

بررسی آزمایشگاهی اندرکنش دیوار برشی فولادی و قاب بتنی با اتصالات پیچی

Original Article

مهدی پرویزی* (دانشجوی دکتری)

مجتبی فتحی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی

سهیل مجید زمانی (استادیار)

پژوهشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

این مقاله به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی که توسط پیچ و مهره به قاب بتنی متصل شده است، می‌پردازد. سه نمونه‌ی مختلف تحت بارگذاری شبه استاتیکی رفت و برگشتی مطابق آیین‌نامه‌ی ۱-۱۰-۱۱ ACI T قرار گرفتند. افزودن دیوار برشی فولادی ساده به قاب بتنی، موجب افزایش به‌ترتیب ۳، ۸، ۱۲ و ۴ برابری ظرفیت باربری، سختی اولیه، جذب انرژی و میرایی معادل شد. وجود سخت‌کننده‌های افقی و قائم در نمونه‌ی دارای بازشوهای قطری، موجب ثابت ماندن تقریبی سختی اولیه‌ی سیستم و افزایش جذب انرژی و میرایی معادل تا حدود ۱۵ درصد شد و ظرفیت باربری را به میزان ۷ درصد کاهش داد. بیشترین تنش‌ها در نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده، در جابه‌جایی نسبی ۱/۷۵ درصد، در چشمه‌ی توپر نزدیک تیر بین سخت‌کننده‌ها و در نمونه‌ی دارای دیوار برشی ساده در گوشه‌ها اتفاق افتاد. مطابق نتایج کرنش سنج‌ها، تسمه‌های اتصال در گوشه‌ها در محل اتصال تیر به ستون، دارای بیشترین تنش وارده بودند در حالی که این تسمه‌ها و سایر اجزا در محدوده‌ی کشسانی بودند.

civil.parvizi@gmail.com
fathim@razi.ac.ir
majidzamani@bhrc.ac.ir

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی، قاب بتنی، اندرکنش، اتصال پیچی.

۱. مقدمه

امروزه سازه‌های بتنی پیش‌ساخته همراه با گسترش جوامع و با قابلیت تولید انبوه، در حال جایگزین شدن به‌جای سازه‌های بتنی درجا هستند. خسارات زیاد این نوع سازه‌ها در طول زلزله‌های قوی ناشی خرابی اتصالات و عدم شکل‌پذیری کافی است. دیوار برشی فولادی یکی از بهترین سیستم‌های مهار جانبی است که در مناطق با لرزه‌خیزی بالا بسیار کاربرد دارد. با توجه به دارا بودن قابلیت نصب صفحات برشی فولادی در قاب‌های بتنی، می‌توان آن را در ترکیب با قاب‌های بتنی نیز به کار گرفت که انتظارات لرزه‌یی را برآورده سازد.

در زمینه‌ی سازه‌های بتنی پیش‌ساخته و اتصالات آنها مطالعاتی صورت گرفته است که تا حدی جوابگوی دغدغه‌های استفاده از این گونه سازه‌ها بوده است. چوی و همکاران^[۱] اتصال تیر به ستون بتنی پیش‌ساخته را با استفاده از متصل‌کننده‌های فولادی و ECC^۱ اجرا کردند و آنها را تحت بار لرزه‌یی قرار دادند. نگرو و همکاران^[۲] پاسخ کلی یک ساختمان پیش‌ساخته‌ی بتنی سه طبقه با مقیاس واقعی را تحت بار شبه‌دینامیکی بررسی کردند. در ساخت این سازه چهار سیستم مختلف جانبی به‌کار گرفته شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. در یک مطالعه‌ی دیگر نگرو و همکاران^[۳]

در اتصال صنعتی ستون پیوسته بود و فقط دارای یک گپ کوچک در تراز دال بود. با قرارگیری تیر روی تکیه‌گاه ستون، به کمک صفحات فولادی به آن جوش شد و آرماتورهای اضافی برای تحمل لنگر منفی از تیر وارد ناحیه‌ی اتصال شدند. در اتصال مسکونی ستون پیوسته نبود و چهار آرماتور بزرگ مقطع از ستون پایین وارد حفره‌های استوانه‌یی ستون بالایی شد و با گروت پر شدند. بعد از قرار گرفتن تیر نیمه‌ی پیش‌ساخته در محل اتصال، آرماتورهای بالایی و پایینی تیر در اتصال جای گرفتند و اتصال با بتن معمولی بتن‌ریزی شد. بهرامی و همکاران^[۴] رفتار دو نوع اتصال خمشی را برای سازه‌های بتنی پیش‌ساخته به‌صورت عددی مطالعه کردند. در اتصال اول با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۷/۱۲/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2019.52489.2478

Archive of SID

را تحت بارهای رفت و برگشتی مطالعه کردند. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که این نوع سازه دارای مقاومت بالا، ظرفیت اتلاف انرژی و شکل پذیری خوب بود. تأثیر نسبت ارتفاع به ضخامت، بر ظرفیت باربری، بیشتر از نسبت ارتفاع به دهانه بود. هم چنین سختی ستون‌های مرزی تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری جانبی داشت. پس از انجام یک مطالعه عددی، استفاده از دیوار برشی‌های با تنش تسلیم پایین دارای سخت‌کننده‌های با مقاطع تی-شکل، برای نواحی با لرزه خیزی بالا پیشنهاد شد. زیرکیان و ژانگ^[۲۰] عملکرد دیوار برشی بدون سخت‌کننده و با نقطه تسلیم پایین را بررسی کردند. استفاده از مصالح با تنش تسلیم پایین و مقاومت کماتشی بالا نیروهای وارد به اجزای پیرامونی را کاهش و قابلیت سرویس دهی و جذب انرژی را افزایش داد. شکسته‌بند و همکاران^[۲۱] رفتار صفحات دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم بالا و پایین را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. اتصال صفحات فولادی فقط با تیرها در نظر گرفته شد و هم چنین بازشوهایی در مرکز صفحات دیوار برشی تعبیه شد. با ضخامت یکسان صفحات فولادی، رفتار لرزه‌ی مصالح با نقطه تسلیم بالا مطلوب‌تر از دیگری بود. اوزلیک و کلایتن^[۲۲] روش مدل نواری را برای شبیه‌سازی رفتار دیوار برشی‌های با صفحات متصل به تیر بسط دادند. این مدل، به خوبی توانست که تقاضای تیر و ستون، ظرفیت برش پایه، جذب انرژی را پیش‌بینی کند. وی و همکاران^[۲۳] به منظور کاهش خسارت وارده به اجزای مرزی، اتصال صفحه‌ی فولادی به اجزای مرزی را در گوشه‌ها برقرار کردند. نمونه‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی، رفتار سازه‌ی قابل قبولی از خود نشان دادند. گو و همکاران^[۲۴] رفتار دیوار برشی فولادی با اتصال نیمه‌صلب تیر به ستون و صفحه‌ی فولادی سخت شده به شکل صلبی را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج، بیانگر ظرفیت سازه در تغییر شکل‌های پلاستیک بود. وانگ و یانگ^[۲۵] برای پیش‌بینی رفتار لرزه‌ی دیوار برشی فولادی با استفاده از مدل نواری ساده شده، مدل ساختاری معادل^۴ تک جهت را ارائه دادند. در این مدل، تأثیر سخت‌شدگی رفت و برگشتی انواع مصالح فولادی، اثر تنش‌های فشاری پسماند و پدیده‌ی باریک‌شدگی^۵ در نظر گرفته شد.

آکین و همکاران^[۲۶] یک قاب بتنی دارای میان قاب تایل بتنویت را با یک صفحه‌ی فولادی بهسازی و آزمایش کردند. ضخامت صفحه‌ی فولادی ۰/۳ میلی‌متر بود و به دو طرف تایل متصل شد. مقاومت جانبی و جذب انرژی به مقدار زیادی افزایش یافت. گرگولو و همکاران^[۲۷] یک سیستم دیوار برشی فولادی را برای بهسازی سازه‌ی بتنی موجود طراحی کردند و به صورت یک قاب مهاربندی اجرا شد. این روش رفتار لرزه‌ی سازه‌ی بتنی را بهبود بخشید. علاوه بر این، برش پایه و سختی سیستم هم بهبود یافت. فورمیسانو و لمباردی^[۲۸] طی یک مطالعه‌ی عددی بهبود رفتار لرزه‌ی سازه‌های بتنی موجود، با استفاده از دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین و دارای بازشو را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار برشی بدون بازشو تقاضای برش را در اجزای مرزی افزایش می‌دهد. اما استفاده از دیوار برشی بازشو باعث کاهش مقاومت برشی بدون تغییر چندان در شکل پذیری و سختی شد. هم چنین نشان داده شد که استفاده از دیوار برشی بازشو باعث کاهش هزینه می‌شود.

مطالعات گذشته پیرامون سازه‌های بتنی پیش‌ساخته نشان می‌دهد که عمده‌ی توجه محققان متمرکز به تعریف اتصالات بوده است؛ در حالی که اجرای این اتصالات مشکل به نظر می‌رسد. اما نتایج تحقیقات در رابطه با دیوار برشی فولادی، نشان می‌دهد که این سیستم از عملکرد لرزه‌ی مطلوب و قابلیت تنوع در طراحی و اجرا برخوردار است. در این مطالعه رفتار و اندرکنش انواع دیوار برشی فولادی در قاب بتنی به صورت آزمایشگاهی مطالعه می‌شود و با نتایج حاصل از قاب خمشی مقایسه می‌شود. اتصال صفحه‌ی دیوار برشی فولادی به اجزای مرزی با استفاده از بیج انجام

قرارگیری تیر روی کربل فولادی مدفون در ستون، اتصال به کمک بستن آرماتورهای رزوه شده‌ی پایینی تیر به کربل فولادی برقرار شد. در اتصال نوع دوم از یک قوطی فولادی مدفون در ستون برای انتقال بار از طریق جوش کردن آرماتورهای تیر به آن استفاده شد. یان و همکاران^[۸] یک اتصال جدید برای سازه‌های پیش ساخته معرفی کردند. که در آن ستون، اتصال و قسمتی از تیر که دور از اتصال قرار داشت به صورت پیش ساخته بود؛ در حالی که قسمتی از تیر که نزدیک اتصال بود، به صورت درجا بتن‌ریزی شد. آرماتور در این ناحیه با استفاده از غلاف گروت^۲ متصل شد. لاگو و همکاران^[۹] یک سیستم سازه‌ی ابداعی بر پایه‌ی تغییر وضعیت اتصالات مفصلی به گیردار را، به وسیله‌ی فعال‌سازی وسایل اتصال مکانیکی که بعد از نصب دال عمل می‌کنند، معرفی کردند.

نمونه‌های واقعی تحت بار لرزه‌ی شبیه‌سازی شده قرار گرفتند و طرح پیشنهادی مؤثر عمل کرد. کتیوت و هسنایینیو^[۱۰] اتصال صلبی را با استفاده از مقطع تی-شکل جاگرفته در انتهای تیر و چشمه‌ی اتصال معرفی کردند. در نمونه‌های پیش ساخته خرابی اصلی، ترک‌هایی در امتداد آرماتورهای وصله پوششی بود که عملکرد نمونه‌ها را تضعیف کرد و مقاومت نمونه‌های پیش ساخته کمتر از نمونه‌ی یکپارچه بود. در مورد دیوار برشی فولادی مطالعات گسترده‌ی انجام شده است که به تعداد محدودی از آنها در زمینه‌ی دیوار برشی‌های دارای بازشو و سخت‌کننده اشاره شده است. صیوری و همکاران^[۱۱] دو سیستم دیوار برشی با و بدون سخت‌کننده را آزمایش کردند. وجود سخت‌کننده رفتار لرزه‌ی دیوار برشی را بهبود بخشید. سخت‌کننده‌های افقی و قائم جذب انرژی و سختی برشی را افزایش دادند؛ در حالی که تأثیر آن بر مقاومت دیوار برشی ناچیز بود. ولی‌زاده و همکاران^[۱۲] رفتار دیوار برشی سوراخ‌دار (بازشو در مرکز) را در مقایسه با دیوار برشی ساده انجام دادند. در این پژوهش اثر ابعاد بازشو و عامل لاغری بر عملکرد دیوار برشی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. کلایتون و همکاران^[۱۳] رفتار لرزه‌ی دیوار برشی‌های خودبرگشت پذیر^۳ با اتصال دیوار به تیر را بررسی کردند. در این مطالعه پس از تعیین روابط طراحی، قاب‌های ۳ و ۹ طبقه برای دو سیستم دیوار برشی با اتصال به تیر و اتصال کامل به اجزای پیرامونی شبیه‌سازی شد. مدل‌ها تحت زلزله با سطوح مختلف قرار گرفتند و نتایج برای دو سیستم مقایسه شد. نی و همکاران^[۱۴] آزمایش‌هایی برای بررسی رفتار لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی سخت شده با و بدون بازشو انجام دادند. خصوصیات مقاومتی و سختی در دیوارهای دارای بازشو کاهش یافت؛ ولی با وجود سخت‌کننده اثر بازشو کاهش یافت. هم چنین بر پایه‌ی مطالعات عددی، یک روش طراحی برای محاسبه‌ی ظرفیت مقاومت جانبی برای طراحی دیوارهای برشی فولادی سخت شده پیشنهاد شد. علوی و همکاران^[۱۵] یک ترکیب خاص از سخت‌کننده‌های قطری با بازشوی دایره‌ی با قطر یک سوم عمق چشمه در مرکز دیوار را بررسی کردند. مقاومت برشی دیوار برشی سوراخ‌دار نزدیک به دیوار برشی سخت نشده با چشمه‌ی یکپارچه به دست آمد و رفتار لرزه‌ی سیستم به‌طور قابل ملاحظه‌ی بهبود یافت. حسین‌زاده و تهرانی‌زاده^[۱۶] اندرکنش بین دیوار و قاب پیرامونی در سیستم دیوار برشی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار برشی در قاب‌های خمشی عملکرد قاب‌های خمشی را در معیارهای مقاومت، سختی، شکل پذیری و جذب انرژی به‌طور چشم‌گیری به خصوص برای قاب‌های چندطبقه افزایش می‌دهد.

بومیگ^[۱۷] رفتار دیوار برشی‌های دارای بازشو در مرکز و بدون سخت‌کننده را به صورت عددی مطالعه کرد. یک معادله برای مقاومت برشی چنین دیوارهای برشی بسط داده شد. اعتبار این رابطه با شبیه‌سازی مدل‌های مختلف و تحلیل غیرخطی آنها بررسی شد و رابطه‌ی پیشنهادی از دقت خوبی برخوردار بود. منگ‌وانگ و همکاران^[۱۸-۱۹] رفتار لرزه‌ی چهار نمونه دیوار برشی فولادی سخت نشده‌ی سه طبقه

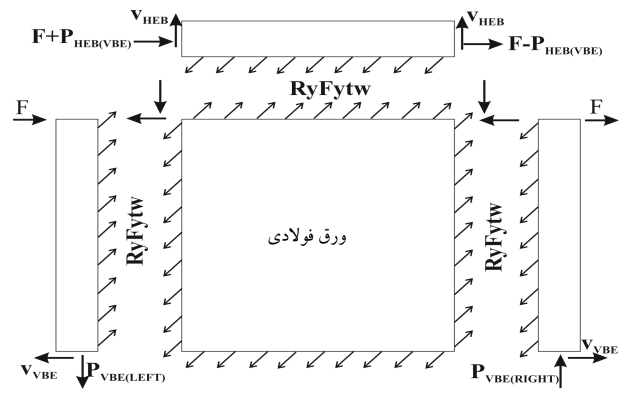
مطابق با راهنمای ۲۰ طراحی آیین‌نامه آمریکا^[۲۰] از رابطه‌ی ۱ برای تعیین ضخامت صفحه‌ی فولادی استفاده می‌شود.

$$t_w = \frac{V_u}{\phi \cdot 0.42 F_y L_{cf} \sin 2\alpha} \quad (1)$$

که در آن t_w ضخامت صفحه‌ی فولادی، V_u نیروی برشی، F_y تنش تسلیم مصالح دیوار برشی فولادی، L_{cf} طول صفحه و برابر 250° میلی‌متر ϕ ضریب کاهش مقاومت و برابر 0.9 و α زاویه‌ی میدان کشش نسبت به افق است. این زاویه بین 35° تا 55° درجه متغیر است که در این پژوهش 45° فرض شد. با احتساب مقیاس یک‌دوم و با توجه به مشخصات مکانیکی اجزای نمونه‌ها در جدول ۱، ضخامت صفحه‌ی فولادی 1791 میلی‌متر به دست می‌آید که 2 میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای طراحی اتصالات صفحه‌ی دیوار برشی فولادی به اجزای مرزی، از نیروهای اندرکنشی بین صفحه‌ی فولادی و اجزای مرزی مطابق شکل ۲ استفاده شده است. برای طراحی اجزای مرزی و اتصالات، نیروی خطی اندرکنشی $R_y f_y t_w$ روی اجزای مختلف اعمال شد که در آن $R_y F_y$ تنش تسلیم مورد انتظار است. اتصال صفحه‌ی فولادی به اجزای مرزی، به‌وسیله تسمه‌های فولادی مدفون در بتن طراحی شد (شکل ۳). فاصله‌ی 20 سانتی‌متر بین تسمه‌ها در نظر گرفته شد و برای متصل کردن صفحه‌ی دیوار برشی فولادی به این تسمه‌ها اتصال پیچی اصطکاکی به کار گرفته شد. مطابق آیین‌نامه فولاد ایران^[۲۱] نیروی پیش‌تیدگی در پیچ‌ها 179 کیلونیوتن اعمال شد. برای جلوگیری از لهیدگی صفحه‌ی دیوار برشی بر اثر این نیروی پیش‌تیدگی، دو صفحه‌ی فولادی با ضخامت 4 میلی‌متر در دو طرف آن قرار داده شد. همچنین یک نبشی به‌عنوان یک المان مرزی در چهار ضلع دیوار برشی و در یک طرف آن اجرا شد. برای جلوگیری از پارگی ورق در گوشه‌ها، به اندازه‌ی 20 سانتی‌متر از هر طرف، از دیوار برشی جدا استفاده شد و سخت‌کننده‌هایی در محل برش به صفحه‌ی فولادی جوش شد.^[۱۸] از معیار رابطه‌ی ۲ نیز برای تعیین عرض و ضخامت سخت‌کننده‌ها استفاده شد.^[۲۲]

$$\frac{h_s}{t_s} \leq 0.48 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad t_w \leq t_s \leq 5t_w \quad (2)$$

که در آن t_w ضخامت صفحه‌ی فولادی، t_s ضخامت سخت‌کننده و h_s عرض سخت‌کننده است. در نهایت برای بررسی اندرکنش صفحه‌ی دیوار برشی فولادی در قاب بتنی، دو نمونه صفحه‌ی دیوار برشی فولادی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. برای نمونه دارای بازشو، بازشوه‌های دایره‌ای به قطر 35 سانتی‌متر، در مسیر قطره‌های اصلی و در فضای بین سخت‌کننده‌ها تعبیه شدند. بازشوها به منظور افزایش



شکل ۲. نیروهای اندرکنشی بین اجزای مرزی و صفحه‌ی فولادی.^[۲۰]

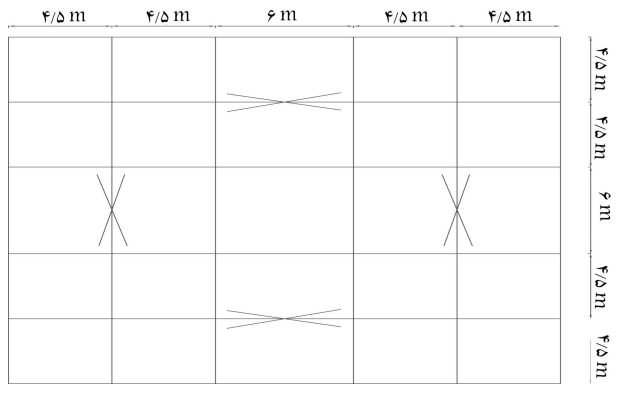
شده است. پس با توجه به ضخامت کم صفحه‌ی دیوار برشی فولادی مشکلات مربوط به جوشکاری حذف شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایش

۲.۱. نمونه‌های آزمایش

آزمایش شامل بارگذاری سه نمونه تحت بار شبه استاتیکی رفت و برگشتی بود. نمونه‌ها در مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی آزمایش شدند. ابعاد نمونه‌ها از پلان ۳ طبقه‌ی تجاری - مسکونی نشان داده شده در شکل ۱ انتخاب شد. ارتفاع طبقه‌ی اول ۵ متر و سایر طبقات ۳/۵ متر است. قاب مورد نظر از طبقه‌ی اول این ساختمان انتخاب شد. با احتساب مقیاس یک‌دوم، دهانه‌ی قاب ۳ متر و ارتفاع آن ۲/۵ متر حاصل شد. با توجه به این ابعاد، نسبت عرض به ارتفاع بزرگ‌تر از یک، برای عملکرد مطلوب دیوار برشی رعایت می‌شود. بارزنده‌ی طبقات مسکونی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار زنده‌ی طبقه‌ی تجاری ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار مرده‌ی طبقات به‌طور متوسط ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شد. برای این ساختمان ناحیه‌ی لرزه‌خیزی بالا و هم‌چنین سرعت موج برشی در خاک این ناحیه بین $375-750$ متر بر ثانیه فرض شد. با استفاده از روش استاتیکی معادل استاندارد 2800 ایران^[۲۹] برش پایه‌ی قاب مورد نظر 85 تن محاسبه شد.

برای طراحی سیستم دیوار برشی مورد نظر، از بتن معمولی برای اجزای مرزی، فولاد ST-۳۷ برای صفحه‌ی دیوار برشی فولادی، فولاد S۴۰۰ برای آرماتورهای خمشی و برشی، و پیچ کلاس A۴۹۰ برای اتصالات پیچی استفاده شد. در جدول ۱، میانگین نتایج مربوط به آزمون فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر، آزمون کشش آرماتورهای طولی و آزمون کشش کوپن تهیه شده از صفحه‌ی فولادی آمده است.

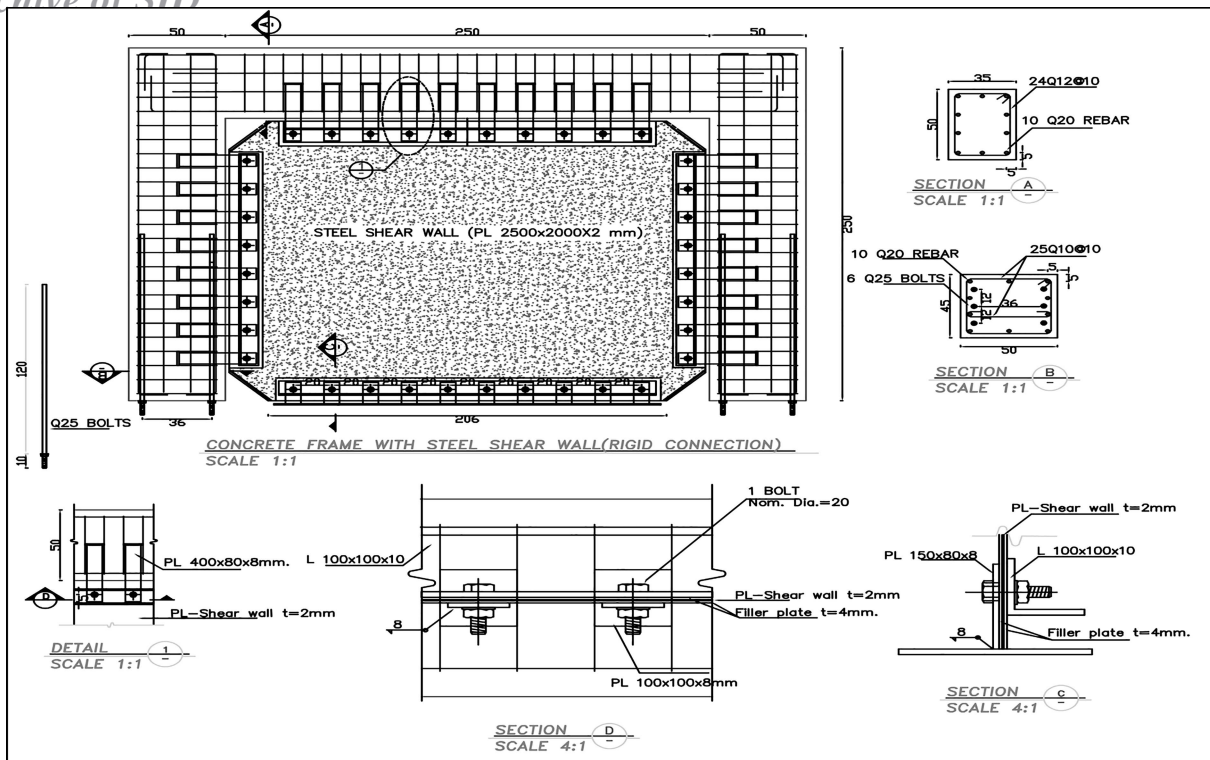


شکل ۱. پلان ساختمان مورد مطالعه.

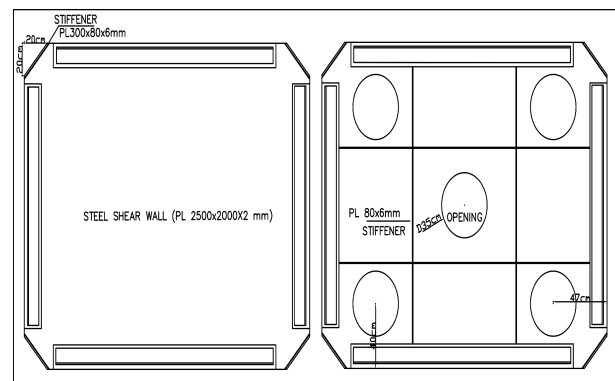
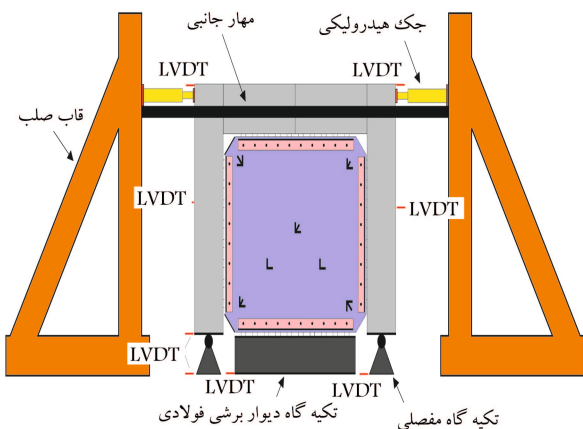
جدول ۱. خصوصیات مکانیکی مصالح.

مصالح	تنش		مقاومت فشاری	انحراف معیار
	تسلیم	نهایی		
بتن	-	-	۴۷	۱۱/۳
فولاد	۲۳۵	۳۶۳	-	۹/۸
آرماتور	۴۱۰	۶۰۸	-	۱۷/۵
پیچ	۱۰۰۰	-	-	-

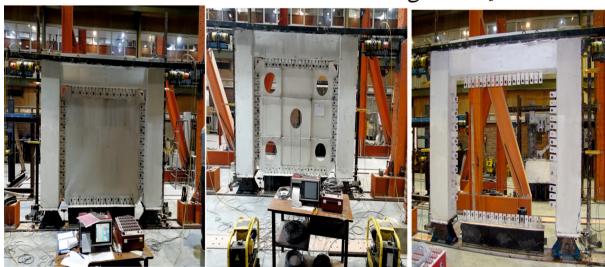
* واحد تنش‌ها و مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال است.



شکل ۳. جزئیات قاب بتنی و اتصالات بتنی.



شکل ۴. جزئیات صفحات دیوار برشی فولادی مختلف.



شکل ۵. برپایی نمونه‌ها.

تکیه‌گاه متصل شد و سپس صفحه‌ی فولادی دیوار برشی با استفاده از اتصال پیچی اصطکاکی به آن متصل شد. مقدار نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها با استفاده از ترک‌متر اندازه‌گیری و اعمال شد. تکیه‌گاه قاب خمشی (تکیه‌گاه ستون‌ها) به صورت مفصل در نظر گرفته شد. اتصال ستون‌ها به تکیه‌گاه با کمک ۶ آرما تور (قطر ۲۵ میلی‌متر)

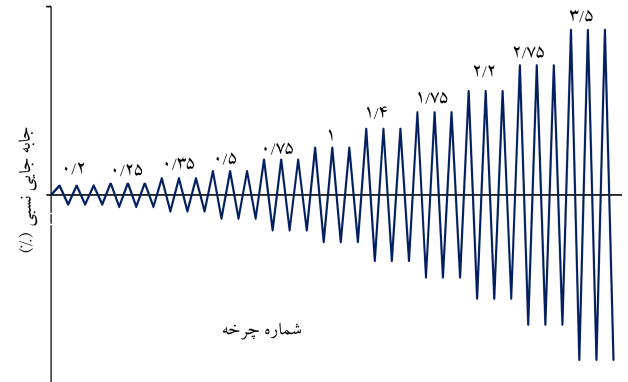
جذب انرژی در دیوار برشی فولادی تعبیه شده‌اند. تاکنون چیدمان‌های مختلفی بررسی شده است. اما چیدمان استفاده شده در این مطالعه، متفاوت است. در این چیدمان، بازشوها در راستای قطره‌های دیوار برشی فولادی قرار گرفته‌اند. میدان‌های کشش اصلی نیز بر راستای قطرها منطبق‌اند. پس بازشوها بیشترین تأثیر خود را خواهند داشت. اما قرار دادن بازشو همواره با کاهش سختی و ظرفیت باربری جانبی همراه بوده است. بهترین روش برای جبران کاهش سختی و ظرفیت جانبی استفاده از سخت‌کننده‌ها در اطراف بازشوهاست. با توجه به این چیدمان بازشو، بهترین آرایش سخت‌کننده‌ها، سخت‌کننده‌های افقی و قائم‌اند. مساحت مجموع بازشوها طوری انتخاب شده است که نسبت مساحت بازشو به مساحت کل دیوار ۱۰ درصد شود.

۲.۲. برپایی نمونه‌ها و الگوی بارگذاری

نحوه‌ی برپا کردن نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در ابتدا قاب بتنی به



شکل ۷. رفتار و نحوه‌ی شکست نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده.



شکل ۶. الگوی بارگذاری رفت و برگشتی.

نمونه‌ی SPSWO از گوشه‌ی چشمه‌ی توپر متصل به تیر تکیه‌گاه و لبه‌ی بازشوها شروع شد. شکل ۷ رفتار و چگونگی شکست نمونه‌ی SPSWO را نشان می‌دهد. وجود سخت‌کننده‌ها باعث شد که کمناش فقط محدود به فضای بین آنها باشد. بنابراین، بار کمناش افزایش یافت و ناحیه‌ی تسلیم‌شدگی بیشتری نسبت به نمونه‌ی SPSWS مشاهده شد. در چشمه‌های توپر از بالا به پایین ناحیه تسلیم‌شدگی بیشتری به چشم می‌خورد. به طوری که در چرخه‌ی ۲۲ در اثر شدت میدان تنش در چشمه‌ی توپر متصل به تیر، صفحه‌ی فولادی شروع به پاره شدن کرد. این مشاهده با نتایج کرنش‌سنج‌ها تطابق دارد که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود.

استفاده از سخت‌کننده در گوشه‌ها، در هر دو نمونه بسیار مؤثر عمل کرد و میدان تسلیم را به کناره‌ها هدایت و از پاره شدن صفحه‌ی نازک دیوار برشی جلوگیری کرد. در چرخه‌ی ۱۰ در ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون، ترک‌های برشی و خمشی به صورت ریز ظاهر شدند. هم‌چنین در محل تسمه‌های مدفون در بتن نیز ترک‌های مویی به چشم خورد. در پای ستون‌ها نیز به علت تنش فشاری بالا، بتن قسمت کاور دچار خردشدگی شد. در نهایت، نمونه‌ی SPSWO در جابه‌جایی نسبی ۱/۷۵ از ناحیه‌ی اتصال پای ستون دچار شکست شد و آرماتورهای اتصال به علت تغییر شکل خمیری پاره شدند.

مطابق نتایج کرنش‌سنج‌ها، تسمه‌های اتصال در گوشه‌ها در محل اتصال تیر به ستون، دارای بیشترین تنش وارده بودند. در حالی که این تسمه‌ها و سایر اجزا در محدوده‌ی الاستیک باقی ماندند. بنابراین، می‌توان گفت که جذب انرژی بر عهده‌ی دیوار برشی فولادی بوده است. این رفتار، امکان تعویض صفحه‌ی دیوار برشی فولادی بعد از خرابی در زلزله را فراهم می‌سازد.

به منظور مقایسه‌ی نتایج مربوط به سیستم‌های ترکیبی قاب بتنی دارای دیوار برشی فولادی و قاب بتنی تنها، بارگذاری نمونه‌ی SPSWO در جابه‌جایی ۱/۴ درصد متوقف شد. سپس صفحه‌ی دیوار برشی فولادی از سیستم خارج شد و از آن‌جا که میزان خرابی بسیار اندک بود، قاب بتنی مجدداً تحت بارگذاری قرار گرفت (شکل ۸). این عمل، اندرکنش قاب بتنی و دیوار برشی فولادی را تا میزان زیادی نشان می‌دهد و بررسی تأثیر صفحه‌ی فولادی در قاب بتنی را ممکن می‌سازد.

مسیر تسلیم، در ناحیه‌ی سایه‌خورده درون بیضی نشان داده شده است و با استفاده از بردار، جهت آنها مشخص شده است. ناحیه‌ی تسلیم‌شدگی بیشتری در نزدیک تکیه‌گاه نسبت به گوشه‌های بالا به چشم می‌خورد. در نمونه‌ی MBF، ترک‌های خمشی و برشی در محل اتصال شکل گرفتند و پای ستون دچار خردشدگی شدند. قاب بتنی تا جابه‌جایی نسبی ۲/۷۵ درصد بارگذاری شد و در نهایت از محل اتصال تیر به ستون و پای ستون شکست رخ داد.

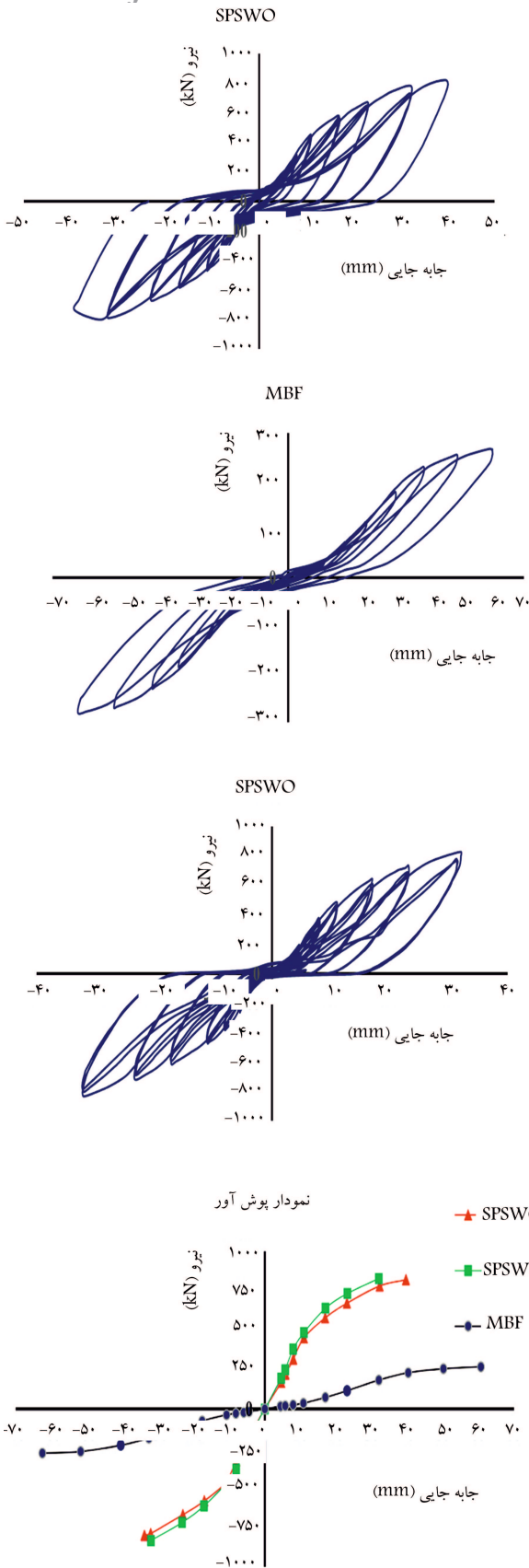
رزوه شده‌ی مدفون در بتن برقرار شد. دیوار برشی فولادی نیز به وسیله‌ی یک تیر صلب به کف قوی متصل شد. از دو مقطع IPE۱۲۰ در دو طرف قاب، برای مهار جانبی استفاده شد که دو سر این تیرها به قاب‌های صلب متصل بود.

بارگذاری به صورت جابه‌جایی کنترل اعمال شد و از الگوی بارگذاری شکل ۶ آیین‌نامه ACI T۱.۱-۰۱ استفاده شد. پس مقدار جابه‌جایی اعمال شده در هر چرخه، از حاصل ضرب مقدار جابه‌جایی نسبی الگوی بارگذاری در ارتفاع جک از تراز پای ستون محاسبه شد. اعمال بار از طریق دو جک هیدرولیکی متصل به قاب صلب در تراز تیر انجام شد. هر کدام از جک‌ها فقط در یک جهت به نمونه‌ها نیرو وارد کردند. کرنش‌سنج‌ها در مکان‌های مختلف از جمله مکان‌هایی که قابلیت ورود به کرنش‌های پلاستیک داشتند، نصب شدند. کرنش‌سنج‌ها در نمونه‌ی ساده، در گوشه‌ها و مرکز و در نمونه‌ی دارای بازشو در مرکز چشمه‌ها، لبه‌ی بازشو و در گوشه‌ها نصب شدند. برای ثبت مقدار تغییر مکان‌ها در نقاط مختلف، از جمله میزان حرکت‌های کوچک تکیه‌گاه، از تغییر مکان‌سنج استفاده شد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خارج از صفحه‌ی دیوار برشی فولادی، استفاده از تغییر مکان‌سنج ممکن نبود. زیرا ضربه‌های ناگهانی دیوار برشی در هنگام کمناش در آنها اختلال ایجاد می‌کرد. نیروی وارده به نمونه‌ها، مقادیر کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی‌سنج‌ها با استفاده از یک دستگاه مرکزی قرائت می‌شد. قبل از اعمال بارگذاری از صحت عملکرد کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی‌سنج‌ها اطمینان حاصل شد. پس از نصب همه‌ی تجهیزات، نمونه‌ها با آب و آهک رنگ‌آمیزی شدند. این روش تجربی، به‌طور تقریبی مسیر تسلیم در دیوار برشی فولادی و محل ترک در اجزای مرزی بتنی را نمایان می‌کند. از کلمه‌ی اختصاری SPSWS^۷ برای نمونه‌ی دیوار برشی ساده، از SPSWO^۸ برای نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده و از MBF^۹ برای قاب تنها استفاده شده است.

۳. نتایج آزمایشگاهی

۳.۱. مشاهدات کلی

از همان چرخه‌های ابتدایی، موج‌های کمناش و میدان‌های کششی در هر دو نمونه به خوبی شکل گرفتند که بیانگر عملکرد مطلوب طرح اتصال و اجزای نمونه بود. در نمونه‌ی SPSWO این موج‌ها به‌طور مستقل و در بین چشمه‌ها و در نمونه‌ی SPSWS، موج‌های کمناش و میدان تنش به‌طور سراسری و پیوسته در صفحه‌ی دیوار برشی فولادی شکل گرفتند. میدان تنش در نمونه‌ی SPSWS با زاویه‌ی ۴۳ درجه و در نمونه‌ی SPSWO با زاویه‌ی ۳۹ درجه شکل گرفت. در حوالی جابه‌جایی نسبی ۰/۵ درصد، تسلیم صفحه‌ی فولادی نمونه‌ی SPSWS از گوشه‌ها و در



شکل ۹. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها.

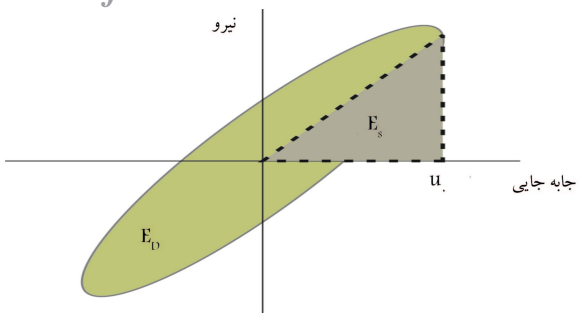


شکل ۸. عملکرد و شکست نمونه‌های SPSWS و MBF.

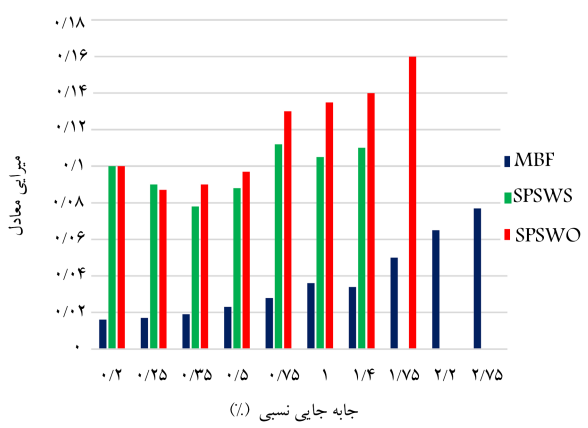
۲.۳. نمودار بار- تغییر مکان جانبی

نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در همه‌ی نمودارها پدیده پینچینگ دیده می‌شود. تغییر مکان خارج از صفحه و کماتش صفحه‌ی دیوار برشی فولادی، ترک خوردن بتن و مفصلی بودن تکیه‌گاه ستون‌ها از دلایل پیدایش پینچینگ است. دلیل اصلی پینچینگ در نمونه‌های دارای دیوار برشی فولادی، تشکیل موج‌های کماتش از همان چرخه‌های ابتدایی است. در بارگذاری برگشتی نیز وقتی نمونه به حالت اولیه نزدیک می‌شود، جهت میدان کشش و موج‌های کماتش عوض می‌شوند و سبب کاهش باربری و جذب انرژی در این لحظه می‌شوند. اما در نمونه‌ی SPSWO به دلیل وجود سخت‌کننده، با اثر توأم شبکه‌ی سخت‌کننده‌ها و صفحه‌ی فولادی، عملاً سختی دیوار و سختی کماتش افزایش می‌یابد و کماتش کلی جای خود را به کماتش موضعی می‌دهد. سخت‌کننده‌ها در جهت فشاری نیز دارای باربری‌اند و فضای بیشتری وارد فاز خمیری می‌شود. موج‌های کماتش محدود به زیر صفحات بین سخت‌کننده‌ها می‌شود و عملاً در این حالت تسلیم‌شدگی بیشتر و در نتیجه جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون سخت‌کننده مشاهده می‌شود. برای مقایسه‌ی بهتر نمونه‌های مختلف با یکدیگر، منحنی پوش آنها نیز رسم شده است. مشاهده می‌شود که نمونه SPSWS بیشترین ظرفیت باربری را در بین نمونه‌ها دارد. طبیعی است که وجود بازشوها از ظرفیت باربری نمونه‌ی دارای بازشو می‌کاهد.

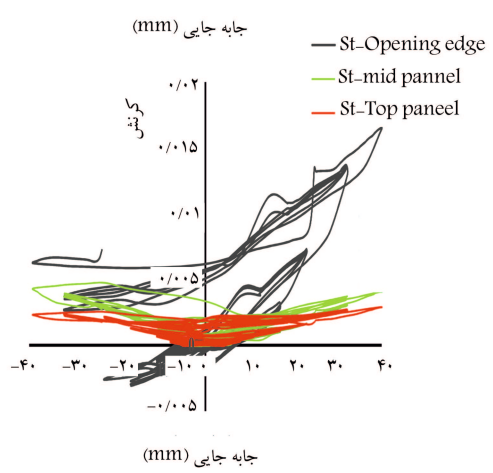
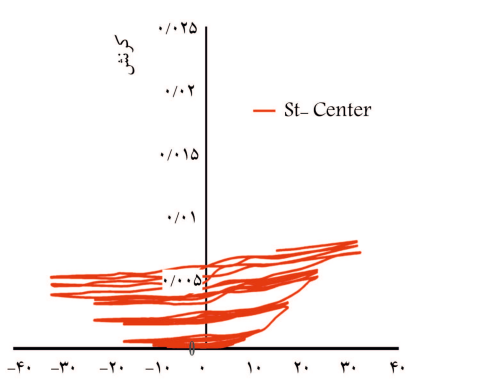
ظرفیت باربری و سختی اولیه‌ی نمونه SPSWS نسبت به نمونه‌ی MBF به ترتیب، ۳ و ۸ برابر افزایش یافته است. این مقدار افزایش در خصوصیات سازه‌ی یک سیستم سازه‌ی بسیار چشم‌گیر است. ظرفیت نمونه‌ی SPSWO به میزان ۷ درصد کمتر از نمونه‌ی SPSWS است. زیرا وجود بازشوها در محل قطر اصلی، از مقاومت آن می‌کاهد. اما سخت‌کننده‌ها تا حد بالایی از کاهش ظرفیت باربری جلوگیری کرده‌اند. زیرا مساحت بازشوها ۱۰ درصد مساحت کل صفحه‌ی دیوار برشی فولادی در باربرترین ناحیه‌ی آن است؛ اما ظرفیت آن فقط به اندازه‌ی ۷ درصد کاهش داشته است.



شکل ۱۱. انرژی جذب شده و ذخیره شده در نمودار بار- تغییر مکان.



شکل ۱۲. میرایی معادل نمونه‌ها.



شکل ۱۳. نتایج کرنش سنج‌ها.

سختی اولیه‌ی نمونه‌ی SPSWS و SPSWO نیز تقریباً یکسان به دست آمده است. به‌طور کلی افزودن سخت‌کننده، به دلیل تبدیل به تأخیر انداختن کماتش، سختی اولیه را افزایش می‌دهد. اما وجود بازشو خود باعث کاهش سختی می‌شود. در نهایت این عوامل افزایش یافته و کاهش دهنده یکدیگر را خنثی کرده‌اند و سختی تقریباً یکسانی با نمونه SPSWS به دست آمده است.

۳.۳. جذب انرژی و میرایی معادل

در شکل ۱۰ جذب انرژی در هر سطح جاب‌جایی نسبی برای هر سه نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. نمونه‌ی SPSWO از بیشترین جذب انرژی برخوردار است. دلیل این امر افزودن سخت‌کننده به دیوار برشی فولادی و به تأخیر افتادن کماتش و افزایش ناحیه‌ی تسلیم‌شدگی در دیوار برشی فولادی است. به‌طور میانگین جذب انرژی نمونه‌ی SPSWO نسبت به نمونه‌ی SPSWS، ۱۷ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین افزودن دیوار برشی فولادی ساده به قاب بتنی، جذب انرژی را ۱۲ برابر کرده است.

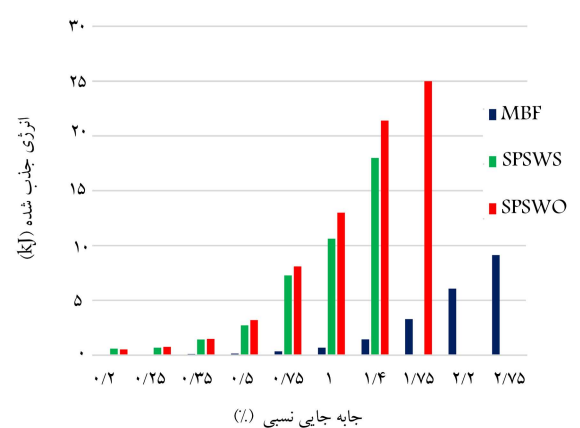
به‌طور کلی پاسخ لرزه‌ای یک سیستم سازه‌ای با میرایی معادل آن سیستم مشخص می‌شود. میرایی معادل به دو بخش تقسیم می‌شود: [۳۲]

$$\xi_{e q} = \xi_0 + \xi_{h y s} \quad (3)$$

ξ_0 و $\xi_{h y s}$ به میرایی معادل اولیه در ناحیه‌ی کشسانی و میرایی معادل مربوط به رفتار هیسترسیز اشاره می‌کند. با توجه به شکل ۱۱ میرایی معادل از رابطه‌ی ۴ حاصل می‌شود. [۳۳]

$$\xi_{h y s} = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (4)$$

در شکل ۱۲ میرایی معادل حاصل از نمودار بار- تغییر مکان نشان داده شده است. به‌طور میانگین میرایی معادل نمونه SPSWO نسبت به نمونه SPSWS، ۱۵ درصد افزایش یافته است و نسبت به نمونه MBF، ۴۷٪ برابر شده است. در جاب‌جایی‌های نسبی پایین، مثلاً جاب‌جایی نسبی ۰/۲ درصد، میرایی معادل سیستم ترکیبی حدود ۱۰ درصد به دست آمده است؛ در حالی که این عدد برای قاب تنها، کمتر از ۲ درصد است. پس نتیجه می‌شود که یک سازه‌ی بلند با این سیستم ترکیبی در مقابل باد بسیار مطلوب عمل می‌کند و می‌تواند در مقابل ارتعاش سازه رفتار مطلوبی از خود نشان دهد.



شکل ۱۰. جذب انرژی بار- تغییر مکان نمونه‌ها.

Archive of SID

- تسلیم هر دو نمونه به طور تقریبی در جابه‌جایی نسبی 0.74° درصد شروع شد. ناحیه‌ی تسلیم‌شدگی برای نمونه‌ی ساده از گوشه‌ها و برای نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده از لبه‌ی بازشو و چشمه‌ی توپر میانی متصل به تیر آغاز شد و در سطح جابه‌جایی نسبی 1.75° درصد، صفحه‌ی دیوار برشی فولادی شروع به پاره شدن کرد.
- با توجه به وجود سخت‌کننده، در سطح جابه‌جایی نسبی یکسان، ناحیه‌ی تسلیم‌شدگی بیشتری در نمونه‌ی بازشو و دارای سخت‌کننده نسبت به نمونه‌ی ساده به چشم خورد.
- مطابق نتایج کرنش‌سنج‌ها، تسمه‌های اتصال در گوشه‌ها در محل اتصال تیر به ستون، دارای بیشترین تنش وارده بودند. در حالی‌که این تسمه‌ها و سایر اجزا در محدوده‌ی کشسانی باقی ماندند. پس می‌توان نتیجه گرفت که تمام جذب انرژی را صفحه‌ی دیوار برشی فولادی متحمل شده است.
- قرار دادن صفحه‌ی دیوار برشی فولادی در قاب بتنی، ظرفیت بار جانبی و سختی اولیه را به ترتیب تا ۳ و ۸ برابر افزایش داد. هم‌چنین جذب انرژی و میرایی معادل را به ترتیب ۱۲ و ۴ برابر کرد.
- تعبیه‌ی سخت‌کننده‌های افقی و قائم در نمونه‌ی دارای بازشو، سختی را تقریباً یکسان نگه داشت. اما ظرفیت نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده، ۷ درصد کمتر از نمونه‌ی ساده بود.
- نمونه‌ی دارای بازشو و سخت‌کننده، بیشترین جذب انرژی و میرایی معادل را از خود نشان داد و به ترتیب نسبت به نمونه‌ی ساده ۱۷ و ۱۵ درصد افزایش داشت.

تقدیر و تشکر

نمونه‌های آزمایشگاهی این مقاله در کارخانه‌ی بتن پیش‌ساخته‌ی ایثار غرب ساخته شد و در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تحت بارگذاری قرار گرفت. نویسندگان این مقاله از تمام حامیان این پژوهش تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

۴.۳. نتایج کرنش‌سنج‌ها

کرنش‌سنج‌ها در نمونه‌ی SPSWS در گوشه‌ها و مرکز و در نمونه‌ی SPSWO در گوشه‌ها (اطراف لبه‌ی بازشو) و در مرکز چشمه‌های توپر نصب شدند. در شکل ۱۳ نمونه‌ی از نتایج کرنش‌سنج‌ها نشان داده شده است. برای نمونه‌ی SPSWS، نتیجه‌ی کرنش‌سنج گوشه و برای نمونه‌ی SPSWO نتایج کرنش‌سنج‌های لبه‌ی بازشو در گوشه، مرکز بالاترین چشمه‌ی توپر و مرکز یکی از چشمه‌های توپر میانی نشان داده شده است. با توجه به مشخصات مصالح استفاده شده آغاز تسلیم شدن در کرنش 0.70° اتفاق می‌افتد.

مطابق مشاهدات عینی، نتایج کرنش‌سنج‌ها در نمونه‌ی SPSWS نشان می‌دهد که تسلیم در جابه‌جایی ۱۱ میلی‌متر، یعنی جابه‌جایی نسبی 0.75° درصد اتفاق افتاده است. این نتیجه‌گیری برای مرکز چشمه‌های نمونه‌ی SPSWO نیز صادق است. بنابراین، می‌توان گفت با وجود سخت‌کننده ناحیه‌ی تسلیم را می‌توان به اکثر نقاط دیوار برشی فولادی منتقل کرد و از کارایی و جذب انرژی بیشتری بهره برد. همچنین در این نمونه مقدار کرنش در چشمه‌ی میانی بیشتر از چشمه‌ی بالایی است که با مشاهدات عینی تطابق کامل دارد. در چشمه‌ی توپر انتهایی متصل به تیر نیز در اثر شدت تنش پارگی رخ داد که بزرگی تنش و کرنش را در چشمه‌ی انتهایی نسبت به چشمه‌های بالایی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود به علت تمرکز تنش در لبه‌ی بازشو مقدار کرنش از نواحی دیگر خیلی بیشتر است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه اندرکنش صفحه‌ی دیوار برشی فولادی در قاب بتنی به طور آزمایشگاهی بررسی شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشت قرار گرفتند و نمودار بار - تغییر مکان آنها استخراج شد. مشاهدات آزمایش و نتیجه‌گیری‌های مربوط به رفتار لرزه‌ی به قرار زیر است:

منابع (References)

1. Choi, H.K., Choi, Y.C. and Choi, C.S. "Development and testing of precast concrete beam-to-column connections", *Journal of Engineering Structures*, **56**, pp. 1820-1835 (2013).
2. Negro, P., Bournas, D.A. Molinal, F.J. "Pseudo dynamic tests on a full-scale 3-story precast concrete building: Global response", *Journal of Engineering Structures*, **57**(4), pp. 594-608 (2013).
3. Negro, P., Bournas, D.A. and Molinal, F.J. "Pseudo dynamic tests on a full-scale 3-story precast concrete building: Behavior of the mechanical connections and floor diaphragms", *Journal of Engineering Structures*, **57**(4), pp. 609-627 (2013).
4. Parastesh, H., Hajirasouliha, I. and Ramezani, R. "A new ductile moment-resisting connection for precast concrete

پانوشته‌ها

8. scouts
9. sentinels
10. elders
11. hunters
12. caretakers
1. engineered cementitious composite
2. Grout sleeve
3. self-centerin
4. equivalent constitutive model
5. Pinching
6. design guide 20-AISC
7. steel plate shear wall simple
8. steel plate shear wall opening
9. moment bare frame

- frames in seismic regions: An experimental investigation", *Journal of Engineering Structures*, **70**, pp. 144-157 (2014).
5. Fathi, M., Parvizi, M., Karimi, J. and et al. "Seismic design and performance of dry-assembled precast structures with adaptable joints", *Journal of Scientia Iranica*, **25**(4), pp. 1977-1986 (2018).
 6. Yuksel, E., Karadogan, F.H., Bal, E.I. and et al. "Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction", *Journal of Engineering Structures*, **99**, pp. 157-172 (2015).
 7. Bahrami, S., Madhkhan, M., Shirmohammadi, F. and et al. "Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading", *Journal of Engineering Structures*, **132**, pp. 808-821 (2017).
 8. Yan, Q., Chen, T. and Xie, Z. "Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves", *Journal of Engineering Structures*, **155**, pp. 330-344 (2018).
 9. Lago, D.B., Negro, P. and Lago, D.A. "Seismic design and performance of dry-assembled precast structures with adaptable joints", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **106**, pp. 182-195 (2018).
 10. Ketiyot, R. and Hansapinyo, C. "Seismic performance of interior precast concrete beam-column connections with T-section steel inserts under cyclic loading", *Journal of earthquake engineering and engineering vibration*, **17**, 355-369 (2018).
 11. Sabouri-Ghomi, S. and Asad Sajjadi, S.R. "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, **75**, pp. 152-159 (2012).
 12. Valizadeh, H., Sheidaii, M. and Showkati, H. "Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **70**, pp. 308-316 (2012).
 13. Clayton, M.P., Berman, J.W. and Lowes, L.N. "Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates", *Journal of Constructional Steel Research*, **106**, pp. 198-208 (2015).
 14. Nie, J.G., Zhu, L., Fan, J.S. and et al. "Lateral resistance capacity of stiffened steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, **67**, pp. 155-167 (2013).
 15. Alavi, E. and Nateghi, F. "Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation", *Journal of Constructional Steel Research*, **89**, pp. 9-20 (2013).
 16. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems", *Journal of Constructional Steel Research*, **98**, pp. 88-99 (2014).
 17. Bhowmick, A.K. "Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations", *Journal of Thin-walled Structures*, **94**, pp. 30-42 (2014).
 18. Wang, M., Shi, Y., Xu, J. and et al. "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, pp. 373-386 (2015).
 19. Wang, M., Shi, Y., Xu, J. and et al. "Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials", *Journal of Constructional Steel Research*, **107**, pp. 194-210 (2015).
 20. Zirakian, T. and Zhang, J. "Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **112**, pp. 45-53 (2015).
 21. Shekastehband, B., Azaraxsh, A. and Showkati, H. "Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only", *Journal of Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **17**, pp. 355-369 (2017).
 22. Ozcelik, Y. and Clayton, M.P. "Strip model for steel plate shear walls with beam-connected web plates", *Journal of Engineering Structures*, **136**, pp. 369-379 (2017).
 23. Wei, M.W, Liew, J.Y.R. and Fu, X.Y. "Experimental and numerical investigation of novel partially connected steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **132**, pp. 1-15 (2017).
 24. Guo, H.G, Li, Y.L., Liang, G. and et al. "Experimental study of cross stiffened steel plate shear wall with semi-rigid connected frame", *Journal of Constructional Steel Research*, **135**, pp. 69-82 (2017).
 25. Wang, M. and Yang, W. "Equivalent constitutive model of steel plate shear wall structures", *Journal of Thin-walled Structures*, **124**, pp. 415-429 (2018).
 26. Akin, E., Korkmaz, Z.S., Korkmaz, H.H. and et al. "Rehabilitation of infilled reinforced concrete frames with thin steel plate shear walls", *American Society of Civil Engineers*, **30**(4), pp. 1-8(2016).
 27. Gorgulu, T., Tama, Y.S., Yilmaz, S. and et al. "Strengthening of reinforced concrete structures with external steel shear walls", *Journal of Cogent Engineering*, **70**, pp. 226-235 (2012).
 28. Formisano, A. and Lombardi, L. "Low yield metals and perforated steel shear wallsfor seismic protection of existing RC buildings", *Journal of Constructional Steel Research*, **5**: 1525813, pp.1-18 (2018).
 29. Iranian Building Codes and Standards, Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition, (2014-1393).
 30. AISC. "Steel design guide 20, steel plate shear walls", American Institute of Steel Construction, Chicago, 1-131 (2006).
 31. Iranian National Building Code, Part 10th, Design and Construction of Steel Buildings, (2013-1392).
 32. Alinia, M.M. , Shirazi, S.R. "On the design of stiffeners in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, pp. 2069-2077 (2009).
 33. Craig Jr, R.R. and Kurdila, A.J. "Fundamentals of Structural Dynamics", 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, ISBN: 978-0-471-43044-5 (2006).