طراحی مبتنی بر عملکرد در آسمان خراش آبنو هاروکاس با ارتفاع ۳۰۰ متر

چکیده

در طراحی یک آسمان خراش ۳۰۰ متری که انتظار می‌رفت بلندترین ساختمان در ژاپن (یک کشور زلزله به شدت زلزله خیز) باشد، تصمیم گرفته شد که طراحی مبتنی بر عملکرد در مقیاس کلی برای تعیین موارد اضافی و همچنین تعریف مشخصات جدید با استفاده از تکنیک جدید زیر انجام شود. از تکنیک‌های جدید به این دلیل استفاده می‌شود که تکنیک‌ها و مصالح موجود برای ارضای معیارهای طراحی در مقیاس بزرگ، ساختمان‌هایی با شکل نامنظم و صرفه جویی در مصالح کافی نیستند و همچنین برای بازسازی ساده یک ساختمان موارد زیر مورد نیاز هستند:

- مصالحی با استحکام بالا: ستون‌های CFT ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و فولاد
- سیستم‌های اتصال جدید: ترکیبی از دیافراگم بیرونی و مفاصل آلومینیومی؛
- میراگرهای مختلف از جمله دیوارهای ساخته شده از ورق فولادی موج دار، میراگر اصطکاکی دورانی، میراگر روغنی و میراگر جرمی تنظیم شده پاندول (ATMD)
- سیستم پی: فونداسیون گسترده شمعی، دیوار حائل ساخته شده از سیمان و خاک و شمع‌های بطری شکل CFT با مقاومت بالا

۱. بررسی اجمالی

آبنو هاروکاس بلندترین آسمان خراش ژاپن با ارتفاع ۳۰۰ متر است که ساخت آن در مارس ۲۰۱۴ به پایان رسید (عکس ۱). این پروژه در اوزاکا، آبنو که یکی از شهرهای غربی ژاپن و هفتمین شهر بزرگ جهان است، قرار دارد. آبنو یکی از مناطق بزرگ اوزاکا است، این منطقه به سرعت در حال رشد است و بیشترین توجه را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است.

شکل ۱. نمای شمال غربی

آبنو هاروکاس روی ایستگاه Abenobashi واقع شده که متعلق به شرکت خصوصی راه آهن KINTETSU است. این ساختمان یک شهر عمودی غول آسا با مساحت ناخالص حدود. ۲۱۲،۰۰۰ متر مربع است. این آسمان خراش ۶۰ طبقه بالاتر از سطح زمین و ۵ طبقه زیر زمین، دارد. بخش‌های گوناگون آن عبارت‌اند از: یک ایستگاه ترمینال، یک فروشگاه، موزه هنر، ادارات، هتل، سکوی بازدید، پارکینگ و غیره. هیچ ساختمان دیگری در این مقیاس در هیچ کجای دنیا روی یک ایستگاه ساخته نشده است.

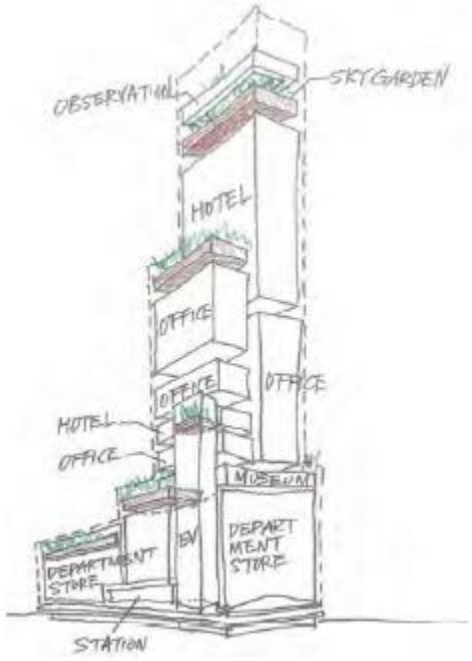
ویژگی‌های خاص آبنو هاروکاس

آسمان خراش آبنو هاروکاس (از این پس هاروکاس)، به طور کلی دارای سه ویژگی قابل توجه زیر است:

(۱) این آسمان خراش، یک شهر عمودی بسیار پیچیده است.

(۲) ساختمان‌های موجود در این آسمان خراش بازسازی شدند.

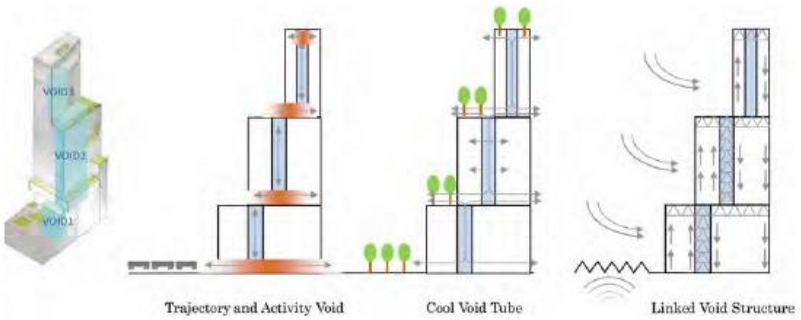
(۳) قوی‌ترین میراگر ساختمان برای این اسمان خراش که در یک منطقه به شدت زلزله خیز و در معرض گردباد قرار دارد، ساخته شد.



شکل ۲. دیاگرام آبنو هاروکاس

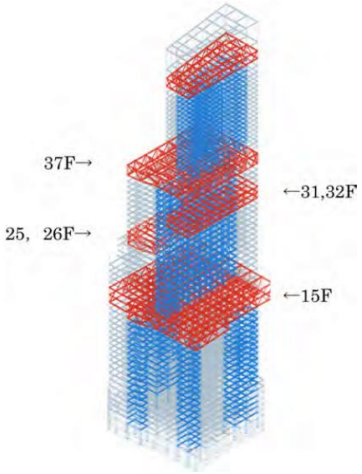
۲,۱. آسمان خراش‌هایی از نوع شهرهای عمودی فراتر از مرزهای ساختمان‌های چند منظوره هستند

بسیاری از آسمان خراش‌های چند منظوره، کارکردهای متفاوتی دارند که منجر به یک حجم همگن شامل سطوح تکرار شده متصل به هم می‌شود. از سوی دیگر، هاروکاس جهت به حداکثر رساندن عملکرد ایستگاه ترمینال و بسیاری از کارکردهای دیگر، طراحی شده بود (شکل ۲). هاروکاس نه تنها سبب راحتی ایستگاه و تجدید حیات محلی می‌شود، بلکه انتظار می‌رود که به عنوان دروازه اوزاکا از فرودگاه بین‌المللی کانسای تبدیل شود.

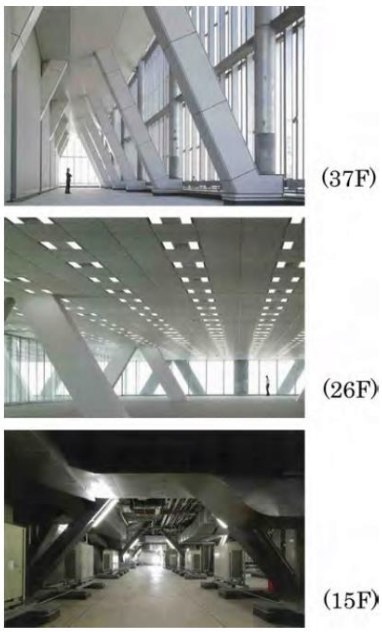


شکل ۳. زیرساخت و اجزای معماری هاروکاس

علاوه بر این، هاروکاس نه تنها به دلیل تنوع فعالیت‌ها و کارکردهای شهری، بلکه زیرساخت‌های ایجاد شده به واسطه آن نیز بسیار حائز اهمیت است. همه این عوامل به لحاظ عملکردی، زیست محیطی و سازه‌ای با یکدیگر در ارتباط هستند (شکل ۳).



شکل ۴. سازه توخالی



شکل ۵. طبقات دارای کمربند خرپایی

به لحاظ زیست محیطی، فضاهای خالی در ساختمان برای اهدافی مانند تأمین روشنایی روز، تهویه و تبادل حرارت استفاده می‌شوند. به لحاظ سازه‌ای، حفره‌های عمودی به پایه‌های خارجی افقی متصل هستند (شکل ۴ و ۵).

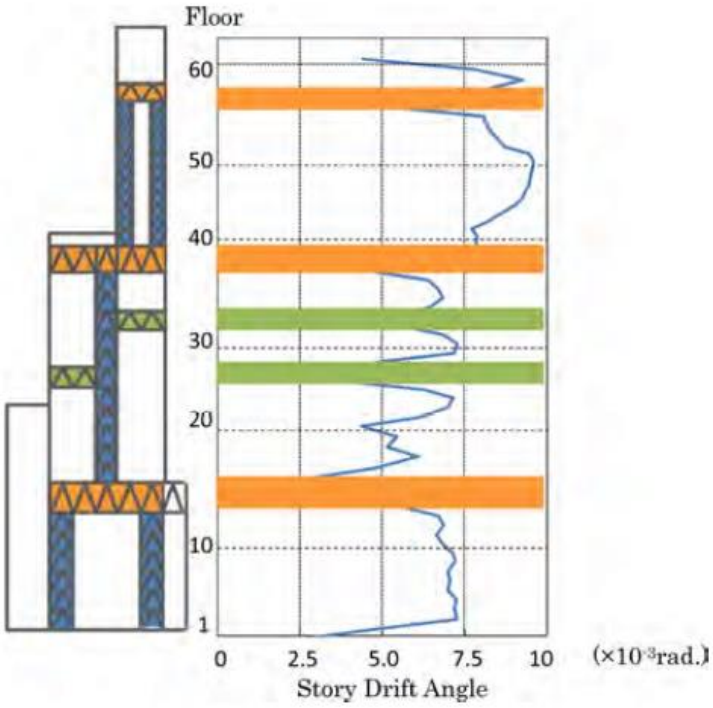
برای طبقات کم ارتفاع، میراگر ارتعاشی به صورت متمرکز انرژی ناشی از تغییر شکل برشی بزرگ را جذب می‌کند که راه پله در پشت محوطه فروشگاه به صورت سطوح چهار گوشه و به عنوان یک حفره عمودی (شکل ۶) استفاده می‌شود.

در طبقه‌هایی با ارتفاع متوسط، یک هسته در مرکز فضاهای خالی اداری، قرار گرفته است. بسیاری از آسمان خراش‌ها یک حفره بتنی بسته واقع در مرکز خود دارند. با این حال، هاروکاس از فضای خالی تنها برای مقاومت در برابر نیروی جانبی استفاده نمی‌کند، بلکه به عنوان یک فضای فاصله انداز بین فضاهایی با کاربری‌های مختلف نیز استفاده می‌کند (شکل ۷).

این طبقات دارای دو سیستم مهار بازویی در طبقات ۱۵ و ۳۷ و دو طبقه مهاربندی شده بین آن‌ها یکی در طبقه ۲۵ و دیگری در طبقه ۳۱ است. سیستم مهارهای بازویی تغییر شکل معادل انحنا در بالاترین مود ارتعاشی را خنثی می‌کند و به طور مؤثر سبب کاهش پاسخ‌های کل ساختمان (شکل ۸) می‌شود. به لحاظ زیست محیطی، هدف ما انتقال هوای سرد در حال حرکت در این طبقات کم ارتفاع؛ از طریق تراوش به راهروها و فضاهای اداری خالی مجاور است. سیستم مهارهای بازویی طبقه ۳۷ دارای یک کاربرد دیگر است به طوری که به عنوان یک دریچه ورود هوای سرد تهویه طبقات بلند سازه عمل می‌کند. حفره طبقات بالا سبب عبور هوا سرد در طبقه ۳۷ شده و سبب گسترش در جهت جانبی می‌شود. همچنین این خلأ یک فضا برای نصب هسته میراگر خرپایی جهت حفظ تغییر شکل هتل همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، می‌شود. این نوع از میراگر ترکیبی از شفت‌ها است که مشابه ستون‌های اصلی مورد استفاده در معابد قدیمی (پاگودا) پنج طبقه ژاپنی و ساختمان‌های دیگر قرار گرفته‌اند و میراگر روغنی در فضای اطراف قاب هتل نصب شده است؛ بنابراین، ادغام حفرات در طبقات کم، متوسط و بلند سبب ایجاد کاربرد چندگانه به صورت زیرساخت‌های کاربردی، محیط زیستی و سازه‌ای و به خصوص در ساختمان‌های پیچیده در فضای محدود در مرکز آن، می‌شود.

شکل ۶. حفره پلکان طبقات پایین

شکل ۷. عکس پل خرپایی (چپ) و حفره طبقات میانی (راست)

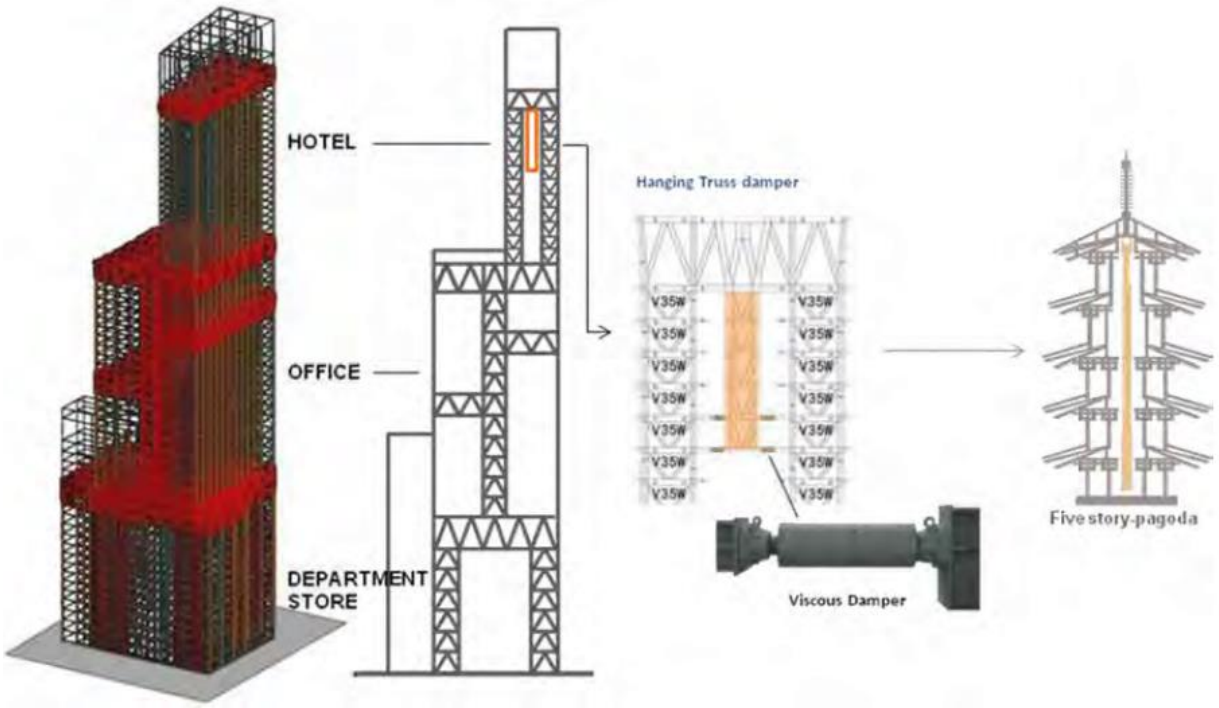


شکل ۸. حداکثر زاویه تغییر مکان جانبی طبقات

۲,۲. ساختمان بازسازی شده

هاروکاس یک آسمان خراش بازسازی شده در بالای ایستگاه ترمینال است. این ساختمان در ضلع شرقی یک ساختمان بلند قرار دارد که به بخش‌های کم ارتفاع فروشگاه هاروکاس از طریق فضای خالی بزرگ، متصل می‌شود. فضای ایجاد شده بین این دو ساختمان که در شکل ۱۰ نشان داده شده، سبب ایجاد افزایش میدان دید بین دو بخش جدید و قدیمی و همچنین ایجاد یک فضای ۳ بعدی عمودی، می‌شود. برای ملاحظات زیست محیطی، از این حفره برای تهویه چند مرحله‌ای استفاده می‌شود: طبقات با خروج حرارت از فضای فروشگاه و خروج گرمای شبانه از داخل سقف، خنک می‌شوند. این هوا برای خنک کردن اتاق تأسیسات در طبقه ۱۵ خرپایی، به سمت بالا می‌رود.

به لحاظ سازه‌ای، این فضای خالی اجازه می‌دهد که این دو ساختمان در صورت زلزله حرکات متفاوتی، داشته باشند. کف و پله برقی قابل حمل که به ساختمان متصل است، در حرکات زلزله سطح ۲ تا ۱,۵ برابر بیشتر، از برخورد ساختمان‌ها با یکدیگر جلوگیری می‌کند.



شکل ۹. نمای مفهومی و توصیفی اتصال میراگر خرپایی

۲,۳. قوی‌ترین میراگر لرزشی ساختمان

ژاپن در منطقه‌ای قرار دارد که هم زمین لرزه و هم بارهای طراحی باد، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، بزرگ‌ترین هستند و بدون اغراق می‌توان گفت که ژاپن از نظر رخداد این حوادث، در جهان اول است. با توجه به نقشه مخاطرات طبیعی جهان، نشان داده شده در شکل ۱۱، شدت لرزه‌ای ژاپن، بالاترین مقدار یعنی سطح IX را در مقیاس شدت مرکالی (MMI) دارد و تقریباً برابر ۴۷۵ گال می‌باشد. حداکثر شتاب لرزه‌ای با دوره بازگشت حدود ۵۰۰ سال، برای طراحی بار لرزه‌ای استفاده می‌شود.

برای طراحی بار باد در ژاپن، میزان فشار ($V^{0.2}$ * ۰,۶) با توجه به سرعت باد طرح مرجع با دوره بازگشت ۵۰ سال تقریباً برابر ۷۰۰ N / M2، محاسبه می‌شود که بزرگ‌تر از داده‌های به دست آمده از هر منطقه دیگر جهان است.

در شرایط فوق برای نیروهای خارجی، معیار طراحی هاروکاس طوری ایجاد شده که معیارهای طراحی آسمان خراش‌های مرسوم ممکن است نیاز به یک درجه ارتقا داشته باشند تا اجازه هیچ گونه تغییر شکلی به اعضا تحت نیروی خارجی سطح ۲ داده نشود؛ بنابراین، ایمنی لرزه‌ای و باد این ساختمان به واسطه میراگر لرزشی بسیار بالا است.

همچنین ایمنی ساختمان در برابر زلزله ۱,۵ برابر قوی‌تر از زلزله سطح ۲ و در برابر زلزله‌های اقیانوسی و محلی با توجه به شرایط محلی، در نظر گرفته شده است از آنجا که میزان میرایی میراگر لرزه‌ای ساختمان، زیاد است ستون‌ها مجاز به تغییر شکل پلاستیک در چنین زلزله‌هایی به جز در برخی موارد نیستند (جدول ۱).

برای مطالعات بیشتر به نسخه سپتامبر ۲۰۱۲ مجله بین‌المللی ساختمان‌های بلند مرتبه برای PBSD (طراحی بر اساس عملکرد لرزه‌ای) و نسخه سپتامبر ۲۰۱۳ این مجله برای PBWRD (طراحی بر اساس عملکرد مقاوم در برابر باد) مراجعه کنید.

۳. روش‌های دستیابی به مفاهیم طراحی

۳,۱. پی گسترده شمعی ظرفیت بالا با دیوار پیوسته سیمانی- خاکی

از آنجا که هاروکاس یک ساختمان بازسازی شده در بالای ایستگاه ترمینال در قلب شهر است، ساختمان تقریباً منطقه را همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده پوشش می‌دهد. در چنین شرایطی، فونداسیون سازه تحت محدودیت زیاد و نیاز به کارایی بالا قرار می‌گیرد؛ بنابراین از پی گسترده شمعی برای این ساختمان استفاده می‌شود که اجری آن به روش معکوس و با استفاده از ستون زیرزمین، انجام می‌شود؛ بنابراین، سازه فوقانی، با بیش از ۵۰ طبقه قبل از نصب پلیت تحتانی ساخته می‌شود. بر این اساس، شمع حدود ۹۰ درصد از نیروهای محوری ستون را تحمل می‌کند و صفحه پایینی نیروهای باقی مانده (تنها در حدود ۱۰٪) را تحمل می‌کند. یک شمع به صورت نشان داده شده در شکل ۱۲ در هر ستون واقع شده است، اما اسکلت مدفون در خاک ساختمان‌های موجود در خاک تحت شرایط دشواری برای حفر شمع‌ها ایجاد می‌کند. در نتیجه از روش ساخت و ساز SMW استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲، نشان داده شده، نیروهای محوری ستون به هسته فولادی خاک دیوارهای حائل از طریق میله‌های بیرونی دیوار زیرزمین و در نهایت به زمین منتقل می‌شود. روش SMW به دلیل اینکه حدود ۴۰ درصد از خاک می‌تواند مورد استفاده مجدد قرار گیرد، سازگار با محیط زیست است.

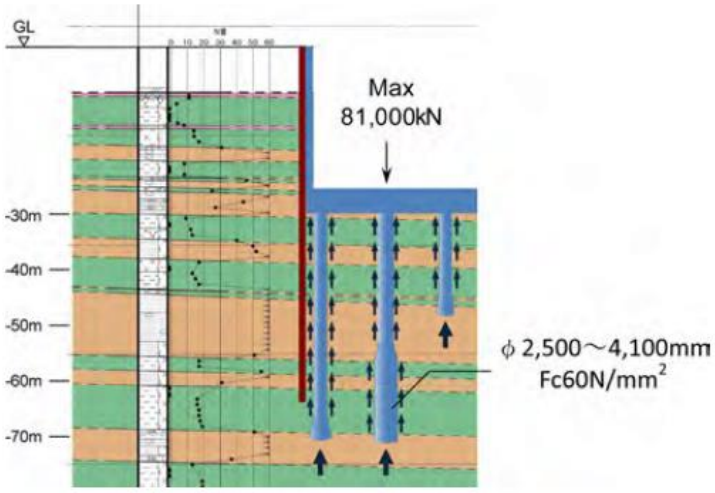
شکل شمع‌های زیر ستون‌هایی که نیروهای محوری زیادی تولید می‌کنند، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده، برای به حداکثر رساندن نیروهای اصطکاکی شمع‌ها به شکل بطری است. بتن بسیار مقاوم (Fc60) برای ساخت شمع‌های قوی در ژاپن استفاده شده است.

۳,۲. ستون CFT بسیار مقاوم

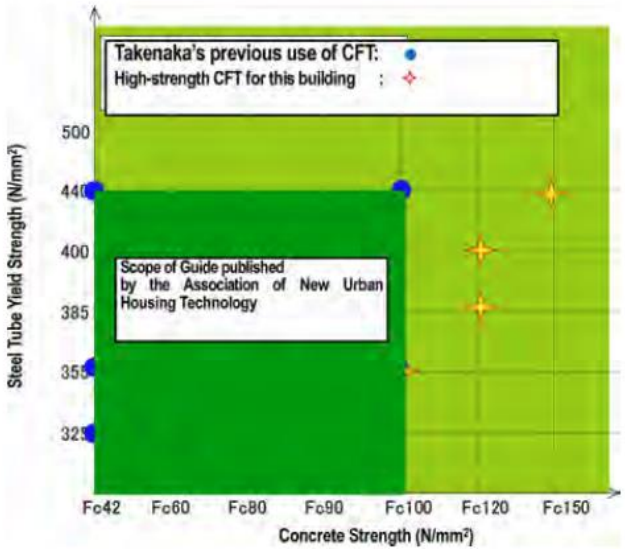
برای به حداقل رساندن ابعاد ستون، احداث هاروکاس در فضای محدود و طبق چیزی که در بخش ۳,۱ گفته شد، کاملاً ضروری بود؛ بنابراین، ستون‌های لوله‌ای فولادی پر از بتن ("CFT") FC150 و فولاد آلیاژی با مقاومت بالا برابر ۴۴۰ نیوتن بر میلی متر مربع و مقاومت کششی برابر ۵۹۰ نیوتن بر میلی متر مربع در این ساختمان به منظور اطمینان از ایمنی در ستون در برابر نیروهای محوری زیاد ساخته شد. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده، آن‌ها خارج از محدوده قابل اجرا در دستورالعمل ژاپن بودند. بر این اساس، معادلات محاسبه ظرفیت تغییر شکل در راهنما نمی‌تواند اعمال شود؛ بنابراین، مشخصات با استفاده آزمایش تعیین می‌شود.

در آزمایش بارگذاری (شکل ۱۵) قبل از طراحی، نیروی محوری از 0.7cNu (ظرفیت باربری در فشار) به 0.5 Nt (ظرفیت باربری در کشش) به نسبت نیروهای برشی افزایش یافت. در نتیجه، ظرفیت تغییر شکل برابر با مقدار زاویه عضو یعنی ده هزارم رادیان شد (شکل ۱۶).

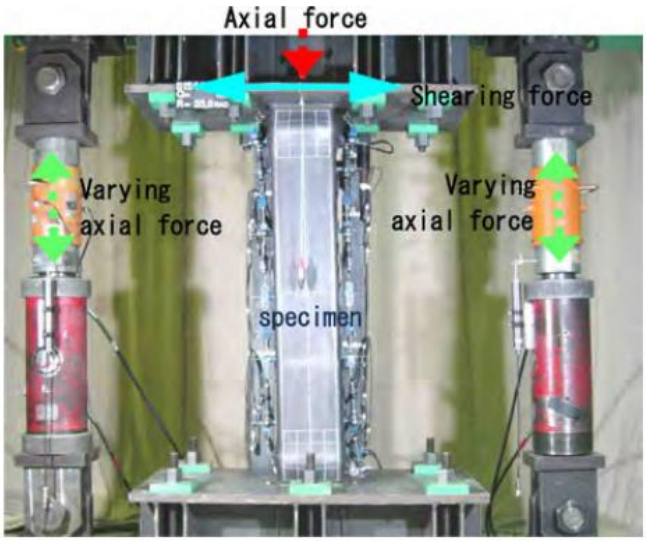
مقدار تجربی را می‌توان در صورتی که مقاومت بتن مورد ارزیابی در ضریب کاهش مقاومت ضرب شده باشد همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده، تعیین کرد.



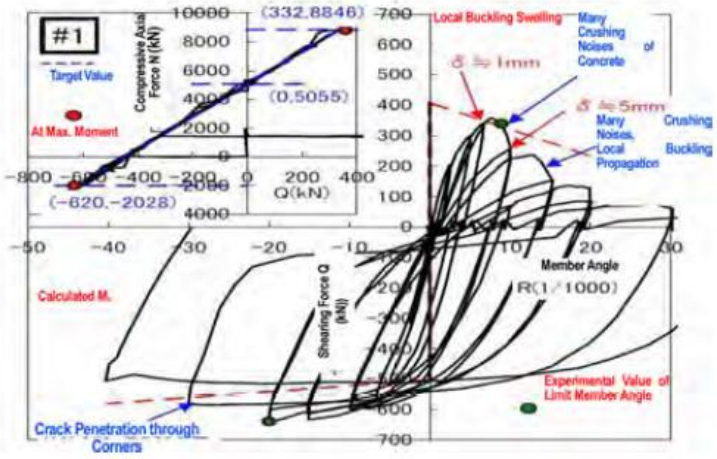
شکل ۱۳. نمای شمع‌ها



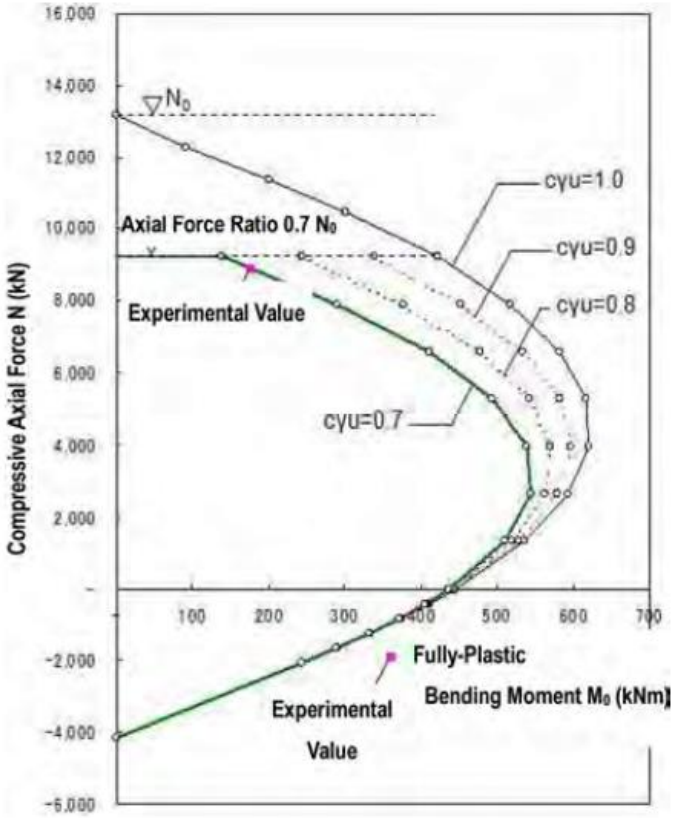
شکل ۱۴. محدوده دستورالعمل



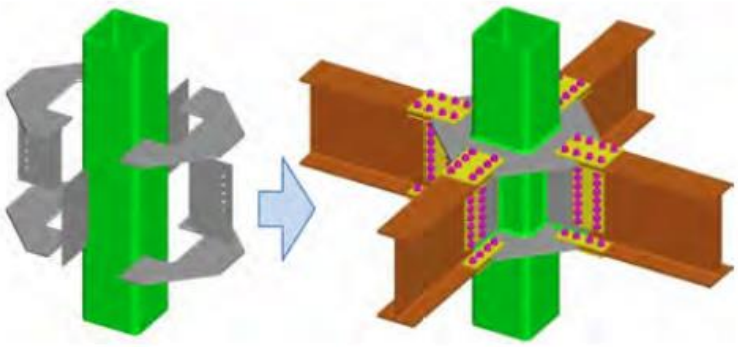
شکل ۱۵. شکل آزمایش بارگذاری



شکل ۱۶. رابطه بار – تغییر شکل



شکل ۱۷. رابطه همبستگی M-N

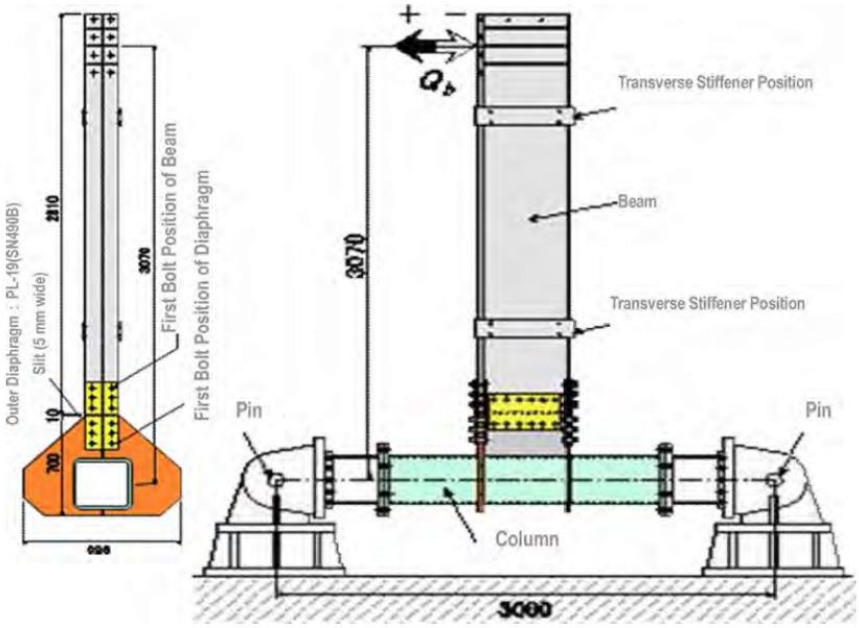


شکل ۱۸. انشعاب دیافراگم بیرونی

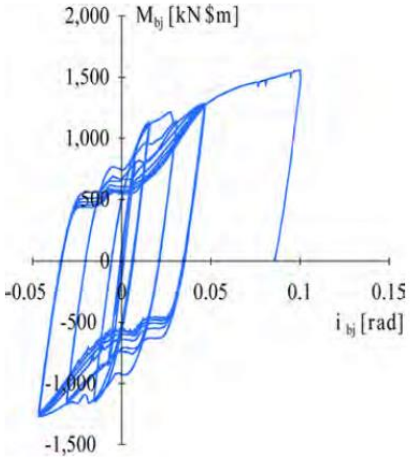
۳,۳. سیستم اتصال جدید

در این ساختمان از یک سیستم اتصال جدید شامل دیافراگم بیرونی و اسپری درزگیر آلومینیومی استفاده شده است، برای استفاده از خصوصیت خود تراکم از بتن با مقاومت بالا که در ۳,۲ بیان شده، استفاده شد.

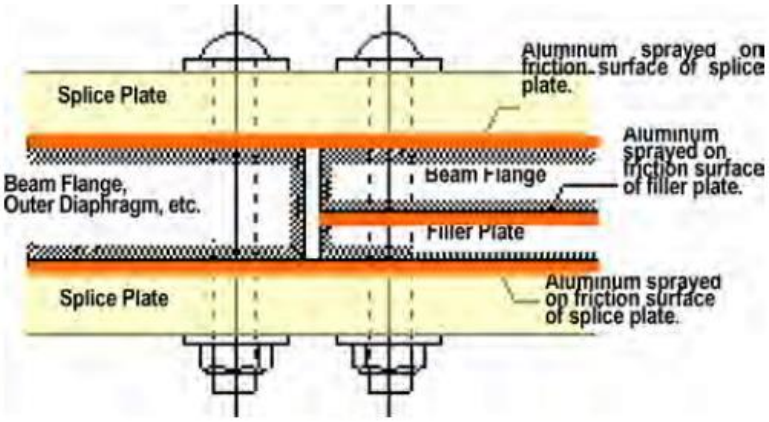
دیافراگم بیرونی این ساختمان از نوع انشعابی است و توسط پشت بندهای موربی به ستون جوش داده شده است (شکل ۱۸). آزمایش اعمال نیروی افقی در یک بخش از قاب که به یک تیر متصل است (از طریق اسپری)، انجام شد. مشاهده شد که تسلیم در پیچ رخ داد (شکل ۱۹ و ۲۰).



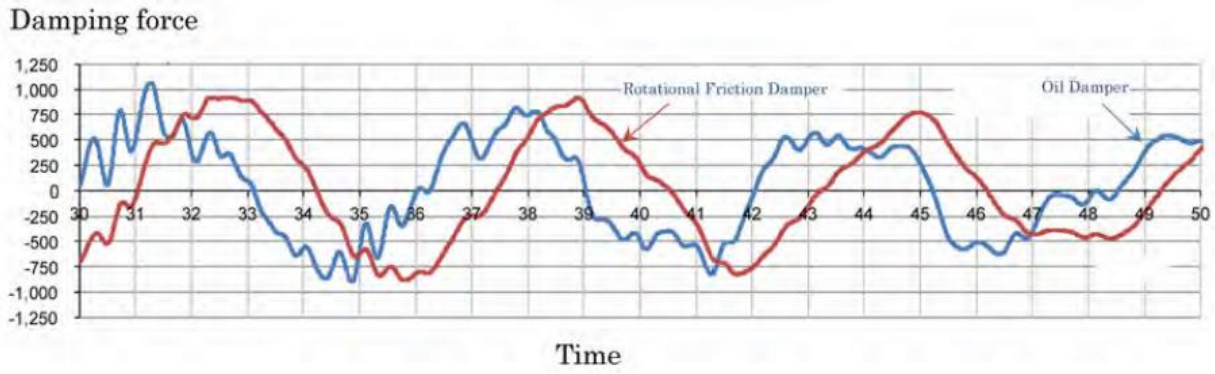
شکل ۱۹. تست – دیافراگم بیرونی



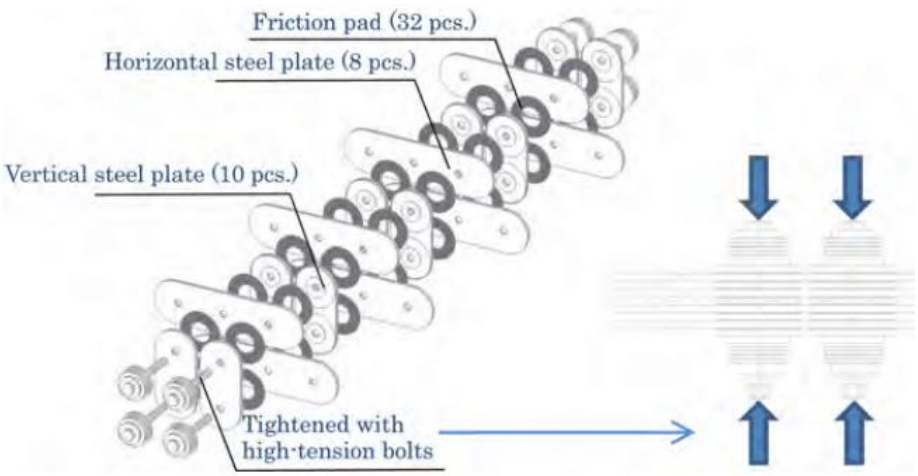
شکل ۲۰. رابطه بار – تغییر شکل



شکل ۲۱. جزییات اتصال با اسپری درزگیر

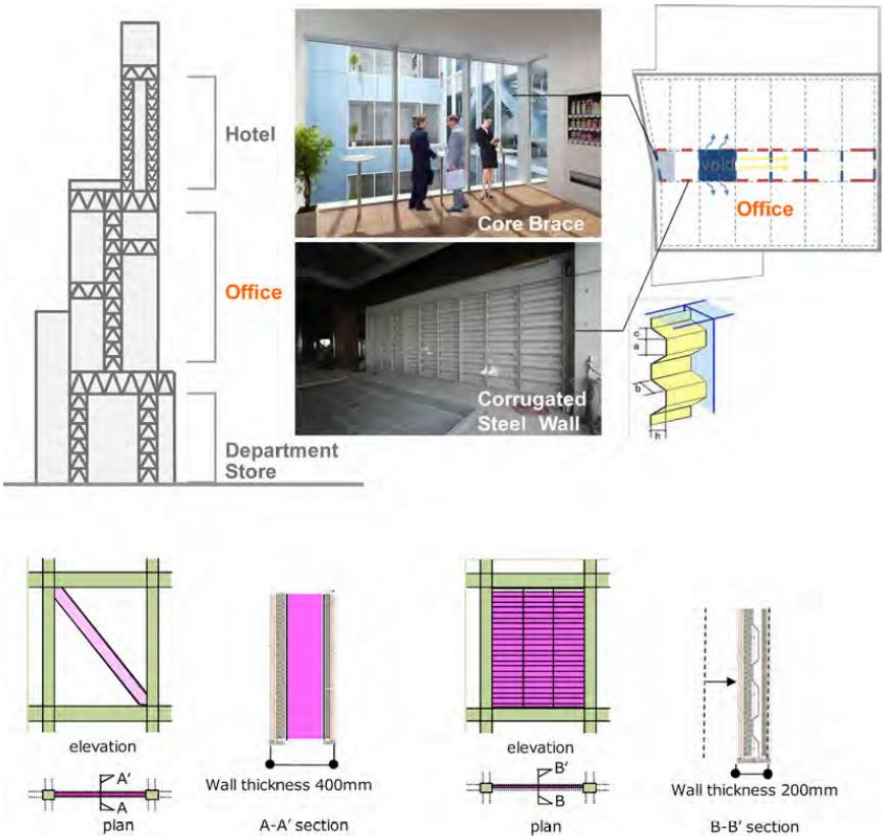


شکل ۲۲. دو نوع از میراگرها با تأخیر زمانی بین زمان مؤثر آن‌ها.

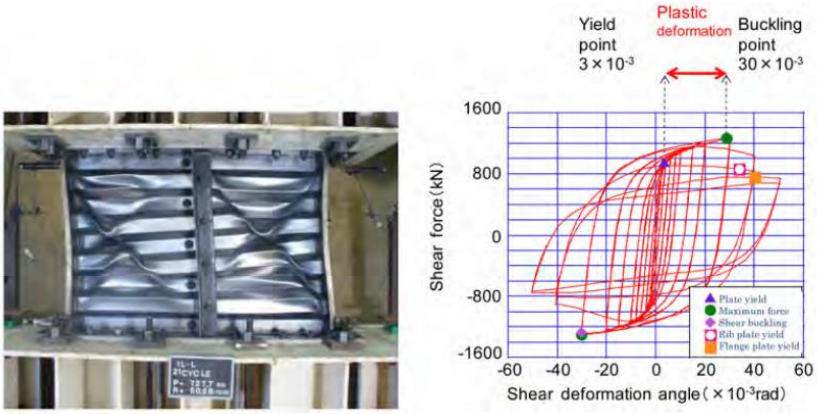


شکل ۲۳. مکانیسم میراگر اصطکاکی دورانی

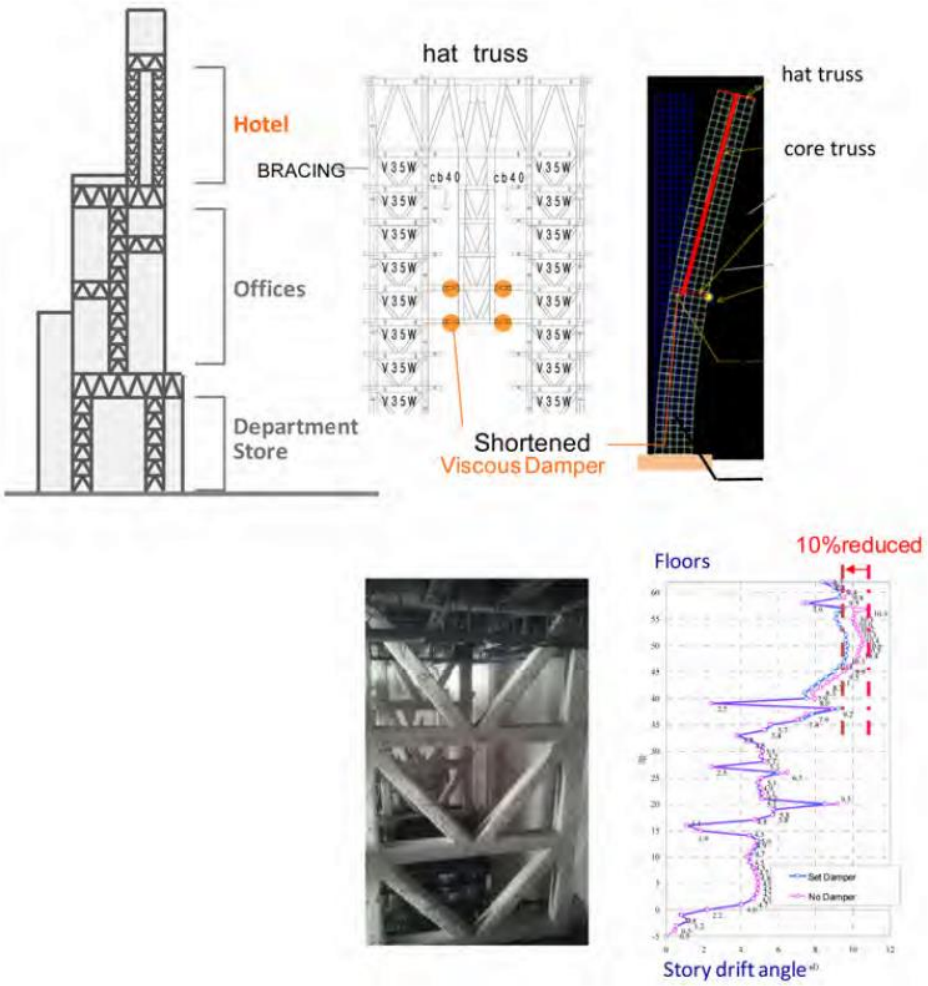
شکل ۲۴. میراگر اصطکاکی دورانی



شکل ۲۵. دیوار برشی با ورق موجدار



شکل ۲۶. عکس دیوار برشی با ورق موجدار (چپ) و چارت یا نمودار بار-تغییر شکل با خاصیت جذب انرژی عالی



شکل ۲۷. مکانیسم میراگر خرپایی مرکزی

۳,۴. میراگر اصطکاک دورانی

میراگر اصطکاک چرخشی و همچنین میراگر روغنی، جهت جذب انرژی لرزه‌ای که به ساختمان وارد می‌شود و کمک به کاهش پاسخ لرزه‌ای نصب شده‌اند. میراگر روغنی بسیار وابسته به سرعت است، در حالی که میراگر اصطکاک چرخشی بسیار وابسته به تغییر شکل است؛ بنابراین، هر دو میراگر با یک تأخیر زمانی در لحظاتی که بیشترین اثر را دارند، به صورت نشان داده شده در شکل ۲۲ کار می‌کنند. میراگر چرخشی اصطکاکی، از طریق صفحات فولادی افقی و عمودی پیچ شده به هم که به صورت نشان داده شده در (شکل ۲۳ و ۲۴) می‌باشد، نیروی اصطکاکی تولید می‌کند.

۳,۵. دیوار فولادی موج دار

دیوار فولادی موج دار در جهت طولی ساختمان، در حفره مرکزی فضای اداری نصب شده است. حفره طولی در مرز بین شفت آسانسور و فضای لوله کشی قرار دارد. دیوار فولادی موج دار، عضو مقاوم در برابر زلزله است که متشکل از یک ورق فولادی موج دار در راستای ارتفاع و صفحات فولادی بال دار دورتادوری است که یا قاب یکپارچه است (شکل ۲۵).

۳،۶. هسته میراگر خرپایی

هسته میراگر خرپایی به صورت نشان داده شده در شکل ۲۷ به عنوان خلأ مرکزی هتل برای تهویه مطبوع و کاهش تغییر شکل اعضای بلند، نصب شد. میراگر روغنی نصب شده بین هسته خرپا و قاب اطراف سبب کاهش دریفت طبقه‌های بلند تا حدود ۱۰٪ از طریق مکانیسم نشان داده شده در شکل ۲۷ می‌شود.

مترجم: نیما اصغری