

کاربرد میراگرهای اصطکاکی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای بیمارستان سنت وینسنت در اتاوا



خلاصه

بیمارستان سنت وینسنت از ۵ بلوک ساختمان با قاب بتنی ۵ طبقه تشکیل شده است. یکی از بلوک‌ها ساختمانی جدید و چهار بلوک دیگر هم ساختمان‌هایی هستند که بین سال ۱۸۹۰ تا اوایل دهه‌ی ۱۹۵۰ ساخته شده‌اند. مقاومت زلزله‌ی سازه‌های موجود بسیار کمتر از مقدار مورد نیاز آیین‌نامه‌های ساختمانی امروزی است. از آنجا که بیمارستان‌ها بعد از وقوع حوادث اهمیت زیادی دارند، مهندسان توصیه می‌کنند که سازه‌های موجود باید با مقررات جدید بهسازی می‌شدند.

روش‌های مرسوم بهسازی لرزه‌ای با دیوارهای بتنی یا مهارندهای فولادی صلب برای این بیمارستان به دلیل هزینه‌ی بالا و زمان‌بر بودن کارهای پی مناسب نبود. میراگرهای مکمل به همراه سختی مناسب یک راه‌حل مبتکرانه برای بهسازی لرزه‌ای این بیمارستان ارائه می‌دهد. این کار با اضافه کردن میراگرهای اصطکاکی پال در مهاربند فولادی انجام شد.

مقدمه

بیمارستان سنت وینسنت در مرکز شهر اتاوا در کانادا قرار دارد (شکل ۱). بیمارستان شامل ۵ بلوک به نام‌های A و B و C و D و E است (شکل ۲). بلوک E یک ساختمان جدید است. همچنین در حیاط داخلی یک سازه‌ی جدید دهلیز مانند وجود دارد. سازه‌های موجود بین سال ۱۸۹۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۵۰ ساخته شده‌اند. ساختمان‌های ۵ طبقه ساختمان‌هایی با قاب بتنی هستند. پوشش بیرونی ساختمان‌ها سنگ بود. پی‌های ساختمان‌ها گسترده هستند. تمام بلوک‌ها با اتصالات انبساطی از هم جدا شده‌اند. مانند اکثر ساختمان‌های ساخته شده در این دوره، مقاومت در برابر زلزله‌ی این سازه‌های موجود بسیار کمتر از مقررات آیین‌نامه ساختمانی موجود است. جزئیات تقویت ستون‌ها و تیرها، نشان‌دهنده‌ی کمبود انعطاف‌پذیری است. از آنجا که بیمارستان‌ها بعد از وقوع حادثه اهمیت زیادی دارند، مهندسان پروژه توصیه کردند که سازه‌های موجود تقویت شوند. کار تقویت در نوامبر ۲۰۰۲ آغاز شد و تا سال ۲۰۰۶ ادامه داشت.

روش‌های معمول بهسازی لرزه‌ای با دیوارهای برشی بتنی یا مهاربندهای فولادی صلب برای این پروژه مناسب نبودند، زیرا بهسازی با این روش‌ها نیاز به عملیات زیرسازی گران و زمان‌بر دارد. کمبود زمان و بودجه باعث شد که این گزینه‌های مرسوم امکان‌پذیر نباشند. میراگرهای مکمل به همراه سختی مناسب یک راه‌حل مبتکرانه برای بهسازی لرزه‌ای این بیمارستان ارائه داد. در اینجا این کار با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پال انجام شد. برخلاف دیوارهای برشی، مهاربندهای میراگر اصطکاکی نیاز به پیوستگی در راستای عمودی ندارند و در نتیجه کار می‌تواند در هر طبقه بسته به در دسترس بودن شروع شود.

این مقاله در مورد نتایج تحلیل، فرآیند طراحی و جزئیات بهسازی لرزه‌ای بحث می‌کند. علاوه بر این در مورد بهسازی لرزه‌ای و تحلیل تک‌تک بلوک‌ها بحث می‌شود. یک بحث مختصر در مورد میراگرهای اصطکاکی پال هم آورده شده است که به درک بهتر کاربرد آن‌ها منجر می‌شود.

میراگرهای اصطکاکی پال

ترمز اصطکاکی به‌صورت گسترده برای متوقف کردن اشیاء در حال حرکت به کار گرفته می‌شود زیرا این روش مؤثرترین، قابل‌اتکاترین و اقتصادی‌ترین راه برای مستهلک کردن انرژی جنبشی است. در اواخر دهه‌ی هفتاد، اصل ترمز اصطکاکی الهام‌بخش توسعه‌ی میراگرهای اصطکاکی پال بود. مشابه ماشین‌ها، حرکت یک ساختمان در حال لرزش را هم می‌توان با مستهلک کردن انرژی در اصطکاک کند کرد.

این میراگرهای اصطکاکی در ساخت و ساز ساده و بدون خطا هستند. به دلیل سادگی آن‌ها، این میراگرها ارزان هم هستند. این میراگرها از یک سری صفحات فولادی پردازش شده برای ایجاد اصطکاک ثابت و پایدار تشکیل شده‌اند. این صفحات به‌وسیله‌ی بولت‌های فولادی با مقاومت بالا در کنار هم محکم نگه داشته شده‌اند. این میراگرها طوری طراحی شده‌اند که در طول تندبادها، تحت بارهای طراحی و زلزله‌های خفیف روی هم نلغزند. در طول یک زلزله‌ی بزرگ، هنگامی که میراگرهای اصطکاکی تحت بار از پیش تعیین شده‌ای قرار بگیرند، قبل از اینکه جاری شدن در دیگر اعضای سازه‌ای آغاز شود و آن‌ها بخش عمده‌ای از انرژی لرزه‌ای را مستهلک کنند، دچار لغزش می‌شوند. نیروی ماکزیمم برای تمام زلزله‌های آینده ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین نیروهای لرزه‌ای ماکزیمم در مهاربندها و اتصالات مشخص است و طراحی این اعضا ساده و اقتصادی است. بعد از زلزله ساختمان طی یک واکنش فنری در ساختار الاستیک، تقریباً به وضعیت اصلی خود بر می‌گردد.

این میراگرهای اصطکاکی چرخه‌ی پسماند مستطیلی بزرگی دارند که مشابه مصالح الاستوپلاستیک ایده آل است. بر خلاف میراگرهای ویسکوز، عملکرد این میراگرها مستقل از دما و سرعت است. برای یک نیرو و جابه‌جایی مشخص در میراگر، انرژی مستهلک شده در میراگری اصطکاکی پال نسبت به دیگر میراگرهای موجود بیش‌تر است؛ بنابراین تعداد میراگرهای اصطکاکی پال کمتری برای ایجاد یک مقدار استهلاک مشخص لازم است. در این میراگرها هیچ چیزی برای نشت یا آسیب دیدن وجود ندارد و در نتیجه نیازی به تعمیر و جابه‌جایی بعد از زلزله نیست. از آنجا که این میراگرها در هنگام وزش باد فعال نمی‌شوند، هیچ خطر شکستی به دلیل خستگی در آن‌ها رخ نمی‌دهد. این میراگرها فشرده و به‌اندازه‌ی کافی باریک هستند که در پارتیشن‌های دیوار پنهان شوند.

میراگرهای اصطکاکی پال آزمایش‌های شدید میز لرزش را در کانادا و ایالات متحده با موفقیت پشت سر گذاشته‌اند. در سال ۱۹۸۵، یک قاب مهاربندی شده با میراگر اصطکاکی در روزی میز لرزش در دانشگاه بریتیش کلمبیا در ونکوور آزمایش شد. حتی یک زلزله‌ی شبیه‌سازی شده با شتاب $0.9g$ هم باعث خسارت به قاب مدل نشد، در حالی که قاب‌های معمولی در سطوح لرزه‌ای پایین‌تری به شدت آسیب دیدند. در سال ۱۹۸۷ یک قاب با مهاربند میراگر اصطکاکی نه طبقه در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی مورد آزمایش قرار گرفت. قاب مدل تا $0.84g$ هم الاستیک باقی ماند. این میراگرهای اصطکاکی استاندارد بالایی در کنترل کیفیت دارند. هر میراگر قبل از تحویل آزمایش می‌شود.

این میراگرها کاربردهای گسترده‌ای در ساختمان‌های بتنی و فولادی، برج‌های آب مرتفع و یا ساختمان‌های جدید و بهینه‌سازی سازه‌های موجود، پیدا کرده‌اند. کارخانه‌ی هواپیمایی بوئینگ در اورت بزرگ‌ترین ساختمان دنیا از نظر حجم است که با استفاده از این میراگرها بهسازی شده است. سانفرانسیسکو میراگرهای اصطکاکی پال را برای کنترل لرزه‌ای مرکز همایش‌های مسکون‌وست انتخاب کرد و نسبت به گزینه‌های جایگزین ویسکوز توانست مبلغ $۲,۲۵$ میلیون دلار ایالات متحده صرفه‌جویی کند. تا به امروز بیش از هشتاد سازه با این میراگرها ساخته شده است. بسیاری دیگر از ساختمان‌ها هم در فاز طراحی یا ساخت قرار دارند.

راهنمایی‌های طراحی

فرآیند طراحی نیمه استاتیک ارائه شده در آیین نامه ساختمانی ملی کانادا ۲۰۰۰ (NBCC 2000) بر اساس شکل‌پذیری است و صریحاً مربوط به ساختمان‌هایی با میراگر اصطکاکی نیستند. با این وجود، تفسیر سازه‌ای NBCC 2000 استفاده از میراگرهای اصطکاکی را برای کنترل لرزه‌ای ساختمان مجاز می‌داند. راهنماهای زیادی در مورد تحلیل و طراحی وسایل استهلاک انرژی غیرفعال در ایالات متحده تدوین شده است. جامع‌ترین آن‌ها راهنمای NEHRP برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها (FEMA 356)، است که در سال ۲۰۰۰ منتشر شده است. NBCC و اسناد فوق به‌عنوان راهنما برای تحلیل و طراحی در بیمارستان سنت وینسنت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

راهنما ملزم می‌کند که سازه با تجهیزات استهلاک انرژی برای پاسخ در دو سطح از لرزش ارزیابی شود - یک زلزله‌ی پایه طراحی (DBE) و یک زلزله‌ی بسیار شدید (MCE). تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در هر دو مورد DBE و MCE مورد نیاز است. DBE اتفاقی است که احتمال زلزله‌ای شدیدتر از آن در یک دوره ۵۰ ساله ۱۰٪ است. در DBE، ساختمان برای اطمینان از اینکه نیازهای مقاومتی اجزای سازه‌ای از حدود خود بیشتر نیستند و اینکه تغییر مکان جانبی ساختمان در داخل بازه‌ی قابل قبول است، ارزیابی می‌شود. MCE شدیدترین زلزله‌ای است که یک ساختمان ممکن است تجربه کند. ساختمان نباید تحت MCE فرو بریزد. همچنین در MCE سازه برای اطمینان از رعایت الزامات تغییر شکل حداکثر تجهیزات هم ارزیابی می‌شود. از آنجا که زلزله‌های مختلف پاسخ‌های سازه‌ای مختلفی را دارند، حداقل استفاده از سه زلزله برای یک منطقه مناسب خواهد بود. حداکثر پاسخ باید برای طراحی استفاده شود.

تحلیل

لغزش میراگر اصطکاکی در یک مهاربند الاستیک، سبب رفتار غیرخطی مصنوعی می‌شود. مقدار انرژی مستهلاک شده متناسب با تغییر مکان در هر بازه‌ی زمانی است؛ بنابراین تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای به کار بردن میراگرهای اصطکاکی ضروری است.

در این نوع از تحلیل پاسخ سازه در هر لحظه از زمان در طول زلزله و بعد از آن را می‌توان به دست آورد. تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی بر روی مدل سه بعدی بیمارستان سنت وینسنت با استفاده از برنامه کامپیوتری ETABS انجام شد. مدل‌سازی میراگرهای اصطکاکی پال خیلی ساده است. چرخه‌ی پسماند میراگر شبیه به چرخه‌ی مستطیل شکل مصالح الاستوپلاستیک ایده آل است؛ بنابراین بار لغزش میراگر را می‌توان به صورت نیروی جاری شونده اصطکاکی در نظر گرفت.

هر بلوک به صورت مجزا تحلیل شد. تحلیل بلوک D که تقریباً مشابه سایر بلوک‌ها هم هست در این مقاله مورد بحث واقع شده است. مدل‌سازی کامپیوتری این بلوک در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. شکل ۶ تاریخچه‌ی زمانی زلزله‌ای که پاسخ حداکثر را می‌دهد را نشان می‌دهد. میرایی بحرانی ویسکوز در مرحله‌ی الاستیک اولیه ۵٪ فرض شد تا حضور اعضای غیر سازه‌ای هم شبیه سازی شود. برنامه‌ی ETABS میرایی پسماند را به دلیل افت اصطکاک میراگرها در نظر می‌گیرد. برای در نظر گرفتن هر خروج از مرکزیت تصادفی احتمالی به دلیل توزیع جرم یا تغییر در سختی نسبی، مرکز جرم ۱۰٪ تغییر پیدا کرد. تحلیل‌ها برای حرکات زلزله در ترکیب محورهای X و Y انجام شد. تعدادی تحلیل‌های تکراری برای تعیین بار لغزش بهینه‌ی میراگرهای اصطکاکی انجام شد که پاسخ بهینه را به دست آورد. ۱۸۳ میراگر اصطکاکی در تمام بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بار لغزش طراحی میراگر اصطکاکی ۳۰۰ کیلو نیوتن بود. بعضی از میراگرهای اصطکاکی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

نتایج

برای مقایسه، تحلیل‌های بیش‌تری با استفاده از مهاربندهای صلب معمول انجام شد. مهاربندهای معمول که بهترین نتایج را به دست آوردند، سطح مقطعی معادل دو برابر مهاربندهایی با میراگر اصطکاکی داشتند. تمام دیگر متغیرها در این تحلیل‌ها ثابت نگه داشته شدند. اثرگذاری میراگرهای اصطکاکی در بهبود پاسخ لرزه‌ای در مقایسه با نتایج دو نوع قاب‌های مهاربندی شده خود را نشان داده است. نتایج ساختمان‌هایی با قاب‌های دارای مهاربند میراگر اصطکاکی (FD) و نتایج مهاربندهای صلب (RB) از این قرار است:

۱. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای محوری در مهاربند قطری منفرد در طبقه‌ی چهارم RB و FD در شکل ۷ نشان داده شده است. نیروی حداکثر در FD حدود ۲۰٪ مقدار نیروی حداکثر در RB است. نیروهای محوری در ستون‌ها در FD حدود ۳۰٪ نیروهای محوری در ستون‌های RB است. علاوه بر مهاربندی و اتصالات گران قیمت، استفاده از مهاربندی صلب به مقاوم سازی ستون و پی گران قیمت و زمان بر نیاز داشت.
۲. تاریخچه‌های زمانی تغییر مکان در سطح طبقات در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر مکان حداکثر FD حدود ۸۰٪ تغییر مکان حداکثر RB است. در انتخاب حرکت زمین FD تقریباً به حالت اولیه خود برمی‌گردد. در مقایسه با قاب سازه‌ی موجود، جابه‌جایی طبقه بیش از ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است. حداکثر جابه‌جایی طبقه FD حدود ۰٫۷٪ بود.
۳. چرخه‌ی پسماند میراگر اصطکاکی در طبقه‌ی چهارم در شکل ۹ نشان داده شده است. چرخه‌ی پسماند نشان از استهلاک انرژی بالا در طول چرخه‌های زیاد لغزش دارد. از آنجا که نیروی ثابتی برای تمام زلزله‌ها در نظر گرفته می‌شود، طراحی مهاربندها و اتصالات ساده و اقتصادی است.

۴. تاریخچه‌های زمانی ورودی انرژی برای RB و FD و انرژی مستهلک شده در FD در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که انرژی کل ورودی در FD حدود ۸۰٪ انرژی در RB است. همچنین می‌بینیم که میراگر اصطکاکی حدود ۸۰٪ از ورودی انرژی را مستهلک کرده است؛ بنابراین انرژی خالص در FD تنها ۳۶٪ کل انرژی در RB است.

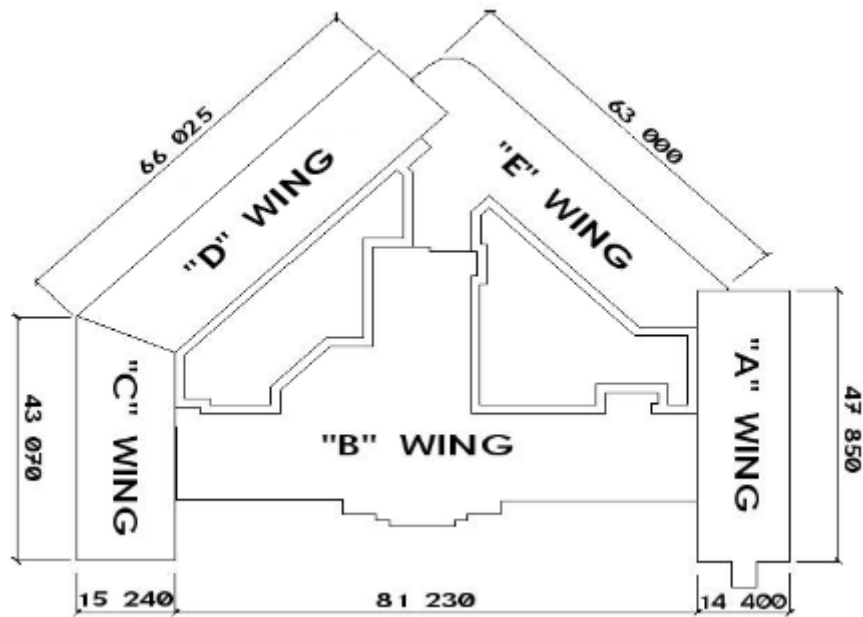
۵. برش‌های پایه در FD حدود ۳۰٪ برش‌های پایه در RB هستند. در کل با به‌کارگیری میرایی مکمل ایجاد شده با میراگرهای اصطکاکی، بهبود کلی در پاسخ لرزه‌ای ایجاد شده است.

نتیجه گیری

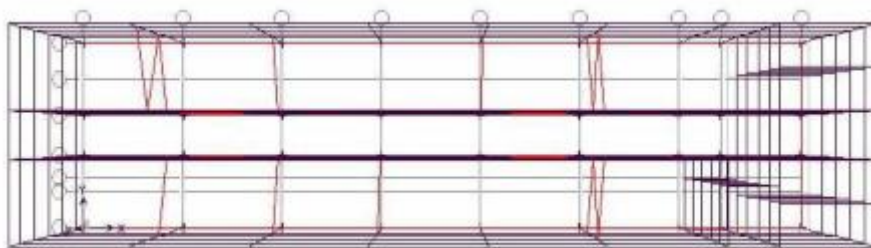
کاربرد میراگرهای اصطکاکی پال یک راه حل عملی، اقتصادی و با سرعت بالاتر برای بهبود لرزه‌ای بیمارستان سنت وینسنت ارائه کرده است. تحلیل‌ها نشان داده است که میراگرها بخش عمده‌ای از انرژی لرزشی را در اصطکاک مستهلک کرده‌اند؛ بنابراین سازه‌های دارای میراگر، تغییر مکان‌ها و نیروهای اعضای کمتری را تجربه می‌کنند. تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان از عملکرد بهتر سازه با میراگر اصطکاکی نسبت به روش‌های مرسوم بهسازی دارد.



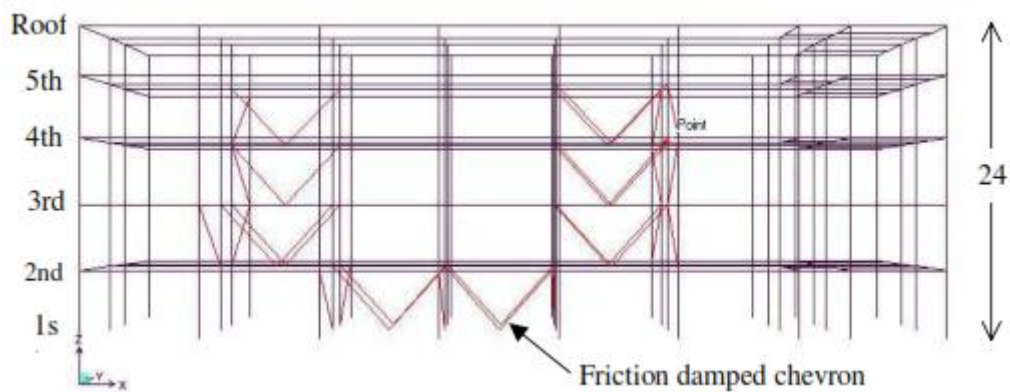
شکل ۱. نمای جلویی بال B



شکل ۲. پلان طرح کلی بیمارستان



شکل ۳. بلوک D، مدل تحلیلی سه بعدی ساختمان، نما از بالا به پایین



شکل ۴. بلوک D، مدل تحلیلی سه بعدی ساختمان، نمای جلو

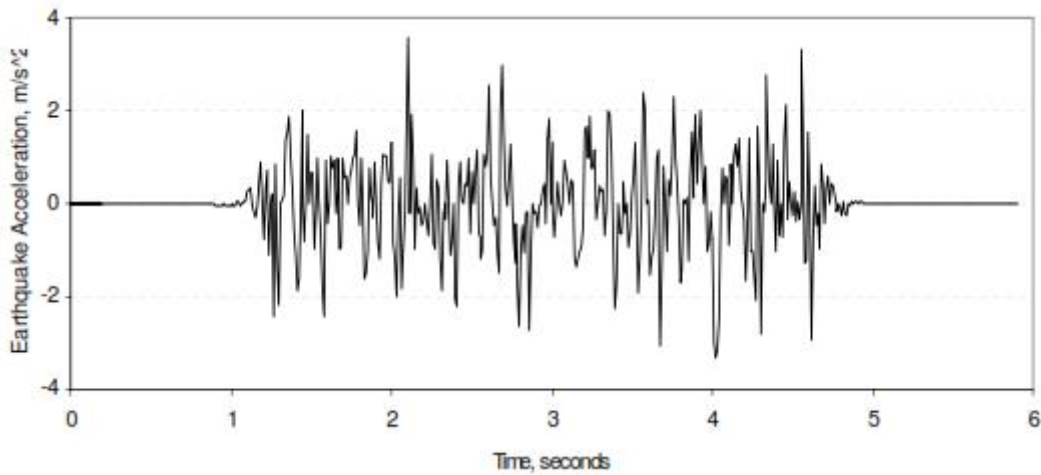


Friction damper in single diagonal bracing

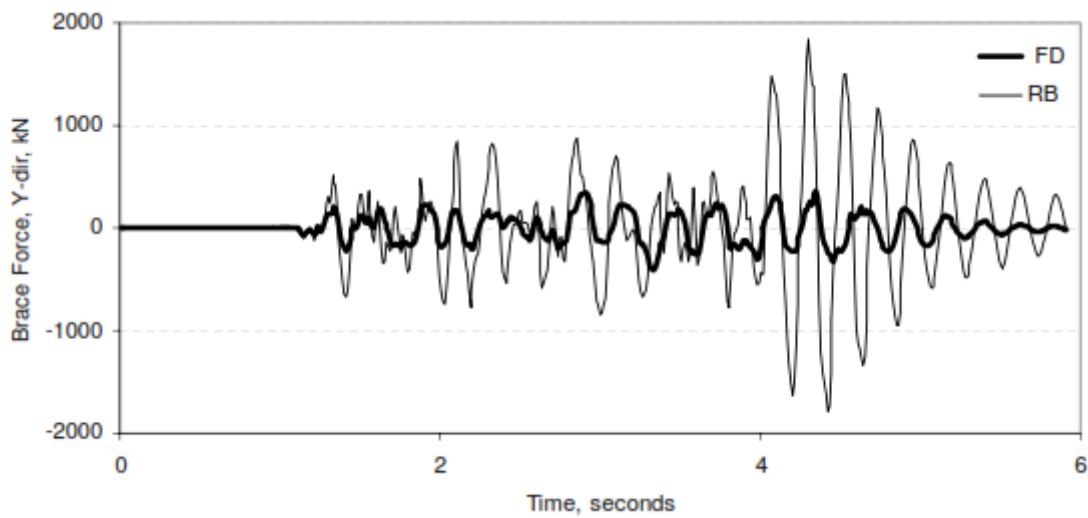


Friction damper in chevron bracing (inverted)

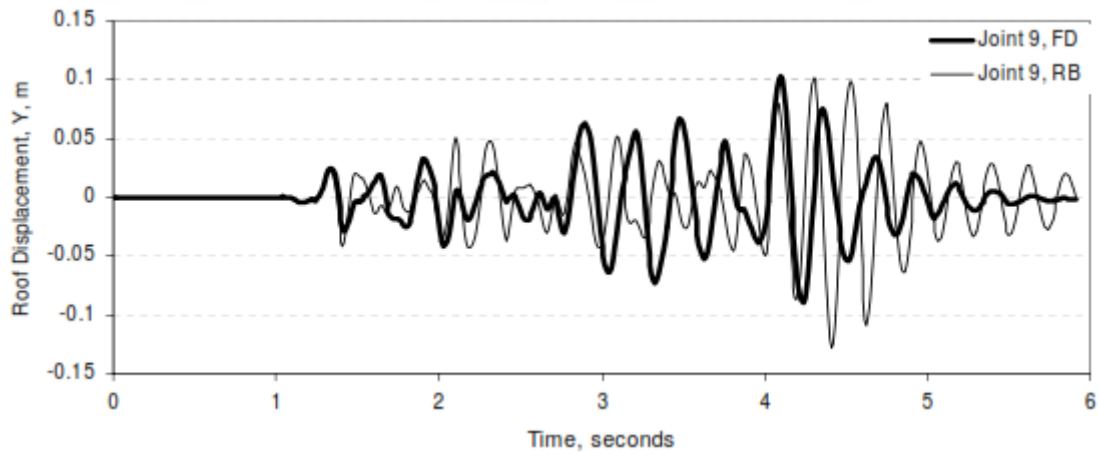
شکل ۵. میراگرهای اصطکاکی پال معمولی در مهاربند قطری منفرد (سمت چپ) و مهاربند شورن (سمت راست)



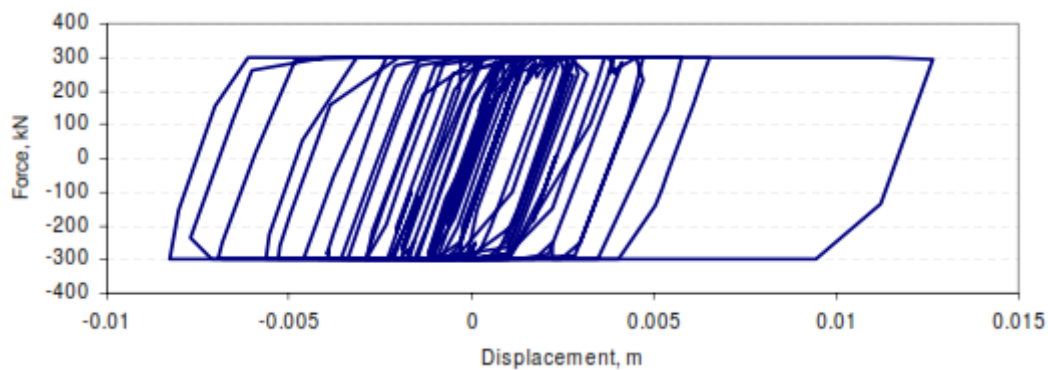
شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی زلزله



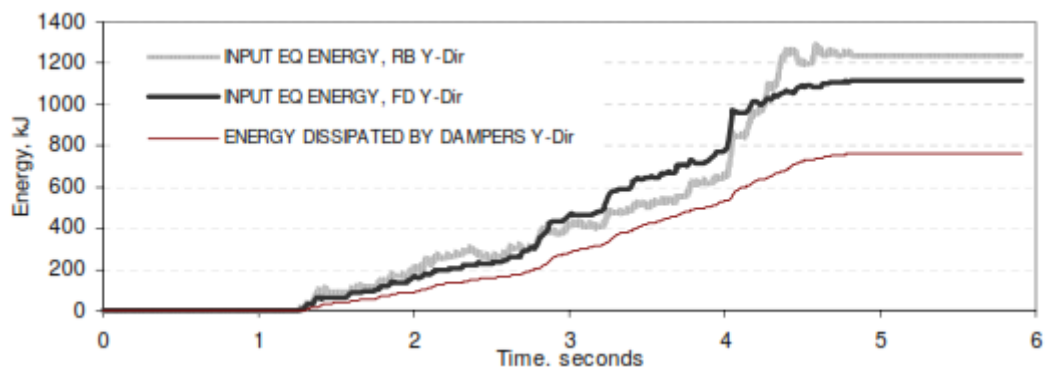
شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی نیروهای محوری در طبقه‌ی چهارم مهاربند قطری منفرد



شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان سقف



شکل ۹. چرخه‌ی پسماند میراگر اصطکاکی



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی ورودی انرژی و انرژی مستهلک شده

مترجم: علی اکبر خلیلی