فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱
صفحات ۱۶۹-۱۷۹
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی توسط حرکت گهواره‌ای و قطعات مستهلک کننده انرژی

فرشاد عابدین مقانکی۱*، فرهاد عابدین مقانکی۲

۱* مربی سازمانی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
farshad.abedin44@gmail.com
۲ کارشناسی ارشد، گروه عمران _سازه، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
farhad.civil110@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر انجام مطالعات عددی و آزمایشگاهی به منظور بررسی کارایی سیستم‌های سازه‌ای دارای حرکت گهواره‌ای در مقایسه با سازه‌های متعارف در محدوده ساختمان‌های کوتاه و میان‌مرتبه در دستورکار قرار گرفته است. قسمت مربوط به مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود غیرخطی به منظور شبیه-سازی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها انجام پذیرفته است در حالیکه بخش مطالعات آزمایشگاهی عمدتا مربوط به انجام آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس نصب شده در قاب عکس‌العمل آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بوده است. به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای حالت‌های مورد بررسی، آنالیزهای تاریخچه زمانی متعدد با اعمال مجموعه رکوردهای حوزه دور در پایه و درنظرگرفتن پارامترهای کلیدی مانند دریفت‌های کل و خمشی و تغییرمکان‌های پسماند انجام گردیده است. نتایج حاصله بیانگر کاهش دریفت‌های کل و خمشی طبقات سازه نوین (تا میزان ۵۰٪ و ۹۰٪) بوده است. از سوی دیگر، مقادیر دریفت‌های پسماند برای سازه‌های متعارف متناظر در محدوده ۰/۶٪ و ۱/۶٪ برای سطوح خطرDBE و MCE برآورد گردید. به علاوه، به منظور ارزیابی احتمالات فراگذشت حالت‌های آسیب مختلف سازه دارای حرکت گهواره‌ای (شامل حالت‌های جاری‌شدن و گسیختگی وسایل مستهلک‌کننده انرژی و سیستم‌های تامین‌کننده مرکزگرایی و فروریزش) منحنی‌های شکنندگی سازه‌های مورد نظر استخراج شد. در بخش تجربی مطالعات حاضر، یک قاب فولادی ۲- طبقه دارای حرکت گهواره‌ای با مقیاس ۱ به ۳ با کاربرد حلقه فولادی، کف‌ستون با ضخامت متغیر و میراگر اصطکاکی با لنت ترمز به منظور بررسی رفتار چرخه‌ای آنها طراحی و ساخته شد. نتایج تجربی به دست آمده بیانگر ارزیابی نمونه‌های آزمایشگاهی دارای حرکت گهواره‌ای تحت تغییرمکان‌های چرخه‌ای از دیدگاه قابلیت استهلاک انرژی و خصوصیات مرکزگرایی می‌باشد.

کلیدواژه: رفتار لرزه‌ای، سازه فلزی، حرکت گهواره‌ای

۱- مقدمه

در سازه‌های فولادی دارای حرکت گهواره ای، با طراحی و اجرای جزئیات اجرایی ویژه در کف ستون‌ها و پایه امکان وقوع پدیده بر کنش در هنگام زلزله برای ساختمان فراهم می گردد. به علاوه، در این سیستم های سازه ای با تعبیه وسایل مستهلک کننده انرژی به عنوان فیوز لرزه ای نسبت به تمرکز تغییر شکل های غیرارتجاعی و آسیب های مورد انتظار در وسایل یاد شده و کنترل جابجایی های ایجاد شده در سازه اقدام می گردد. به این ترتیب استفاده از مزایای این قبیل سازه ها در کاهش تقاضای لرزه ای از یک سو و تفکیک سیستم باربر ثقلی و لرزه ای به همراه کاربرد قطعات فیوز با امکان تعویض ساده تر و عدم اخلال در باربری ثقلی ساختمان پس از زلزله از سوی دیگر مورد توجه بوده است.

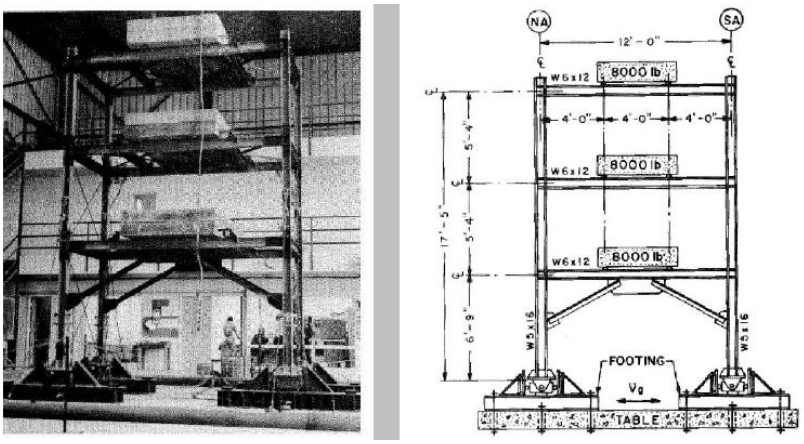
از سوی دیگر به منظور توسعه سازه های دارای حرکت گهواره ای در جامعه مهندسی، توجه به محدودیت های موجود در تامین خصوصیت بازگردانندگی سیستم به منظور احتراز از وقوع بلندشدگی دائمی در پایه به همراه ضرورت انجام پژوهش در مواردی از قبیل ارزیابی موشکافانه حالت های آسیب ساختمان های موردنظر، مطالعه مقایسه ای بازدهی کاربرد سازه های فولادی دارای حرکت گهواره ای و سازه های متعارف در ساختمان های واقعی و ... بایستی در دستور کار قرار گیرد.

ایده استفاده از پدیده بر کنش و حرکت گهواره ای در یک نگاه کلی

بررسی رفتار لرزه ای سازه های مقاوم در برابر زلزله بیانگر ایجاد تغییر شکل های غیرارتجاعی و نیروهای قابل توجه (در حد مقاومت نهایی مورد انتظار در مقاطع بحرانی اعضای لرزدبر) در صورت وقوع یک زمین لرزه مخرب می باشد. گذشته از دشواری تامین ظرفیت های مورد نیاز در مقاطع بحرانی سازه، ایجاد تغییر شکل های پسماند و بروز خرابی های پس از زلزله در اعضای اصلی سازه های متعارف و متعاقبا دشواری با ناممکن شدن تعمیرات پس از زلزله از دلایل رویکرد پژوهشگران به پیشنهاد سیستم های نوین مقاوم در برابر زلزله بوده است. در میان سیستم های سازهای نوین متعدد، کاربرد سازه های فولادی مرکزگرا دارای حرکت گهواره ای به دلیل تمرکز آسیب های لرزه ای در اعضای غیر اصلی با امکان قابلیت تعویض ساده به همراه حذف یا کاهش قابل توجه تغییر مکان های جانبی پسماند مورد توجه قرار گرفته است. پیشینه پژوهش های انجام شده در زمینه کاربرد مهندسی حرکت گهواره ای در کاهش بارهای لرزه ای، به دهه هفتاد قرن گذشته میلادی بازمی گردد. از دیدگاه طراحی وجود حساسیت بیشتر در مواردی مانند لنگرهای واژگونی و نیروهای برکنش ناشی از زلزله در سازه ها و پلهای دارای دهانه بلند در سازه های متعارف، مبدا توجه به موضوع بوده است. در این خصوص با بررسی سیستم های سازهای متعارف دارای لنگرهای واژگونی بزرگ ناشی از زلزله مشخص شده بود که نیروهای کششی قابل توجهی در تراز اتصال سازه به فونداسیون این قبیل سازهها ایجاد می گردد. همچنین، با درنظر گرفتن ملاحظات طراحی، تامین ظرفیت کششی مورد نیاز به منظور مهار نیروهای کششی یاد شده توام با صرف هزینه های زیاد و دشواریهای اجرایی قابل ملاحظه تشخیص داده شد. از سوی دیگر، در نقطه مقابل تامین ظرفیت کششی مورد نیاز در محل اتصال روسازه به فونداسیون در سازههای با تکیه گاه ثابت ، ایده امکان استفاده از سازه های آزاد در برابر برکنش که با طراحی و اجرای جزئیات ویژه در کف ستون ها امکان وقوع پدیده برکنش ناشی از حرکت گهواره ای را فراهم می نمایند به عنوان یک گزینه جایگزین مورد توجه قرار گرفت. به این ترتیب با ایجاد یک سازوکار استهلاک انرژی زمین لرزه از طریق وقوع برکنش در پایه و فراهم نمودن سیکل حرکتی برای وسایل مستهلک کننده انرژی، امکان کاهش تقاضای لرزه ای به عنوان یک مشوق جدی در توسعه کاربرد سیستم های سازهای نوین مطرح می گردد.

در مسیر توسعه ایده مورد نظر، انجام پژوهش های اولیه در خصوص مفاهیم و مشخصات سیستم های دارای حرکت گهواره ای در هر دو حیطه مطالعات عددی و تجربی در دستور کار پژوهشگران قرار گرفت [۱]. به عنوان نمونه، شمای قاب فولادی خمشی ۳ طبقه کوچک مقیاس (با مقیاس تقریبی ۱ به ۲) که تحت انجام آزمایش های میز لرزان در دانشگاه برکلی کالیفرنیا [۲] قرار گرفت در شکل (۱) نشان داده شده است. در این آزمایش، تعبیه تکیه گاههای غلتکی در پایه ستونها امکان ایجاد بر کنش و حرکت گهواره ای را برای نمونه آزمایشگاهی فراهم می نمود. شایان ذکر است که نمونه آزمایشگاهی مورد نظر فاقد هرگونه مکانیسم تامین کننده بازگردانندگی (به استثنای وزن خود نمونه) و قطعات مستهلک کننده انرژی بوده است. نتایج

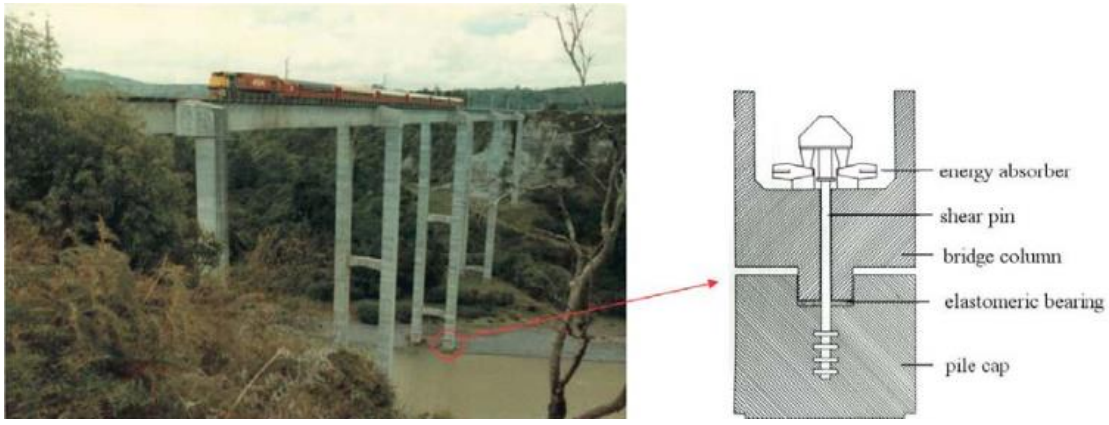
آزمایش در مقایسه پاسخ لرزه ای نمونه مورد نظر با قاب مشابه دیگری که با تکیه گاه ثابت ساخته شده بود، بیانگر کاهش نیروهای اعضای قاب و شتاب طبقات در سازه دارای حرکت گهواره ای بوده است.



(ب) (الف)

شکل۱- آزمایش‌های میز لرزانبر روی قاب فولادی خم شی ۳ طبقه کوچ ک مقیاس در دانشگاه برکلی کالیفرنیا (الف) تصویر نمونه آزمایشگاهی، (ب) نمای جانبی و ابعاد نمونه

نخستین کاربرد عملی و مهندسی سازه های دارای حرکت گهواره ای مرکزگرا به طراحی و ساخت پل راه آهن رانجیتیکی (Rangitikei) در کشور نیوزیلند در سال ۱۹۸۱ میلادی باز می گردد [۵]. پل مورد نظر دارای ۶ دهانه به طول کلی ۳۱۵ متر و پایه هایی به ارتفاع ۷۰ متر بوده که مطابق شکل (۲) در هر پایه دارای دو عضو جاذب انرژی بزرگ می باشد. در این پل اجزای سازه از مقاطع توخالی بتنی پیش تنیده ساخته شده که با توجه به جزئیات پایه نشان داده شده امکان ایجاد حرکت گهواره ای در آن فراهم می شود. خصوصیات مرکزگرایی و بازگردانندگی سیستم توسط وزن خود پل تامین می گردد. با توجه به توضیحات بالا، رفتار سیستم سازه ای پل در عمل به صورت یک پاندول وارونه میباشد.



شکل۲- کاربرد حرکت گهوارهای و و سایل مستهلک کننده انرژی در پایه پل راه آهن رانجیتیکی جنوب

در زمینه امکان کاربرد حرکت گهواره ای در پایه ساختمان پژوهش های متعددی در سالیان اخیر در قالب مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه کاربرد سازه های آزاد در برابر بر کنش به کمک اجرای جزئیات پای ستون مشابه کلید برشی روغن کاری شده به منظور تسهیل حرکت گهواره ای در مطالعات میز لرزان یک نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی ۴ طبقه در مقیاس ۱ به ۹ قابل ذکر می باشد [۲]. همچنین، در خصوص ایده مبتنی بر طراحی کف ستون های جاری شونده در پایه سازه های فولادی به منظور ایجاد آزادی حرکت بر کنش و بررسی رفتار سازه های مورد نظر، مطالعاتی در کشور ژاپن انجام پذیرفت.

در کشور آمریکا نیز سیستم های سازهای دارای حرکت گهواره ای با کاربرد فیوزهای برشی پروانه ای در حالتهای دوگانه [۳] و منفرد مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است فیوزهای برشی یاد شده در حالت دوگانه در فضای مابین دو قاب مجاور یکدیگر و در حالت ساده در پایه ساختمان قرار گرفتند.

لازم به ذکر است که علیرغم تنوع موجود در جزئیات اجرایی و نوع اجزای به کار رفته در سازه های فولادی دارای حرکت گهوارهای پیشنهادی مانند نمونه های ذکر شده در بالا، مفاهیم کلی عملکرد و ساختار در این دسته از سازه ها دارای شباهتهای بنیادین می باشد. از این دیدگاه اجزای اصلی این قبیل سازه ها به شرح ذیل می باشد:

• قاب فولادی آزاد در برابر برکنش . وسایل مستهلک کننده انرژی (فیوز لرزه ای)

• وسایل تامین کننده بازگردانندگی سیستم (مرکزگرایی)

به عنوان نمونه در پژوهش های ذکر شده در بالا، کاربرد کف ستون های جاری شونده و فیوزهای برشی پروانه ای به عنوان وسایل مستهلک کننده انرژی و سیستم های کابلی پیش تنیده و بارهای دائمی ثقلی به وسایل تامین کننده بازگردانندگی سیستم (مرکزگرایی) مورد توجه قرار گرفته است. در بخش های بعدی این فصل توضیحات بیشتری در خصوص وسایل فوق الذکر ارائه می گردد.

وسایل مستهلک کننده انرژی

با عنایت به بروز تغییر شکل های غیرارتجاعی در سازه های متعارف در یک زلزله شدید، ایجاد آسیب های قابل ملاحظه در اعضای اصلی سازه اجتناب ناپذیر است. تجربیات زلزله های پیشین به همراه مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بیانگر بروز رفتار غیرارتجاعی و کمانش در اعضای مهاربندی قاب های فولادی مهاربندی شده هم مرکز، تشکیل مفاصل خمیری برشی در عضو پیوند قاب های فولادی مهاربندی شده برون محور و ایجاد مفاصل خمیری خمشی در تیرها و در پاره ای اوقات ستون های قابهای خمشی فولادی به عنوان نمونه - هایی از سازه های طراحی شده منطبق بر ضوابط آئین نامه های طراحی رایج می باشد.

از سوی دیگر، کاربرد وسایل مستهلک کننده انرژی در سازه های دارای حرکت گهواره ای می توانند در هنگام وقوع یک زلزله شدید موجب تمرکز تغییر شکل های غیرارتجاعی و آسیب ها در این اعضا و باقی ماندن اجزای اصلی سازه در محدوده ارتجاعی گردد. در ادامه، به تعدادی از سیستم های مستهلک کننده انرژی پیشنهادی در مطالعات پیشین اشاره گردیده و متعاقبا در مطالعات آزمایشگاهی رساله حاضر بررسی کاربرد نمونه هایی از آنها جهت تعبیه در سازه های دارای حرکت گهواره ای در دستور کار قرار خواهد گرفت.

- وسایل جاری شونده فلزی

در این وسایل استهلاک انرژی از طریق جاری شدن فلزات و تغییر شکل های غیرارتجاعی آنها در سیکل های بارگذاری مختلف در زمان وقوع زلزله تحقق می پذیرد. در اغلب موارد ذکر شده در مراجع فنی استهلاک انرژی مورد نظر با تشکیل مفاصل خمیری خمشی ناشی از تغییر شکل های عمود بر صفحه در قطعات صفحه ای فیوز لرزه ای طراحی شده انجام می گردد. به عنوان نمونه قطعات فلزی افزاینده میرایی و سختی به سیستم با مکانیسم جاری شدن خمشی به صورت عمود بر صفحه که اختصارا ADAS نامیده می شود و تاثیر آنها بر رفتار لرزهای سازه ها به طور مکرر مورد مطالعه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است که تعدادی از پژوهش های مربوطه در قسمت مراجع ارائه گردیده است [۴]. به طور مشابه قطعات فلزی مثلثی شکل افزاینده میرایی و سختی با نام اختصاری TADAS نیز با دارا بودن مکانیسم جاری شدن خمشی در سازه های فولادی مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. همچنین، در مراجع فنی یک سیستم حلقه فولادی شکل پذیر با توانایی استهلاک انرژی ناشی از جاری شدن تحت اثر لنگرهای خمشی ارائه گردیده است.

در خصوص مکانیسمهای جاری شدن فلزات تحت اثر تغییر شکل های درون صفحه ای نیز مطالعات متعددی انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه پژوهش های انجام یافته در مورد کاربرد قطعات پانل برشی جاری شونده و یا YSPD قابل ذکر است [۶]. همچنین، پیشنهاداتی در خصوص ایجاد شکاف در صفحات فولادی به منظور حصول رفتار چرخهای مناسب توسط پژوهشگران

پیشین پیشنهاد گردیده است [۷]. در واقع صفحه فولادی اولیه با ایجاد این شکاف ها به مجموعه ای از اعضای پیوندی موازی با هم تبدیل می گردد که با عنایت به مقادیر کوچکتر نسبت عرض به ضخامت در مقایسه با صفحه اصلی از شرایط فشردگی مناسب تری برخوردار می باشند که به نوبه خود در افزایش ظرفیت کمانش برشی صفحه موثر خواهد بود.

در سیستم های پیشنهادی برای صفحات شکافدار فولادی نسبتا ضخیم (با نسبت عرض به ضخامت اعضای پیوندی در محدوده ۱ تا ۲) نمونه های مورد نظر دارای چرخههای هیسترزیس پایدار تا کرنش های برشی به بزرگی ۱۰٪ تا ۲۰٪ بوده اند [۸]. در مورد کاربرد صفحات فولادی نازکتر (با نسبت عرض به ضخامت اعضای پیوندی در حدود ۱۰) کرنش های برشی به بزرگی ۵/۲ ٪ پیش از رخداد کمانش گزارش گردیده است. به منظور بهبود رفتار چرخهای درون صفحه ای وسایل جاری شونده فوق الذکر، پیشنهاداتی در خصوص استفاده از بازشوهای لانه زنبوری به جای شکافهای ساده در صفحات فولادی ارائه شد که عملا موجب باقی ماندن صفحات پیوندی پروانه ای شکل در صفحات فولادی می گردد. شایان ذکر است که این آرایش به دلیل انطباق بیشتر هندسه صفحات پیوندی با دیاگرام لنگر خمشی موجب توزیع به مراتب یکنواختتر جاری شدن در سرتاسر طول اعضای پیوندی می گردد. براساس گزارشهای آزمایشگاهی با انتخاب نسبتهای مناسب عرض به ضخامت در این سیستم امکان حصول کرنش های برشی به بزرگی ۳۰٪ قبل از بروز هرگونه کاهندگی در رفتار چرخهای قطعه فراهم گردید [۸].

در ادامه، پژوهش های نوین به منظور بررسی دقیق و جامع فیوزهای با اعضای پیوندی پروانه ای با آرایشهای متنوع انجام پذیرفت که کاربرد آنها در سازه های دارای حرکت گهواره ای در مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد توجه محققین پیشین قرار گرفت. شایان ذکر است که علاوه بر میراگرهای جاری شونده ذکر شده در بالا، کاربرد سایر مکانیسم های تسلیم مانند ساز و کارهای جاری شدن محوری و پیچشی نیز مورد توجه بوده است که گزارشهای آنها در مراجع مربوطه موجود می باشد. در عین حال کاربرد این مکانیسمهای جاری شدن در مقایسه با سازوکارهای برشی و خمشی در موارد محدودتری محقق گردیده است.

- وسایل مستهلک کننده اصطکاکی

ایده اصلی در سیستم های اصطکاکی استهلاک انرژی از طریق مکانیسم اصطکاک لغزشی می باشد که قدمت کاربرد آن در اتصالات فولادی به حدود سه دهه قبل باز می گردد. در طی این مدت میراگرهای اصطکاکی متعددی توسط پژوهشگران مختلف به منظور استفاده در قاب های فولادی پیشنهاد گردید. به عنوان نمونه کاربرد سیستم میراگر اصطکاکی پال در محل تقاطع اعضای مهاربندی ضربدری قاب فولادی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، میراگر اصطکاکی در پروژه های عملی مانند کنترل سازه ادارات مرکزی آژانس فضایی کانادا مورد استفاده قرار گرفته است. در سالهای اخیر یک مدل اصلاح شده برای میراگر اصطکاکی پال پیشنهاد گردید که ضمن برخوداری از قابلیت استهلاک انرژی مشابه با نمونه اصلی سهولت بیشتری را در ساخت و نصب میراگر فراهم می نمایند [۹].

همچنین، یک میراگر اصطکاکی دارای جدار استوانه ای و بالشتکهای لغزنده داخلی توسط صنایع فلزی سومیتومو در ژاپن عرضه گردید که عملکرد آن طی مطالعات آزمایشگاهی مقایسه ای میان سیستم های استهلاک انرژی در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلی مورد بررسی قرار گرفت [۱۰].

- وسایل مستهلک کننده ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک

برخلاف میراگرهای جاری شونده فلزی و اصطکاکی که سیستم های وابسته به تغییر مکان می باشند، میراگرهای ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک در زمره سازوکارهای وابسته به سرعت قرار می گیرند. میراگرهای ویسکوز مایع شامل یک پیستون سوراخدار بوده که درون سیلندری حاوی مایع تحت فشار قرار می گیرد که بر اثر عبور مایع از سوراخ پیستون استهلاک انرژی محقق می گردد. در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده تاثیر میراگرهای ویسکوز مایع مانند نمونه نشان داده شده است. همچنین، یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص کاربرد میراگرهای ویسکوز مایع در سازه های فولادی دارای حرکت گهواره ای توسط ترمبلی و همکاران انجام پذیرفته است [۱۱]. نتایج به دست آمده از مطالعات میز لرزان بیانگر کاهش تقاضای لرزه ای در نیروی بر کنش پای ستون و برش پایه سیستم پیششنهادی در مقایسه با سازه متعارف متناظر بوده است.

وسایل تامین کننده بازگردانندگی سیستم (مرکزگرایی)
یکی دیگر از اجزای اساسی قاب های فولادی دارای حرکت گهواره ای وسایل تامین کننده بازگردانندگی سیستم مرکزگرایی) می باشند که علاوه بر اینکه تامین کننده سختی و پایداری سیستم هستند عملا پس از پایان زلزله نیز نقش تعیین کننده ای در غلبه بر نیروی پسماند فیوز به منظور بازگرداندن سیستم به وضعیت تعادلی اولیه بر عهده دارند. بررسی پژوهش های انجام یافته در خصوص ساختمان های فولادی دارای حرکت گهواره ای، بیانگر این موضوع است که در نمونه های متناظر با ساختمان های واقعی منابع دیگر تامین بازگردانندگی سیستم مورد نیاز می باشد که به عنوان نمونه کاربرد کابل های پس کشیده در این رابطه قابل ذکر است [۱۲].

۲- ادبیات تحقیق

توصیف مدل‌های عددی مورد استفاده در مطالعه رفتار لرزه ای سازه های نوین و متعارف
مطالعات عددی این قسمت براساس شبیه سازی های انجام شده در نرم افزار OpenSees به منظور بررسی سازه های موردنظر ارائه گردیده است. برای شبیه سازی قاب فولادی شورون و سیستم دارای حرکت گهواره ای از مدل های عددی ۲ بعدی استفاده شده است. برای این منظور در هر کدام از حالت های آنالیز یک عدد از سیستم های لرزه بر ساختمان به همراه مقادیر متناظر جرمهای لرزه ای طبقات و بارهای ثقلی اعمالی بر سازه شبیه سازی می گردد. همچنین، به منظور در نظر گرفتن اثرات P-Delta در رفتار سازه ناشی از تاثیر بارهای قائم سیستم باربر ثقلی ساختمان در هنگام ایجاد جابجایی های جانبی نسبت به افزودن ستون های کج شونده به مدل های مربوطه اقدام گردیده است. پس از اعمال بارهای ثقلی، سازه های مورد نظر تحت تاثیر تحریک پایه ناشی از رکوردهای زلزله قرار می گیرند که نتایج حاصله طی یک آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی در قسمت های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.
به منظور شبیه سازی اعضای قاب، از المان های تیر ستون غیرخطی با فرمولاسیون بر پایه نیرو ومقاطع فایبر با انتخاب مدل رفتاری گیوفره منگتو پینتو برای فولاد در نرم افزار OpenSees استفاده شده است. لازم به ذکر است که اگرچه امکان کاربرد مدل های عددی پیچیده تر در نرم افزارهای چندمنظوره مانند ABAQUS با دسترسی به مدل های رفتاری با تنوع بیشتر فراهم می باشد، در عین حال استفاده از این مدل ها با هزینه های محاسباتی بیشتری همراه می باشد. در پژوهش حاضر، با عنایت به اهمیت بازدهی محاسباتی مدل های عددی در انجام آنالیزهای تاریخچه زمانی متعدد از یک سو و کفایت دقت مدل های ساده تر در برآورد رفتار کلی سازه های موردنظر (که در بخش ۴۲ مورد اشاره واقع خواهد شد) استفاده از آنها در دستور کار قرار گرفت. به منظور شبیه سازی رفتار پس کمانشی اعضا، هریک از مهاربندهای قاب به ۱۰ قسمت برابر تقسیم گردیده و ضمن جابجایی موقعیت هندسی گرههای حاصله در امتداد عمود بر محور عضو، میزان نقص اولیه در وسط دهانه برابر L/۱۰۰۰ انتخاب شده است که پارامتر L بیانگر طول عضو می باشد.

صحت سنجی و ارزیابی دقت مدلها

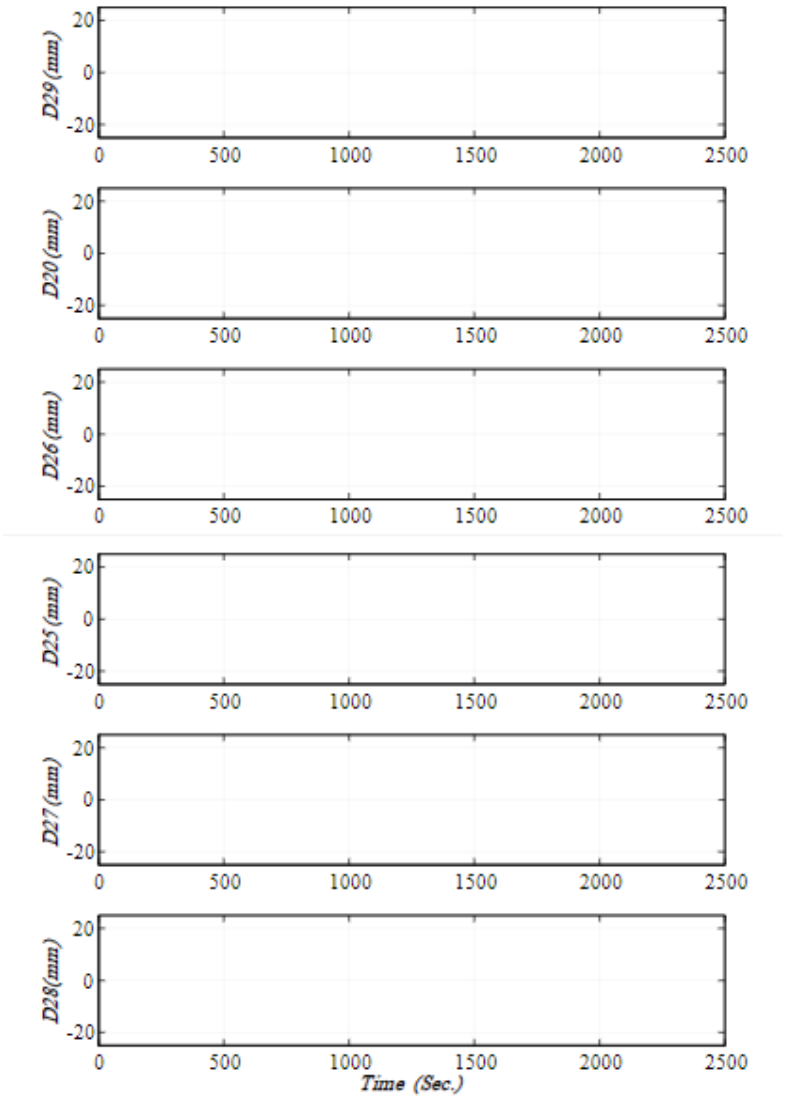
در پژوهش حاضر در راستای صحت سنجی و ارزیابی دقت مدلهای محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی رفتار لرزه ای قاب های فولادی متعارف و نوین دارای حرکت گهواره ای در سطوح اجزا و سیستم، تلاش زیادی به عمل آمده است. به این منظور پس از به کار گیری مدل های عددی در تعدادی از مطالعات تجربی پیشین [۷]، انطباق خوبی میان نتایج برآورد شده توسط مدل عددی با داده های آزمایشگاهی مشاهده می گردد. بست مورد نظر یک لوله فولادی به طول ۱۱۸/۱۴ اینچ، قطر خارجی ۴ اینچ و ضخامت ۰/۳ اینچ بوده است که دارای شرایط انتهایی مفصلی بوده است و در نتیجه لاغری عضو مورد نظر برابر ۸۰ بوده است. مقاومت جاری شدن عضو برابر ۲۴ کیلو پاوند بر اینچ مربع گزارش گردیده بود. شایان ذکر است که نسبت قطر به ضخامت سطح مقطع عضو برابر ۴/۱۳ بوده است که از مقدار حدی مقاطع فشرده به مراتب کمتر می باشد و در نتیجه نیازی به شبیه سازی پدیده کمانش موضعی در مدل عددی نمی باشد. در ادامه، مدل های عددی شامل شبیه سازی بست فشاری به کمک مواد فولادی با تنش جاری شدن مورد نظر و رفتار سخت شوندگی سینماتیک با ضریب ۰/۳ مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین، عضو مورد نظر به ۱۰ قسمت برابر تقسیم گردید و با اعمال نقص اولیه به وسیله جابجایی گردهای المان ها در راستای عمود بر محور عضو، شبیه سازی رفتار پس کمانشی بست در دستور کار قرار گرفت.

حداکثر مقادیر طول و عرض نمونه قابل آزمایش در این دستگاه برابر ۱۶۰۰ و ۷۰۰ میلیمتر می باشد. حلقه فولادی مورد نظر جهت انجام آزمایش مقدماتی از طریق جدا نمودن یک قطعه به طول ۷۵ میلیمتر از لوله فولادی به قطر خارجی۱/۷۶ میلیمتر و ضخامت جدار ۵ میلیمتر و اتصال به صفحات فولادی به ضخامت ۲۰ میلیمتر در بالا و پایین ایجاد می شود. در آزمایش های مربوط به قاب فولادی مرکزگرا دارای حرکت گهواره ای با کاربرد حلقه فولادی و لنت ترمز به عنوان فیوز لرزه ای، میله های فولادی از جنسMo40 به قطر ۱۲ میلیمتر مورد استفاده قرار می گیرند و در آزمایش کف ستون متغیر کاربرد میله های فولادی از جنسccn100 به قطر ۱۰ میلیمتر در دستور کار قرار می گیرد. در مطالعات آزمایشگاهی پژوهش حاضر نمونه قاب فولادی دارای حرکت گهوارهای ابتدا بر روی سه عدد تیر پایه از پروفیل IPB220 نصب گردیده که در نهایت این تیرهای پایه به تیرورق پایه قاب عکس العمل متصل می- گردند. لازم به ذکر است که به منظور ایجاد فضای کافی برای نصب المان های فیوز و میله های فولادی در طرفین نمونه آزمایشگاهی از یک سو و امکان تعبیه تکیه گاههای هدایت کننده در محل پایه ستون های دارای برکنش به منظور جلوگیری از هرگونه جابجایی عمود بر صفحه در پای ستون ها از سوی دیگر، ورق های پوششی به عرض ۵۰۰ میلیمتر و ضخامت ۲۰ میلیمتر بر روی بالهای بالایی تیرهای پایه جوشکاری می گردند. در آزمایش حاضر، ورق اتصال به جک نمونه آزمایشگاهی در فاصله ۱۷۹۰ میلیمتری از ستون سمت چپ قاب عکس العمل قرار می گیرد که این فاصله تابعی از طول و کورس جابجایی اکچوایتور انتخابی برای انجام آزمایش چرخهای بر روی نمونه آزمایشگاهی می باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش با درنظر گرفتن مقاومت مورد انتظار نمونه آزمایشگاهی از اکچوایتور دارای ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن استفاده می شود. حداکثر طول حرکت رفت و برگشتی در این اکچوایتور برابر ۳۰۰ میلی متر و حداکثر فرکانس اعمال نیرو ۱۰ هرتز است. روی هر اکچویتور یک سنسور موقعیت ، یک نیروسنج و یک سرو ولو نصب شده است. هر اکچویتور توسط یک کنترل کننده PIDبه نام کنترل کننده K7500 (با توانایی اعمال شکل موجهای سینوسی، مربعی و ذوزنقه ای در دو حالت کنترل جابجایی و کنترل نیرو) به اکچویتور کنترل می شود.

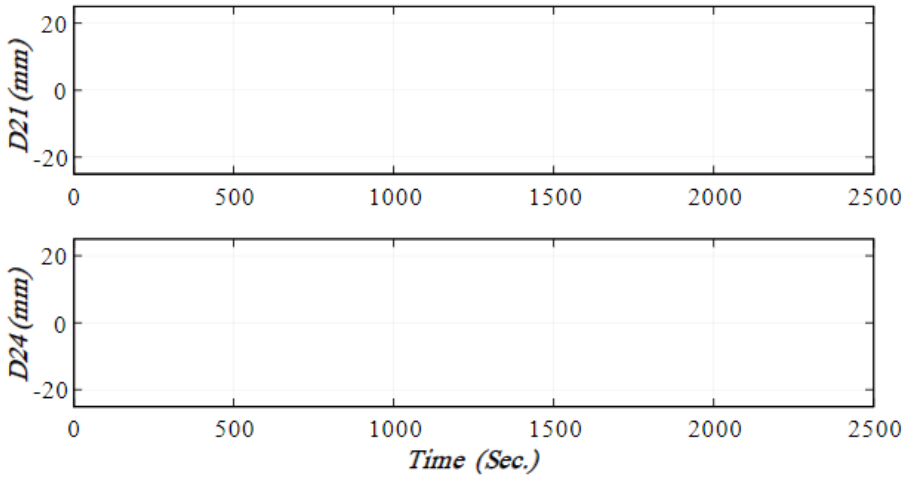
۳- یافته‌ها

نمودار مقادیر ثبت شده برای جابجایی نقاط کنترلی آزمایش چرخهای نمونه آزمایشگاهی قاب فولادی دارای حرکت گهواره ای با کاربرد فیوز حلقه ای در شکل (۱) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که نتایج ثبت شده توسط تعدادی از جابجایی سنجها به علت لغزش پایه آنها دارای خطا می باشد. به علاوه در هنگام وقوع برکنش به دلیل مایل شدن نمونه آزمایشگاهی مقداری خطا در قرائتهای جابجایی سنجها ایجاد می گردد. با در نظر گرفتن این موضوع و اختلاف نسبتا کوچک مقادیر اندازه گیری شده توسط جابجایی سنجها با مقادیر محاسبه شده بر اساس جابجایی های اکچوایتور در حالت هایی که لغزش پایه رخ نداده است، دقت اندازه گیری قابل قبول تلقی می گردد.



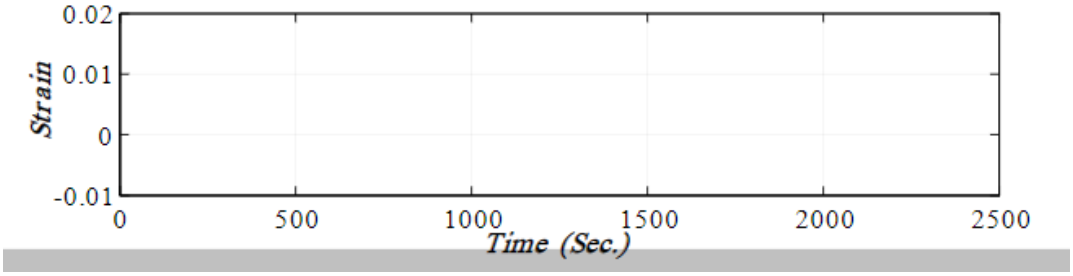
شکل ۳- مقادیر ثبت شده برای جابجایی نقاط کنترلی درآزمایش چرخهای نمونه آزمایشگاهی قاب فولادی دارای حرک ت گهوارهای با کارب رد فیوز حلقهایدر قاب عکس العمل (آزمایش اول)

لازم به ذکر است که در آزمایش های پژوهش حاضر علاوه بر ثبت مقادیر جابجایی نقاط کنترلی، تعداد ۲ عدد جابجایی سنج اضافی نیز (با نامهای D21 و D24 در این آزمایش) به منظور اندازه گیری جابجایی افقی لغزشی پایه ستونها نصب می گردد که نتایج جابجایی ثبت شده توسط آنها در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می شود مقادیر بسیار کوچک لغزش ثبت شده توسط جابجایی سنجهای فوق الذکر بیانگر غالب بودن مود حرکت گهواره ای در جابجایی های جانبی سازه و در نتیجه قابل قبول بودن فرضیات اولیه مدلسازیهای عددی در صرفنظرنمودن از تاثیر لغزش در جابجایی های سیستم می‌باشد.



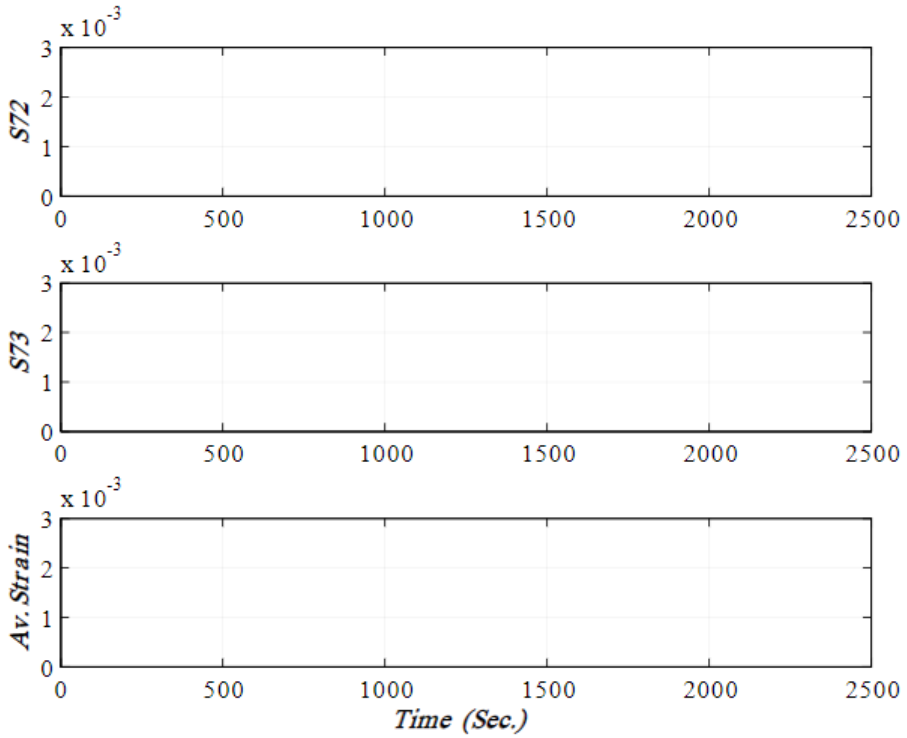
شکل ۴- مقادیرثبت شده توسط جابجاییسنجهای نصب شده برای اندازهگیری جابجایی لغزشی پای ستون در آزمایش چرخهای نمونه آزمایشگاهی قاب فولادی دارای حرکت گهواره ای با کاربرد فیوز حلقه ای در قاب عکس العمل (آزمایش اول)

نمودار زمانی مقادیر ثبت شده برای کرنش های نقاط مورد نظر بر روی حلقه فولادی در شکل (۴) نشان داده شده است که با عنایت به مقادیر بزرگ برای کرنش ها در مقایسه با کرنش حد جاری شدن و تجمع کرنش های خمیری بروز رفتار غیرارتجاعی قابل توجه در فیوز لرزه ای مشاهده می گردد. از طرف دیگر با عنایت به کوچکتر بودن مقادیر کرنش های ثبت شده در مقایسه با کرنش حد گسیختگی، عدم وقوع گسیختگی حلقه توجیه می شود.



شکل ۵- کرنش های ثبت شده برای نقاط مورد نظر در حلقه فولادی (آزمایش اول)

در ادامه، کرنش های ثبت شده در میله های فولادی پس کشیده در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که در ابتدای این بخش تشریح گردید با عنایت به موقعیت نصب کرنش سنجها بر روی قسمت های میانی آنها و خارج از ناحیه رزوه شده و با فاصله قابل قبول از این قسمت ها، در عمل رفتار میله های فولادی در خارج از محل رزوه ها مورد بررسی قرار میگیرد.



شکل ۶- کرنش های ثبت شده در میله های فولادی پس کشیده (حلقه فولادی - آزمایش اول)

همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می شود مقادیر ثبت شده برای کرنش های میله های فولادی بسیار نزدیک به هم می باشد اما این مقادیر دقیقا یکسان نمی باشند. تنظیم میزان تنش اولیه پس کشیدگی در میله های فولادی در لحظه آغاز آزمایش به وسیله قرائت های این کرنش سنجها انجام می شود که در آزمایش حاضر میزان کرنش های اولیه میله های فولادی برابر ۰/۰۰۰۷۱۴ و ۰/۰۰۰۷۳۱ بوده است. در واقع ایجاد کرنش اولیه مورد نظر به صورت دقیق و کاملا یکسان در هر دو میله فولادی امکانپذیر نمی باشد زیرا با سفت نمودن مهره هرکدام از میله ها مقدار کرنش در میله دیگر نیز تغییر خواهد کرد. در نتیجه تنظیم مهر دهای مربوطه به منظور ایجاد کرنش هدف در میله های فولادی در یک فرایند سعی و خطا (تا زمانیکه اختلاف کرنش در هر دو میله فولادی با کرنش هدف با قضاوت مهندسی قابل قبول تلقی گردد) ادامه می یابد. همچنین، مقادیر کرنش های ثبت شده برای میله - های فولادی در طول آزمایش به صورت مداوم تحت پایش قرار می گیرند که اختلاف زیادی با هم نداشته باشند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی، رفتار چرخهای نمونه های آزمایشگاهی دارای حرکت گهواره ای با کاربرد حلقه فولادی از دیدگاه خصوصیات مرکزگرایی مناسب ارزیابی گردید. همچنین در مورد تداوم سیکلهای بارگذاری با عنایت به بروز گسیختگی زود هنگام در قسمتهای رزوه شده در آزمایش مربوط به فیوز حلقه ای، با اصلاح دتایل و افزایش تعداد مهرها امکان به تعویق انداختن این گسیختگی در آزمایشهای بعدی فراهم گردید. بر اساس منحنی هیسترزیس به دست آمده، میزان دوران صلب بیشینه به دست آمده در آزمایش چرخه ای قاب فولادی دارای حرکت گهوارهای پس از اصلاح جزئیات مورد استفاده در قسمت رزوه شده میله های فولادی در حدود ۱/۷٪ بوده است.

۵- منابع

[1] Kelly, JM. and Tsztoo, D. (1977). Earthquake simulation testing of a stepping frame with energy-absorbing devices. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

[2] Clough, RW. and Huckelbridge, AA. (1977). Preliminary experimental study of seismic uplift of a steel frame. Report No. UCB/EERC-77/22, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

[3] Huckelbridge, AA. (1977). Earthquake simulation tests of a nine story steel frame with columns allowed to uplift. Report No. UCB/EERC-77/23, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

[4] Yim, CS., Chopra, AK. and Penzien, J. (1980). Rocking response of rigid blocks to earthquakes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 8(6): 565-587.

[5] Cormack, LG. (1988). The design and construction of the major bridges on the Mangaweka rail deviation. Transaction of the Institute of Professional Engineers of New Zealand, 15(1): 16-23.

[6] Rutenberg, A., Jennings, PC. and Housner, GW. (1982). The response of Veterans Hospital building 41 in the San Fernando earthquake. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10(3): 359-379.

[7] Hayashi, Y., Tamura, K., Mori, M. and Takahashi, I. (1999). Simulation analyses of buildings damaged in the 1995 Kobe, Japan, earthquake considering soil-structure interaction. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28(4): 371-391.

[8] Wada, A., Yamada, S., Fukuta, O. and Tanigawa, M. (2001). Passive controlled slender structures having special devises at column connections. 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures (pp. 2-5): Assisi, Italy.

[9] Iwashita, K., Kimura, H., Kasuga, Y. and Suzuki, N. (2002). Shaking table test of a steel frame allowing uplift. Journal of Structural and Construction Engineering (561): 47-54.

[10] Azuhata, T., Midorikawa, M., Ishihara, T. and Wada, A. (2004). Simplified prediction method for seismic response of rocking structural systems with yielding base plates. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp.): Vancouver, B.C., Canada.

[11] Midorikawa, M., Azuhata, T., Ishihara, T. and Wada, A. (2006). Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 35(14): 1767-1785.

[12] Midorikawa, M., Toyomaki, S., Hori, H., Asari, T., Azuhata, T. and Ishihara, T. (2008). Seismic response of six-story eccentrically braced steel frames with columns partially allowed to uplift. Paper No. ST17-03-006. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (pp.): Beijing, China.