



بررسی تأثیر شکل و ابعاد بر رفتار جداسازهای لاستیکی لایه‌ای

مهدی رضوی سطوتی^۱، حسن حاجی کاظمی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد - واحد یزد

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Mahdirazavisetvati@yahoo.com
hkazemi@um.ac.ir

خلاصه

در این مقاله، تأثیر وجود ورق‌های فولادی، شکل مقطع، تغییر قطر و طول ضلع و بالاخره تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد در تغییر مکان‌های افقی، قائم و چرخش صفحه جداساز لاستیکی لایه‌ای (laminated Rubber Bearing) بررسی گردیده است، در واقع عوامل موثر بر سختی افقی، قائم و چرخشی جداسازهای لاستیکی لایه‌ای به روش مقایسه تغییر شکل‌ها بررسی شده است. روابط تئوری موجود برای بررسی رفتار جداسازی لاستیکی لایه‌ای به دلیل ساده‌سازیها و در نظر نگرفتن رفتار غیرخطی لاستیک دارای تقریب زیادی می‌باشند، در این تحقیق با آنالیز غیرخطی به کمک نرم‌افزار Ansys، رفتار جداسازهای لاستیکی لایه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. واژه‌های کلیدی: جداسازهای لرزه‌ای، آنالیز غیرخطی، شکل و ابعاد، رفتار جداسازهای لاستیکی لایه‌ای.

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در طراحی سازه‌ها، طراحی آنها در برابر بارهای جانبی به ویژه بارهای جانبی اتفاقی نظیر زلزله است. تاکنون روش‌های بسیاری برای مقاوم سازی سازه‌ها در برابر زلزله ابداع شده است، که برخی از آنها مانند نصب اعضای مهاربندی در قالبها و یا افزودن دیوارهای برشی رواج بیشتری دارد. اکثر این روشها براساس این فرض استوارند که نیروی ناشی از زلزله به طور کامل از طریق پی به سازه منتقل شده سپس میان عناصر خاصی که برای این منظور در سازه تعبیه شده‌اند توزیع و توسط آنها تحمل می‌گردند. روش دیگری که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، تعبیه و نصب جداگرهای لرزه‌ای در محل اتصال سازه به پی به عنوان مانعی برای انتقال کامل نیرو و انرژی زلزله از پی به سازه است. در واقع جداسازهای لرزه‌ای یک روش طراحی لرزه‌ای مقاوم است که به جای افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه بر مبنای کاهش نیاز لرزه‌ای قرار دارد [۱،۲].

به طور کلی هر جداساز دارای سه خصوصیت می‌باشد:

۱- سختی قائم زیاد، جداسازهای لرزه‌ای باید قادر به تحمل بار قائم ساختمان و انتقال آن به پی‌ها باشند بدون آنکه خلی در عملکردشان در طول عمر مفید سازه ایجاد نماید.

۲- سختی افقی کم، شتاب اکثر زلزله‌ها معمولاً دارای زمان تناوب غالبی در حدود ۰/۱ تا ۱ ثانیه می‌باشند. جداسازها باید با انعطاف‌پذیری زیاد خود موجب افزایش دوره تناوب سازه نسبت به دوره تناوب زلزله طرح شده و از تشدید پاسخ سازه جلوگیری نمایند.

۳- میرایی، میرایی در سیستم جداساز موجب محدود شدن تغییر مکانها و استهلاک انرژی زلزله می‌شود.

تاکنون سیستم‌های جداگر متنوع بسیاری شناخته شده و به ثبت رسیده است. دو نوع اصلی سیستم جداکننده (از نظر رفتاری) وجود دارد:

تکیه‌گاههای الاستومریک و تکیه‌گاههای لغزشی. سیستم‌هایی نیز پیشنهاد و ساخته شده‌اند که ترکیبی از تکیه‌گاههای الاستومریک و لغزشی می‌باشند.

جداسازی‌های لاستیکی - لایه‌ای از لاستیک طبیعی یا مصنوعی که توسط ورق‌های فولادی مسلح شده‌اند، ساخته شده است. این تکیه‌گاه‌ها را می‌توان به ابعادی ساخت که ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری افقی لازم برای جداسازی لرزه‌ای را تأمین کنند [۳].

۲- مدل‌سازی تئوری

خواص مکانیکی جداسازی‌های لاستیکی لایه‌ای در طول چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با وجود این، هنوز انجام تحلیل دقیق با استفاده از روش‌های غیرخطی بسیار دشوار است، اما روش‌های تقریبی زیادی وجود دارند که در ادامه دو روش توضیح داده می‌شود.

۱-۲ روابط ساده‌شده‌ای بر مبنای تئوری ارتجاعی

تکیه‌گاه‌های لاستیکی لایه‌ای را می‌توان به صورت تیر برشی قائم در نظر گرفت. زیرا لایه‌های فولادی از تغییر شکل خمشی تا حد زیادی جلوگیری کرده، اما مانعی در مقابل تغییر شکل‌های برشی ایجاد نمی‌کند. سختی افقی تقریباً از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_H = \frac{GA}{h} \quad (1)$$

که در آن A = سطح لاستیک، h = ضخامت کل لاستیک و G مدول برشی لاستیک است. و سختی قائم تقریبی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$k_z = k_z(\gamma)k_z(v) / [k_z(\gamma) + k_z(v)] \quad (2)$$

که $k_z(\gamma)$ سختی قائم تکیه‌گاه بدون تغییرات حجمی است و برابر است با:

برای نشیمن گاه دایره‌ای شکل

$$k_z(\gamma) = 6GS^2A / h \quad (3)$$

برای نشیمن گاه مربع شکل

$$k_z(\gamma) = 6.73GS^2A / h \quad (4)$$

که در آن S ، ضریب شکل می‌باشد (سطح بدون بار / سطح بارگذاری شده S)

و $k_z(v)$ سختی قائم در اثر تغییرات حجمی و بدون کرنش برشی بوده و برابر است با:

$$k_z(v) = KA / h \quad (5)$$

که K مدول فشاری لاستیک است.

۲-۲ روش عددی (اجزاء محدود)

روش حل عددی که اجزاء محدود زیر مجموعه آن می‌باشد جزء یکی از پرکاربرترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. در این روش غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و یا به کمک کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. به علت حجم بالای محاسبات در تحلیل به روش اجزاء محدود غیر خطی از نرم افزارهای المان محدود (مانند Ansys) بهره برده می‌شود. بنابراین در ادامه نحوه مدل‌سازی جداسازی‌های لاستیکی - لایه‌ای در نرم افزاری Ansys بیان می‌گردد.

مدلسازی لاستیک: در نرم افزار مدل‌های ابرالاستیک Neo-Hookean, Arruda-Boyce, Ogden, Rivilin-Mooney و ... پیش بینی شده است. در این تحقیق از فرم دو پارامتری مدل Mooney-Rivlin با مقادیر زیر (در سیستم SI) استفاده گردیده است:

$$C1 = C10 = 293000 \quad C2 = C01 = 17700 \quad d = 1 \times 10^{-7}$$

و دیگر مشخصات لاستیک به صورت زیر در نرم افزار وارد شده است:

$$E = 2.77E6 \quad (N / M^2) \quad \nu = 0.49$$

با مراجعه به Help نرم افزار Ansys می‌توانیم المانهایی که قابلیت مدل‌سازی مواد هاپیرالاستیک را دارا می‌باشند مشاهده کنیم. این المانها عبارتند از: Solid 187, Solid 186, solid 158 و ... که در این تحقیق با توجه به سرعت بالا و دقت قابل قبول المان Solid 185، از این المان برای مدل‌سازی لاستیک استفاده شده است.

مدلسازی صفحات فولادی: برای تعریف فولاد در نرم افزاری کافی است مدول الاستیسیته و ضریب پراسون وارد گردد، که در این پژوهش این مشخصات به صورت مقابل وارد شده است:

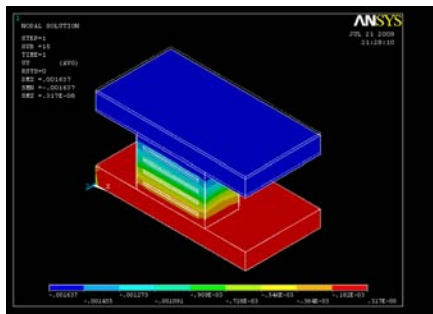
$$E = 2.07E11 \text{ (N/M}^2\text{)}$$

$$\nu = 0.3$$

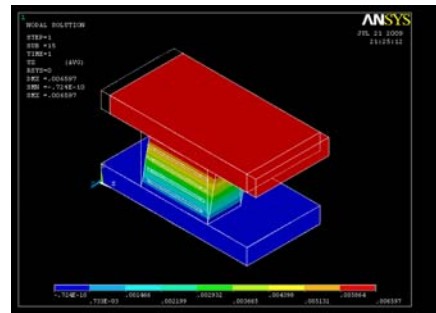
در مدل‌سازی اجسامی که چند المان مختلف دارند باید المانها با هم سازگار باشند یا به عبارت بهتر المانها دارای درجات آزادی یکسانی در گره‌ها باشند بنابراین المانهایی را برای مدل‌سازی صفحات فولادی می‌توانیم انتخاب کنیم که (مانند المان solid185) دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره باشد. در این تحقیق از همان المان solid185 استفاده شده است.

آنالیز مدل جداساز لاستیکی لایه‌ای

با توجه به اینکه مدل شامل موادهای پیرالاستیک می‌شود، آنالیز باید غیر خطی باشد و گزینه Large Displacement فعال شود. نرم افزار Ansys مدل‌های غیر خطی را توسط روش نیوتن-رافسون تحلیل می‌کند.



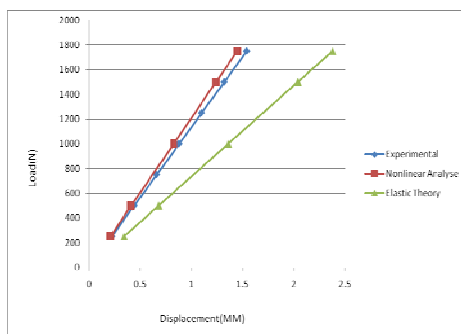
شکل ۲- نمونه جداساز تحت بار قائم



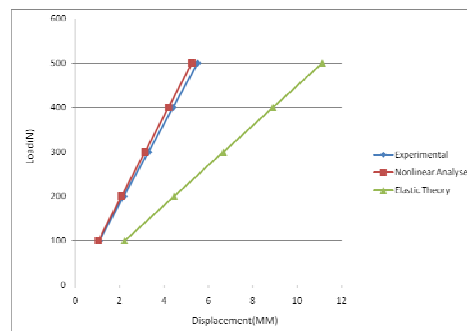
شکل ۱- نمونه جداساز تحت بار افقی

مدلسازی تئوری یک نمونه آزمایشگاهی و مقایسه نتایج:

در این تحقیق ابتدا یک نمونه جداساز که قبلاً مورد آزمایش قرار گرفته است، به دو روش تئوری ارتجاعی و روش المان محدود (غیر خطی) به کمک نرم افزار ANSYS تحلیل شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.



شکل ۴- نتایج مدلسازی تئوری و آزمایشگاهی تحت بار قائم



شکل ۳- نتایج مدل سازی تئوری و آزمایشگاهی تحت بار افقی

از مقایسه نمودارها نتایج زیر حاصل می‌شود:

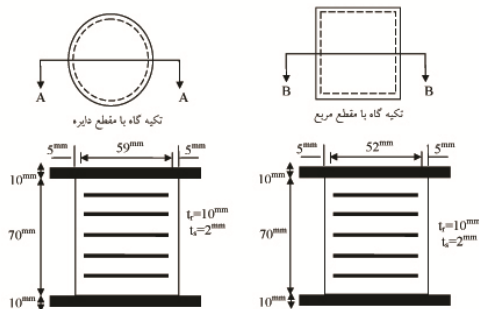
- ۱- نتایج حاصل از روابط تئوری ارتجاعی نسبت به نتایج آزمایشگاهی تقریب زیادی دارد.
- ۲- نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی نرم افزار ANSYS به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک و دقت قابل قبولی دارد.

۳- بررسی تأثیر شکل و ابعاد و بر رفتار جداسازهای لاستیکی - لایه‌ای

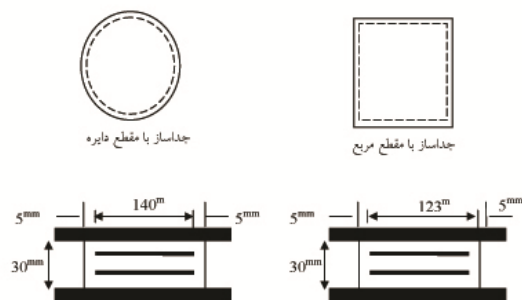
در این تحقیق هدف آن است که با استفاده از آنالیز غیرخطی به کمک نرم افزارهای ANSYS تأثیر وجود ورق‌های فولادی، شکل مقطع، تغییر قطر و طول ضلع و بالاخره تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد در تغییر مکانهای افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی جداسازهای لاستیکی بررسی گردد.

۳- ۱ تأثیر وجود ورق‌های فولادی

در این قسمت چهار نمونه جداساز در نظر گرفته شده است. ابعاد و مشخصات نمونه‌های کوتاه در شکل ۳ و نمونه‌های بلند در شکل ۴ نشان داده شده است.

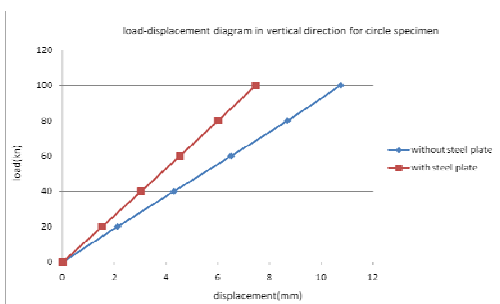


شکل ۶- ابعاد نمونه های بلند

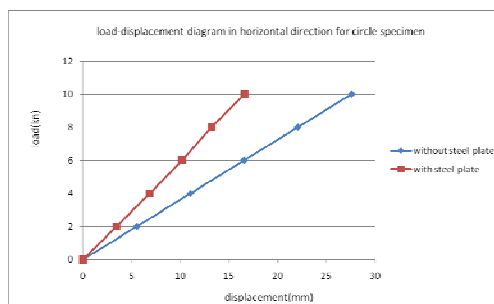


شکل ۵- ابعاد نمونه های کوتاه

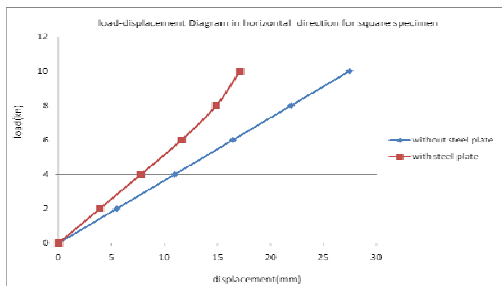
دو نمونه کوتاه با یکدیگر و نیز دو نمونه بلند با یکدیگر دارای ارتفاع و حجم یکسان می باشند و تنها در شکل سطح مقطع با یکدیگر متفاوت می باشد. هر نمونه پنج مرتبه بارگذاری و تحلیل شده و مقادیر تغییر مکانها و چرخش نمونه ها به دست آمده است و با استفاده از آن نمودارهای شکل ۷ تا ۱۸ رسم شده است.



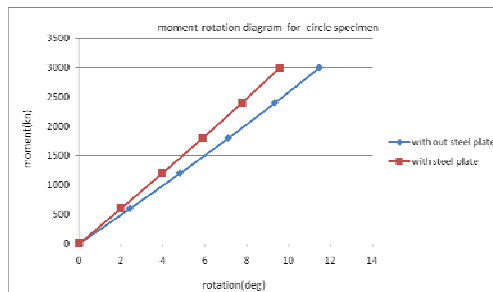
شکل ۸- نمودار بار - تغییر مکان نمونه کوتاه دایره ای در جهت قائم



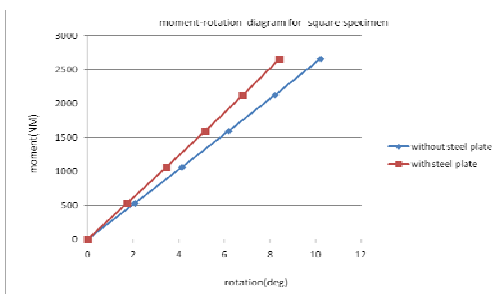
شکل ۷- نمودار بار تغییر مکان نمونه کوتاه دایره ای در جهت افقی



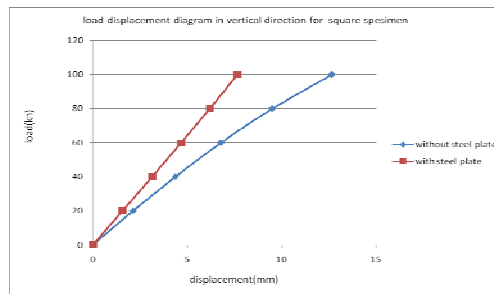
شکل ۱۰- نمودار بار - تغییر مکان نمونه کوتاه مربعی در جهت افقی



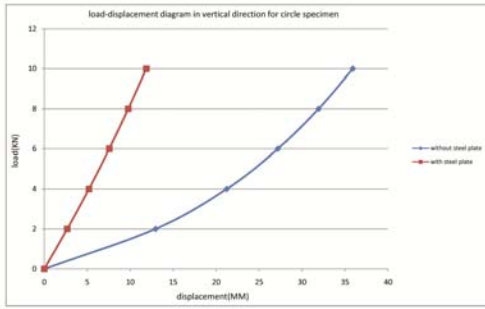
شکل ۹- نمودار لنگر - چرخش صفحه فوقانی نمونه کوتاه دایره ای



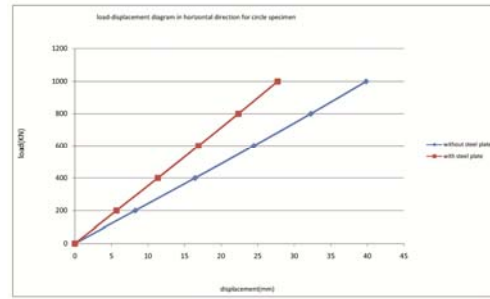
شکل ۱۲- نمودار لنگر- چرخش صفحه فوقانی نمونه کوتاه مربعی



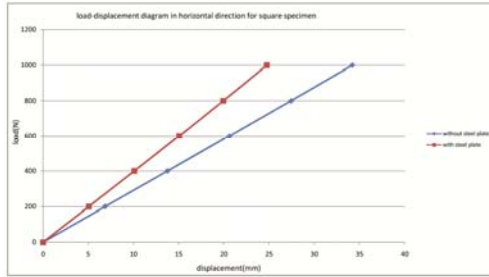
شکل ۱۱- نمودار بار - تغییر مکان نمونه کوتاه مربعی در جهت قائم



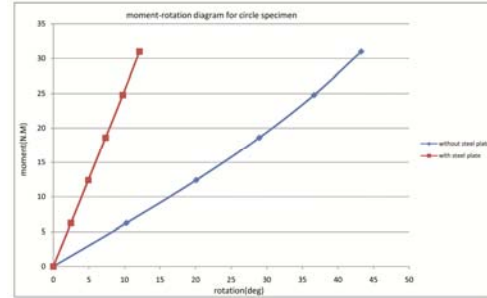
شکل ۱۴- نمودار بار- تغییر مکان نمونه بلند دایره ای در جهت قائم



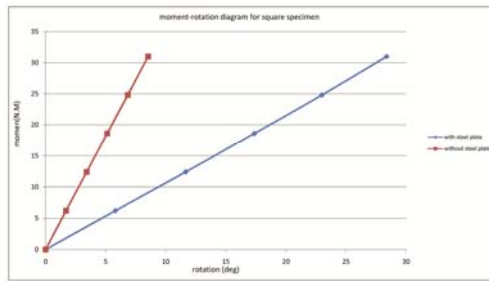
شکل ۱۳- نمودار بار - تغییر مکان نمونه بلند دایره ای در جهت افقی



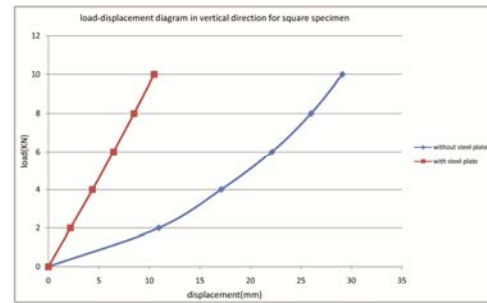
شکل ۱۶- نمودار بار - تغییر مکان نمونه بلند مربعی در جهت افقی



شکل ۱۵- نمودار لنگر - چرخش صفحه فوقانی نمونه بلند دایره ای



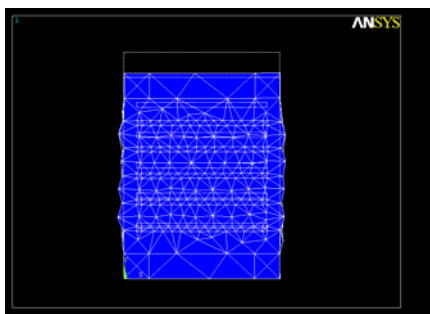
شکل ۱۸- نمودار لنگر - چرخش صفحه فوقانی نمونه بلند مربعی



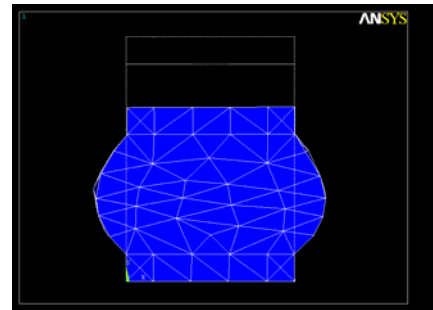
شکل ۱۷- نمودار بار تغییر مکان نمونه بلند مربعی در جهت قائم

از بررسی نمودارها نتایج زیر حاصل می شود:

- ۱- در نمونه های کوتاه تأثیر صفحات فولادی در کاهش تغییر مکانهای افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی جداساز تقریباً به یک میزان است.
- ۲- در نمونه های بلند که به نمونه های کاربردی شبیه تر می باشد، تأثیر صفحات فولادی در کاهش تغییر مکان قائم و چرخش صفحه فوقانی جداسازی خیلی بیشتر از کاهش تغییر مکان افقی جداساز می باشد و علت این است که صفحات فولادی از انبساط جانبی لاستیک جلوگیری کرده و سختی قائم را به مقدار زیادی افزایش می دهد اما بر سختی افقی سیستم که به وسیله مدول برشی پایین لاستیک کنترل می شود تأثیر کمی دارد.



(ب)- نمونه با صفحات فولادی

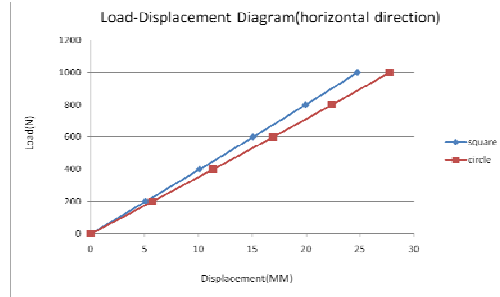
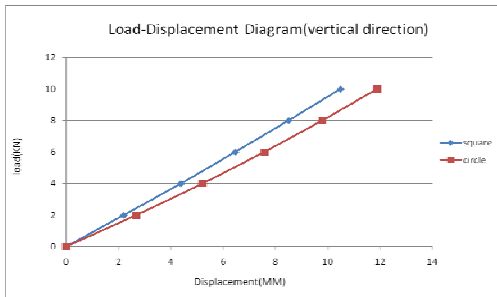


(الف)- نمونه بدون صفحات فولادی

شکل ۱۹- تأثیر صفحات فولادی در تغییر شکل قائم LRB

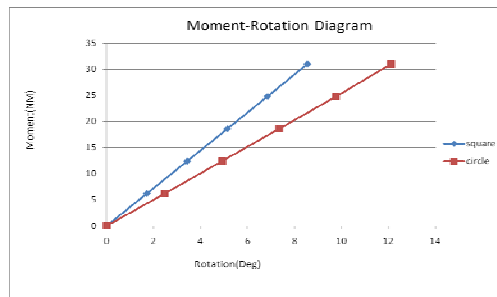
۳-۲ مقایسه رفتار جداسازی‌های دایره و مربع شکل

برای مقایسه رفتار جداسازهای دایره و مربع از دو نمونه بلند که جزئیات آن در شکل ۶ آورده شده، استفاده گردیده است. هر نمونه پنج مرتبه تحت بار افقی، قائم و لنگر قرار گرفته، آنالیز شده و مقادیر تغییر مکانها و چرخش‌ها به دست آمده است و با استفاده از آنها نمودارهای شکل ۲ تا ۲۱ ترسیم شده است.



شکل ۲۱- نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های دایره ای و مربعی در جهت قائم

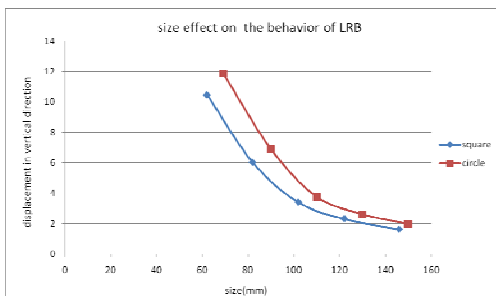
شکل ۲۰- نمودار بار تغییر مکان نمونه‌های دایره‌ای و مربعی در جهت افقی



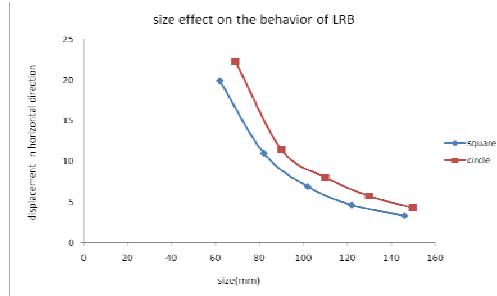
شکل ۲۲- نمودار لنگر چرخش صفحه فوقانی نمونه‌های دایره‌ای و مربعی

از بررسی نمودارها، نتایج زیر حاصل می‌شود:

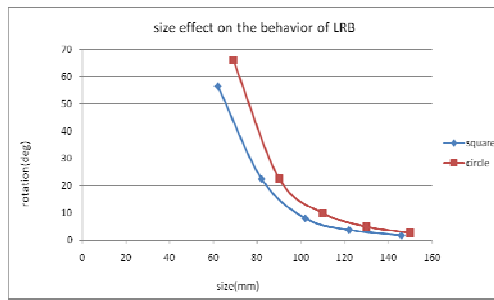
- ۱- سختی افقی، قائم و خمشی نمونه دایره‌ای کمتر از نمونه مربعی است.
 - ۲- اختلاف سختی خمشی در نمونه‌های دایره‌ای و مربعی چندین برابر اختلاف سختی افقی و قائم می‌باشد.
 - ۳- تأثیر تغییر قطر و طول ضلع جداساز.
- در این قسمت نیز از نمونه‌های بلند که جزئیات آن در شکل ۶ موجود است استفاده گردیده است. قطر نمونه دایره‌ای و طول نمونه مربعی (تحت بار افقی، قائم و لنگر خمشی ثابت) هر کدام پنج مرتبه افزایش یافته و تحلیل گردیده است تا تغییر مکانهای افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی جداساز به دست آید و با استفاده از آن نمودارهای شکل ۲۳ و ۲۴ رسم شده است.



شکل ۲۴ تأثیر تغییر قطر و تغییر طول ضلع بر تغییر مکان قائم نمونه



شکل ۲۳- تأثیر تغییر قطر و تغییر طول ضلع بر تغییر مکان افقی نمونه



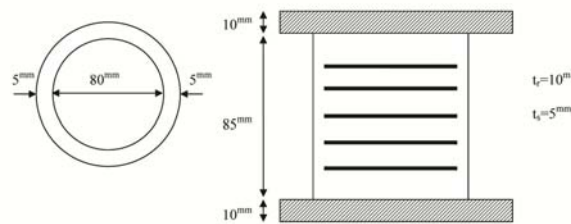
شکل ۲۵- تأثیر تغییر قطر و تغییر طول ضلع بر چرخش صفحه فوقانی

از بررسی نمودارها و نتایج زیر حاصل می شود:

کاهش تغییر مکانها و چرخش صفحه فوقانی جداساز در دو نمونه دایره ای و مربعی شکل با افزایش قطر و طول ضلع جداساز کاملاً غیر خطی می باشد به صورتی که در ابتدای افزایش قطر و طول ضلع جداساز، کاهش تغییر مکانها و چرخشها شدید و به مرور این کاهش کمتر می شود. بنابراین اگر بخواهیم تغییر مکانهای سازه های جداسازی شده لرزه ای را کاهش دهیم، افزایش قطر یا طول ضلع جداساز تا یک حدی اقتصادی می باشد و از آن به حد به بعد بهتر است تعداد جداسازهای سازه را افزایش دهیم.

۴.۳ تأثیر تغییر ضخامت لایه های لاستیک و فولاد

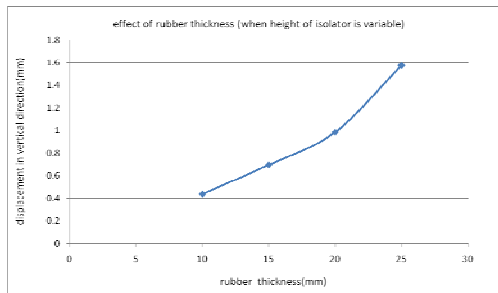
مشخصات نمونه استفاده شده در این قسمت در شکل ۲۶ آورده شده است.



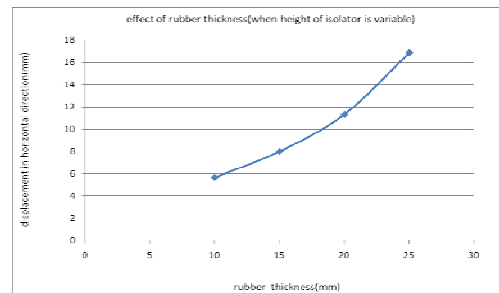
شکل ۲۶- مشخصات نمونه برای بررسی تأثیر ضخامت لایه های لاستیک و فولاد

در این بخش به دو طریق تأثیر ضخامت لایه ها لاستیک و فولاد بر روی جداساز بررسی شده است. در حالت اول ضخامت لایه های لاستیک افزوده شده و ضخامت لایه فولادی ثابت نگه داشته شده است. بنابراین ارتفاع کل تکیه گاه نیز افزایش یافته است. در حالت دوم ارتفاع جداسازها ثابت فرض شده بنابراین با افزایش ضخامت لایه های لاستیک از صفحات فولادی کاسته می شود.

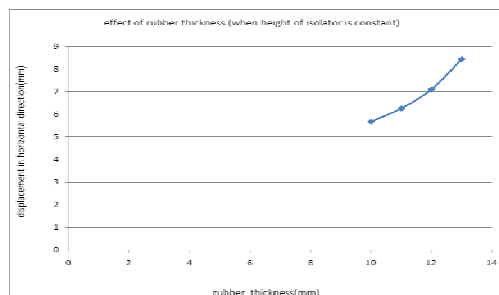
در نمونه های با ارتفاع متغیر و نمونه های با ارتفاع ثابت چهار مرتبه ضخامت لایه لاستیک افزوده شده و تحت بارگذاری ثابت، آنالیز شده است، سپس تغییر مکانها و چرخشها به دست آمده و با استفاده از آن نمودارهای شکل ۲۷ تا ۳۲ رسم شده است.



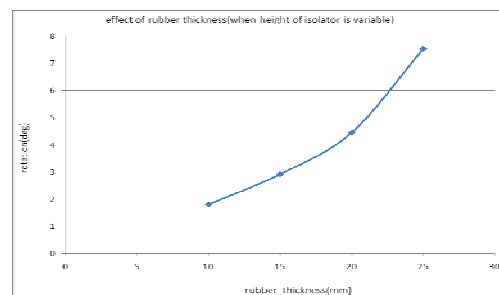
شکل ۲۸- تأثیر ضخامت لایه های لاستیک بر تغییر مکان قائم نمونه جداساز با ارتفاع متغیر



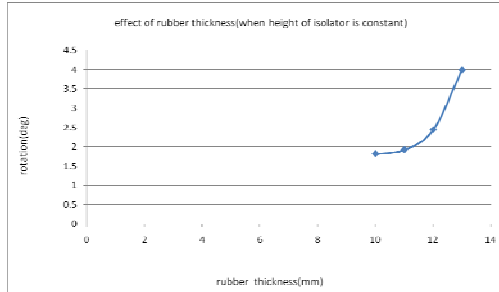
شکل ۲۷- تأثیر ضخامت لایه های لاستیک بر تغییر مکان افقی نمونه جداساز با ارتفاع متغیر



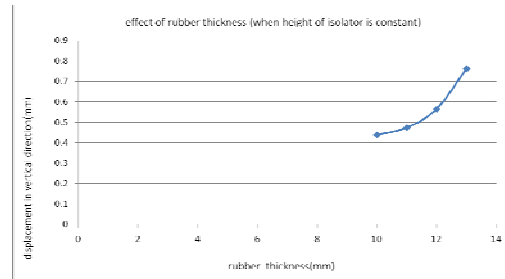
شکل ۳۰- تأثیر ضخامت لایه های لاستیک و فولاد بر تغییر مکان افقی نمونه جداساز با ارتفاع ثابت



شکل ۲۹- تأثیر ضخامت لایه های لاستیک بر چرخش صفحه فوقانی نمونه جداساز با ارتفاع متغیر



شکل ۳۲- تأثیر ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد بر چرخش صفحه فوقانی نمونه جداساز با ارتفاع ثابت



شکل ۳۱- تأثیر ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد بر تغییر مکان قائم نمونه جداساز با ارتفاع ثابت

از بررسی نمودارها نتیجه زیر حاصل می‌شود:

افزایش تغییر مکان افقی قائم و چرخش صفحه فوقانی جداساز نسبت به افزایش ضخامت لایه‌های لاستیک در هر دو حالت به خصوص در حالت با ارتفاع ثابت غیر خطی می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

۱- تأثیر صفحات فولادی در کاهش تغییر مکان قائم و چرخش صفحه فوقانی، خیلی بیشتر از کاهش تغییر مکان افقی جداساز می‌باشد و علت این است که صفحات فولادی از انبساط جانبی لاستیک جلوگیری کرده و سختی قائم را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد، اما بر سختی افقی سیستم که به وسیله مدول برشی پایین لاستیک کنترل می‌شود تأثیر کمی دارد.

۲- سختی افقی، و قائم خمشی نمونه دایره‌ای کمتر از نمونه مربعی (هم سطح و هم ارتفاع آن) است به طوری که تغییر مکان افقی نمونه دایره‌ای ۱۲٪، تغییر مکان قائم آن ۲۱-۱۳٪ و چرخش صفحه فوقانی آن ۴۴-۴۱٪ بیشتر از نمونه مربعی است، بنابراین اختلاف منحنی خمشی در نمونه‌های دایره‌ای و مربعی چندین برابر اختلاف سختی افقی و قائم می‌باشد. ۳- افزایش سختی افقی، قائم و خمشی در هر دو نمونه دایره‌ای و مربعی شکل با افزایش قطر و طول ضلع جداساز کاملاً غیر خطی می‌باشد به طوری که در ابتدای افزایش قطر و طول ضلع جداساز، افزایش سختی افقی، قائم و خمشی شدید و مرور این افزایش کمتر می‌شود. بنابراین اگر بخواهیم تغییر مکانهای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای را کاهش دهیم افزایش قطر یا طول ضلع جداساز تا یک حدی اقتصادی می‌باشد و از آن حد به بعد بهتر است تعداد جداسازی‌های لرزه‌ای سازه را افزایش دهیم.

۴- با افزایش ضخامت لایه‌های لاستیک، تغییر مکان افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی به صورت غیر خطی و افزایشی بیشتر می‌شود. همچنین نتیجه می‌شود که افزایش تغییر مکان افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی در حالتی که ضخامت صفحات فولادی کاسته می‌شود بسیار بیشتر از حالتی است که ضخامت صفحات فولادی ثابت است و از روی این نتایج می‌توان تأثیر به سزای ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد را بر روی تغییر مکانهای افقی قائم و چرخش صفحه فوقانی تکیه گاه درک نمود.

۵- مراجع

- ۱- ایوان اسکینو، روبینسون، ویلیام اجر و مک وری، گرمی اچ، ترجمه، تهرانی زاده، م، حامدی، ف، (۱۳۷۸) "جداسازی لرزه‌ای در مقابل زلزله"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله
- ۲- نعیم، ف و کلی، جیمزم، ترجمه غفوری آشتیانی، محسن و همایون شاد، ف، (۱۳۸۱) "طراحی ساختمانها با جداسازهای لرزه‌ای"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله .
- ۳- معاونت پژوهشی دانشگاه تهران - دکتر مهدی زهرانی، ۱۳۸۵ "آشنایی با جداسازهای لرزه‌ای و تأثیر آن بر عملکرد پلها" پژوهشگاه حمل و نقل
- ۴- جاهد مطلق، ح، نوبان، م، (۱۳۸۳)، اجزا محدود Ansys، دانشگاه تهران

- 5 - Bhasker Rao, P. and Jangid, R.S., (2001), "Experimental study of base isolator structure", ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No.405, Vol.38, No, 1
- 6- Masaki, N. and Suzuki, SH., (2004), "Restoring Force Characteristics of Laminated Rubber Bearing under Various Restraining Condition", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.126
- 7- Topkaya, Cen, (2004), "Analysis of specimen size effect of inclined compression test of Laminated Elastomeric Bearing", Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey