

عملکرد لرزه ای سیستم های قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش

چکیده: تعداد فزاینده ای از ساختمان ها در ایالات متحده، از مهاربندی های مقاوم در برابر کمانش به عنوان سیستم اصلی مقاوم در برابر نیروی جانبی زمین لرزه استفاده می کنند. در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، مهاربندهای نامقید مقاوم در برابر کمانش تاکنون برای مقاوم سازی و ساخت و ساز جدید استفاده شده اند. به تازگی، به عنوان بخشی از اعتبارسنجی طراحی قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش برای یک ساختمان آزمایشگاهی جدید عمده در دانشگاه، آزمایش های در مقیاس بزرگ قطعات قاب مهاربندی شده انجام شدند. سه قطعه قاب، با مهاربندی های نامقید در یک پیکربندی شورون و دو پیکربندی مورب تکی، تحت بارگذاری جانبی سیکلی سطح طراحی و فراتر از سطح طراحی قرار گرفتند. آزمون ها رفتار خوب مهاربندها را نشان دادند، و نتایج، ملاحظات مهمی برای طراحی قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش و همچنین قاب های مهاربندی در حالت کلی نشان داد. این مقاله پروژه ساختمان آزمایشگاهی، طراحی قطعات آزمون را توصیف می کند و یک نمای کلی از یافته های برنامه آزمون و تحلیل های بعدی را نشان می دهد.

مقدمه

زلزله های سال ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۹۵ هیوگو-کن نانبو، حساسیت قاب های فولادی مقاوم خمشی در برابر انواع مختلف آسیب مرتبط با جابجایی های بزرگ جانبی را نشان دادند. برای کاهش این گونه مسائل، مهندسان به طور فزاینده ای به سمت قاب های مهاربندی هم محور به عنوان یک وسیله عملی و مقرون به صرفه برای بهبود مقاومت و سختی جانبی ساختمان های فولادی جذب می شوند. با این حال، سیستم های مهاربندی معمولی، عملکرد ضعیفی در چند زلزله اخیر داشته اند (سابلی و همکاران [۱])، و یافته های تحقیقات اخیر نشان می دهد که چنین سیستم هایی ممکن است قابلیت اعتماد دیگر سیستم های معمول را نداشته باشند (به عنوان مثال، اوریز و همکاران [۲]). در نتیجه، فعالیت قابل توجهی در سراسر جهان، به منظور بهبود عملکرد قاب های فولادی مهاربندی هم محور از طریق توسعه پیکربندیهای ساختاری جدید (به عنوان مثال، خطیب و همکاران [۳])، مکانیزم های پاسخ (هاکلبریدج [4])، و یا المان های مهاربندی، از جمله المان هایی که از فعالیت کامپوزیت استفاده می کنند (لیو، [۵])، تسلیم فلزی (به عنوان مثال، واتانابه [۶]؛ کامورا، [7])، مواد با کارایی بالا (اوهی [۸])، میرایی اصطکاکی و ویسکوز (به عنوان مثال، آیکن، [۹]) در جریان است. به طور خاص، المان های مهاربندی دارای هسته های تسلیم شونده محدودشده در یک ماتریس که مانع کمانش موضعی و جانبی است کاربرد گسترده ای در ایالات متحده، ژاپن، تایوان و جاهای دیگر پیدا کرده اند (به آیکن [۱۰]، براون [۱۱] رجوع کنید). این المان ها، مشخصات

هیسترتیک دوخطی نزدیک به ایده آل نشان می دهند، ظرفیت های بزرگ اتلاف انرژی تجمعی دارند و طراحی و ساخت و ساز متداول را برای مشارکت آنها در یک سیستم ساختاری بکار می گیرند.

سوالات اغلب با معرفی فن آوری های جدید ناشی می شوند، مانند مواردی که برای ارتقای عملکرد قاب های فولادی مهاربندی، بادر نظر گرفتن تاثیر آنها بر عملکرد در طول زلزله های آینده و اثر بخشی روش های مورد استفاده در طراحی، تحلیل و ساخت و ساز مطرح شدند. به عنوان مثال، آیا یک حاشیه ایمنی کافی قابل دست یابی است (و چگونه این تعیین می شود)، و ترکیب مناسب در میان سختی، مقاومت و چقرمگی با عملکرد مورد نظر کدام است (و چگونه این عملکرد مشخص می شود)؟ پژوهش گزارش شده در این مقاله، بخشی از یک پروژه در حال پیشرفت با هدف کلی توسعه و اعتبارسنجی یک روش طراحی مبتنی بر عملکرد جامع برای سازه های قاب فولادی مهاربندی شده است، که مهاربندی های معمولی، المان های مهاربندی مقاوم در برابر کمانش (یا هیسترتیک دیگر) یا ابزارهای مکمل میرایی ویسکوز، را بکار می گیرند. تلاش های اولیه برای مشخص کردن عملکرد احتمالاتی سیستم های قاب مهاربندی، توسط اوریز و مهین بررسی شدند و در جای دیگر گزارش شدند (اوریز [2]). این مقاله بر تحقیقات تجربی و تحلیلی اولیه درباره رفتار قاب های مهاربندی مقاوم در برابر کمانش متمرکز است. یک سری از آزمایشات بر روی سه قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش، تقریباً در مقیاس کامل گزارش می شوند. این نمونه ها تحت تحلیل های دقیق المان محدود غیرخطی سه بعدی و همچنین تحلیل های ساده تر معرف های ۲ بعدی قرار می گیرند.

برنامه آزمون دانشگاه کالیفرنیا برکلی

محوطه دانشگاه کالیفرنیا، برکلی یکی از پذیرندگان اولیه اصلی تکنولوژی قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش در ایالات متحده بوده است. بیشتر محوطه دانشگاه برکلی تقریباً بین ۲ کیلومتر گسل هیوارد قرار می گیرد، که قادر به تولید حوادث با بزرگی M7 یا حتی بیشتر است. در طول ۳۰-۵۰ سال آینده، گسل بزرگترین تهدید لرزش قوی در ناحیه خلیج سان فرانسیسکو را ایجاد می کند. برای کاهش اثرات نزدیک بزرگ توسط زلزله، مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش تاکنون در چهار ساختمان در محوطه دانشگاه برکلی استفاده شده اند.

در حالی که تست های تک محوره نشان داده اند مهاربندهای جداگانه مقاوم در برابر کمانش دارای مشخصات هیسترتیک و شکل پذیری خوب هستند (بلک و همکاران [۱۲]، کو و همکاران [۱۳])، کمیته بررسی لرزه ای دانشگاه برکلی توصیه کرد یک تست ساب مونتاز به عنوان بخشی از فرآیند طراحی برای یک ساختمان به جای استنلی هال انجام شود (یک مجموعه بیوتکنولوژی واقع شده در کمتر از ۱۰۰ متری گسل هیوارد). این توصیه برمبنای استفاده روبه رشد مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش در دانشگاه برکلی کالیفرنیا، اهمیت استنلی هال

جدید برای دانشگاه، و برخی از نگرانی های فنی بود. این نگرانی های فنی بر رفتار مهاربندها تحت تغییر شکل های محوری و دورانی ناشی از قاب، تناسب برونمایی انتظارات عملکرد مهاربند از نتایج آزمون تک محوره، و رفتار اتصالات تحت تغییر شکل های جانبی قاب متمرکز شدند. در حالی که تست های سابمونتاز، که موجب تغییر شکل های محوری و همچنین چرخشی قاب می شوند تاکنون در ژاپن اجرا شده اند (فوجیموتو و همکاران [۱۵]؛ کونامی و همکاران [۱۶]؛ ایواتا و همکاران [۱۷])، آزمایش ها هنوز با استفاده از جزئیات مشابه شیوه US انجام نشده بودند.

در زمان طراحی استنلی هال جدید، قاب های مهاربندی مقاوم در برابر کمانش هنوز به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی لرزه ای در هر کد ساختمانی در ایالات متحده ترکیب نشده بودند. تعدادی از تحلیل های دینامیکی غیرخطی توسط محققان مختلف برای کمک به درک پاسخ لرزه ای این نوع سیستم قاب مهاربندی و ارزیابی مقررات طراحی ممکن، انجام شده بودند (سابلی و همکاران [۱] و [۱۸]). علاوه بر این، یک انجمن مشترک از مهندسين سازه کالیفرنیا و موسسه کار گروه ساخت و ساز فولادی آمریکا (SEAOC / AISC) در روند تکمیل تلاش دو ساله برای توسعه مقررات طراحی برای قاب های مهاربندی مقاوم در برابر کمانش بود (سابلی و آیکن [۱۹]). این مقررات توصیه شده قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش (SEAOC [20])، که از این پس به عنوان مقررات توصیه شده اشاره می شوند، همراه با مقررات لرزه ای AISC برای ساختمان های سازه ای فلزی (AISC [21]) در طراحی سازه استفاده شدند (لوپز و همکاران [22]). مقررات توصیه شده، تست ویژه پروژه را ملزم نمی کنند. تست اولیه المان های مشابه به طور مناسب می تواند برای تعیین کیفیت طراحی یا مفهوم یک مهاربند استفاده شود. با این حال، مقررات توصیه شده تصریح می کنند برای هر طراحی مهاربند، حداقل یک آزمون سابمونتاز مقدماتی باید انجام شود که هر دو تقاضاهای محوری و چرخشی را در مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش تحمیل می کند. فقدان چنین آزمونی برای یک سابمونتاز قاب با مهاربندهای نامقید تحت تغییر شکل های جانبی سازگار با معیارهای طراحی در ایالات متحده عامل دیگری است که، همراه با عوامل بحث شده قبلی، در نیاز برای آزمون سابمونتاز برای پروژه استنلی هال سهیم بود.

ساختمان جایگزین استنلی هال

شرح پروژه

استنلی هال جدید در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، یک ساختمان آزمایشگاهی ۲۹۰۰۰۰ فوت مربع برای بخش های مختلف در حال کار بر روی مهندسی زیستی و بیوتکنولوژی است. آن، جایگزین یک ساختمان آزمایشگاهی بتنی مسلح پنج طبقه موجود می شود که در آغاز دهه ۱۹۵۰ ساخته شد. ساختمان متشکل از هفت سطح قاب فولادی

بر روی یک زیرزمین بتنی سه سطحی، با یک سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی لرزه ای مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش در سطوح بالا و دیوارهای برشی بتنی در سطوح زیرزمین است (لوپز و همکاران [۲۲]).

اهداف عملکرد لرزه ای

دانشگاه کالیفرنیا، برکلی یک نیاز عملکرد طراحی پایه ایمنی جانی در یک رویداد طراحی با احتمال تجاوز ۱۰ درصد در ۵۰ سال، و پیشگیری از فروریزش در یک ۱۰ درصد بزرگتر در رویداد ۱۰۰ ساله ایجاد کرد. دستیابی به افزایش سطح عملکرد اسکان فوری برای این پروژه مورد نظر بود، اگر این از لحاظ اقتصادی قابل توجیه بود، که به دنبال بازیابی اسکان و استفاده از سازه در یک دوره چند هفته ای پس از ۱۰ درصد در رویداد ۵۰ ساله بود.

مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش به عنوان سیستم مقاوم نیروی جانبی لرزه ای برای ساختمان به دلیل انعطاف پذیری بزرگ آنها، قابلیت اتلاف انرژی و نیز برای سهولت تعمیر پس از یک زلزله بزرگ انتخاب شدند، که زلزله بزرگ نسبت به هر نوع دیگری از قاب فولادی و یا سیستم مهاربندی، دارای احتمال کمتر در نظر گرفته شد (لوپز [۲۲]).

طراحی ساختمان

سازه استنلی هال جدید برای برآوردن الزامات کد ساختمانی یکنواخت ۱۹۹۷ (ICBO، 24) طراحی شد. شرح مفصل تر طراحی توسط لوپز و همکاران [۲۳] داده شده است، و در اینجا خلاصه می شود. نیروهای لرزه ای بر اساس عوامل زیر تعریف شده اند: منطقه لرزه ای ۴، نوع مشخصات خاک SB، $I = 1$ ، $R = 8$ ، ضرایب نزدیک منبع $NV = 2$ و $NA = 1.5$. مقدار ۱ برای ضریب افزونگی، ρ مورد استفاده قرار گرفت. برش بر اساس طراحی حدود ۰،۱۱۴W بود، و نسبت دریافت طبقه ساختمان به ۲ درصد محدود شد. برای بررسی طراحی، تحلیل غیر خطی استاتیکی (پوش آور) استفاده شد. طراحی مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش بر مبنای مقررات توصیه شده بود. تنش های مورد انتظار مواد برای تعریف مقاومت های مهاربند مورد استفاده قرار گرفت، و طراحی اتصالات، ستون ها و المان های جمع کننده، از یک روش مبتنی بر ظرفیت تبعیت کرد (لوپز [۲۲]).

برنامه تست

مجموعه ای از سه آزمون سابمونتاژ تقریباً در مقیاس کامل برای بررسی سه پرسش اصلی انجام شد (لوپز [۲۲]):

- چگونه چرخش های انتهایی مهاربند، ناشی از تغییر شکل های جانبی قاب، بر رفتار کلی مهاربند تاثیر می گذارند؟
 - آیا رفتار هیسترتیک یک مهاربند نامقید در یک سابمونتاژ قاب مانند رفتار یک مهاربند آزمایش شده به صورت تک محوری است؟
 - چگونه اتصالات مهاربند به ورق اتصال قاب تحت دررفت های مورد انتظار ساختمان اجرا می شوند؟
- آزمون های سابمونتاژ در بخش سازه های آزمایشگاهی مهندسی عمران و محیط زیست در دیویس هال، در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی انجام شدند. بخش زیر، ویژگی های اصلی اجرای سه آزمون، طرح های مهاربند مقاوم در برابر کمانش، و پروتکل های بارگذاری استفاده شده را توصیف می کند. توضیحات کامل تر را می توان در اریز و مهین [۲۵] پیدا کرد.

اجرای تست

این برنامه آزمون، رفتار یک قاب تیر-ستون، تک دهانه، یک طبقه با مهاربندهای نامقید را بررسی کرد. سه سابمونتاژ مختلف در دو پیکربندی مختلف، مورد آزمایش قرار گرفتند که همه آنها از اجزای تیر به ستون یکسان اما هر کدام با طرح های مختلف مهاربند مقاوم در برابر کمانش استفاده کردند. سه پیکربندی به عنوان تست شماره ۱، ۲ و ۳ ارجاع داده می شوند (شکل ۱، ۲ و ۳). تست شماره ۱ شامل یک پیکربندی مهاربند شورون یا وی-معکوس بود و آزمون شماره ۲ و ۳ هر دو دارای مهاربندهای تک مورب بودند. بار جانبی به قاب آزمایش توسط یک محرک ۶۷۰۰ کیلونیوتنی متصل به یک چیدمان "مهاربند کلاه مانند" اعمال شد. این سطح بالایی مهاربند برای دستیابی به یک نمایش کلی بهتر از ویژگی های قاب و اتصال در ساب مونتاژها در نظر گرفته شد.

محدودیت های ظرفیت تجهیزات تست، و همچنین قیدهای اندازه کلی نمونه قاب آزمون، دیکته کردند که ساب مونتاژهای آزمون کمی کمتر از اندازه کلی بودند زمانی که با قاب ها در ساختمان واقعی مقایسه شدند. برحسب هندسه، سابمونتاژهای آزمون حدود ۷۰ درصد عرض دهانه و ارتفاع طبقه ساختمان بود. نمونه های آزمون دارای عرض دهانه ۶،۱ متر، ارتفاع طبقه ۳،۳ متر بودند و شامل ستون های درجه W14x176 A572/50 و تیر W21x93 بود. اعضای مهاربند کلاهی سطح بالایی طوری طراحی شدند که برای همه شرایط بارگذاری مورد انتظار الاستیک باقی بمانند. اتصالات تیر به ستون مقاوم در برابر ممان طراحی شدند، که به طور کلی الزامات FEMA برای جزئیات از پیش تعیین شده WUF-W را برآورده کردند (FEMA [26]). همان سابمونتاژ قاب تیر به ستون پایه دوباره برای هر سه آزمون، تنها با تغییر در جزئیات اتصال سیستم مهاربندی مورد استفاده قرار گرفت. قاب آزمون پیش ساخته بود، و در آزمایشگاه در وضعیت عمودی مونتاژ شد، و پس از جوشکاری، بر کناره

خود قرار شد. مهاربندها نصب شدند پس از این که قاب در حالت افقی بود. فلز فیلر شکاف برای همه جوش ها در قاب های آزمون استفاده شد.

اتصالات بولتی لغزش بحرانی بین مهاربندها و ورق های پشت بند از بولت های A490 با قطر ۳۲ میلی متر در سوراخ های اندازه استاندارد، واشرهای شاخص تنش مستقیم و سطوح کلاس A استفاده کردند. اتصالات برای نیروهای مهاربند مورد انتظار، از جمله سهم های اضافه مقاومت فشاری و کرنش سخت شوندگی، طراحی شدند. از نتایج برای مهاربندهای با اندازه مشابه تست شده در یک برنامه تست قبلی (بلک و همکاران [۱۲])، ضرایب اضافه مقاومت ۱٫۶۵ برای مهاربندها در آزمون شماره ۱ و ۱٫۵۰ برای مهاربندها در آزمون شماره ۲ و ۳ در طراحی اتصالات مورد استفاده قرار گرفت.

تنظیمات ورق اتصال برای هر یک از سه آزمون متفاوت بود، و به همین ترتیب پس از هر آزمون صفحات پشت بند قدیمی توسط برش گاز حذف شدند و صفحات پشت بند جدید در محل جوش داده شدند. عمل معمول از جوش های فیلت برای اتصال ورق پشت بند به بال های تیر و ستون استفاده می کند، با این حال، چون قاب آزمون در موقعیت افقی بود، جوش های با نفوذ کامل تک مورب، مورد استفاده قرار گرفت و نوار پشتیبان پس از جوشکاری حذف نشد.

سابمونتاژهای قاب به طور گسترده به ابزار دقیق مجهز شدند. ابزار دقیق شامل مبدل های جابجایی برای جابجایی های کلی قاب و جابجایی های مهاربند، و کرنش سنج ها برای اجازه دادن تعیین متوالی نیروهای قاب و نیروهای مهاربند شامل شدند. کرنش سنج ها نیز در بخش های تسلیم هسته مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش شامل شدند. بیش از ۱۷۵ کانال اطلاعات در هر یک از سه آزمون ثبت شدند.

طرح های مهاربند مقاوم در برابر کمانش (نامقید)

سه طرح مهاربند مقاوم در برابر کمانش مختلف در برنامه آزمون مورد بررسی قرار گرفت. همه مهاربندها از نوع مهاربند نامقید ساخته شده توسط نیپون فولاد بود. منطقه ورق هسته تسلیم شونده نوار مسطح ۴۰۸۰ میلی مترمربع برای هر دو تست شماره ۱ و ۲ بود و هسته صلیبی آزمون شماره ۳ دارای مساحت ۷۵۴۰ میلی مترمربع بود. فولاد درجه SN400B استاندارد صنعتی ژاپن (JIS) برای ورق هسته برای تمام مهاربندها، با تنش تسلیم گواهی کارخانه ۲۸۰ مگاپاسکال استفاده شدند. نیروهای تسلیم حدود ۱۱۵۰ کیلو نیوتن برای مهاربندها در آزمون های شماره ۱ و ۲، و ۲۱۳۰ کیلو نیوتن کیپس برای تست شماره ۳ بودند. به منظور بررسی اثر احتمالی جهت

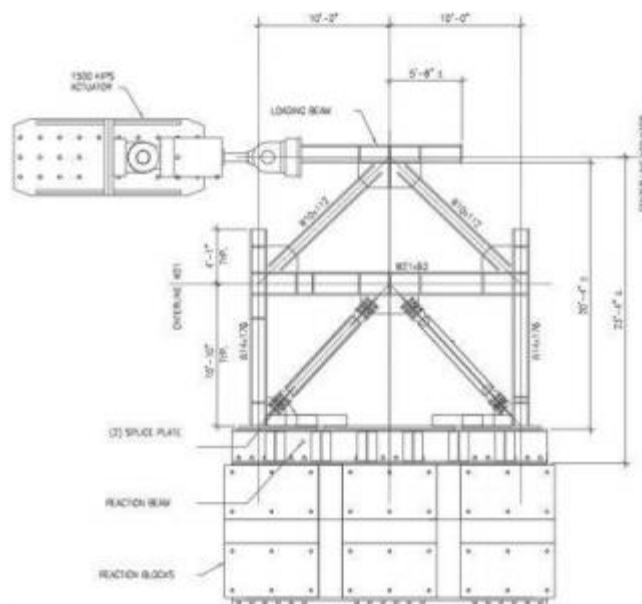
ورق هسته بر رفتار مهاربند، دو مهاربند ورق هسته نوار تخت تست شماره ۱ با یک ورق هسته افقی و یک عمودی نصب شدند. مهاربند ورق هسته نوار تخت تست شماره ۲ به صورت عمودی بود.

پروتکل های بارگذاری

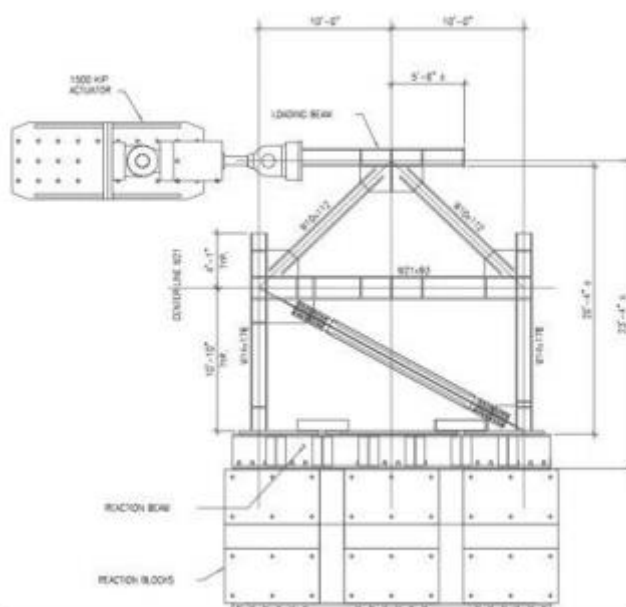
تاریخچه های بارگذاری مورد استفاده برای هر سه آزمون اساساً از الزامات مقررات توصیه شده تبعیت کردند. این آزمایشات برای قراردادن مهاربند (ها) تحت حداکثر تغییر شکل حداقل مساوی با تغییر شکل طراحی موردنظر و تقاضای شکل پذیری پلاستیک تجمعی حداقل ۱۴۰ بودند. برای برنامه آزمون، نسبت های رانش حداکثر در نظر گرفته شده، تقریباً مساوی با آنها از تجزیه و تحلیل استاتیکی غیر خطی ساختمان مربوط به ۱۰ درصد در تقاضاهای ۱۰۰ ساله بودند. شکل ۴ تاریخچه بارگذاری برای تست شماره ۱ را نشان می دهد. ویژگی های کلی تاریخچه های بارگذاری برای تست شماره ۲ و ۳ مشابه بود، که تنها برحسب جابجایی جانبی حداکثر قاب متفاوت هستند. برای تست شماره ۱، چرخه های سطح طراحی (Δb_m) در یک دررفت بین طبقه ۱،۳۴٪ انجام شدند و فراتر از چرخه های سطح طراحی متناظر با دررفت ۲،۰۱٪ شدند. برای آزمایش های شماره ۲ و ۳، این مقادیر دررفت بین طبقه، ۱.۷۲٪ و ۲،۶٪ بود.

نتایج آزمون

شرح کاملی از نتایج آزمون در اریز و مهین [۲۵] یافت می شود. نکات برجسته نتایج آزمون به شرح زیر ارائه می شوند. از آنجا که گنجانیدن یک سلول بار به طور سری با مهاربندها در اجرای آزمون، مطلوب نبود اطلاعات کرنش سنج قاب در برآورد نیروهای مهاربند استفاده شدند. کرنش سنج ها روی ستون ها و تیرها، واقع در مقاطع مورد انتظار برای الاستیک باقی ماندن، همراه با ملاحظات مکانیک و تعادل برای استخراج نیروهای عضو استفاده شدند. با این حال، در سیکل های تغییر شکل بزرگ تر، شبکه های ستون در برش تسلیم شدند، و فرض رفتار الاستیک در بخش های مجهز به ابزار دقیق دیگر معتبر نبود. به این ترتیب، نیروهای مهاربند نشان داده شده در زیر تنها در طول چرخه های دامنه کم دقیق هستند.



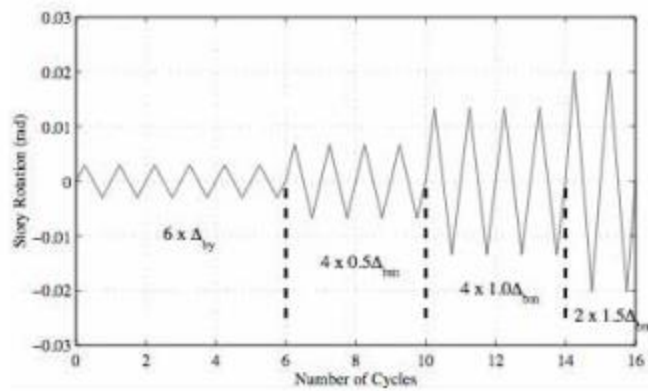
شکل ۱: اجرای آزمون برای تست شماره ۱



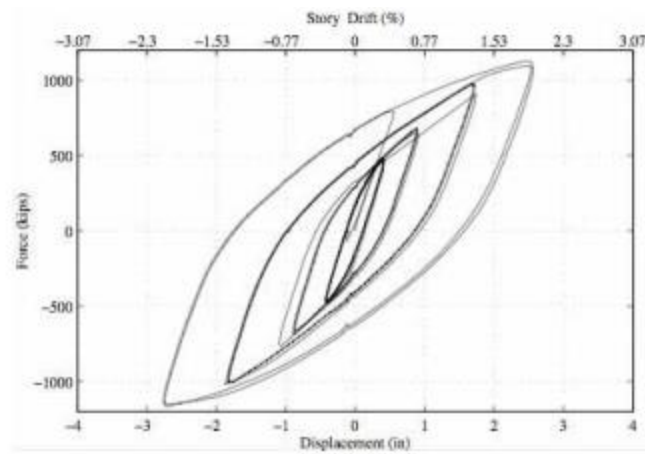
شکل ۲: اجرای آزمون برای تست شماره ۲ و ۳



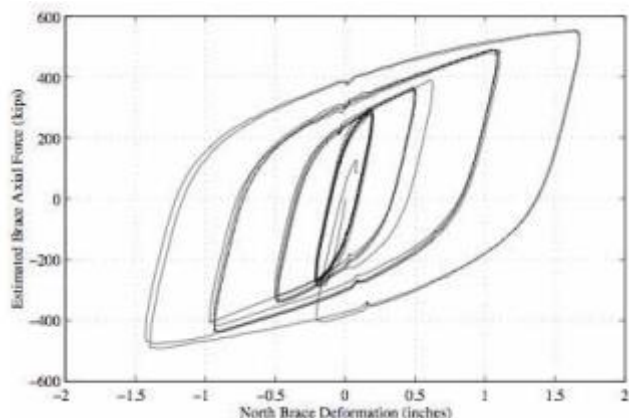
شکل ۳: عکس نمونه آزمون شماره ۱



شکل ۴: پروتکل بارگذاری - تست شماره ۱



شکل ۵: نیروی جانبی - دررفت جانبی طبقه، تست ۱



شکل ۶: رفتار هیسترتیک مهاربند، تست شماره ۱

تست شماره ۱

سابمونتاز قاب، رفتار بسیار خوبی رویهمرفته از طریق کل توالی چرخه ها در این آزمون (شکل ۵) نشان داد. مهاربندهای نامقید رفتار هیسترتیک پایدار و تکراری (شکل ۶)، از طریق شکل پذیری مهاربند حدود ۱۵ به نمایش گذاشتند. در زمان توقف، کل شکل پذیری پلاستیک تجمعی تحمل شده توسط مهاربندها حدود ۳۲۶ یا بیش از دو برابر آن مورد نیاز توسط مقررات توصیه شده بود. نیروهای اوج قاب در جهات مخالف و همچنین از چرخه تا چرخه بسیار سازگار هستند، که دلالت بر رفتار سازگار مشابه دو مهاربند دارد. تسلیم قاب در سیکل های دریافت ۶۷٪، در ستون های نزدیک بالای سخت کننده های پایه ستون و در خود سخت کننده های ستون آشکار شد. در طول سیکل های دامنه دریافت ۲٪، تسلیم در اتصالات تیر ستون، در جان ستون در کل ارتفاع آنها، و در صفحات پشت بند پایینی دیده شد (شکل ۷ - ۹). هیچ لغزشی در هر یک از اتصالات بولتی مهاربند در سراسر آزمون رخ نداد. هیچ تسلیمی در ورق اتصال بالایی در وسط دهانه تیر در هر مرحله از آزمون مشاهده نشد، و جنبش بسیار کمی رو به بالا و پایین در مرکز تیر دیده شد (همراه با نیروهای دیفرانسیلی در مهاربندها (شکل ۱۰)).

جهت گیری های ورق هسته مختلف برای دو مهاربند ظاهرا تاثیری بر رفتار هیسترتیک آنها نداشتند. چرخش هایی که در انتهای مهاربندها رخ داد ظاهرا هیچ گونه تاثیر منفی بر رفتار مهاربندها نداشت.

تست شماره ۲

در پایان تست شماره ۱، مهاربندها و ورق های پشت بند، حذف شدند ورق های پشت بند جدید در محل جوش داده شدند، و یک مهاربند جدید تک مورب نصب شد.

در طول کل تاریخچه بارگذاری، سابمونتاز قاب رفتار خوبی (شکل ۱۱) را نشان داد. مهاربند نامقید رفتار هیسترتیک پایدار و تکراری (شکل ۱۳)، تا انعطاف پذیری حداکثر در حدود ۱۴ در چرخه های تا ۲,۶٪ دریافت بین طبقه نشان داد. CPD کل تحمل شده توسط مهاربندها حدود ۲۹۹ بود. نیروهای اوج قاب بسیار سازگار هستند، که دلالت بر رفتار کشش-فشار نزدیک به متقارن مهاربند نامقید دارد. هیچ لغزشی در اتصالات بولتی مهار بند در هر مرحله در این آزمون رخ نداد. تسلیم اولیه در قاب در ورق اتصال بالا و در هر دو سخت کننده های پایه ستون در ۰,۸۷٪ چرخه های دامنه دریافت مشاهده شد. در ۱,۷۲٪ چرخه های دریافت، خطوط تسلیم در جان ستون، با شروع در پایه های ستون و گسترش تا کل ارتفاع ستون آشکار شد.

در دو چرخه گذشته تا ۰,۸۷٪ دریافت، ترک های جوش در لبه آزاد پایین ورق اتصال بالایی، در مجاورت ستون تشکیل شدند. در طول چرخه های دریافت ۲,۶ درصد بعدی، ترک در ورق اتصال بالایی منتشر شد. زمانی که مهاربند در کشش بود، کمانش قابل توجهی در ورق اتصال بالا، به دلیل فعالیت پینچینگ قاب ورق اتصال بین تیر و ستون رخ داد (شکل ۱۲). تجزیه و تحلیل غیر خطی المان محدود قاب تمایل برای رخ دادن چنین کمانشی را نشان می دهد [فیلد و همکاران ۲۶].

همانطور که در تست شماره ۱ مشاهده شد، چرخش ها ظاهرا هیچ گونه تاثیر منفی بر رفتار مهاربند ندارند. با مهاربند در یک پیکربندی تک مورب، حداکثر چرخش در انتهای مهاربند در حدود نصف چرخش طبقه بود.

آزمون شماره ۳

در پایان تست شماره ۲، صفحات پشت بند و مهاربند دوباره حذف شدند، صفحات پشت بند جدید در محل جوش داده شدند، و یک مهاربند جدید دارای یک هسته صلیبی نصب شد. در پاسخ به کمانش ورق اتصال و ترک خوردگی جوش که در تست شماره ۲ رخ داد، یک ورق سخت کننده مستطیل شکل کوچک به لبه پایین ورق اتصال بالایی در وجه ستون اضافه شد.

در چرخه ها تا دریافت ۱,۷۲٪، چند شرط آسیب توسعه یافت که نشان داد این تغییر شکل یک وضعیت حدی برای تحمل قاب تیر به ستون باشد. چنان چه در آزمون شماره ۱ و ۲ دیده شد، تسلیم برشی جان ستون به تدریج در طول آزمون توسعه یافت. تسلیم در پایه های ستون ها و همچنین در سخت کننده های پایه ستون نیز مانند قبل رخ داد. اتصال تیر به ستون در ستون دور از مهاربند نامقید در سطح پایین تر (شکل ۳) یک ترک عرضی

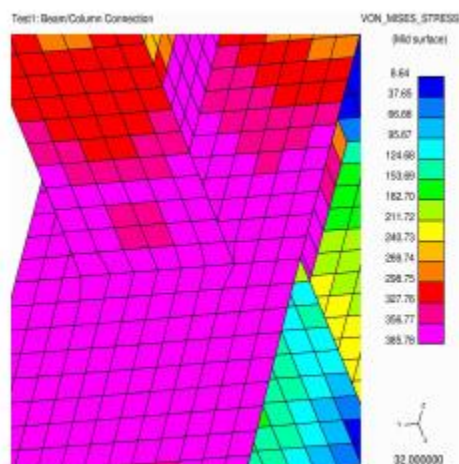
مجاور به جوش بال CJP پایینی در سراسر کل عرض بال توسعه داد (شکل ۱۴). این ترک در ادامه آزمون، گسترش یافت و عریض شد. چند ترک کوچک در این سطح در پایه ستون ها نیز آغاز شد. اگرچه چرخش های اوج تحمیل شده بر این اتصالات، در طول این آزمایش ها نسبتا کم بود، این، دنباله بارگذاری سوم تحمیل شده بر اتصالات در این نمونه بود، که نشان می دهد خستگی چرخه پایین می تواند یک ملاحظه در ارزیابی عملکرد در رویدادهای با مدت زمان طولانی باشد.

در طول اولین سیر در سیکل های دامنه ۲،۶٪، در حالی که دریافت هنوز کمتر از ۱،۷۲ درصد بود، بال پایین تیر در لبه بیرونی ورق اتصال، یک ترک در سراسر عرض بال و در حدود ۲ اینچ در جان توسعه داد. این شکستگی منجر به از دست دادن ثبات پیچشی در منطقه تیر- پشت بند در انتهای بالایی مهاربند شد (شکل ۱۵). به دلیل شکستگی های تیر، تنها یک چرخه در دامنه دریافت ۱،۷۲٪، تکمیل شد و با دو چرخه اضافی در دریافت ۰،۸۷٪ دنبال شد. ترک در جان منتشر شد، و بال تیر پایین به طور عرضی تا حد زیادی جابجا شد.

با وجود توسعه چندین شکستگی کوچک در ناحیه اتصال، قاب رفتار کلی هیسترتیک خوبی تا تکمیل چرخه های ۰،۸۷٪ (شکل ۱۷) نشان داد. مهاربندهای نامقید رفتار خوبی تا نقطه شکستگی بال تیر نشان داد، و فراتر از آن نقطه چندین سیکل چرخش پلاستیکی بسیار بزرگ، بدون هیچ نشانه ای از شکستگی محلی جایگزین شدند. به دلیل جابجایی های جانبی بال تیر و ورق اتصال، رفتار هیسترتیک بعدی مونتاژ مهاربند شبیه به آن از یک مهاربند معمولی (شکل ۱۸) بود. حداکثر تقاضای کرنش مهاربند در آزمون برابر با ۱،۸۹ درصد اندازه گیری شد و تا نقطه شکستگی بال تیر، مهاربند CPD برابر با ۲۱۹ را تحمل کرد. پس از شکست تیر، چرخش های غیرارتجاعی بسیار بزرگ محلی و تغییر شکل های محوری در نزدیکی دو انتهای مهاربند مقاوم کمانشی رخ داد. هیچ لغزشی در اتصالات بولتی مهاربند در هر مرحله در آزمون رخ نداد.

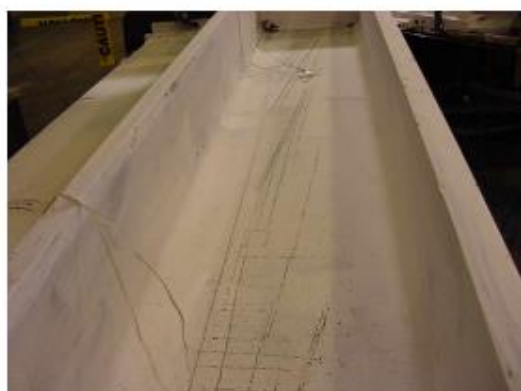


(a) Test Results

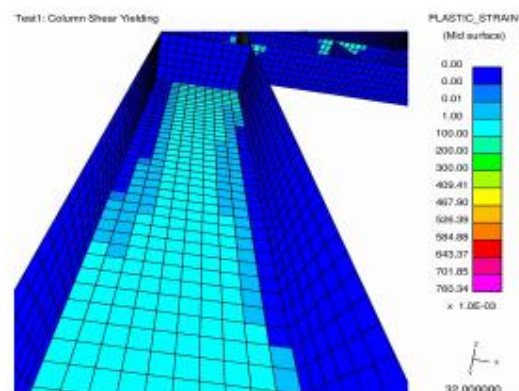


(b) Finite Element Results (Field et al [27])

شکل ۷: وجه زیرین اتصال تیر-ستون، سیکل های دررفت طبقه ۲٪ تست شماره ۱



(a) Test Results

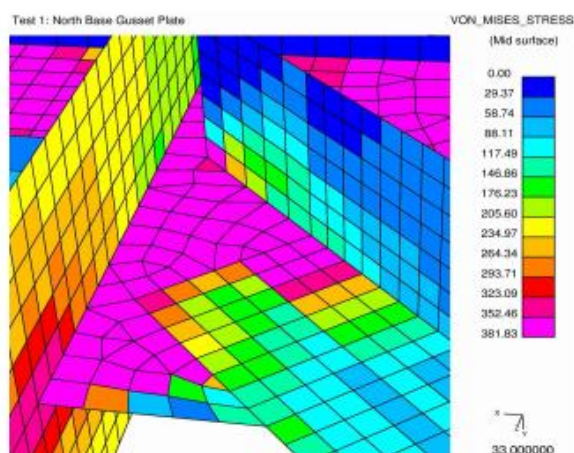


(b) Finite Element Results (Field *et al* [27])

شکل ۸: تسلیم برشی جان ستون، سیکل های دررفت طبقه ۲٪ تست شماره ۱

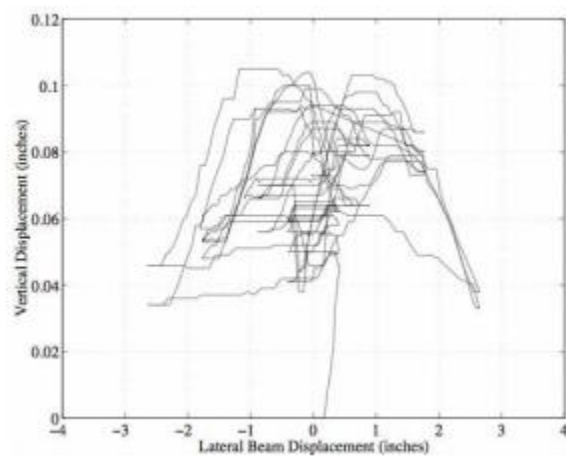


(a) Test Results

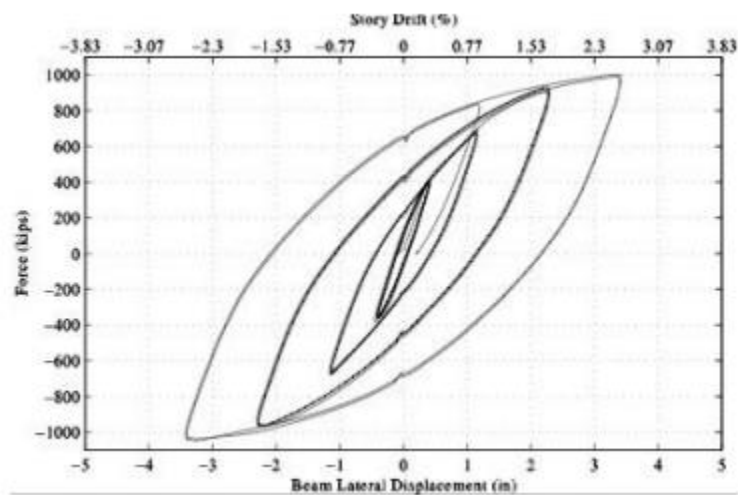


(b) Finite Element Results (Field *et al* [27])

شکل ۹: تسلیم ورق پشت بند پایه ستون، دررفت طبقه ۲٪ تست شماره ۱



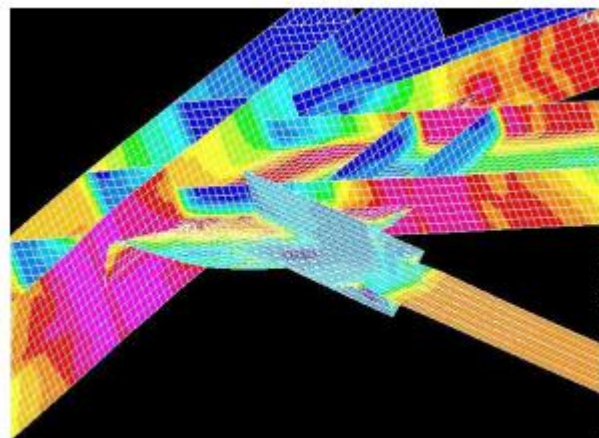
شکل ۱۰: جابجایی قائم دهانه میانی تیر، تست شماره ۱



شکل ۱۱: دررفت جانبی طبقه- نیروی جانبی، تست شماره ۲



شکل ۱۲: کمانش ورق پشت بند بالایی، تست شماره ۲



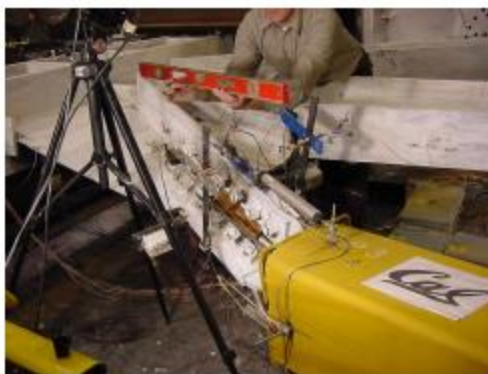
شکل ۱۳: تحلیل المان محدود قاب شماره ۲، نشانگر کمانش ورق پشت بند بالایی ناشی از فعالیت پینچینگ قاب



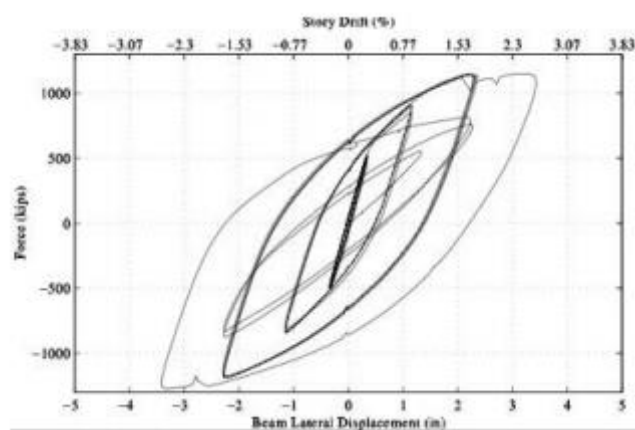
شکل ۱۴: گسیختگی در HAZ در اتصال تیر-ستون، تست شماره ۳



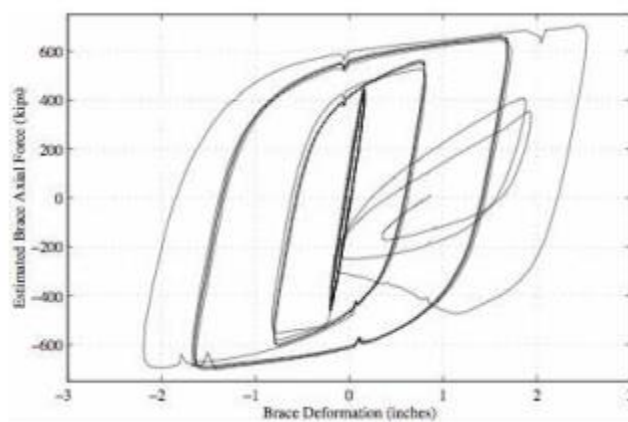
شکل ۱۵: گسیختگی در تیر در انتهای ورق پشت بند، دررفت ۲,۶٪، تست شماره ۳



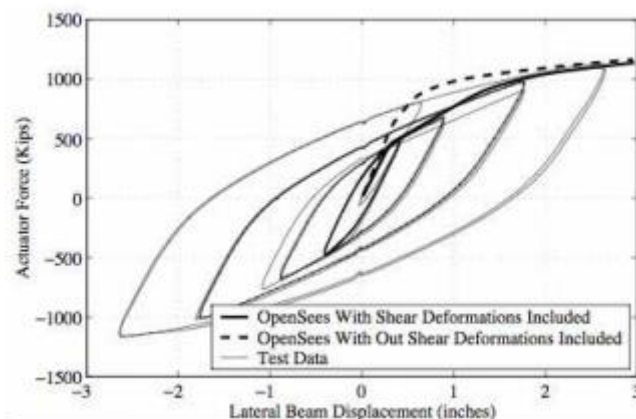
شکل ۱۶: کمانش جانبی مهاربند ناشی از گسیختگی بال پایینی و جان تیر، دریفت ۰.۲۶٪، تست شماره ۳



شکل ۱۷: دریفت طبقه- بار جانبی، تست شماره ۳



شکل ۱۸: رفتار هیسترتیک مهاربند، تست شماره ۲



شکل ۱۹: مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی پوش آور با نتایج تست، تست شماره ۱

ارزیابی تحلیلی

قبل از تست، مدل های غیر خطی سابمونتازهای قاب آزمون با استفاده از نرم افزار (OPENSEES) PEER [28]، به منظور برآورد نیروهای عکس العمل اجرای آزمون توسعه داده شد. مدل شامل المان های خطی با آفست های انتهایی صلب در صفحات پشت بند و سخت کننده ها بود. عناصر قاب با پلاستیسیته متمرکز با مقطع عرضی فیبر، اندرکنش ممان محوری را لحاظ کردند. یک فنر برشی غیرخطی محوری آزاد برای تصرف تغییر شکل های برشی ستون استفاده شد. مقایسه نتایج تحلیل پوش آور با نتایج تجربی برای آزمون شماره ۱ در شکل ۱۹ نشان داده می شود. دیده می شود که مدل با ترکیب تغییر شکل های برشی ستون، بهتر نتایج آزمون را تخمین می زند، اما مدل بدون تغییر شکل های برشی هنوز به طور منطقی حداکثر نیروی و تغییر شکل قاب را تخمین می زند. به طور مشابه توافق خوبی برای دو نمونه دیگر تست به دست آمد.

نتیجه گیری

سه آزمون سابمونتاز قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش، عملکرد خوب این سیستم جانبی لرزه ای را نشان دادند، و انتخاب و طراحی مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش را برای ساختمان جدید استنلی هال اعتبارسنجی نمودند. این برنامه تست نشان دهنده اولین بررسی سابمونتاز در مقیاس بزرگ رفتار قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش در ایالات متحده است. استفاده از جزئیات طراحی و تقاضاهای تغییر شکل ایالات متحده در برنامه آزمون منجر به اطلاعات بسیار مفید شده است، که بر زمینه شیوه طراحی آمریکا متمرکز است. مهاربندهای نامقید تست شده، عملکرد خوبی داشتند و یک قاب مهاربندی شکل پذیر با ظرفیت اتلاف انرژی بزرگ ارائه کردند. مسائل مختلف بحث شده در زیر، در رابطه با هر دو طراحی قاب به طور کلی و همچنین طراحی

دقیق اجزای ورق اتصال، شناسایی شده اند و مطالعه بعدی را تضمین کرده اند. مطالعات اضافی مربوط به پاسخ دینامیکی قاب های مهاربندی مقاوم در برابر کمانش در جاهای دیگر توسط سابلی، چانگ و مهین، [۱] و اریز و مهین توصیف می شوند [۲].

مهاربندهای نامقید

مهاربندهای نامقید در هر سه آزمون عملکرد خیلی خوبی داشتند. رفتار هیسترتیک و ازدیاد طول آنها ظاهراً تحت تاثیر تقاضاهای محوری و خمشی ترکیبی با بارگذاری در یک پیکربندی قاب نبود. در آزمون شماره ۱، هیچ تفاوت آشکاری در رفتار بین دو مهاربند با پیکربندی شورون به علت جهات ورق هسته مختلف آنها وجود نداشت. مهاربندها در هر دو تنظیمات شورون و تک مورب به خوبی رفتار کردند، و در پیکربندی شورون، تنها تقاضاهای نیروی نامتعادل کوچک در وسط دهانه تیر ایجاد شدند. به عنوان یک نتیجه، جابجایی عمودی در وسط دهانه تیر کوچک بود، و تمایل به ایجاد ثبات پس از اولین گردش تسلیم داشت. به طور کلی، مشخص شد که مقاومت مهاربند واقعی، از جمله سهم های سخت شوندگی کرنشی و اضافه مقاومت فشاری را می توان با دقت از داده ها از آزمون تک محوره قبلی، و همچنین از ارزیابی های دقیق المان محدود تحلیلی بر اساس خواص مواد اندازه گیری شده ایجاد نمود.

ساب مونتاژهای قاب

ساب مونتاژهای قاب آزمون در تمام سطوح دریافت برای تست شماره ۱ و ۲ خوب عمل کردند. در آزمون شماره ۳، یک ترک در اتصال تیر به ستون در طول چرخه های دریافت طبقه طراحی توسعه یافت. در چرخه اول فراتر از دریافت سطح طراحی، بال پایین تیر در لبه خارجی اتصال ورق پشت بند مهاربند گسیخته شد. شکستگی بال تیر منجر به از دست دادن ثبات پیچشی و کمانش پس از آن انتهای مهاربند نامقید و منطقه اتصال ورق پشت بند شد. بال تیر بسیار در این زمان تنیده شد و مواد در بال در نوک ورق پشت بند به احتمال زیاد به شدت محدود شد. شکست تیر در پشت بند مهاربند نیز ممکن است با این واقعیت مربوط باشد که صفحات پشت بند در این مکان حذف شدند و دو بار در دوره برنامه آزمون جایگزین شدند. اثرات گرما از برش و جوش دوباره، با تقاضای غیرارتجاعی قابل توجهی همراه شدند که در سراسر برنامه آزمون رخ داد ممکن است در شکست بال تیر در تست شماره ۳ سهیم باشند. تحقیقات بیشتری بر روی چنین ورق اتصال به اتصالات تیر و ستون ضروری است.

نتیجه گیری های اضافی که می توان از رفتار سابمونتاژهای قاب مهاربندی مقاوم در برابر کمانش استخراج کرد عبارتند از:

- حضور صفحات پشتبند اتصال مهاربند می تواند منجر به عمل قاب صلب در دهانه مهاربندی شود، خواه به صراحت توسط طراح موردنظر است یا نه، و در نتیجه سهم صفحات پشت بند به قاب کلی به طور صلب باید به دقت در نظر گرفته شود.
 - اتصالات ممان WUF-W از پیش تعریف شده FEMA به قاب اجازه داد تست های شماره ۱ و ۲ و بخشی از تست شماره ۳ را بدون شکست اجازه دهد.
 - استفاده از فلز پرکننده شکاف برای همه جوش ها در قاب ها ظاهرا در محدود کردن انتشار شکل پذیر شکستگی های جوش، که در مکان های مختلف رخ داد سودمند بود.
- همانطور که توسط لوپز، ۲۰۰۲ شناسایی شد، تعدادی از مشاهدات گسترده تر را می توان در اهمیت طراحی ورق اتصال در رفتار و نوع قاب مهاربندی شده ایجاد نمود:
- اثر اندازه ورق اتصال در کوتاه کردن ابعاد واضح تیر و ستون، و در رفتار دریافت از مدهای خمشی تا برشی باید به رسمیت شناخته شود. وقوع تسلیم برشی گسترده جان های ستون در این تست ها دارای اهمیت ویژه ای است.
 - تغییر شکل های سینماتیک اعمال شده بر روی صفحات پشت بند به عنوان یک نتیجه از تغییر شکل های جانبی قاب، به خوبی درک نشده اند و نیاز به مطالعه بیشتر دارند.
 - برای دریافت های قاب بزرگ، روش های طراحی مبتنی بر نیرو برای صفحات پشت بند ممکن است منجر به طرح های قابل قبول نشود. علاوه بر این، محدوده بزرگ متغیرها در طراحی صفحات پشت بند مستلزم روش های مبتنی بر محاسبات منطقی و نه صرفا با تکیه بر نتایج آزمون است.