یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، CESC 2004
1 تا 4 دیماه 1383- دانشگاه هرمزگان

بررسی رفتار و طراحی لرزه ای دیوار برشی فلزی مرکب

امین زرگر، دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز
احسان تبوزاده، دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز
پرویز براتی، دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

چکیده

این مقاله در مورد رفتار لرزه ای و طراحی لرزه ای دیوارهای برشی فلزی مرکب است .دیوار برشی فلزی مرکب یک صفحه فلزی جوش شده به ستونهای عمودی و تیرهای افقی است. که در یک یا دو طرف آن دیوار بتنی مسلح قرار دارد و فولاد و بتن به وسیله یک سری رابط های مکانیکی (پیچ یا گل میخ) به هم متصل شده اند و تشکیل یک دیوار برشی مرکب را داده اند .

دیوار برشی مرکب در تعداد کمی از ساختمانهای آمریکا و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است .این دیوارها برای ساختمانهای با اهمیت زیاد که پس از وقوع زلزله اهمیت خاص دارد و وقفه در بهره برداری از آنها بطور غیر مستقیم موجب افزایش تلفات و خسارات در نواحی زلزله زده می شود مانند بیمارستانها ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

به تازگی دو نمونه از دیوارهای برشی های مرکب در دانشگاه کالیفرنیا مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفته است که نتایج آزمایشات به صورت خلاصه در این مقاله آمده است.

کلمات کلیدی: *دیوار برشی فلزی مرکب ، تیرها و ستونهای مرزی ، اتصالات برشی ، میدان کششی قطری*

مقدمه

سیستم مهاربندی جانبی که در این مقاله معرفی شده است از یک دیوار برشی فلزی (SSW) به همراه دیوار بتنی مسلح که در یک یا دو سمت صفحه فلزی قرار می گیرد، تشکیل شده است. پیوند دیوار بتنی و صفحه فلزی بوسیله رابطهای مکانیکی مثل گل میخ برشی یا پیچ تامین می شود.

در ضوابط لرزه ای آیین نامه AISC این سیستم مهار بندی به نام « دیوار برشی فلزی مرکب » « Composite Steel Plate Shear Walls» و یا به اختصار C-SPWمعرفی شده است و این سیستم در سالهای اخیر در بعضی از ساختمانهای بلند و یا در سازه های با اهمیت زیاد همچون بیمارستانها بکار رفته و این پدیده نوین به سرعت رو به گسترش می باشد.

در این مقاله اطلاعات کلی از دیوار برشی فلزی مرکب، موارد استعمال ، رفتار لرزه ای، نتایج آزمایشات انجام شده بر روی دو نمونه از دیوارهای برشی مرکب و توصیه هایی در مورد طراحی این سیستم جدید در سازه‌های با مهاربند جانبی بیان شده است.

اجزای اصلی یک دیوار برشی فلزی مرکب

یک دیوار برشی مرکب از دیوار برشی فلزی، دیوار بتنی، رابط های برشی، تیر و ستون های مرزی، اتصالات دیوار برشی فلزی به تیر و ستون های مرزی و اتصالات تیر به ستون تشکیل شده است که در ادامه به معرفی این اجزا و نقشـشان در کل سیستم پرداخته می شود.

دیوار برشی فلزی

نقش اصلی صفحه فلزی در دیوار برشی مرکب تامین مقاومت و سختی و همچنین مشارکت در محـدود کـردن انـدازه لنگر واژگونی است. در دیوار برشی فلزی برش طبقه توسط توسعه عمل میدان کششی قطری تحمل می شود ولـی در دیوار برشی فلزی مرکب دیواربتنی با مهار کردن صفحه فلزی و جلوگیری از کمانش آن باعث بالا رفتن ظرفیت برشـی دیوار برشی فلزی، تا حد تسلیم در برش می شود. البته دیوار بتنی نیز در تحمل مقداری از برش طبقه مـشارکت مـی کند.

این عضو معمولا یک صفحه فلزی نسبتا نازک است ولی صفحات نازکتر از $3/8$ in به دلیل مشکلات در حمل و نقـل، ساخت و نصب توصیه نمی شود. همچنین صفحات نازک برای عملکرد مناسب احتیاج به تعداد زیادتری رابطهای برشی دارد تا کمانش صفحه را تا تسلیم در برش به عقب بیندازد.

دیوار بتنی مسلح

دیوار بتنی مسلح می تواند در یک یا دو طرف یا بین دو دیوار برشی فلزی (ساندویچی) قرار داشته باشد. در همه این موارد دیوار بتنی بواسطه تشکیل میدان فشاری قطری در سختی و مقاومت برشی سیستم مشارکت می کند و بخـاطر وجود آرماتور در دیوار اندکی شکل پذیر است.

دیوار بتنی می تواند در محل اجرا یا به صورت پیش ساخته استفاده شود ولی در هر صورت نقش اصلی آن ممانعت از کمانش دیوار برشی فلزی قبل از رسیدن به نقطه تسلیم برشی است. این عمل بوسیله پیوند صفحه فلزی و دیوار بتنی با رابطهای برشی انجام می شود.

رابط‌های برشی

رابطهای برشی عمل اتصال عناصر فلزی دیوار مرکب را به بتن انجام می دهند. برای دیوار بتنی که در محل اجـرا مـی شود از گل میخهای برشی که به صفحه فلزی جوش می شود استفاده می کنند. البته امکان استفاده از دیگـر اتـصال دهنده های برشی مثل استفاده از پروفیل ناودانی وجود دارد ولی ممکن است نسبت به گل میخ مقرون به صرفه نباشد. آزمایشات دیوار بتنی مرکب نشان داده که در بعضی موارد، گل میخهای برشی به دلیل کمانش موضعی صـفحه فلـزی علاوه بر برش در معرض کشش نیز قرار می گیرند. در دیوار بتنی پیش ساخته، پیچها می توانند عمل اتصال دیوار بتنی و دیوار برشی فلزی را انجام دهند.

ستونهای مرزی

از جمله وظایف ستونهای مرزی کنترل لنگر واژگونی توسط بار ثقلی ستونهای اطراف دیوار برشـی مرکـب مـی باشـد. همچنین ستونها، یک نقطه مهار برای عمل میدان کششی قطری صفحه فلزی و یک عـضو بـاربر بـرای عنـصر فـشاری قطری دیوار بتنی هستند. در سازه‌های با ستونهای نسبتا بزرگ ستونها می توانند مقدار قابل توجهی از بـرش طبقـه را نیز منتقل کنند.

تیرهای مرزی

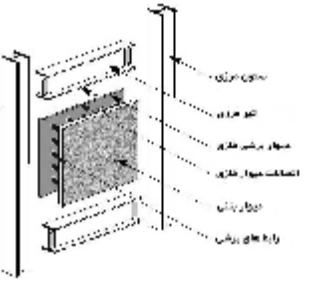
تیرهای فوقانی و تحتانی دیوار برشی مرکب همچون ستونهای مرزی نقش مهار کننده برای عمل میدان کششی صفحه فلزی و یک عنصر باربر برای عضو فشاری قطری دیوار بتنی را دارد. به دلیل لنگر واژگونی، تیرها در معرض جریان برشی نسبتا بزرگی در انتهایشان هستند. این تیرها علاوه بر نیروهای فوق، بارهای ثقلی منتقل شده از کف را نیز تحمل می کنند.

اتصال دیوار برشی به قطعات مرزی

دیوار برشی فلزی بوسیله پیچ یا جوش به تیر و ستونهای مرزی متصل می شود. نقش اصلی این اتصالات انتقال برش و کشش می باشد. همچنین امکان اتصال دیوار بتنی بوسیله رابطهای مکانیکی به اجزای مرزی وجود دارد. این رابطها، نیروی برشی وارد بر دیوار بتنی را منتقل می کنند.

اتصال تیر به ستون

این اتصالات نقش بزرگی را در عملکرد دیوار بازی می کنند. در سیستم های دوگانه جایی که قاب فلزی یک سیستم پشتیبان برای دیوار برشی مرکب است اتصالات باید اتصال خمشی باشد.



شکل (۱) اجزای اصلی دیوار برشی مرکب

برخی از مزایای استفاده از دیوار برشی فلزی مرکب

۱- یک دیوار برشی مرکب نسبت به دیوار برشی بتنی با ظرفیت برشی مشابه و احتمالا سختی برشی بیشتر دارای ضخامت و وزن کمتر است. سطح مقطع کوچکتر به لحاظ معماری چه از نظر نما و چه از نظر سطح مفید ساختمان، بسیار مفید می باشد و وزن کمتر دیوار برشی مرکب باعث کاهش نیروی لرزه ای و در نتیجه کوچکتر شدن ضخامت پی و دیوارها می شود.

۲- برای ساخت دیوار برشی مرکب می توان آن را در محل اجرا یا از قطعات پیش ساخته استفاده کرد. از آنجا که دیوار برشی فلزی می تواند سختی و پایداری لازم را در مدت ساخت و نصب تامین کند امکان ساخت دیوار بتنی مسلح مستقل از ساخت اسکلت فلزی و در خارج از شرایط کارگاهی وجود دارد که در این صورت باید به صفحه فلزی پیچ شود.

۳- در دیوار برشی فلزی، برش طبقه بوسیله عمل میدان کششی قطری صفحه فلزی بعد از کمانش ناشی از فشار قطری تحمل می شود. در دیوار برشی مرکب، دیواربتنی از کمانش قبل از تسلیم صفحه فلزی جلوگیری می کند. در نتیجه صفحه فلزی تا تسلیم در برش در مقابل برش طبقه مقاومت می کند که نسبت به نقطه تسلیم کششی قطری بزرگتر است.

۴- در دیوار برشی مرکب پس از وقوع زلزله‌های متوسط با فراوانی بالا، کمانش دیوار برشی فلـزی و ترکهـای دیـوار بتنی افزایش می یابند که نیاز به تعمیرات دارند. این گونه تعمیرات اگر چه به لحاظ سازه ای گران نمی باشد ولی از نظر عدم امکان سکونت در مدت تعمیرات هزینه بالایی دارد.

۵- دیوار بتن مسلح در دیوار برشی مرکب نقش عایق رطوبت و صدا را نیز داشته و همچنین پوشش نسوزی را بـرای دیوار برشی فلزی نیز ایجاد می‌کند.

مثالی از کاربرد دیوارهای برشی فلزی مرکب

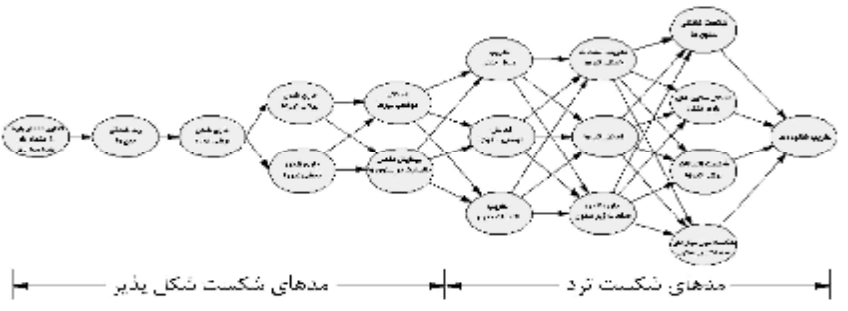
مهندسان دیوار برشی فلزی مرکبی را در یک بیمارستان در سانفرانسیسکو به کار بردند. این ساختمان مثـال خـوبی از کاربرد آسان دیوار برشی فلزی مرکب در ساختمان یک بیمارستان در منطقه با خطر نسبی زلزله زیاد مثل کالیفرنیا می باشد. مهندسان بعد از بررسی تحلیل دینامیکی سازه متوجه نیروی بسیار بزرگ جانبی در سازه شدند که در نتیجه نیاز به یک دیوار برشی بتنی مسلح تنها به ضخامت feet ۴ دارد. این دیوار برشی هم از نظر معماری غیر قابل قبول اسـت وهم وزن سازه را افزایش که باعث افزایش نیروهای طراحی می شود.نصب دیوار برشی فلزی مرکب درایـن بیمارسـتان راه بسیار مناسبی بود که اجرا شد. این دیوار برشی شامل یک دیوار برشی فلزی که دو طرف آن توسط دیوارهای بتنی مسلح پوشیده شده است و به تیر و ستونهای مرزی جوش شده است و رابطهای برشی آن عبارتند از بست هایی که از میان سوراخ های صفحه فلزی و جان تیرهای مرزی، عبور کرده است.

توصیه های طراحی لرزه ای دیوار برشی فلزی مرکب

در طراحی سیستمهای باربر جانبی در مناطق زلزله خیز دو موضوع اساسی باید مد نظر باشد. ابتدا اینکه سیستم دارای شکل پذیری کافی برای جذب انرژی مناسب در سازه باشد و دیگر اینکه باید دارای مقاومت کافی برای ایجاد سختی در سازه در جهت کنترل تغییر مکان جانبی باشد. بدین منظور باید سعی شود در سیستم های باربر جانبی که در سازه به کار می بریم مد شکست شکل پذیر قبل از مد شکست ترد به وقوع به پیوندد و ابتدا رفتار غیر ارتجاعی (خمیری) در اعضایی که وظیفه تحمل بار های جانبی را دارند صورت پذیرد و در صورت نیاز در لحظات پایانی زلزله در اعـضایی کـه وظیفه تحمل بار های ثقلی را دارند گسترش پیدا کند و به این ترتیـب از تخریـب پیـشرونده اعـضای سـازه‌ای و غیـر سازه‌ای تحت زلزله جلوگیری به عمل می آید.

سلسله مراتب مدهای شکست در دیوار برشی مرکب

به منظور دستیابی به یک عملکرد شکل پذیر مدهای شکست دیوار برشی مرکب و تیر و ستونهای مرزی آنها را می توان به صورت سلسله مراتب مشخص مطابق شکل زیر نشان داد.



شکل (۲) مدهای اصلی شکست دیوار برشی فلزی مرکب

سلسله مراتب مدهای شکستی که در بالا بیان شده به شکلی صورت می پذیرد که ابتدا مدهای شکست شکل پذیر در خود دیوار که عضو باربر جانبی می باشد رخ می دهد و پس در تیرهای بالا و پایین و در نهایت در ستونهای مرزی صورت می پذیرد و پس از آن مدهای شکست ترد صورت می گیرند و انتظار می رود شکست ترد دیوار بر شکست ترد تیرها و ستونها حاکم گردد.

در رابطه با کنده شدن پیچها و یا جوشهای اتصالات مرزی دیوار به نظر می رسد که یک مد شکست مهم باشد در صورتی که در واقعیت کنده شدن ها باعث ایجاد مکانیسم توزیع انرژی از طریق اصطکاک می کند و برای سازه برخی خواص مفید غیر صلب را ایجاد می کند.

توصیه های طراحی دیوار برشی مرکب

۱- در صورتیکه بتن در یک طرف صفحه فلزی باشد باید ضخامت آن حداقل ۸ اینچ و چنانچه بتن در هر دو طرف صفحه فلزی اجرا شود حداقل ضخامت آن باید در هر دو طرف ۴ اینچ در نظر گرفته شود.

۲- از گل میخهای کلاهک دار و یا از دیگر اتصالات مکانیکی برشی برای جلوگیری از کمانش موضعی ورق استفاده شود.

۳- آرماتورهای افقی و عمودی باید در دیوار بتنی کار گذاشته شوند و حداقل نسبت آرماتورها در هر دو جهت نباید از ۰/۰۰۲۵ کمتر باشد.

۴- در صورت نیاز به ایجاد بازشو در دیوار برشی باید به اندازه کافی اعضای مرزی تعبیه گردد.

در محاسبه ظرفیت برشی یک دیوار برشی مرکب ظرفیت برشی بتن را در نظر نمی گیرند و ظرفیت برشی صفحه فلزی محاسبه می شود. که این یک رویه محافظه کارانه می باشد ولی با این حال در محاسبه سختی دیوار برشی مرکب که برای تعریف پریود ارتعاش استفاده می شود توصیه شده که سختی بتن نیز لحاظ گردد.

مقاومت در برابر لنگر واژگونی

در دیوار های برشی مرکب در صد قابل توجهی از لنگر واژگونی توسط دیوار تحمل می شود در مرحله تحلیل هر دوی دیوار فلزی و بتنی به صورت عنصر صفحه ای موازی مدلسازی می شود. توصیه های زیر برای سازگاری با فلسفه کلی طراحی ارائه شده است:

۱- کل نیروی برشی وارده بر دیوار برشی فلزی مرکب توسط صفحه فلزی تحمل می گردد.

۲- دیوار بتنی بر اساس بارهای ثقلی و لنگر خمشی طراحی می شود.

طراحی رابط های برشی

نقش اصلی رابط های برشی مهار کردن صفحه فلزی و جلوگیری از کمانش کلی آن می باشد. توصیه می شود که اتصالات برشی برای دو دسته شرایط طراحی شوند:

۱- هر رابط برشی باید قادر به تحمل نیروی کششی ناشی از کمانش موضعی غیر الاستیک صفحه فلزی در حین اعمال چرخه بارگذاری باشد که مقدار نیروی کششی در اتصالات برشی با لحاظ کردند تعادل نیروها همانن شکل زیر محاسبه می شود.

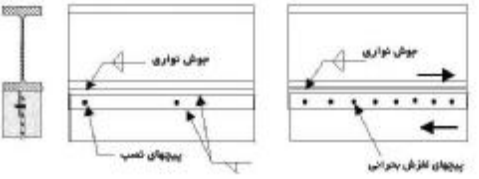
۲- تمامی رابط های برشی باید قادر به انتقال کوچترین دو مقدار، ظرفیت برشی صفحه فلزی و دیوار بتنی باشند.

طراحی تیرهای بالا و پایین و ستونهای مرزی دیوار برشی مرکب

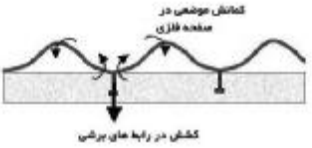
در سیستم دیوار برشی مرکب که در این مقاله بحث شده تیرها و ستونها بخشی از قابهای خمشی ویژه به حساب می آیند و ضوابط قابهای خمشی ویژه برای طراحی این تیرها و ستونها به کار می رود. علاوه بر این ضوابط، تیرها و ستونهای مرزی دیوار برشی مرکب باید احتیاجات زیر را برای نسبت b/t که توسط ضوابط لرزه ای آیین نامه AISC ارائه شده، برآورده شود.

$$bf/2tf \leq 52/\sqrt{fy}$$

$$hc/tw \leq 520/\sqrt{fy}$$



شکل (۳) اتصالات صفحه فلزی به تیر و ستونهای مرزی

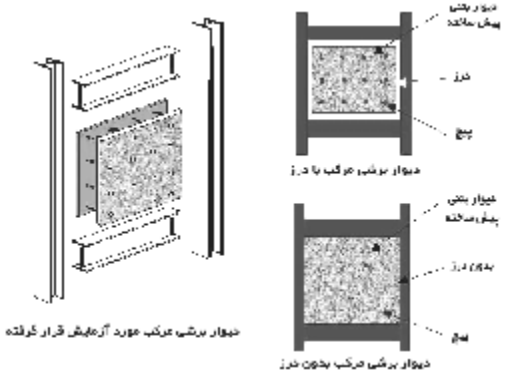


شکل (۴) نیروی کششی در رابط های برشی

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی دو نمونه از دیوارهای برشی مرکب

هدف اصلی این پروژه آزمایشگاهی، انجام آزمایشهای بارگذاری تناوبی بر روی دو نمونه از دیوارهای برشی مرکب می باشد تا نظرات و توصیه های طراحی و مدل سازی بهبود پیدا کند. دو نمونه دیوار برشی مرکب، سیستم بابر جانبی ترکیبی می باشند که در آن ها دیوار برشی مرکب در میان قاب خمشی قرار گرفته‌اند.

تنها تفاوت میان دو نمونه دیوار پیشنهاد شده در این مقاله این است که در یکی از نمونه ها یک درز بین دیوار بتنی و تیرها و ستونهای اطراف پانل آن وجود دارد ولی در نمونه دیگر هیچ درزی وجود ندارد و بتن به طور مستقیم در معرض بارهای وارده از تیرها و ستونهای اطراف پانل می باشد. همانگونه که در ادامه نشان داده می شود، همین تفاوت به ظاهر ساده، منجر به تفاوت قابل توجهی در عملکرد دیوار همانند شکل پذیری و کاهش آسیب پذیری شده است.



شکل(۵) نمایی از دیوارهای برشی مرکب با درز و بدون درز

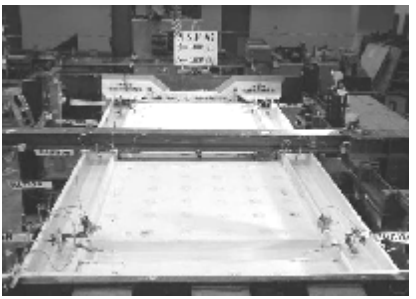
نمونه های آزمایشی:

نمونه های آزمایش عبارت هستند از یک قاب دو طبقه یک دهانه که با مقیاس ۰/۵ ساخته شده اند. نمونه ها خواص مشابه و یکسانی دارند به جز اینکه یکی از نمونه ها دارای درزی به اندازه ۱/۲۵ اینچ بین دیوار بتنی و تیرها و ستونهای فولادی تعبیه شده است. ورق فولادی مورد استفاده در نمونه ها از نوع A36 است. تیرها و ستونها از نوع فولاد A572 هستند. دیوار بتنی در نمونه ها یک دیوار بتنی پیش ساخته است که به وسیله پیچهای A325 با قطر ۰/۵ اینچ به ورق فولادی متصل شده است.

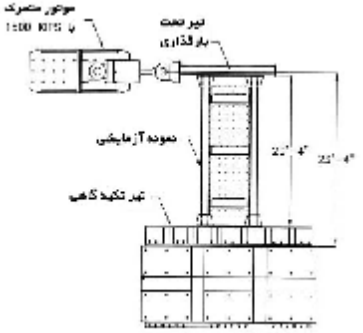
بتن مورد استفاده در نمونه ها دارای Fc=4000 psi می باشد. دیوار بتنی پیش ساخته در آزمایشگاه قالب گیری و ساخته شد و اتصالات تیر به ستون در نمونه ها از نوع اتصالات خمشی است.

دستگاه آزمایش:

اجزای اصلی استفاده شده در پروژه عبارتند از یک موتور محرک برای بارگذاری تا ۱۵۰۰kips یا ۷۵۰ton ، یک تیر تحت بارگذاری در بالا و یک تیر تکیه گاهی در پایین که به بلوک های تکیه گاهی متصل است. و نیز تیری در ارتفاع میانی که صفحه فولادی را از هر دو طرف مهار کرده است. مهاربندی ها برای شبیه سازی اثرات مهاری طبقات در سازه حقیقی اضافه شده است.



شکل (۶) نمایی از نمونه تحت آزمایش



شکل (۷) دستگاه آزمایش

رفتار نمونه ها

ترتیب بارگذاری بر اساس ضوابط لرزه ای آیین نامه AISC اعمال شد است. ترتیب بارگذاری بر حسب تغییر شکل نسبی نمونه‌ها که از تقسیم تغییر مکان افقی قسمت فوقانی نمونه که توسط موتور محرک اندازه گیری می شود بر ارتفاع کل نمونه ها به دست می آید تعیین می گردد.

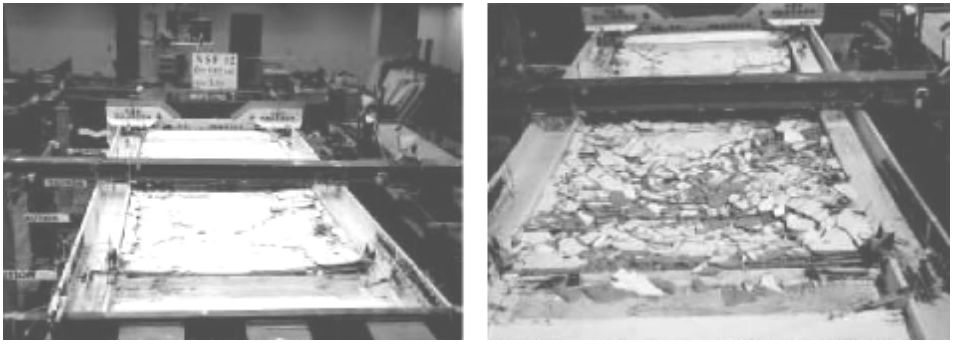
خلاصه‌ای از رفتار نمونه ها تهیه شده :

نمونه اول (دیوار برشی مرکب با درز) بسیار انعطاف پذیر و مطلوب	
Drift	توضیحات
0/044	*حداکثر تغییر شکل نسبی*

0/004	خطوط تسلیم ناچیزی در قسمت پایه نمونه مشاهده شد و در مرحله الاستیک باقی ماند.
0/006	نمونه، تسلیم هر سه تیر افقی و تا حدودی تسلیم پایه ستون را نشان داد. همانگونه که محاسبات پیش بینی می‌کرد و در عمل نیز مشاهده شد، مقدار تغییر شکل نسبی 0/006 برای نقطه تسلیم به ثبت رسید. نیروی برشی به هنگام تسلیم در حدود 300 kips ثبت شد.
0/012	دیوار برشی فلزی تا حدودی دچار کمانش موضعی در راستای فشار قطری و تسلیم در راستای کشش قطری شد. در حالیکه پانل بتنی شروع به جدا شدن از قاب ها و از جا در آمدن و کنده شدن از پانل فولادی کرد. آسیب وارد شده به دیوار بتنی بسیار کم و به شکل ترکهای مویین بود.
0/024	تیرهای میانی و تحتانی نمونه در قاب فلزی شروع به افزایش کمانش موضعی بال و جان در نزدیکی اتصالات خمشی تیر به ستون کردند. ضمنا پانل بتنی در طبقه دوم دچار ترکهای قطری شد.
0/03	نخستین شکست پانچ (سوراخ شدگی) در پیچ‌های بین دیوار فولادی و دیوار بتنی اتفاق افتاد و دیوار فولادی شروع به ترک برداشتن در گوشه ها کرد. در طول این چرخه، نمونه به حداکثر مقدار مقاومت برشی خود که حدود 625 kips می باشد، دست یافت.
0/036	دیوار های بتنی ترک های بزرگی برداشتند و در گوشه ها خرد شدند. همه تیرها دارای کمانش های موضعی قابل توجهی در نزدیکی اتصالات خمشی، در جان و بال خود شدند و اولین شکست در ناحیه جان تیر، در قسمت انتهای سمت چپ تیر میانی رخ داد.و در ستون ها یک مفصل پلاستیک ایجاد شد که تا نیمه ای از طبقه دوم هم ادامه یافت.
0/042	در حدود 10% کل پیچ هایی که صفحات فولادی را به دیوارهای بتنی متصل می کردند، یا شکستند و یا به درون صفحات فولادی فرو رفته و آن ها را سوراخ کردند. دیوار بتنی بالایی در حدود 4 اینچ از محل اولیه خود، در نواحی محیطی، بالاتر آمدند و یک شکل بشقابی را پدید آوردند. شکست ها از ناحیه ای که کمانش موضعی با تیرها رخ داده بود شروع شده و گسترش یافتند. در طول این چرخه نمونه به شکل یک صفحه فولادی که از گوشه ها دچار شکست شده باشد، از بین رفت. در نتیجه این تخریب، بار و نیروی برشی وارد به نمونه در حدود 20% کاهش یافت. از آن جایی که ظرفیت نمونه در این زمان کمتر از 80% حداکثر ظرفیتش بود، نمونه عملا تخریب شده به حساب می آمد، اما با این حال آزمایش ادامه پیدا کرد.
0/044	کمانش موضعی بال ستونها و شکست جان کلیه تیرها به شکلی واضح وجود داشت. هنگامی که بخش عمده ای از دیوار بتنی تخریب و خرد شد، شکست شدیدی در نزدیکی قسمت جنوبی – میانی اتصالات خمشی دیوار فولادی اتفاق افتاد. نمونه در طول این چرخه نیز 20% دیگر از ظرفیت برشی خود را از دست داد.

نمونه دوم (دیوار برشی مرکب بدون درز) نسبت به نمونه اول رفتاری با شکل پذیری کمتر	
drift	توضیحات
0/042	*حداکثر تغییر شکل نسبی*
0/004	نمونه در حالت الاستیک باقی مانده و تنها خطوط تسلیم جزیی در پایین جان تیرها مشاهده شد.
0/006	تسلیم فولاد در جان تیرهای تحتانی و میانی و همین طور در صفحات زیر ستون مشاهده شد. این مقدار تغییر شکل به عنوان نقطه تسلیم نمونه ثبت شد. محاسبات غیر الاستیک پیش از انجام آزمایش نیز پیش بینی می کردند که نقطه تسلیم منتاظر با drift = 0.006 باشد. مقدار بار وارده در هنگام تسلیم برابر با 440 kips بود که نسبت به نمونه اول 40% بیشتر است.
0/012	بعضی از نقاط گوشه ای و محیطی پانل های دیوار های فلزی دچار تسلیم شدند، اما هیچ گونه کمانشی قابل

	تشخیص نبود. دیوار بتنی با فاصله ای به اندازه 0/25 اینچ شروع به جدا شدن از قاب ها کرد در حدود 0/5 اینچ از پانل فولادی نیز بلند شد. تسلیم همه جانبه در جان تیر و کلاهک برشی رخ داد.
0/018	پانل های بتنی شروع به ترک برداشتن در اطراف کناره ها و قسمت های میانی کردند و پانل فولادی دچار کمانش واضحی شدند. خطوط تسلیم قطری و عمودی در نزدیکی اتصالات خمشی تیر به ستون مشاهده شد. یک پیچ مقاومت برشی خود را از دست داد و دچار شکست شد.
0/03	نخستین شکست پانچ (سوراخ شدگی) پیچهایی که صفحات فولادی را به دیوار بتنی متصل می‌کنند، رخ داد و در این زمان در ناحیه گوشه های صفحه های فولادی ترک خوردگی ایجاد شد. نمونه به حداکثر مقدار مقاومت برشی خود که حدود 625 kips بود، رسید.
0/036	دیوارهای بتنی در هر دو طبقه ترک های بزرگی برداشتند و در قسمت های گوشه دچار شکست شدند. هر سه تیر افقی در اطراف اتصالات خمشی دچار کمانش شدید موضعی در بال و جان شدند و نخستین شکستگی در جان تیر میانی و در انتهای سمت راست آن اتفاق افتاد. در این زمان در ستونها مفصل پلاستیک ایجاد شد و تا نیمه طبقه دوم ادامه یافت.
0/042	بیش از 20% کل پیچ های بین پانل فولادی و پانل بتنی یا شکسته شدند و یا به درون دیوار فولادی فرو رفتند. پانلهای بتنی فوقانی در حدود 4 اینچ از جای خود بالا آمده اند. شکستگی ها از نقاطی که بال تیر دچار کمانش موضعی شد، رخ داد و گسترش یافت. نمونه بیش از 20% مقاومت برشی خود را از دست داد و نمونه عملا تخریب شده محسوب می گردد.
0/044	کمانش موضعی در بال ستون ها و شکستگی در جان تمامی تیرها به وضوح وجود داشت. در نزدیکی اتصالات خمشی در قسمت جنوبی – میانی پانل دیوار فولادی، شکستگس های شدیدی وجود داشت. همچنین دیوار برشی فولادی فوقانی از ستون سمت راست جدا شد. دیوار بتنی در هر دو طبقه قطعه قطعه شدند.



شکل (۸) نماهایی از رفتار لرزه ای تحت بارگذاری تناوبی دو نمونه آزمایشگاهی

نتایج آزمایش و مقایسه دو نمونه آزمایش با یکدیگر:

نتایج و اطلاعات زیادی از این آزمایشات به دست آمده و یکی از نتایج مهم، نمودار تغییر شکل نسبی تحت نیروی برشی برای نمونه ها بود. این نمودارها اطلاعات ارزشمندی را در مورد سختی، مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت توزیع انرژی سیستم به دست می دهد. همه این پارامترها در طراحی و تحلیل سازه ها بسیار مهم هستند. هر دو نمونه قادر

به رسیدن به تغییر شکل نسبی بیش از 4% را بدون کاهش مقاومت دارا می باشند و هر دو قادرند وقتی که مقاومتشان در حدود 80% بیشینه مقاومت می رسد، دست کم به تغییر شکل نسبی 5% برسند.

حداکثر مقاومت دیوار بدون درز تا اندازه ای بیشتر از مقاومت نمونه با درز بود. این موضوع مورد انتظار بود. زیرا در نمونه بدون درز، از ابتدای آزمایش بتن در معرض بار ستون و تیر قرار داشت و مقاومت آن به مقاومت برشی کل اضافه می شد. با این حال، نکته جالب آن است که دیور بتنی حتی وقتی که در انتقال برش شرکت می کرد، مقدار ظرفیت برشی را به طور قابل توجهی افزایش نمی‌داد و سختی نمونه بدون درز در اطراف بتن به اندازه کمی بیشتر از سختی نمونه با درز است. و به نظر می رسد که مشارکت دیوار بتنی در مقاومت برشی مقدار زیادی به مقدار سختی سیستم نمی افزاید.

منابع

مجموعه مقالات پروفسور آستانه اصل در مورد دیوارهای برشی فلزی:

- Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls.
- Experimental and Analytical Studies of Composite Shear Walls.
- Cyclic Behavior of Traditional and an Innovative Composite Shear Walls.
- Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls.