

تأثیر تعداد پانل‌های بتنی در طرفین ورق فولادی و مقاومت بتن بر رفتار دیوار برشی مرکب

ابوالفضل عربزاده^{۱*}، حامد احمدی طالشیان^۲

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس

arabzade@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۱/۹]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۷/۱۹]

چکیده- در این مقاله به بررسی عددی اثر تعداد پانل بتنی و همچنین مقاومت بتن استفاده شده در این پانل بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی مرکب پرداخته شده است. بدین منظور پس از مدلسازی یک نمونه آزمایشگاهی معتبر در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS و درستی آزمایشی آن، اثر پارامترهای گفته شده با ساخت نمونه‌های جدید بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که هرچند استفاده از پانل بتنی در دو طرف ورق منجر به مقاومت بیشتر در تغییر مکان‌های غیرارتجاعی پایین می‌شود، ولی در نهایت شکل‌پذیری بسیار ضعیف‌تری نسبت به نمونه با بتن در یک طرف حاصل شده و در عین حال مقاومت نهایی در دو حالت تقریباً یکسان خواهد بود. نتایج همچنین گویای تأثیر بسیار اندک مقاومت بتن بر رفتار کلی دیوار برشی مرکب دارد، اگرچه خسارت وارد بر خود پانل بتنی کاهش می‌یابد. براساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان استفاده از بتن با مقاومت معمولی و فقط در یک طرف ورق فولادی را برای حصول رفتار لرزه‌ای مطلوب در دیوار برشی مرکب کافی دانست.

واژگان کلیدی: دیوار برشی مرکب، تحلیل استاتیکی بارافزون، اجزاء محدود، پانل بتنی، کماتش

۱- مقدمه

پانل‌های بتن مسلح را می‌توان در یک یا هر دو طرف ورق فولادی به کار گرفت. استفاده از پانل بتنی در یک طرف سبب می‌شود که ورق فولادی در طرف دیگر آزاد بوده و بنابراین حتی با وجود ضخامت مناسب پانل بتنی نیز امکان کماتش ورق فولادی در حدفاصل بین بولت‌های اتصال وجود دارد. در طرف مقابل استفاده از پانل بتن مسلح در هر دو سمت با وجود اینکه اجازه هیچ گونه کماتشی را به ورق نمی‌دهد ولی عملکرد بهتری را نسبت به حالت یک طرف بتن نخواهد داشت. به عبارت دیگر در صورت کماتش ورق فولادی در تنش‌های نزدیک به تسلیم نیز می‌توان رفتار لرزه‌ای مناسبی را برای این سیستم مرکب پیش‌بینی نمود.

در سال‌های اخیر و پس از پروژه آزمایشگاهی انجام شده به وسیله‌ی آستانه‌اصل و همکارش در دانشگاه برکلی [۲۰۱] (که

دیوار برشی مرکب یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی است که در آن ورق فولادی به‌عنوان عنصر اصلی در تحمل برش ناشی از بار جانبی مطرح است. این ورق با توجه به نازک بودن ذاتی آن می‌تواند تحت نیروهای جانبی نسبتاً پایین کماتش نماید که به‌منظور جلوگیری از این کماتش و بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم از پانل بتن مسلح استفاده می‌شود. عملکرد مرکب این دو جزء از طریق برشگیرها تأمین می‌شود که معمولاً در صورت پیش ساخته بودن بتن مصرفی از بولت‌ها بدین منظور استفاده می‌شود. هرچند سازوکار رفتاری مطلوب سیستم بر این است که ورق فولادی تحت اثر بتن مجاور تا قبل از رسیدن به تسلیم کامل کماتش نکند، ولی در عمل این مسئله به میزان سخت شدگی ورق نیز وابسته است.

یکدیگر در دیپارتمان مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه برکلی کالیفرنیا به ترتیب روی دیوار برشی فولادی و مرکب صورت پذیرفت [۱]. هدف از پروژه مربوط به دیوار برشی مرکب، انجام آزمایش چرخه‌ای روی این سیستم در دو حالت مختلف بود: ۱- حالت سستی که پانل بتنی بطور مستقیم و از ابتدا به قاب پیرامونی متصل باشد، و ۲- حالت جدید که درزی بین بتن و قاب اطراف قرار داده شده و این دو جزء از ابتدا در تماس نبود. در شکل (۱) اجزاء اصلی سیستم دیوار برشی مرکب آورده شده است.

شکل ۱: اجزاء اصلی دیوار برشی مرکب [۱]

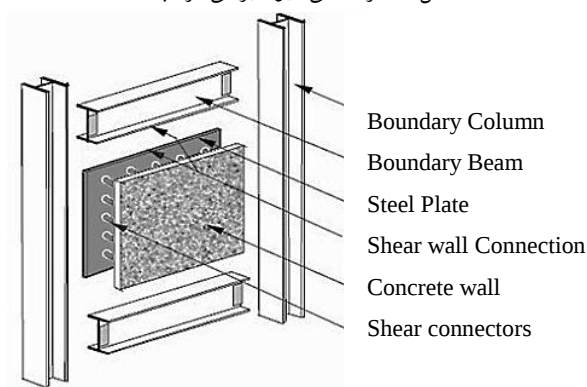


Fig. 1: Main components of Composite shear wall

نمونه در حالت جدید (دارای درز) دو فاز رفتاری متفاوت را از خود نشان می‌دهد: فاز اول مربوط به زلزله‌های ضعیف و متوسط بوده که در آن پانل بتنی با توجه به وجود درز در اطراف در تحمل بار جانبی سهیم نبوده و نقش اصلی آنها در این فاز تأمین سختی خارج از صفحه برای ممانعت از کماتش ورق فولادی است و فاز دوم نیز مربوط به زلزله‌های شدید است که با توجه به بسته شدن درز گفته شده، پانل بتنی نیز در تحمل نیروی برشی و تأمین سختی جانبی مشارکت خواهد داشت [۱].

در پروژه آزمایشگاهی آستانه‌اصل و همکارش یک نمونه در حالت جدید و یک نمونه در حالت سستی از دیوار برشی مرکب، هر دو به صورت یک سازه یک دهانه سه طبقه با مقیاس ۲/۱ ساخته و آزمایش شد. به استثناء درزی به‌اندازه ۲۵/۱in در اطراف نمونه در حالت جدید، مابقی مشخصات دو

در بخش دوم این مقاله بررسی می‌شود)، پژوهش‌های متعددی روی رفتار دیوار برشی مرکب صورت گرفته است. رهایی و حاتمی [۳] ضمن انجام مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های یک‌دهانه یک‌طبقه از دیوار برشی مرکب، به بررسی اثر پارامترهایی مانند فاصله بین برشگیرها، صلبیت تیر میانی و نوع اتصال تیر به ستون بر رفتار این سیستم مرکب پرداختند. همچنین آنها رابطه‌ای را نیز برای ضخامت بهینه پانل بتنی ارائه نمودند [۴]. حاتمی و صهری [۵] با بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی خود نشان دادند که افزایش ضخامت ورق فولادی تا یک حد بهینه و به‌ازای یک ضخامت ثابت پانل بتنی در کاهش تغییرمکان خارج از صفحه ورق فولادی موثر است. عربزاده و همکاران [۶] نیز به مطالعه گسترده آزمایشگاهی نمونه‌های یک و سه طبقه با مقیاس‌های ۱/۳ و ۱/۴ از دیوارهای برشی مرکب پرداختند. نتایج گویای رفتار قابل اطمینان سیستم در صورت وجود صلبیت خمشی بالا در ستون‌ها بود. این پژوهشگران معادلات تنش در المان‌های مختلف سیستم را نیز ارائه نمودند [۶].

در این مقاله به بررسی تفاوت عملکرد سیستم دیوار برشی مرکب در دو حالت یک طرف و دو طرف بتن پرداخته شده است. همچنین مقاومت بتن نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در رفتار سیستم بررسی شده است. بدین منظور ابتدا یک نمونه معتبر آزمایشگاهی دارای بتن در یک طرف ورق فولادی (نمونه آستانه‌اصل و همکارش در دانشگاه برکلی) در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی شده و ضمن انجام تحلیل استاتیکی افزایشده غیرخطی روی مدل حاصل، درستی آزمایشی آن از طریق مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. سپس نمونه با بتن در دو طرف ورق و همچنین نمونه‌های یک طرف بتن با مقاومت مختلف بتن مصرفی ساخته شده و نتایج آنها با نمونه اولیه مقایسه شده است. در ادامه ابتدا به مروری بر نمونه آزمایشگاهی مبنا پرداخته و سپس چگونگی تشکیل مدل اجزاء محدود این نمونه را تشریح خواهیم نمود.

۲- نمونه آزمایشگاهی آستانه‌اصل

در طی سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ دو پروژه تحقیقاتی به موازات

مشخصات مصالح استفاده شده نیز به قرار زیر است [۲]:

- ۱- تیر و ستون‌های مرزی فولادی از فولاد نوع A572 Gr.50 با تنش تسلیم مشخصه 50 ksi (345 Mpa)
- ۲- ورق فولادی، صفحه انتهایی و صفحه اتصال از فولاد A36 با تنش تسلیم مشخصه 36 ksi (248 Mpa)
- ۳- بولت‌های اتصال ورق فولادی و پانل بتن مسلح از نوع A325 با مقاومت کششی نهایی 90 ksi (630 Mpa)
- ۴- پانل بتنی از بتن معمولی با مقاومت مشخصه 4000 psi ($f_c = 28 \text{ Mpa}$)

حال پس از معرفی نمونه آزمایشگاهی آستانه‌اصل و همکارش می‌توان جزئیات مدل عددی را تشریح نمود. لازم به گفتن است که در این پژوهش فقط دیوار برشی مرکب در حالت سستی مدلسازی و تحلیل شده است زیرا ادعا بر این است که با مشارکت بتن از ابتدای مراحل اعمال بار بهتر می‌توان مشخصه‌ها و ضعف‌های سیستم در انتهای تحلیل و اثر تغییر در پارامترهای پانل بتنی بر رفتار سیستم را مشاهده نمود.

۳- مدلسازی عددی دیوار برشی مرکب

برای مدلسازی دیوار برشی مرکب در نرم‌افزار ABAQUS از المان‌های مختلفی استفاده شده است. برای ورق فولادی دیوار از المان پوسته‌ای سه بعدی چهار گرهی استفاده شده است که مزیت این المان در مدلسازی مناسب کمناش محتمل ورق فولادی و امکان گسترش واقع‌بینانه تسلیم در سطح ورق است [۱]. مش‌بندی این المان‌ها باید به گونه‌ای انجام گیرد که گره‌های مشترکی در محل انطباق با بولت‌ها داشته باشد.

نمونه کاملاً یکسان بود. نتایج حاصل از پروژه گفته شده نشان می‌دهد که همین اختلاف به ظاهر ساده منجر به بهبود قابل-ملاحظه عملکرد سیستم همراه با افزایش شکل‌پذیری و کاهش در خسارت می‌شود. جزئیات این آزمایش‌ها به همراه نتایج حاصل در مراجع [۲و۱] آورده شده است که در اینجا ضرورتی به گفتن تمام آن‌ها نیست و فقط مشخصات ابعاد، مقاطع و مصالح مصرفی در نمونه‌ها به منظور تشکیل مدل عددی مدنظر است. مشخصات مقاطع اجزاء در جدول (۱) آورده شده است. نمایی از نمونه‌های آزمایشگاهی نیز در شکل (۲) آورده شده است.

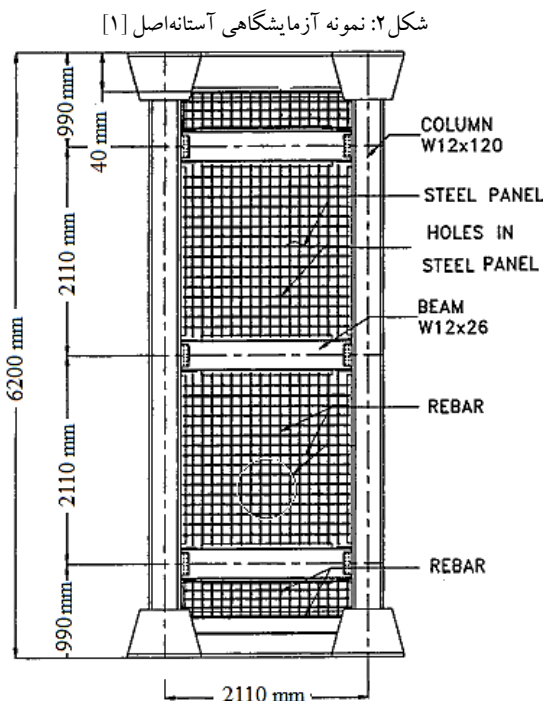


Fig. 2. Astaneh-asl experimental specimen

جدول ۱: مشخصات مقاطع اجزاء دیوار در نمونه آزمایشگاهی آستانه‌اصل [۱]

Specimen	Columns	Beams	Steel plate thick.	Concrete wall		
				Wall Type	Wall thick.	Reinfor. ratio (each direction)
Innovative	W12×120	W12×26	4.8 mm	Pre-cast	75 mm	0.93%
Traditional	W12×120	W12×26	4.8 mm	Pre-cast	75 mm	0.93%

Table 1: Section properties of wall components in Astaneh-asl experimental specimen

حصول رفتار مطلوب‌تر در محل اتصال، از المان آجری سه-بعدی هشت گرهی خطی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره برای مدلسازی پانل بتنی و قاب پیرامونی (تیرها و ستون‌ها) استفاده شده است. این المان قادر به نمایش مناسب ساروکار تحمل بار از طریق قطر فشاری در پانل بتنی نیز است.

در مدلسازی بولت‌ها نیز از المان تیر سه بعدی با دو گره انتهایی و شش درجه آزادی در هر گره استفاده شده که یک با یک گره انتهایی روی ورق فولادی و دیگری بر سطح بیرونی پانل بتنی منطبق است. آزادی این المان برای دوران در محل اتصال با پانل بتنی به عنوان یک مزیت مدلسازی به شمار می-آید چنانکه در آزمایش‌های واقعی نیز بولت‌ها در محل اتصال با بتن در برابر تغییر مکان خارج از صفحه مقید ولی در برابر دوران درون صفحه آزادند [۲].

مدل رفتاری تنش-کرنش هر سه نوع فولاد مورد استفاده به صورت الاستوپلاستیک با سخت شوندگی کرنشی و بدون شکست یا نرم شوندگی کرنشی مصالح در نظر گرفته می‌شوند که در تخصیص اعداد از مقادیر واقعی بر اساس مرجع [۷] استفاده شده است. تمام فولادهای استفاده شده دارای ضریب پواسون $\nu = 0.3$ و مدول ارتجاعی 29000 ksi ($2 \times 10^5 \text{ Mpa}$) فرض شده‌اند. پانل بتنی نیز به جای مدلسازی مستقیم آرماتورها و یا استفاده از مدل‌های خسارت، مصالح بتنی به صورت الاستوپلاستیک و بدون سخت‌شوندگی (چه در فشار و چه در کشش) در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه مدول ارتجاعی بتن بر حسب مقاومت آن از رابطه $1.5, 8, 10$ آئین‌نامه ACI-318 [۸] به صورت زیر استفاده شده است:

$$E_c = 57,000 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

با وجود اینکه نمونه دیوار برشی مرکب مورد مطالعه فاقد درز است، ولی در مدل تحلیلی یک فاصله ناچیز (در حدود 0.2 mm) بین پانل بتنی و قاب اطراف با هدف تسهیل فرآیند تحلیل و مدلسازی واقعی سطح تماس بین بتن و فولاد لحاظ شده است. این سطح تماس از نوع تماس سخت بدون اصطکاک معرفی شده است، به گونه‌ای که دو جزء بتوانند از

هم جدا شوند ولی در هم فرو نروند. به منظور مدلسازی واقعی تر قاب پیرامونی (تیر و ستون‌ها)، اجزاء آن در برابر تغییر مکان خارج از صفحه آزاد گذاشته شده‌اند. برای اتصال تیر به ستون و همچنین ورق فولادی به قاب اطراف، نقاط متناظر دو المان در محل انطباق با هم گره زده می‌شوند. این گزینه برای اتصال گسترده بسیار مفید و موثر است، ولی برای اتصال نقطه‌ای مانند اتصال گره به گره بولت به ورق فولادی و پانل بتنی گزینه درگیر نمودن این نقاط مناسب بوده و در این تحلیل استفاده می‌شود. سطح تماس پانل بتنی با سطح ورق فولادی نیز مشابه تماس این پانل با قاب اطراف به صورت سخت شده بدون اصطکاک تعریف می‌شود.

روش استفاده شده در تحلیل مدل از نوع استاتیکی افزایشده غیرخطی است. این روش با وجود نواقصی که نسبت به تحلیل‌های دینامیکی دارد، ولی مزایایی مانند شناسایی آثار از بین رفتن مقاومت اعضاء در رفتار سیستم و برآورد مناسب پارامترهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری با صرف هزینه کمتر [۹] سبب رواج آن در تحلیل‌های غیرخطی شده است. رویه مورد استفاده در گام‌های تحلیل از نوع ضمنی است که در آن تعادل در انتهای هر گام قبل از شروع گام بعد به روش نیوتن-رافسون و با رواداری مناسبی ارضاء می‌شود. این روش در تحلیل‌های استاتیکی مناسب‌تر از روش صریح است که در آن به جای ارضاء تعادل در انتهای هر گام، گام‌های تحلیل بسیار کوچک در نظر گرفته می‌شوند. مزیت تحلیل‌های ضمنی نسبت به صریح برای تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی در مرجع [۱۰] و در قالب یک نمونه ساده به تصویر کشیده شده است.

به منظور اعمال شرایط مرزی به نمونه تحلیلی، یک ورق مستطیلی با ضخامت نازک روی انتهای بالایی ستون‌ها و تیر نیم‌طبقه فوقانی تعبیه و به این مجموعه گره زده شده است. سپس مجموعه نقاط این ورق به صورت یک دسته از نقاط با تغییر مکان ثابت معرفی می‌شوند، به گونه‌ای که حرکت این گره‌ها در تمام طول ورق انتهایی یکسان بوده و به وسیله یک نقطه مرجع از آن دسته کنترل می‌شود. همچنین کلیه نقاط این ورق فوقانی به منظور مدلسازی شرایط واقعی در جهت خارج

آزمایشگاهی [۲۱] است. تنش بالای تیرها در مجاورت اتصال خمشی با ستون و تسلیم ستون در پایه نیز در آزمایش مشاهده شده‌اند [۲]. تنش بالا در گوشه‌های فشاری بتن نیز در نمونه آزمایشگاهی به صورت خرد شدن پانل بتنی در این گوشه‌ها وجود دارد که تمام این موارد دال بر درستی مدلسازی انجام گرفته است.

پس از حصول اطمینان از رفتار مدل اجزاء محدود دیوار برشی مرکب، حال می‌توان مطالعات پارامتری را روی نمونه عددی به انجام رساند. در این پژوهش تعداد پانل‌های بتنی در یک یا دو سمت ورق فولادی و همچنین مقاومت بتن به عنوان پارامترهای مدنظر است که در ادامه اثر آنها بر رفتار سیستم به شکل عددی بررسی می‌شود.

شکل ۴: شرایط مرزی اعمالی به مدل تحلیلی

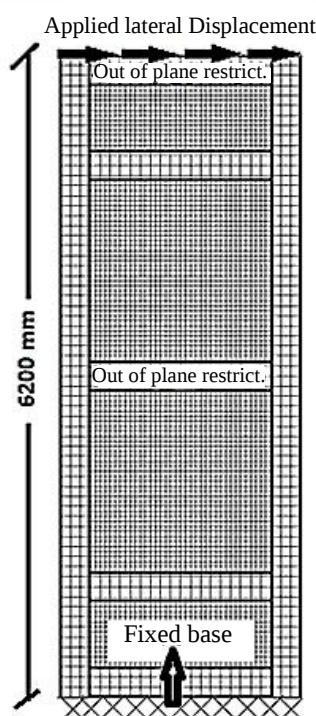


Fig. 4. Boundary condition applied to the analytical model

۴- مطالعه پارامتریک

۴-۱- بررسی اثر تعداد پانل‌های بتنی

به منظور بررسی اثر این پارامتر، نمونه عددی دارای بتن در دو طرف با مجموع ضخامت برابر با نمونه یک طرف بتن اصلی (نمونه عددی بررسی شده در بخش قبل) ساخته شده و تحلیل

از صفحه مقید می‌شود. به منظور اعمال شرایط کاملاً گیردار در پایین نمونه سازگار با واقعیت آزمایشگاهی [۲]، کلیه نقاط موجود در وجه پایینی ستون‌ها و تیر کف به صورت یک دسته از نقاط با تغییرمکان ثابت معرفی و هر شش درجه آزادی آنها بسته شده است.

شکل ۳: مشخصات فولادهای مورد استفاده در مدل اجزاء محدود

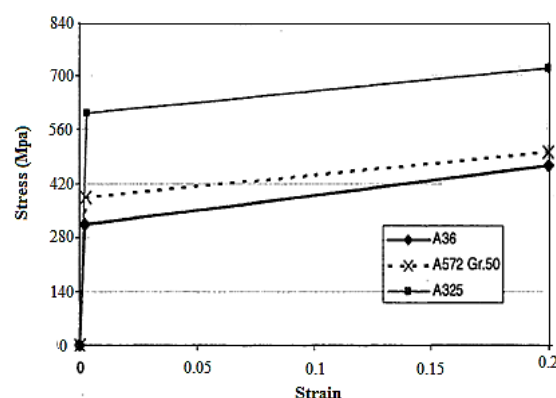


Fig. 3. Properties of steels used in FE model

پس از تکمیل نمونه عددی، تحلیل اجزاء محدود غیرخطی روی آن صورت پذیرفته و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نظیر مقایسه شده تا از این رهگذر ضمن کنترل درستی نمونه عددی و قابلیت نرم‌افزار در شبیه‌سازی مناسب عملکرد دیوار، درک بهتری از رفتار اجزاء سیستم نیز حاصل شود. در شکل (۳) منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان مبنا (تغییرمکان نقطه مرجع در ورق مستطیلی نازک فوقانی) در نمونه عددی در کنار پوش حاصل از منحنی هیستریزس آزمایشگاهی ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود با وجود نواقص مانند سخت‌تر بودن ذاتی نمونه عددی و عدم نمایش افت موجود در منحنی هیستریزس واقعی و در کنار آن لحاظ نمودن پیچیدگی‌های مربوط به اندرکنش اجزاء سیستم و ساده‌سازی-های مربوط به مدلسازی مصالح، باز هم مقاومت و تغییرشکل نهایی نمونه آزمایشگاهی با دقت مناسبی در مدل عددی برآورد شده است. در شکل (۴) نیز توزیع تنش فون میزس در نمونه عددی به تصویر کشیده شده است. این توزیع نیز انطباق مناسبی با خروجی‌های آزمایشگاهی دارد. تنش‌های بالاتر در اطراف ورق فولادی در دو طبقه کامل میانی متناظر با گسیختگی ورق فولادی در لبه‌ها به عنوان عامل اصلی شکست نمونه

در دو طرف سبب کاهش شکل‌پذیری به میزان حدود ۶۰٪ نسبت به نمونه یک طرف بتن با مجموع ضخامت یکسان پانل بتنی شده است.

شکل ۶: ایده آل سازی منحنی بارافزون به صورت دوطبقی برای تعیین شکل‌پذیری

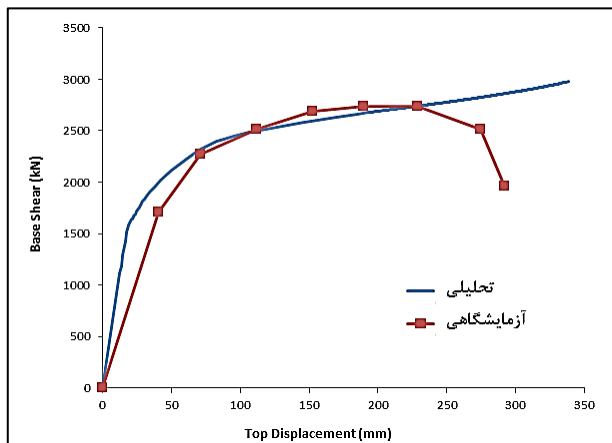


Fig. 6. Comparison of push-over curves obtained from analytical model with experiment (Innovative model)

نکته شایان ذکر در اینجا کماتش ورق فولادی در نمونه یک طرف بتن در تنش‌های بالا و نزدیک به حد تسلیم است، بگونه‌ای که در شروع کماتش انتظار می‌رود تسلیم در برخی از قسمت‌های دیوار و حتی خود ورق ایجاد شده باشد. با توجه به وجود پانل بتنی، کماتش فقط در جهت آزاد ورق امکان‌پذیر است که به آن کماتش یک‌طرفه گفته می‌شود. به صورت تئوریک ثابت شده است که وجود قید در یک طرف ورق سبب افزایش در مقاومت کماتشی ورق نسبت به حالت دو طرف آزاد می‌شود [۱۳۹]. تأثیر وجود پانل بتن بر مقاومت کماتشی در نمونه‌های دیوار برشی مرکب نیز در مرجع [۱۴] بررسی شده است. کماتش ورق فولادی در دیوار برشی مرکب منجر به سازوکار عمل میدان کشش در این ورق می‌شود. توزیع تنش‌های اصلی در ورق فولادی مربوط به نمونه تحلیل شده دارای بتن در یک طرف نیز، که در شکل (۷) نشان داده شده، مؤید همین مطلب بوده و مشاهده می‌شود که تنش‌های کششی با همین سازوکار تحمل بار به حدود ۴۲۰ Mpa در لبه‌ها رسیده است. عدم امکان کماتش ورق فولادی در نمونه با بتن در دو طرف سبب توزیع معقول‌تر تنش در پانل بتنی نیز می‌شود. در

استاتیکی افزایش دهنده غیرخطی روی آن انجام گرفت. در شکل (۵) منحنی بارافزون این دو نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که با وجود سختی اولیه تقریباً یکسان دو نمونه و همچنین مقاومت برشی بیشتر نمونه با بتن در دو طرف در تغییر مکان جانبی میانی تا حدود ۱۴٪، نمونه یک طرف بتن رفتار بسیار شکل‌پذیرتری را از خود به نمایش گذاشته و توانسته است اختلاف مقاومت را در تغییر مکان‌های بالاتر جبران نماید. بیشترین مقاومت نمونه در حالت یک طرف بتن تقریباً ۶۵۴ Kips و در حالت دو طرف بتن تقریباً ۶۸۳ Kips است که در نتیجه استفاده از بتن در دو طرف فقط ۴٪ بیشینه مقاومت برشی را افزایش داده است.

شکل ۵: مقایسه منحنی بارافزون نمونه‌های یک‌طرف و دو طرف بتن با مجموع ضخامت یکسان

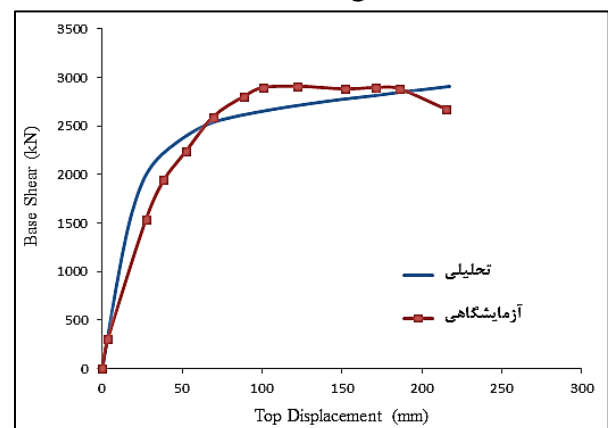


Fig. 5. Comparison of push-over curves obtained from analytical model with experiment (Traditional model)

برای محاسبه شکل‌پذیری، ابتدا منحنی بارافزون مطابق روش استفاده شده در طیف ظرفیت^۱ ATC 40 [۱۱] به صورت دوطبقی ایده آل سازی شده (شکل ۶) و مقدار تغییر مکان جانبی حد تسلیم (Δ_y) مشخص می‌شود، سپس ضریب شکل‌پذیری برابر نسبت تغییر مکان بیشینه به تغییر مکان تسلیم مطابق پروتکل^۲ ATC 24 تعریف می‌شود [۱۲]. بر مبنای این نظریه، مقدار ضریب شکل‌پذیری در نمونه‌های تحلیل شده در دو حالت بتن در یک طرف و بتن در دو طرف به ترتیب برابر با ۸/۸۶ و ۳/۶۱ به دست آمده که در نتیجه استفاده از پانل بتنی

1 Spectrum method
2 Protocol

با بتن در دو طرف ورق دارند [۱۵]. قرار دادن این دو مسئله در کنار هم گویای نیاز به نوعی توازن در ملاحظات مربوط به سخت‌شدگی ورق است، بدین معنی که ضخامت پانل بتنی و فاصله بین برشگیرها به عنوان مولفه‌های اصلی در تأمین سختی خارج از صفحه ورق- باید به گونه‌ای طرح شدند که امکان کماتش ورق در تنش‌های بالا و حتی نزدیک به حد تسلیم فراهم شود، هرچند نیاز به حداقل‌هایی برای ممانعت از کماتش زودهنگام و رفتار لرزه‌ای ضعیف مشابه دیوار برشی نازک وجود دارد که ضوابط موجود مانند ضوابط آئین‌نامه AISC [۱۶] در رسیدن به این مهم تأثیر زیادی دارند.

شکل ۸: توزیع تنش فون‌میزس (برحسب Mpa) در اجزاء فولادی برای

نمونه دارای درز:

(الف) بتن در یک سمت و (ب) بتن در دو سمت

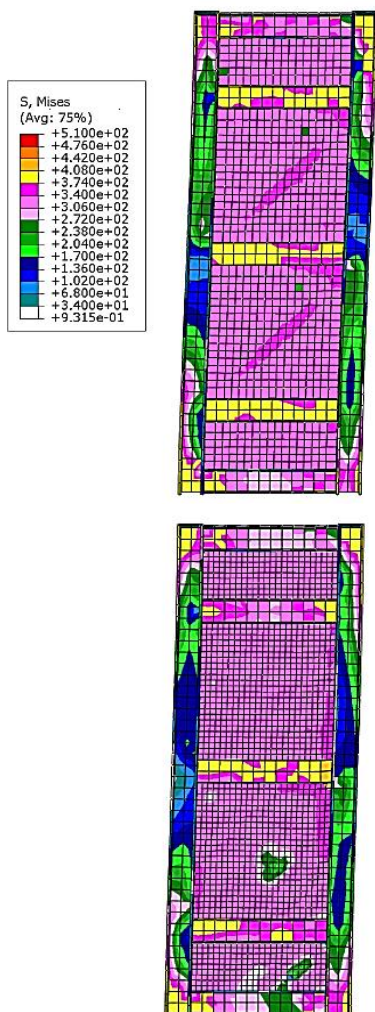


Fig. 8. Von-mises stress distribution in a) Steel parts and b) Concrete panel at the end of analysis (Innovative model)

شکل (۸) همخوانی بین توزیع تنش فون‌میزس پانل بتنی در نمونه با بتن در دو طرف با رفتار مورد انتظار از این پانل (برگرفته از مرجع [۱]) به تصویر کشیده شده است.

شکل ۷: توزیع تنش فون‌میزس (برحسب Mpa) در (الف) اجزاء فولادی و (ب) پانل بتنی در انتهای تحلیل (نمونه فاقد درز)

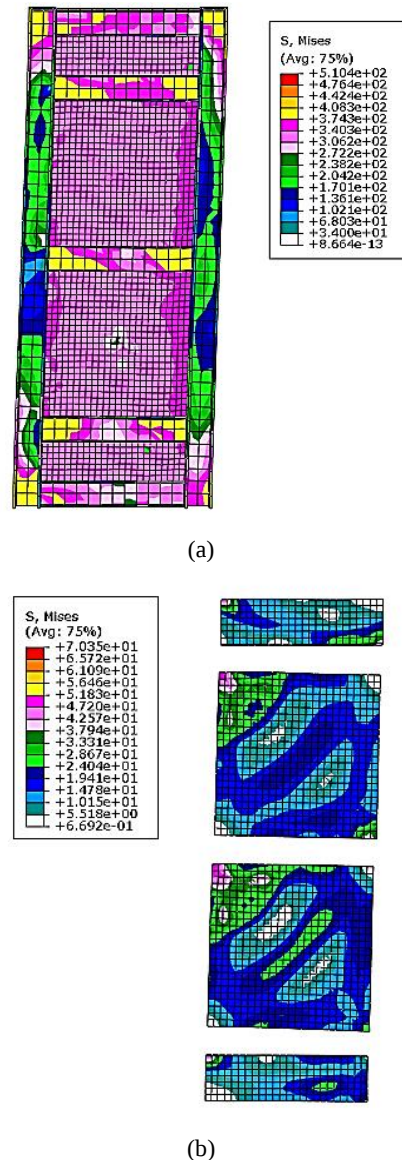


Fig. 7. Von-mises stress distribution in a) Steel parts and b) Concrete panel at the end of analysis (Traditional model)

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که کماتش ورق فولادی در نمونه با بتن در یک طرف ورق سبب شکل‌پذیری بیشتر سیستم شده است و این در شرایطی است که دیوارهای برشی فولادی نازک (به دلیل کماتش زودهنگام ورق فولادی) شکل‌پذیری نسبتاً ضعیف‌تری نسبت به دیوارهای برشی مرکب

۴-۲- بررسی اثر مقاومت بتن

برای بررسی اثر مقاومت بتن مصرفی، دو نمونه عددی دیوار برشی مرکب با بتن در یک طرف ورق و با مقاومت‌های ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ psi ساخته شده و تحلیل استاتیکی افزایشی غیرخطی روی آنها انجام پذیرفت. در شکل (۹) منحنی بار افزون این نمونه‌ها در کنار نمونه اولیه (با مقاومت بتن ۴۰۰۰ psi) ترسیم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت بتن تأثیر محسوسی بر رفتار کلی دیوار برشی مرکب نداشته و مشخصه‌های لرزه‌ای مانند سختی، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری در سه حالت تقریباً یکسان است.

شکل ۱۰: مقایسه منحنی بارافزون نمونه‌های یک‌طرف و دو طرف بتن با مجموع ضخامت یکسان (نمونه دارای درز)

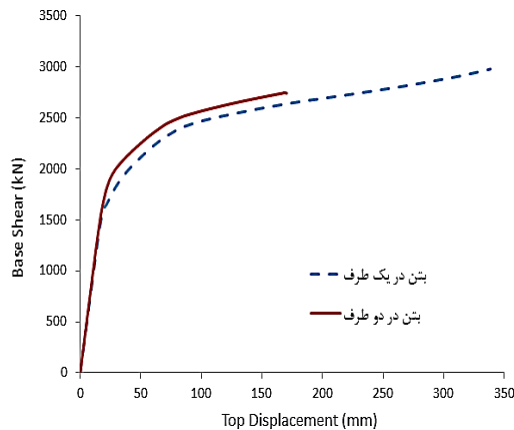


Fig. 10. Comparison of push-over curves for specimens with same thickness of concrete located in one or both sides of steel plate (Innovative wall)

شکل ۱۱: ایده آل سازی منحنی بارافزون به صورت دوخطی جهت تعیین شکل‌پذیری

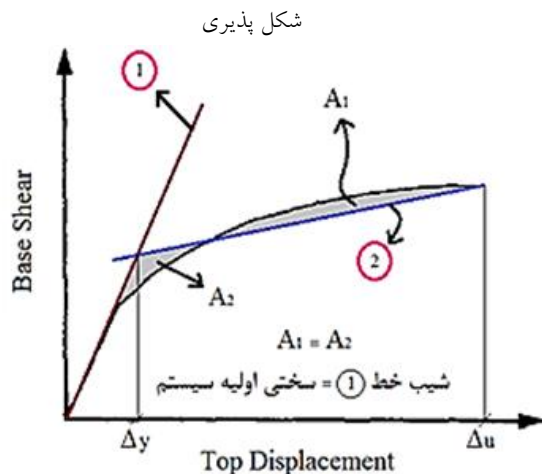


Fig. 11. Idealizing push-over curve using bilinear model for determining ductility

شکل ۹: مقایسه منحنی بارافزون نمونه‌های با مقاومت مختلف پانل بتنی

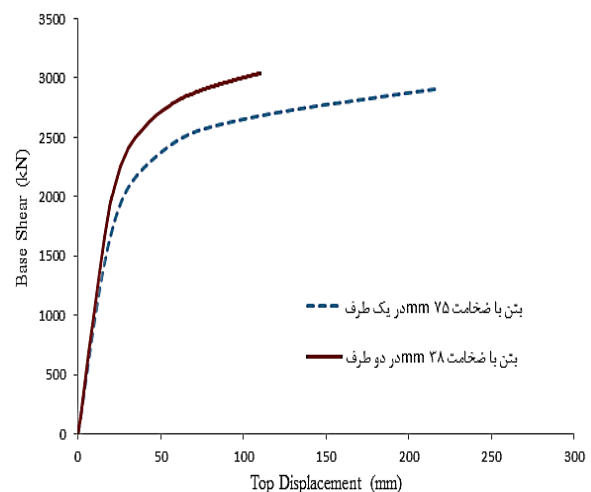


Fig. 9. Comparison of push-over curves for specimens with same thickness of concrete located in one or both sides of steel plate (Traditional wall)

شکل ۱۲: توزیع تنش‌های اصلی در ورق فولادی در طبقه اول (سمت چپ) و دوم (سمت راست)

نمونه دیوار برشی مرکب تحلیل شده دارای بتن در یک طرف ورق فولادی

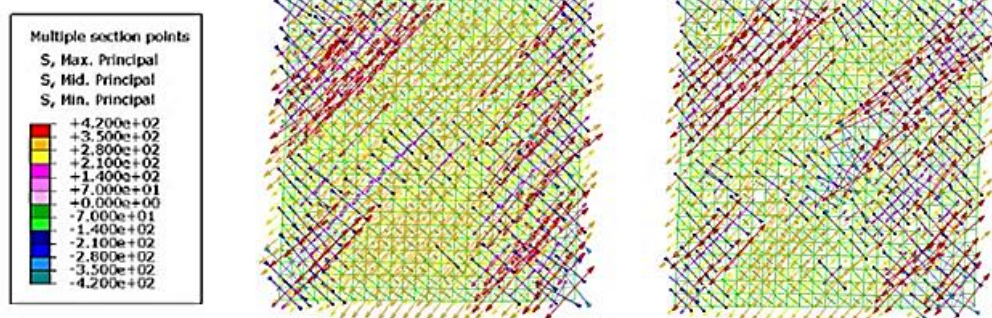


Fig. 12. Major stress distribution in steel plate of first (left) and second (right) story in analyzed composite shear wall with concrete on one side of steel plate

شکل ۱۵: مقایسه توزیع تنش فون میزس برای نمونه‌های با مقاومت بتن
(الف) ۶۰۰۰ psi (ب) ۸۰۰۰ psi

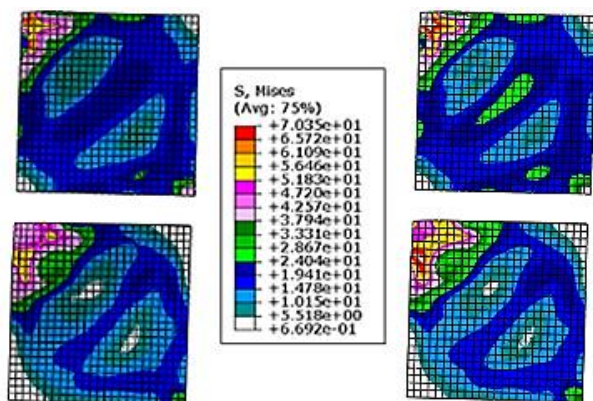


Fig. 15. Comparison of Von-mises stress distribution for specimens with concrete strengths of
a) 6000 psi b) 8000psi

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عددی اثر تعداد پانل‌های بتنی و مقاومت بتن بر رفتار دیوار برشی مرکب پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پانل بتنی در دو طرف ورق فولادی، اگرچه در تغییر مکان‌های غیرارتجاعی پایین مقاومت برشی بیشتری را نسبت به نمونه با بتن در یک طرف ورق از خود نشان می‌دهد، ولی در نهایت شکل‌پذیری کمتری را از خود نشان داده و بیشینه مقاومت در دو حالت نیز تقریباً یکسان می‌شود. این کاهش شکل‌پذیری در مدل عددی مربوط به نمونه آزمایشگاهی آستانه‌اصل و همکارش به حدود ۶۰٪ می‌رسد. تغییر سازوکار رفتار ورق از کمانش نزدیک به تسلیم به سمت تسلیم کامل بدون امکان کمانش موضعی و همچنین توزیع یکنواخت میدان قطر فشاری در پانل بتنی به ویژه در تغییر مکان‌های غیرارتجاعی بالا از مهمترین شاخصه‌های رفتاری نمونه دارای بتن در دو طرف است.

کمانش ایجاد شده در نمونه با بتن در یک طرف ورق سبب رفتار لرزه‌ای مناسب‌تر نسبت به حالتی می‌شود که امکان وقوع کمانش وجود نداشته باشد. این مسئله نشان دهنده نیاز به یک توازن در میزان سخت‌شدگی ورق است، زیرا در عین حال که کمینه الزام مربوط به تأمین سخت‌شدگی قرار دادن حد پایین برای ضخامت پانل بتنی و فاصله بین بولت‌ها برای جلوگیری

بر خلاف تأثیر بسیار اندک بر رفتار کلی سیستم مرکب، مقاومت بتن در کنترل تنش موجود در خود پانل بتنی تأثیرگذار است. مقایسه توزیع تنش فون میزس در پانل‌های بتنی میانی دو نمونه جدید (شکل ۱۰) با نمونه دارای مقاومت بتن ۴۰۰۰ psi (شکل ۴-ب) در انتهای تحلیل نشان می‌دهد که افزایش مقاومت بتن سبب کاهش نسبی تراز تنش در نواحی میانی پانل بتنی می‌شود که این مسئله را می‌توان متناظر با کاهش خسارت بتن در نمونه‌های واقعی تفسیر نمود. مشاهده فوق نشان می‌دهد که در عمل نمی‌توان انتظار زیادی برای بهبود رفتار لرزه‌ای دیوار برشی مرکب از طریق افزایش مقاومت پانل بتنی داشت.

شکل ۱۳: (الف) رفتار مورد انتظار برای مکانیزم تحمل بار در پانل بتنی و (ب) الگوی توزیع تنش فون میزس در پانل بتنی نمونه با دو طرف بتن

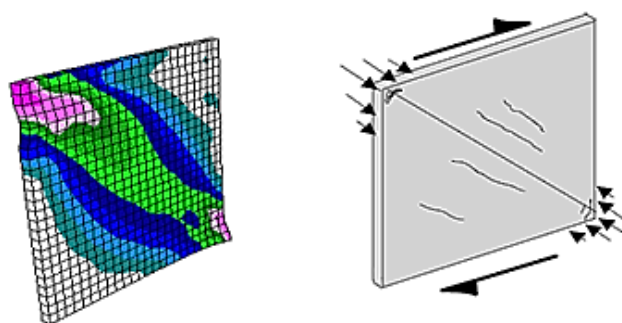


Fig. 13. a) Expected behavior for load-carrying mechanism in Concrete panel & b) Von-mises stress distribution pattern in concrete panel of specimen with both-sided concrete

شکل ۱۴: مقایسه منحنی بارافزون نمونه‌های با مقاومت مختلف بتن

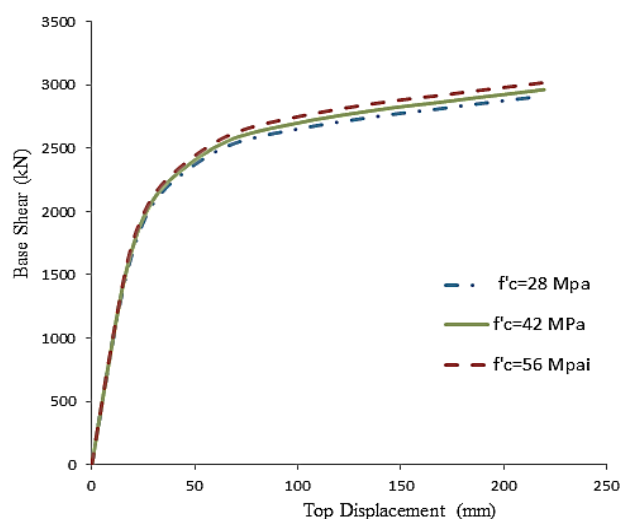


Fig. 14. Comparison of push-over curve for specimens with different push concrete strengths

حاتمی، فرزاد؛ صهری، سید مجیدرضا؛ بررسی تغییرات ضخامت ورق فولادی بر رفتار دیوار برشی مرکب؛ نشریه علمی- پژوهشی سازه و فولاد، سال چهارم، شماره چهارم، پاییز ۱۳۸۷.

[5] Arabzadeh A., Soltani M., Ayazi A.؛ "Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings"؛ Thin-walled Structures, 49, 2011, Pgs 842-854.

[6] ASTM؛ Annual Book of ASTM Standards؛ American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2000.

[7] ACI 318-08؛ Building Code Requirements for Structural Concrete؛ American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, January 2008.

[۸] قوامی ماسوله، سید محمد مجید؛ تحلیل غیرخطی ساختمان‌های فولادی به روش بارافزون (Pushover)؛ پایان- نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، بهمن ماه ۱۳۸۰.

[9] Yaw Louie L.؛ "Nonlinear Static- Explicit and Implicit Analysis Example"؛ Walla Walla University, Draft date: May27, 2009.

[10] ATC 40؛ Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings؛ Applied Technology Council, Report No. SSC 96-01, November 1996.

[11] ATC 24؛ Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures؛ Applied Technology Council, Report 24, California, 1992.

[12] Seide P.؛ "Compressive Buckling of a Long Simply Supported Plate on an Elastic Foundation", Journal of The Aeronautical Science, 25(6), Pg 382-384, June 1958.

[13] Arabzade A., Moharrami H., Ayazi A.؛ "Local elastic buckling coefficient of steel plates in composite steel plate shear walls"؛ Scientia Iranica, Transactions A : Civil Engineering, Vol 18, Pgs 9-15, 2011.

[14] Guo L., Li R., Rong Q., Zhang S.؛ "Cyclic behavior of SPSW and CSPSW in composite frame"؛ Thin-walled Structures, 51, 2012, Pgs 39-52.

[15] AISC 341-05؛ Seismic provisions for Structural Steel Buildings؛ American Institute of steel construction Inc., Chicago, IL. March 2005.

از رفتار نامطلوب دیوار برشی فولادی نازک مورد نیاز است، در کنار آن باید امکان کمایش ورق فولادی در تنش‌های بالاتر و نزدیک به تسلیم فراهم باشد تا بتوانیم رفتار شکل‌پذیرتری را به دست آوریم.

همچنین نتایج ای پژوهش نشان می‌دهد که افزایش مقاومت بتن تأثیر چندانی بر بهبود رفتار لرزه‌ای کلی دیوار برشی مرکب نداشته و تغییر در پارامترهای لرزه‌ای مانند سختی، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری بسیار ناچیز است. با این حال، افزایش مقاومت بتن می‌تواند سبب کاهش خسارت در پانل بتنی شود. با توجه به اثر نامحسوس مقاومت بتن بر رفتار کلی سیستم و حتی اثر منفی استفاده از بتن در دو طرف ورق بر شکل‌پذیری، می‌توان استفاده از بتن با مقاومت معمولی (مثلاً ۴۰۰۰ psi یا ۲۸Mpa) و آنهم فقط در یک طرف ورق فولادی را برای حصول به رفتار لرزه‌ای مطلوب در دیوار برشی مرکب کافی دانست.

۶- مراجع

[1] Astaneh-asl A.؛ "Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls"؛ Steel Information and Product Service Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA, May 2002.

[2] Zhao Q.؛ Experimental and Analytical Studies of Cyclic Behavior of Steel and Composite Shear wall Systems؛ Ph.D Dissertation in Civil and Environmental Engineering, University Of California, Berkeley, Fall 2006.

[3] Rahai A.؛ Hatami F.؛ "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings"؛ Journal of Constructional steel research, 65, 2009, Pgs. 1528-37.

[۴] حاتمی، فرزاد؛ ارزیابی عملکرد و مشخصات هندسی بهینه دیوارهای برشی مرکب؛ رساله دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۱۳۸۴.

Effects of Concrete Strength and Number of Concrete Panels on Behavior of Composite Shear Walls

Aboulfazl Arabzadeh^{1*}, Hamed Ahmadi Taleshian²

1- Assoc. Prof., Structural Engineering Department, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2- M.Sc., Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

arabzade@modares.ac.ir

Abstract:

Composite steel plate shear wall, or in short: Composite shear wall, is a lateral load resisting system which is widely investigated during past decades. Steel plate is one of the most important components in this system, which carries the shear stress as well. However, relatively high values reported for the slenderness of this component may result in its buckling under relatively small loads. Avoiding the probable buckling, and reaching to a suitable seismic performance, concrete panel is also attached to one or both sides of the steel plate. This allows the composite performance of the system, where the shear connectors are developed. These connectors are usually in the form of bolts, when the pre-cast concrete panels are used. The composite panel acts as infill, when it is surrounded by beams and columns (as a frame). The frame elements can be regarded to as boundary members, where their behavior in combination with the shear wall is considered, especially in special-seismic designs. In this case, a dual action is required, and the beam-to-column connections should be rigid enough. It must be noticed that the frame members also participate in resisting a significant portion of shear, which is resulted from the overturning moments, distributed based on their stiffness. In this paper, a number of concrete panels (whether on one or both sides of steel plate) are numerically investigated, along with the values for concrete strength, to determine their effects on the seismic behavior of composite walls. For this purpose, a reliable experimental specimen -as a reference case- is evaluated using ABAQUS. Verifying the accuracy of the numerical model, new similar specimens were studied by push-over method, in order to determine the participation of the required parameters in the overall response. According to the results, specimens with concrete layers on both sides represent less ductile behavior than specimens with one-sided concrete layer. However, the former reaches to a higher shear strength at smaller inelastic displacements. It is remarkable that same ultimate shear strength and initial stiffness are reported for both specimens. The steel plate is likely to buckle in the specimen with one side concrete layer at high levels of stress close to yielding state. Whereas, it is observed that the buckling has no stability sequences, and does not result in a performance similar to thin steel plate shear walls, due to the prevention of early buckling. It also leads to a more ductile behavior in comparison with the case where the specimen will reach to its yielding state due to shear, where no buckling is expected. In addition, the strength of concrete shows little effects on the overall behavior of the system; however it can reduce the amount of the imposed damage to concrete panel. Based on the results, using one-sided concrete layer with normal-strength ($f_c=28\text{Mpa}$) is sufficient for obtaining a desirable seismic performance.

Keywords: Composite shear wall, Static Push-over analysis, Finite Element, Concrete panel, buckling