

ارزیابی عددی مهاربند کمانش تاب مجهز به الاستومر

سید علی رضوی طباطبایی^{۱*}، محمدرضا علیمردانی^۲، عرفان جوینی^۳

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، arazavi@usc.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک مهاربند کمانش تاب (BRB) نوآورانه مجهز به الاستومر مورد تحلیل عددی قرار گرفت. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام شد. اجزای مهاربند شامل غلاف، هسته، الاستومر و نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر تشریح شد. نحوه اتصال الاستومر به سایر اجزا توضیح داده شد. سپس جزئیات مدل‌سازی عددی تشریح گردید. هیستریزس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر و یک BRB بدون الاستومر با همان ابعاد مقایسه شد. همچنین توزیع تنش در نقاط بحرانی هسته و غلاف مورد بررسی قرار گرفت. مود خرابی این BRB به صورت کمانش قسمت تسلیم‌شونده هسته دیده شد. مشاهده شد که افزودن الاستومر به BRB موجب افزایش سختی پس از تسلیم و کاهش جابجایی پسماند می‌گردد. مدل‌سازی با نسبت سختی دو برابری الاستومر نسبت به نمونه آزمایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. این افزایش سختی الاستومر، افزایش ۲۰ درصدی سختی پس از تسلیم را نشان داد. همچنین BRB مجهز به الاستومر توانایی جذب انرژی بیشتری نسبت به BRB بدون الاستومر دارد. در مقایسه با BRBهای مرسوم، مهاربند مجهز به الاستومر حتی پس از گسیختگی هسته، پایداری سازه را به دلیل نقش الاستومر در نواحی بحرانی حفظ می‌نماید. این ویژگی، کارایی بالای این سیستم را در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

مهاربند کمانش تاب، BRB، الاستومر، سختی پس از تسلیم

Numerical Evaluation of an Elastomer-Equipped Buckling-Restrained Brace

S.A. Razavi, M.R. Alimardani, E. Jovaini

Abstract

In this study, an innovative buckling-restrained brace (BRB) equipped with an elastomer was numerically analyzed. The analyses were performed using Abaqus software. The components of the BRB, including the casing, core, and elastomer, as well as their connections, were described in detail. The elastomer's connection method to other components was also detailed. Subsequently, the numerical modeling process was thoroughly explained. The force-displacement hysteresis of a BRB equipped with elastomer was compared to that of a BRB without elastomer and of the same dimensions. Additionally, stress distribution in critical areas of the core and casing was examined. The failure mode of this BRB was identified as buckling of the yielding portion of the core. It was observed that incorporating an elastomer into the BRB increased the post-yield stiffness and reduced residual displacements. A model with an elastomer stiffness twice that of the experimental specimen was also studied, demonstrating a 20% increase in post-yield stiffness. The BRB equipped with elastomer has a greater energy dissipation capacity compared to the BRB without elastomer. Compared to conventional BRBs, BRBs equipped with elastomers maintained structural stability even after core fractures, owing to the elastomers' role in critical regions. This characteristic highlights the high efficiency of this system in improving the seismic performance of structures.

Keywords

Double Channel, Intermediate Connectors, Lateral-Torsional Buckling, Flexural Capacity

۱- مقدمه

اولین مهاربند کمناش تاب در سال ۱۹۸۸ در ژاپن توسعه یافت. پژوهش‌ها نشان داد اگرچه بتن مسلح با فولاد در ساختمان‌های بلندمرتبه ظرفیت باربری بالایی داشت، اما از نظر شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی، عملکرد مطلوبی نداشت [۱]. پس از زلزله نورتریج^۱ در سال ۱۹۹۴، پژوهشگران آمریکایی طراحی قاب‌های فولادی موجود را بازبینی کردند و علاقه بیشتری به بررسی قابلیت‌ها و مزایای استفاده از مهاربندهای کمناش تاب (BRB) نشان دادند [۲]. در سال ۲۰۰۰، یک پژوهش آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس BRB در دانشگاه برکلی^۲ انجام شد [۳]. اولین مجموعه دستورالعمل‌های طراحی برای قاب‌های مهاربندی کمناش تاب (BRBF) معرفی شد و در سال‌های بعد، کاربردهای متعددی برای BRB‌ها ارائه گردید. در سال ۲۰۱۵، کرستینگ^۳ و همکاران دستورالعمل طراحی لرزه‌ای BRBF را منتشر کردند که راهنمایی‌هایی برای ساخت BRB‌ها و همچنین تحلیل و طراحی سیستم‌های BRBF ارائه داد [۴]. فولاد کربنی با مقاومت تسلیم حدود ۲۳۵ مگاپاسکال به دلیل مقاومت، شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری بالا، طی دهه‌های گذشته به‌طور گسترده در سازه‌های فولادی استفاده شد. هسته بیش‌تر BRB‌های اولیه از این نوع فولاد ساخته شده است. اولین BRB‌های ساخته‌شده در سال ۱۹۸۸ با استفاده از فولاد JIS SS41 (نام قدیمی SS400 [۵]) تولید شدند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این نوع BRB‌ها رفتار چرخه‌ای پایدار و ظرفیت جذب انرژی خوبی دارند. به دلیل اقتصادی بودن و ساخت آسان، استفاده از این نوع فولاد در ساخت BRB‌ها، همچنان رایج است.

BRB‌های تمام‌فولادی با قراردادن هسته BRB میان لایه‌های فولادی و استفاده از پوشش‌های جداشدنی، امکان تعویض آسان هسته آسیب‌دیده را پس از زلزله‌های متعدد فراهم می‌کند. این طراحی، علاوه بر افزایش دوام و کارایی سازه، قابلیت بازسازی و استفاده مجدد از مهاربندها را بهبود داده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش می‌دهد. جزئیات متنوعی برای توسعه این سیستم‌ها ارائه شده است که عملکرد لرزه‌ای آن را ارتقا می‌بخشد [۶-۸].

ظرفیت جذب انرژی یک BRB به‌طور عمده به هسته آن بستگی دارد. هسته به‌عنوان یک میراگر فلزی تسلیمی عمل کرده

که انرژی را از طریق تغییرشکل غیرالاستیک جذب می‌کند. هرچه هسته‌ریز غیرالاستیک تولیدشده در بخش تسلیم هسته بیش‌تر باشد، انرژی بیش‌تری جذب می‌شود. بنابراین، هسته‌هایی که از موادی با نقطه تسلیم پایین و شکل‌پذیری بالا مانند فولاد با نقطه تسلیم پایین ساخته شده‌اند، مطلوب‌تر هستند زیرا ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند [۹].

هسته‌های ساخته‌شده از آلیاژهای آلومینیومی به دلیل شکل‌پذیری پایین‌تر از فولاد، مطلوب نیستند. در پژوهشی، **دوسیکا^۴ و همکاران** مهاربندی سبک‌وزن با هسته آلومینیومی و لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای را بررسی کردند که وزن مهاربند را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد [۱۰]. همچنین، هسته‌های ساخته‌شده از لوله‌های فولادی می‌توانند ظرفیت جذب انرژی بالایی داشته باشند و هسته‌های سوراخ‌دار نیز به دلیل رفتار هسته‌ریز مناسب، مطلوب هستند. ظرفیت جذب انرژی BRB‌ها معمولاً با ظرفیت تغییرشکل پلاستیک تجمعی و میرایی و یسکوز معادل اندازه‌گیری می‌شوند. علاوه بر عملکرد به‌عنوان یک میراگر، BRB به‌عنوان یک عضو مقاوم در برابر نیروی جانبی نیز عمل می‌کند که قادر به تحمل بار قابل‌توجه بوده و دارای سختی مطلوبی برای سازه‌ها به‌ویژه در ساختمان‌های بلندمرتبه است [۹]. برج تیانجین^۵ یکی از بلندترین ساختمان‌ها در چین است. سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی آن از یک هسته بتن مسلح و سیستم قاب بزرگ مهاربندی‌شده تشکیل شده است. مشخصات طراحی برای پنج طبقه اول نیاز به فضای باز داشت. برای جلوگیری از ایجاد مکانیزم طبقه نرم، مهاربندهای کمناش تاب بزرگ به طول حدود ۴۸ متر در این طبقات به‌صورت شورون قرار داده شده‌اند [۱۱].

برج ناگویا لوسنت^۶ یک آسمان‌خراش ۴۰ طبقه‌ای در ناگویای ژاپن است. سیستم مقاوم لرزه‌ای مورد استفاده برای جذب انرژی لرزه‌ای و اطمینان از ایمنی ساختمان در برابر زلزله‌های طولانی‌مدت، شامل مجموعه‌ای از ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده با بتن و سیستم کنترل ارتعاش ساخته‌شده از BRB‌ها است [۱۲]. اگر ظرفیت باربری و سختی اولویت‌های اصلی طراحی باشند، BRB‌هایی که از لوله‌های فولادی و مقاطع صلیبی ساخته شده‌اند، مطلوب هستند زیرا این مقاطع دوطرفه بوده و استحکام خمشی و سختی یکسانی در هر دو محور اصلی دارند. هزینه‌های مواد، میزان برش و جوشکاری مورد نیاز و سهولت سرهم‌بندی

⁴ Dusicka

⁵ Tianjin

⁶ Nagoya Lucent

¹ Northridge

² Berkeley

³ Kersting

مقاومت جانبی، سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی پیشنهاد کردند [۱۸].

در سال ۲۰۱۸، **گواررو**^۶ و **همکاران** آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی یک قاب چهار طبقه مقیاس‌شده مجهز به BRB انجام دادند و نشان دادند که BRBها گزینه‌ای عالی برای ساختمان‌های پیش‌ساخته در نواحی با لرزه‌خیزی بالا هستند؛ زیرا می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی میرایی را افزایش دهند، اثرات کاهش سختی را به تأخیر بیندازند و دریافت طبقات و جابه‌جایی‌های جانبی سازه را کاهش دهند [۱۹ و ۲۰].

در سال ۲۰۱۹، **چو**^۷ و **همکاران** آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی سه قاب فولادی مقیاس کامل دو طبقه با یک دهانه مجهز به مهاربند خودمركز (DC-SCBs)، BRB و ترکیبی از این دو انجام دادند. برخلاف نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های اجزای جداگانه، قاب مجهز به DC-SCBs بالاترین میزان جذب انرژی را در بین تمامی قاب‌های آزمایشی نشان داد. این موضوع به سختی بالای پس از تسلیم نسبت داده شد [۲۱].

دی‌آنیلو^۸ و **همکاران** دو BRB تمام‌فولادی قابل‌جداشدن را آزمایش کردند که شامل یک صفحه فولادی مستطیلی و یک پوشش فولادی مهارکننده بود که دو شکل به‌صورت امگا را تشکیل می‌دادند و با پیچ به هم متصل شده بودند. این مهاربند تمام‌فولادی تا دامنه دریافت طبقه ۱/۵٪ واکنش متقارن نشان داد که معادل با کرنش ۲/۵٪ در هسته بود [۶].

مزولانی^۹ و **همکاران** برای بهسازی ساختمان‌های دو طبقه بتن مسلح غیرشکل‌پذیر، یک BRB فولادی پیچ‌شده را آزمایش کردند. عملکرد جلوگیری از کماتش این مهاربند توسط دو لوله فولادی مستطیلی تأمین شده بود که با اجزای سخت‌کننده پیچ‌شده به یکدیگر متصل شدند. این مهاربند با شکل‌پذیری ۱۵، عملکرد خوبی از خود نشان داد [۷].

چو^{۱۰} و **چن** نوع خاصی از BRBهای لایه‌ای را معرفی کردند که در آن نیازی به استفاده از مواد بدون چسبندگی نبود. پوشش‌های این مهاربندها از یک کانال فولادی جوش‌شده به یک صفحه تخت تشکیل شده و با بتن با مقاومت ۴۸ تا ۵۸ مگاپاسکال پر شده بود. این پوشش‌ها با استفاده از پیچ به یکدیگر متصل می‌شدند.

طراحی ارائه‌شده توسط نویسندگان شامل دستورالعمل‌هایی برای تأمین پایداری کلی مهاربند، سختی موضعی پوشش‌ها و ظرفیت

قطعات، عواملی هستند که بر قیمت نهایی محصول تأثیر می‌گذارند. در این راستا، BRBهای ساخته‌شده از لوله فولادی پرشده با بتن هنوز به‌عنوان مقرون‌به‌صرفه‌ترین گزینه‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در تحقیقات مواد و تکنیک‌های ساخت و با تکمیل انتقال BRBها از فاز توسعه به فاز تولید، احتمالاً هزینه‌ها کاهش خواهد یافت [۹].

درحالی‌که آزمایش چرخه‌ای یک‌محوری می‌تواند رفتار چرخه‌ای BRB را نشان دهد، برای بررسی اثرات تعامل میان نمونه BRB، تیرها و ستون‌ها آزمایش‌های بیش‌تری نیاز است. در سال ۲۰۱۲، **سارنو**^۱ و **مانفردی**^۲ آزمایش‌های مقیاس کامل را بر روی دو ساختمان قاب بتن مسلح انجام دادند؛ یکی به‌صورت بازسازی با استفاده از BRB و دیگری بدون آن. نتایج آزمایش نشان داد که پاسخ لرزه‌ای قاب بازسازی‌شده می‌تواند به‌طور مؤثر با استفاده از سختی محوری و نیروی تسلیم BRBها کنترل شود [۱۳].

BRBFها به‌دلیل ترکیب سختی و شکل‌پذیری بالا به‌عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی مؤثر شناخته می‌شوند. کاهش طول BRB و ترکیب آن با مهاربندهای الاستیک، مزایای متعددی مانند کاهش مواد مصرفی و هزینه‌های تولید، تسهیل در نصب و تعویض پس از زلزله دارد. مطالعات نشان می‌دهند که کاهش طول BRB تأثیر چشم‌گیری بر سطح مقطع هسته مورد نیاز ندارد و سیستم‌های مهاربند با طول کاهش‌یافته (RLBRBs) عملکرد بهتری در توزیع پلاستیسیته در ارتفاع سازه و کاهش تغییرمکان‌های باقی‌مانده و بیشینه دارند. همچنین، این مهاربندها اقتصادی‌تر از نمونه‌های بلند بوده و قابلیت جابه‌جایی و جایگزینی ساده‌تری پس از زلزله فراهم می‌کنند [۱۴ و ۱۵].

در سال ۲۰۱۴، **پالمر**^۳ و **همکاران** نتایج آزمایش‌های یک BRBF دوبعدی و سه‌بعدی را ارائه کردند و نشان دادند BRBFها در یک ساختار سیستم، تقاضاهای متفاوتی نسبت به آزمایش یک‌محوره ساده دارند [۱۶]. در سال ۲۰۱۵، **ماهرنولتز**^۴ و **همکاران** آزمایش‌های مقیاس بزرگ بر روی BRBهای متصل به قاب‌های بتن مسلح با انکرهای بتن پس‌انصب‌شده انجام دادند و نشان دادند که هم شکل‌پذیری و هم مقاومت قاب‌ها می‌تواند به سطح عملکرد لرزه‌ای بسیار بالا افزایش یابد [۱۷]. در سال ۲۰۱۶، **پان**^۵ و **همکاران** به‌جای استفاده از انکرهای پس‌انصب‌شده، استفاده از BRBF ساخته‌شده درون قاب‌های بتن مسلح را برای بهبود

⁶ Guerrero

⁷ Chou

⁸ D'Aniello

⁹ Mazzolani

¹⁰ Chen

¹ Sarno

² Manfredi

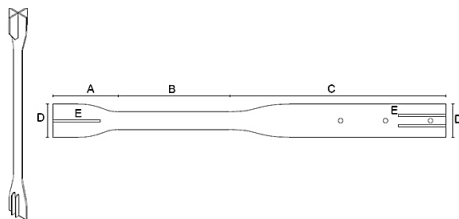
³ Palmer

⁴ Mahrenholtz

⁵ Pan

۱-۲- هسته فولادی

وظیفه اصلی هسته، تحمل نیروهای محوری فشاری و کششی است که در طول چرخه‌های بارگذاری وارد می‌شوند. این عضو با طراحی مناسب برای تغییرشکل‌های بزرگ، رفتار غیرخطی مطلوبی از خود نشان داده و عمده انرژی لرزه‌ای را از طریق تغییرشکل پلاستیک جذب و مستهلک می‌کند. هسته مرکزی این BRB ابداعی مشابه سایر BRBها از یک هسته فولادی (شکل ۲)) تشکیل شده است که در آن به چهار قسمت اصلی می‌توان اشاره کرد: قسمت A و C به‌عنوان بخش‌های غیرتسلیم‌شونده در نظر گرفته شده‌اند، درحالی‌که B بخش تسلیم‌شونده را تشکیل می‌دهد. D به عرض یا پهنای هسته اشاره دارد و E مربوط به سخت‌کننده‌های هسته می‌باشد.



شکل ۲- تصویر شماتیک هسته

۲-۲- غلاف فولادی

غلاف به‌عنوان یک پوشش برای جلوگیری از کمانش جانبی یا موضعی هسته در هنگام بارگذاری فشاری عمل کرده و امکان بهره‌گیری از ظرفیت کامل محوری هسته را فراهم می‌کند. غلاف در BRBها یکی از اجزای اصلی و بسیار مهم محسوب می‌شود. در این آزمایش، غلاف از ورق فولادی تهیه و اجرا شده است. ورق اصلی مورد استفاده برای ساخت غلاف هسته دارای ضخامت ۱۵ میلی‌متر، عرض ۲۴/۵ سانتی‌متر و طول ۱۶۰ سانتی‌متر است. غلاف به‌صورت دو قطعه از بالا و پایین هسته به‌یکدیگر متصل می‌شود. در شکل (۳) شماتیک قسمت رو به هسته غلاف بالا و پایین نمایش داده شده است.

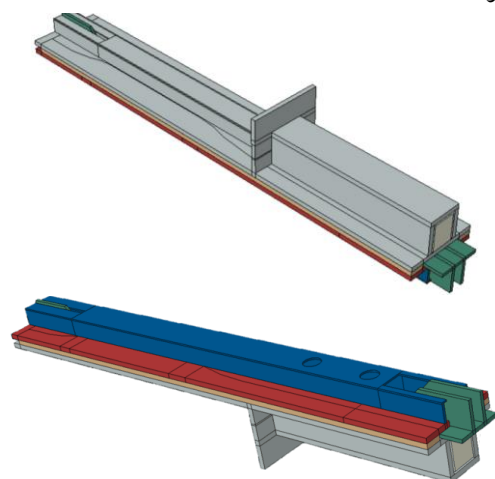
محوری پیچ‌های اتصال بر اساس طول موج کمانش در موده‌های بالاتر بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در صورت تأمین سختی خمشی کافی برای پوشش‌ها، مهاربندهای پیشنهادی در تغییرشکل جانبی ۲/۴٪ و شکل‌پذیری پلاستیک تجمعی مناسب، پاسخ هیستریزس مناسبی از خود نشان دادند [۲۲].

رضوی و همکاران به بررسی و توسعه RLBRBها پرداختند. این پژوهش شامل طراحی، ساخت و آزمایش دو نمونه مهاربند تمام‌فولادی بود. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و بدون بروز شکست‌های کلی یا موضعی، کرنش‌های محوری بالای ۵٪ تحمل کردند. رفتار هیستریزس نمونه‌ها پایدار و متقارن بود. همچنین، مدل‌های عددی توسعه یافت و تحلیل‌های چرخه‌ای غیرخطی انجام شد که به درک بهتر از عملکرد هسته و غلاف‌ها و کاربرد RLBRB در سیستم‌های مهاربندی کمک کرد. نتایج نشان داد که کاهش طول هسته باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای، کاهش تغییرمکان‌های باقی‌مانده و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود [۲۳].

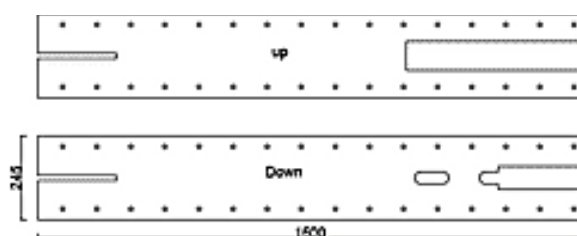
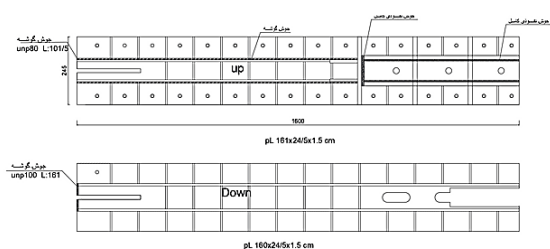
در این مطالعه ابتدا یک مهاربند کمانش‌تاب ابداعی مجهز به الاستومر معرفی شده و سپس با مدل‌سازی عددی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن در نرم‌افزار Abaqus، این BRB ابداعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها نیز تأثیر سختی الاستومر بر روی نتایج عددی بررسی می‌گردد.

۲- معرفی BRB ابداعی مجهز به الاستومر

BRB ابداعی مطابق سایر BRBها شامل هسته فولادی، غلاف فولادی و پرکننده است با این تفاوت که به‌وسیله یک الاستومر هسته به غلاف متصل می‌شود. نمونه نهایی در شکل (۱) نمایش داده شده است. در ادامه اجزای تشکیل‌دهنده این BRB معرفی می‌شود.



شکل ۱- BRB ابداعی مجهز به الاستومر



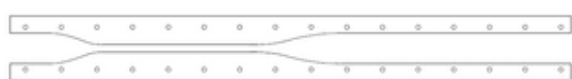
شکل ۳- شماتیک غلاف BRB

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها (cm)

نمونه	عرض ابتدا و انتهای هسته (D)	عرض قسمت تسلیم‌شونده (B)	ضخامت هسته	طول هسته	سخت‌کننده‌های هسته (E)	ابعاد الاستومر
A-1	14	7.5	1	166	$20 \times 8 \times 1$	ندارد
A-2	14	7.5	1	166	$20 \times 8 \times 1$	$51 \times 5 \times 9$

۳-۲- پرکننده

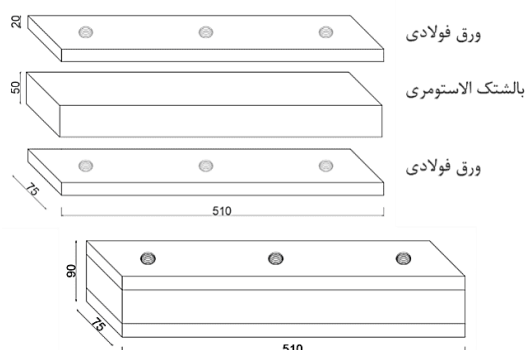
در BRBها، برای پرکردن فضای خالی میان هسته و غلاف و حفظ فاصله مناسب از پرکننده‌ها استفاده می‌شود که پس از سرهم‌بندی، با غلاف یکپارچه می‌شوند. طول آن ۳ سانتی‌متر کوتاه‌تر از غلاف در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) پرکننده‌های BRB مجهز به الاستومر نمایش داده شده است.



شکل ۵- شماتیک غلاف BRB

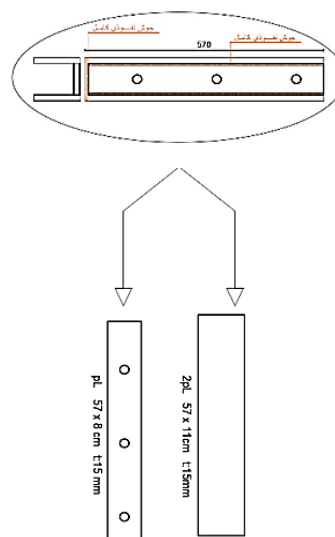
۴-۲- الاستومر

در این BRB، از بالشتک الاستومری نئوپرن استفاده شده که مطابق شکل (۶) بین دو ورق فولادی مساوی، مواد لاستیکی الاستومر در این ساختار جای گرفته است. در شکل (۷) نیز یک نمونه الاستومر نئوپرن نشان داده شده است.



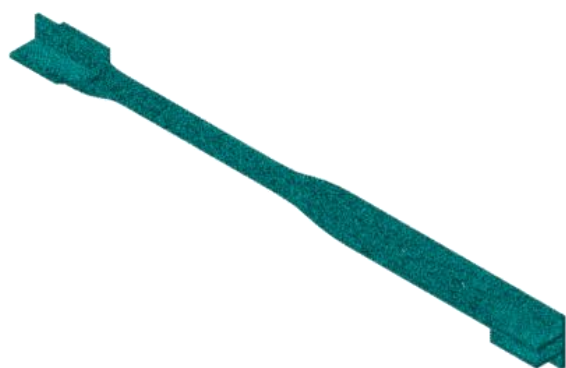
شکل ۶- شماتیک الاستومر

برای نصب الاستومر در BRB، غلافی متشکل از سه ورق فولادی ساخته شده است: دو ورق با ضخامت ۱۵ میلی‌متر، عرض ۱۱ سانتی‌متر و طول ۵۷ سانتی‌متر و یک ورق با همان ضخامت، عرض ۸ سانتی‌متر و طول ۵۷ سانتی‌متر (شکل (۴)). این ورق‌ها با جوش نفوذی کامل به شکل ناودانی مونتاژ شده تا الاستومر مهار شود. برای مقابله با تغییر مکان‌ها، کمانش، پیچش و ناپایداری نمونه، در دو سمت نمونه دو ناودانی تعبیه شده است. در سمت دارای الاستومر از ناودانی سایز ۸ با طول ۱۰۱/۵ سانتی‌متر و در سمت فاقد الاستومر از ناودانی سایز ۱۰ با طول ۱۶۰ سانتی‌متر استفاده شده است.

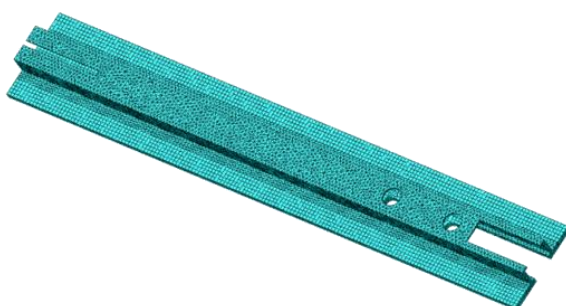


شکل ۴- شماتیک غلاف الاستومر BRB

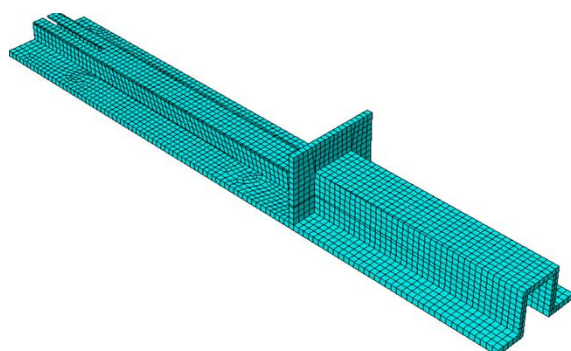
نیز انجام شد. اندازه مش در اجزا از ۵ میلی متر تا ۲۰ میلی متر متغیر است.



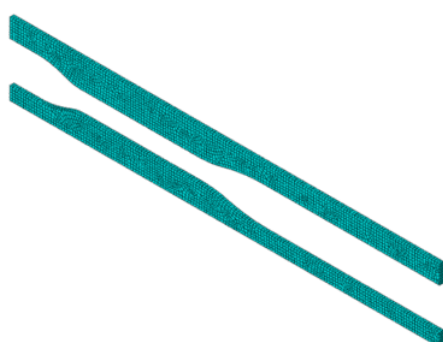
شکل ۹- مش هسته BRB



شکل ۱۰- مش غلاف پایین BRB



شکل ۱۱- مش غلاف بالا BRB



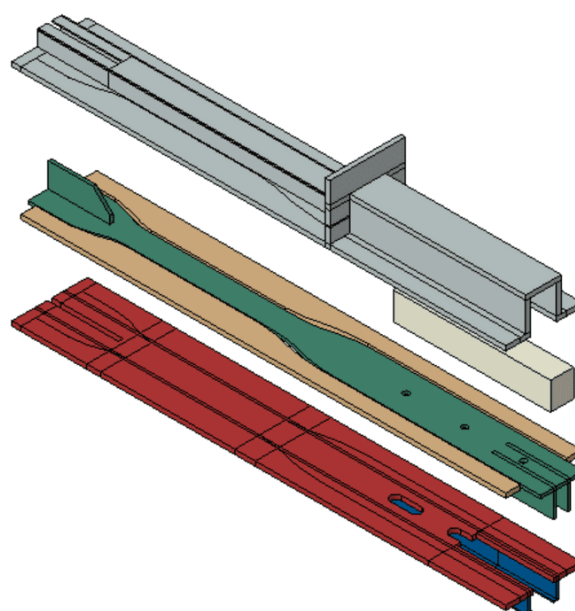
شکل ۱۲- مش پرکننده های BRB



شکل ۷- یک نمونه الاستومر نئوپرن

۲-۵- سرهم بندی

پس از نصب هسته بر روی غلاف پایین، پرکننده ها در کنار هسته قرار گرفته با قرارگیری غلاف بالا، الاستومر در جای خود بین هسته و غلاف متصل می شود. وضعیت نهایی BRB ساخته شده در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- سرهم بندی BRB مجهز به الاستومر

۳- مدل سازی

از نرم افزار Abaqus برای مدل سازی عددی BRB استفاده شد. در این بخش به نحوه مدل سازی BRB و اجزای آن پرداخته می شود.

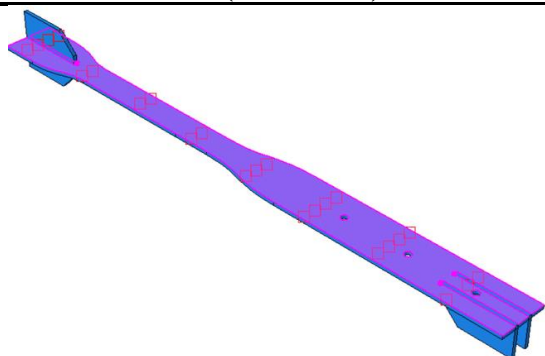
۳-۱- مش

مطابق بخش ۲ این BRB از چهار بخش اصلی شامل هسته، غلاف، پرکننده و الاستومر تشکیل شده است. در شکل های (۹) الی (۱۴) به ترتیب مش اجزای ساخته شده نمایش داده شده است. مش های همه اجزا از نوع C3D8R^۱ است. بررسی حساسیت مش

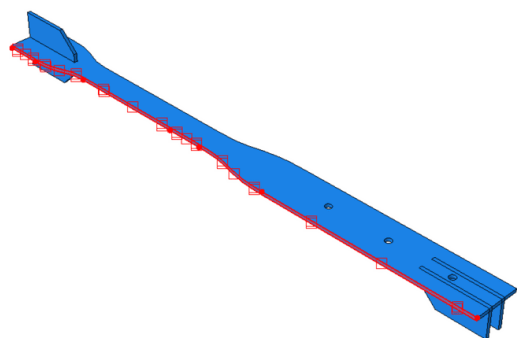
^۱ 8-Node Linear Brick, Reduced Integration, Hourglass Control

جدول ۲- مشخصات خصوصیات تماس بین اجزا

Interaction Property	Tangential Behavior	Normal Behavior
IntProp1	Frictionless	Hard Contact
IntProp2	Penalty (Coefficient=0.3)	Hard Contact



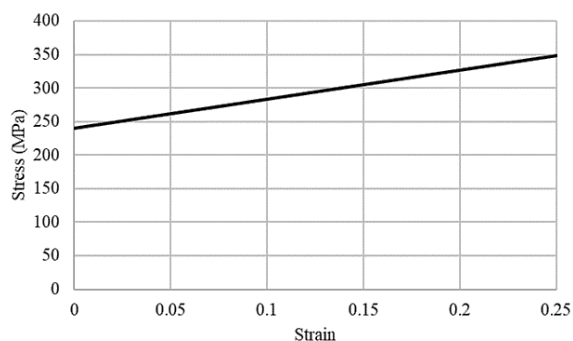
شکل ۱۵- نمونه صفحه تماس هسته با غلاف



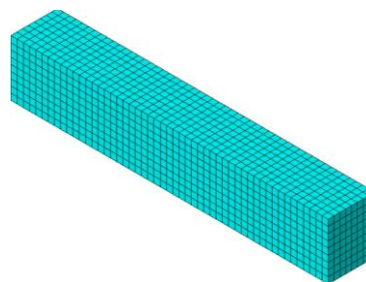
شکل ۱۶- نمونه صفحه تماس هسته با پرکننده

۴-۳- مصالح

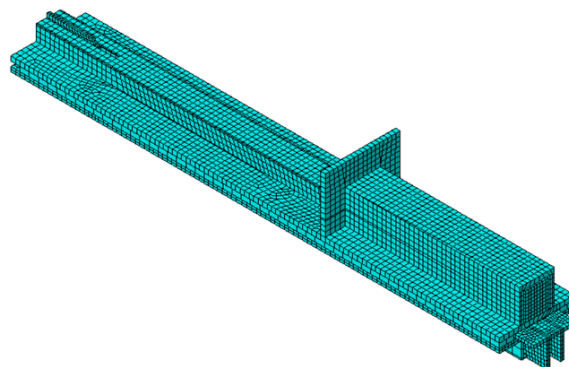
تمامی اجزای BRB فوق از نوع فولاد ST37 در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۱۷) نمودار تنش- کرنش واقعی آن نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش واقعی فولاد ST37



شکل ۱۳- مش الاستومر BRB



شکل ۱۴- مش سرهم‌بندی کامل نمونه BRB مجهز به الاستومر

۲-۳- حلگر

در این مدل تحلیل با استفاده از حلگر Dynamic/Explicit انجام می‌شود چراکه در مقایسه با حلگر Abaqus/Standard، قابلیت زیادی در حل مسائل با ماهیت غیرخطی بالا دارد. همچنین تعداد تماس بین سطوح در این مسئله بالا می‌باشد؛ بنابراین برای همگرایی بیش‌تر از این حلگر استفاده می‌شود. حلگر Dynamic/Explicit برای مسائل با نرخ تغییرات بالا، نظیر ضربه، برخورد و انفجار یا سطوح پیچیده توسعه یافته و کاربرد دارد.

۳-۳- تماس

در BRB دو تماس تعریف شده است: یک تماس بین صفحه بیرونی هسته و صفحات داخلی غلاف بالا و پایین و تماس دیگر مطابق شکل صفحات مجاور پرکننده‌ها و صفحه مجاور هسته. مطابق جدول (۲) تماس از نوع Surface to Surface و دو نوع رفتار مماسی و عمودی با ضریب ۰/۳ تعریف شده است. توجه شود که رفتار مماسی در تماس بین هسته و غلاف از نوع Frictionless در نظر گرفته شده است. بنابراین تماس مطابق شکل (۱۵) صفحات بین هسته و غلاف‌ها از نوع IntProp1 (بدون اصطکاک) و بین هسته و پرکننده از نوع IntProp2 (با ضریب اصطکاک برابر ۰/۳) و مطابق شکل (۱۶) است.

آن به هسته متصل است. در BRB بدون الاستومر مشابه BRBهای مرسوم، غلاف بالا بدون الاستومر بوده و به جای الاستومر یک صفحه در امتداد هسته قرار می‌گیرد.

۳-۶- بارگذاری

برای بارگذاری یک جابه‌جایی با تابع Smooth به صفحه ابتدایی هسته داده شد. پروتکل بارگذاری مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴- مقادیر بارگذاری

Time/Step	Displacement (mm)
0	0
0.125	8
0.375	-8
0.625	15
0.875	-15
1.125	23
1.375	-23
1.625	30
1.875	-30
2	0

۴- نتایج

منحنی هیستریزس حاصل از آنالیز اجزای محدود مدل عددی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن در شکل (۱۹) نشان داده شده است. با توجه به نمودار، منحنی در قسمت خطی و الاستیک مشابه یکدیگر هستند. به مرور و تشکیل حلقه‌های هیستریزس، این تغییرات بیش‌تر شده و در چرخه‌های با جابه‌جایی بیش‌تر، شیب قسمت غیرخطی در BRB مجهز به الاستومر افزایش می‌یابد. در شکل (۲۰) قسمتی از غلاف به همراه هسته فولادی در هر دو نمونه BRB نمایش داده شده است. در این شکل برای سهولت نمایش تنش‌های وارد بر قسمت‌های داخلی غلاف، از سایر اجزای BRB صرف‌نظر شده است. تنش‌های زیادی در غلاف هر دو نمونه مشاهده نمی‌شوند.

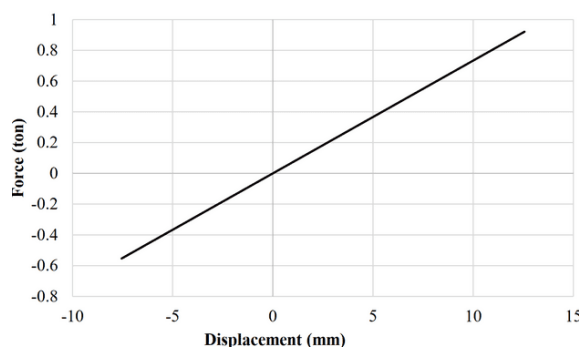
بر اساس آزمایش انجام‌شده بر روی یک قطعه الاستومر (شکل (۷)) نمودار نیرو-جابه‌جایی الاستومر مطابق شکل (۱۸) است. مقدار سختی آن برابر ۷۵۰ نیوتون بر میلی‌متر محاسبه می‌شود.

در جدول (۳) محاسبات مربوط به مدول برشی و الاستیسته آن نمایش داده شده است. مطابق جدول، مقدار ضریب پواسون الاستومر برابر ۰/۵ و تراکم‌ناپذیر (برای همگرایی نتایج ۰/۴۹ فرض می‌شود) در نظر گرفته شده و مقدار مدول الاستیسته برابر ۵/۲۸ مگاپاسکال محاسبه می‌شود.

جدول ۳- محاسبات ضرایب مدول برشی و الاستیسته الاستومر

$$K = G \times \frac{A}{L} \rightarrow 750 = G \times \frac{510 \times 75}{90} \rightarrow G = 1.76 \text{ MPa}$$

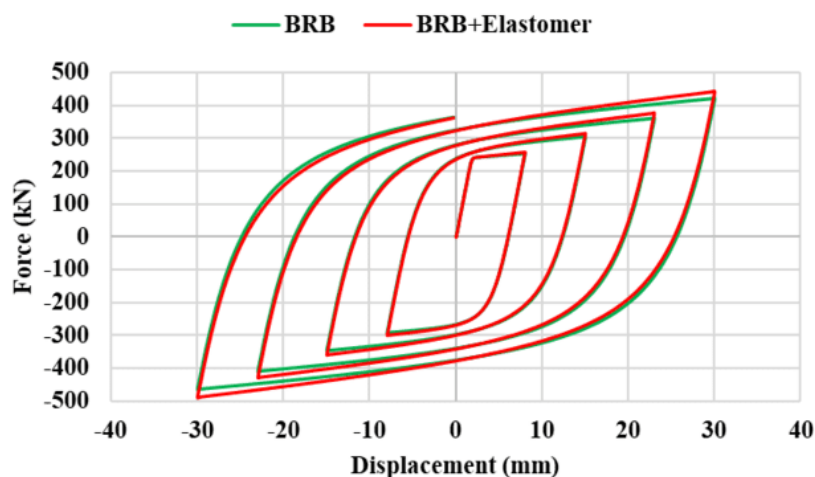
$$\text{if } \nu = 0.5 \rightarrow E = 2(G)(1 + \nu) = 5.28 \text{ MPa}$$



شکل ۱۸- نمودار نیرو-جابه‌جایی الاستومر

۳-۵- قیود

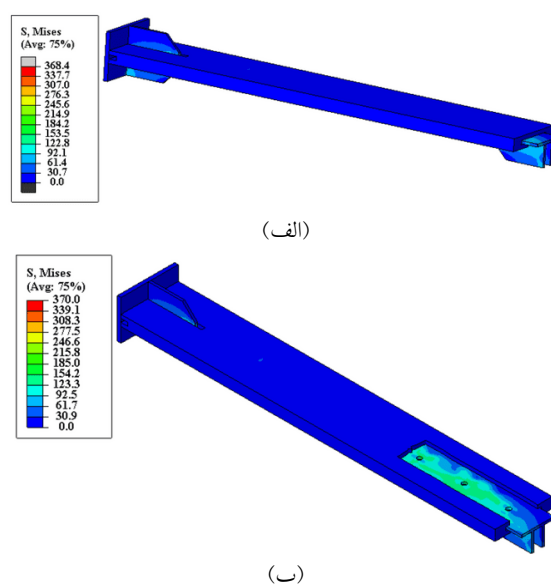
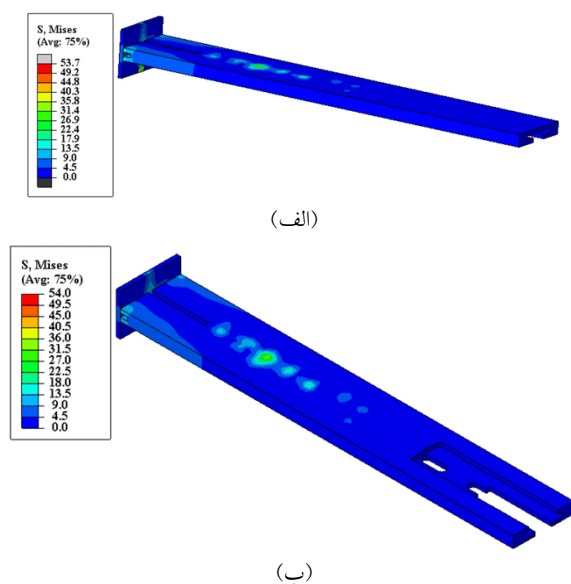
در مدل اصلی پیچ‌ها موجب اتصال غلاف و پرکننده‌ها می‌شود. در مدل‌سازی عددی صفحات بین این دو قطعه به یکدیگر توسط قید Tie به یکدیگر متصل می‌شود. همچنین یک صفحه به انتهای غلاف و هسته نیز توسط قید Tie متصل شده که در انتها، این صفحه انتهایی به‌طور کامل مقید شده است. در BRB مجهز به الاستومر، صفحه بالای الاستومر به غلاف متصل و صفحه پایین



شکل ۱۹- هیستریزس نیرو-جابجایی مدل BRB مجهز به الاستومر (BRB+Elastomer) و BRB بدون الاستومر (BRB)

مقدار تنش حدود ۳۰ مگاپاسکال در وسط غلاف در مکانی که قسمت تسلیم شونده هسته واقع شده، رخ داده است.

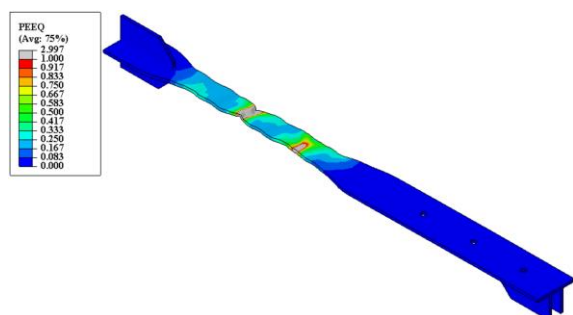
در شکل (۲۰) توزیع تنش در غلاف فولادی برای هر دو نمونه دیده می شود. با توجه به این توزیع، حداکثر تنش حدود ۵۰ مگاپاسکال در صفحه انتهایی هر دو نمونه دیده می شود. با این حال



شکل ۲۱- توزیع تنش در غلاف: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

شکل ۲۰- توزیع تنش در نمونه: (الف) BRB بدون الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

در سایر نقاط غلاف، تنش محسوسی دیده نشده و تسلیم نداده است. بنابراین تنش های واقع در نمونه ها تقریباً یکسان هستند. عدم تسلیم در غلاف به خوبی در شکل (۲۲) دیده می شود. کرنش پلاستیک به واسطه عدم ورود غلاف به محدوده پلاستیک و تسلیم، صفر است.

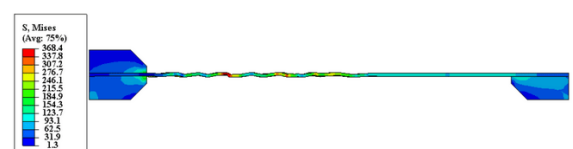


شکل ۲۴- توزیع کرنش پلاستیک هسته BRB مجهز به الاستومر

تعداد کماتریتاب نمونه‌های عددی در شکل (۲۵) نشان داده شده است. بنابراین در نمونه دارای الاستومر، شش و در نمونه بدون الاستومر، پنج کماتریتاب در هسته مشاهده می‌شود.



(الف)

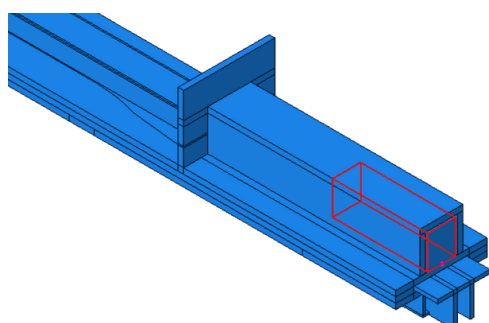


(ب)

شکل ۲۵- مود کماتریتاب: (الف) BRB بدون الاستومر

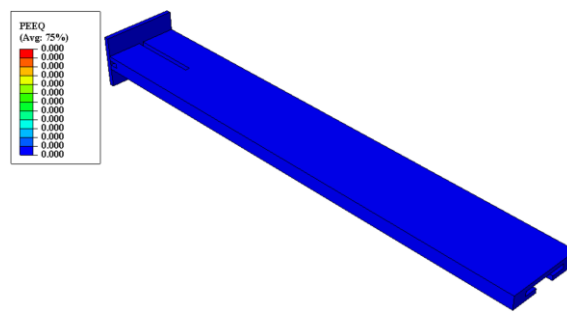
(ب) BRB مجهز به الاستومر

برای بررسی بیش‌تر تأثیر الاستومر در BRB مجهز به الاستومر، با فرض کاهش طول آن، منحنی هیستریزیس مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین طول الاستومر از ۵۱۰ میلی‌متر به ۲۵۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد که با این تغییر مقدار سختی آن از ۷۵۰ نیوتون بر میلی‌متر به ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر افزایش می‌یابد. شکل (۲۶) قرارگیری الاستومر جدید در نمونه را نمایش می‌دهد.

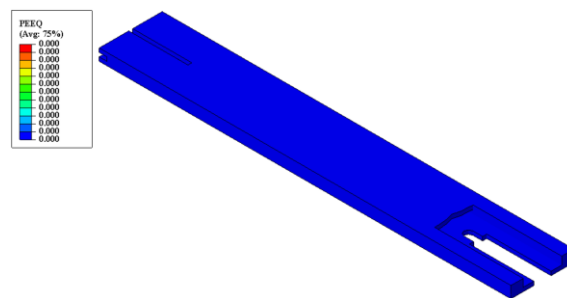


شکل ۲۶- قرارگیری الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتون بر میلی‌متر در

بین غلاف و هسته BRB



(الف)

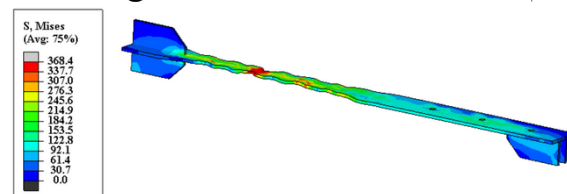


(ب)

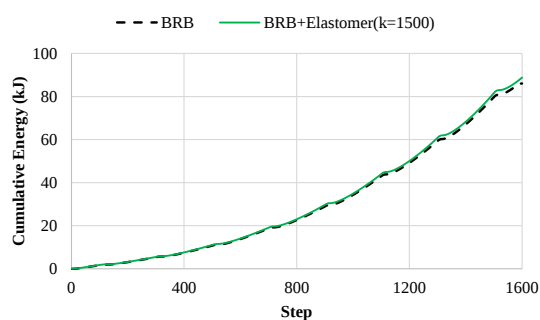
شکل ۲۲- توزیع کرنش پلاستیک در غلاف: (الف) BRB بدون

الاستومر (ب) BRB مجهز به الاستومر

برای مثال هسته BRB مجهز به الاستومر مطابق شکل (۲۳) دچار خرابی در مود کماتریتاب شده است. مطابق آن تسلیم اجزا در قسمت تسلیم‌شونده مشخص است. عملکرد صحیح هسته با مود خرابی کماتریتاب هسته مشهود بوده و توزیع تنش‌ها با فاصله از قسمت تسلیم‌شونده هسته کاهش می‌یابد. در شکل (۲۴) توزیع کرنش پلاستیک مشخص شده است که با توجه به آن، خرابی در محدوده حداکثر تجمع کرنش پلاستیک روی می‌دهد. انتظار می‌رود هسته در آن محدوده دچار گسیختگی و پارگی شود. بنابراین می‌توان این نکته مدنظر گرفته شود که غلاف به هیچ‌عنوان تسلیم نشده است و خرابی به‌طور کلی در هسته رخ داده است.



شکل ۲۳- توزیع تنش هسته BRB مجهز به الاستومر



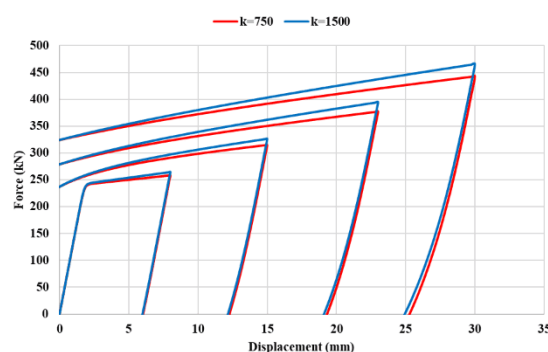
شکل ۲۹- انرژی تجمعی BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر و BRB بدون الاستومر

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک BRB ابداعی مجهز به الاستومر مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. این ارزیابی عددی در نرم‌افزار Abaqus انجام شد. پس از مرور ادبیات فنی، اجزای BRB مذکور به‌طور کامل توضیح داده شد. نحوه اتصال الاستومر به غلاف و هسته نیز ارائه شده است. سپس نحوه مدل‌سازی آن با Abaqus بررسی شد. جزئیات مدل‌سازی شامل اجزا، مش‌بندی قطعات، نوع حلگر، مشخصات تماس بین اجزا، مصالح مورد استفاده، قیود مورد نظر و در انتها بارگذاری ارائه شد. پس از آنالیز مدل عددی هیستریزیس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر و بدون آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نقاط تسلیم و بحرانی غلاف و هسته از منظر توزیع تنش مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین سختی پس از تسلیم در BRB مجهز به الاستومر افزایش داشت. مود خرابی BRB از نوع کماتشی بود. در هر دو نمونه به یک تعداد کماتش در هسته مشاهده شد. قرارگیری الاستومر در BRB باعث افزایش سختی پس از تسلیم آن می‌شود و از این طریق جابه‌جایی پسماند متناظر نیز کاهش می‌یابد. با مدل‌سازی مجدد با نسبت سختی دو برابری الاستومر نسبت به حالت اولیه، افزایش ۲۰ درصدی سختی پس از تسلیم قابل توجه بود. در انتها با مقایسه مقدار انرژی تجمعی اتلافی مشخص شد که نمونه BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر حدود ۳/۵٪ از BRB بدون الاستومر، اتلاف انرژی بیش‌تری دارد.

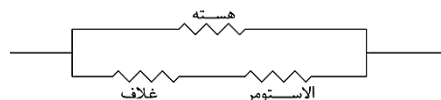
از دیگر مزایای BRB مجهز به الاستومر در مقایسه با BRBهای مرسوم، BRB مجهز به الاستومر حتی پس از وقوع زلزله و گسیختگی هسته، به دلیل اتصال الاستومر به غلاف و نواحی ابتدایی یا غیرالاستیک هسته، توانایی حفظ پایداری سازه را دارا می‌باشد.

منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر با سختی ۷۵۰ نیوتن بر میلی‌متر و ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر در شکل (۲۷) نشان داده شده است. سختی اولیه یکسان است. سختی پس از تسلیم در نمونه با سختی بیش‌تر الاستومر افزایش یافته است. این افزایش پس از تسلیم، در چرخه‌های بالاتر به‌خوبی دیده می‌شود. با دو برابر شدن سختی الاستومر در BRB مقاومت افزایش یافته و سختی پس از تسلیم نیز افزایش می‌یابد که خود در کاهش جابه‌جایی پسماند مؤثر است. افزایش سختی پس از تسلیم در مقایسه دو نمونه حدود ۲۰ درصد است. به این معنا که BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر سختی پس از تسلیم حدود ۱/۲ برابر بیش‌تری را نسبت به BRB مجهز به الاستومر با سختی ۷۵۰ نیوتن بر میلی‌متر تجربه می‌کند.



شکل ۲۷- نمودار نیرو-جابجایی BRB مجهز به الاستومر با دو سختی ۷۵۰ نیوتن بر میلی‌متر و ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر

قطعه الاستومر عملکرد کاملاً الاستیک دارد. این قطعه از یک سو به هسته فولادی و از سوی دیگر به غلاف متصل است. عملکرد این الاستومر مشابه یک فنر سری متصل به غلاف و مجموع آن به‌صورت موازی متصل به هسته مطابق شکل (۲۸) است. این روند با افزایش سختی پس از تسلیم مهاربند، بهبود چشمگیری در عملکرد کلی آن ایجاد می‌کند.



شکل ۲۸- مدل‌سازی رفتاری BRB مجهز به الاستومر به‌وسیله فنر

مقدار انرژی تجمعی BRB بدون الاستومر و BRB مجهز به الاستومر با سختی ۱۵۰۰ نیوتن بر میلی‌متر در شکل (۲۹) نشان داده شده است. با توجه به آن با اضافه شدن الاستومر، مقدار انرژی حدود ۳/۵٪ افزایش داشته است.

- [14] Razavi, S.A., Shemshadian, E., Mirghaderi, R., and Ahleghagh, S. (2011), "Seismic design of buckling restrained braced frames with reduced core length",
- [15] Shemshadian, M.E., Razavi, S.A., Mirghaderi, S.R., Hosseini, A., and Mohammadi, M.K. (2011), "The advantages of reducing the length of yielding segment in seismic performance of buckling restrained braced frames", In Sixth International Conference of Seismology and Earthquake Engineering, pp. 1-8.
- [16] Palmer, K.D., Christopoulos, A.S., Lehman, D.E., and Roeder, C.W. (2014), "Experimental evaluation of cyclically loaded, large-scale, planar and 3-d buckling-restrained braced frames", Journal of Constructional Steel Research, 101, pp. 415-425.
- [17] Mahrenholtz, C., Lin, P.C., Wu, A.C., Tsai, K.C., Hwang, S.J., Lin, R.Y., and Bhayusukma, M.Y. (2015), "Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44(1), pp. 59-78.
- [18] Pan, K.Y., Wu, A.C., Tsai, K.C., Li, C.H., and Khoo, H.H. (2016), "Seismic retrofit of reinforced concrete frames using buckling-restrained braces with bearing block load transfer mechanism", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45(14), pp. 2303-2326.
- [19] Guerrero, H., Ji, T., Escobar, J.A., and Teran-Gilmore, A. (2018), "Effects of buckling-restrained braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation", Engineering Structures, 163, pp. 294-310.
- [20] Guerrero, H., Escobar, J.A., and Teran-Gilmore, A. (2018), "Experimental damping on frame structures equipped with buckling-restrained braces (BRBs) working within their linear-elastic response", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 106, pp. 196-203.
- [21] Chou, C.C., Hsiao, C.H., Chen, Z.B., Chung, P.T., and Pham, D.H. (2019), "Seismic loading tests of full-scale two-story steel building frames with self-centering braces and buckling-restrained braces", Thin-Walled Structures, 140, pp. 168-181.
- [22] Chou, C.C., and Chen, S.Y. (2010), "Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces", Engineering structures, 32(8), pp. 2108-2121.
- [23] Tabatabaei, S.A.R., Mirghaderi, S.R., and Hosseini, A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces", Engineering Structures, 77, pp. 143-160.
- [1] Fujimoto, M.W.A.S. (1988), "A study on the unbonded brace encasted in bucking-restrained concrete and steel tube", Journal of Structure. Engineering, AIJ, 34.
- [2] Sabol, T.A. (2004), "An assessment of seismic design practice of steel structures in the United States since the Northridge earthquake", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 13(5), pp. 409-423.
- [3] Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I. (1999), "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices", In Proceedings, 68th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Santa Barbara.
- [4] Kersting, R.A., Fahnestock, L.A., and López, W.A. (2015), "Seismic design of steel buckling-restrained braced frames", NIST GCR, pp. 15-917.
- [5] ASTM A36/A36M-19 (2019), "Standard Specification for Carbon Structural Steel", American Society for Testing and Materials International West Conshohocken.
- [6] D'Aniello, M., Corte, G.D., and Mazzolani, F.M. (2008), "Experimental Tests of a Real Building Seismically Retrofitted by Special Buckling-Restrained Braces", In AIP Conference Proceedings, Vol. 1020, No. 1, pp. 1513-1520. American Institute of Physics.
- [7] Mazzolani, F.M., Corte, G.D., and D'Aniello, M. (2009), "Experimental analysis of steel dissipative bracing systems for seismic upgrading", Journal of Civil Engineering and Management, 15(1), pp. 7-19.
- [8] Eryaşar, M.E., and Topkaya, C. (2010), "An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39(5), pp. 561-581.
- [9] Zhou, Y., Shao, H., Cao, Y., and Lui, E.M. (2021), "Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review", Engineering Structures, 246, pp. 112991.
- [10] Dusicka, P., and Tinker, J. (2013), "Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces", Journal of Composites for Construction, 17(1), pp. 139-150.
- [11] L. Bao, D. Wang, J. Zhou, J. Chen, J., Tong, and D. Lu, "Design and rethinking of mega brace in Tianjin 117 tower," Prog. Steel Build. Struct., vol. 2, pp. 43-48, 2014.
- [12] Zhang, G., Chen, P., Zhao, Z., and Wu, J. (2018), "Experimental study on seismic performance of rocking buckling-restrained brace steel frame with liftable column base", Journal of Constructional Steel Research, 143, pp. 291-306.
- [13] Di Sarno, L., and Manfredi, G. (2012), "Experimental tests on full-scale RC unretrofitted frame and retrofitted with buckling-restrained braces", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41(2), pp. 315-333.