بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

بررسی رفتار استاتیکی غیرخطی دیوارهای برشی فولادی در تغییرشکل‌های بزرگ

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله

آرش محمدی فارسانی

استاد راهنما

دکتر فرهاد بهنام‌فر

۱۳۸۶

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی زلزله آقای آرش محمدی فارسانی

تحت عنـوان

بررسی رفتار استاتیکی غیرخطی دیوارهای برشی فولادی در تغییرشکل‌های بزرگ

در تاریخ ۱۳۸۶/۰۲/۲۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرارگرفت.

۱ – استاد راهنمای پایان‌نامه — دکتر فرهاد بهنام فر

۲ – استاد مشاور پایان‌نامه — دکتر مجتبی ازهری

۳ – استاد داور — دکتر احمد نیکنام

۴ – استاد داور — دکتر علی محمد مؤمنی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر مرتضی مدح خوان

تشکر و قدردانی

خدا را شکرگزار هستم که به من توفیق داد تا این دوره را به پایان برسانم. بی‌شک گذارندن این دوره بدون همکاری و زحمات اساتید، دوستان و خانواده‌ی عزیزم امکان‌پذیر نبود و از خداوند متعال موفقیت و بهروزی این عزیزان را خواستارم.

لازم می‌دانم از استاد راهنمای عزیز و ارجمندم، جناب آقای دکتر فرهاد بهنام‌فر به خاطر زحمات زیاد و صبر و حوصله‌ی فراوانی که داشتند، صمیمانه تشکر کنم. جدیت و نظم در کار، همراه با ویژگی‌های اخلاقی ایشان، همواره برای من یک نمونه و الگو خواهد بود.

از استاد گران‌قدر جناب آقای دکتر مجتبی ازهری که همواره با نظرات ارزشمندشان، بنده را در انجام این تحقیق یاری نمودند و افتخار شاگردی ایشان را داشتم، تشکر و قدردانی می‌کنم.

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی‌محمد مؤمنی که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل نمودند تشکر می‌کنم و آنچه را که از ایشان آموختم هیچ‌گاه فراموش نخواهم کرد. هم‌چنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر احمد نیکنام نیز که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل نمودند، تشکر می‌کنم.

ایده‌ی اولیه‌ی این تحقیق را مدیون استاد فرزانه، جناب آقای دکتر محمدمهدی سعادت‌پور می‌دانم که بدین‌وسیله از ایشان قدردانی می‌نمایم و از لطف و محبتی که نسبت به بنده داشتند کمال تشکر را دارم. هم‌چنین از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر بیژن برومند که همواره از راهنمایی‌های ارزنده‌شان بهره‌مند بودم، سپاس‌گزاری می‌نمایم.

از آقایان مهندس پرهام معمارزاده و مهندس بهزاد طلایی‌طبا، دانشجویان دکترای سازه، که در مراحل انجام پایان‌نامه بسیار به بنده کمک کردند تشکر می‌کنم.

یاد و خاطره‌ی دوستان بسیار عزیزم را که بودن در کنار آنها تحمل بسیاری از سختی‌ها را آسان می‌نمود را نیز گرامی می‌دارم و در این بین از زحمات آقایان سعید ابراهیمی دهشیری، توحید حکم‌آبادی، بهروز کشته‌گر، مجتبی نجفی و رسول عزیزخانی که بنده را در بسیاری از مراحل انجام پایان‌نامه کمک کردند تشکر ویژه دارم. هم‌چنین از دوستان خوبم، مهدی ریاحی، علیرضا قیوم‌زاده، سعید خان‌باباپور، قربان حسین‌زاده، حجت قلی‌زاده، رضا شفیعی‌نژاد، عطاء فیضی‌پور، امیر مشاری، وحید کمالی، سعید معظم، احسان نصراصفهانی، سهیل سقراطی، عرفان جابرزاده، ایمان جنتی، محسن ضیایی، محمدمهدی ساعتی‌وحید، علی رجبی‌پور و رضا جلوس‌جمشیدی نیز که در طول این مدت از لطف و عنایت آنها برخوردار بودم نهایت تشکر را دارم.

از زحمات سرکار خانم‌ها بهشتی و فروغی، مسؤولین محترم سایت تحصیلات تکمیلی، نیز نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به

همه‌ی کسانی که دوستشان دارم و به آنها مدیون هستم .

کلیه حقوق مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱ـ۱ـ کلیات ۲

۱ـ۲ـ هدف و انگیزه‌ی تحقیق ۴

۱ـ۳ـ محتوای فصل‌های بعدی ۵

فصل دوم: بررسی پژوهش‌های انجام شده توسط دیگران ۶

۲ـ۱ـ مطالعات تجربی ۶

۲ـ۲ـ مطالعات تحلیلی ۱۴

۲ـ۳ـ جمع بندی ۲۵

فصل سوم: مبانی تحلیلی کمانش و پس‌کمانش صفحات ۲۷

۳ـ۱ـ کلیات ۲۷

۳ـ۲ـ استاتیک صفحات ۲۸

۳ـ۲ـ۱ـ معادله‌ی دیفرانسیل ورق: فرضیه‌ی خطی ۲۸

۳ـ۲ـ۲ـ منحنی تنش- کرنش برای ورق تحت فشار ۳۴

۳ـ۲ـ۳ـ کمانش غیر ارتجاعی صفحات ۳۵

۳ـ۲ـ۴ـ مقاومت پس از کمانش ورق ۳۸

۳ـ۳ـ مبانی تحلیلی سیستم دیوار برشی فولادی ۴۲

۳ـ۳ـ۱ـ تحلیل برشی دیوارهای برشی فولادی ۴۲

۳ـ۳ـ۲ـ تحلیل خمشی دیوارهای برشی فولادی ۵۰

۳ـ۳ـ۳ـ اندرکنش خمش- برش برای دیوارهای برشی فولادی ۵۳

فصل چهارم: مدل‌سازی و روش تحقیق ۵۸

۴ـ۱ـ کلیات ۵۸

۴ـ۲ـ مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی ۵۹

۴ـ۲ـ۱ـ معرفی اجمالی نرم‌افزار *ANSYS* ۵۹
۴ـ۲ـ۲ـ مروری بر مفهوم تحلیل غیر خطی ۵۹
۴ـ۲ـ۳ـ پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی ۶۰
۴ـ۲ـ۴ـ المان‌های مورد استفاده در *ANSYS* برای مدل سازی دیوارهای برشی فولادی ۶۰
۴ـ۲ـ۱ـ نکات کلی ۶۲
۴ـ۳ـ تحلیل غیر خطی نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی و مقایسه‌ی نتایج ۶۵
۴ـ۳ـ۱ـ نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی الگالی و همکاران ۶۵
۴ـ۳ـ۲ـ نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی درایور و همکاران ۷۰
۴ـ۳ـ۳ـ نمونه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی رضایی و همکاران ۷۴
۴ـ۴ـ مدل ساده شده‌ی دیوارهای برشی فولادی ۷۷
۴ـ۴ـ۱ـ مقدمه‌ای بر روش تحلیل غیر خطی در نرم‌افزار *SAP 2000* ۷۸
۴ـ۴ـ۲ـ تحلیل نمونه‌ی آزمایشگاهی درایور و همکاران با استفاده از مدل نواری و مقایسه‌ی نتایج ۸۲
۴ـ۴ـ۳ـ تحلیل نمونه‌ی آزمایشگاهی رضایی و همکاران با استفاده از مدل نواری و مقایسه‌ی نتایج ۸۴

فصل پنجم: تحلیل استاتیکی غیر خطی دیوارهای برشی فولادی ۸۶

۵ـ۱ـ کلیات ۸۶
۵ـ۲ـ مثال‌های طراحی ۸۷
۵ـ۲ـ۱ـ ضوابط آیین نامه‌ی *AISC* مربوط به طراحی اجزاء مختلف یک سیستم دیوار برشی فولادی ویژه ۸۷
۵ـ۲ـ۲ـ طراحی مقدماتی سیستم دیوار برشی فولادی ۵ طبقه ۹۲
۵ـ۲ـ۳ـ طراحی مقدماتی سیستم دیوار برشی فولادی ۱۰ طبقه ۹۷
۵ـ۳ـ ارزیابی مثال‌های طراحی‌شده و طراحی نهایی ۹۹
۵ـ۳ـ۱ـ نکات مهم در ارزیابی عملکرد سازه های ۵ و ۱۰ طبقه با دستور العمل بهسازی ۱۰۰
۵ـ۳ـ۲ـ ارزیابی عملکرد سازه‌ی ۵ طبقه با دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ۱۰۳
۵ـ۳ـ۳ـ ارزیابی عملکرد سازه‌ی ۱۰ طبقه با دستور العمل بهسازی لرزه‌ای ۱۰۵
۵ـ۴ـ تحلیل پوش اور مثال‌های طراحی ۱۰۷
۵ـ۴ـ۱ـ مدل یک طبقه از سازه‌ی ۵ طبقه ۱۰۸
۵ـ۴ـ۲ـ مدل ۵ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی ۱۱۰
۵ـ۴ـ۳ـ مدل ۱۰ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی ۱۱۳

۵ـ۵ـ اثر بازشو در دیوارهای برشی فولادی ۱۱۴
۵ـ۶ـ مهاربند معادل دیوار برشی فولادی ۱۱۷
فصل ششم: نتیجه‌گیری ۱۱۹
۶ـ۱ـ خلاصه ۱۱۹
۶ـ۲ـ نتایج به دست آمده در این پایان‌نامه ۱۲۰
۶ـ۳ـ پیشنهادها برای تحقیقات آینده ۱۲۱
مراجع ۱۲۳

چکیده

دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی از سال ۱۹۷۰ میلادی در تعدادی از ساختمان‌های بلند جدید به خصوص در کشورهای ژاپن و آمریکا به کار رفته است. مطالعات انجام شده در مورد رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی و تجربیات گذشته نویدبخش یک سیستم بسیار مؤثر و شکل‌پذیر در برابر بارهای لرزه‌ای می‌باشد. مزایای استفاده از این سیستم شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی نسبتاً بالا، سبکی نسبت به دیوار برشی بتن آرمه‌ی معادل، سختی زیاد، سرعت نصب، اشغال فضای کمتر و سهولت بهسازی یا تعویض آنها می‌باشد. با توجه به مزایای ذکر شده برای دیوارهای برشی فولادی، در عین حال عواملی مانع از گسترش اجرای این دیوارها می‌شود. از جمله کمبود اطلاعات و جدید بودن موضوع مربوط به طراحی این‌گونه سازه‌ها و عدم اشاره به این موضوع در آیین‌نامه‌های داخلی، کمبود و نقص اطلاعات راجع به رفتار لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها در مقایسه با رفتار دیوارهای برشی بتن مسلح و هم‌چنین فقدان یک ابزار تحلیلی مؤثر و قابل اعتماد، نظیر دیگر موانع موجود بر سر راه استفاده‌ی وسیع از این سیستم قرار دارد. بدین منظور در این تحقیق، تلاش می‌شود تا با ارائه‌ی یک مدل اجزاء محدود غیرخطی از یک سیستم دیوار برشی فولادی که از قبل بر اساس ضوابط موجود طراحی شده است، و با انجام یک تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) و با در نظر گرفتن رفتار پس از کمانش، به رفتار لرزه‌ای آن دست یافت. تأثیر عواملی نظیر وجود یا عدم وجود بارهای ثقلی، نوع توزیع بار جانبی، تعداد طبقات، نوع مدل‌سازی و اثر وجود بازشو در پانل، مورد بررسی قرار گرفته و ضوابط طراحی مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرند. درستی مدل اجزاء محدود ارائه شده، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی که پیش از این توسط دیگر پژوهشگران به دست آمده است، نشان داده می‌شود. هم‌چنین به منظور مقایسه و ارزیابی، مدل ساده شده‌ی دیوارهای برشی فولادی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ورق‌های بسیار نازک، در سیستم دیوار برشی فولادی امکان‌پذیر است؛ در حالی که در عمل ممکن است مجبور به استفاده از ورق‌های ضخیم‌تر از مقدار مورد نیاز شد و این به نوبه‌ی خود موجب کاهش شکل‌پذیری سیستم می‌شود. ضوابط موجود در ارتباط با حداقل مقاومت مورد نیاز ستون‌ها، در عمل بسیار کمتر از مقدار لازم می‌باشد و نیاز به تجدید نظر دارد. لیکن استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در طراحی و سپس ارزیابی سازه‌ی طراحی شده، به یک طراحی منطقی و مؤثر منجر می‌شود. تأثیر اعمال بارهای ثقلی متعارف روی منحنی رفتاری سیستم دیوار برشی فولادی ناچیز است. هم‌چنین استفاده از بازشو در دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده‌های اطراف آن، به هیچ وجه مجاز نخواهد بود و در نهایت استفاده از یک مهاربند کششی منفرد معادل، به جای ورق فولادی و یا حتی مدل نواری، وبا دقت مناسب امکان‌پذیر است.

فصل اول

مقدمه

۱ـ۱ـ کلیات

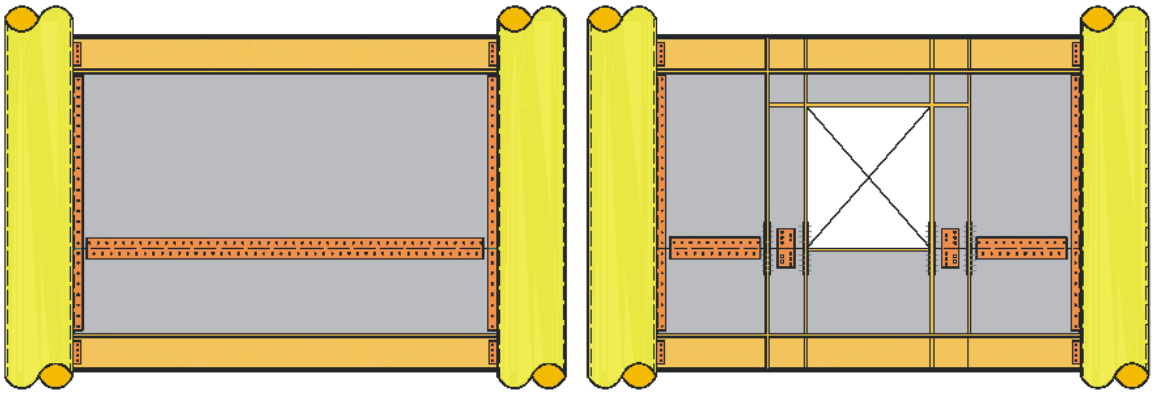
دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی از سال ۱۹۷۰ میلادی در تعدادی از ساختمان‌های بلند جدید به‌خصوص در کشورهای ژاپن و آمریکا به کار رفته است. هم‌چنین استفاده از این سیستم به عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود شناخته شده که از همان ابتدا برای این منظور در کشور آمریکا به‌کار گرفته شده است [۱].

یک دیواربرشی فولادی عبارتست از ورقی فولادی که در داخل یک پانل محصور بین تیرهای کف و سقف و ستون‌های طرفین آن نصب و به آنها جوش داده می‌شود و مانند سایر دیوارهای برشی، بارهای جانبی را به همراه قاب فولادی یا به تنهایی تحمل می‌نماید. به این ترتیب رفتار دیوار برشی فولادی در برابر بارهای جانبی به مثابه یک تیرورق کنسول و قائم است که بال‌های آن ستون‌های طرفین دیوار و جان آن ورق فولادی مذکور بوده و سخت‌کننده‌های آن تیرهای افقی کف و سقف می‌باشند. این دیوارهای نازک نه تنها سختی لازم را برای سازه تأمین می‌کنند بلکه شکل‌پذیری همراه با حداقل مصالح را به عنوان یک پارامتر مطلوب برای بارگذاری لرزه‌ای، فراهم می‌نمایند.

مزایای استفاده از این سیستم شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی نسبتاً بالا، سبکی نسبت به دیوار برشی بتن آرمه‌ی معادل، سختی زیاد، سرعت نصب، اشغال فضای کمتر و سهولت بهسازی یا تعویض آنها می‌باشد.در بهسازی ساختمان‌های موجود استفاده از دیوار برشی فولادی به علت حذف قالب بندی که در

مورد دیوارهای برشی بتن آرمه لازم است، بر سرعت اجرا به نحو قابل ملاحظه‌ای می‌افزاید.

قاب فولادی محیطی هر پانل ممکن است دارای اتصال تیر به ستون ساده یا گیردار باشد. هم‌چنین صفحه‌ی ورق فولادی می‌تواند همراه با سخت‌کننده یا بدون سخت‌کننده باشد. علاوه بر این ورق فولادی ممکن است توسط پیچ یا جوش به قاب محیطی متصل گردد. شکل ۱ـ۱ دو تیپ از دهانه‌های دیوار برشی فولادی را نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر تحقیقات روی نمونه‌های عملی نشان داده‌اند که صفحات فولادی به تنهایی و بدون سخت‌کننده‌ها بسیار شکل‌پذیر و مؤثر رفتار می‌کنند و در کشورهای آمریکا و کانادا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این نوع سیستم سخت‌کننده‌ای موجود نبوده یا فواصل آنها در حدی است که کمانش قطری ورق دیوار قبل از جاری شدن آن روی می‌دهد. هزینه‌ی جوشکاری این دیوارها به مراتب کمتر از دیوارهای سخت‌شده بوده و سبک‌ترند.



شکل ۱ـ۱ یک دهانه از دیوارهای برشی فولادی تیپ همراه با بازشو و سخت کننده و بدون آنها [۲]

در حال حاضر در دنیا ساختمان‌هایی با استفاده از دیوار برشی فولادی ساخته شده‌اند که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود:

۱ـ ساختمان اداری ۲۰ طبقه معروف به نیپون استیل[1] در توکیو، ژاپن؛

۲ـ ساختمان اداری ۵۳ طبقه در توکیو، ژاپن؛

۳ـ هتل ۳۰ طبقه‌ی هایت رجنسی[2] در دالاس، تگزاس؛

۴ـ بیمارستان ۶ طبقه‌ی سیلمار[3] در لوس آنجلس، کالیفرنیا؛

۵ـ ساختمان اداری ۳۵ طبقه در کوبه، ژاپن؛

[1] Nippon Steel Building
[2] Hyatt Regency
[3] Sylmar

۶ـ ساختمان مسکونی ۵۲ طبقه در سان فرانسیسکو، کالیفرنیا؛

۷ـ ساختمان اداری ۲۲ طبقه در سیاتل، واشینگتون.

لازم به ذکر است که بیمارستان ۶ طبقه‌ی سیلمار و ساختمان اداری ۳۵ طبقه در کوبه، به ترتیب زلزله‌های ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۹۵ کوبه را تجربه کرده‌اند و گزارشات به عمل آمده از آنها، حاکی از عملکرد موفقیت آمیز دیوارهای برشی فولادی بوده است [۱].

۱ـ۲ـ اهداف و انگیزه‌ی تحقیق

اخیراً اطلاعات قابل ملاحظه‌ای در مورد طراحی لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی در مقالات علمی وجود دارد. دراغلب آنها، رفتار دیوارهای برشی فولادی با یک تیرورق قائم مقایسه می‌شود و نشان می‌دهند که ورق فولادی سیستم دیوار برشی فولادی، نیروی برشی را توسط عمل میدان کشش تحمل می‌کند و لنگرهای واژگونی را عناصر مرزی قائم تحمل می‌کنند. در حالی که این شباهت و قیاس در ایجاد یک درک مناسب ومفهومی از رفتار دیوارهای برشی فولادی مفید است و اختلاف‌های بارزی در رفتار و مقاومت این دو سیستم وجود دارد به طوری که نمی‌توان از معادلات ارائه شده برای تیرورق‌ها برای ارزیابی مقاومت و دیگر پارامترهای دیوار برشی فولادی استفاده کرد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از نیمرخ‌های نورد شده و سازه‌ای برای عناصر مرزی قائم و افقی در سیستم دیوار برشی فولادی، به طور قابل ملاحظه‌ای در جهت‌گیری زاویه‌ی توسعه‌ی عمل میدان کشش مؤثر است و استفاده از ورق‌های خیلی نازک را ممکن می‌سازد. عناصر مرزی محیطی نسبتاً قوی، هم‌چنین برای مهار میدان کشش ایجاد شده، لازم هستند [۳].

با توجه به مزایای ذکر شده برای دیوارهای برشی فولادی، در عین حال عواملی مانع از گسترش اجرای این دیوارها می‌شود. از جمله کمبود اطلاعات و جدید بودن موضوع مربوط به طراحی این گونه سازه‌ها و عدم اشاره به این موضوع در آیین‌نامه‌های موجود، کمبود و نقص اطلاعات راجع به رفتار لرزه‌ای این گونه سازه‌ها در مقایسه با رفتار دیوارهای برشی بتن مسلح و هم‌چنین فقدان یک ابزار تحلیلی مؤثر و قابل اعتماد نظیر دیگر موانع موجود بر سر راه استفاده‌ی وسیع از این سیستم قرار دارد.

اهداف این پایان نامه عبارتند از:

۱ـ جمع آوری و خلاصه کردن اطلاعات موجود در ارتباط با رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی که از نتایج تست‌های آزمایشگاهی و یا مطالعات تحلیلی به دست آمده‌اند؛

۲ـ مطالعه و شناخت مبانی نظری حاکم بر رفتار دیوارهای برشی فولادی در مراحل قبل و بعد از

کمانش ورق فولادی؛

۳ـ مدل‌سازی اجزاء محدود غیرخطی دیوارهای برشی فولادی و بررسی صحت مدل‌سازی؛

۴ـ مدل‌سازی ساده شده‌ی دیوارهای برشی فولادی و بررسی صحت مدل‌سازی؛

۵ـ بررسی ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود در ارتباط با طراحی لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی و در ادامه‌ی آن، ارائه مثال‌های طراحی به صورت عملی؛

۶ـ ارزیابی مثال‌های طراحی شده با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر و بررسی کفایت ضوابط طراحی آیین‌نامه‌ای؛

۷ـ بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی منحنی رفتاری دیوارهای برشی فولادی از جمله وجود یا عدم وجود بارهای ثقلی، نوع توزیع بار جانبی، تعداد طبقات، نوع مدل‌سازی و اثر وجود بازشو در پانل؛

۸ـ بررسی تأثیر نسبت سختی ورق به سختی عناصر مرزی و هم‌چنین نسبت عرض به ضخامت ورق

۹ـ بررسی جایگزینی ورق فولادی در دیوار برشی فولادی، با مهاربند کششی معادل.

۱ـ۳ـ محتوای فصل‌های بعدی

در ادامه‌ی مطالب ذکر شده در این فصل، در فصل دوم، پیشینه‌ی علمی موضوع و پژوهش‌های انجام شده توسط دیگر محققان، چه در بعد تجربی و چه در بعد تحلیلی، به طور خلاصه ارائه می‌شود. در فصل سوم ابتدا به مبانی تحلیلی کمانش و پس‌کمانش ورق‌ها پرداخته و در ادامه‌ی آن مبانی نظری مربوط به دیوارهای برشی فولادی ارائه می‌شود. فصل چهارم به مدل‌سازی دیوارهای برشی فولادی اختصاص دارد. در این فصل مدل اجزاء محدود غیرخطی دیوارهای برشی فولادی و هم‌چنین مدل ساده شده‌ی آن تشریح شده و پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، از طریق مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل حاضر با دیگر نتایج مشابه به دست آمده از آزمایش یا تحلیل توسط پژوهشگران دیگر، به تحلیل استاتیکی غیرخطی نمونه‌های مورد نظر این تحقیق در فصل پنجم پرداخته خواهد شد. اما در فصل پنجم، ابتدا مختصری از ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود در ارتباط با طراحی لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی ارائه می‌شود و بعد از آن مثال‌های عملی از دیوارهای برشی فولادی مورد تحلیل و طراحی قرار می‌گیرد. هم‌چنین تأثیر پارامترهای مختلف روی منحنی رفتاری دیوارهای برشی فولادی از جمله وجود یا عدم وجود بارهای ثقلی، نوع توزیع بار جانبی، تعداد طبقات، نوع مدل‌سازی و اثر وجود بازشو در پانل، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت در فصل ششم، نتیجه‌گیری کلی از این پایان‌نامه و پیشنهادهایی برای تحقیقات بعدی ارائه می‌شود.

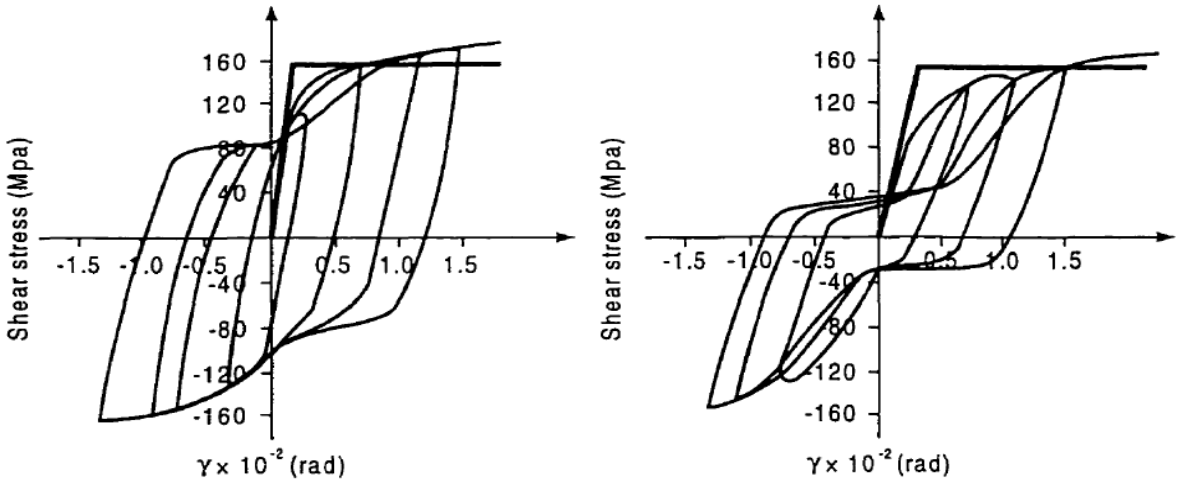
فصل دوم
بررسی پژوهش‌های انجام شده توسط دیگران

۲ـ۱ـ مطالعات تجربی

تاکاهاشی و همکاران [۴] در سال ۱۹۷۳ اولین آزمایشات را در مورد رفتار دیوارهای برشی فولادی به انجام رسانیده‌اند. آنها آزمایشات با بارگذاری متناوب را روی دوازده نمونه‌ی یک طبقه و دو نمونه‌ی دو طبقه انجام داده‌اند. دوازده نمونه‌ی یک طبقه که در مقیاس ۱ به ۴ ساخته شده بودند، به استثنای یک مورد، همگی دارای سخت‌کننده‌های قائم و افقی بودند که به یک یا هر دو طرف ورق فولادی جوش می‌شدند. در این دوازده نمونه، از ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۲/۳، ۳/۲، ۴/۵ میلی‌متر و با ابعاد ۲/۱ متر عرض و ۰/۹ متر ارتفاع، استفاده شده بود که به قاب‌های محیطی مفصلی، محصور می‌شدند. بارگذاری به صورت قطری به نمونه‌ها اعمال می‌شد تا برش تقریباً خالصی را در پانل‌ها ایجاد کند. نمونه‌ها شکل‌پذیری بسیار بالایی از خود نشان دادند به طوری که تغییرشکل زوایا در بعضی از موارد از ۰/۱ رادیان تجاوز می‌کرد. هم‌چنین مقاومت برشی نمونه‌ها با آنچه از معیار تسلیم فن میزس[1] به دست می‌آید، کاملاً تطابق داشت. شکل ۲ـ۱ منحنی‌های هیسترزیس[2] دو نمونه‌ی ساخته شده از ورق با ضخامت ۲/۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. دو نمونه‌ی دو طبقه‌ای که توسط این محققان مورد آزمایش قرار گرفت، در واقع به منظور طراحی ساختمان بلند ۳۵ طبقه‌ی کوبه‌ی ژاپن، که در مقدمه به آن اشاره شد، انتخاب شده بود. این نمونه‌ها در اندازه‌ی واقعی ساخته شده بودند که یکی از آنها بدون بازشو و دیگری شامل بازشو بوده است. ضخامت پانل‌های بدون بازشو حدود ۴/۵ میلی‌متر

[1] Von Mises
[2] Hysteresis

و ضخامت پانل‌های دارای بازشو را حدود ۶ میلی‌متر انتخاب کرده بودند. بار دیگر مقاومت تسلیم برشی به دست آمده از معیار تسلیم فن میزس با نتایج حاصل از آزمایش تطابق بسیار نزدیکی داشت. از نظر این محققان تئوری تیر مرسوم[1] می‌تواند برای محاسبه‌ی سختی و مقاومت تسلیم دیوارهای برشی سخت شده به کار برده شود.



ب ـ سخت شده

الف ـ سخت نشده

شکل ۲ـ۱ رفتار هیسترزیس دیوارهای برشی فولادی سخت نشده و سخت شده[۴]

تیملر و کولاک [۵] در سال ۱۹۸۳ در دانشگاه آلبرتای کانادا آزمایشات با بارگذاری یکنواخت و تناوبی را در مورد دیوارهای برشی فولادی سخت نشده به انجام رسانیده‌اند. نتایج آزمایشات نشان دهنده‌ی رفتاری شکل‌پذیر و اضافه مقاومتی قابل ملاحظه بوده است. برای آزمایشات استاتیکی، شکل‌پذیری و اضافه مقاومت را به ترتیب ۴ و ۲ گزارش دادند. هم‌چنین آزمایش مذکور دقت کافی معادله‌ی پیشنهادی توربورن را برای زاویه‌ی تمایل میدان کششی تأیید نمود.

ترومپاش و کولاک [۶] در سال ۱۹۸۷ یک نمونه‌ی دیوار برشی فولادی سخت نشده‌ی یک طبقه را در اندازه‌ی واقعی، مشابه با نمونه‌ی آزمایشی تیملر و کولاک، تحت آزمایش تناوبی قرار دادند. هدف اصلی آنها از این آزمایش، در حقیقت تأیید مدل پیشنهادی توربورن و همکاران و مبنی بر جایگزینی دیوار برشی فولادی با یک سری اعضای کششی مایل بوده است. ارتفاع نمونه ۲/۲ متر، عرض آن ۲/۷۵ متر و ضخامت ورق فولادی ۳/۲۵ میلی‌متر بوده که تحت بارگذاری متناوب قرار گرفته است. به علت محدودیت‌های سیستم بارگذاری، پس از اعمال ۲۸ دور کامل بارگذاری متناوب، بارگذاری به طور یکنواخت تا ظرفیت نهایی

[1] Conventional beam theory

سیستم اعمال گردید. منحنی‌های هیسترزیس حاصل از آزمایش اگرچه باریک شده[1] بودند اما پایدار باقی ماندند. نهایتاً این نتیجه حاصل شد که مدل میله‌های کششی مایل برای تعیین مقاومت و ظرفیت نهایی دیوارهای برشی فولادی سخت نشده، از دقت کافی برخوردار است. هم‌چنین تأثیر عواملی نظیر نوع اتصالات تیر به ستون، بار محوری ستون‌ها و تنش‌های پسماند ایجاد شده در پانل‌های دیوار برشی در نتیجه‌ی فرایند جوشکاری، در تعیین پاسخ بار- جابجایی سیستم دیوار برشی فولادی بسیار مهم است.

رابرتز و صبوری قمی [۷] در سال ۱۹۹۱ در دانشگاه ولز[2] انگلستان نتایج ۱۶ آزمایش روی پانل‌های برشی فولادی که به صورت قطری بارگذاری شده بودند را ارائه کرده‌اند. نمونه‌های آزمایشی عبارت بودند از ورق‌های فولادی محصور به قاب‌های چهارگانه‌ی مفصلی که در مقیاس کوچک ساخته شده بودند. در بعضی از نمونه‌ها نیز سوراخ تعبیه شده بود. آزمایشات نشان دادند که همه‌ی پانل‌ها، دارای شکل‌پذیری کافی بوده و چهار دوره‌ی غیرارتجاعی بزرگ را تحمل کردند. چرخه‌های هیسترزیس حاصل از آزمایش بیان‌گر شکل‌پذیری بیش از ۷ و بدون هیچ کاهش مقاومتی بودند. یکی از نکات برجسته‌ی این آزمایش‌ها، بررسی تأثیرات سوراخ‌های دیوار، روی سختی و مقاومت آن می‌باشد. نشان داده شد که مقاومت و سختی دیوار با افزایش نسبت قطر سوراخ به بعد آن به صورت خطی کاهش می‌یابد.

یامادا [۸] در سال ۱۹۹۲ در دانشگاه کانسای[3] ژاپن رفتار دو نمونه‌ی دیوار برشی فولادی یک طبقه را تحت بارگذاری تناوبی در راستای قطر، مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار داد. نمونه‌ها ۱/۲ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع داشتند و ضخامت ورق‌های فولادی ۱/۲ و ۲/۳ میلی‌متر بوده است. پانل‌های فولادی کمانش یافته، تغییرشکل‌های بزرگی را تجربه کردند؛ در حالی که کاهش مقاومت آنها حداقل بود. گسیختگی نهایی در پایه‌ی قاب‌های صلب مرکب محیطی رخ داد. قاب‌های مرکب محیطی شامل مقاطع فولادی بال‌پهن محصور در ستون بتن آرمه، می‌شدند. محققان دریافتند که سختی نسبی پانل‌های فولادی، در مقایسه با سختی قاب محیطی، در رفتار کلی سیستم دیوار برشی فولادی بسیار مهم است. به‌هرحال رفتار نمونه‌ها در این آزمایشات بسیار شکل‌پذیر بوده و میدان کشش در امتداد قطر به وجود آمد.

کاکسیز، الگالی و چن [۹] در سال ۱۹۹۳ در ایالات متحده‌ی آمریکا، مطالعات تحلیلی و تجربی در مورد دیوارهای برشی فولادی داشته‌اند. مطالعات تجربی آنها شامل آزمایشات تناوبی بر روی شش نمونه‌ی سه طبقه‌ی یک دهانه و تحت اثر بار افقی در سطح بام بوده است. این نمونه‌ها که بدون سخت‌کننده بودند، در مقیاس ۱ به ۴ ساخته شده بودند. براساس رفتار مشاهده شده طی این آزمایشات، محققان به این نتیجه

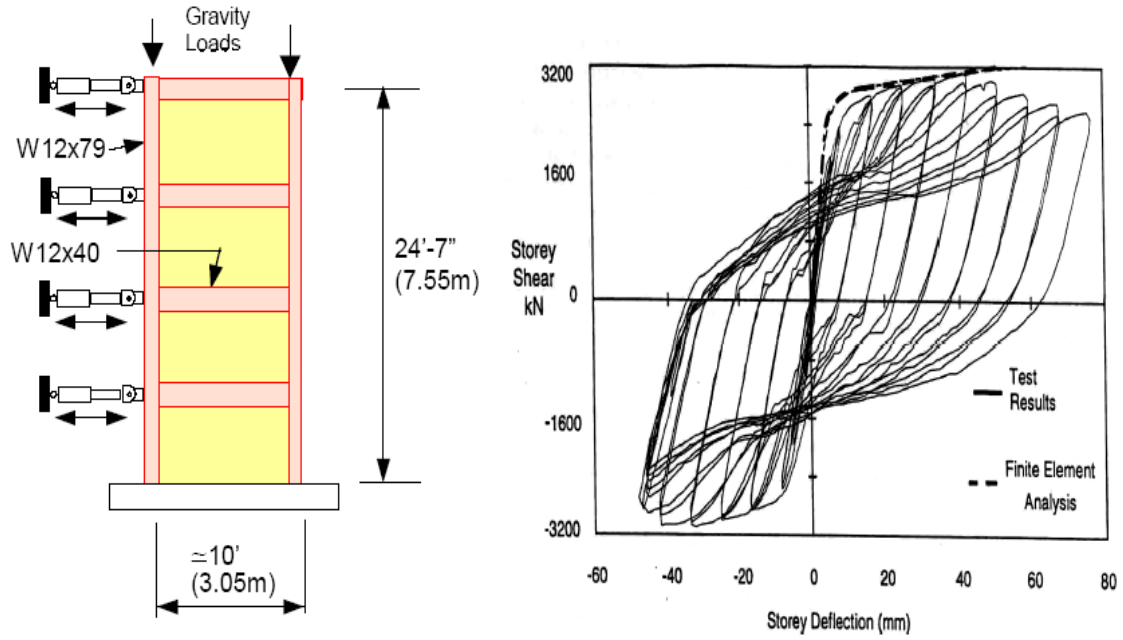
[1] Pinched
[2] Wales
[3] Kansai

رسیدند که وقتی از یک ورق نازک سخت نشده به عنوان دیوار برشی فولادی استفاده شود، رفتار غیرارتجاعی سیستم با تسلیم ورق فولادی شروع شده و به طور عمده، در نتیجه‌ی کشیدگی ورق و تشکیل میدان کشش قطری، کنترل می‌شود. هم‌چنین وقتی از ورق‌های ضخیم‌تر استفاده شود، رفتار غیرارتجاعی سیستم توسط ستون‌ها کنترل می‌شود و ظرفیت نمونه‌ی با ورق ضخیم‌تر به ناپایداری ستون‌ها محدود می‌شود و تنها افزایش ناچیزی در مقاومت سیستم در نتیجه‌ی افزایش ضخامت دیوار به وجود می‌آید. بر این اساس، آنها پیشنهاد کردند که برای طراحی سیستم باربر جانبی یک ساختمان با استفاده از دیوارهای برشی فولادی، از ورق‌های نازک‌تر در حد امکان استفاده شود به گونه‌ای که بتواند در برابر یک زلزله‌ی ضعیف و یا باد شدید به صورت ارتجاعی رفتار کند و در برابر یک زلزله قوی و قبل از ناپایداری ستون‌ها، مقاومت پس از کمانش خود را توسعه دهد. و این یک فلسفه‌ی منطقی برای طراحی است.

سوجی و یامادا [۱۰] در سال ۱۹۹۶ نتایج آزمایشات یکنواخت و تناوبی را در مورد چهارده نمونه‌ی دیوار برشی فولادی گزارش داده‌اند. نمونه‌ها در مقیاس ۱ به ۱۰ و به صورت دو طبقه ساخته شده بودند. قاب محیطی عبارت بود از یک قاب مرکب صلب که شامل مقاطع فولادی بال پهن محصور در ستون‌های بتن آرمه بوده است. نمونه‌های آزمایش شامل نسبت‌های عرض به ارتفاع مختلف ۱:۱ تا ۱:۲ و هم‌چنین ضخامت‌های مختلف از ۰/۴ تا ۱/۲ میلی‌متر بوده‌اند. همانند آزمایش تیملر و کولاک، بار افقی در ا متداد تیر بین طبقه اعمال می‌شد. مقاومت حداکثر دیوارهای برشی فولادی تحت بارگذاری یکنواخت، متناظر با زاویه‌ی تمایل طبقه، از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ رادیان به دست آمد و کاهش بسیار اندکی در مقاومت آنها، طی مقادیر بزرگ‌تر از این زوایا، مشاهده شد. تحت بارگذاری تناوبی، ضخامت ورق‌ها سهم عمده‌ای در مقاومت کلی نمونه‌ها و هم‌چنین شکل منحنی‌های هیسترزیس دارند. ویژگی باریک‌شدگی برای ورق‌های نازک کاملاً مشهود بود [۱۰].

درایور و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۷ در کانادا رفتار یک نمونه‌ی چهار طبقه‌ی دیوار برشی فولادی که با مقیاس ۱ به ۲ ساخته شده بود را مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار داده‌اند. این نمونه‌ی چهار طبقه، دارای یک دهانه و ورق‌های فولادی با ضخامت ۳/۴ و ۴/۸ میلی‌متر بوده است. ورق‌های فولادی جوش شده به قاب خمشی ویژه‌ی محیطی، تشکیل یک سیستم باربر جانبی دوگانه را داده بود. بارهای افقی یکسان در سطوح طبقات اعمال می‌شد و همزمان نیز بار ثقلی در بالای ستون‌ها اعمال می‌گردید. شکل ۲ـ۲ شماتیک نمونه‌ی آزمایشی و منحنی‌های هیسترزیس مربوط به اولین طبقه را نشان می‌دهد. نمونه ۳۰ دوره‌ی بارگذاری را در طول آزمایش تحمل کرد که ۲۰ دوره‌ی آن مربوط به ناحیه‌ی غیرارتجاعی می‌شد. قبل از گسیختگی

نمونه، تغییرشکل پایین‌ترین طبقه، ۹ برابر تغییرشکل تسلیم بود. نمونه‌ی دیوار برشی با گسیختگی ناگهانی پایه‌ی ستون سمت راست منهدم شد. پژوهشگران مذکور این مد گسیختگی را به کمانش موضعی ستون که در طول ۲۰ چرخه به وجود آمده بود و هم‌چنین تغییرشکل بزرگ ایجاد شده در نواحی کمانش یافته‌ی بال ستون مربوط می‌دانند. مسلماً این مد گسیختگی مطلوب نبوده و باید از آن اجتناب نمود. این پژوهشگران پیشنهاد کردند که برای جلوگیری از کمانش موضعی بال ستون و هم‌چنین در قسمت‌هایی که انتظار می‌رود رفتار کاملاً پلاستیک رخ دهد، باید از سخت‌کننده استفاده نمود. این کار بایستی انجام شود؛ حتی اگر مقاطع طراحی شده براساس معیارهای طراحی پلاستیک انتخاب شده باشند. این سخت‌کننده‌ها به صورت افقی و بین بال‌های ستون به کار می‌روند. به هر حال حتی با گسیختگی زود هنگام پایه‌ی ستون در این نمونه، رفتار تناوبی، اضافه مقاومتی در حدود ۱/۳ و شکل‌پذیری بیش‌تر از ۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۲ـ۲ شماتیک نمونه‌ی آزمایشی و منحنی‌های هیسترزیس مربوط به اولین طبقه، درایور و همکاران [۱۱]

رضایی [۱۲] در سال ۱۹۹۹ و لوبل و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه بریتیش کلمبیای کانادا، آزمایشات میز لرزان دینامیکی و شبه استاتیکی را روی نمونه‌های دیوار برشی فولادی با مقیاس‌های مختلف به انجام رسانیده‌اند. در این مطالعات پارامترهای مختلفی نظیر مقاومت کلی، سختی پس از کمانش ارتجاعی، اندرکنش بین عملکرد قاب و رفتار پانل فولادی، تأثیر صلبیت تیر و ستون، تشکیل عمل میدان کشش قطری همراه با کمانش فشاری قطری ورق فولادی و پایداری منحنی‌های هیسترزیس، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده، در حقیقت بیانگر مدل‌های یک دهانه از هسته‌ی یک ساختمان اداری و

مسکونی بودند و با مقیاس ۱ به ۴ ساخته شده بودند. بارهای برشی متناوب به دو نمونه‌ی یک طبقه اعمال شد. قاب‌های مرزی در نمونه‌ها عبارت بودند از قاب‌های خمشی؛ و در نتیجه تشکیل یک سیستم دوگانه می‌دادند. نمونه‌های یک طبقه تغییرشکل‌های غیرارتجاعی بزرگی را تجربه نمودند. شکل‌پذیری این نمونه‌ها بیش از ۶ و اضافه مقاومت، حدود ۱/۵ بوده است. محققان به این نتیجه رسیدند که دو نمونه‌ی یک طبقه، ثابت کردند که ورق‌های فولادی، تقاضای چرخشی اتصالات تیر به ستون را کاهش می‌دهند. در آزمایشات میز لرزان یک نمونه‌ی چهار طبقه به کار برده شد. ابعاد هر طبقه مشابه نمونه‌های یک طبقه بوده و سیستم باربر جانبی همان سیستم دوگانه بوده است. در هر پانل نمونه، قبل از آن که ناپایداری کلی، ناشی از تسلیم ستون، منجر به گسیختگی آن شود؛ شکل‌پذیری برابر ۱/۵ به دست آمد. هم‌چنین این نمونه، از نمونه‌های یک طبقه انعطاف‌پذیرتر بود و اضافه مقاومتی حدود ۱/۲ از خود نشان داد.

آستانه اصل و ژائو [۱] در سال ۲۰۰۱ در دانشگاه برکلی کالیفرنیا آزمایشات دیوار برشی فولادی را روی دو نمونه‌ی دو طبقه و سه طبقه و با مقیاس ۱ به ۲ انجام دادند. دیوار برشی فولادی در هر دو نمونه شامل ورق فولادی با ضخامت ۹/۵ میلی‌متر و از نوع A36 بوده است. تمام پیچ‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از نوع پیچ‌های با مقاومت بالای A490 بوده که به صورت اصطکاکی به کار برده شدند. پیچ‌های مورد استفاده در وصله‌های ورق فولادی به قطر ۱۵/۶ میلی‌متر بوده که براساس مشخصات AISC-99 سفت می‌شدند. اتصال دیوار برشی فولادی به تیر و ستون‌های مرزی به وسیله‌ی جوش‌های گوشه انجام شد. در نمونه‌ها و هم‌چنین در ساختمان واقعی، تیرهای اصلی پیوسته بوده و ستون‌ها، به بال‌های بالا و پایین این تیرهای اصلی جوش داده می‌شدند. سخت کننده‌های جان نیز در امتداد بال‌های ستون به جان تیرهای اصلی جوش شدند. ستون‌ها نیز در وسط ارتفاع هر طبقه دارای وصله‌های کارگاهی پیچ شده بودند. در این قسمت از پیچ‌های به قطر ۲۲ میلی‌متر استفاده شده بود. ستون‌های لوله‌ای فولادی پر شده با بتن دارای قطری برابر ۶۱۰ میلی‌متر و با ضخامت ۷/۹ میلی‌متر بوده است. در سیستم واقعی ساختمان، ستون‌های لوله‌ای مقدار زیادی از بار ثقلی را تحمل می‌کنند. برای نشان دادن فشار ثقلی از ۸ میلگرد به قطر ۳۸ میلی‌متر، که در ستون لوله‌ای و قبل از ریختن بتن تعبیه شده بود، استفاده شد. محرک فوقانی از ظرفیت کشش ـ فشار ۷۵۰ تن و جابجایی ۳۵۰ میلی‌متر در دو جهت برخوردار بوده است. نمونه‌ی اول بسیار شکل‌پذیر و مطلوب رفتار نمود. تا رسیدن به نسبت تغییرشکل نسبی طبقه (دریفت) حدود ۰/۷ درصد، نمونه تقریباً به صورت ارتجاعی عمل کرد. در این سطح از دریفت، تعدادی خطوط تسلیم روی ورق دیوار و هم‌چنین ستون‌های داخلی ظاهر شد. وقتی نسبت دریفت به ۲/۲ درصد رسید، قطر فشاری در پانل‌های دیوار کمانش کرد و ستون‌های داخلی دچار