

مطالعه آزمایشگاهی دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل پذیر

سه طبقه

سعید صبوریⁱ؛ مجید قلہکیⁱⁱ

چکیده

دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل پذیر سه طبقه دارای ورق نازک با مقیاس یک سوم تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش شد. دیوارهای مذکور دو نوع اتصال تیر به ستون صلب (SPSW-R) و ساده (SPSW-S) دارند و در ورق پانل‌ها و ستون‌ها به ترتیب از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و پرمقاومت استفاده شد. هر کدام از نمونه‌های با اتصال صلب و ساده به ترتیب تحت ۳۱ و ۱۹ دوره بارگذاری قرار گرفتند که از این تعداد به ترتیب ۲۵ و ۱۳ دوره آن در محدوده غیرخطی انجام شد. قبل از خرابی نمونه و پایان آزمایش، تغییر مکان طبقه اول نمونه‌های با اتصال صلب و ساده به ترتیب به ۱۰ و ۱۱ برابر تغییر مکان اولین تسلیم شدگی آنها رسید. نمونه‌ها شکل پذیری عالی (به ترتیب ۶/۶۳ و ۸/۲۴)، سختی اولیه زیاد و جذب انرژی بالایی داشتند و حلقه‌های هیستریزیس آنها رفتار پایداری را نشان دادند. استفاده از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در ورق پانل‌ها باعث جذب انرژی فوق‌العاده‌ای در تغییر مکان‌های بزرگ شد. علاوه بر این، در خلال آزمایش‌ها و تا پایان آنها هیچ‌گونه علایمی از کماتش موضعی یا کلی در ستون‌ها دیده نشد. نتایج نشان داد که نوع اتصال تیر به ستون بر روی ضریب شکل پذیری، مقاومت و جذب انرژی تأثیرگذار است؛ ولی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سختی اولیه ندارد.

کلمات کلیدی

دیوار برشی فولادی با ورق نازک، فولاد نرم (جاذب انرژی)، رفتار هیستریزیس، اتصال تیر به ستون، شکل پذیری، سختی، مقاومت، جذب انرژی.

Experimental Study of Two Three-Story Ductile Steel Plate Shear Walls

S. Sabouri-Ghomi.; M. Gholhaki.

ABSTRACT

Two specimens with one third scale three-story single bay ductile steel plate shear wall with unstiffened infill plates were tested by using controlled cyclic loading. The shear walls had two types of rigid and simple beam-to-column connections and also easy-going and high strength steel were used in their plates of panels and boundary frames, respectively. The test specimens proved to be initially very stiff, showed excellent ductility (6.63 and 8.24, respectively) and energy dissipation characteristic, and exhibited stable behavior. The results show that type of beam-to-column connection, effects on ductility, strength and energy dissipation and doesn't effect on initial stiffness.

KEY WORDS

Thin Steel Plate Shear Wall, Easy-Going Steel, Hysteretic Behavior, Beam-to-Column Connection, Ductility, Stiffness, Strength, Energy Absorption

ⁱ دانشجویار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ sabouri@kntu.ac.ir

ⁱⁱ استادیار دانشگاه سمنان؛ mgholhaki@semnan.ac.ir

کمانش الاستیک، مکانیزم تحمل بار از برش داخل صفحه به میدان کشش قطری^۶ تغییر می‌یابد و سپس تا تسلیم ورق فولادی، مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی در بارهای دوره‌ای جذب می‌شود.

در سالهای اخیر، از دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در تعدادی از ساختمان‌ها که عمدتاً در ژاپن و امریکای شمالی قرار دارند استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین ساختمان‌های ساخته شده با این سیستم در محدوده لرزه‌خیزی بالا، ساختمان ۳۵ طبقه در کوبه ژاپن است، شکل (۲). این ساختمان در سال ۱۹۸۸ ساخته شد و در جریان زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد[۴]. همچنین ساختمان ۲۴ طبقه دانشگاه ایالات متحده در سیاتل واشنگتن امریکا و ساختمان ۶ طبقه در سنت جرج واقع در ایالت کبک کانادا نیز نمونه‌هایی از کاربرد این سیستم است، شکل‌های (۳) و (۴).

۲- آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک از ابتدا تا کنون

در این مقاله، مطالعه بر روی کارهای قبلی فقط به مطالعات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک محدود می‌شود.

در سال ۱۹۸۳، تیملر و کولاک[۲۷]، یک دیوار برشی فولادی یک طبقه را به منظور ارزیابی مدل تحلیلی که تربورن و همکاران[۲۶]، ارایه داده بودند، آزمایش کردند. نمونه به صورت استاتیکی تحت سه دوره کامل و تا رسیدن به حد تغییرمکان بهره‌برداری $h_s/400$ (ارتفاع طبقه است) یا $6/25$ میلی‌متر تحت بارگذاری قرار گرفت. در خلال این دوره‌های بارگذاری، نمونه رفتار الاستیک از خود نشان داد.

در خلال سه دهه گذشته، اقبال عمومی در کاربرد دیوار برشی فولادی^۱ به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در ساختمان‌ها افزایش چشمگیری داشته است. این سیستم شامل تعدادی ورق فولادی است که به تیر و ستون‌های محیطی متصل شده اند[۲]،[۲۲]. ورق‌های مذکور می‌توانند در یک یا چند دهانه و در ارتفاع ساختمان قرار گیرند و یک دیوار طره‌ای را تشکیل دهند، شکل (۱).

در این سیستم، اتصال تیر به ستون قاب می‌تواند بصورت صلب یا ساده انجام گیرد و همچنین پانل‌ها می‌توانند به دو گونه تقویت شده و تقویت نشده اجرا شوند. علاوه بر این، می‌توان داخل ورق فولادی پانل‌ها، بازشو ایجاد کرد. از این سیستم می‌توان در ساخت سازه‌های جدید و یا ترمیم و افزایش مقاومت سازه‌های موجود فولادی یا بتنی استفاده کرد.

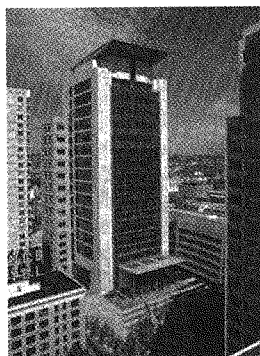
دیوارهای برشی فولادی خصوصیات ذاتی مفیدی در برابر بارهای لرزه‌ای از خود نشان می‌دهند. در این زمینه می‌توان به شکل‌پذیری^۲ فوق‌العاده، مقاومت^۳ بالا، سختی^۴ اولیه زیاد، رفتار پایدار در بارگذاری دوره‌ای^۵ و جذب انرژی^۶ چشمگیر آنها اشاره کرد.

تا سال ۱۹۸۰، طراحی دیوارهای برشی فولادی بر مبنای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه ورق پانل‌ها صورت می‌گرفت. اگرچه استفاده از سخت کننده‌ها در پانل‌های دیوارهای برشی فولادی باعث افزایش میزان جذب انرژی در آنها می‌شود[۲۵] ولی در عین حال این مسأله باعث افزایش هزینه ساخت آنها می‌گردد.

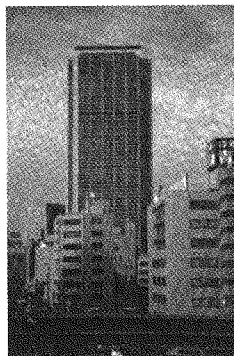
از دیرباز مشخص شده است که کمانش در ورق‌ها به معنای پایان تحمل باربری آنها نیست و پس از آن، مقاومت پس‌کمانشی قابل ملاحظه‌ای در پانل‌های برشی بدون تقویت، با شکل‌گیری میدان کششی به وجود می‌آید[۳۰]. در نقطه حدی



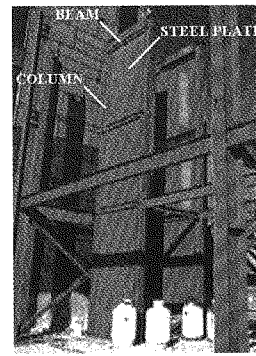
شکل (۴): ساختمان ۶ طبقه در حال ساخت در کبک کانادا[۱۵]



شکل (۳): ساختمان ۲۴ طبقه دانشگاه ایالات متحده در سیاتل امریکا[۲۴]



شکل (۲): ساختمان ۳۵ طبقه کوبه ژاپن[۶]



شکل (۱): اجزای مختلف دیوار برشی فولادی[۱۵]

پس از آن، نمونه در یک جهت و تا حداکثر ظرفیت خود تحت بار یک جهته قرار گرفت. در این آزمایش هیچ‌گونه بار محوری بر روی ستون‌ها وارد نشد.

در سال ۱۹۸۷، ترمپوش و کولاک [۲۸]، یک آزمایش شبیه آزمایش تیملر و کولاک [۲۷]، بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام دادند. در این نمونه اشکالات نمونه قبلی برطرف و در آن از اتصالات ساده پیچی در قاب، ورق نازک در پانل و تیرهای دارای سختی زیاد استفاده شد.

در برنامه تحقیقاتی که الغالی و کیکس [۱۲]، [۱۳]، در سال ۱۹۹۰ انجام دادند، رفتار ۱۰ نمونه دیوار برشی فولادی با مقیاس $\frac{1}{4}$ تحت بارگذاری دوره‌ای بررسی شد. نمونه‌ها سه طبقه و یک دهانه بودند و تفاوت آنها با یکدیگر در ضخامت ورق و نوع اتصال تیر به ستون آنها بود. در خلال آزمایش‌ها ستون‌ها به علت طراحی ضعیف دچار کمانش شدند و همچنین با توجه به اجرای نادرست اتصال ساده تیرها به ستون‌ها، این اتصال از خود رفتاری مشابه با اتصال صلب نشان داد.

در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲، صبوری و رابرتز [۲۲]، [۲۳] و رابرتز و صبوری [۱۹]، [۲۰]، ۱۲ نمونه پانل برشی کوچک مقیاس را؛ که دارای ورق نازک با ابعاد 300×300 میلی‌متر و 450×300 میلی‌متر بودند، تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش کردند. ورق‌های به کار رفته با ضخامت $0/54$ و $0/83$ میلی‌متر از جنس فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و فولاد ساختمانی و با ضخامت $1/23$ میلی‌متر از جنس آلومینیوم بودند. قاب محیطی (شامل تیرها و ستون‌ها) به کمک مفصل به صورت کاملاً لولایی اجرا شد.

هر نمونه، تحت بار کششی و فشاری بر روی دو قطر مخالف، که در گوشه‌های آن وارد می‌شد، تحت بارگذاری دوره‌ای قرار گرفتند. یکی از نتایج خوب برنامه تحقیقاتی صبوری، بررسی اثر بازشوها بر روی مقاومت و سختی پانل‌های برشی بود. او نتیجه‌گیری کرد که مقاومت و سختی پانل‌های برشی با افزایش ابعاد بازشوها به صورت خطی کاهش می‌یابد.

در سال ۱۹۹۷، درایور [۱۰]، [۱۱]، یک دیوار برشی فولادی

$\frac{1}{4}$ چهار طبقه با مقیاس $\frac{1}{4}$ را که دارای اتصالات تیر به ستون صلب بود، تحت بارگذاری شبه استاتیکی ۹ دوره‌ای آزمایش کرد. هدف این آزمایش، مطالعه عملکرد یک دیوار برشی فولادی چند طبقه تحت اثر بارهای دوره‌ای جدی بود. یک جک عمودی به منظور اعمال بار ثقیل بر ستون‌ها، در بالای نمونه نصب شد. بارهای جانبی معادل به صورت دوره‌ای در تراز هر طبقه وارد شد و نمونه تا حداکثر شکل‌پذیری، تحت ۳۵ دوره بارگذاری

قرار گرفت. در نهایت، با شکست جوش پای ستون نمونه، آزمایش پایان یافت.

در سال ۱۹۹۷، لوبل [۱۶]، دو پانل برشی یک طبقه و یک دیوار برشی فولادی چهار طبقه را تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش کرد. هدف از این آزمایش‌ها بررسی مقاومت، سختی، میدان کشش قطری، پایداری منحنی‌های هیستریزس و تعامل بین ورق و قاب بود.

در سال ۱۹۹۹، رضائی [۱۸]، یک آزمایش روی میز لرزان انجام داد. نمونه مورد آزمایش همان دیوار برشی فولادی چهار طبقه لوبل بود. نمونه در معرض حرکت شبیه‌سازی شده بر اساس یک رکورد زلزله قرار گرفت. ظرفیت محدود میز لرزان مانع از پاسخ غیرالاستیک نمونه شد؛ بنابراین بحث و بررسی پژوهشگران عمدتاً بر روی پاسخ سیستم در محدوده الاستیک متمرکز شد.

در سال ۲۰۰۱، آستانه اصل و ژائو [۵]، دو نمونه دیوار برشی فولادی سه طبقه با ارتفاع کلی $7/2$ متر را تحت بارگذاری دوره‌ای بررسی کردند. نمونه‌ها شامل نصف یک دیوار برشی فولادی کوپله و ستون‌های فولادی دایروی توخالی با بتن پر شده بودند. نمونه‌ها شکل‌پذیری خوب و رفتار هیستریزس پایدار را به همراه جذب انرژی مناسب از خود نشان دادند.

در سال ۲۰۰۲، بهبهانی‌فرد [۶]، یک آزمایش بر روی نمونه دیوار برشی فولادی سه طبقه با مقیاس $\frac{1}{4}$ تحت بارگذاری دوره‌ای و همراه بارهای ثقیل انجام داد. در واقع، نمونه مورد آزمایش، بخش فوقانی نمونه چهار طبقه‌ای بود که در ایور، [۱۰]، [۱۱] آزمایش کرده بود. با توجه به این‌که نمونه، در آزمایش قبلی خود تحت یک تاریخچه تغییرشکل‌های پلاستیک قرار گرفته بود، لذا ارزیابی اثر آزمایش قبلی بر روی عملکرد کلی نمونه، یکی از اهداف این آزمایش بود.

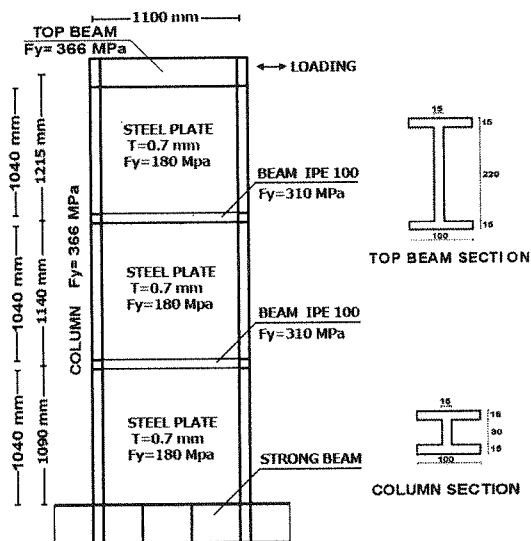
در سال ۲۰۰۴، ویان و برونیو [۲۹]، سه نمونه دیوار برشی فولادی را که در ورق پانل‌های آنها از فولاد کم مقاومت^۱ و در دو انتهای تیرهای آنها از مقطع کاهش یافته^۲ استفاده شده بود تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش کردند. در دو عدد از نمونه‌ها سوراخ‌هایی در ورق‌های آنها ایجاد شد. در ورق یکی از نمونه‌ها به منظور کاهش مقاومت کلی آن در مقایسه با نمونه بدون بازشو، تعداد قابل توجهی سوراخ ایجاد شد. در نمونه بعدی یک بازشو به شکل ربع دایره در گوشه پانل ایجاد شد. در این نمونه به منظور انتقال نیروهای ورق به تیر و ستون‌های محیطی، اطراف این بازشو، مسلح گردید.

در سال ۲۰۰۵، خرازی [۱۵]، دو نمونه دیوار برشی فولادی

شدند. تیرهای طبقات اول و دوم از نوع پروفیل IPE 100 انتخاب و تیر طبقه سوم از فولاد پرمقاومت به ضخامت جان و بال ۱۵ میلی‌متر طراحی شد. ارتفاع جان و عرض بال این تیر به ترتیب ۲۲۰ و ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. علت انتخاب این تیر عمیق، جلوگیری از خمش نامطلوب به دلیل وجود میدان کشش قطری در پانل پایینی تیر و عدم وجود این میدان در قسمت فوقانی آن است. شکل‌های (۶) و (۷) جزئیات اجرایی دو نوع اتصال تیر به ستون صلب و ساده را به ترتیب در نمونه‌های SPSW-S و SPSW-R نشان می‌دهند.

این اتصالات به تیرهای میانی مربوط است و اتصال تیر به ستون در تیر بالایی هر دو نمونه به صورت صلب اجرا شد. در اتصال تیر به ستون صلب، اتصال بال تیرها به بال ستون‌ها با استفاده از جوش شیاری با نفوذ کامل و به صورت دور تا دور انجام شد. همچنین جان تیرها با جوش گوشه دو طرفه به بال ستون‌ها متصل شدند. ستون‌ها با استفاده از جوش شیاری با نفوذ کامل؛ که هم در بال و هم در جان آنها ایجاد شده بود، به تیر عمیق کف متصل شدند. علاوه بر این، لچکی‌های سخت‌کننده به ابعاد 60×60 میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میلی‌متر در پای ستون‌ها اجرا شد. در اتصال تیر به ستون ساده، جان تیر به بال ستون به وسیله دو نبشی $L30 \times 30 \times 3$ به طول ۳۰ میلی‌متر متصل شد، شکل (۷).

در این اتصال، بین جان و بال تیر با بال ستون، فاصله‌ای به اندازه ۱۵ میلی‌متر ایجاد شد و همچنین به منظور اجرای اتصال کاملاً مفصل، در محل تلاقی نبشی قائم و افقی در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون، فاصله‌ای به اندازه ۶ میلی‌متر برای امکان دوران کامل تیر نسبت به قاب ایجاد شد.



شکل (۵): تصویر، نمای کلی و جزئیات نمونه‌های دیوار برشی فولادی

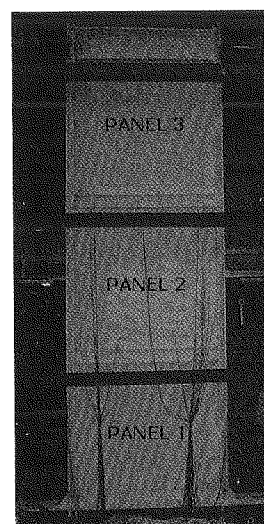
را با راهنمایی ونچورا و مشاوره صبوری تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش کرد. ورق پانل‌ها در این نمونه‌ها از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و فولاد معمولی ساختمانی، قاب آن از فولاد پرمقاومت و نسبت ارتفاع به عرض پانل‌ها بزرگتر از یک انتخاب شد. پانل‌ها رفتار پایدار داشتند و مقاومت کلی، سختی الاستیک و پس‌کمانشی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی از خود نشان دادند.

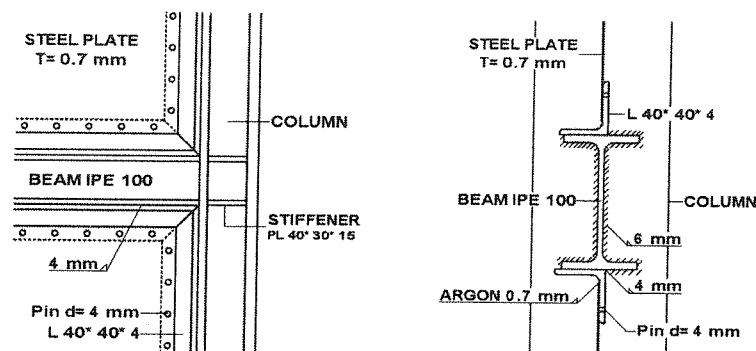
۳- اهداف آزمایش‌ها

- اهداف اصلی این تحقیق [۱۴] عبارتند از:
- ارزیابی اثر نوع اتصال تیر به ستون بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک
 - ارزیابی مفهوم کلی استفاده از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک
 - مشاهده کارآمدی روش تعامل ورق با قاب (PFI) در دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک
 - مطالعه رفتار هیستریزس دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، شامل بررسی شکل‌پذیری، سختی، مقاومت، جذب انرژی و زاویه میدان کشش قطری
 - ارزیابی عملکرد اتصالات و اعضای دیوار برشی فولادی با ورق نازک

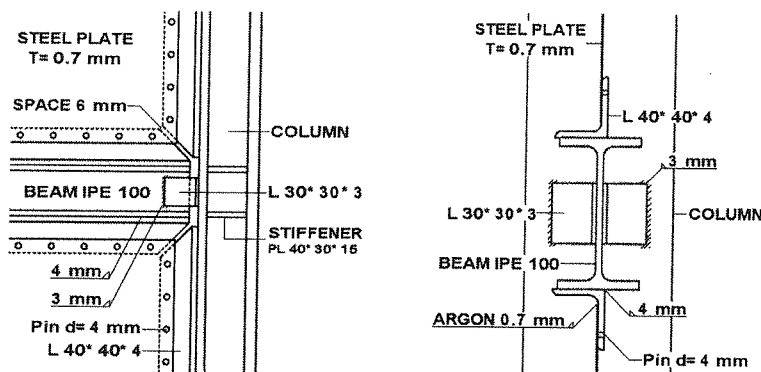
۴- جزئیات آزمایش

شکل (۵)، نمای کلی دو نمونه دیوار برشی فولادی SPSW-S و R را که تنها تفاوت آنها در نوع اتصال تیرهای میانی به ستون است، نشان می‌دهد [۲۱]. ستون‌ها به صورت یکپارچه و بدون هیچ‌گونه وصله ساخته





شکل (۶): جزئیات اتصال تیر به ستون صلب



شکل (۷): جزئیات اتصال تیر به ستون ساده

شد. در یک سوم ابتدایی و انتهایی ورق در گوشه‌ها به منظور مقابله با میدان کششی قطری، فاصله پرچ‌ها از یکدیگر به ۱۵ میلی‌متر کاهش داده شد.

شایان ذکر است که سیستم اتصال تلفیقی مذکور به دلایل ذکر شده در این آزمایش‌ها اجرا شد؛ ولی در مقیاس واقعی به دلیل ضخامت مناسب ورق‌ها و امکان جوشکاری ورق‌ها به دو طرف قاب نبشی، به استفاده همزمان از جوش و پرچ نیازی نیست. جدول (۱) اطلاعات مربوط به مشخصات و پارامترهای مکانیکی ورق‌ها و دیگر اجزای نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): خصوصیات مکانیکی اجزای نمونه‌های دیوار برشی فولادی

اعضا	$\sigma_0 (N/mm^2)$	$E (kN/mm^2)$
ورق	180	206
ستون	366	206
تیرهای میانی	310	206
تیر فوقانی	366	206

که σ_0 و E به ترتیب تنش تسلیم و مدول الاستیسیته مصالح می‌باشند.

بارگذاری دوره‌ای به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی، فقط در بالای نمونه و به وسیله دو عدد چک هیدرولیکی فشاری؛ که در دو طرف نمونه‌ها نصب شده بود انجام شد.

هر دو نمونه براساس روش تعامل ورق با قاب؛ که صبوری و رابرتز در سال‌های ۲-۱۹۹۱ برای تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی ارائه کرده بودند، طراحی شدند و همچنین مفهوم فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در آنها به کار گرفته شد. علاوه بر آن، تمام ملاحظات طراحی آیین‌نامه AISC نیز مدنظر قرارگرفت.

ورق‌ها با قاب نبشی به تیرها و ستون‌های محیطی متصل شدند، شکل‌های (۶) و (۷). این نبشی‌ها با جوش گوشه‌ای؛ که در لبه و گوشه آنها اجرا شد، به قاب محیطی متصل شدند.

ورق‌ها به نبشی‌ها با ۲۰ میلی‌متر همپوشانی متصل شدند. این نحوه اتصال نوین، یک روش ساده برای نصب ورق در داخل قاب است و مشکلات نصب را به حداقل می‌رساند.

به دلیل نازکی ورق، جوش پرکننده از نوع آرگون فقط در یک وجه بال نبشی‌ها و ورق و با بعد ۰/۷ میلی‌متر (برابر ضخامت ورق پرکننده) ایجاد شد.

نتایج آزمایش کششی بر روی چند نمونه؛ که تداعی کننده محل اتصال ورق به قاب نبشی بودند، نشان داد که جوش یک طرفه مذکور جوابگوی مقاومت نهایی ورق نیست.

لذا به منظور رفع مشکل مذکور علاوه بر اجرای جوش بین ورق و نبشی از تعدادی پرچ به قطر ۴ میلی‌متر و به فاصله مرکز به مرکز ۲۰ میلی‌متر در دور تا دور قاب نبشی استفاده

تمام اطلاعات و پارامترهای مهمی که در نتایج یا کنترل آزمایش‌ها تأثیرگذار بود، ثبت گردید. بار چک‌های هیدرولیکی، به وسیله سلول‌های اندازه‌گیری بار^{۱۲}، سنجش شد. کرنش‌سنج‌ها^{۱۴} در ۵۲ نقطه واقع بر روی ستون‌ها، تیرها و ورق‌ها نصب شدند تا به وسیله آنها مقدار تنش و زمان تسلیم‌شدگی تعیین و راستای میدان کشش قطری در ورق‌ها بررسی شود.

۱۲ تغییرمکان‌سنج^{۱۵} با دقت دهم میلی‌متر در تراز طبقات و میانه آنها برای اندازه‌گیری تغییرمکان دیوار در دو طرف هر نمونه نصب شدند و ۴ تغییرمکان‌سنج با دقت دهم میلی‌متر نیز بر روی تیر عمیق کف نصب شدند تا لغزش و دوران احتمالی پایین نمونه‌ها را اندازه‌گیری کند.

به منظور تحلیل و طراحی نمونه‌ها علاوه بر استفاده از روش تعامل ورق با قاب، آنالیزهای اجزای محدود غیرخطی اولیه با نرم‌افزار ANSYS انجام شد. با توجه به حساسیت آنالیز نمونه‌ها نسبت به ضخامت اندک ورق‌ها و ایجاد کماتش برشی و ناپایداری موضعی در آنها، امکان انجام آنالیز تحت بار دوره‌ای میسر نبود و بنابراین آنالیزها با بار یک جهته^{۱۶} و به صورت بارافزون^{۱۷} انجام گرفت. بر مبنای نتایج آنالیزها و همچنین روش تعامل ورق با قاب، ظرفیت مورد نیاز چک‌های افقی نصب شده بر روی قاب پشتیبان اصلی و همچنین محدوده مورد نیاز جک‌ها و تغییرمکان‌سنج‌ها به دست آمد.

۵- پروتکل بارگذاری و روند انجام آزمایش

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک سازه، به اعمال تعداد زیادی تاریخچه بار و تغییرمکان به آن نیاز است. اغلب آزمایش‌های تحت بارگذاری آهسته دوره‌ای به منظور شبیه‌سازی بار زلزله از تاریخچه بارگذاری افقی به گونه‌ای که در آن، تغییرمکان‌ها و بارها به صورت تدریجی در دوره‌های متوالی بارگذاری افزایش می‌یابند، استفاده می‌کنند [۹].

یکی از دستورالعمل‌های بارگذاری با نرخ افزایش تدریجی، روش پیشنهادی انستیتو تحقیقات کاربردی آمریکا^{۱۸} [۳] است که در این برنامه تحقیقاتی از آن استفاده شده است. این پروتکل بارگذاری (ATC-24) توصیه می‌کند که پارامتر تغییرمکان به عنوان پارامتر اصلی کنترل کننده بارگذاری انتخاب شود. بر این اساس، در این آزمایش‌ها تغییرمکان طبقه اول به عنوان پارامتر کنترل کننده بارگذاری‌ها انتخاب شد.

بدین ترتیب، تغییرمکان δ_y (تغییرمکان پانل طبقه اول در زمان تشکیل اولین تسلیم‌شدگی در نمونه) و بار Q_y (بار ایجاد کننده اولین تسلیم‌شدگی در نمونه) اندازه‌گیری و بر اساس آن

میزان شدت دوره‌های بارگذاری اعمالی بر روی نمونه‌ها تعیین شد. بر روی نمونه‌های SPSW-R و SPSW-S به ترتیب ۳۱ و ۱۹ دوره بارگذاری اعمال گردید که از این تعداد به ترتیب ۲۵ و ۱۳ دوره آن در محدوده غیرخطی اعمال شد.

۶- رفتار نمونه‌ها در حین آزمایش

نمونه‌ها در خلال دوره‌های مختلف بارگذاری از خود رفتار متفاوتی نشان دادند که در زیر به شرح آنها در هر یک از نمونه‌ها پرداخته می‌شود.

۶-۱- نمونه SPSWR

در خلال شش دوره بارگذاری ابتدایی، بررسی ورق پانل‌ها و اعضای محیطی نشان داد که هیچ‌گونه تسلیم‌شدگی یا کماتش غیرالاستیک در ورق اتفاق نیفتاده است [۱۴].

در دوره بارگذاری ۷ (اولین دوره بارگذاری با تغییرمکان تسلیم‌شدگی δ_y برابر ۲/۴۴ میلی‌متر)، اولین نشانه‌های تسلیم‌شدگی، مشاهده شد. پانل‌های دوم و سوم در حداکثر تغییرمکان دچار کماتش قابل مشاهده شدند. علاوه بر این، صدای ناشی از ایجاد و تغییر جهت میدان‌های کششی قطری ورق‌ها^{۱۹}، از این دوره بارگذاری تا انتهای آزمایش شنیده شد.

در خلال دوره‌های بارگذاری ۱۰ الی ۱۲ با افزایش بار، میزان کماتش‌ها در پانل‌های طبقات دوم و سوم افزایش یافت و بخشی از کماتش‌های مذکور پس از باربرداری، به صورت مشخصی در نمونه باقی ماندند.

در دوره بارگذاری ۱۳، اولین تسلیم‌شدگی در گوشه سمت چپ تیر طبقه دوم به وقوع پیوست. در دوره بارگذاری ۲۱، اولین نشانه‌های شروع پارگی جزئی ورق در گوشه سمت راست بالای ورق پانل دوم در نزدیکی پرچ‌های متصل کننده ورق به نبشی مشاهده شد، شکل (۸).

این پارگی در خلال دوره‌های بارگذاری بعدی افزایش یافت. پس از آن، جوش محل اتصال نبشی‌های قائم و افقی در نزدیکی اتصال تیر به ستون طبقه دوم شروع به ترک خوردگی کرد و در دوره‌های بارگذاری بعدی این ترک به طرف اتصال تیر به ستون رشد یافت.

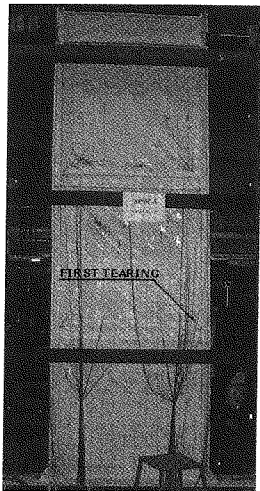
در دوره بارگذاری ۲۶، ترک اتصال تیر به ستون در طبقه دوم افزایش یافت. علاوه بر این، جوش اتصال نبشی‌های قائم و افقی در سمت راست بالای تیر طبقه اول و گوشه‌های پایینی پانل‌های طبقات دوم و سوم ترک خورد. همچنین در این دوره بارگذاری، در تغییرمکان δ_y ۹ نمونه به حداکثر مقاومت (برش پایه) خود؛ که برابر ۱۵۳ کیلو نیوتن بود، رسید.

کمانش قابل ملاحظه شدند. همچنین، صدای ناشی از ایجاد و تغییر جهت میدان‌های کشش قطری ورق‌ها، از این دوره بارگذاری تا انتهای آزمایش شنیده شد.

در دوره‌های بارگذاری ۸ و ۹ سفیدآبه^{۲۰} (آب آهک خشک شده بر روی نمونه‌ها) روی ورق‌ها در نزدیکی محل اتصال نبشی‌های افقی و قائم در پانل‌های اول و دوم مقدار جزئی پوسته شد. در خلال دوره‌های بارگذاری ۱۰ و ۱۱ و با افزایش بار، شدت کمانش در پانل‌های دوم و سوم افزایش و علاوه بر این، تسلیم‌شدگی ورق‌ها به کل سطح گسترش یافت.

در دوره‌های بارگذاری ۱۲ و ۱۳، پوسته‌شدگی سفیدآبه در قسمت سمت چپ بالای پانل دوم و سمت چپ پایین پانل سوم و نبشی اتصال جان تیر به بال ستون شروع شد.

اولین پارگی در خلال دوره بارگذاری ۱۴، در قسمت سمت راست پائین پانل دوم در نزدیکی نبشی اتصال رخ داد، شکل (۹).

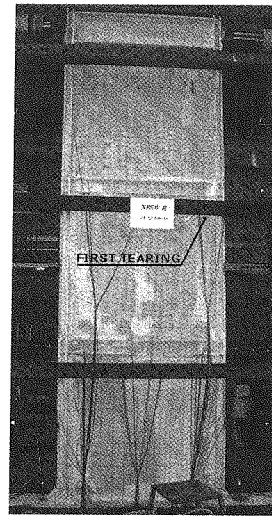


شکل (۹): شروع اولین پارگی در ورق نمونه

SPSW-S در خلال دوره بارگذاری ۱۴

در خلال دوره‌های بارگذاری ۱۵ تا ۱۷، پوسته‌شدگی سفیدآبه در سرتاسر پانل دوم و سوم و تا حدودی در پانل اول گسترش یافت. در پایان نیم‌دوره اول دوره بارگذاری ۱۸، نمونه به حداکثر مقاومت خود؛ که ۱۲۱ کیلونیوتن بود، رسید و در نیم‌دوره دوم و در تغییرمکان ۱۱۵، ابتدا در لبه بالایی و سپس در لبه سمت راست ورق پانل دوم، پارگی به صورت وسیعی ایجاد شد.

در خلال نیم دوره دوم دوره بارگذاری ۱۹ و درست قبل از انهدام، برش پایه به مقدار ۶۸٪ حداکثر برش پایه به دست آمده در دوره بارگذاری ۱۸ رسید. به دلیل پارگی ورق پانل دوم، دوران تیرهای طبقات اول و دوم به مقدار حداکثر خود رسید و نبشی جان تیرها تسلیم شدند. در پایان دوره بارگذاری ۱۹، پارگی در گوشه سمت راست بالای ورق پانل طبقه اول آغاز



شکل (۸): شروع اولین پارگی در ورق نمونه

SPSW-R در خلال دوره بارگذاری ۲۱

در دوره بارگذاری ۲۷، شدت کمانش‌ها در تمام پانل‌ها افزایش یافت. به عنوان مثال بیرون‌زدگی ورق در پانل طبقه دو در حدود ۱۳۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

در دوره‌های بارگذاری ۲۹ و ۳۰، در لبه بالا و سمت راست پانل دوم و در لبه پایین و سمت چپ پانل سوم، ترک‌خوردگی اطراف پرچ‌ها شروع شد و افزایش یافت. در این دوره‌های بارگذاری با توجه به تسلیم‌شدگی فراگیر ورق‌ها و در نتیجه عملکرد جدی قاب، جوش اتصال بال تیرها به بال ستونهای طبقات اول و دوم شکسته شد و ترک خوردگی به داخل جان تیرها گسترش یافت.

در آغاز دوره بارگذاری ۳۱، ورق پانل‌های دوم و سوم در محل اتصال پرچ‌ها پاره شدند. در پایان نیم‌دوره اول دوره بارگذاری ۳۱ و درست قبل از انهدام، برش پایه به ۹۱٪ حداکثر برش پایه نمونه؛ که در دوره بارگذاری ۲۶ حاصل شد، رسید.

در پایان آزمایش، تمامی ستون‌ها سالم ماندند و هیچ‌گونه کمانش موضعی یا کلی در آنها مشاهده نشد. علاوه بر این، هیچ گونه شکست یا پارگی در پانل اول مشاهده نشد و به دلیل عملکرد مناسب سخت کننده‌های پای ستون هیچ‌گونه شکستی در آن منطقه رخ نداد.

۴-۶- نمونه SPSW

در خلال شش دوره ابتدایی بارگذاری، بررسی ورق‌های پرکننده و اعضای محیطی هیچ‌گونه تسلیم‌شدگی را نشان‌ندادند [۱۴].

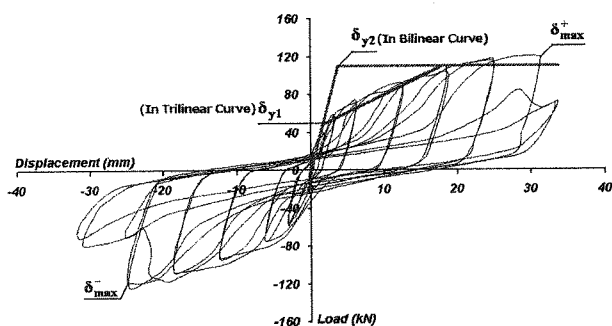
در دوره بارگذاری ۷ (اولین دوره بارگذاری با تغییرمکان تسلیم^{۲۱} برابر ۳/۰۹ میلی‌متر)، اولین نشانه‌های تسلیم‌شدگی مشاهده شد. پانل‌های دوم و سوم در حداکثر تغییرمکان، دچار

در حالت غیرالاستیک می‌داند و این به آن دلیل است که سازه نه تنها باید از حالت غیرالاستیک به وضعیت اولیه قبل از تغییر شکل برسد؛ بلکه باید به اندازه حالت قبلی در جهت مخالف تغییر شکل دهد. بر این اساس، حداکثر تغییر مکان افقی سازه طبق تعریف پوپوف برابر است با:

$$\delta_{max} = \delta_{max}^+ + |\delta_{max}^-| \quad (2)$$

در نمونه SPSW-R با تغییر مکان حداکثر δ_{y2} در $6/63$ در یک جهت و تغییر مکان حداکثر δ_{y2} در $6/100$ در جهت دیگر، ضریب شکل‌پذیری نمونه بر اساس تعریف ATC-24 و پوپوف به ترتیب برابر $6/63$ و $12/63$ است.

شکل (۱۱) منحنی هیستریزس پانل طبقه اول نمونه SPSW-S را نشان می‌دهد که در یک طرف تا تغییر مکانی برابر با δ_{y2} در $8/24$ و در طرف دیگر تغییر مکانی تا δ_{y2} در $6/52$ را تحمل کرده است. بر این اساس، شکل‌پذیری سیستم مذکور بر طبق تعریف ATC-24 و پوپوف به ترتیب برابر $8/24$ و $14/76$ است.



شکل (۱۱): منحنی هیستریزس، منحنی دو خطی و منحنی سه خطی ایده‌آل پانل اول نمونه SPSW-S

با توجه به اینکه نمونه‌های مذکور بر اساس مدل تعامل ورق با قاب (PFI) که در آن، رفتار ورق و قاب به دقت لحاظ می‌شود، طراحی و در ورق پانل‌ها از فولاد نرم با رعایت کامل تئوری فولاد جاذب انرژی؛ که در آن، ورق انرژی بیشتری در تغییر مکان کوچک‌تر نسبت به قاب فولادی جذب می‌کند، استفاده شده است؛ لذا برای معرفی رفتار آنها، همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است، می‌توان به جای استفاده از منحنی دو خطی ایده‌آل از منحنی سه خطی ایده‌آل استفاده کرد. در این صورت تغییر مکان تسلیم (δ_{yi}) در منحنی سه خطی به مراتب کوچک‌تر از تغییر مکان تسلیم (δ_{y2}) در منحنی دو خطی بوده و ضریب شکل‌پذیری می‌تواند به مراتب بزرگ‌تر در نظر گرفته شود.

علت انتخاب δ_{yi} به عنوان تغییر مکان تسلیم نمونه آن است که در این تغییر مکان، ورق (که سهم عمده‌ای از مقاومت نمونه را داراست) کاملاً به تسلیم رسیده است و بر این اساس این نقطه را می‌توان به عنوان نقطه‌ای که تسلیم‌شدگی چشمگیر در

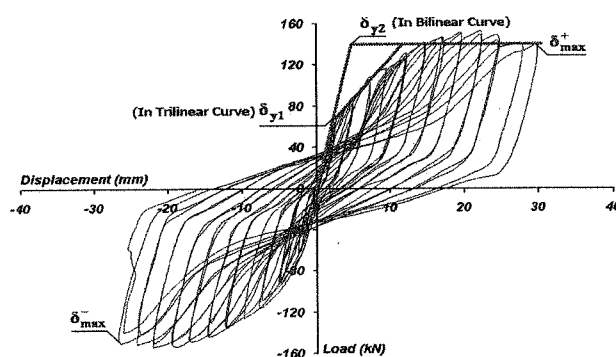
در این نمونه نیز شبیه نمونه SPSW-R تا پایان آزمایش، تمام ستون‌ها سالم باقی ماندند و هیچ علامتی از کماتش موضعی یا کلی در آنها مشاهده نشد. همچنین به دلیل عملکرد مناسب سخت‌کننده‌های پای ستون‌ها هیچ‌گونه ترک‌خوردگی یا شکست در آنها ایجاد نشد.

۷- رفتار هیستریزس نمونه‌ها

در این بررسی، رفتار هیستریزس نمونه‌ها شامل شکل‌پذیری، سختی، مقاومت، جذب انرژی، زاویه میدان کشش قطری، رفتار اتصال تیر به ستون و رفتار تیرها و ستون‌ها در خلال بارگذاری‌ها مورد بحث قرار گرفته و سپس با یکدیگر مقایسه می‌شود [۱۴].

۷-۱- شکل‌پذیری

شکل‌پذیری یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر روی ضریب رفتار سازه‌هاست. شکل (۱۰)، منحنی هیستریزس پانل طبقه اول نمونه SPSW-R را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان ضریب شکل‌پذیری نمونه را تعیین کرد.



شکل (۱۰): منحنی هیستریزس، منحنی دو خطی و منحنی سه خطی ایده‌آل پانل اول نمونه SPSW-R

بر اساس تعریف پروتکل بارگذاری ATC 24، نسبت تغییر مکان حداکثر به تغییر مکانی که تسلیم‌شدگی چشمگیر در سازه اتفاق می‌افتد، شکل‌پذیری سیستم نامیده می‌شود. بر این اساس، شکل‌پذیری از (۱) قابل محاسبه است.

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_{yi}} \quad (1)$$

که در آن، δ_{max} ، حداکثر تغییر مکان پلاستیک سازه و δ_{yi} ، تغییر مکان مربوط به تسلیم‌شدگی چشمگیر در سازه است.

پوپوف شکل‌پذیری را نسبت تغییر مکان افقی حداکثر به تغییر مکان تسلیم چشمگیر تعریف کرد [۱۷]. او تغییر مکان حداکثر را مجموع حداکثر تغییر مکان‌ها در یک دوره بارگذاری

سازه اتفاق افتاده است، انتخاب کرد.

صورت تدریجی اتفاق افتاد.

دلیل اصلی اینکه پارگی ورق‌ها باعث کاهش ناگهانی سختی و مقاومت نمونه نشد این است که توزیع تنش در ورق پانل‌ها به طور گسترده صورت گرفت و پس از پارگی بخشی از ورق‌ها، بازتوزیع تنش در بخش‌های سالم ورق انجام شد.

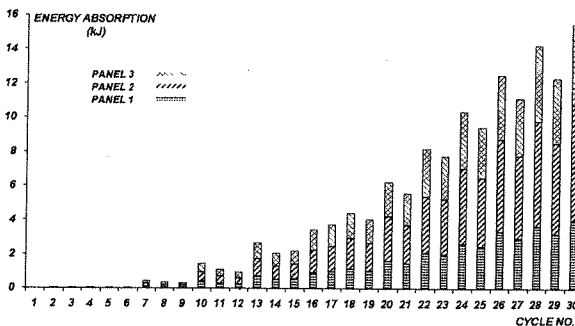
همچنین با توجه به وجود اتصال صلب و تحمل بار به وسیله قاب خمشی محیطی، تسلیم‌شدگی یا پارگی ورق، اثر ناگهانی بر کاهش سختی و مقاومت نمونه نداشت.

در نمونه SPSW-S، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد پس از تسلیم و پارگی ورق‌ها و با توجه به وجود اتصال ساده در قاب؛ که قابلیت تحمل لنگر خمشی را ندارد، مقاومت و سختی نمونه به صورت ناگهانی کاهش یافت.

۷-۴- جذب انرژی

سطح هر حلقه از منحنی هیستریزیس، مقدار انرژی جذب شده به وسیله سیستم را در خلال دوره بارگذاری مربوطه نشان می‌دهد. منحنی‌های هیستریزیس دیوارهای برشی فولادی عمدتاً وسیع است و از این جهت، قابلیت جذب انرژی در آنها بالاست.

به منظور ارزیابی جذب انرژی نمونه‌های مورد آزمایش، مقدار انرژی جذب شده در هر دوره بارگذاری برای هر نمونه در هر سه پانل آن محاسبه شد. شکل (۱۲)، نمودار جذب انرژی تجمعی پانل‌های نمونه SPSW-R را در دوره‌های بارگذاری مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): جذب انرژی تجمعی پانل‌های نمونه SPSW-R

به دلیل این که دوره بارگذاری ۳۱ به صورت کامل اعمال نشد؛ لذا جذب انرژی این دوره، در نمودار مذکور آورده نشده است.

با توجه به این که ۶ دوره بارگذاری اولیه، در مرحله الاستیک انجام شد، لذا مقدار جذب انرژی نمونه در خلال این دوره‌ها بسیار اندک است. همان‌طور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، جذب انرژی نمونه با افزایش دوره‌های بارگذاری افزایش یافته است.

در تمام دوره‌های بارگذاری، سهم جذب انرژی پانل دوم

دیوارهای برشی فولادی؛ که براساس روش تعامل ورق با قاب طراحی شده و در ورق پانل‌های آنها از فولاد نرم با به کارگیری تئوری فولاد جاذب انرژی به نحوی استفاده شود که ورق انرژی بیشتری را در تغییرمکان‌های کوچک‌تر نسبت به قاب جذب کنند، دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر نامیده می‌شوند. همان‌طور که در آزمایش‌ها مشاهده شد، در این‌گونه دیوارها، ستون‌ها تا حد زیادی از گزند آسیب مصون می‌مانند.

۷-۲- سختی

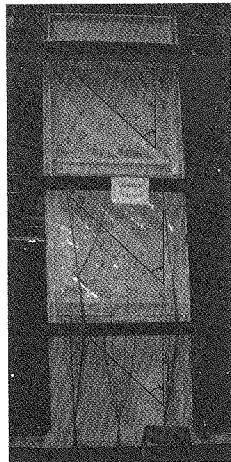
سختی اولیه منحنی بار-تغییرمکان سازه‌ها از اساسی‌ترین پارامترها در طراحی الاستیک آنهاست. همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود، سختی اولیه پانل اول نمونه‌های SPSW-S و R به ترتیب ۲۰٪ و ۲۹٪ کیلونیوتن بر میلی‌متر است که تفاوت بین آنها در حدود ۳ درصد است. با توجه به عدم وجود تفاوت عمده بین سختی اولیه نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که اثر نوع اتصال تیر به ستون بر روی سختی اولیه دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک ناچیز است.

۷-۳- مقاومت

رشد مناسب حلقه‌ها و یکنواختی آنها در منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌ها نشان می‌دهد که رفتار نمونه‌های مذکور تحت بارگذاری دوره‌ای نه تنها شکل‌پذیر بوده، بلکه پایدار نیز هستند.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود، حداکثر مقاومت نمونه‌های SPSW-R و SPSW-S در منحنی‌های ایده‌آل دو خطی و سه خطی به ترتیب برابر ۱۲۸/۶ و ۱۱۰/۰ کیلونیوتن و در منحنی هیستریزیس اصلی به ترتیب برابر ۱۵۳/۰ و ۱۲۱/۰ کیلونیوتن است. این نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نمونه SPSW-R در حدود ۲۶ درصد بیشتر از نمونه SPSW-S است. بر این اساس به نظر می‌رسد که در طراحی دیوارهای برشی فولادی لازم است به نوع اتصال تیر به ستون آنها توجه شود، همچنین باید به این نکته توجه کرد که بخشی از این اضافه مقاومت در نمونه SPSW-R مربوط به نبشی اتصال ورق پانل است که در این نمونه به علت جوش شدن در گوشه‌ها اندکی در مقاومت قاب دخالت کرده است.

در نمونه SPSW-R، پس از این که نمونه به حداکثر مقاومت خود رسید (در تغییرمکان δ_y که δ_y تغییرمکان پانل طبقه اول در زمان تشکیل اولین تسلیم‌شدگی نمونه است)، کاهش مقاومت در طی دوره‌های بارگذاری بعدی به دلیل تسلیم‌شدگی تدریجی ورق‌ها و اعضا (که خود یک مکانیزم جذب انرژی است) به



شکل (۱۴): زاویه میدان کشش قطری پانل‌ها در نمونه SPSW-R

زاویه میدان کشش قطری (نسبت به قائم) در خلال دوره‌های مختلف بارگذاری، برای نمونه SPSW-R اندازه‌گیری شد که برای پانل اول در محدوده ۳۸/۰ تا ۴۵/۳ درجه، برای پانل دوم در محدوده ۳۸/۰ تا ۴۵/۱ درجه و برای پانل سوم در محدوده ۳۷/۵ تا ۴۴/۱ درجه متغیر بود.



شکل (۱۵): زاویه میدان کشش قطری پانل‌ها در نمونه SPSW-S

در نمونه SPSW-S، این زوایا برای پانل اول در محدوده ۳۷/۰ تا ۴۴/۶ درجه، برای پانل دوم در محدوده ۳۷/۰ تا ۴۴/۶ درجه و برای پانل سوم در محدوده ۲۸/۰ تا ۴۴/۲ درجه متغیر بود. مقایسه بین این زوایا با زوایای اندازه‌گیری شده در نمونه SPSW-R نشان می‌دهد که اثر نوع اتصال تیر به ستون بر روی زاویه میدان کشش قطری ناچیز است.

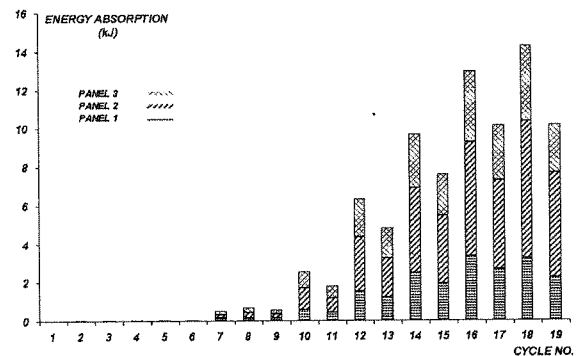
رابطه (۳) برای محاسبه زاویه قرارگیری اعضای نواری مورب^{۱۱} (که در تحلیل این‌گونه سیستم‌ها به جای ورق فولادی جایگزین می‌شوند) در آیین نامه ملی فولاد کانادا [۸] ارائه شده است، (CAN/CSA 16.01).

زاویه میدان کشش قطری با توجه به اصل کار مجازی و در نظر گرفتن انرژی ناشی از میدان کشش قطری و انرژی ناشی از نیروهای محوری در تیر و ستون‌ها به دست می‌آید.

رابطه تعیین زاویه میدان کشش قطری را ترבורن و

مخصوصاً در محدوده غیرالاستیک بیشتر از پانل سوم و اول است. در دوره بارگذاری ۳۰، حداکثر انرژی جذب شده به وسیله نمونه ۱۵/۵۰ کیلوژول بود که از این مقدار ۲۵/۵٪ سهم پانل اول، ۴۳/۷٪ سهم پانل دوم و ۳۰/۸٪ سهم پانل سوم بود. این در حالی است که مقدار جذب انرژی در بار حداکثر (در دوره بارگذاری ۲۶) حدود ۸۰ درصد مقدار جذب انرژی حداکثر نمونه (در دوره بارگذاری ۳۰) بود.

اما همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در نمونه SPSW در دوره بارگذاری ۱۸، حداکثر انرژی جذب شده اندکی کمتر از نمونه SPSW-R و برابر ۱۴/۲۴ کیلوژول بود که از این مقدار ۲۲/۵٪ سهم پانل اول، ۵۰/۰٪ سهم پانل دوم و ۲۷/۵٪ سهم پانل سوم بود.



شکل (۱۳): جذب انرژی تجمعی پانل‌های نمونه SPSW-S

همان‌طور که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود در هر دو نمونه و در هر دو دوره بارگذاری متوالی با تغییر مکان مساوی، جذب انرژی معمولاً در دوره دوم کاهش یافته است که علت آن، کاهش سختی و مقاومت در نمونه به دلیل افزایش تسلیم‌شدگی ناشی از بارگذاری در دوره اول آن است.

۷-۵- زاویه میدان کشش قطری

زاویه میدان کشش قطری در طی دوره‌های بارگذاری و بر اساس نتایج به دست آمده از کرنش‌سنج‌ها در تمام پانل‌ها اندازه‌گیری شد؛ علاوه بر این، به دلیل ایجاد میدان کشش قطری در پانل‌ها، تعدادی موج کوچک و بزرگ در آنها تشکیل می‌شود. با این فرض که راستای میدان کشش قطری منطبق بر راستای موج‌های کمانشی است، لذا می‌توان زاویه میدان کشش قطری را با توجه به راستای موج‌های کمانشی، به دست آورده و با مقادیر به دست آمده از کرنش‌سنج‌ها آن را کنترل کرد.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، میدان‌های کشش قطری تشکیل شده در نمونه‌های SPSW و SPSW-R را به خوبی نشان می‌دهند.

همکاران [۲۵] ارائه و تیملر و کولاک [۲۶] به صورت زیر اصلاح کردند.

$$tg^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t.L}{2A_c}}{1 + t.h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360.I_c.L} \right)} \quad (۳)$$

در این رابطه، α زاویه میدان کششی قطری نسبت به قائم، t ضخامت ورق پانل، L عرض پانل، h ارتفاع پانل، A_b و A_c سطح مقطع تیر و ستون قاب پانل و I_c ممان اینرسی ستون قاب است.

با توجه به این که رابطه مذکور زاویه میدان کشش قطری را تا آغاز محدوده پلاستیک برآورد می‌کند؛ لذا زاویه میدان کشش قطری در دوره بارگذاری ۷ (که آغاز تسلیم‌شدگی در آن دوره بارگذاری اتفاق افتاد) انطباق زیادی با زاویه محاسبه شده از (۳) دارد. زاویه میدان کشش قطری اندازه‌گیری شده در دوره بارگذاری ۷ برای تمام پانل‌های هر دو نمونه تقریباً ۲۸ درجه و مقدار آن طبق (۳) در حدود ۲۷/۷ درجه است.

۷-۶- رفتار اتصالات تیر به ستون

در محل اتصالات تیر به ستون در نمونه SPSW-R تا رسیدن بارگذاری به دوره بارگذاری ۱۶، تسلیم‌شدگی کامل در آنها رخ نداد، شکل (۱۶). همچنین در دوره بارگذاری ۱۳، در محل اتصالات تیر به ستون در نمونه SPSW-S، علی‌رغم چرخش قابل توجه تیر

نسبت به ستون، در محل جوش‌ها تسلیم‌شدگی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد، شکل (۱۷).

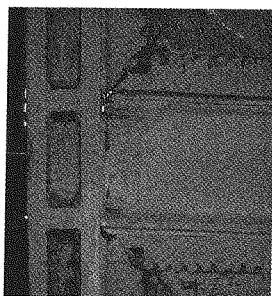
حتی در خلال دوره‌های بارگذاری ۲۴ و ۱۸ به ترتیب در نمونه‌های SPSW-R و SPSW-S، تسلیم‌شدگی محدود به مقداری پوسته‌شدگی سفیدآبه در اطراف اتصالات شد، شکل‌های (۱۸) و (۱۹).

همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، عملکرد اتصالات‌های صلب و ساده منطبق بر مبانی تئوری طراحی آنهاست به گونه‌ای که در اتصال صلب، زاویه اتصال تیر به ستون، قبل و بعد از آزمایش به صورت قائم باقی مانده و در اتصال ساده، تیر به راحتی امکان دوران دارد. در این زمان، نمونه‌ها به ترتیب به تغییرمکان δ_y ۸ و δ_y ۱۰ (تغییرمکان پانل طبقه اول در زمان تشکیل اولین تسلیم‌شدگی نمونه) رسیدند.

۷-۷- رفتار تیرها و ستون‌ها

به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نمونه‌ها، تعدادی تغییرمکان‌سنج در پایین، وسط و بالای ستون‌های قاب محیطی آنها نصب شد.

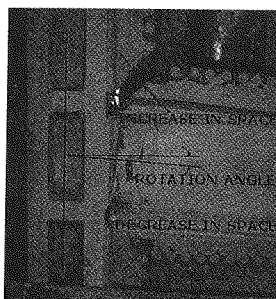
همچنین در جان و بال‌های دو سر تیرها و در پایین، وسط و بالای بال‌ها و جان هر ستون نیز تعدادی کرنش‌سنج برای مشاهده میزان تنش در این اعضا نصب شد. تغییر شکل ستون هر طبقه، با تعیین تغییرات شیب آن به دست می‌آید.



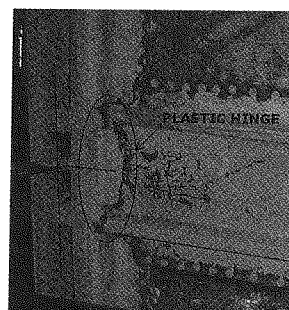
شکل (۱۷): اتصال ساده نمونه SPSW-S در دوره بارگذاری ۱۳



شکل (۱۶): اتصال صلب نمونه SPSW-R در دوره بارگذاری ۱۶



شکل (۱۹): اتصال ساده نمونه SPSW-S در دوره بارگذاری ۱۸

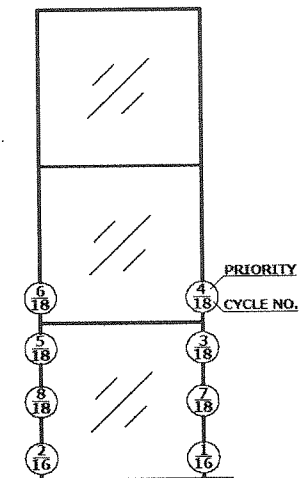


شکل (۱۸): اتصال صلب نمونه SPSW-R در دوره بارگذاری ۲۴

شد که تغییر شکل در آنها اندک است.

کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی تیرها و ستون‌ها امکان

تغییرات شیب ستون‌های طبقات هر دو نمونه SPSW و SPSW با استفاده از تغییرمکان‌سنج‌ها اندازه‌گیری و مشخص



شکل (۲۱): مفاصل پلاستیک تشکیل شده در ستونهای نمونه SPSW-S

۸- مود خرابی

نتایج اکثر آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی حاکی از تشکیل کمانش موضعی و کلی در ستون‌ها و یا شکست پای ستون‌ها قبل از پارگی در ورق فولادی می‌باشد.

در صورتی که در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به علت نوع طراحی سنجیده، خرابی به محل مورد نظر؛ یعنی ورق‌های فولادی هدایت شده است و همان‌طور که مشاهده شد ستون‌ها از آسیب مصون ماندند.

۹- خلاصه و نتیجه‌گیری

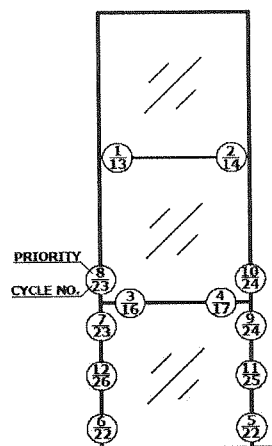
دو نمونه سه طبقه دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با ورق نازک تحت بارگذاری دوره‌ای آزمایش شدند. نمونه‌ها دارای دو نوع اتصال تیر به ستون صلب و ساده بودند و در ورق پانل‌ها و ستون‌ها به ترتیب از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و پرمقاومت استفاده شد. بارگذاری دوره‌ای افقی به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی فقط در بالای نمونه‌ها اعمال شد. روش پیشنهادی پروتکل بارگذاری ATC24 مبنای بارگذاری قرار گرفت.

رفتار نمونه‌ها نشان داد که با استفاده از روش تعامل ورق با قاب (PFI) در طراحی و همچنین کاربرد فولاد نرم بر اساس تئوری فولاد جاذب انرژی در ورق پانل‌ها و استفاده از فولاد پرمقاومت در ستون‌های دیوار برشی فولادی، می‌توان عمده جذب انرژی را به ورق فولادی منتقل کرد تا بدین ترتیب، ستون‌ها که مسئولیت پایداری سازه را به عهده دارند (حتی تحت بارهای فوق العاده) تا حد زیادی از گزند آسیب مصون بمانند.

مشاهده تنش و وقوع تسلیم‌شدگی در این اعضا را در خلال دوره‌های مختلف بارگذاری می‌دهد.

بر این اساس، شکل‌های (۲۰) و (۲۱) ترتیب و شماره دوره بارگذاری تشکیل مفاصل پلاستیک تیرها و ستون‌ها را به ترتیب در نمونه‌های SPSW-R و SPSW-S نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود در نمونه SPSW-R پس از تسلیم ورق‌ها، مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرها و سپس در ستون‌ها تشکیل شد. در تیرها، مفاصل پلاستیک ابتدا در تیر طبقه دوم و سپس در تیر طبقه اول تشکیل شد؛ ولی هیچ‌گونه تسلیم‌شدگی در تیر بالایی نمونه مشاهده نشد.



شکل (۲۰): مفاصل پلاستیک تشکیل شده در تیرها و ستون‌های نمونه SPSW-R

در ستون‌ها، اولین مفصل پلاستیک در پای ستون‌های طبقه اول و در نزدیکی سخت‌کننده‌ها اتفاق افتاد. پس از آن، مفاصل پلاستیک در بالای ستون‌های طبقه اول و سپس در پایین ستون‌های طبقه دوم در نزدیکی محل اتصال تیر به ستون تشکیل شد. در انتها نیز مفاصل پلاستیک در میانه ستون‌های طبقه اول تشکیل شد.

در شکل (۲۱) که به تشکیل مفاصل پلاستیک در نمونه SPSW-S مربوط است، به دلیل وجود اتصال ساده تیر به ستون، مفاصل پلاستیک فقط در ستون‌ها و به همان ترتیبی که در نمونه SPSW-R رخ داد، تشکیل شدند. همان‌طور که مشاهده شد در نمونه‌ها ابتدا ورق‌ها، سپس تیرها و در نهایت ستون‌ها به تسلیم رسیدند.

این نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از مدل تعامل ورق با قاب (PFI) در طراحی و کاربرد فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و پرمقاومت به ترتیب در ورق و ستون‌ها، می‌توان تسلیم‌شدگی در اعضا را به نحو مطلوبی کنترل و هدایت نموده و از ایجاد مودهای خرابی ۲۲ نامطلوب جلوگیری کرد.

- Astaneh-Asl, A.; Zhao, Q.; "Cyclic Behavior of Steel Shear Wall Systems", Proceedings, Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, April, 2002. [۵]
- Behbahani-Fard, M. R.; "Cyclic Behavior of Unstiffened Steel Plate Shear Walls", Ph.D. Dissertation, University of Alberta, 227 pages, 2003 [۶]
- Caccese, V.; Elgaaly, M.; Chen, R.; "Experimental Study of Thin Steel Plate Shear Walls under Cyclic Load", Journal of Structural Engineering, ASCE, 119(2), 573-587, 1993. [۷]
- Canadian Standard Association, *Handbook of Steel Constructions, CAN/CSA-S16.1-01*, Seventh Edition, Canadian Institute of Steel Construction, Willowdale, Ontario, 2003 [۸]
- Derecho, A. T.; Iqbal, M.; Fintel, M.; Corley, W. G.; "Loading History for Use in Quasi Static Simulated Earthquake Loading Tests", ACI Publication SP63 Reinforced Concrete Structures Subjected to Wind and Earthquake Forces, American Concrete Institute, 329-356, 1980 [۹]
- Driver, R. G.; Kulak, G. L.; Kennedy, D. J. L.; Elwi, A. E.; "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report 215, Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1997 [۱۰]
- Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L., and Elwi, A.E. 1998a, "Cyclic Test of Four-Story Steel Plate Shear Wall", Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(2), 112-130. [۱۱]
- Elgaaly, M.; Caccese, V.; "Steel Plate Shear Walls", Proceeding, AISC National Steel Construction Conference, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago 111. 4-1-4-28 1990. [۱۲]
- Elgaaly, M.; Caccese, V.; Du, C.; "Postbuckling Behavior of Steel Plate Shear Walls under Cyclic Loads", Journal of Structural Engineering ASCE, 119 (2), 588-605, 1993. [۱۳]
- Gholhaki, M.; "Study of Thin Steel Plate Shear Walls and Effect of Beam-to-Column Connection", Ph.D. Dissertation, Khaje Nasir Toosi University of Technology, 276 pages, 2007 [۱۴]
- Kharrazi, M. H. K.; "Rational Method for Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls", Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, 217 pages, 2005. [۱۵]
- Lubell, A. S.; "Performance of Unstiffened Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Quasi Static Loading", Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1997 [۱۶]
- Popov, E. P.; "Seismic Behavior of Structural Sub Assemblages", Journal of Structural Engineering, ASCE, 106 (7), 1451-1474 1980. [۱۷]
- Rezai, M.; "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls by Shake Table Testing", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1999 [۱۸]
- Roberts, T. M.; Sabouri-Ghomi, S.; "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", Thin Walled Structures, 12 145-162, 1991. [۱۹]
- Roberts, T. M.; Sabouri-Ghomi, S.; "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plate Shear Panels", Thin Walled Structures, 14, 139-151, 1992. [۲۰]
- Sabouri-Ghomi, S.; Gholhaki, M.; "Cyclic Test on Two Specimens of Three-Story Ductile Steel Plate Shear Walls", Report of Building and Housing Research Center (BHRC), 117 pages, 2006. [۲۱]
- Sabouri-Ghomi, S.; Roberts, T. M.; "Nonlinear Dynamic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls", Computers and Structures, 39(1/2), 121-127, 1991 [۲۲]
- منحنی هیستریزیس نمونه‌ها نشان داد که ضریب شکل‌پذیری نمونه SPSW-R بر مبنای تعریف پروتکل بارگذاری ATC-24 و پوپوف به ترتیب برابر $6/63$ و $12/63$ و مقدار این ضریب برای نمونه SPSW-S به ترتیب برابر $8/24$ و $14/76$ است. این منحنی‌ها نشان دادند که اثر نوع اتصال تیر به ستون بر روی سختی اولیه دیوارهای برشی فولادی قابل صرف نظر کردن است. همچنین مقاومت نمونه‌های SPSW-R و SPSW-S به ترتیب تا رسیدن به تغییر مکان‌های ۹ و ۱۰ برابر تغییر مکان اولین تسلیم‌شدگی ورق پانل اول، افزایش یافت. بر این اساس، مقاومت نمونه SPSW-R حدود ۲۶ درصد بیش از مقاومت نمونه SPSW-S بود.
- نتایج نشان داد که نمونه‌ها در برابر بارهای دوره‌ای عملکرد مطلوبی داشته و دارای منحنی‌های هیستریزیس پایداری هستند که مقدار انرژی جذب شده در آنها با افزایش تغییر مکان، افزایش می‌یابد. در این رابطه مقدار جذب انرژی نمونه SPSW-R بیش از نمونه SPSW-S بود.
- نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زاویه میدان کشش قطری در تمام پانل‌های هر دو نمونه، در خلال دوره‌های مختلف بارگذاری در محدوده $37/0$ تا $45/3$ درجه (نسبت به قائم) متغیر می‌باشد. این نتایج همچنین نشان داد که اثر نوع اتصال تیر به ستون بر روی زاویه میدان کشش قطری ناچیز است. علاوه بر این، مقدار اندازه‌گیری شده زاویه میدان کشش قطری نمونه‌ها در دوره بارگذاری ۷ (که اولین تسلیم‌شدگی در ورق پانل اول اتفاق افتاد) با رابطه تئوری آیین نامه ملی فولاد کانادا (CAN/CSA-S16.01) مطابقت خوبی دارد.
- نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با توجه به حضور ورق فولادی، باز توزیع تنش بین اعضای دیوار به صورت گسترده و مناسب صورت گرفته و بر خلاف دیگر سیستم‌ها که در آنها محل اتصالات به دلیل وجود تمرکز تنش، ضعف سازه می‌باشند، در این سیستم، اتصالات تا حد بالایی از گزند آسیب‌های جدی مصون می‌مانند.

۱۰- مراجع

- [۱] Sabouri-Ghomi, S.; *Lateral Load Resisting Systems: An Innovative Idea to Application of Easy-Going Steel*, Anguizeh Publishing Ltd., Tehran, Iran, 2004.
- [۲] Sabouri-Ghomi, S.; *Lateral Load Resisting Systems: An Introduction to Steel Shear Walls*, Anguizeh Publishing Ltd., Tehran, Iran, 2002
- [۳] ATC; *Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures*, Applied Technology Council, Report 24, 1992
- [۴] Astaneh-Asl, A.; "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", Steel Tips report, Structural Steel Educational Council, July, 2001

- ۱۹ Popping
- ۲۰ White Wash
- ۲۱ Stripe Model
- ۲۲ Failure Mode

- Sabouri-Ghomi, S.; Roberts, T. M.; "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls including Shear and Bending Deformations", Engineering Structures 14(5), 309-317, 1992. [۲۲]
- Sabouri-Ghomi, S.; Ventura, C. E.; Kharrazi, M. H. K.; "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Shear Walls", ASCE, Journal of Structural Engineering, pp 878-889, 2005 [۲۴]
- Takahashi, Y.; Takemoto, Y.; Takeda, T.; Takagi, M.; "Experimental Study on Thin Steel Shear Walls and Particular Bracings under Alternative Horizontal Load," Preliminary Report, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, pp 185-191, 1973 [۲۵]
- Thorburn, L. J.; Kulak, G. L.; Montgomery, C. J.; "Analysis of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983. [۲۶]
- Timler, P. A.; Kulak, G. L.; "Experimental Study of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983. [۲۷]
- Tromposch, E. W.; Kulak, G. L.; "Cyclic and Static Behavior of Thin Panel Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report No. 145, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1987. [۲۸]
- Vian, D.; Bruneau, M.; "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 978, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004 [۲۹]
- Wagner, H.; "Flat Sheet Metal Girders with Very Thin Webs, Part I-General Theories and Assumptions," Tech. Memo. No. 604, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D. C., 1931 [۳۰]

۱۱- زیر نویس ها

- ۱ Steel Plate Shear Wall (SPSW)
- ۲ Ductility
- ۳ Strength
- ۴ Stiffness
- ۵ Cyclic Loading
- ۶ Energy Absorption
- ۷ Diagonal Tension Field
- ۸ فولاد نرم با مفهوم کلی تر آن را سعید صبوری، به عنوان فولاد جاذب انرژی (Easy-Going Steel) برای کاربری های مختلف از جمله دیوار برشی فولادی ثبت اختراع کرده است. ایشان این پدیده را در سال ۱۹۸۸ میلادی آزمایش کرده است؛ لذا استفاده از آن مستلزم اخذ اجازه از ایشان است.
- ۹ Quasi Static
- ۱۰ (LYS) Low Yield Strength
- ۱۱ (RBS) Reduced Beam Section
- ۱۲ (PFI) Plate Frame Interaction Technique
- ۱۳ Pressure Load cell
- ۱۴ Strain Gauge
- ۱۵ Displacement Transducer (Cable Potentiometer)
- ۱۶ Monotonic Load
- ۱۷ Push Over
- ۱۸ Applied Technology Council