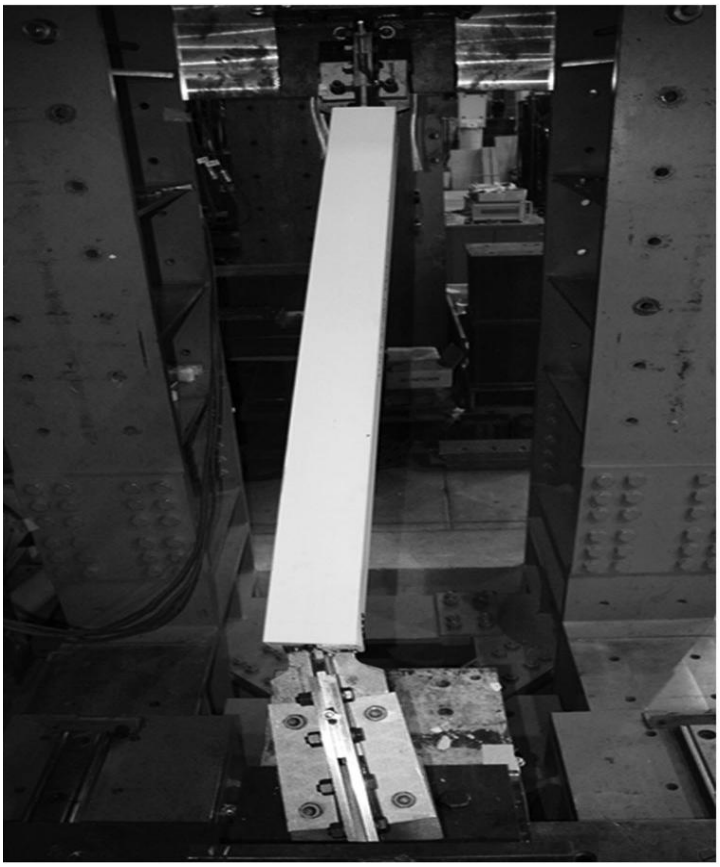
مهاربند های کمانش ناپذیر(BRB ها) به طور عمده به عنوان اعضای سازه ای مقاوم لرزه ای شکل پذیر و مستهلک کننده انرژی در مناطق لرزه خیز استفاده میشوند. اگرچه انتظار میرود مهاربند های کمانش ناپذیر تحت بارهای محوری رفت و برگشتی (سیکلی) پایدار بماند،یکی از محدودیتهای کلیدی اصلی آن کمانش خمشی کلی است که میتواند پاسخی ناخواسته را بوجود آورد. بسیاری از مطالعات گذشته اشاره به امکان وقوع کمانش کلی BRB پیش از اینکه تسلیم هسته آن باعث گسیختگی اتصال شوند کرده اند.

در این مقاله مفاهیم پایداری BRB شامل ظرفیت انتقال لنگر خمشی آنها در انتهای غلاف برای مقادیر گوناگون سختی اتصال با انحراف خارج از صفحه اولیه ارایه شده است و یک معادله سازی ساده یکپارچه برای تامین پایداری BRB پیشنهاد شده است. علاوه بر این یک سری آزمایشات بارگذاری رفت و برگشتی با انحراف خارج از صفحه اولیه انجام گرفته و نتایج حاصله با نتایج حاصل از معادلات پیشنهادی مقایسه شده است.

مقدمه

انتظار میرود مهاربند های کمانش ناپذیر(BRB ها) زمانی که در معرض بارهای محوری رفت و برگشتی داخل صفحه قرار داده میشوند ، مطابق آنچه در مقررات لرزه ای AIJ 2009 و AISC 341–10 شده، رفتار هیسترزیس پایداری نشان دهند. همانطور که در این مقررات معین گردیده شرایط گوناگونی برای تامین پایداری BRB مورد نیاز است. Takeuchi درباره رابطه ی بین ظرفیت تغییر شکل تجمعی و تاریخچه بارگذاری اعمالی یک BRB تحقیق کرد و درباره تاثیر کمانش موضعی بر مقاومت و شکل پذیری BRB بحث کرد. به علاوه چندین مطالعه گذشته، خطر کمانش کلی BRB، ناشی از گسیختگی اتصال از قبیل تشکیل مفاصل پلاستیک در ناحیه اتصال پیش از تسلیم هسته را مورد تاکید قرار داده اند (شکل ۱). به عنوان نمونه Tsai و Lin پدیده کمانش کلی مرتبط با گسیختگی اتصال در آزمایشات قاب BRB را گزارش کرد و Wigle درباره تاثیر اتصالات بر رفتار BRB بحث کرد. Zao درباره شرایط پایداری BRB ها با اتصالات مفصلی تحقیق کرد. Hikino آزمایشات میز لرزه ای را بر قاب های BRB انجام داد، و Okazaki سختی مورد نیاز صفحات

اتصال تحت کمانش یک جانبه با در نظر گیری از بین رفتن ظرفیت انتفال لنگررا پیشنهاد کرد و الزامات را با نتایج آزمایش مطابقت داد. به علاوه، الزامات سختی و مقاومت در اتصالات در چندین آزمایش قاب BRB دیگر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱

هرچند در مطالعات گذشته، مفاهیم پایداری شامل آثار ظرفیت انتقالی لنگر خمشی در انتهای گیردار برای مقادیر سختی پیچشی گوناگون صفحات اتصال هنوز به طور واضح روشن نشده است. اثر جابجایی نسبی طبقه در جهت خارج از صفحه برای شبیه سازی مولفه انتقالی حرکت زمین نیز در نظر گرفته نشده بود. در این مقاله، پایداری مورد نیاز برای BRB ها با انحراف خارج از صفحه اولیه به کار گرفته شده ودقت معادله سازی پیشنهادی مورد تایید قرار گرفته است.

شرایط پایداری برای BRB های شامل اتصالات

در توصیه های AIJ برای طراحی پایدار سازه های فولادی، به کارگیری دو مفهوم ذیل برای جلوگیری از کمانش کلی ارایه شده است (شکل ۲):

مفهوم ۱ : اگرچه تشکیل مفصل پلاستیک بدون ظرفیت انتقالی لنگر خمشی در تکیه گاه گیردار مجاز است، شرایط پایداری به تنهایی برای ناحیه غلاف و ناحیه اتصال ار ضا میشوند [شکل ۲_ a].

مفهوم ۲ : زمانی که ظرفیت انتقالی لنگر خمشی در تکیه گاه گیردار بوجود می آید، پایداری ترکیبی ناحیه غلاف و ناحیه اتصال تامین میشود [شکل ۲_ b].

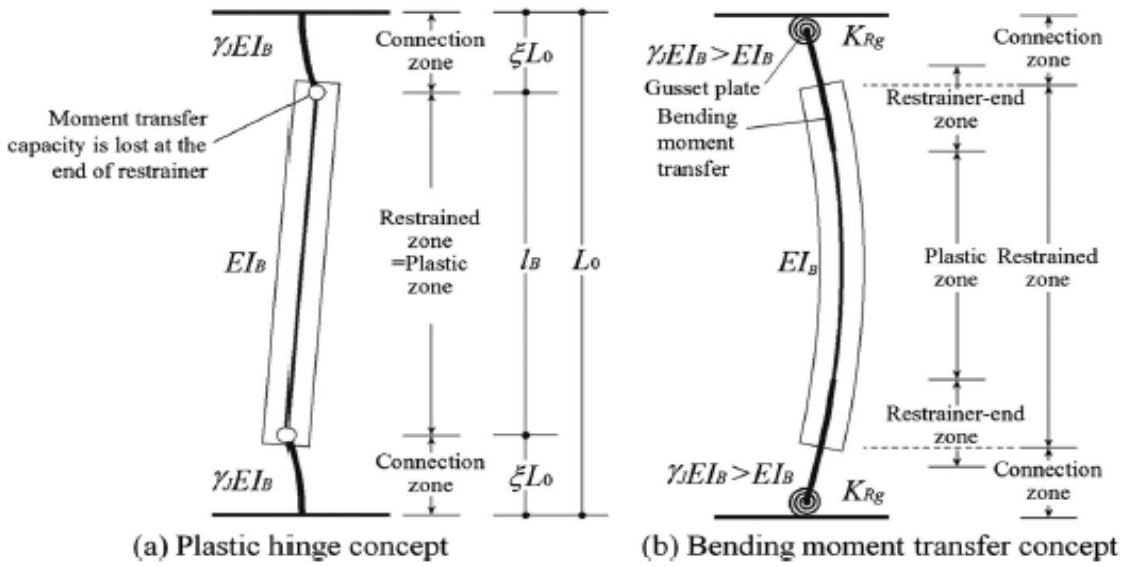


Figure 2. Buckling-restrained brace stability condition concepts
(AIJ Recommendations for Stability Design of Steel Structures, 2009).

برای مفهوم ۱، معادلات زیر توسط Koetaka پیشنهاد شده است:

حالت پایداری ناحیه غلاف:

$$M_y^B \geqslant \frac{(a+e+s_r)N_{cu}}{1-N_{cu}/N_{cr}^R} \qquad (1)$$

حالت پایداری ناحیه اتصال:

$$\frac{(1-2\xi)\pi^2\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2} > N_{cu} \qquad (2)$$

M_y^B مقاومت خمشی تسلیم غلاف ، a حداکثر ناقصی (imperfection) در طول غلاف، e نیروی محوری خارج از مرکز، s_r فضای خالی حد فاصل هسته و غلاف، N_{cu} حداکثر مقاومت محوری صفحات هسته، N_{cr}^R مقاومت کمانشی اویلر غلاف، $\gamma_J EI_B$ سختی خمشی اتصالات، L_o طول کلی BRB و ξL_o طول محل اتصال هستند.

معادله ۲ بر پایه ی این فرض است که انتهای ناحیه های اتصال به طور صلب در برابر پیچش مقید شده اند، هرچند در عمل اساسا صفحات اتصال سخت نیازمند اضای این شرط هستند.

برای مفهوم ۲، Matsui تصریح کرد که اگر طول ناحیه الحاقی L_m به غلاف از عرض صفحه هسته بزرگتر باشد ناحیه ی انتهای غلاف میتواند لنگر خمشی به بزرگی مقاومت خمشی کوچکتر غلاف یا گلوگاه (neck) را انتقال دهد(تصویر ۴).

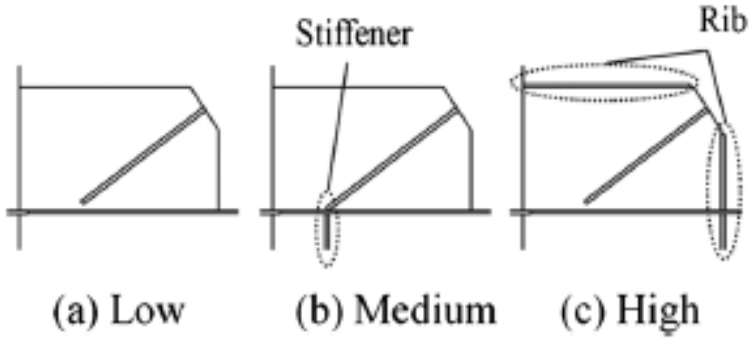


Figure 3. Connection with varying stiffness.

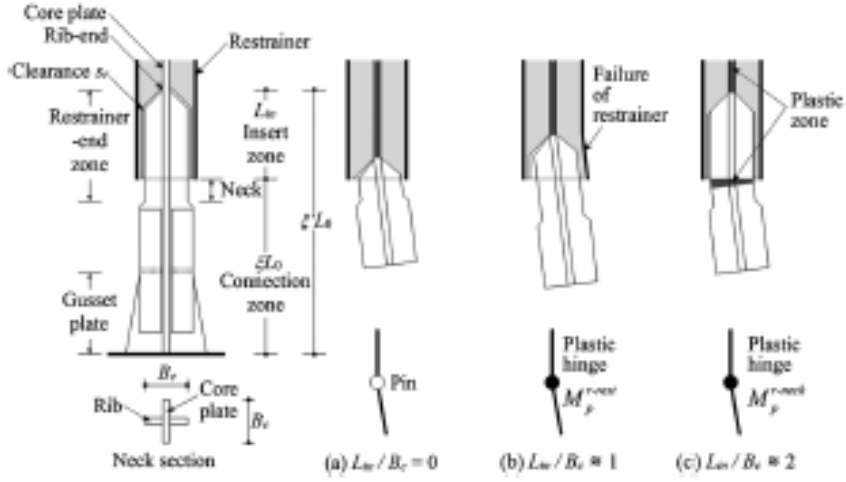


Figure 4. Bending moment transfer at restrainer ends.

در شکل ۴، گلوگاه (neck) بخشی از هسته صلیبی شکل را نشان میدهد که تا سوی دیگر پوشش غلاف کشیده شده. اگر

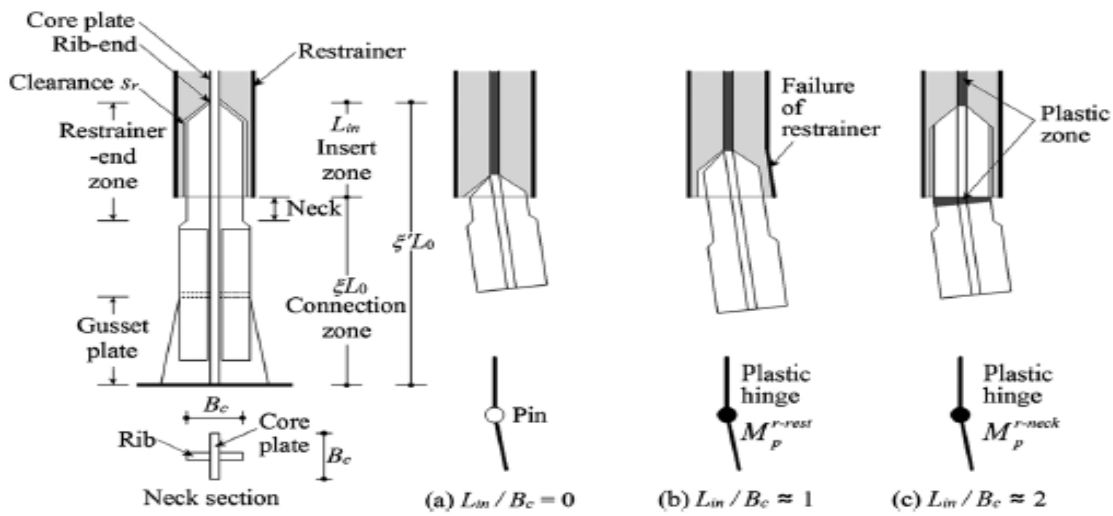


Figure 4. Bending moment transfer at restrainer ends.

سختی پیچشی صفحه اتصال نسبتا کم باشد مانند شکل 3_a، فضای خالی هسته غلاف یک نقص (imperfection) اولیه را که میتوان فرض کرد برابر $a_r = a + e + s_r + (2s_r/L_m)\,\xi\, L_o$ است به وجود آورد، تصویر نشان داده شده در شکل ۵. سپس رابطه یبین نیروی محوری N و تغییر شکل خارج از صفحه y_r در انتهای غلاف را میتوان با رابطه زیر تخمین زد (شکل ۶).

$$N = \frac{y_r}{y_r + a_r} N_{cr}^{B} \qquad (3)$$

N_{cr}^{B} مقاومت کمانشی الاستیک کلی BRB، شامل آثار سختی خمشی ناحیه اتصال و سختی پیچشی صفحات اتصال را مشخص میکند. در شکل۶ نیروی محوری در جهت افزایش مقادیر y_r به N_{cr}^{B} میل میکند. هرچند روند کمانش الاستیک زمانی که مهاربند به مقاومت نهایی خودش میرسد قطع میشود.

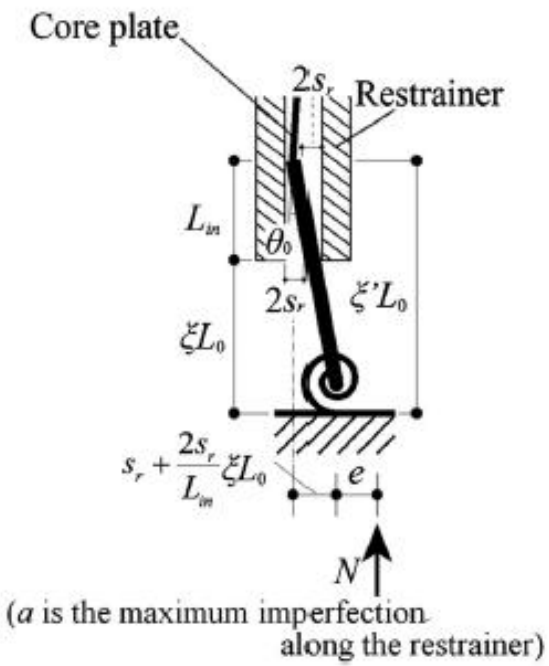


Figure 5. Assumed initial imperfection.

نقطه تقاطع نمودار کمانش الاستیک و مقاومت نهایی با عنوان حد پایداری تعریف میشود. هرگاه جایی که حد اکثر مقاومت محوری هسته ، N_{cr} ، از حد پایداری کوچکتر باشد ، مهاربند پایدار در نظر گرفته میشود و هسته BRB رفتار هیستریک عادی ای را نشان میدهد. زمانی که N_{cu} از حد پایداری تجاوز کند مفاصل پلاستیک درآن ناحیه تشکیل میشوند و رفتار

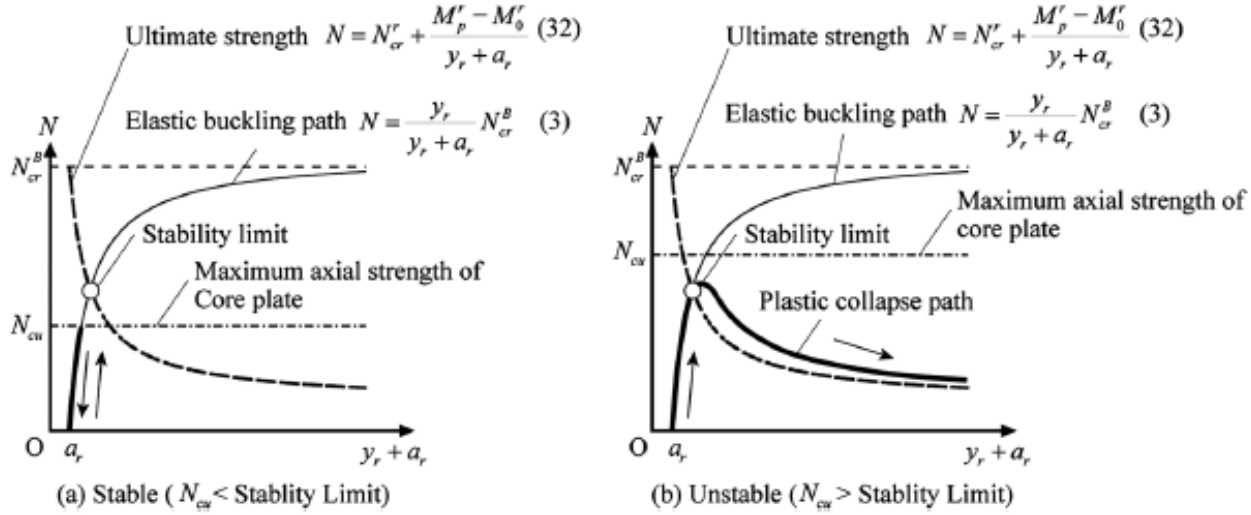


Figure 6. Buckling-restrained brace stability concepts and limits.

هیستریک قطع شده با مکانیزم فروپاشی کمانش کلی در نظر گرفته میشود.

مقادیر مقاومت نهایی مکانیزم های فروپاشی ممکن با استفاده از مدل های نشان داده شده در شکل ۷ محاسبه میشوند. چنان که در این شکل دبده میشود BRB با سختی پیچشی K_{Rg} در هر دو صفحه اتصال مدل میشود. یک خرابی (imperfection) اولیه در دو انتهای غلاف مدل میشود. زمانی که لنگر خمشی در انتهای غلاف از ظرفیت لنگر غلاف تجاوز کند، بار در BRB از حد نهایی مقاومتش تجاوز میکند که در نهایت منجر به کمانش میشود.

اولا صفحات اتصال (Gusset Plates) صلب فرض میشوند و تغییر شکل های خارج از صفحه ناحیه اتصال در طول زمان مکانیزم سینوسی شکل در نظر گرفته میشود. مطابق آنچه در تصویر ۷(a) و معادله ۴ نشان داده شده است

$$y = \frac{a_r x}{\xi L_0} + y_r \left[1 - \cos\left(\frac{\pi x}{2\xi L_0} \right) \right] \qquad (4)$$

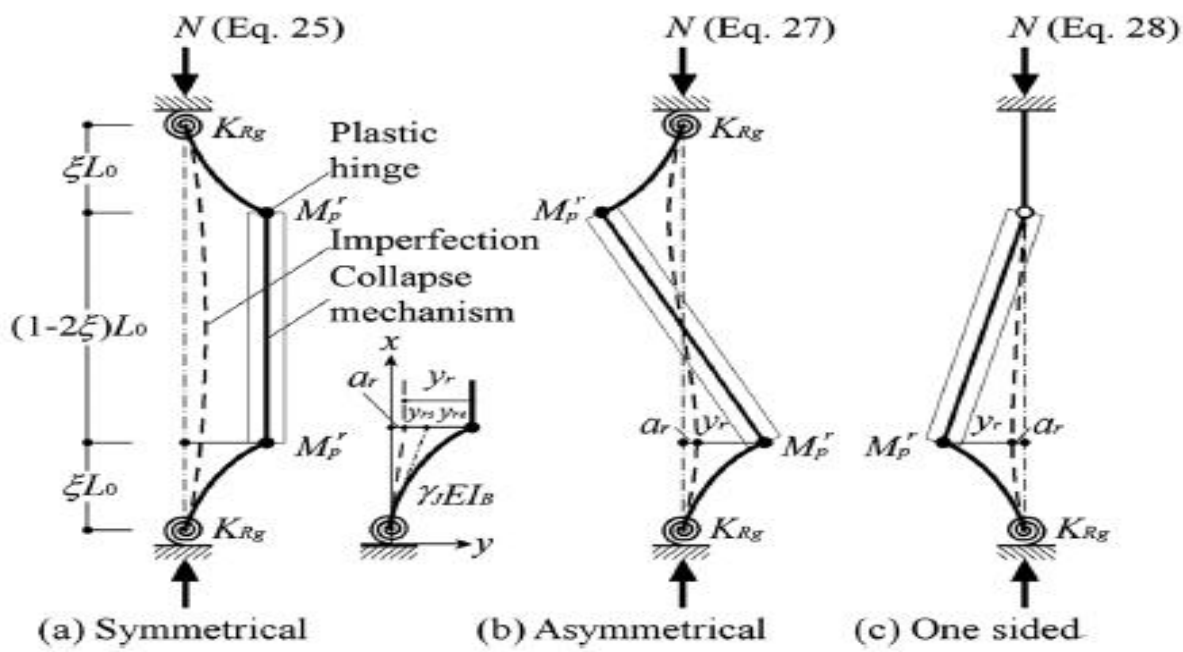


Figure 7. Collapse mechanisms with rotational springs at gusset plates.

انرژی کرنشی در دو ناحیه اتصال برابر است با:

$$U_\varepsilon = 2\int_0^{\xi L_0} \frac{\gamma_J E I_B}{2}\left(\frac{d^2}{dx^2}\left(y - \frac{a_r}{\xi L_0}\right)\right)^2 dx = \frac{\pi^4 \gamma_J E I_B y_r^2}{32(\xi L_0)^3} \tag{5}$$

زاویه چرخشی مفاصل پلاستیک از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta\theta_r = \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x=\xi L_0} - \frac{a_r}{\xi L_0} = \frac{\pi}{2\xi L_0} y_r \tag{6}$$

انرژی کرنشی پلاستیک موجود در مفاصل پلاستیک :

$$U_p = 2M_p^r \Delta\theta_r = \frac{\pi y_r}{\xi L_0} M_p^r \tag{7}$$

تغییر شکل محوری :

$$\Delta u_g = 2\cdot\frac{1}{2}\int_0^{\xi L_0}\left[\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \left(\frac{a_r}{\xi L_0}\right)^2\right] dx = \frac{\pi^2 {y_r}^2}{8\xi L_0} + \frac{2a_r y_r}{\xi L_0} \tag{8}$$

کار انجام شده:

$$T = N\Delta u_g = \frac{\pi^2\left(y_r^2 + 16a_r y_r/\pi^2\right)}{8\xi L_0} N \tag{9}$$

با معادله دیفرانسیل زیر

$$\frac{\partial\left(U_\varepsilon + U_p - T\right)}{\partial y_r} = \frac{\pi^4 \gamma_J E I_B y_r}{16(\xi L_0)^3} + \frac{\pi}{\xi L_0} M_p^r - \frac{\pi^2(y_r + 8a_r/\pi^2)}{4\xi L_0} N = 0 \tag{10}$$

$$N = \frac{\pi^2 \gamma_J E I_B}{(2\xi L_0)^2}\frac{y_r}{y_r + 8a_r/\pi^2} + \frac{4M_p^r}{\pi(y_r + 8a_r/\pi^2)} \tag{11}$$

با تقریب $8/\pi^2 \approx 1$ داریم:

$$N \approx \frac{\pi^2 \gamma_J E I_B}{(2\xi L_0)^2}\frac{y_r}{y_r + a_r} + \frac{4}{\pi}\frac{M_p^r}{y_r + a_r} \tag{12}$$

محاسبات مشابهی را میتوان برای حالت کمانش نامتقارن نشان داده شده در شکل ۷ (b) انجام داد. مطابق روند زیر:

$$U_p = \frac{y_r}{\xi L_0}\frac{\pi - 2\pi\xi + 4\xi}{1-2\xi}M_p^r \tag{13}$$

$$T \approx \frac{\pi^2 N}{8\xi(1-2\xi)L_0}\left(y_r^2 + 16a_r y_r/\pi^2\right) \tag{14}$$

$$N = \frac{\pi^2(1-2\xi)\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2}\frac{y_r}{y_r + 8a_r/\pi^2} + \frac{4(1-2\xi+4\xi/\pi)}{\pi(y_r+8a_r/\pi^2)}M_p^r \tag{15}$$

اگر $\xi = 0.25$ ، N را میتوان مطابق زیر محاسبه کرد:

$$N \approx \frac{\pi^2(1-2\xi)\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2}\frac{y_r}{y_r + a_r} + \frac{M_p^r}{y_r + a_r} \tag{16}$$

در صورتی که $M^r_P = 0$ و $a_r << y_r$ ، معادله ۱۶ به معادله ۲ تبدیل میشود. همانطور که در معادلات ۱۲ و ۱۶ اشاره شد، به طور کلی اگر انتهای اتصالات به صورت صلب متصل شده باشند مقاومت کمانشی کلی در حالت نامتقارن تعیین میگردد.

ثانیا با در نظر گرفتن سختی پیچشی نرمال شده طبقات میتوان $\xi\kappa_{Rg}$ را اینطور تعریف کرد:

$$\xi\kappa_{Rg} = \frac{K_{Rg}\xi L_0}{\gamma_J EI_B} \tag{17}$$

جابجایی اضافه که منجر به پیچش صفحه اتصال میشود با y_{rs} تعریف میشود. با این فرض که تغییر شکل ناشی از خمش ناحیه اتصال y_{re} با y_{rs} معادل شده است. انرژی کرنشی ذخیره شده در یک فنر خاص اینگونه بدست می آید:

$$U_\varepsilon = \frac{\pi^4\gamma_J EI_B {y_r}^2}{32(\xi L_0)^3}\left(\frac{\xi\kappa_{Rg}}{\xi\kappa_{Rg}+3}\right)^2 \tag{18}$$

پیچش فنر صفحه اتصال، پیچش مفصل پلاستیک وتغییر شکل محوری را میتوان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta\theta_s = \frac{y_r}{\xi L_0}\frac{3}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3} \tag{19}$$

$$\Delta\theta_r = \frac{\pi y_r}{2\xi L_0}\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3} + \frac{y_r}{\xi L_0}\frac{3}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3} = \frac{y_r}{2\xi L_0}\frac{\pi_{\xi}\kappa_{Rg}+6}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3} \tag{20}$$

$$\Delta u_g = \frac{y_r^2+2a_r y_r}{\xi L_0}\left(\frac{3}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3}+\frac{\pi^2}{8}\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3}\right) = \frac{y_r^2+2a_r y_r}{\xi L_0}\frac{\pi^2}{8}\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+24/\pi^2}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3} \tag{21}$$

انرژی ذخیره شده در فنرها، مفصل ها و کار کلی انجام شده را میتوان به شکل زیر محاسبه کرد:

$$U_s = \frac{\gamma_J EI_B y_r^2 {}_{\xi}\kappa_{Rg}}{2(\xi L_0)^3}\left(\frac{3}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3}\right)^2 \tag{22}$$

$$U_p = \frac{y_r}{\xi L_0}\frac{\pi_{\xi}\kappa_{Rg}+6}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3}M_p^r \tag{23}$$

$$T = \frac{\pi^2\left(y_r^2+2a_r y_r\right)}{8\xi L_0}\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+24/\pi^2}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+3}N \tag{24}$$

با $\partial(U_\varepsilon+U_s+U_p-T)/\partial y_r=0,$

داریم:

$$N \approx \frac{\pi^2\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2}\cdot\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+24/\pi^2}\cdot\frac{y_r}{y_r+a_r}+\frac{4}{\pi}\cdot\frac{M_p^r}{y_r+a_r}\cdot\frac{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+6/\pi}{{}_{\xi}\kappa_{Rg}+24/\pi^2} \tag{25}$$

اگر سختی پیچشی صفحات اتصال ناچیز باشد شاید بتوان معادله ۲۶ را به جای ۲۵ به کار برد:

$$N = \frac{M_p^r}{y_r+a_r} \tag{26}$$

مقاومت مکانیزم فروپاشی نامتقارن را میتوان از روند مشابهی برای بدست آوردن معادله ۲۷ حاصل نمود:

$$N \approx \frac{\pi^2(1-2\xi)\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2} \cdot \frac{\xi\kappa_{Rg}}{\xi\kappa_{Rg}+24/\pi^2} \cdot \frac{y_r}{y_r+a_r} + \frac{M_p^r}{y_r+a_r} \tag{27}$$

از اینرو مقاومت حالت کمانش یک طرفه را میتوان اینگونه بیان کرد:

$$N \approx \frac{\pi^2(1-2\xi)\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2} \frac{\xi\kappa_{Rg}}{(1-\xi)\left(\xi\kappa_{Rg}+24/\pi^2\right)} \frac{y_r}{y_r+a_r} + \frac{M_p^r}{y_r+a_r} \tag{28}$$

اگر $a_r << y_r$ معادله ۲۷ به شکل زیر خواهد بود:

$$N \approx \frac{\pi^2(1-2\xi)\gamma_J EI_B}{(2\xi L_0)^2} \cdot \frac{\xi\kappa_{Rg}}{\xi\kappa_{Rg}+24/\pi^2} + \frac{M_p^r}{y_r+a_r} = N_{cr}^r + \frac{M_p^r}{y_r+a_r} \tag{29}$$

با جایگذاری $a_r N/(N_{cr}^B - N)$ ازمعادله ۲۹ ظرفیت انتقال لنگر مقاوم مورد نیاز را میتوان مطابق زیر بدست آورد:

$$M_p^r = \frac{a_r}{1-N/N_{cr}^B}\left[N - N_{cr}^r\right] \tag{30}$$

اگر مهاربند تابع یک نیروی محوری با انحراف نسبی خارج از صفحه باشد، لنگر خمشی مطابق شکل ۸ بوجود می آید:

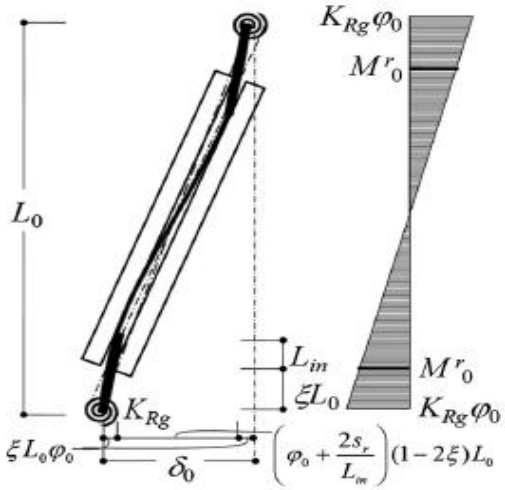


Figure 8. Additional bending moment under out-of-plane drift.

$$M_0^r = (1-2\xi)K_{Rg}\left[\frac{\delta_0}{L_0} - \frac{2s_r(1-2\xi)}{L_{in}}\right] \geqslant 0 \tag{31}$$

با قرار دادن M_o^r مقاومت نهایی به این صورت بدست می آید:

$$N = N_{cr}^r + \frac{M_p^r - M_0^r}{y_r + a_r} \tag{32}$$

اگر N جایگزین نیروی محوری در معادله ۳۰ شود پایداری مطابق زیر بیان میشود:

$$M_p^r - M_0^r \geqslant \frac{a_r}{1 - N_{cu}/N_{cr}^B}\left(N_{cu} - N_{cr}^r\right) \tag{33}$$

در معادله ۳۳ N^B_{cr} را میتوان با تحلیل مقدار ویژه بدست آورد. اگر y_r را برابر یک فرض کنیم کمترین مقدار تعیین شده در حالت متقارن الاستیک اینگونه است:

$$\begin{cases} N_{cr}^B = \dfrac{4\pi^2 EI_B}{L_0{}^2}\dfrac{{}_L\kappa_{Rg}^2 + 10{}_L\kappa_{Rg} + 16}{{}_L\kappa_{Rg}^2 + 14{}_L\kappa_{Rg} + 64} \\ {}_L\kappa_{Rg} = K_{Rg}\dfrac{L_0}{EI_B} \end{cases} \tag{34}$$

برای ارضای معادله ۳۳ دو رویکرد را میتوان دنبال نمود:

۱. اگر $\xi\kappa_{Rg}$ به اندازه کافی بزرگ باشد بخش چپ معادله ۳۳ به صفر میل میکند. برای ارضای معادله ۳۳ N^r_{cr} باید از N_{cu} بزرگتر باشد.
۲. کاهش M^r_o و N^r_{cr} با کاهش $\xi\kappa_{Rg}$ و بوجود آمدن مقاومت خمشی برای ارضای معادله ۳۳. این رویکرد مطابق انتقال لنگر خمشی در ناحیه تکیه گاه غلاف است.

$$\left[(1-2\xi)M_p^g - M_0^r\right] + \left(M_p^r - M_0^r\right) \geqslant \frac{a_r}{1 - N_{cu}/N_{cr}^B}N_{cu} \tag{35}$$

آزمایشات بارگذاری رفت وبرگشتی با انحراف خارج از صفحه

برای تایید شرایط پایداری پیشنهاد شده آزمایشات بارگذاری رفت وبرگشتی بر روی BRB های با انحراف خارج از صفحه انجام شد. این برنامه آزمایشی بحرانی ترین حالتی که حداکثر جابجایی نسبی داخل صفحه در ۱٪ جابجایی نسبی خارج از صفحه اتفاق می افتد را شبیه سازی کرد. وضعیت انجام آزمایش در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده

شده است و ماتریس آزمایش در جدول ۱ خلاصه شده. جنس هسته JIS-SN400B بود (متوسط مقاومت تسلیم 270 MPa) و اندازه مقطع عرضی هسته A_r =12mm*90mm است. همچنین غلاف، یک مقطع قوطی پر شده از ملات با طول یک طرف 125 mm و ضخامت 2.3 mm یا یک لوله دایره ای با قطر خارجی 139.8 mm و ضخامت دیواره 3.2 mm است. دو نوع صفحه اتصال در آزمایشات استفاده شده اند، نوع عادی و نوع سخت. طول داخلی قسمت سخت صفحه هسته درون غلاف، L_{in} ، 90 mm و 180 mm انتخاب شده که به ترتیب معادل یک و دو برابر عرض صفحه هستند. به علاوه فضای بین عرض صفحه و غلاف از 1.0 mm تا 2.0 mm تغییر میکند.

قبل از هر آزمایش، یک انحراف خارج از صفحه معادل ۱٪ رادیان جابه جایی نسبی خارج از صفحه برای هر نمونه در نظر گرفته شد. برای هر بارگذاری رفت وبرگشتی بیش از ۳٪ تغییر شکل محوری نرمال شده به کار گرفته شد. مطابق پروتکل بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱۲. اینجا، نیروی محوری نرمالیزه شده که به طور تقریبی با زاویه انحراف طبقه معادل است، نسبت تغییر شکل محوری به طول پلاستیک صفحه است. مقادیر مورد انتظار نقص اولیه برای هر نونه در جدول ۲ خلاصه شده است.

حلقه های هیسترزیس بدست آمده از آزمایشات بارگذاری رفت و برگستی برای هر نمونه در شکل ۱۳ نشان داده شده. مجموع تغییر شکل پلاستیک نرمال شده و انرژی جذب شده تا ناپایداری در هر شکل نشان داده شده است. نونه MRL 1.0 S1H (شکل ۱۲-a) با صفحات اتصال سخت شده تا گسیختگی هسته بعد از ۶ دور بیش از ۳,۵ ٪ تغییر شکل محوری نرمال رفتار هیستریک پایدار نشان داد.

مشابها MRL 2.0S1 (شکل 12-b) با صفحات اتصال عادی تا ۱۲ دور ۳ درصد تغییر شکل محوری نرمال رفتار

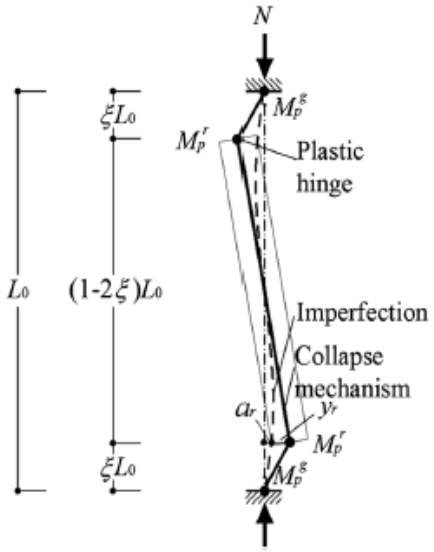


Figure 9. Collapse mechanism with plastic hinges at gusset plate ends.

هیسترزیس پایدار از خود نشان داد. این عملرد برای مهاربندهای مستهک کننده انرژی رضایتبخش تلقی میشوند. MRL 2.0S2 (شکل 12-c)، که در مقایسه با MRL 2.0S1 نقص بزرگتری دارد، تا دور دوم در ۳٪ 36 mm تغییر شکل محوری نرمال شده رفتار هیستریک پایدار از خود نشان داد. MCL 2.0S2 (شکل 12-d) که در آن از یک لوله فولادی دایره ای پر شده از ملات استفاده شده، تا دور دوم در ۲٪ (27.6 mm) تغییر شکل محوری نرمال در هر بار که ناپایداری خارج از صفحه اتفاق بیفتد رفتار هیستریک پایدار نشان داد، MRL 2.0S1 (شکل 12-e) تا پیش از دور دوم ۱٫۰٪ (13.8 mm) تغییر شکل محوری نرمال شده رفتار هیستریک پایدار نشان داد و هسته به تسلیم رسید، (بعد از اینکه کمانش کلی آزمایش شده با مفصل گلوگاه آزمایش شد) MRL 2.0S2 (شکل 12-f) تنها برای یک دور ۰٫۵٪ (6.9 mm) تغییر شکل محوری نرمال شده یک حلقه هیسترزیس پایدار نشان داد، سپس کمانش کلی همراه با تشکیل مفصل در گلوگاه را تجربه کرد.

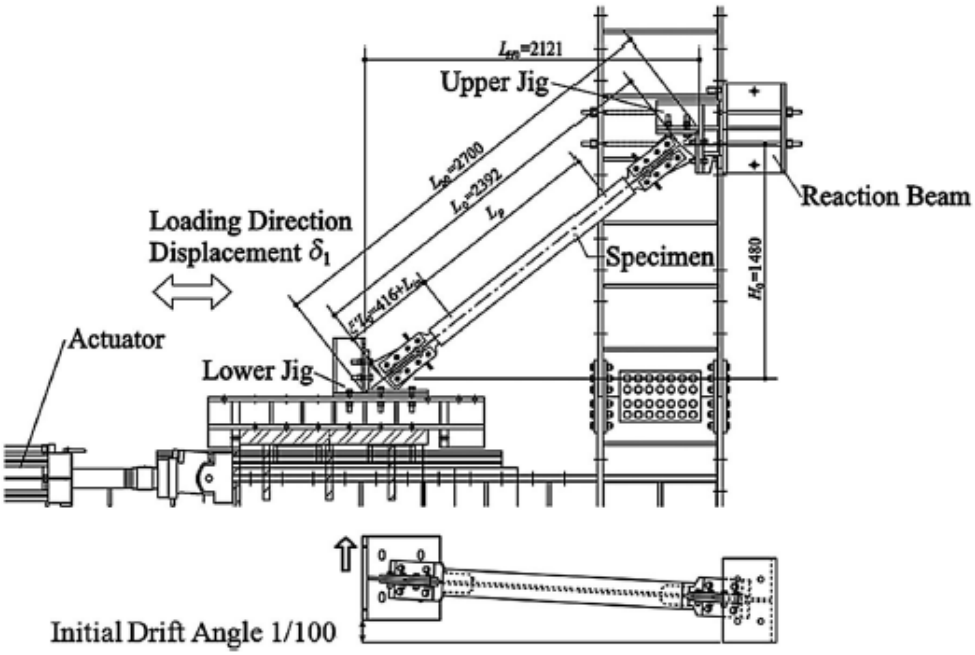


Figure 10. The cyclic loading test setup.

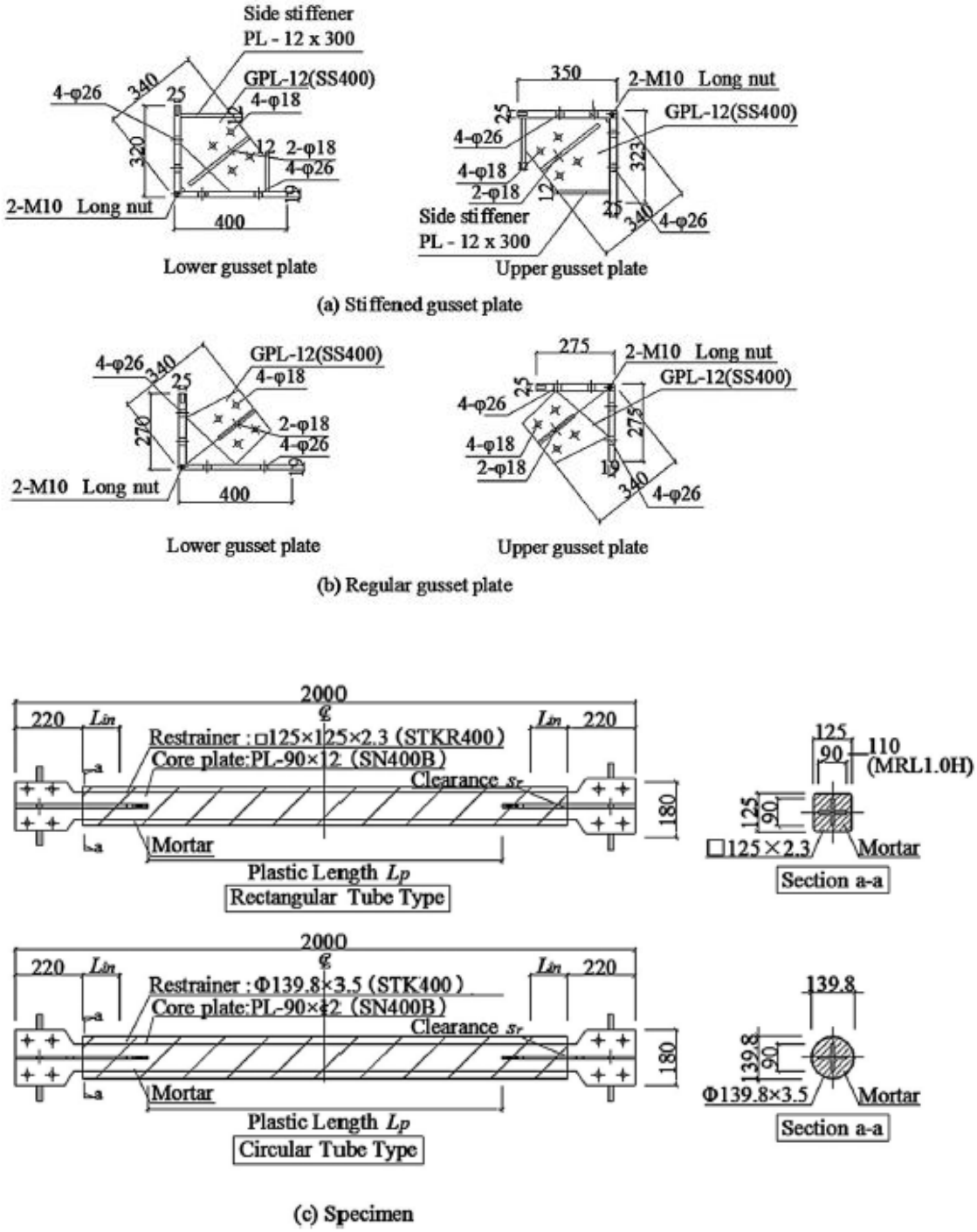


Figure 11. The loading protocol.

Table I. Test matrix.

Specimen	A_c (mm^2)	σ_{cy} (N/mm^2)	EI_B (Nmm)	σ_{ry} (N/mm^2)	K_{Rg} (Nmm)	$\gamma_J EI_B$ (Nmm)	L_0 (mm)	L_{in} (mm)	L_p (mm)	s_r (mm)	ξL_0 (mm)	$\xi' L_0$ (mm)
MRL1.0S1H	1080	266.0	5.81×10^{11}	305.0	6.90×10^{8}	1.20×10^{12}	2392	90	1380	1	416	506
MRL2.0S1	1080	266.8	5.81×10^{11}	385.8	9.73×10^{7}	1.20×10^{12}	2392	180	1200	1	416	596
MRL2.0S2	1080	266.8	5.81×10^{11}	391.5	9.73×10^{7}	1.20×10^{12}	2392	180	1200	2	416	596
MCL2.0S2	1080	269.7	7.14×10^{11}	365.7	9.73×10^{7}	1.20×10^{12}	2392	180	1200	2	416	596
MRL1.0S1	1080	266.8	5.81×10^{11}	391.5	9.73×10^{7}	1.20×10^{12}	2392	90	1380	1	416	506
MRL1.0S2	1080	266.8	5.81×10^{11}	391.5	9.73×10^{7}	1.20×10^{12}	2392	90	1380	2	416	506

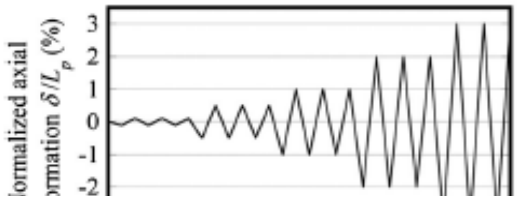


Table III. Bending capacities at restrainer ends.

Specimen	Yield bending strength of cruciform zone (kNm)	Yield bending strength of restrainer (kNm)	M_p^r (kNm)
MRL1.0S1H	2.46	2.97	2.46
MRL2.0S1	5.50	8.38	5.50
MRL2.0S2	6.56	8.56	6.56
MCL2.0S2	6.50	35.68	6.50
MRL1.0S1	6.78	4.28	4.28
MRL1.0S2	6.78	4.28	4.28

MCL2.0S2	180	2	0.02
MRL1.0S1	90	1	0.02
MRL1.0S2	90	2	0.04

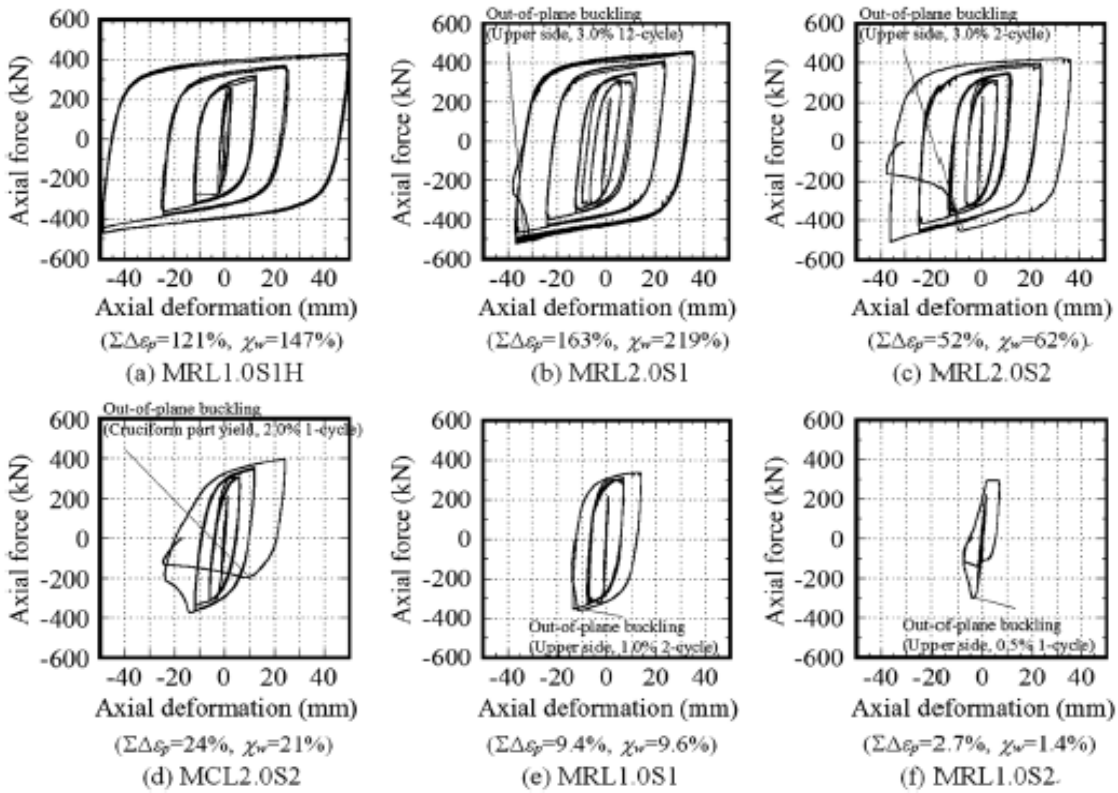


Figure 13. Axial force-deformation relationship.

Specimen	$N_{cr}^{B}(kN)$	a_r (mm)	N_{cr}^{r} (kN)	N_{cu} (kN)	M_o^{r} (kNm)	Failure cycle at experiment	Stability limit (kN)		Failure axial force in experiment (kN)
							N_{lim1} (Equation (39))	N_{lim2} (Equation (41))	
MRL1.0S1H	1880	11.4	695	431	0.00	None	818	1390	(452)
MRL2.0S1	1158	6.80	82	432	0.09	3.0%-12cycle	520	520	535
MRL2.0S2	1158	12.4	82	432	0.00	3.0%-2cycle	419	410	507
MCL2.0S2	1389	12.4	82	437	0.00	1.0%-2cycle	440	432	375
MRL1.0S1	1158	11.4	111	432	0.00	0.5%-1cycle	367	345	362
MRL1.0S2	1158	21.7	111	432	0.00	0.5%-1cycle	264	217	300

*N_{cu} is estimated as $1.5A_c\sigma_{cy}$ (approximately equivalent to axial forces of the first 3% normalized axial deformation).
( ): Exceptionally, MRL1.0S1H did not fail, so only the maximum applied axial force is shown above.

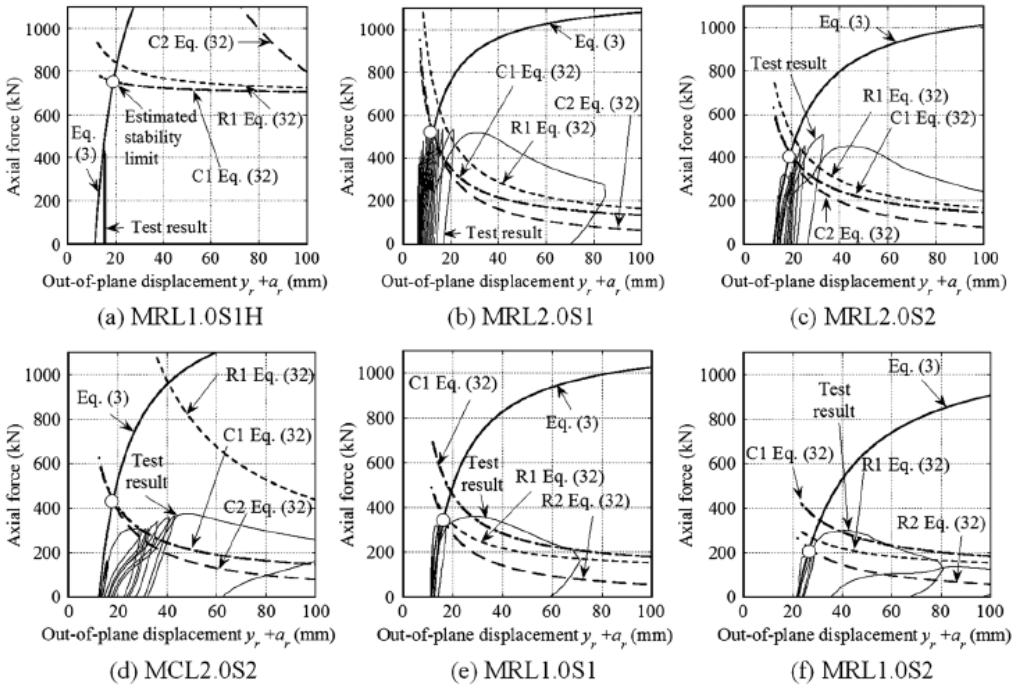


Figure 14. Axial force versus out-of-plane displacement relationship.

مقایسه نیروهای محوری گسیختگی تخمینی N_{hm} که ازN_{lim1} و N_{lim2} کوچکتر است با نیروی محوری حداکثر است نتایج تجربی از شکل ۱۵ نشان داده شده است می توان شاهد کرد که نتایج معادلات پیشنهادی با کمی اختلاف با نتایج تجربی یکسان هستند شرط ایمنی داده شده به طور موفقیت آمیزی عملکرد هر نمونه آزمایش را تخمین زده و بنابراین معتبر شناخته می شود.

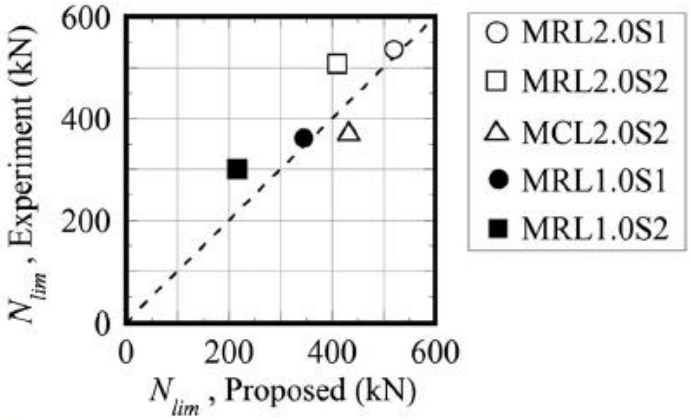


Figure 15. Distribution of proposed/experimental accuracy by specimen type.

نتایج

وقتی BRB ها رفتار کمانش کلی از خود نشان میدهند مقدار معینی لنگر خمشی بین مقطع هسته و انتهای محفظه غلاف منتقل میشوند، که در این مقاله با عنوان ظرفیت انتقالی لنگر غلاف شناخته شد. ظرفیت انتقالی لنگر غلاف به ساختار داخلی BRB و تاثیرات مهم پایداری BRB بستگی دارد(همانگونه که در مقاله توضیح داده شد) . این مقاله مجموعه ای فشرده از معادلات جهت محاسبه پایداری کلی BRB را با در نظر گرفتن ظرفیت انتقال لنگر غلاف پیشنهاد میکند. معادلات پیشنهادی طیف گسترده ای از اتصالات BRB از تکیه گاه صلب تا مفصلی را پوشش میدهد.

آزمایشات بارهای رفت و برگشتی بر روی BRB های با ابعاد کامل و با انحراف اولیه خارج از صفحه و مقادیر سختی گوناگون جهت تایید اعتبار شرایط پایداری و معادلات پیشنهادی انجام شدند. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

۱. شرایط پایداری BRB با تشکیل معادلات ساده مانند معادلات ظرفیت انتقال لنگر غلاف، سختی پیچشی در صفحات اتصال، نقایص اولیه که توسط فضای خالی بین هسته و صفحه کنترل میشوند، و انحراف های خارج از صفحه مورد انتظار ، تبیین شد.
۲. در آزمایشات بارهای رفت و برگشتی با انحراف خارج از صفحه اولیه، نمونه ها با نواحی داخلی کوچکتر و فضاهای خالی بزرگتر رفتار هیستریک پایدارتری نشان دادند که ممکن است نشان دهنده این حقیقت باشد که ظرفیت انتقال لنگر غلاف به شدت بر پایداری BRB موثر است.

به علاوه، نمونه ها با صفحات اتصال سخت رفتار هیستریک پایدارتر و ظرفیت محوری بالاتری حتی با ناحیه داخلی کوچکتر از خود نشان دادند.

۳. معادله سازی پیشنهادی را میتوان برای محاسبه مستقیم مقاومت حد پایداری BRB ها به کار برد. نتایج نشان داده اند که مقاومت های حد پایداری محاسبه شده با نتایج تجربی نمونه های کمانش شده موافقند، بدین ترتیب معادلات پیشنهادی معتبر هستند.