

پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند جداسازی شده تحت اثر حرکات پریود بلند زمین

ارسلان بذرافشان^۱، ناصر خاجی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

nkhaji@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۳۰]

چکیده - جداسازی لرزه‌ای یکی از مناسب‌ترین ابزارهای مهندسی زلزله در زمینه کنترل غیرفعال است. اگرچه این روش در ابتدا برای سازه‌های کوتاه مرتبه با رفتار روسازه نسبتاً صلب توسعه یافت، با این حال، کاربرد آن در سازه‌های متوسط و بلند رو به افزایش است. کمترین نتیجه‌ای که جداسازی لرزه‌ای در سازه‌های بلند به همراه دارد، کاهش تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) طبقات به علت تغییر شکل مد نخست، به علاوه تأمین یک سازوکار استهلاک انرژی مناسب در کف ساختمان است. برای حفظ کارایی جداسازی، زمان تناوب سیستم جداساز باید به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود. چنین سازه‌ای ممکن است در برابر زلزله‌های پریود بلند آسیب پذیر باشد. در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای سه مدل ساختمان برشی ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه جداسازی شده، به وسیله دو نوع جداساز سربی-لاستیکی و آونگ اصطکاکی، تحت اثر زلزله‌های پریود بلند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، میزان اثرپذیری سازه از زلزله‌های پریود بلند بیشتر می‌شود و این حرکات قادرند نیاز جابه‌جایی بالایی را به جداساز تحمیل کنند.

واژگان کلیدی: ساختمان برشی، جداسازی لرزه‌ای، ساختمان‌های بلند، زلزله‌های پریود بلند.

۱- مقدمه

سایت دچار بزرگنمایی شده و اثر تخریبی آنها چندین برابر شود. نمونه قابل ملاحظه‌ای از این نوع حرکات، زلزله ۱۹۸۵ میچوآکان (Michoacan) است که خسارت‌های بسیار شدیدی به شهر مکزیکوسیتی، که در ۴۰۰ کیلومتری مرکز زلزله قرار داشت، وارد نمود [۲].

حرکات لرزه‌ای زمین متأثر از آثار چشمه، مسیر عبور و مشخصات سایت است. از آنجایی که امواج سطحی منطقه‌ای پس از حدود ۱۰ کیلومتر قابل توجه می‌شوند، بنابراین تنها آثار مسیر، سایت، و ساختار سرعت آنها در مورد حرکات دور از چشمه مطرح است. این حرکات اساساً از امواج سطحی تشکیل شده‌اند که به وسیله آثار مسیر و سایت تحریک می‌شوند و مدت طولانی‌تری نسبت به حرکات نزدیک گسل دارند. حتی

در گذشته بیشتر سازه‌های موجود در مناطق زلزله‌خیز کوتاه مرتبه بودند و در نتیجه تنها حرکات پریود کوتاه، به علت امکان وقوع شدید، اهمیت داشتند. اما امروزه با در نظر گرفتن تعداد فزاینده سازه‌های بزرگ مقیاس، که فرکانس طبیعی کمتری دارند، زلزله‌های با پریود بلند اهمیت زیادی یافته‌اند. این زلزله‌ها به دو دسته دور از چشمه (Far-source) و نزدیک گسل (Near-fault) تقسیم می‌شوند [۱]. زلزله‌های بزرگ (در مناطق فرورانش) و همچنین زلزله‌های پوسته‌ای داخلی متوسط و بزرگ می‌توانند به علت آثار مسیر انتشار امواج، منجر به ایجاد حرکات با پریود بلند دور از چشمه در حوضه‌های رسوبی دوردست شوند. این حرکات ممکن است به علت شرایط محلی

این ترتیب، انتظار می‌رود می‌رود سازه‌های بلند جداسازی شده، که زمان تناوب بسیار بزرگی در محدوده ۴ تا ۷ ثانیه دارند، در برابر زلزله‌های پرریز بلندی آسیب پذیرتر باشند.

جداسازی در ابتدا برای سازه‌های کوتاه مرتبه با رفتار روسازه نسبتاً صلب توسعه یافت، با این وجود، کاربرد آن در سازه‌های متوسط و بلند رو به افزایش است. در کشور ژاپن از زمان زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه تاکنون، استفاده از جداسازی لرزه‌ای در سازه‌های بلندمرتبه محبوبیت فزاینده‌ای داشته است. تا به امروز، در حدود ۲۰۰ سازه بلندمرتبه جداسازی شده با ارتفاعی بین ۶۰ تا ۱۸۰ متر، در ژاپن ساخته شده است که بیشتر آنها ساختمان‌های مسکونی بتنی هستند. با این وجود، این استراتژی هنوز در بیشتر نقاط جهان غیرمعمول است. در حالی که سازه‌های بلند، خود دارای پرریز بلند و در نتیجه شتاب ورودی اندکی است، افزودن جداساز به آنها می‌تواند دریافت بین‌طبقه‌ای و شتاب کف را به مقدار چشمگیری کاهش داده و از محتویات ساختمان به خوبی حفاظت کند. به این ترتیب، ساختمان‌های بلندمرتبه می‌توانند حین زلزله به صورت کامل قابلیت استفاده خود را حفظ نموده و بلافاصله پس از زلزله قابل اسکان باشند [۹].

با وجود تمام موارد بالا، هنوز ابهاماتی در مورد عملکرد این سیستم در زلزله‌های پرریز بلند و زلزله‌های نزدیک گسل وجود دارد. این موضوع به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰-۱۴]. با این وجود، اثر زلزله‌های پرریز بلند دور از چشمه بسیار کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است. علاوه بر این، در بیشتر این موارد به محتوای انرژی حرکات توجهی نشده است. تقسیم‌بندی حرکات به دو دسته پرریز کوتاه و پرریز بلند می‌تواند دید بهتری از چگونگی رفتار سازه به دست دهد. سازه‌های جداسازی شده زمان تناوب نسبتاً بزرگی دارند، و از این رو انتظار می‌رود که تحت اثر حرکات پرریز بلند دچار تشدید شوند. هدف اصلی این مقاله، مقایسه رفتار سازه‌های جداسازی شده تحت اثر حرکات پرریز کوتاه و پرریز بلند می‌باشد. همچنین برای تقسیم‌بندی حرکات لرزه‌ای، از شاخص انرژی ورودی استفاده شده است.

اگر دلایل لرزه‌شناسی هم در دست نباشد، آسیب وارد شده به مخازن بزرگ می‌تواند نشانه‌ای از شکل‌گیری حرکات پرریز بلند دور از چشمه باشد. این آسیب به‌طور عمده از تلاطم (Sloshing) آب درون مخزن ناشی می‌شود، چرا که به نظر می‌رسد تحریک مد تلاطمی در سیال نیاز به حرکت لرزه‌ای پرریز بلند زمین دارد [۳]. در مقابل، حرکات نزدیک گسل تنها با توجه به اثر چشمه و نیز مقداری از آثار سایت و ساختار سرعت موضعی تفسیر می‌شوند؛ چرا که حرکات پرریز بلند نزدیک گسل معمولاً در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتر مطرح می‌شوند. حرکات پرریز بلند نزدیک گسل، در مجاورت گسل مسبب زلزله و به علت آثار جهت‌پذیری (Directivity) گسیختگی رخ می‌دهند. این حرکات به‌ویژه زمانی که با آثار سایت و یا آثار لبه حوضه ترکیب شوند، می‌توانند بسیار مخرب باشند.

حرکات پرریز بلند دور از چشمه دارای مدتی طولانی (معمولاً بیش از یک دقیقه) هستند و اگرچه دامنه شتاب کوچکی دارند، اما دامنه سرعت در آنها بسیار بزرگ می‌باشد. ویژگی اصلی این حرکات، وجود مؤلفه‌های پرریز بلند (در محدوده ۱ تا ۱۰ ثانیه) در طیف پاسخ آنهاست؛ و به این ترتیب انتظار می‌رود سازه‌های با پرریز بلند (مانند ساختمان‌های بلند، مخازن ذخیره سوخت، پل‌های معلق، و سازه‌های جداسازی شده) از این زلزله‌ها به شدت تأثیر بپذیرند. با توجه به محدود بودن تعداد این زلزله‌ها، مطالعات اندکی در مورد اثر آنها بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد اشاره، انجام شده است (به عنوان نمونه به مراجع [۴] تا [۷] مراجعه شود). در مقابل، حرکات پرریز بلند نزدیک گسل دارای مدتی بسیار کوتاه‌تر هستند و نسبت PGV به PGA بالایی دارند.

وجود پالس‌های بلندمدت در حرکات نزدیک گسل، سازه‌های جداسازی شده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این حرکات ممکن است یک یا چند پالس جابه‌جایی، با سرعت بیشینه‌ای از مرتبه ۰/۵ متر بر ثانیه و مدت زمانی در حدود ۱ تا ۳ ثانیه داشته باشند [۸]. این پالس‌ها ضربه بزرگی به یک سیستم جداسازی با پرریز در این محدوده وارد می‌کنند که می‌تواند منجر به یک جابه‌جایی بسیار بزرگ در جداسازها شود. به

۲- معادلات حرکت

برای یک مدل قاب برشی n طبقه که روی یک سیستم جداسازی قرار دارد، معادله حرکت روسازه ارتجاعی به صورت زیر است:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b) \quad (1)$$

که در آن، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی روسازه بوده و $\{r\}$ بردار تأثیر زلزله است. همچنین $\{\ddot{u}\}$ ، $\{\dot{u}\}$ و $\{u\}$ به ترتیب نشان‌دهنده بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی روسازه نسبت به پایه، \ddot{u}_b بیانگر شتاب پایه نسبت به زمین، و بالاخره \ddot{u}_g بیانگر شتاب زمین است. از سوی دیگر، معادله حرکت پایه نسبت به زمین برابر است با:

$$M_b(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b) + C_b\dot{u}_b + K_b u_b + f = -\{r\}^T [M]\{\ddot{u}\} + \{r\}(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b) \quad (2)$$

که در آن، M_b ، C_b و K_b به ترتیب جرم، میرایی و سختی جداساز و f بیانگر نیروهای غیرخطی ایجاد شده در سیستم جداسازی است. اکنون مختصات مودال زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\{u\} = [\Phi]\{u^*\} \quad (3)$$

که در آن $[\Phi]$ ماتریس مودال نرمال شده نسبت به جرم، و $\{u^*\}$ بردار جابه‌جایی مودال نسبت به کف است. با ترکیب نمودن روابط (۱) و (۲)، و با توجه به رابطه (۳):

$$\begin{bmatrix} \{r\}^T [M]\{r\} + M_b & \{r\}^T [M][\Phi] \\ [\Phi]^T [M]\{r\} & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \{u^*\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b & [0] \\ [0] & [2h_i\omega_i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \{u^*\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b & [0] \\ [0] & [\omega_i^2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ \{u^*\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f \\ \{0\} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \{r\}^T [M]\{r\} + M_b \\ [\Phi]^T [M]\{r\} \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (4)$$

همچنین در رابطه اخیر، ماتریس‌های $[\omega_i^2]$ و $[2h_i\omega_i]$ قطری است.

۳- مدل‌سازی و طراحی سازه‌های جداسازی شده

طراحی سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای براساس آیین‌نامه‌های موجود در این زمینه (مانند Eurocode، UBC، IBC) انجام می‌گیرد. در این‌جا از ضوابط IBC (که عمدتاً برپایه ASCE-7 قرار دارد) برای طراحی استفاده شده است. بر اساس ASCE-7، طراحی سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای به دو روش انجام می‌شود: روش نیروی جانبی معادل، و روش دینامیکی. در روش نیروی جانبی معادل، ابتدا طیف طرح ویژه سایت تعیین می‌شود. طیف طرح بر مبنای مقادیر شتاب طیفی با احتمال فراگذشت ۲ درصد در ۵۰ سال قرار دارد. تعیین این مقادیر با توجه به موقعیت سایت و به کمک نقشه‌هایی که در آیین‌نامه ارائه شده‌اند انجام می‌گیرد. در این مطالعه، این مقادیر به شکلی انتخاب شده‌اند که بیشینه جابه‌جایی طیفی متناظر با جداساز در سازه ۲۰ طبقه از ۵۵ سانتی‌متر فراتر نرود.

مدل این سازه‌ها برای طراحی به صورت قاب خمشی فولادی ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه در نظر گرفته شده است. ابعاد پلان ساختمان ۲۰ در ۲۰ مترمربع و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر است. پس از تکمیل طراحی، جرم و سختی طبقات تعیین و مدل چنددرجه-آزاد منطبق با آنها برای انجام تحلیل دینامیکی به کار گرفته می‌شود.

شکل (۱) هندسه و پلان سازه‌های طراحی شده

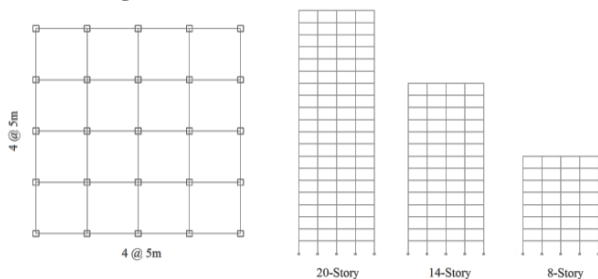


Fig. 1. Schematic view of floor plan and elevation of the designed buildings

با در نظر گرفتن زمان تناوب هدف (T_D) برای سیستم جداسازی شده، و با فرض رفتار صلب روسازه، کمینه سختی

که در آن، h_i نسبت میرایی مودال، $[I]$ ماتریس یگه، و ω_i فرکانس طبیعی روسازه با پایه ثابت در مد i ام می‌باشد.

جداسازهای FPS به ترتیب برابر با $K_1 = 10 K_2$ و $K_1 = 100 K_2$ فرض شده است.

شکل (۲) پارامترهای مدل دوخطی برای طراحی جداساز

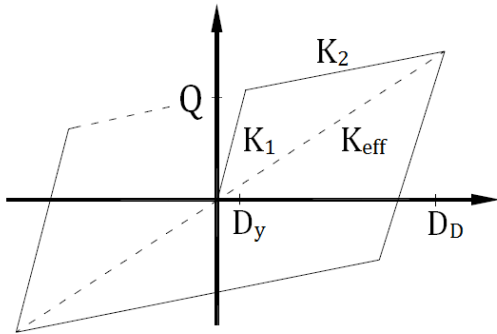


Fig. 2. Parameters of bilinear model for isolators

جدول (۱) مشخصات طراحی جداسازهای LRB و FPS

پارامتر	طبقه ۸		طبقه ۱۴		طبقه ۲۰	
	LRB	FPS	LRB	FPS	LRB	FPS
T_{eff} (s)	2.02	2.02	3.54	3.54	5.14	5.14
h_{eff} (%)	16.5	15.7	16.1	16.0	15.8	15.6
D_D (cm)	21	21	37	37	54	54

Table 1. Design parameters for LRB and FPS isolators

جداسازها طوری طراحی می‌شوند که زمان تناوب مؤثر و جابه‌جایی طرح یکسانی داشته باشند. مشخصات کلی جداسازها برای سازه‌های ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه در جدول ۱ نشان داده شده است. برای اطمینان از امکان‌پذیری طراحی، جداسازها به صورت عملی طراحی شده و ابعاد و اندازه اجزا و همچنین ظرفیت باربری آنها مورد کنترل قرار گرفته است. در عمل، پس از تکمیل طرح اولیه لازم است که مدل کاملی از سازه جداسازی شده ساخته شده و تحلیل دینامیکی روی آن انجام شود. با توجه به انعطاف‌پذیری روسازه، زمان تناوب سازه جداسازی شده بیشتر از مقدار فرض شده می‌شود؛ و این تغییر در زمان تناوب باعث تغییر جابه‌جایی جداساز می‌شود. بنابراین، مجموعه‌ای از تکرارهای تحلیل و طراحی لازم خواهد بود تا سیستم جداسازی و روسازه، جوابگوی اهداف تغییر مکان

مؤثر (K_{eff}) مورد نیاز برای مجموعه جداسازها با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W_f}{gK_{eff}}} \quad (5)$$

که در آن، W_f وزن کل روسازه است. برای تخمین جابه‌جایی طرح (D_D) با استفاده از مقدار شبه‌شتاب طیفی حاصل از طیف طرح (S_{D1})، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{D1} T_D}{B_D} \quad (6)$$

که در آن، B_D ضریب میرایی است. به این ترتیب، پس از تعیین سختی مؤثر و جابه‌جایی طرح، برش پایه طرح روسازه (V_s) را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$V_s = \frac{K_{eff} D_D}{R_f} \quad (7)$$

در رابطه بالا، R_f ضریبی است که به سیستم مقاوم جانبی و ضریب رفتار روسازه، R ، بستگی دارد و برابر است با:

$$R_f = \frac{3}{8} R \leq 2 \quad (8)$$

با استفاده از این برش پایه، طراحی اولیه روسازه انجام می‌شود. پس از طراحی اولیه، بر اساس نیروهای ثقلی حاصل از تحلیل مدل، طراحی واحدهای جداساز به صورت یک مدل دوخطی و بر اساس سه پارامتر K_1 ، K_2 و Q انجام می‌گیرد (شکل ۲). تفاوت دو نوع جداساز در طراحی بیشتر ناشی از تفاوت در این سه پارامتر است. برای هر دو نوع جداساز، سختی ثانویه (K_2) را می‌توان با دقت قابل قبولی محاسبه کرد. مقدار این سختی در جداسازهای سربی-لاستیکی (LRB)، با چشم‌پوشی از هسته سربی، تقریباً برابر سختی لاستیک است. از سوی دیگر، مقدار سختی مزبور در جداسازهای آونگ اصطکاکی (FPS) برابر با نسبت وزن مؤثر به شعاع انحنای سطح مقعر می‌باشد. در مقابل، سختی اولیه معمولاً به صورت ضریبی از K_2 تقریب زده می‌شود. مقدار این ضریب برای جداساز LRB بین ۸ تا ۱۳ و برای جداساز FPS در حدود ۱۰۰ یا بیشتر فرض می‌شود. در اینجا سختی ارتجاعی برای جداسازهای LRB و

$$E_I = - \int_0^{t_0} m \ddot{u}_g \dot{x} dt \quad (9)$$

که در آن، \dot{x} بیانگر سرعت نسبی جرم m نسبت به زمین است. با فرمول بندی انرژی در حوزه فرکانس، رابطه اخیر برای انرژی ورودی واحد جرم برابر است با:

$$\frac{E_I}{m} = \int_0^{+\infty} F(\omega) |A(\omega)|^2 d\omega \quad (10)$$

که در این رابطه، $A(\omega)$ تبدیل فوری $\ddot{u}_g(t)$ است. همچنین، $F(\omega)$ تابع انتقال انرژی است و برابر است با [۱۵]:

$$F(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{2h\Omega\omega^2}{(2h\Omega\omega)^2 + (\Omega^2 - \omega^2)^2} \quad (11)$$

در شکل ۵، متوسط انرژی ورودی کل زلزله‌های استفاده شده در مقابل زمان تناوب رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود رکوردهای پرریز بلند انتخاب شده، در محدوده پرریز اصلی سازه‌های مورد استفاده (بین ۲ تا ۶ ثانیه) محتوای انرژی قابل توجهی دارند. نام و مشخصات رکوردها در جداول ۲ تا ۵ ارائه شده است.

نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که مقیاس کردن رکوردها، به ویژه شتاب‌نگاشت‌های دور از چشمه، می‌تواند به نتایج غیرواقعی منجر شود. شکل ۶-چپ، متوسط طیف پاسخ شتاب مقیاس شده رکوردهای پرریز بلند دور از چشمه را در مقایسه با طیف آیین‌نامه، برای مدل ۸ طبقه نشان می‌دهد. طیف پاسخ سرعت رکورد مقیاس شده مکزیکوسیتی نیز در شکل ۶-راست نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که استفاده از روند پیشنهادی آیین‌نامه، منجر به افزایش غیرقابل قبول مقدار بیشینه طیف پاسخ سرعت شده است. تحلیل مدل تحت اثر این رکورد، منجر به یک جابه‌جایی ۱/۷۶ متری در جداساز می‌شود، که غیرقابل قبول است. علاوه بر این، چون مقیاس کردن بر اساس زمان تناوب سازه انجام می‌شود، رکوردهای مورد نیاز برای هر مدل متفاوت خواهد بود که در این صورت امکان مقایسه بین مدل‌ها وجود نخواهد داشت.

و نیروی پایه باشند. با توجه به پیچیدگی‌های ذکر شده تنها از روش نیروی جانبی معادل برای طراحی استفاده می‌شود. به علاوه برای حفظ یک مقدار ثابت برای نسبت پرریز روسازه به پرریز سیستم جداسازی شده، از اعمال تغییرات در روسازه در اثر تغییر در مشخصات جداساز چشم‌پوشی می‌شود. به عبارت دیگر، پس از طراحی واحدهای جداساز و تعیین ضریب برش پایه نهایی، روسازه تنها برای این مقدار برش پایه کنترل (و نه طراحی دوباره) می‌شود.

شکل (۳) منحنی نیرو-تغییر مکان جداسازهای LRB

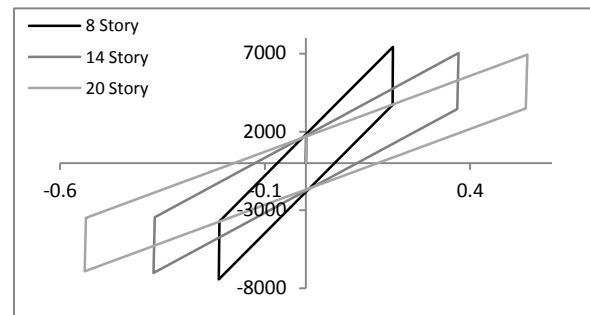


Fig. 3. Typical hysteretic curves for LRB isolators

شکل (۴) منحنی نیرو-تغییر مکان جداسازهای FPS

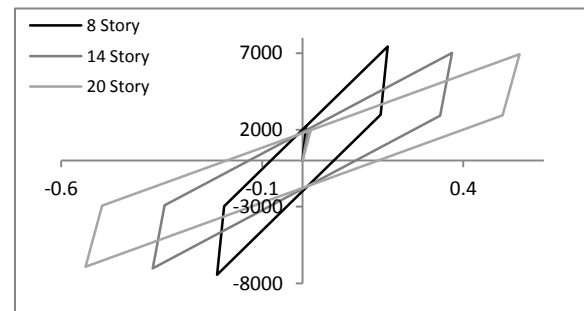


Fig. 4. Typical hysteretic curves for FPS isolators

۴- حرکات لرزه‌ای ورودی

به منظور انجام تحلیل دینامیکی از ۱۴ رکورد پرریز کوتاه و ۱۴ رکورد پرریز بلند مقیاس نشده استفاده می‌شود. تقسیم‌بندی حرکات بر مبنای انرژی واحد جرم ورودی به یک سیستم یک-درجه آزاد انجام شده است. برای یک سیستم یک-درجه آزاد ارتجاعی خطی میرا، انرژی ورودی حاصل از شتاب افقی حرکت زمین از $t = 0$ تا $t = t_0$ را می‌توان به صورت کار انجام شده به وسیله‌ی زمین روی سیستم تعریف نمود [۱۵]:

شکل (۵) متوسط انرژی ورودی کل رکوردهای دور از چشمه (چپ) و نزدیک گسل (راست)

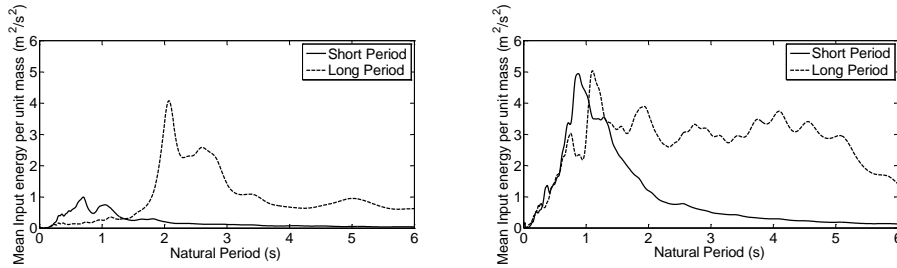


Fig. 5. Mean of total input energy per unit mass for far-source (left) and near-fault (right) ground motions

شکل (۶) متوسط طیف پاسخ شتاب مقیاس شده رکوردهای پریدبلند دور از چشمه (چپ) و طیف پاسخ سرعت رکورد مقیاس شده مکزیکوسیتی (راست)

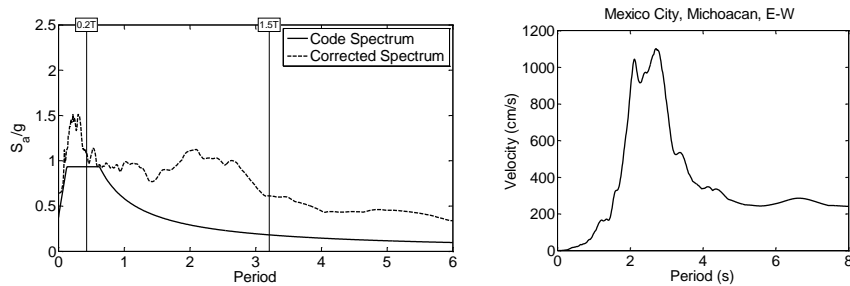


Fig. 6. Mean of corrected acceleration response spectrum for far-source long-period ground motions (left) and velocity response spectrum of the Mexico City earthquake (right)

جدول (۲) رکوردهای دور از چشمه پریدکوتاه

ردیف	زلزله	ایستگاه	مولفه	فاصله (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
۱	Loma Prieta	Foster City - APEEL 1	۰	۶۶/۴	۰/۳	۲۵/۴	۶/۳
۲	Loma Prieta	SF Intern. Airport	۹۰	۸۱	۰/۳	۲۷/۸	۶
۳	Loma Prieta	Palo Alto - SLAC Lab	۳۶۰	۵۴	۰/۳	۲۹/۳	۹/۷
۴	Chi-Chi	CHY041	1-E	۵۱/۸	۰/۳	۲۰/۴	۶/۸
۵	Landers	Coolwater	TR	۸۲/۴	۰/۴	۴۲/۳	۱۲/۸

Table 2. Short-period far-source ground motions

جدول (۳) رکوردهای دور از چشمه پریدبلند

ردیف	زلزله	ایستگاه	مولفه	فاصله (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
۱	Michoacan	SCT	E-W	۴۰۰	۰/۱۷	۵۶/۷	۳۸۲۳
۲	Tohoku	TKY007	N-S	۳۸۷	۰/۱۹	۱۹/۸	۱۱
۳	Tohoku	TKY007	E-W	۳۸۷	۰/۱۸	۱۶/۳	۸/۱
۴	Tokachi-Oki	HKD129	N-S	۲۲۸	۰/۱۰	۲۹/۵	۲۰
۵	Tokachi-Oki	HKD129	E-W	۲۲۸	۰/۰۸	۳۳/۸	۲۸/۶

Table 3. Long-period far-source ground motions

جدول (۴) رکوردهای نزدیک گسل پریدکوتاه

ردیف	زلزله	ایستگاه	مولفه	فاصله (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
۱	Bam	Bam	۰۰۰	۱۰/۲	۰/۷۸	۱۰۹/۵	۳۲/۵
۲	Chi-Chi	CHY080	0-E	۳۱/۷	۰/۹۷	۱۰۷/۷	۱۸/۶
۳	Northridge	Rinaldi Receiving Sta	۲۲۸	۱۰/۹	۰/۸۳	۱۶۰/۱	۲۹/۶
۴	Imperial Valley	Bonds Corner	۲۳۰	۱/۷۳	۰/۷۷	۴۵/۹	۵۱
۵	Loma Prieta	Lexington Dam	۹۰	۲۰/۴	۰/۴۳	۸۶/۲	۳۰/۱
۶	Kocaeli	Izmit	۹۰	۵/۳۱	۰/۲۲	۲۹/۸	۱۷/۱
۷	Landers	Joshua Tree	۹۰	۱۳/۷	۰/۲۸	۴۳	۱۴/۳
۸	Kobe	KJMA	۰۰۰	۱۸/۳	۰/۸۲	۸۱/۳	۱۷/۷
۹	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۰۰۰	۱۰/۴	۱/۵۰	۱۲۵/۱	۳۹/۷

Table 4. Short-period near-fault ground motions

جدول (۵) رکوردهای نزدیکِ گسلِ پیروبلند

ردیف	زلزله	ایستگاه	مولفه	فاصله (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
۱	Tabas	Tabas	TR	۵۵/۲	۰/۸۵	۱۲۱/۲	۹۵
۲	Chi-Chi	TCU065	5-E	۲۶/۷	۰/۸۱	۱۲۶/۲	۹۲/۶
۳	Northridge	Sylmar - Converter	۵۲	۱۳/۱	۰/۶۱	۱۱۷/۴	۵۴/۳
۴	Imperial Valley	El Centro Array #6	۲۳۰	۲۷/۵	۰/۴۴	۱۰۹/۸	۶۵/۸
۵	Loma Prieta	LGPC	۰	۱۸/۵	۰/۹۷	۱۰۸/۵	۶۵/۸
۶	Kocaeli	Yarimca	۶۰	۱۹/۳	۰/۲۷	۶۵/۷	۵۷
۷	Landers	Lucerne	۲۶۰	۴۴	۰/۷۳	۱۴۶/۵	۲۶۲/۶
۸	Kobe	Takatori	۰	۱۳/۱	۰/۶۱	۱۲۷/۲	۳۵/۸
۹	Cape Mendocino	Petrolia	۹۰	۴/۵	۰/۶۶	۸۹/۷	۲۹

Table 5. Long-period near-fault ground motions

۵- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های جداسازی شده ارائه می‌شود. پارامترهای مورد مطالعه عبارت‌اند از: بیشینه جابه‌جایی جداساز، بیشینه شتاب مطلق طبقات و بیشینه دررفت بین طبقات.

شکل ۷ متوسط بیشینه تغییر مکان طبقات را برای مدل‌های ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود رکوردهای پیروبلند پاسخ بزرگتری در سازه ایجاد می‌کنند. در هر سه مدل، بیشینه جابه‌جایی جداساز برای هر دو دسته از رکوردهای دور از چشمه و رکوردهای نزدیکِ گسل پیروبلند در محدوده مجاز قرار دارد. در مقابل، رکوردهای نزدیکِ گسل پیروبلند در هر سه مورد، منجر به افزایش بیشینه جابه‌جایی جداساز از مقادیر طراحی شده‌اند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که در شرایطی که امکان بروز زلزله‌های نزدیکِ گسل پیروبلند وجود دارد، لازم است تدابیر ویژه‌ای (مانند استفاده از میراگر در تراز جداسازی) برای کنترل جابه‌جایی جداساز در نظر گرفته شود.

در شکل ۸، تغییرات متوسط بیشینه دررفت بین طبقه‌ای روسازه برای سه مدل ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که در

رکوردهای پیروبلند، بیشینه دررفت در طبقات فوقانی رخ می‌دهد و طبقات زیرین دررفت کمتری را تجربه می‌کنند. درحالی‌که در رکوردهای پیروبلند، این تغییرات یکنواخت‌تر است. همچنین ملاحظه می‌شود که در رکوردهای دور از چشمه، افزایش جابه‌جایی جداساز منجر به کاهش بیشینه دررفت شده است؛ درحالی‌که در رکوردهای نزدیکِ گسل چنین نیست. علت این امر می‌تواند ماهیت ضربه‌گونه حرکات نزدیک گسل باشد.

در شکل ۹-راست، تاریخچه زمانی انرژی ورودی کل به یک سیستم یک‌درجه‌آزاد با زمان تناوب ۱/۵۶ ثانیه، برای یک نمونه از رکوردهای پیروبلند نزدیکِ گسل و دور از چشمه رسم شده است. زمان تناوب ۱/۵۶ ثانیه به این علت انتخاب شده است که انرژی ورودی کل سیستم تحت اثر دو رکورد، تقریباً یکسان باشد. ملاحظه می‌شود که در رکورد مکزیکوسیتی تغییرات سطح انرژی تدریجی است؛ درحالی‌که در رکورد لوماپریتا تغییرات به صورت ناگهانی و در یک بازه زمانی کوتاه، رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹-چپ مشاهده می‌شود نرخ تغییرات انرژی ورودی در رکورد نزدیکِ گسل، در حدود ۵ برابر بیشتر است.

شکل (۷) متوسط بیشینه جابه‌جایی طبقات برای مدل‌های ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه

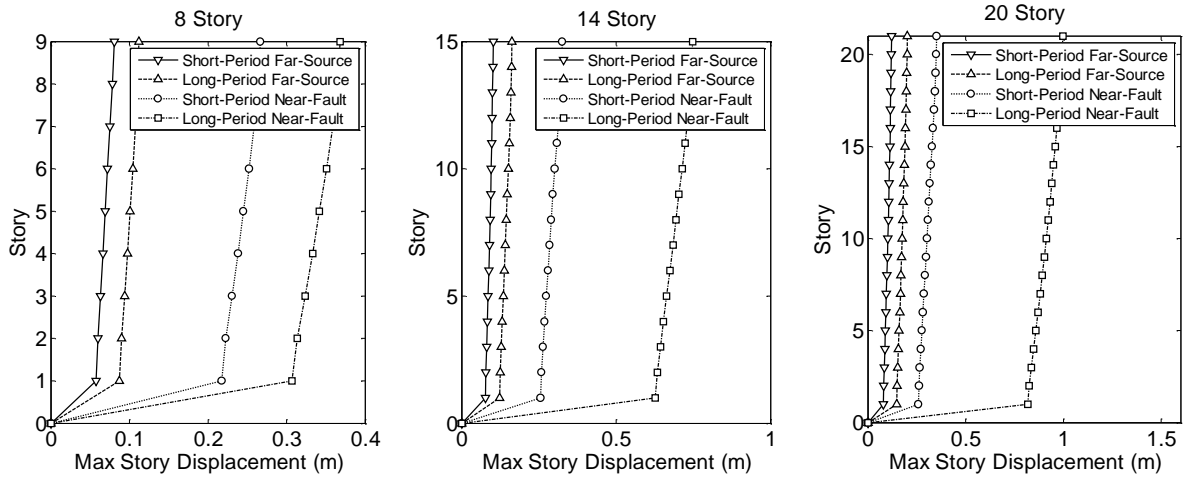


Fig. 7. Mean of maximum story displacement for 8, 14 and 20 story models

شکل (۸) متوسط بیشینه دریفت روسازه برای مدل‌های ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه

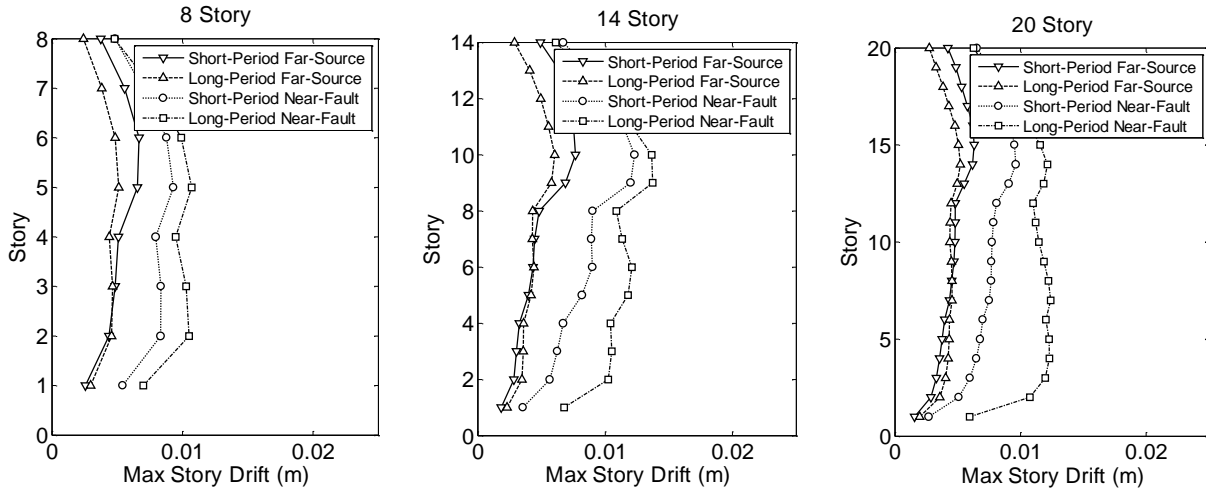


Fig. 8. Mean of maximum interstory drift of the superstructure for 8, 14 and 20 story models

شکل (۹) تاریخچه زمانی انرژی ورودی و نرخ تغییرات آن (چپ) برای رکوردهای لوماپریتا و مکزیکوسیتی

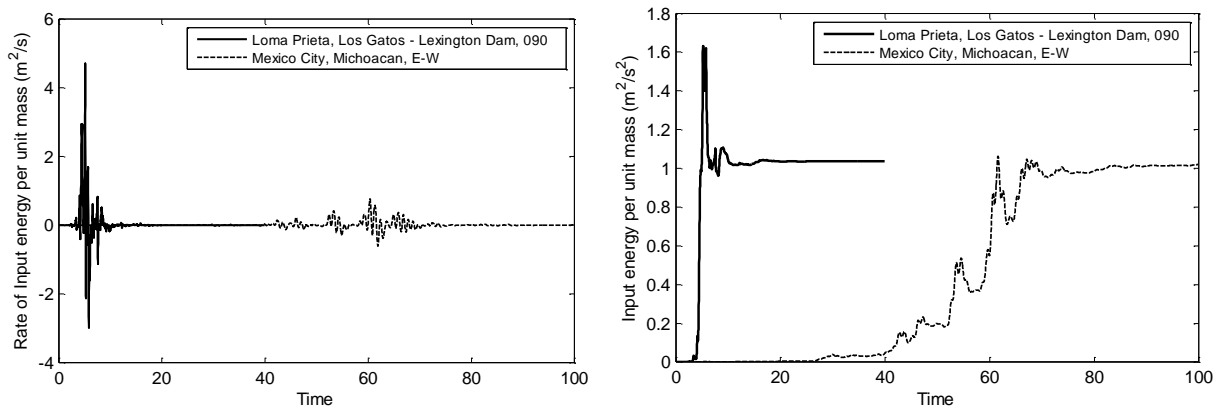


Fig. 9. Time history of the total input energy (right) and its rate (left) for Loma Prieta and Mexico City earthquakes

شکل (۱۰) متوسط بیشینه جابه‌جایی جداساز LRB تحت اثر رکوردهای دور از چشمه (راست) و نزدیک گسل (چپ)

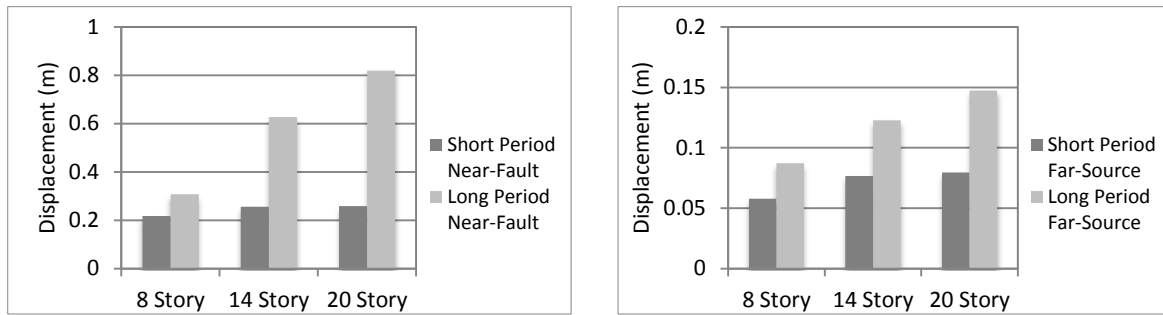


Fig. 10. Mean of maximum isolator displacement for far-source (right) and near-fault (left) ground motions

شکل (۱۱) متوسط بیشینه شتاب مطلق بام تحت اثر رکوردهای دور از چشمه (راست) و نزدیک گسل (چپ)

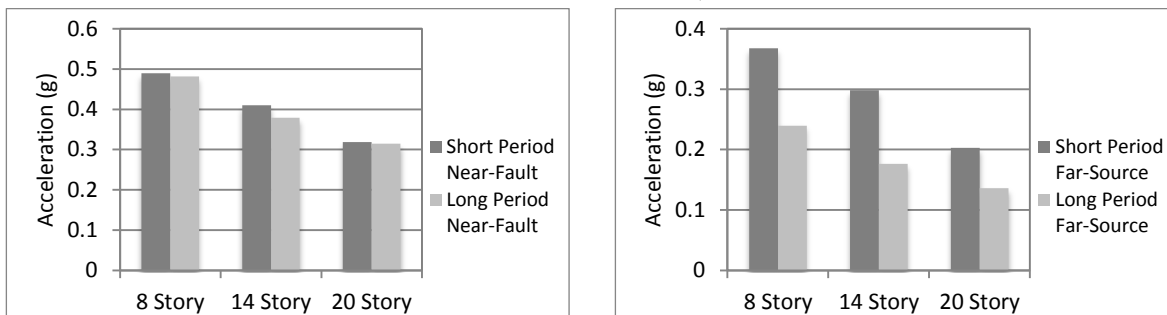


Fig. 11. Mean of maximum top floor acceleration for far-source (right) and near-fault (left) ground motions

می‌شود، که با چشم‌پوشی از کاهش شتاب طیفی (که ممکن است در رکوردهای پرریودبلند حاصل نشود)، با افزایش نسبت زمان تناوب روسازه به زمان تناوب کل سیستم، مشارکت مدهای بالاتر را کاهش می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، به منظور بررسی اثر نوع جداساز، از دو نوع جداساز LRB و FPS استفاده شده است. در اینجا، برای رعایت اختصار، تنها نتایج مربوط به بحرانی‌ترین دسته حرکات، یعنی حرکات نزدیک گسل پرریودبلند، ارائه می‌شود.

شکل (۱۲) متوسط بیشینه جابه‌جایی جداساز LRB و FPS

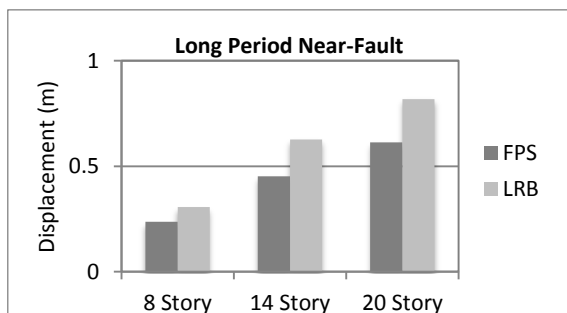


Fig. 12. Mean of maximum isolator displacement for LRB and FPS isolators

در شکل ۱۰، متوسط بیشینه جابه‌جایی جداسازها در سه مدل برای حرکات پرریودکوتاه و پرریودبلند مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در زلزله‌های پرریودکوتاه افزایش زمان تناوب سیستم جداساز (ناشی از افزایش ارتفاع سازه) تأثیر چندانی بر بیشینه جابه‌جایی جداساز ندارد. در مقابل، در زلزله‌های پرریودبلند، بیشینه جابه‌جایی جداساز با افزایش زمان تناوب سیستم، به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد زلزله‌های نزدیک گسل پرریودبلند، می‌تواند بسیار فراتر از حد مجاز طراحی باشد.

هدف مهم دیگری که از به‌کارگیری جداسازها دنبال می‌شود، کاهش شتاب مطلق طبقات است. شکل ۱۱، متوسط بیشینه شتاب مطلق بام در سه مدل را برای حرکات پرریودکوتاه و پرریودبلند نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حرکات پرریودبلند به‌طور متوسط (نسبت به حرکات پرریودکوتاه) منجر به بیشینه شتاب کمتری شده‌اند. علت این امر را می‌توان جابه‌جایی بیشتر جداساز در حرکات پرریودبلند دانست. جابه‌جایی بیشتر منجر به سختی مؤثر کمتر و در نتیجه افزایش زمان تناوب کل سیستم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای سه مدل ساختمان برشی ۸، ۱۴ و ۲۰ طبقه جداسازی شده به وسیله‌ی دو نوع جداساز سربی-لاستیکی و آونگ اصطکاکی، تحت اثر زلزله‌های پریدوکوتاه مورد مطالعه قرار گرفته است. جداسازها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که زمان تناوب مؤثر و جابه‌جایی طرح یکسانی داشته باشند. برای تحلیل دینامیکی از چهار دسته رکورد، پریدوکوتاه و پریدوبلند- نزدیک گسل و دور از چشمه- مقیاس نشده استفاده شده است. تقسیم‌بندی رکوردها بر مبنای انرژی ورودی در واحد جرم انجام می‌شود. نتایج این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

(الف) رکوردهای پریدوبلند نسبت به رکوردهای پریدوکوتاه، پاسخ بزرگتری در جداسازها ایجاد می‌کنند. برخلاف سه دسته دیگر، رکوردهای نزدیک گسل پریدوبلند می‌توانند منجر به تجاوز بیشینه جابه‌جایی جداساز از مقادیر طراحی شوند. بنابراین در شرایطی که امکان بروز این نوع حرکات وجود داشته باشد لازم است برای کنترل جابه‌جایی جداساز تدابیر ویژه‌ای (مانند استفاده از میراگر در تراز جداسازی) در نظر گرفته شود.

(ب) با افزایش زمان تناوب سیستم (با افزایش ارتفاع)، میزان اثرپذیری سازه از زلزله‌های پریدوبلند به شدت افزایش می‌یابد، و این حرکات قادرند نیاز جابه‌جایی بالایی را به جداساز تحمیل کنند. درحالی‌که در زلزله‌های پریدوکوتاه، افزایش زمان تناوب سیستم اثر چندانی بر بیشینه جابه‌جایی جداساز ندارد. البته جابه‌جایی بیشتر جداساز در حرکات پریدوبلند منجر به بیشینه شتاب بام کمتری نسبت به حرکات پریدوکوتاه می‌شود.

(پ) در رکوردهای پریدوکوتاه، بیشینه دررفت در طبقات فوقانی رخ می‌دهد و طبقات زیرین دررفت کمتری را تجربه می‌کنند. درحالی‌که در رکوردهای پریدوبلند این تغییرات یکنواخت‌تر است. همچنین در رکوردهای دور از چشمه، افزایش جابه‌جایی جداساز منجر به کاهش بیشینه دررفت می‌شود. در رکوردهای نزدیک گسل، افزایش جابه‌جایی جداساز منجر به افزایش بیشینه دررفت می‌شود.

(ت) به ازای زمان تناوب مؤثر و جابه‌جایی طرح یکسان،

شکل ۱۲، مقایسه متوسط بیشینه جابه‌جایی را برای دو نوع جداساز نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود جداساز FPS از توانایی بهتری در محدود کردن جابه‌جایی برخوردار است. به عبارت دیگر، می‌توان چنین گفت که به ازای زمان تناوب مؤثر و جابه‌جایی طرح یکسان، جابه‌جایی جداساز FPS کمتر از جداساز LRB است. البته این جابه‌جایی کمتر ضرورتاً منجر به افزایش دررفت و شتاب روسازه می‌شود.

در شکل ۱۳، متوسط بیشینه دررفت بین طبقه‌ای برای دو نوع جداساز مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که جابه‌جایی کمتر جداساز FPS منجر به افزایش دررفت روسازه می‌شود.

شکل (۱۳) متوسط بیشینه دررفت روسازه در جداساز LRB و FPS

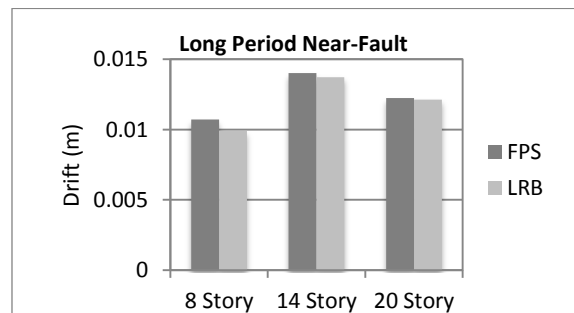


Fig. 13. Mean of maximum interstory drift of the superstructure for LRB and FPS isolators

متوسط بیشینه شتاب مطلق بام برای دو نوع جداساز، در شکل ۱۴ ارائه شده است. در تمام موارد، بیشینه شتاب مطلق بام در مدل‌های دارای جداساز FPS بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در حرکات نزدیک گسل، بیشینه شتاب مطلق بام بیشتر از حرکات دور از چشمه است.

شکل (۱۴) متوسط بیشینه شتاب روسازه در جداساز LRB و FPS

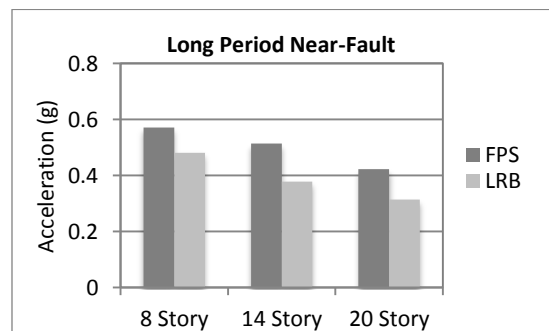


Fig. 14. Mean of maximum top floor acceleration of the superstructure for LRB and FPS isolators

- [7] Qingjun, Z. Z. C, A Comparative Study on Long-Period Seismic Responses for High-Rise Structures. *Structural Engineers*, 2009. 4: 015.
- [8] Jangid, R.S. and J.M. Kelly, Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001. 30(5): 691-707.
- [9] Becker, T. C., Yamamoto, S., Hamaguchi, H., Higashino, M., & Nakashima, M, Application of isolation to high-rise buildings: A Japanese design case study through a US design code lens. *Earthquake Spectra*, 2014.
- [10] Attard, T. and K. Dhiradhamvit, Application and design of lead-core base isolation for reducing structural demands in short stiff and tall steel buildings and highway bridges subjected to near-field ground motions. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2009. 4(5): 799-817.
- [11] Providakis, C.P., Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *Engineering Structures*, 2008. 30(5): 1187-1198.
- [12] Mazza, F. and A. Vulcano, Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated r.c. framed buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012. 41(2): 211-232.
- [13] Fujitani, H., Mukai, Y., Tomizawa, T., Hirata, K., Mazuka, Y., & Fujii, H, Response Reduction of Base-Isolation System Against Near-Fault Pulse and Long-Period Ground Motions. In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [14] Jangid, R.S., Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 2005. 27(3): 349-359.
- [15] Takewaki, I., Bound of Earthquake Input Energy. *Journal of Structural Engineering*, 2004. 130(9): 1289-1297.

جابه‌جایی جداساز FPS کمتر از جداساز LRB است. البته این جابه‌جایی کمتر منجر به افزایش دررفت و شتاب مطلق روسازه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که با پارامترهای طرح یکسان، جداساز FPS کنترل جابه‌جایی مطلوب‌تری را فراهم می‌کند. در مقابل، جداساز LRB از نظر کنترل شرایط عملکردی، کاهش شتاب و دررفت، مناسب‌تر می‌باشد.

References

۷- مراجع

- [1] Koketsu, K., & Miyake, H, *A seismological overview of long-period ground motion*. *Journal of Seismology*, 2008, 12(2): 133-143.
- [2] Celebi, M., Prince, J., Dietel, C., Onate, M., & Chavez, G., The culprit in Mexico City-amplification of motions. *Earthquake Spectra*, 1987. 3(2): 315-328.
- [3] Zama S, Nishi H, Yamada M, Hatayama K. Damage of oil storage tanks caused by liquid sloshing in the 2003 Tokachi Oki earthquake and revision of design spectra in the long-period range, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12–17, 2008, Beijing, China.
- [4] Takewaki, I., Murakami, S., Fujita, K., Yoshitomi, S., & Tsuji, M, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011. 31(11): 1511-1528.
- [5] Chen, Q. J., Yuan, W. Z., Li, Y. C., & Cao, L. Y, Dynamic response characteristics of super high-rise buildings subjected to long-period ground motions. *Journal of Central South University*, 2013. 20(5): 1341-1353.
- [6] Loungchiranothai, K., Seismic resistant design of high-rise buildings considering long-period earthquake effects: *Earthquake Engineering Course. Individual studies by participants to the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 2004. 40: 275-286.

Seismic response of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions

A. Bazrafshan¹, N. Khaji^{2*}

1- M.Sc. of Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof. of Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

nkhaji@modares.ac.ir

Abstract:

Base isolation systems may be considered as one of the most powerful tools of earthquake engineering pertaining to the passive structural vibration control technologies. It may enable a building or non-building structure to survive a potentially devastating seismic impact. Generally, it is thought that application of seismic isolation is limited to low- and medium-rise structures, and the use of isolation for high-rise buildings considered as impractical or unfeasible. However, existing examples of isolated high-rise buildings in Japan, also in Iran, suggest that these viewpoints clearly disagree with the real state-of-practice that exists there. Since the 1995 Kobe earthquake, just fewer than 200 isolated high-rise buildings, ranging from 60 to 180 meters height, have been constructed in Japan. However, this strategy is still uncommon in most countries of the world. Implementation of base isolation can greatly decrease inter-story drifts and floor accelerations, which results in protection of building's contents. As a result, high-rise buildings can be kept fully operational during the earthquake and also immediately occupiable just after the event. In other words, isolation can be adopted for the improved performance of high-rise buildings. To maintain the efficiency, the period of isolation system has to be considered between 4 and 7 seconds. Clearly, structures like this will be vulnerable to long period ground motions. Therefore, it is necessary to study the behavior of these structures under such earthquakes. Long-period ground motions can be divided into far-source and near-fault classes. Most far-source long-period ground motions were generated by large earthquakes and effective propagation paths. Therefore, far-source long-period ground motions are generally associated with offshore earthquakes in subduction zones. Near-fault long-period ground motions are generated mainly by rupture directivity effects in the vicinity of earthquake source faults. They consist primarily of rupture directivity pulses, which can be damaging, especially when combined with site effects and basin edge effects. In this paper, three base isolated models of 8-, 14-, and 20-story shear buildings using isolator type of lead-rubber bearing (LRB) and friction pendulum system (FPS), under long-period ground motions are studied. A set of 14 long-period ground motions – 5 far-source long-period motions and 9 near-fault long-period motions – as well as 14 short-period ground motions were selected. Total earthquake input energy per unit mass was used as a measure to distinguish long-period motions so that those which had a significant input energy over the periods of 2 seconds were considered as long-period motions. For each model two isolators – LRB and FPS – were designed so that the design displacement and the period of systems were exactly the same. The isolators were designed carefully and all dimensions and parameters were checked to insure practicality of the design. Then nonlinear dynamic analysis was implemented to evaluate the response of the structures. Results show that in the cases that input motions are short-period, increasing the height of the structure doesn't significantly affect the structure response and the isolation displacement are nearly the same. On the other hand, as the height of the structure is increased, its response due to the long-period ground motions becomes more significant, and these motions impose a great displacement demand in the isolation system.

Keywords: Shear Buildings, Seismic Isolation, High-Rise Buildings, Long-Period Ground Motions.