مهاربند مقاوم در برابر کمانش، رویکردی نوین در ساخت سازه های مقاوم در برابر زلزله

سید مصطفی شارع- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه- دانشگاه سیستان و بلوچستان

تلفن: 09155103600، پست الکترونیکMostafa.share@gmail.com

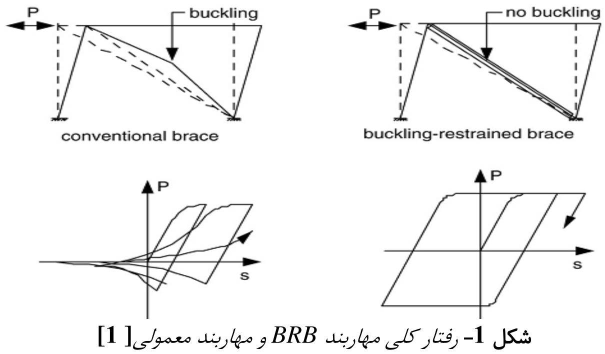
چکیده

استفاده از مهاربند بعنوان یک سیستم باربر جانبی یکی از متداولترین روشها برای تحمل نیروهای ناشی از زلزله است.این سیستمها برمبنای رفتارمحوری، کششی فشاری تعیین می گردد. یکی از نقاط ضعف این سیستم امکان کمانش عضو فشاری ودر نتیجه کاهش ظرفیت باربری آن می باشد. در سالهای اخیر با ظهور یک نوع مهاربند جدید بنام مهاربند مقاوم در برابر کمانش(BRB) این مشکل تا حدود بسیاری مرتفع شده است.این مهاربند دارای رفتار یکسان در کشش و فشار است و قاب های مهاربندی شده با آن قابلیت جذب انرژی بالایی را دارا هستند. استفاده از این مهاربند هم در ساخت ساختمانهای جدید و هم در بحث مقاوم سازی ساختمانهای موجود بسیار مفید می باشد. در این مقاله ابتدا مهاربند مقاوم در برابر کمانش و قسمت های مختلف آن معرفی می شوند. در ادامه به بیان روابط بدست آمده از تحلیل پایداری این سیستم، انواع اتصالات آن و نیز نکاتی پیرامون طراحی قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش(BRBF) می پردازیم.

کلید واژه: مهاربند مقاوم در برابر کمانش، قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش

مقدمه

قابهای مهاربندی شده با مهاربند همگرا(CBF) از جمله سیستمهای باربر جانبی است که استفاده از آن متداول است.این قابها در برابر نیروهای زلزله عملکرد مناسبی از خود نشان نمی دهند. علت این رفتار نامناسب کمانش مهاربند در نیروهای فشاری بزرگ است. از این رو مهاربند دارای رفتار هیسترزیس نامتقارن و افت مقاومت تحت بارهای سیکلیک می شودو در نتیجه سازه قابلیت جذب انرژی را از دست داده و منهدم می شود. لذا باجلوگیری از کمانش مهاربند، امکان تسلیم فشاری آن فراهم می گردد. مهاربند های مقاوم در برابر کمانش (Buckling-Restrained Brace) و یا به اختصار BRB در حقیقت نوع جدیدی از مهاربند های هم مرکز هستند که در مقابل کمانش محافظت شده اند. در نتیجه این مهاربند دارای منحنی هیسترزیس نسبتا متقارن و رفتار یکسان در کشش و فشار است. در شکل 1 تفاوت یک نمونه منحنی هیسترزیس BRB و یک مهاربند معمولی را مشاهده می کنید.



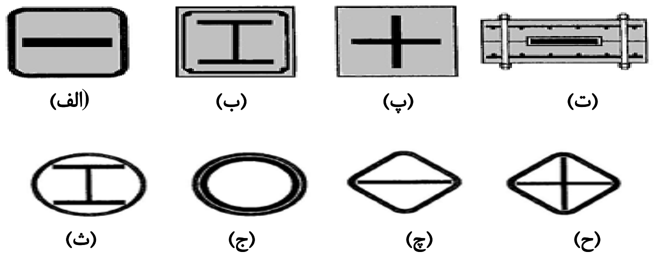
شکل 1- *رفتار کلی مهاربند BRB و مهاربند معمولی* **[1]**

معرفی BRB

ایده مهاربند مقاوم در برابر کمانش در اواسط دهه 70 در ژاپن شکل گرفت. انواع مختلفی از BRB در فاصله سالهای 1980 تا 1990 در ژاپن ساخته شد . در 1998 این فن آوری به ایالات متحده آمریکا انتقال یافت و از سال 2000 بعنوان یک عضو موثر لرزه بر مورد استفاده قرار گرفت. با وجود

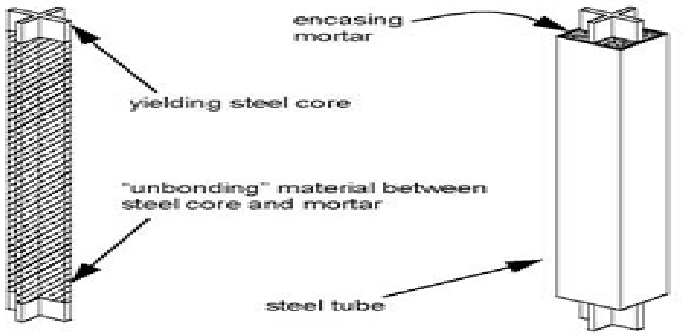
Computer For Civil Softeare Engineering Group : www.CCSofts.com , www.CompCivil.com

توسعه اشکال مختلف از BRB همه آنها دارای مفاهیم مشترکی هستند. ویژگی اصلی تمام آنها محصور سازی هسته فولادی توسط یک مکانیزم خارجی برای جلوگیری از وقوع کمانش بود. فوجیموتو (Foojimoto)در 1988 رفتار یک نوع BRB شامل هسته فولادی جا داده شده درون یک غلاف فلزی پر شده با ملات را مورد مطالعه قرار داد (شکل2- الف) . ناگائو و تاکابایاشی در 1990 نوع دیگری از BRB شامل یک هسته فلزی که در یک عضو بتن مسلح قرار داده می شود را مطرح کردند(شکل 2- ب). در ادامه اشکال دیگری از انواع BRB آورده شده است(شکل2).

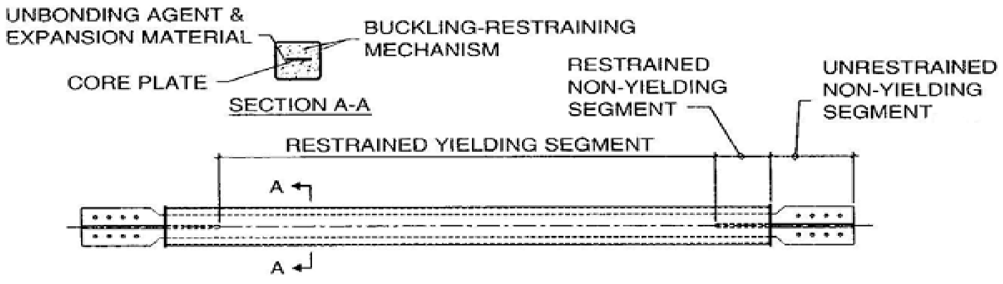


شکل2-*اشکال مختلف BRB در ژاپن* [1]

عمومی ترین شکل BRB شامل یک هسته فولادی است که درون یک غلاف فلزی قرار می گیرد . فضای خالی بین هسته و غلاف توسط یک ماده پر کننده مناسب مانند ملات پر می شود(شکل2- الف)[2] . قبل از ریختن ملات یک ماده لغزنده با یک گپ هوای کوچک بین هسته فولادی و ملات فراهم می شود. این ماده و همچنین گپ هوا، جهت جلوگیری از انتقال نیروی محوری از هسته مهاربندی به غلاف و ملات تعبیه می شود. در حقیقت غلاف فولادی وملات فقط نقش جلوگیری از کمانش مهاربند را بر عهده داردو تحمل نیروی محوری بر عهده هسته فولادی است (شکل 3).



شکل 3- *پیکر بندی یک نمونه BRB*



شکل 4 -*اجزای مختلف BRB*

اجزای BRB [2]

بطور کلی می توان 5 قسمت مجزا را برای هر BRB مشخص کرد. شکل 4 اجزای مختلف یک BRB را نشان می دهد. در ادامه به بررسی هر یک از این اجزا می پردازیم.

1- قطعه جاری شونده محصور شده

این بخش از یک یا چند صفحه فولادی بصورت مستطیلی یا صلیبی تشکیل شده است . تحمل نیروی محوری صرفا بر عهده این قسمت است و سطح مقطع آن با توجه به مقاومت محوری مورد نیاز مهاربند تعیین می شود . بدلیل اینکه این بخش برای وارد شدن به ناحیه پلاستیک طراحی می شود،

استفاده از فولاد نرمه در ساخت آن توصیه می شود. بعنوان یک جایگزین از فولاد پر مقاومت کم آلیاژ نیز می توان استفاده کرد . همچنین باید از مصالح فولادی با مقاومت تسلیم مشخص و بدون نوسانات زیاد استفاده کرد . این نوع مصالح برای طراحی ظرفیت قابل اطمینان یک قاب مهاربندی شده با BRB ضروری است.

2- بخش الاستیک محصور شده

این ناحیه بوسیله غلاف و ملات احاطه می شود . برای اطمینان از پاسخ الاستیک، سطح مقطع آن نسبت به ناحیه الاستیک مقدار بیشتری اختیار می شود . این کار با عریض کردن بخش جاری شونده محصور شده صورت می گیرد . برای جلوگیری از تمرکز تنش، انتقال در عرض باید به آرامی صورت گیرد . همچنین می توان با جوش دادن سخت کننده مساحت این ناحیه را افزایش داد.

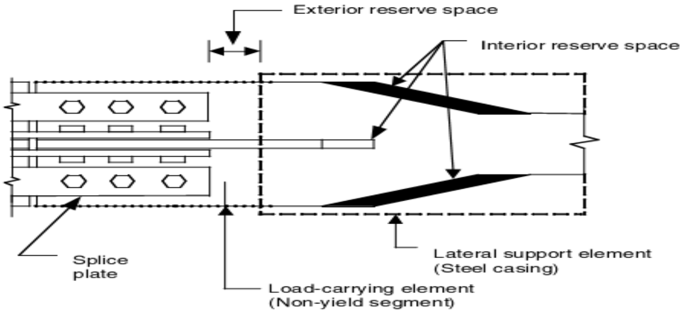
3- بخش الاستیک محصور نشده

این بخش در ادامه قسمت الاستیک محصور شده است و مهاربند را به قسمت اتصال وصل می کند . این ناحیه بطور عمومی برای اتصال با بولت طراحی می شود،ولی برای دیگر انواع اتصال مانند اتصال یا پین و نیز اتصال با جوش هم می تواند طراحی گردد . دو نکته در طراحی این قسمت باید در نظر گرفته شود. 1- جلوگیری از کمانش این ناحیه 2- سهولت در نصب و امکان برداشتن آن.

4- مصالح جدا کننده و انبساطی

کارایی این مواد لغزنده در حذف یا به حداقل رساندن انتقال نیروی برشی بین هسته جاری شونده ومکانیزم مقاوم در برابر کمانش (ملات و غلاف) است. موادی مانند لاستیک ، پلی اتیلن ، روغن سیلیکون ، نوار ماستیک و ... از این جمله است. ضخامت این لایه با توجه به نوع ماده بین 0.15 تا 2 میلی متر متفاوت است[1] . بدلیل مکانیزم محصور شدگی امکان کمانش هسته فولادی در مدهای بالاتر وجود دارد . به همین دلیل فضای خالی بین هسته و ملات باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا به فولاد اجازه انبساط در مود فشاری را بدهد . در غیر این صورت اصطکاکی که توسط نیروهای تماسی بین فولاد منبسط شونده و ملات بوجود می آید ، باعث می شود مکانیزم محصور شدگی مقداری نیروی محوری تحمل کند . از طرفی اگر این فضا بیش از اندازه بزرگ باشد، کمانش و انحنای همراه آن خیلی بزرگ می شود و سبب کاهش مقاومت خستگی مهاربند در بارهای سیکلیک می شود . در تخمین فاصله خالی بین ملات و هسته فولادی باید مقدار ضریب پواسون 0.3 در حالت الاستیک و 0.5 در حالت جاری شدن در نظر گرفته شود . طراحی فضای خالی همچنین بر اساس بیشینه کرنش نیز باید در نظر گرفته شود . این فضای خالی معمولا بین 0.7 تا 3.5 میلی متر متغیر است[1] .

اگر در بین قطعه محصور شده جاری شونده و قطعه الاستیک محصور شده تغییری در مساحت ایجاد گردد، باید یک فضای خالی در طول ،جلوی قسمت جاری شونده فراهم شود تا از تماس بین قطعه فولادی و ملات جلوگیری کند . چنین تماسی سبب می شود بطور غیر منتظره ای مقاومت فشاری مهاربند نسبت به نیروی طراحی فراتر رود که این افزایش از نقطه نظر طراحی ظرفیتی مطلوب نخواهد بود (شکل 5).در شکل 5 یک فضای خالی خارجی را نیز مشاهده می کنید که از تماس میان ورقهای وصله در ناحیه اتصال و مکانیزم محصور شدگی جلوگیری می کند .



شکل 5

5- مکانیزم محصور شدگی

این مکانیزم بطور معمول ترکیبی از ملات و غلاف فولادی است . ابعاد غلاف برای جلوگیری از کمانش مهاربند طراحی می شود . ملات علاوه بر پر کنندگی در جلوگیری از کمانش موضعی هسته فولادی بسیار موثر است . لذا طرح اختلاط و عمل آوری صحیح برای مقاومت فشاری کافی ملات ضروری است.

تحلیل پایداری[3]

محققین سه مد کمانشی قابل تمایز را در BRB مطرح ساخته اند . کمانش کلی مهاربند ، کمانش هسته فولادی در مدهای بالاتروکمانش پیچشی پلاستیک قسمتی از مهاربند که توسط غلاف محافظت نشده است . در این بخش به بیان روابط ارائه شده برای هر یک از این سه حالت می پردازیم.

1- کمانش خمشی کلی مهاربند

کمانش خمشی کلی را می توان مستقیما از طریق معیار های کمانش اولر در غلاف فلزی بدست آورد. بار کمانش مهاربندی به طول L بصورت زیر بدست می آید.

$$P_{cr} = P_e = \frac{\pi^2}{(KL)^2}(E_i I_i + E_0 I_0)$$

در این رابطه KL طول کمانشی موثر مهاربند است(K=1 برای دو انتها مفصلی و K=2 برای دو انتها گیردار) . $E_i I_i$ صلبیت خمشی هسته فولادی مهاربند و $E_0 I_0$ صلبیت خمشی غلاف و ملات است. با صرف نظر کردن از صلبیت خمشی هسته فولادی و ملات معادله بالا بصورت زیر بدست می آید.

$$P_{cr} = P_e = \frac{\pi^2 EI_{tube}}{(KL)^2}$$

E و I_{tube} بترتیب مدول الاستیسیته یانگ و ممان اینرسی غلاف فلزی هستند.

در نتیجه اگر P_e از بار تسلیم هسته فولادی $(P_y = \sigma_y A_{core})$ بیشتر باشد پایداری کلی مهاربند تضمین می شود. البته واتانابه (Watanabe) و همکارانش در 1988 با انجام آزمایشات سیکلیک بر روی نمونه های مختلف BRB نسبت $P_{cr} / P_y > 1.5$ را برای طراحی غلاف پیشنهاد کرد[2].

2- کمانش هسته فولادی در مدهای بالاتر

کارایی مهاربند مقاوم در برابر کمانش با جلوگیری از کمانش موضعی هسته فلزی در طول محافظت شده آن افزایش می یابد. بار بحرانی هسته فولادی در مدهای بالاتر را می توان از روش انتگرال گیری مستقیم یا به کمک روش انرژی بصورت زیر بدست اورد.

$$P_{cr} = 2\sqrt{\beta E_t I_i}$$

در این رابطه β ثابت توزیع فنر تعریف می شود که نشان دهنده سختی در واحد طول ملات ریخته شده است. I_i ممان اینرسی و E_t مدول تانژانت هسته فولادی است. در نتیجه بمنظور جلوگیری از کمانش هسته فولادی مهاربند در مدهای بالاتر باید $P_{cr} \geq \sigma_y A_i$ باشد. در نتیجه خواهیم داشت.

$$\beta \geq \frac{\sigma_y^{\,2} A_{core}^{\,2}}{4 E_i I_i}$$

ثابت توزیع فنر β را می توان با محاسبه مدول های فشاری یک بعدی بتن که بطور جانبی محفوظ شده است و همچنین بطور طولی توسط بتن مجاور محصور است، بدست آورد.با فرض شرایط کرنش مسطح خواهیم داشت.

$$\beta = E_c \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

E_c و ν مدول یانگ و نسبت پواسون ملات یا بتن پر کننده است.

3- کمانش پیچشی پلاستیک در ناحیه الاستیک محصور نشده مهاربند

سومین مد کمانشی BRB کمانش پیچشی پلاستیک قسمتی از هسته است که توسط غلاف محافظت نشده است. در تحلیل پایداری هر بال این مقطع صلیبی شکل همانند یک صفحه تحت فشار یکنواخت که در 3 طرف بطور ساده مهار شده و در طرف دیگر آزاد است در نظر گرفته می شود .تنش بحرانی تحت کمانش پیچشی پلاستیک بصورت زیر بدست می آید.

$$\sigma_{cr} = \frac{E_t}{3}\left[\frac{\pi^2 b^2}{3b^2} + 1 + \frac{3\sigma_y}{E_t}\right]\frac{t^2}{b^2}$$

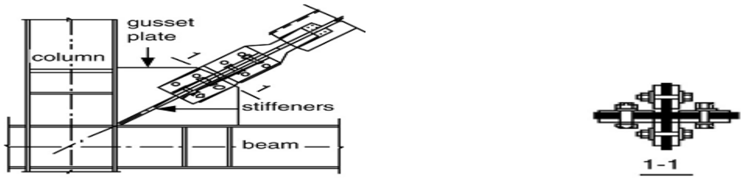
در این رابطه E_t مدول افزایش طول تانژانت است، σ_y تنش تسلیم هسته، L طول، b عرض و t ضخامت هر یک از 4 بال مقطع است. مشابه این رابطه برای دیگر اشکال مهاربند با استفاده از تئوری افزایشی پلاستیسیته بدست می آید. برای کسب جزییات بیشتر می توان به مرجع[3] مراجعه کرد.

اتصالات مهاربند BRB

در حال حاضر سه شکل برای اتصال انتهای مهاربند به قاب مورد استفاده قرار می گیرد.1- اتصال استاندارد با بولت.2- اتصال اصلاح شده با بولت.3- اتصال بوسیله پین.

1- اتصال استاندارد با بولت[1]

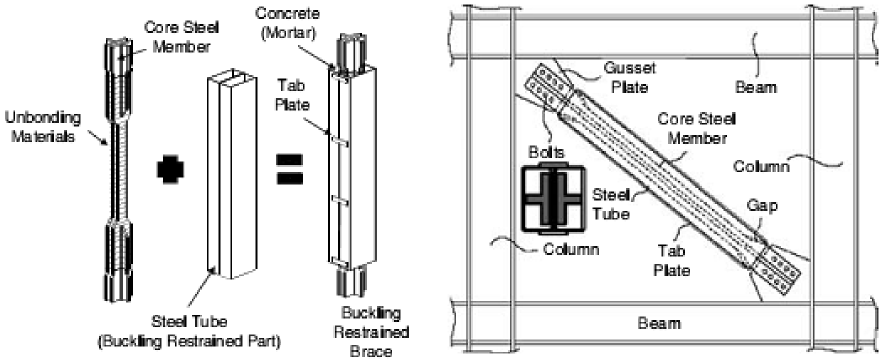
عمومی ترین شکل اتصال مهاربند BRB به قاب استفاده از 8 ورق وصله و 2 مجموعه بولت است(شکل6).



شکل6- جزییات اتصال استاندارد با بولت

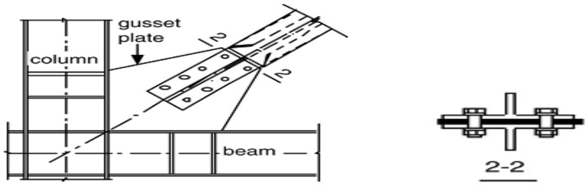
2- اتصال اصلاح شده با بولت[1، 2]

بمنظور کاهش ابعاد صفحه اتصال و همچنین بهبود نصب مهاربند،سیستم BRB دوغلافه توسط Tsai و Lai در سال 2002 مطرح شد.جزییات این پیکربندی از BRB در شکل 7 قابل مشاهده است.



شکل 7- BRB دو غلافه

همان طور که از شکل 7 پیداست این نوعBRB ترکیبی از دو قسمت مشابه است.هر قسمت شامل یک هسته فولادی که در انتها بصورت T شکل است. این امر سبب تسهیل اتصال مهاربند به صفحه اتصال می شود. برای اتصال دو غلاف بهم از تعدادی ورق فولادی باریک استفاده می شود(شکل 7).



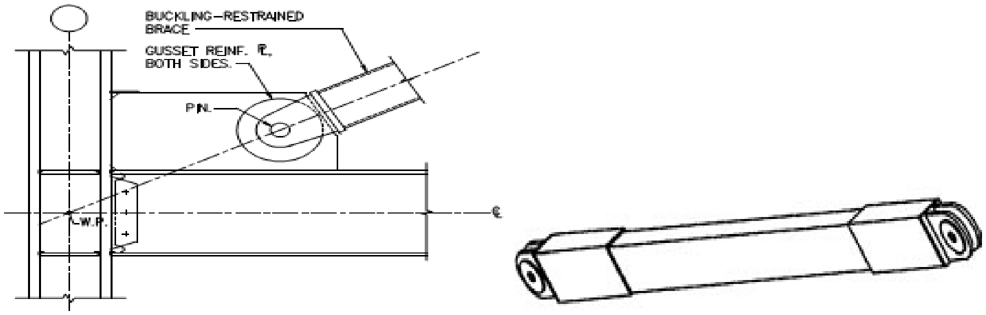
شکل8-اتصال اصلاح شده با بولت

شکل8 جزئیات اتصال BRB دو غلافه را به صفحه اتصال نشان می دهد.همان طور که مشاهده می کنید با توجه به کم شدن تعداد بولتها طول کلی اتصال کاهش می یابد. از طرفی با توجه به عدم نیاز به ورق وصله عملیات کاری هم نسبت به شکل استاندارد اتصال کاهش می یابد.

3- اتصال با پین[2]

اما نوع دیگری از BRB که درآمریکا مورد استفاده قرار می گیرد اتصال با پین است (شکل 9).اتصال با پین صفحات اتصال را در مقابل لنگرهای ثانویه ناشی از تغییر مکان نسبی طبقات محافظت می کند. همچنین اتصال مستقیم مهاربند به صفحه اتصال با استفاده از پین مجموع طول اتصال را کاهش

می دهد. این امر سبب افزایش طول هسته جاری شونده و در نتیجه کاهش کرنش محوری مهاربند می شود. تعداد قطعات اتصال نیز نسبت به 2 شکل قبل کاهش می یابد. پایداری کلی مهاربند در این سیستم با توجه به جلوگیری از کمانش خارج از صفحه ناحیه محصور نشده افزایش می یابد. همچنین استفاده از این اتصال اجازه می دهد در صورت نیاز از چند مهاربند در کنار هم برای افزایش ظرفیت سیستم استفاده گردد.



شکل9-*اتصال با پین*

اشکال زیر نمونه هایی از این سه نوع اتصال را در پروژه های عملی نشان می دهد.

اتصال استاندارد با بولت

اتصال با پین

اتصال اصلاح شده با بولت

شکل10- *نمونه هایی از انواع اتصالات BRB به قاب*

مزایا و معایب BRB [2]

برخی از مزایای BRB به شرح زیر است.

1- مدل سازی ساده رفتار چرخه ای مهاربند در تحلیل های غیر خطی. 2 - رفتارهیسترزیس پایدار بدون کمانش و قابلیت اتلاف انرژی بالا. 2- فراهم آوردن یک طراحی انعطاف پذیر به سبب سهولت در تنظیم سختی و مقاومت. 3- سهولت در نصب و تعویض بعلت استفاده از اتصالات پیچی. 4- عدم نیاز به فراهم آوردن فونداسیون پر هزینه و تقویت دیافراگم کف در مقاوم سازی.

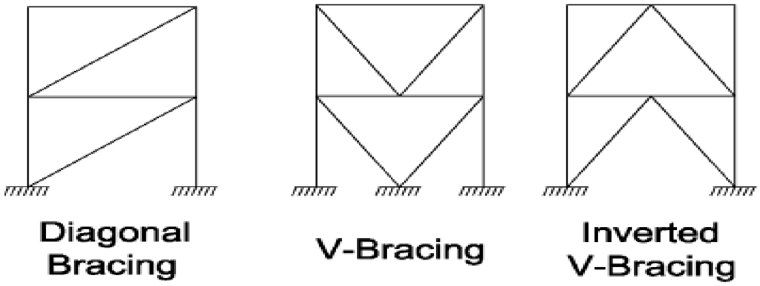
از طرفی BRB دارای معایب زیر است.

1- مهاربندهای BRB در انحصار شرکت های خصوصی قرار دارند. 2- نصب کارگاهی این نوع مهاربندها نسبت به مهاربندهای هم محور به دقت بیشتری نیاز دارد. 3- اعمال نیرو های اضافه به سازه در صورت استفاده از فولاد با بازه جاری شدن وسیع در هسته فولادی مهاربند. 4- امکان ایجاد تغییر شکل های ماندگار در BRB تحت زلزله های بزرگ بعلت عدم برخورداری از مکانیزم Recentering.5- نیاز به ارائه معیارهایی جهت تشخیص خرابی و تعویض مهاربندهای BRB.

قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش(BRBF)

قاب های مهاربندی شده با مهاربند مقاوم در برابر کمانش (Buckling-Restrained Braced Frames (BRBFs)) در حقیقت نوع ویژه ای ازقابهای مهاربندی شده هم مرکز هستند.تسلیم یکسان مهاربند در کشش و فشار ویژگی اصلی BRBF است.BRBF قابلیت جذب انرژی و نیز شکل پذیری بالاتری نسبت به سیستمهای مهاربندی همگرا دارد. سختی این سیستم قابل مقایسه با سیستم EBF است. جذب انرژی و شکل پذیری آن با قاب های خمشی ویژه قابل مقایسه است. از طرفی سختی مناسب این سیستم سبب ارضای ضوابط آیین نامه های طراحی در مورد تغییر مکانهای کلی و نسبی سازه می شود. BRB در آرایش های قطری، هفتی و هشتی در قاب می تواند مورد استفاده قرار گیرد (شکل11). استفاده از این مهاربند در دو آرایش K و X مجاز نمی باشد[4] . نکته قابل توجه دیگر در مورد BRB ، افزایش مقاومت فشاری مهاربند نسبت به مقاومت کششی آن است که در

اکثر آزمایشات تک محوری انجام شده گزارش شده است.این افزایش بطور معمول تا حدود 10 درصد برآورد شده است[2] . اگر مهاربند BRB با آرایش هفتی یا شورون در قاب استفاده شود،این افزایش نیروی فشاری سبب ایجاد یک نیروی نامتعادل در تیر می شود که اثرات آن در طراحی بایدلحاظ گردد[4] .



شکل11- *انواع آرایش قرار گیری BRB در قاب*

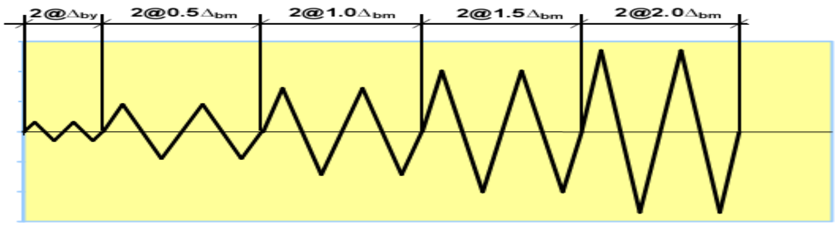
طراحی BRBF

بر خلاف موارد عملی در آمریکا ، BRB های انحصاری که در ژاپن توسعه یافتند در طراحی بعنوان یک میراگر هیسترزیس مدل می شدندوهیچ گونه ضوابطی برای طراحی آنها وجود نداشت. از آنجاییکه BRB به طور گسترده ای در ساختمانهای بلندمرتبه استفاده می شد، طراحی این ساختمانها مطابق با آیین نامه ژاپن احتیاج به نوعی بازنگری داشت که در آن به آنالیز غیر خطی تاریخچه زمانی احتیاج بود.

در آمریکا BRBF عموما به روش استاتیکی معادل طراحی می شود. همانند روش بکار رفته در مورد سیستمهای مهاربندی هم مرکز، در اینجا نیز یک مدل الاستیک از سازه در معرض بارهای لرزه ای قرار گرفته و مقاومت و سختی مورد نیاز قاب تامین می شود. طراحی BRBF توسط هیچ یک از آیین نامه های طراحی موجود پوشش داده نشده، با این وجود پیشنهاداتی برای طراحی این قابها که توسط AISC/SEAOC مطرح شده است در بخش لرزه ای آیین نامه AISC-2005 [4] ونیز فصل 8 دستورالعمل FEMA-450 [6] آورده شده است.

برای اطمینان از صحت تحلیل های خطی، المانهای مهاربند مورد استفاده در تحلیل باید متناظر با رفتارمهاربند درآزمونها باشد، بطور مشابه، آزمونهای انجام شده روی مهاربند باید مقاومت و شکل پذیری فرض شده در تحلیل را تایید کند. در نتیجه، طراحی BRBF بر مبنای نتایج آزمونها موفق استوار است. آزمونهای موفق آن دسته از آزمونهایی است که طی آن مهاربند رفتار هیسترزیس پایدار همراه با مقدارمحدودی اضافه مقاومت فشاری را از خود نشان داده ودر ضمن شکل پذیری بیشینه و نیز شکل پذیری پلاستیک تجمعی آن از مقادیر مورد نیاز در پروژه واقعی بیشتر باشد. از طرفی با توجه به اینکه در اکثر آزمایشات انجام شده بر روی BRB از ترتیب بارگذاری متفاوت نسبت به دیگری استفاده شده است مقایسه عملکرد میان انواع مختلف این مهاربند امکان پذیر نمی باشد. بر این اساس و با توجه به مطالعات انجام شده توسط سابلی(Sabelli) آیین نامه AISC [4]دستورالعملی ترتیب بارگذاری را برای انجام آزمون های مورد نیاز در تایید عملکرد BRB ارائه داده است. این آیین نامه ترتیب بارگذاری را مطابق زیر مشخص می کند.

1- دو سیکل بارگذاری تا تغییر شکل متناظر با $\Delta = \Delta_{by}$.
2- دو سیکل بارگذاری تا تغییر شکل متناظر با $\Delta = 0.5\Delta_{bm}$.
3- دو سیکل بارگذاری تا تغییر شکل متناظر با $\Delta = 1\Delta_{bm}$.
4- دو سیکل بارگذاری تا تغییر شکل متناظر با $\Delta = 1.5\Delta_{bm}$.
5- دو سیکل بارگذاری تا تغییر شکل متناظر با $\Delta = 2\Delta_{bm}$.



شکل 12 - دستورالعمل تغییر مکان های BRB در انجام آزمون های تایید عملکرد

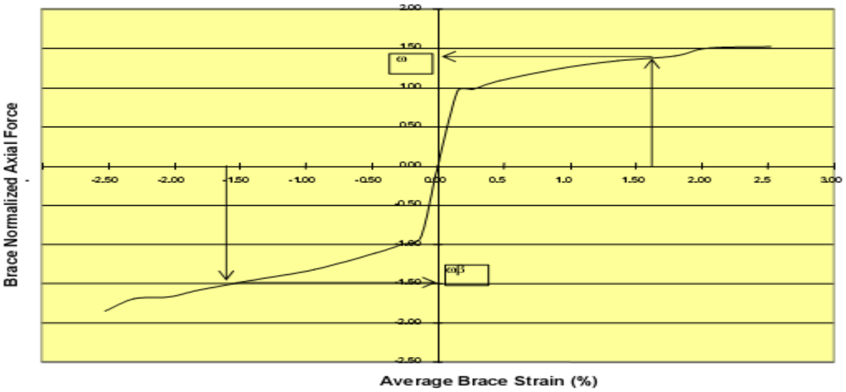
Δ_{by} تغییر شکل متناظر با اولین تسلیم قابل توجه و Δ_{bm} تغییر شکل مهاربند متناظر با تغییر مکان نسبی طراحی طبقه تعریف می شود.

در محاسبه Δ_{bm} تغییر مکان نسبی طبقه نباید از 0.01 برابر ارتفاع طبقه کمتر اختیار شود.

مطابق آیین نامه دو آزمون برای تایید کیفیت BRB مطابق با دستورالعمل ذکر شده باید انجام شود . حداقل یکی از این دو آزمون باید برروی یک قاب مهاربندی شده با BRB انجام شود. آزمون دیگر می تواند بصورت تک محوری بر روی خود مهاربند انجام شود.

علاوه بر 5 مورد قبلی، BRB باید در معرض سیکلهای اضافی بارگذاری تا تغییر مکان متناظر با $\Delta = 1.5\Delta_{bm}$ قرار گیرد. این سیکلها تا آنجا ادامه می یابد که مهاربند مورد آزمایش به تغییر شکل محوری غیر الاستیک تجمعی به میزان حداقل 200 برابر تغییر شکل تسلیم Δ_{by} دست یابد. این آزمون نیازی به انجام بصورت قابی ندارد و انجام آزمون تک محوری کفایت می کند. هر نمونه از مهاربند که بتواند آزمون های ذکر شده را با موفقیت پشت سر بگذارد می تواند در طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از نتایج مهم بدست آمده از آزمایشات بر روی BRB نمودارهای استقامتی (Backbone) است. این نمودارها بصورت کرنش مهاربند و نیروی محوری نرمال شده تعریف می گردد.دو فاکتور تنظیم کننده مقاومت ωوβ برای هر BRB از طریق این نمودارها بدست می آید. فاکتور ω اثرات کرنش سختی در افزایش مقاومت مهاربند را لحاظ می کند. β نیز مشخص کننده مقدار افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی مهاربند است. این دو فاکتور نقش اساسی در طراحی اجزای BRBF شامل تیر، ستون و اتصالات ایفا می کنند. بطور کلی این نمودار برای انواع مختلف BRB مقادیر متفاوتی را نشان می دهد. لذا مهندس طراح باید در هنگام طراحی این اطلاعات را از شرکت سازنده BRB کسب کند. یک نمونه از این نمودارها را در شکل زیر مشاهده می کنید.



شکل 12- نمودار استقامتی یک نمونه BRB

ملاحظات اقتصادی

بطور کلی ساخت مهاربندهای BRB در مقایسه با سایر مقاطع ساختمانی بسیار پر هزینه تر است. با این وجود شکل پذیری بالا همراه با افزایش دوره تناوب اصلی سازه سبب کاهش برش پایه نسبت به سیستمهای همگرای رایج می شود. این مساله سبب کاهش هزینه ساخت دیافراگم هاو فونداسیون می شود. از طرفی سختی مناسب جانبی این سیستم سبب کاهش تغییر مکان های سازه و در نتیجه کوچک شدن مقاطع نسبت به قاب های خمشی ویژه می شود. در پروژه های مقاوم سازی نیز می توان با استفاده از مهاربند در تعداد دهانه کمتر در مقایسه با سیستمهای همگرا و واگرا، به مقاومت و شکل پذیری مورد نظر دست پیدا کرد و از صرف هزینه های بیشتر در تقویت فونداسیون و دیافراگم کف جلوگیری کرد. مهاربند های BRB مانند یک فیوز ساز ه ای قابل تعویض عمل می کند که خرابی را در المانهای دیگر کمینه کرده و قابلیت تعویض بعد از زلزله های بزرگ را دارا می باشد.از طرفی انجام اتصال با بولت و پین سبب کاهش هزینه های جوشکاری کارگاهی و نظارت همراه با آن می شود.

مراجع

[1].Qiang Xie. "State of The Art of Buckling-Restrained Braces in Asia" Journal of Constructional Steel Research .no.61, 2005, pp.727-748

[2].Uang, C.M., and Nakashima, M. (2003). "Steel buckling-restrained frames," in Earthquake Engineering: Recent Advances and Applications, Chapter 16, Y. Bozorgnia and V.V. Bertero, Eds, CRC Press, publication pending.

[3].Black, C., Makris, N., Aiken, I., 2002, "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbounded Brace", PEER Report 2002/08, Pacific Earthquake Engineering Center.

[4].AISC. 2005. Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago.

[5]. Sabelli, R. Mahin, S. and Chang C. (2003) "Seismic demands on steel braced frame buildings with Buckling restrained Braces." Journal of Engineering Structures, 25, 655–666.

[6].FEMA 450 (2004). 2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures Part1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (FEMA Publication No. 450)