




Performance of precast concrete walls with friction bolted connectors

Fasehullah Farahmand^{1✉} , Mohammad Qasim Panahy² , Jalil Nowrozi³ 

1. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. (Corresponding Author) Email: fasehullah.farahmand@gmail.com
2. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan.
3. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibn Sina University, Kabul, Afghanistan.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 22/01/2026
Received in revised form: 21/02/2026
Accepted: 12/03/2026
Available online: 19/03/2026

Keywords:

Prefabricated, concrete wall, seismic performance, friction connector, cyclic loading, energy dissipation

ABSTRACT

To evaluate the performance of prefabricated concrete walls with friction bolted connectors, static (cyclic) and dynamic (time history) analyses were conducted on four one-story models, four two-story models with simple arrangement, and four two-story models with zigzag arrangement. One-story models have one, two, three, and four panels, respectively. Two-story models with simple arrangement have one, two, three, and four panels per story, respectively. Two-story models with zigzag arrangement have two, four, six, and eight panels per story, respectively. The total effective width of panels is the same in all one-story models and also in all two-story models. To enhance energy dissipation and ductility, these panels are connected to each other by friction bolted connectors, and self-centering is achieved by post-tensioning elements (two elements embedded in each panel), with the total cross-sectional area of post-tensioning elements being the same in all models. Seismic performance, hysteresis curves, lateral stiffness, energy dissipation, lateral displacement, permanent lateral displacement, and damage were evaluated and compared. The results show that as panel width decreases (or the number of panels increases), lateral displacement and energy increase, while lateral stiffness, permanent lateral displacement, and damage decrease. In other words, increasing the number of panels (and thus the number of friction bolted connectors) increases the ductility of the models.

Cite this article: Farahmand, F. Panahy, M. & Nowrozi, J (2026). Performance of precast concrete walls with friction bolted connectors, *Kateb Scientific-Research Journal of Technology and Engineering*, 1 (1), 25-43.



عملکرد دیوارهای کانکریتی پیش ساخته با اتصالات

پیچ ومهرهای اصطکاکی

فصیح الله فرهمند^۱ ، محمد قاسم پناهی^۲ ، جلیل نوروزی^۳ 

۱. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. (نویسنده مسئول)

ایمیل: fasehullah.farahmand@gmail.com

۲. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان.

۳. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون ابن سینا، کابل، افغانستان.

چکیده

اطلاعات مقاله

بهنظور بررسی عملکرد دیوارهای بتنی پیش ساخته با اتصالات پیچ ومهرهای اصطکاکی، تحلیل های استاتیکی (چرخه ای) و دینامیکی (تاریخچه زمانی) بر روی چهار مدل یک طبقه، چهار مدل دوطبقه با آرایش ساده و چهار مدل دوطبقه با آرایش زیگزاگ انجام شد. مدل های یک طبقه به ترتیب دارای یک پانل، دو پانل، سه پانل و چهار پانل هستند. مدل های دوطبقه با آرایش ساده در هر طبقه به ترتیب دارای یک پانل، دو پانل، سه پانل و چهار پانل می باشند. مدل های دوطبقه با آرایش زیگزاگ در هر طبقه به ترتیب دارای دو پانل، چهار پانل، شش پانل و هشت پانل هستند. مجموع عرض مؤثر پانل ها در همه مدل های یک طبقه با یکدیگر و در مدل های دوطبقه با یکدیگر برابر است. برای افزایش جذب انرژی و شکل پذیری، این پانل ها توسط اتصال دهنده های اصطکاکی به یکدیگر متصل شده اند و خودمحموری آن ها توسط المان های پس تنیده تأمین می شود؛ در هر پانل دو عدد المان پس تنیده تعبیه شده است و مجموع سطح مقطع پس تنیده ها در همه مدل ها نیز با یکدیگر برابر می باشد.

عملکرد لرزه ای، مشخصات هیستریزس، سختی جانبی، اتلاف انرژی، تغییر مکان جانبی، تغییر مکان جانبی ماندگار و خسارت وارده به این مدل ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده آن است که با کاهش عرض پانل ها یا افزایش تعداد آن ها، تغییر مکان جانبی و انرژی افزایش می یابد؛ سختی، تغییر مکان جانبی ماندگار و خسارت وارده به مدل ها کاهش می یابد. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد پانل ها (یا افزایش تعداد اتصال دهنده های اصطکاکی)، شکل پذیری مدل ها افزایش می یابد.

نوع مقاله:

مقاله تحقیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

واژه های کلیدی:

پیش ساخته، دیوار بتنی، عملکرد لرزه ای، اتصالات اصطکاکی، بارهای چرخه ای، اتلاف انرژی

استاد: فرهمند، فصیح الله، پناهی، محمد قاسم و نوروزی، جلیل (۱۴۰۴). عملکرد دیوارهای کانکریتی پیش ساخته با اتصالات

پیچ ومهرهای اصطکاکی. مجله علمی - تحقیقی تکنالوژی و انجینیری کاتب، ۱ (۱)، ۲۵-۴۳.



مقدمه

امروزه به منظور مدرن شدن و ارج گذاری به صنعتی سازی ساخت و ساز، صنعت پیش ساختگی بتن مورد توجه مهندسان و سرمایه گذاران قرار گرفته است که از مزایای بی شماری نیز برخوردار می باشد. در این صنعت، اجزای سازه به صورت قطعات متفاوت (از قبیل تیر، ستون و پانل های دیواری) با اندازه های تعیین شده در کارخانه ها ساخته شده و پس از انتقال به محل نصب می شوند. بزرگترین چالش در این صنعت، شکل پذیر نبودن اجزا و نحوه اتصال قطعات پیش ساخته می باشد. اتصالات قطعات از حساسیت های ویژه ای برخوردار بوده و در شکل پذیری سازه نیز نقش گسترده ای دارد. برای کم رنگ کردن این چالش های بتن های پیش ساخته، روش های متفاوتی وجود دارد. یکی از راه های افزایش شکل پذیری، استفاده از اتصال دهنده های اصطکاکی می باشد. احداث دیوار برشی بتنی پیش ساخته یکی از راه های مهار بارهای جانبی به شمار می رود که به صورت گسترده در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می گیرد. پانل های دیواری پیش ساخته به طور معمول از سختی زیادی برخوردار بوده که باعث کاهش شکل پذیری و منجر به خسارت هنگفتی به سازه می شود. به منظور کاهش سختی و افزایش قابلیت شکل پذیری پانل های دیواری بتنی پیش ساخته، روش های متفاوتی وجود داشته که تحقیقگران به بررسی آن ها پرداخته اند.

۱. پیشینه تحقیق

مارشال لیو و همکاران (۲۰۱۰)، در مورد خرابی سازه هایی که در آن مهار بارهای جانبی به روش های سنتی انجام شده و تحت زمین لرزه های بزرگ قرار گرفته، تحقیق کردند. نتیجه نشان دهنده آن بود که پس از زمین لرزه های بزرگ، در این سازه ها تغییر شکل های قابل چشم گیری باقی می ماند که منجر به هزینه های زیادی برای ترمیم مجدد آن می گردد. برای مبارزه با این مشکل و بالا بردن انعطاف پذیری لرزه ای سازه ها، سیستم دیوار بتنی با استفاده از المان پس تنیده را مورد توجه قرار دادند که در آن پنل های دیواری پیش ساخته به طور معمول روی هم قرار می گیرند و برای به دست آوردن قابلیت خودمحوری از المان های پس تنیده استفاده کردند [۱، ۲].

انقی گوا و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیقی تحت عنوان «مطالعه آزمایشگاهی، تحلیل پارامتریک و عملکرد لرزه ای دیوار برشی مسلح بتنی خودمحور ترکیبی» بیان داشتند که برای بهبود قابلیت اتلاف انرژی دیوارهای خودمحور، می توان از میراگرهای گوناگون استفاده کرد. به منظور بررسی عملکرد سیستم یاد شده، این تحقیقگران آزمایش بارگذاری چرخه ای را با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام دادند و نتایج آن را با سیستم متعارف مقایسه کردند. نتایج آزمایش نشان دهنده آن بود که این سیستم دارای توانایی تمرکز مجدد و تغییر شکل بهتر می باشد. نتایج تحلیل پارامتریک نشان دهنده آن بود که مؤثرترین روش برای بهبود بخشیدن به قابلیت اتلاف انرژی این سیستم، افزایش سطح مقطع فولاد نرم (mild steel) می باشد. همچنین نتایج تحلیل پارامتریک نشانگر آن بود که ظرفیت مجاز دریافت به طور چشم گیری می تواند توسط افزایش نسبت ابعاد دیوارها بهبود یابد [۳، ۴].

تانگوا و همکاران (۲۰۱۸) روی عملکرد سیستم دیوارهای بتنی پیش ساخته خودمحور که توسط اتصال دهنده های اصطکاکی به یکدیگر متصل شده بودند، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی انجام دادند. این

تحقیقگران پس از انجام ۹ آزمایش روی این سیستم دیواری و اتصالات آن دریافتند که ساختار اصلی و سازه‌ای تا حد اکثر دریافت ۲۰۹۸٪ به حالت ارتجاعی باقی می‌ماند، گرچه ترک خوردگی در برخی از پوشش اتصالات پس از چند سیکل بارگذاری دیده شده بود [۵].

ک.م. تویگدین و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی تحت عنوان «پاسخ آزمایشگاهی و طراحی اتصالات بیضوی شکل برای سیستم دیوارهای تحت حرکت لرزه‌ای»، عملکرد اتصالات بیضوی شکل را بررسی کرده و آزمایش بارهای چرخه‌ای را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که فرایند جوشکاری مورد استفاده در این اتصال دهنده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر نوع خرابی یا شکست و شکل‌پذیری دیوارها دارد [۶].

واغی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با مطالعه در مورد سیستم سازه‌های صنعتی دریافتند که این سیستم برای به حداقل رساندن زمان اجرا و هزینه اجرای پروژه‌ها بسیار مؤثر می‌باشد. در نتیجه، اطمینان از اتصالات این‌گونه سیستم‌ها شرط اساسی است که باعث مطمئن شدن از پایداری سازه در برابر بارهای جانبی می‌گردد، اگرچه هنوز هم دانش درباره اتصالات و جزئیات این سیستم‌ها بسیار زیاد وجود ندارد. به این دلیل، آن‌ها روش ویژه‌ای برای اتصال دیوار به دیوار به منظور مقابله با بارهای دینامیکی پیشنهاد کردند. این سیستم برای متصل کردن دو پنل دیواری، از دو کانال فلزی U شکل استفاده می‌کند [۷].

یانگ لیو و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقی را تحت عنوان «مطالعه آزمایشگاهی ستون دارای حالت ارتجاعی همراه با فولادهای قابل جابجایی دارای شیار» انجام دادند. این سیستم شامل یک ستون فلزی بود که توسط میراگرهای قابل تعویض به پی متصل شده بود. شش آزمایش را برای بررسی عملکرد ستون‌های ارتجاعی انجام دادند. این تحقیقگران در این تحقیق، مکانیزم انتقال بار، ارائه نتایج آزمایشگاهی و پیشنهاد روش ساده‌شده برای محاسبه ظرفیت انتقال بار جانبی را ارائه نمودند. آن‌ها به این باور رسیدند که متغیرهای اصلی، ضخامت میراگر فولادی، نسبت بارهای فشاری محوری و نسبت ضخامت دیوار می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان داد که ستون دارای حالت ارتجاعی دارای مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و رفتار هیستریتیک پایدار و رضایت‌بخش بوده است [۸].

یینگ ژوا و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقاتی را با عنوان «تحلیل شکست ترد دیوارهای برشی بتنی پیش‌ساخته و طراحی پس‌تنیده‌های متفاوت و اتلاف انرژی» انجام دادند. در این تحقیق، تأثیر انواع گوناگون پس‌تنیده‌ها و طراحی المان‌های اتلاف انرژی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده آن بود که طراحی و تعبیه المان‌های اتلاف انرژی، تأثیر بیشتری نسبت به طراحی پس‌تنیده‌ها در شکست و شکل‌پذیری دیوارها دارد [۹، ۱۰].

در این تحقیق، برای دستیابی به سیستم پانل‌های دیواری پیش‌ساخته بتنی با قابلیت شکل‌پذیری بالا، اقدام به کوچک کردن ابعاد پانل و افزایش تعداد آن‌ها نمودیم و پانل‌های کوچک را با اتصال دهنده‌های اصطکاکی به یکدیگر متصل کرده و مورد مقایسه قرار دادیم. خودمحوری این سیستم‌ها با استفاده از المان‌های پس‌تنیده چسبنده تأمین شده است [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸].

۲. روش انجام تحقیق

به منظور دست یابی به نتایج کامل و جامع، دو روش برای انجام تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است: تحلیل استاتیکی (سیکلک) و تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی). برای انجام تحلیل‌ها از نرم افزار آباکوس (Abaqus CAE) استفاده شده است.

۲_۱. تحلیل استاتیک چرخه‌ای (Cyclic)

این تحلیل با استفاده از معیارهای بارگذاری چرخه‌ای بر پایه (زمان-دریافت بام) و مبتنی بر شکل ۴ انجام و به مدل‌ها اعمال شده است.

۲_۲. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی (Time History)

در این تحقیق، افزون بر تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی نیز انجام شده است. تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی) با استفاده از سه رکورد زلزله انجام شده است. آیین‌نامه‌های ساختمانی توصیه می‌کنند که در صورت استفاده از هفت رکورد، مقدار میانگین و در صورت استفاده از سه رکورد، حداکثر پاسخ‌ها ملاک عمل قرار گیرند. بنابراین، به دلیل استفاده از سه رکورد، باید پاسخ‌های بیشینه را ملاک قرار داده و نتایج را مورد مقایسه قرار دهیم. سه رکورد استفاده شده در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱. رکورد زلزله امپریال (Imperial)

۲. رکورد زلزله کوبه (Kobe)

۳. رکورد زلزله لاندس (Landers)

۳. معرفی مدل‌ها

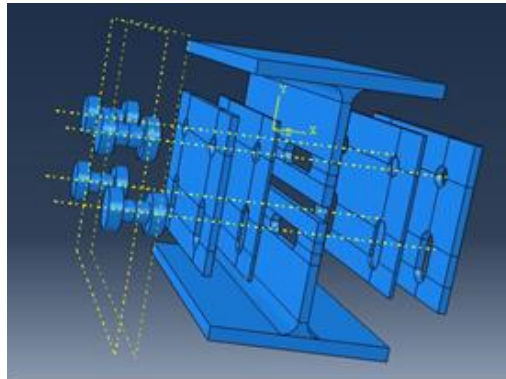
به منظور دست یابی به بهترین حالت ممکن، ۱۲ مدل بررسی شده است که از جمله این مدل‌ها، چهار مدل یک طبقه و هشت مدل دوطبقه می‌باشند. مدل‌ها از لحاظ تعداد، چیدمان پانل‌ها و همچنین تعداد اتصال دهنده‌های اصطکاکی متفاوت هستند، ولی دارای مجموع عرض مؤثر دیوارها، مجموع سطح مقطع المان‌های پس تنیده، مجموع نیروی پس تنیده المان‌ها و مجموع نیروی بولت‌های یکسان در هر طبقه می‌باشند. شکل ۶ نشان دهنده مدل‌های مورد بررسی است.

این مدل‌ها به سه دسته (ردیف) تقسیم‌بندی شده است: ردیف اول چهار مدل یک طبقه؛ ردیف دوم چهار مدل دوطبقه با آرایش ساده؛ و ردیف سوم چهار مدل دوطبقه با آرایش زیگزاگ.

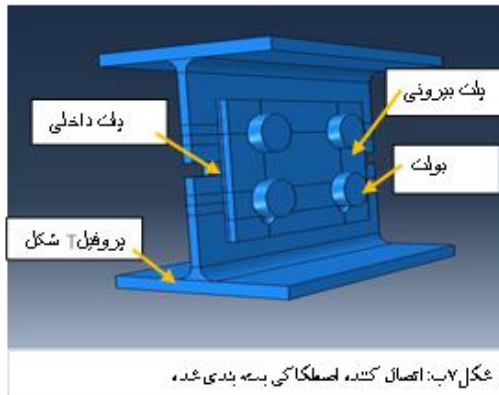
۳_۱. معرفی اتصال دهنده اصطکاکی

اتصال دهنده‌های اصطکاکی از این لحاظ قرارگیری اعضا و شکل ظاهری اعضای تشکیل دهنده، انواع و اقسام گوناگونی دارد. اتصال دهنده‌ای که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، متشکل از دو پروفیل T شکل است که با بال هایش به دو دیوار مجاور به ارتفاع یکسان نصب شده است. در دو طرف جان این پروفیل‌ها، پلت اصطکاکی و در دو طرف پلت اصطکاکی، پلت‌های فولادی که در سطح بیرونی قرار گرفته است، با استفاده از پیچ و مهره و شیارهای این پلت‌ها و جان پروفیل T شکل به یکدیگر متصل شده‌اند.

پس از اعمال بار به اتصال، شیارهای موجود در پلتها و جان پروفیل T شکل که بولتهای اصطکاکی از آن عبور داده شده‌اند، اجازه حرکت به منظور اتلاف انرژی را می‌دهند. بنابراین، بولتها اجازه حرکت داخل شیارها را دارند و این حرکت باعث اتلاف بخش اعظم انرژی جانبی شده و حرکت سازه را کنترل می‌کند. شکل ۷-الف نشان‌دهنده اتصال دهنده اصطکاکی در حال بسته‌بندی و شکل ۷-ب اتصال دهنده اصطکاکی بسته‌بندی شده را نشان می‌دهد.



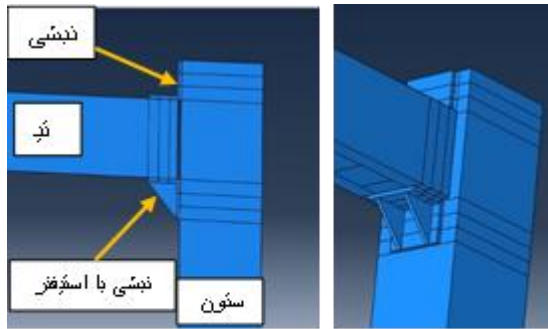
شکل ۷-الف: اتصال کننده اصطکاکی در حال بسته‌بندی



شکل ۷-ب: اتصال کننده اصطکاکی بسته‌بندی شده

۳_۲. اتصال تیر به ستون

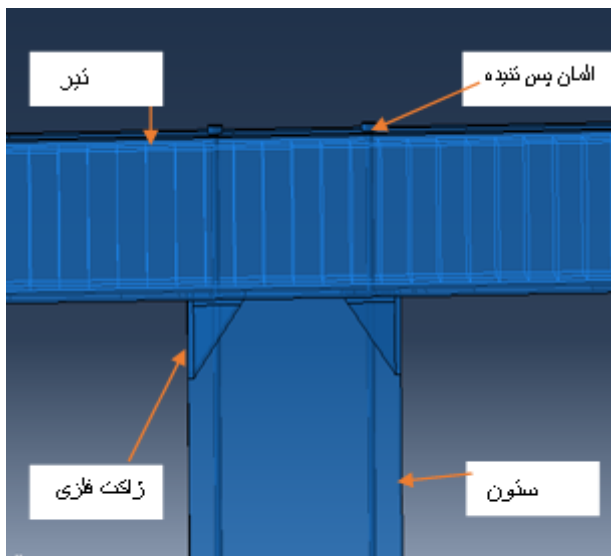
شکل ۸ نشان‌دهنده اتصال تیر به ستون است که این اتصال به صورت نیمه‌صلب در نظر گرفته شده و با پلت‌های L شکل، این دو عضو به یکدیگر متصل شده‌اند. برای کنترل کردن رفتار پلت در قسمت پایین، از استیفر استفاده شده است.



شکل ۸. نمای اتصال تیر به ستون

۳_۳. اتصال پانل دیواری به تیر

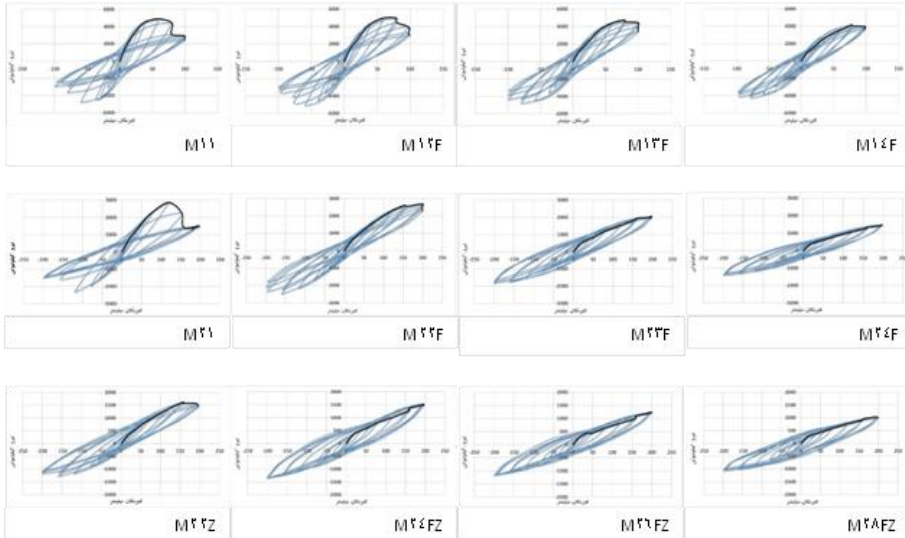
در اتصال میان پنل‌های دیواری و تیرها، افزون بر این دو عضو، بولت‌های پس‌تنیده و ژاکت‌های فولادی نیز سهم دارند. با اعمال بار جانبی چرخه‌ای، پنل‌ها دچار حرکات نوسانی می‌شوند که با این حرکات رفت و برگشتی، امکان آسیب دیدن بتن در گوشه‌های پنل و یا بتن‌های مجاور آن وجود دارد. برای مقابله با این پدیده، در قسمت بالا و پایین دیوار از این ژاکت‌های فولادی در گوشه‌های پنل استفاده کرده‌ایم. همچنین برای تقویت خودمحوری و تقویت رفتار کششی پنل‌ها از این اعضای پس‌تنیده استفاده شده است. شکل ۹ نشان‌دهنده اتصال پنل‌ها به تیر می‌باشد.



شکل ۹. اتصال پنلهای دیواری به تیر

۴. نتایج تحلیل

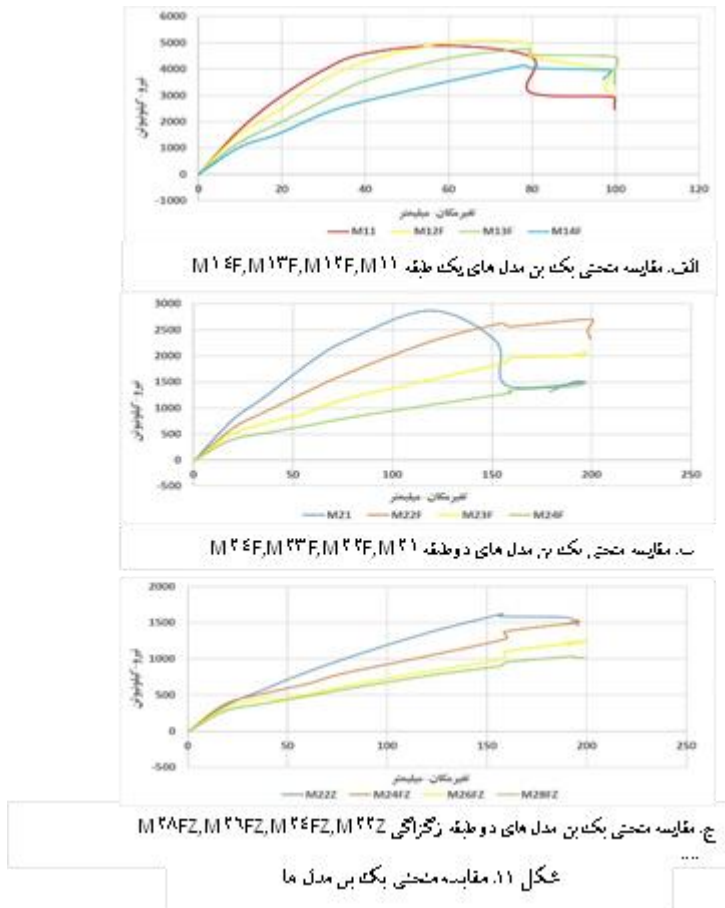
منحنی هیستریزیس بیان‌کننده عملکرد کلی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده منحنی هیستریزیس مدل هاست.



شکل ۱۰. منحنی هیستریزیس مدل‌ها

۴_۱. مقایسه منحنی‌های بک‌بون (Backbone)

پس از به‌دست آوردن منحنی هیستریزیس و منحنی بک‌بون مدل‌ها، به‌منظور مطالعه دقیق، پاسخ‌ها باید مورد مقایسه قرار گیرند. برای مقایسه پاسخ‌ها، مدل‌ها با توجه به تعداد طبقات و نوع چیدمان پانل‌ها به سه بخش تقسیم‌بندی شده است که هر بخش با هم‌نوع خود مقایسه شده است. مدل‌های یک‌طبقه با یکدیگر مقایسه شده و دو طبقه‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ البته دو طبقه‌ها از لحاظ آرایش و چیدمان پانل‌ها به دو بخش (آرایش ساده و آرایش زیگ‌زاگ) تقسیم شده‌اند که هر کدام به‌صورت جداگانه با هم‌نوع خود مقایسه شده است.



۴_۲. انرژی اتلاف شده مدل ها

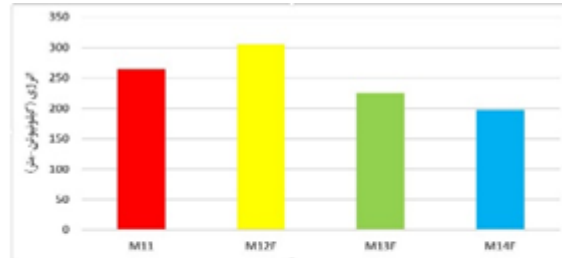
سطح زیر منحنی هیستریزس نشان دهنده انرژی اتلاف شده در سازه هاست. به روش های متفاوت می توان این سطح را محاسبه نمود؛ یکی از روش های محاسبه این سطح زیر نمودار، روش مساحت دوزنقه می باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، حلقه های منحنی هیستریزس به چندین دوزنقه کوچک تقسیم می شوند و پس از محاسبه مساحت هر دوزنقه کوچک، آن ها را با یکدیگر جمع می کنیم. از فرمول زیر برای محاسبه آن استفاده شده است:

$$A = \{2(Y_1 + Y_2) * (X_2 - X_1)\} + \dots$$

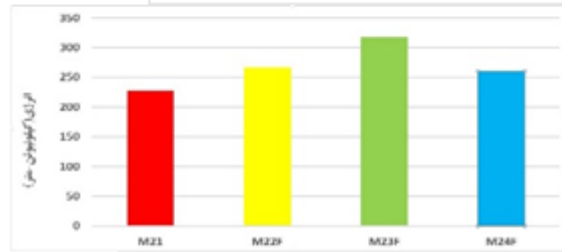
۴_۳. مقایسه انرژی مدل های یک طبقه

در مدل M11، اتصال دهنده اصطکاکی تعبیه نشده و دارای یک پانل است. این مدل به عنوان مرجع مدل های M12F، M13F و M14F در نظر گرفته شده است.

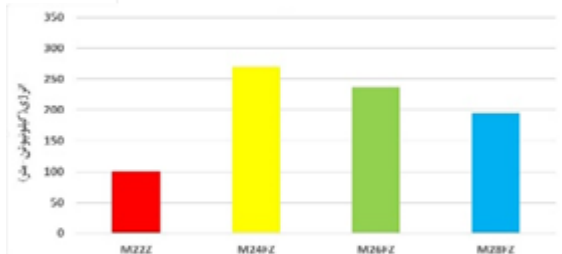
مدل M12F افزایش ۱۵.۵٪ اتلاف انرژی را نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.
 مدل M13F کاهش ۱۴.۵۵٪ اتلاف انرژی را نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.
 مدل M14F کاهش ۲۵.۴۲٪ اتلاف انرژی را نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.
 از این‌رو، می‌توان گفت مدل M12F با داشتن دو پانل دارای بیشترین اتلاف است.



الف. مقایسه اتلاف انرژی مدل‌های بک طبقه



ب. مقایسه اتلاف انرژی مدل‌های در طبقه



ج. مقایسه اتلاف انرژی مدل‌های در طبقه آرایش رگ‌زایی

شکل ۱۲. مقایسه اتلاف انرژی مدل‌ها

۴_۴. مقایسه اتلاف انرژی مدل‌های دو طبقه

مدل M21 دارای یک پانل در طبقه بالا و یک پانل در طبقه پایین است؛ این مدل فاقد اتصال دهنده اصطکاکی است. مدل یادشده به‌عنوان مرجع مدل‌های M22F، M23F و M24F قرار گرفته است.

مدل M22F افزایش ۱۶.۹۱٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.

مدل M23F افزایش ۳۹.۲٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.

مدل M24F افزایش ۱۴٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.

مدل M22Z دارای دو پانل به صورت زیگزاگ در هر طبقه است. این مدل فاقد اتصال دهنده اصطکاکی بوده که به عنوان مرجع مدل‌های M24FZ، M26FZ و M28FZ قرار گرفته است. مدل M24FZ افزایش ۱۶۷.۲۹٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد. مدل M26FZ افزایش ۱۳۴.۹۸٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد. مدل M28FZ افزایش ۹۲.۶۲٪ اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش تعداد پانل‌ها سبب کاهش تغییر مکان نسبی پانل‌ها شده و از این رو، نقش اتصال دهنده‌های اصطکاکی کمرنگ می‌شود.

۴_۵. سختی جانبی مدل‌ها

برای مشخص کردن سختی جانبی مدل‌ها از سختی نخستین مدل‌ها استفاده شده است. برای محاسبه سختی مدل‌ها از فرمول سختی که به صورت زیر است استفاده شده است:

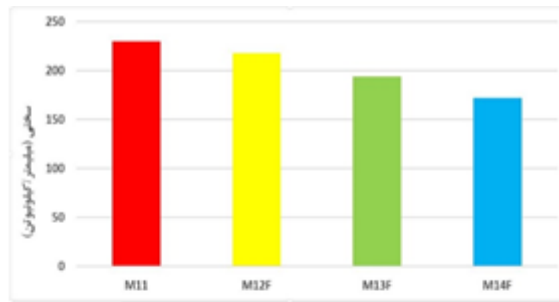
$$k_i = |X_{i+}| + |X_{i-}| + |F_{i+}| + |F_{i-}|$$

۴_۶. مقایسه سختی جانبی مدل‌های یک طبقه

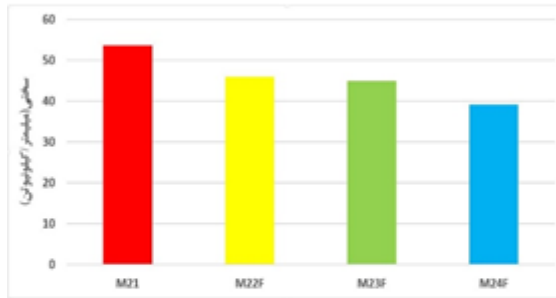
مدل M11 سخت‌ترین مدل در میان مدل‌های یک طبقه است. سختی این مدل به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و با مدل‌های M12F، M13F و M14F مقایسه شده است. مدل M12F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۵.۲۵٪ را نشان می‌دهد. مدل M13F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۱۵.۵۸٪ را نشان می‌دهد. مدل M14F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۲۵.۱۶٪ را نشان می‌دهد.

۴_۷. مقایسه سختی جانبی مدل‌های دو طبقه

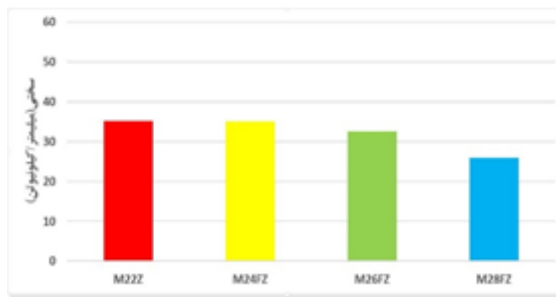
مدل M21 (دارای یک پانل در هر طبقه) سخت‌ترین مدل در میان مدل‌های دو طبقه با آرایش ساده (M24F، M23F، M22F) است. این مدل به عنوان مرجع انتخاب شده است. مدل M22F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۱۴.۴٪ را نشان می‌دهد. مدل M23F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۱۶.۲۸٪ را نشان می‌دهد. مدل M24F نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۲۶.۹۸٪ را نشان می‌دهد. مدل M22Z دارای دو پانل در هر طبقه با چیدمان زیگزاگ و بدون اتصال دهنده اصطکاکی است. سختی این مدل به عنوان مرجع در میان مدل‌های دو طبقه با چیدمان زیگزاگ در نظر گرفته شده و با سختی مدل‌های M24FZ، M26FZ، M28FZ مقایسه شده است. مدل M24FZ نسبت به مدل مرجع افزایش سختی ۲۰.۰۵٪ را نشان می‌دهد. مدل M26FZ نسبت به مدل مرجع افزایش سختی ۱۱.۳۳٪ را نشان می‌دهد. مدل M28FZ نسبت به مدل مرجع کاهش سختی ۱۱.۵۵٪ را نشان می‌دهد.



الف. مقایسه سختی جانبی مدل های یک طبقه



ب. مقایسه سختی جانبی مدل های دو طبقه



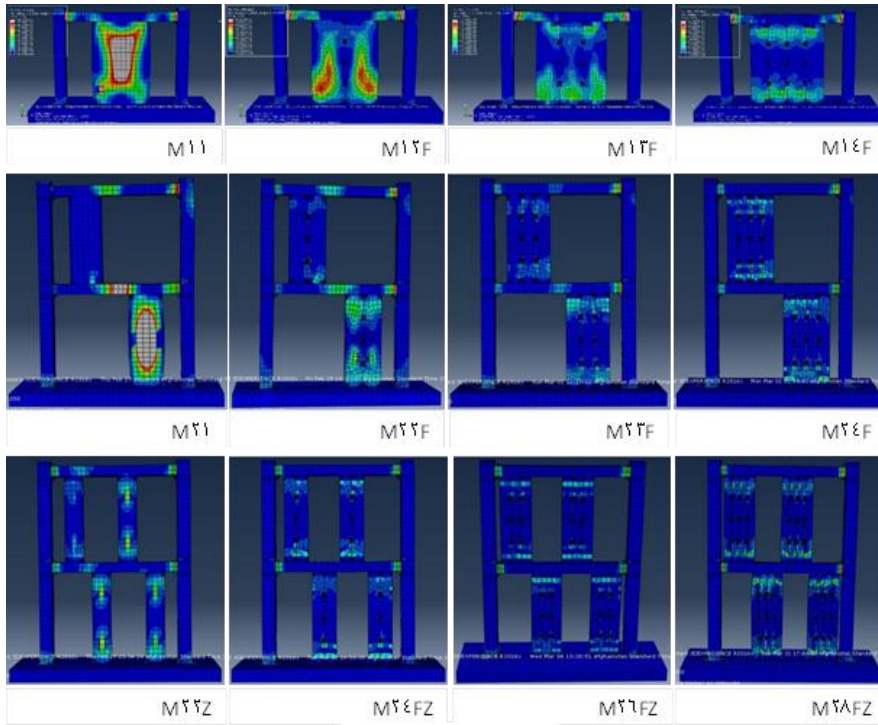
ج. مقایسه سختی جانبی مدل های در طبقه آرایش رنگرایی

شکل ۱۴. مقایسه سختی جانبی مدل ها

پس می‌توان گفت که در مدل‌های یک‌طبقه، مدل M12F و در مدل‌های دو طبقه، مدل M23F از سختی مطلوبی برخوردار می‌باشند؛ این مدل‌ها نه خیلی سخت و شکننده هستند و نه خیلی نرم، بلکه از لحاظ سختی در حالت متوازن قرار دارند.

۸_۴. خسارت در مدل‌ها

شکل ۱۴ نشان‌دهنده خسارت در مدل‌هاست. به‌وضوح دیده می‌شود که مدل سخت‌تر، خسارت بیشتری متحمل شده است. بیشتر خسارت‌ها در پانل‌ها، دو سر تیر و قسمت میانه تیر وارد شده است.



شکل ۱۳. خسارت در مدلها

۱. خسارت‌های وارد شده در پانل‌ها ناشی از سختی بیش از حد پانل‌ها می‌باشد که با کاهش سختی در مدل‌ها کاهش یافته است و خرابی از نوع برشی است.
۲. خسارت در قسمت میانه تیر از نوع برشی بوده که نشان می‌دهد آرایش نامنظم پانل‌ها به شدت به تیرها آسیب می‌زند.
۳. تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تیر که ناشی از نیمه‌صلب بودن اتصال تیر به ستون می‌باشد.

۹_۴. مقایسه حداکثر تغییر مکان جانبی مدل‌ها

همان گونه که پیش‌تر نیز ذکر گردید، در این تحقیق ۱۲ مدل مورد تحلیل قرار گرفته و تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی) با استفاده از سه رکورد زلزله انجام شده است. آیین‌نامه‌های ساختمانی توصیه می‌کنند که در صورت استفاده از ۷ رکورد، مقدار میانگین و در صورت استفاده از ۳ رکورد، حداکثر پاسخ‌ها ملاک عمل قرار گیرند. بنابراین، به دلیل استفاده از ۳ رکورد، باید پاسخ‌های بیشینه را ملاک قرار داده و نتایج را مورد مقایسه قرار دهیم. پاسخ بیشینه هر مدل از میان سه رکورد استخراج شده و به صورت زیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند:



الف) مقایسه حداکثر تغییر مکان جانبی مدل های یک طبقه

شکل ۱۵-الف نشان دهنده حداکثر تغییر مکان جانبی در مدل های یک طبقه است. مدل M11 با داشتن یک پانل به عنوان مرجع مدل های M12F، M13F و M14F در نظر گرفته شده است. مدل M12F افزایش ۵.۸۴٪ تغییر مکان جانبی را نسبت به مدل مرجع نشان می دهد. مدل M13F افزایش ۳۴.۴۴٪ تغییر مکان جانبی نسبت به مدل مرجع نشان می دهد. مدل M14F افزایش ۷۲.۵۸٪ تغییر مکان جانبی نسبت به مدل مرجع نشان می دهد.

(ب) مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی مدل‌های دوطبقه (آرایش ساده)

شکل ۱۵-ب نشان دهنده تغییرمکان جانبی مدل‌های M22F، M23F، M24F و M21 می‌باشد. مدل M21 (دارای یک پانل در هر طبقه) به عنوان مرجع انتخاب شده است. مدل M22F نسبت به مدل مرجع افزایش ۹.۵۷٪ تغییرمکان جانبی نشان می‌دهد. مدل M23F نسبت به مدل مرجع افزایش ۷۰.۷۷٪ تغییرمکان جانبی نشان می‌دهد. مدل M24F نسبت به مدل مرجع افزایش ۱۰۲.۶٪ تغییرمکان جانبی نشان می‌دهد.

(ج) مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی مدل‌های دو طبقه با آرایش زیگزاگ

شکل ۱۵-ج نشان دهنده تغییرمکان جانبی مدل‌های M22FZ، M24FZ، M26FZ، M28FZ و M22Z می‌باشد. مدل M22Z (دارای دو پانل در هر طبقه با آرایش زیگزاگ) به عنوان مرجع مدل‌های دوطبقه با آرایش زیگزاگ در نظر گرفته شده است.

مدل M24FZ نسبت به مدل مرجع افزایش ۱.۵٪ تغییرمکان جانبی نشان داده است. مدل M26FZ نسبت به مدل مرجع افزایش ۱۱.۳۵٪ تغییرمکان جانبی نشان می‌دهد. مدل M28FZ نسبت به مدل مرجع افزایش ۲۰.۷۵٪ تغییرمکان جانبی نشان داده است.

۱۰_۴. مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار

همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، با کاهش سختی، کاهش خرابی و افزایش تعداد پانل‌ها، مدل‌ها تغییرمکان جانبی ماندگار کمتری را متحمل شده‌اند:

(الف) مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار مدل‌های یک طبقه

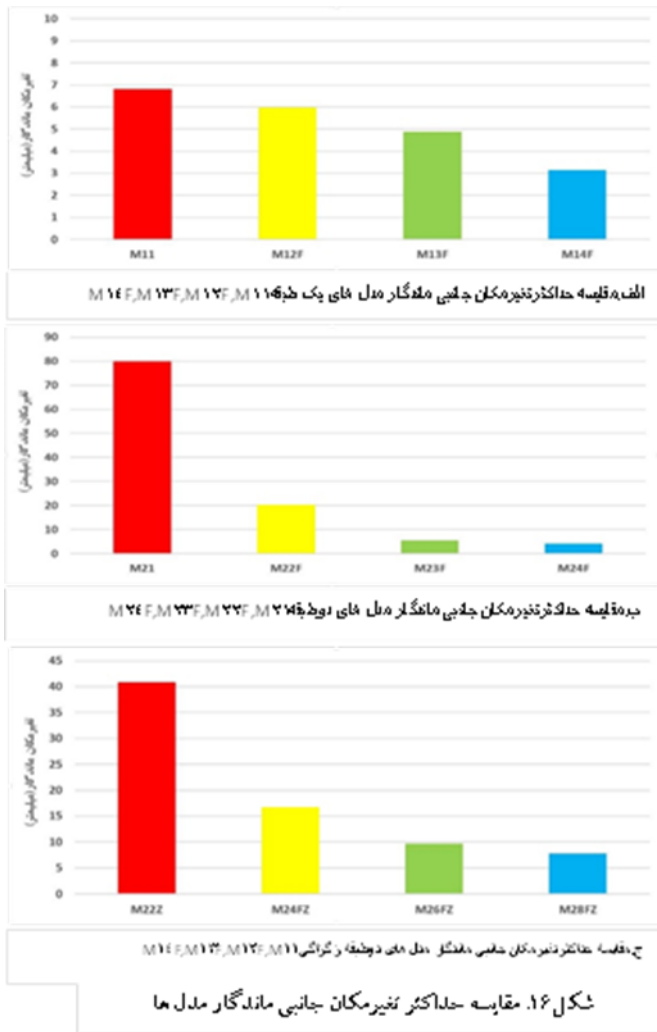
شکل ۱۶ الف، نشان دهنده حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار در مدل‌های F1۲M، F1۳M، F1۴M و ۱۱M می‌باشد.

(ب) مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار مدل‌های دوطبقه (آرایش ساده)

شکل ۱۶ ب، نشان دهنده حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار در مدل‌های F۲۲M، F۲۳M، F۲۴M و ۲۱M می‌باشد.

(ج) مقایسه حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار مدل‌های دو طبقه با آرایش زیگزاگ

شکل ۱۶ ج، نشان دهنده حداکثر تغییرمکان جانبی ماندگار در مدل‌های FZ۲۴M، FZ۲۶M، FZ۲۸M و Z۲۲M می‌باشد.



۵. جمع بندی و نتیجه گیری

بتن پیش ساخته از مزیت های بی شماری برخوردار است. از جمله مزیت ها می توان به سرعت کار، تمیز بودن، صنعتی بودن ساخت و ساز، قابلیت نظارت دقیق و هزینه مناسب اشاره کرد. اما در کنار این مزیت ها، از نقاط ضعف اندکی نیز مستثنی نیست؛ شکل پذیری کمتر و حساسیت اتصالات را می توان به عنوان نقاط ضعف این سیستم ها قلمداد نمود که این نقاط ضعف را می توان به نحوی کم رنگ تر کرد. در این تحقیق، تقسیم کردن قطعات بزرگ به قطعات کوچک تر و استفاده از اتصالات دهنده های اصطکاکی، این مشکلات را تا حدی حل کرده و به نتایج خوبی رسیدیم.

با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از این نمودارهای اتلاف انرژی، سختی، تغییر مکان، تغییر مکان ماندگار و خرابی ایجاد شده در مدل ها، به این نتیجه رسیدیم که کاهش عرض و افزایش تعداد پانل ها سبب

افزایش تغییرمکان جانبی، شکل‌پذیری و انرژی سازه می‌شود. کاهش عرض و افزایش تعداد پانل‌ها منجر به کاهش سختی، خسارت و تغییرمکان جانبی ماندگار در مدل‌ها می‌شود.

در مدل‌های یک طبقه، مدل M12F دارای اتلاف انرژی، سختی و تغییرمکان جانبی در توازن است؛ اتلاف انرژی به حداکثر می‌رسد و از این سختی و تغییرمکان قناعت‌بخش برخوردار می‌باشد. این مدل دوپانلی عملکرد بهتری نسبت به دیگر مدل‌های یک طبقه دارد.

در مدل‌های دو طبقه، مدل M23F دارای اتلاف انرژی، تغییرمکان جانبی و سختی در توازن است. انرژی به حداکثر می‌رسد و همچنین از این سختی و تغییرمکان جانبی قناعت‌بخش برخوردار می‌باشد. این مدل سه پانلی به عنوان مدلی با عملکرد بهتر در میان مدل‌های دو طبقه شناخته می‌شود.

منابع و مراجعها

1. Lew, M., Naeim, F., Carpenter, L. D., Youssef, N. F., Rojas, F., & Saragoni, G. R. (2010). The significance of the 27 February 2010 Offshore Maule, Chile earthquake. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19(8), 826-837.
2. Henry, R. S., Sritharan, S., & Ingham, J. M. (2016). Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system. *Engineering Structures*, 115, 28-41.
3. Hassanli, R., ElGawady, M. A., & Mills, J. E. (2017). Simplified approach to predict the flexural strength of self-centering masonry walls. *Engineering Structures*, 142, 255-271.
4. Kurama, Y., Pessiki, S., Sause, R., & Lu, L. W. (1999). Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *PCI Journal*, 44(3), 72-89.
5. Priestley, M. J. N., Sritharan, S., Conley, J. R., & Pampanin, S. (1999). Preliminary results and conclusions from the PRESSS five-story precast concrete test building. *PCI Journal*, 44(6), 42-67.
6. Twigden, K. M., & Henry, R. S. (2015). Experimental response and design of O-connectors for rocking wall systems. *Structures*, 3, 261-271.
7. Henry, R. S., Aaleti, S., Sritharan, S., & Ingham, J. M. (2009). Concept and finite-element modeling of new steel shear connectors for self-centering wall systems. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 136(2), 220-229.
8. Aaleti, S., & Sritharan, S. (2009). A simplified analysis method for characterizing unbonded post-tensioned precast wall systems. *Engineering Structures*, 31(12), 2966-2975.
9. Rahman, M. A., & Sritharan, S. (2015). Seismic response of precast, post-tensioned concrete jointed wall systems designed for low- to mid-rise buildings using the direct displacement-based approach. *PCI Journal*.
10. Restrepo, J. I., & Rahman, A. (2007). Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators. *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1560-1570.
11. Lu, X., Dang, X., Qian, J., & Zhou, Y. (2017). Experimental study of self-centering shear walls with horizontal bottom slits. *Journal of Structural Engineering*, 143(3), 04016183.
12. Smith, B., & Kurama, Y. (2013, May). Seismic displacement demands for hybrid precast concrete shear walls. In *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, Pittsburgh, PA, USA, 2-4.
13. Shultz, A. E., & Magana, R. A. (1996). Seismic behavior of connections in precast concrete walls. In *Proc. Mete A. Sozen Symposium*, ACI SP-162, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

14. Perez, F. J., Sause, R., & Pessiki, S. (2007). Analytical and experimental lateral load behavior of unbonded post-tensioned precast concrete walls. *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1531-1540.
15. Rojas, P., Ricles, J. M., & Sause, R. (2005). Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices. *Journal of Structural Engineering*, 131(4), 529-540.
16. Song, L. L., Guo, T., & Chen, C. (2014). Experimental and numerical study of a self-centering prestressed concrete moment resisting frame connection with bolted web friction devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(4), 529-545.
17. Bing, Q., Dai, C., Qiu, J., Hou, H., & Qiu, C. (2019). Testing of seismic dampers with replaceable U-shaped steel plates. *Engineering Structures*, 179, 625-639.
18. Liu, Y., Guo, Z., Liu, X., Chicchi, R., & Shahrooz, B. (2019). An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: Experimental program on seismic performance. *Engineering Structures*, 183, 830-840.
19. Xu, L., Xiao, S., & Li, Z. (n.d.). Hysteretic behavior and parametric studies of a self-centering RC wall with disc spring devices. *Engineering Structures*.
20. Wu, H., Zhou, Y., & Liu, W. (n.d.). Collapse fragility analysis of self-centering precast concrete walls with different post-tensioning and energy dissipation designs. *Engineering Structures*.