

تأثیر توابع هندسی جداگر پاندولی- اصطکاکی با انحنای متغیر تحت زلزله‌ی حوزه نزدیک

مهتاب فراست

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، واحد گلپایگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گلپایگان، ایران

ferasat@giu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۶/۲۹

چکیده

سیستم‌های پاندولی اصطکاکی، یکی از پرکاربردترین سیستم‌های جداسازی هستند. یکی از انواع رایج جداگرها، جداگرهای اصطکاکی می‌باشند که در بین این گروه، جداگر پاندولی اصطکاکی از جایگاه خاصی برخوردار می‌باشد. به دلیل ظهور این سیستم‌ها در سال‌های اخیر، در زمینه طراحی و تحلیل این نوع جداگر، کارشایان توجهی صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش سعی بر آن شده است تا با شناخت کامل رفتار جداگرهای لرزه‌ای پاندولی - اصطکاکی، به بررسی این جداگر با انحنای متغیر تحت زلزله حوزه‌ی نزدیک پرداخته شود. جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای جداگرهای پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر، ابتدا توابع هندسی مختلف برای سطح لغزش غیرکروی انتخاب و روابط مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی آن‌ها به دست آمد. سپس یک مدل عددی برای تحلیل تاریخیچه زمانی سازه‌ی جداسازی شده به وسیله‌ی این جداگرها ارائه گردید و رفتار جداگر پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی برای سه جداگر تابع درجه چهارم، درجه ششم و FPS نشان داد که جداگرهای پاندولی اصطکاکی عملکرد بهتری نسبت به جداگرهای FPS دارند؛ که در این بین، زمانی که سازه در معرض زلزله با سطح شدت پایین (حوزه دور) قرار گیرد، مناسب‌ترین تابع جهت پیشرفت عملکرد مطلوب سازه مجزا، جداگر تابع درجه چهارم می‌باشد؛ و زمانی که سازه در معرض زلزله‌های شدید (حوزه نزدیک) قرار گیرد، جداگر درجه ششم عملکرد مطلوبی خواهد داشت.

کلید واژگان: جداگر لرزه‌ای پاندولی-اصطکاکی، انحنای متغیر، زلزله‌ی حوزه نزدیک

مقدمه

جداگر لرزه‌ای علیرغم پراکندگی انرژی ورودی، حداکثر شتاب را با ضریب اصطکاک قطع می‌کند. در نتیجه، سازه را نسبت به تغییرات فرکانس و فراوانی حرکات ورودی، غیرحساس می‌نماید (مستقل و تنبکوچی^۱؛ ۱۹۸۳). با این وجود، عدم وجود نیروی بازگرداننده به جابجایی دائمی سازه منجر می‌گردد. برای جلوگیری از این معضل، زایاس و همکاران سطح لرزه‌ای کروی را با شعاع ثابت انتخاب به نام سیستم پاندولی - اصطکاک (FPS)^۲ معرفی نمودند (زایاس و همکاران، ۱۹۹۰). این سیستم از عمل جاذبه برای ذخیره نیروی بازگرداننده استفاده می‌نماید، اما دوره زمانی نسبتاً ثابت نوسان آن، بازدهی را تحت دامنه وسیعی از زلزله، محدود می‌نماید (سینها و پرنش^۳؛ ۲۰۰۰). به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای FPS و ارائه وسایل انطباقی، مفاهیم زیادی معرفی گردید. یکی از این نظریات، نسبت لغزشی چندکروی است که شامل بیش از یک سطح مقعر می‌باشد؛ بدین وسیله، رفتار پسماند متفاوتی را نشان می‌دهد هنگامی که لغزنده بر روی بیش از یک مقعر، می‌لغزد.

بیان مسئله

پرنش و سینها و تسای و همکاران عملکرد جداگرهای پاندولی اصطکاک با انحنای متغیر (VCFP)^۴ را با استفاده از سطح لغزشی بیضوی ارزیابی نموده‌اند (زایاس و همکاران، ۱۹۹۰؛ تسای و همکاران، ۲۰۰۴) که محور اصلی آن به‌عنوان لغزنده‌ای بسط و گسترش می‌یابد که از نقطه مرکزی سطح لغزشی دور است؛ بنابراین دوره نوسان با جابجایی جداگر در حال افزایش بوده و رفتار آن بین FPS و جداگر اصطکاک خالص (PF)^۵ در حال تغییر است. آن‌ها دریافتند که احتمال رزونانس فرکانس پایین را می‌توان کاهش داد ولی به جابجایی‌های جانبی فوق‌العاده زیاد و جابجایی باقیمانده منجر می‌گردد. عملکرد ثابت در طول تحریکات با شدت پایین را نشان داده و در طول تحریکات با شدت بالا، نقص در ایمنی را به دنبال دارد. در تحقیقات مختلف، گیلیچ و همکاران جداگرهای VCFP را با تابع چندجمله‌ای به‌عنوان سطح لغزشی معرفی نمودند (تسای و همکاران، ۲۰۰۳). لو و همکاران، تست‌های تجربی جهت تعیین بازدهی توابع چندجمله‌ای درجه چهارم و ششم انجام دادند. آن‌ها کارایی این سطوح لغزشی را جهت کاهش جابجایی جداگر و شتاب درون طبقه‌های تحت زلزله نزدیک حوزه نشان دادند. در اکثر تحقیقات، کاربرد نسبت VCFP در طبقه جداسازی شده به‌طور تجربی با تابع چندجمله‌ای درجه ششم بررسی گردید (گیلیچ^۶ و همکاران، ۲۰۱۲). تحقیقات بیشتر، رفتار هیستریک انطباقی نسبت جنبش فرکانس متغیر^۷ (VFRB) را با تابع چندجمله‌ای به‌صورت سطح جنبشی نشان می‌دهد (لو و هسو^۸؛ ۲۰۱۳). آن‌ها هیچ‌گونه تحلیل حساسیتی در پارامترهای تابع انتخابی نداشته و اقدام به تعیین بهینه پارامترهای طراحی نمودند. نسبت پاندولی - اصطکاک با انحنای متغیر (VCFP) یکی از راهکارهای کنترل

واکنش‌های القایی بیش از حد سازه‌های مجزا در معرض زلزله حوزه‌ی نزدیک می‌باشد. انحنای سطح لغزشی در این جداگر، با جابجایی در حال تغییر است و تابع آن، نیمکره است. انتخاب مناسب‌ترین تابع برای سطح لغزشی به اهداف طراحی و خصوصیات زلزله بستگی دارد. همچنین چند تابع چندجمله‌ای از نظر تجربی برای VCFP تست شده است، ولی نیاز به بررسی پارامتری جامع دارد تا مشخص شود که کدام یک رفتار مؤثرتری را دارند. در این باره، عملکرد لرزه‌ای سازه جدای نصب شده در VCFP با دو تابع چندجمله‌ای متفاوت سطح لغزشی بررسی شده است (درجه ۴ و ۶). با تغییر ثبات‌ها در این توابع از طریق تغییر پارامترهای طراحی، ۱۲۰ مورد جداگر ارزیابی شده است و مناسب‌ترین تابع جهت کاهش شتاب کف و یا جابجایی جداگر تحت سطوح خطرناک متفاوت بررسی شده است (شهبازی و تقی-خانی، ۲۰۱۷). بیرامی و همکاران (۱۳۹۱) نیز در پژوهشی دریافتند جداگر مورد مطالعه دارای یک بازو می‌باشد که به‌صورت گیردار به قسمت کاو سطح کروی متصل می‌شود و انتهای دیگر آن به صورت مفصلی به ستون‌های ساختمان متصل می‌شود. اگر ارتفاع بازوی این پایه‌ها کمتر از شعاع انحنای سطح کروی آن باشد وقتی مقداری جابه‌جایی در جداگر ایجاد می‌گردد یک نیروی بازگرداننده به جداگر اعمال می‌شود. همچنین باجلان و زندی (۱۳۹۳) در پژوهشی به این نتایج رسیدند که استفاده از سیستم‌های جداگری لرزه‌ای، راهکار مناسبی برای کاهش اثرات زلزله روی سازه موجود می‌باشد و هنگامی که حفاظت از اعضا مدنظر باشد و یا تجهیزات مهمی در ساختمان موجود باشد، با به‌کارگیری جداگرهای لرزه‌ای می‌توان انتقال انرژی موجود در حرکات ارتعاشی زمین را به ساختمان محدود نمود. روش جداسازی برای ساختمان‌های کوتاه و نسبتاً صلب مؤثر بوده و برای ساختمان‌های بلند و نرم کارایی کمتری دارد. نصب سیستم‌های جداگر لرزه‌ای منجر به افزایش در زمان تناوب سازه می‌شود. خدادادی و همکاران (۱۳۹۳) نیز دریافتند که سیستم جداسازی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حالت‌های منظم و نامنظم بهبود مناسبی دارد و مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌دهد. تسای و همکاران (۲۰۰۳) نیز در پژوهشی به این نتایج رسیدند که پالس طولانی مدت زلزله حوزه‌ی نزدیک به واکنش مهم سازه جداسازی شده پایه منجر می‌شود. لذا، جداگر پایه پیشرفته به نام سیستم پاندولی اصطکاک با انحنای متغیر (VCFP) پیشنهاد گردید. شعاع انحنای VCFP با افزایش جابه‌جایی جداگر افزایش یافته است؛ بنابراین، دوره اساسی سازه جداسازی شده پایه را می‌توان از دوره حرکات لرزه‌ای حوزه نزدیک تغییر داد. فرمولاسیون‌های امان محدود برای VCFP در طول حرکات لرزه‌ای حوزه نزدیک را می‌توان در دامنه مطلوبی با نصب VCFP کنترل کرد؛ بنابراین، VCFP را می‌توان برای ترویج مقاومت لرزه‌ای سازه‌های مجاور با گسل فعال تطبیق داد.

¹ - Purified Friction 3

¹ - Gillich 4

¹ - Variable Frequency Rotation Base 6

¹ - Lu & Hsu 6

⁸ - Mostaghel & Tanbakuchi

⁹ - Friction Pendulum Systems

¹ - Zayas 0

¹ - Sinha & Pranesh 1

¹ - Variable Curvature Friction Pendulum Isolator

طراحی سطح لغزش

در اینجا، از توابع هندسی به عنوان سطح لغزش با انحنای متغیر استفاده گردیده است. این توابع عبارتند از: چندجمله‌ای درجه ۴ و چندجمله‌ای درجه ۶ انتخاب این دو نوع تابع برای پوشش دو نوع رفتار لرزه‌ای است. به این صورت که جداگر O4 دارای رفتاری سخت شونده (با افزایش جابه‌جایی پروید کاهش می‌یابد) و جداگر O6 در زلزله‌های ضعیف دارای رفتاری نرم شونده و در زلزله‌های شدید با افزایش جابه‌جایی دارای رفتاری سخت شونده است.

مدل‌سازی جداگرهای پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر در فضای حالت

برای نوشتن معادله تعادل، مدل یک روسازه یک درجه آزادی بر روی جداگر پاندولی اصطکاکی قرار دارد.

معادله حرکت دو جرم m_1, m_2, m_3 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$m_3 \ddot{u}_3 + c_s(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_s(u_3 - u_2) = -m_3 \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + \frac{W}{R_{eff2}}(u_2 - u_1) + \mu_2 W Z_2 + F_{r2} + c_b \dot{u}_2 - c_s(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) - k_s(u_3 - u_2) = -m_2 \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{u}_1 + \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + \mu_1 W Z_1 + F_{r1} - \frac{W}{R_{eff2}}(u_2 - u_1) - \mu_2 W Z_2 - F_{r2} = -m_1 \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

$$F_{r2} = k_{r2}(|u_2 - u_1| - d_2) \text{sign}(u_2 - u_1) H(|u_2 - u_1| - d_2) \quad (4)$$

در این روابط جرم‌های m_1 تا m_3 به ترتیب عبارتند از: (۱) جرم لغزنده (۲) جرم صفحه لغزنده همراه با جرم کف (۳) جرم روسازه. u_1 تا u_3 و \dot{u}_1 تا \dot{u}_3 و \ddot{u}_1 تا \ddot{u}_3 به ترتیب جابه‌جایی، سرعت و شتاب لغزنده، کف و روسازه هستند و همچنین u_1 جابه‌جایی لغزنده، u_2 جابه‌جایی صفحه لغزنده با کف و u_3 جابه‌جایی سقف می‌باشند. \ddot{u}_g نیز شتاب زمین ناشی از زلزله است. روابط (۱) تا (۴) را می‌توان به صورت یک سیستم معادلات دیفرانسیل معمولاً درجه اول به صورت زیر نوشت که به آن فضای حالت گویند.

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{B\} \quad (5)$$

در مدل‌سازی جداگرهای پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر، به علت غیرکروی بودن سطح قوس‌ها، شعاع ثابت نبوده و نسبت به جابه‌جایی متغیر است. لذا در روابط فوق شعاع در هر نقطه از قوس از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

به عبارتی، یک سیستم جداگر لرزه‌ای انطباقی می‌تواند سختی و میرایی متغیری از خود ارائه دهد. مهم‌ترین فایده‌ی این رفتار، پاسخگویی مناسب این سیستم‌ها در برابر عملکردهای متفاوت و سطوح خطر متفاوت است. جداگر پاندولی - اصطکاکی که یکی از انواع جداگرهای لرزه‌ای اصطکاکی چند قوسی است، در زمره‌ی این سیستم‌های لرزه‌ای انطباقی‌پذیر است. ساختار داخلی این سیستم‌ها با توجه به سطوح مقعر چندگانه و اینکه لغزش بر روی کدام یک از سطوح اتفاق بیفتد، مشخص می‌شود. لغزش بر روی این سطوح با توجه به مقادیر جابه‌جایی، بین سطوح تعویض می‌شود و سختی و میرایی مورد نظر حاصل می‌گردد (معین‌درباری و تقی‌خانی، ۱۳۹۳).

از طرف دیگر، در زلزله‌های اخیر تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها در مجاورت گسل‌های مسبب زلزله و آن‌هایی که در فاصله دورتری از گسل واقع شده‌اند، مشاهده شده است. جنبش زمین در حوزه نزدیک دارای خصوصیات ویژه‌ای است که با حرکات زمین در مناطق حوزه دور متفاوت می‌باشد (فتحی و همکاران، ۲۰۱۵). جداسازی لرزه‌ای روشی برای محافظت ساختمان‌ها در برابر خسارات ناشی از زلزله بوده و این عمل با محدود ساختن اثر تخریبی زلزله انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه سازه‌های نامنظم در مقایسه با سازه‌های منظم، در هنگام وقوع زلزله از عملکرد مناسبی برخوردار نیستند، بی‌نظمی‌های موجود در سازه که در هنگام وقوع زلزله موجب تشدید اثر آن در سازه خواهد شد، باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳).

اهداف پژوهش

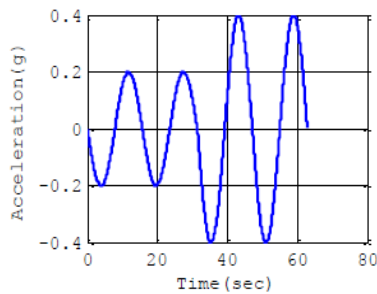
هدف اصلی: جداگر لرزه‌ای پاندولی - اصطکاکی با انحنای متغیر تحت زلزله حوزه‌ی نزدیک
اهداف فرعی:

۱. بررسی توابع هندسی جداگرهای لرزه پاندولی - اصطکاکی با انحنای متغیر
۲. بررسی تأثیر هندسه سطح لغزشی بر عملکرد لرزه‌ای سازه
۳. بررسی واکنش‌های سازه‌ای جداگرهای توابع چندجمله‌ای درجه ۴ و ۶ تحت زلزله حوزه‌ی نزدیک

روش شناسی

طراحی و مدل‌سازی جداگرها

جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای جداگرهای پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر (VCFP)، ابتدا توابع هندسی مختلف برای سطح لغزش غیرکروی انتخاب و روابط مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی آن‌ها به دست می‌آید. سپس یک مدل عددی برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ی جداسازی شده به‌وسیله‌ی این جداگرها ارائه می‌شود. در این روش که بر مبنای معادلات فضای حالت استوار است، رفتار جداگر پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر مدل‌سازی شده است. همچنین به منظور اعتبارسنجی روابط به دست آمده، پاسخ‌های سازه‌ای یک سازه‌ی جداسازی شده و نمودار هیستریزس جداگر آن تحت اثر زلزله، بررسی شده است.



(ج)

شکل ۱- حلقه هیستریزس شماتیک جداگرهای VCFP طبق بارگذاری سینوسی. (الف) تابع درجه چهارم (O4)، (ب) تابع درجه ششم (O6) و (ج) نمونه بارگذاری سینوسی

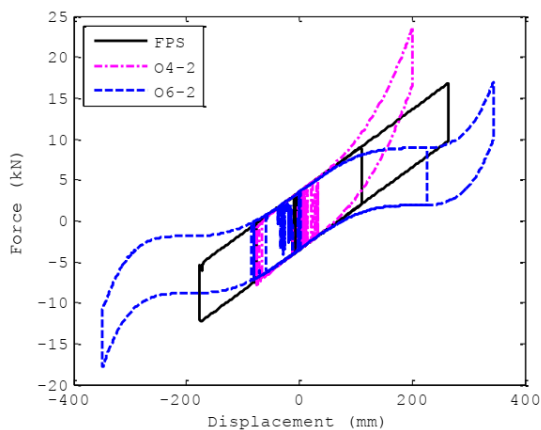
که T_D دوره مؤثر، B_D فاکتور کاهش دمپینگ و S_{D1} شتاب طیف طراحی در یک ثانیه است. در این تحقیق، جابجایی طراحی برای یک محل با نوع خاک C، پارامتر شتاب واکنش طیفی $S_I=0.40$ و پارامترهای جداگر به صورت $B_D=1$ و $T_D=T_0$ محاسبه شده است. برای ۵ دوره اولیه متفاوت برابر با (۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ ثانیه، جابجایی‌های طراحی به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۲۸، ۰/۳۷ و ۰/۴۶ متر می‌باشد.

در اینجا با انتخاب جابجایی ویژه (D) برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر، جداگرهایی با D داریم که مقدار آن بین ۰/۲ و ۳ برابر هر جابجایی طراحی (D_D) می‌باشد. در این تحقیق، جداگرها با توابع مرتبط و مقادیر D با O4-3، O4-2، O4-1، O6-2، O6-1، O6-3 بیان شده است.

تأثیر هندسه سطح لغزشی بر عملکرد لرزه‌ای سازه

تأثیر تابع ریاضیاتی

شکل (۲) حلقه‌های هیستریزس حالت شماره ۱۲ جداگرهای O4-2 و O6-2 (D برابر با ۰/۲ متر) تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال را نشان می‌دهد که مثالی برای نشان دادن تأثیر هندسه سطح لغزشی بر رفتار لرزه‌ای جداگرهای VCFP می‌باشد. حلقه هیستریزس جداگر FPS با حداقل ضریب اصطکاک مشابه و دوره ($f_{min}=0.035$ و $T_0=2sec$) نیز جهت نشان دادن تفاوت بین جداگر FPS و دو جداگر متفاوت VCFP طراحی شده است.



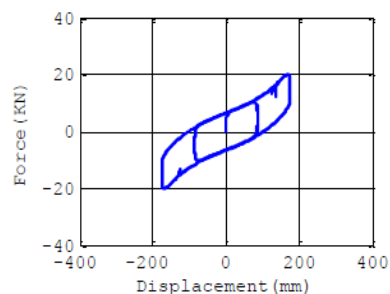
شکل ۲- حلقه‌های هیستریزس جداگرهای FPS، O4-2 و O6-2 (حالت شماره ۱۲ تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال. $T_0=2sec$ و $f_{min}=0.035$)

$$R_i(x) = |x| \sqrt{1 + \frac{1}{y'(x)^2}} \quad (6)$$

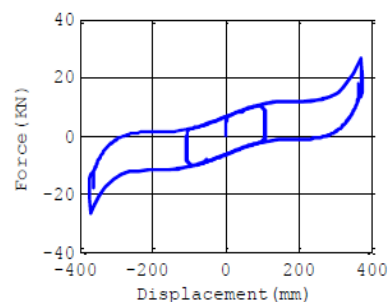
حداکثر شتاب طبقه و اوج جابجایی جداگر با فرمولاسیون فضای حالت معادلات حرکت در MATLAB با استفاده از تابع ODE و کاربرد روش Runge-Kutta محاسبه شده است.

بعلاوه، جهت تعیین مدل عددی VCFP با تابع هندسی چندجمله‌ای درجه ششم، جابجایی تاریخیچه‌ی زمانی جداگر و منحنی هیستریک آن ارائه شده است. یک سازه فولادی یک طبقه با مقیاس کامل با ارتفاع سه متر و وزن برابر ۱۲ تن می‌باشد. فرکانس اساسی (میانی ثابت) $2/33$ هرتز و نسبت دمپینگ ۲٪ دارد. صلبیت اولیه k_0 در رابطه با دوره ایزولاسیون اولیه برابر با یک ثانیه انتخاب شده است. صلبیت جداگر k_D در نقطه انکسار D حدود ۱/۵ برابر صلبیت اولیه است. نقطه انکسار، علامت تغییر یافته بین شتاب و منطقه کنترل جابجایی (نرم کردن و سخت شدگی) در تابع هندسی چند جمله درجه ششم جداگر (O6) است و به پیشرفت هدف عملکرد محدود در سطوح خاص زمین لرزه کمک می‌کند.

شکل (۱) حلقه هیستریزس شماتیک جداگرهای VCFP با دو تابع سطح لغزشی متفاوت طبق بارگذاری سینوسی را نشان می‌دهد. دوره اولیه، حداقل ضریب اصطکاک و جابجایی ویژه هر دو سیستم، ۲ ثانیه، ۰/۰۶۵ و ۰/۲ متر است. همان‌گونه که در حلقه‌های هیستریک نشان داده شده است، نقطه انکسار تابع لغزشی O6 ظاهراً دو منطقه متفاوت را جدا می‌سازد.

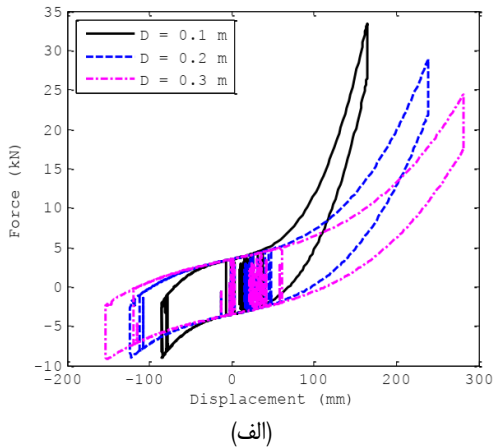


(الف)

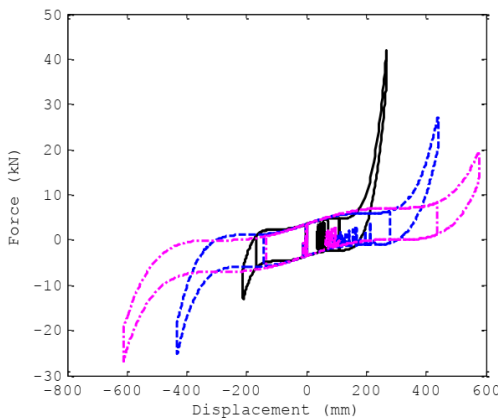


(ب)

قابل توجه است که انتخاب جابجایی ویژه نقش بسیار سازنده‌ای در اوج شتاب کف کنترل کننده در سطح لغزشی O6 نسبت به O4 دارد، درحالی که تأثیر بیشتری بر حداکثر جابجایی جداگر سطح مقعر O4 دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- تأثیر جابجایی ویژه بر حلقه‌های هیستریزس حالت شماره ۸ جداگرهای (الف) O4 و (ب) O6 ($T_0=2\text{sec}$ و $f_{\min}=0.035$) تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال.

مقدار D ، منطقه کنترل جابجایی و شتاب را جدا کرده و D بیشتر در سطح لغزشی O6، تأثیر شتاب کف را به خاطر ورود به مرحله سخت کاری، حذف می‌کند؛ اما در VCFP با ضریب اصطکاک بالا، D بزرگ‌تر باعث جابجایی باقیمانده بیشتر می‌گردد که مطلوب نیست. نکته حائز اهمیت، مقدار بهینه جابجایی ویژه برای O6 است که به دامنه وسیع دوره‌های پالس و پارامترهای طراحی بستگی دارد.

تأثیر دوره اولیه

شکل (۴)، حلقه‌های هیستریزس O4 و O6 را برای دوره‌های اولیه متفاوت جداسازی شده طبق زلزله دره امپریال ۱۹۷۹ نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده گردید، هرگونه تغییر در صلبیت اولیه، تأثیر چشمگیری بر رفتار لرزه‌ای جداگرهای VCFP دارد. دوره اولیه انتخابی برابر با ۱ ثانیه برای جداگر O4 به صلبیت جداگر نرمال شده اولیه منجر شده که تقریباً برابر با $4(m^{-1})$ می‌باشد. در این حالت، ضریب p_1 برابر با صفر و تابع ریاضیاتی سطح لغزشی به تابع چندجمله‌ای درجه دوم تغییر کرده است (دایره) که یک

در این شکل، حلقه هیستریزس جداگر O4 دارای رفتار سخت کاری است هنگامی که لغزنده از موقعیت خنثی حرکت می‌کند، زیرا مشتق ثانویه سطح لغزشی (میزان تغییر صلبیت) در جداگر O4 یک تابع فزاینده با جابجایی است. در مقایسه با جداگر FPS با تابع خطی صلبیت جداگر، جداگر O4 جابجایی‌های جداگر مازاد را در طول شدت بالا و زلزله حوزه نزدیک محدود می‌کند. صلبیت بالا باعث جابجایی‌های باقیمانده اندکی می‌شود حتی در مواردی با ضریب اصطکاک بالا.

در حلقه هیستریزس جداگر O6، صلبیت بین منبع و $x=D$ دائماً به صفر در حال کاهش است. در این مرحله، به خاطر جداگر نیروی بازبایی صفر، شتاب تبدیلی به سازه محدود شده است. در سطح پایین لغزنده تحریک ورودی بیش از نقطه عطف نیست و شتاب کف همسو با هدف خدمات فوری برای طراحی عملکرد لرزه‌ای کنترل شده است. با جابجایی بیش از حد بیشتر از $x = D$ در حلقه هیستریزس جداگر O6، صلبیت و نیروی بازگرداننده آن جهت کنترل جابجایی‌های جداگر در طول زلزله حوزه نزدیک با شدت بالا، افزایش یافته است.

تأثیر جابجایی ویژه (D)

همان گونه که تشریح شد، جابجایی ویژه (D)، فاصله از منبع به موقعیت است که صلبیت جداگر را نرمال شده برابر با مقدار بالای $4(m^{-1})$ در جداگر O4 می‌باشد و نقطه تغییردهنده میزان تغییر صلبیت را در سطح لغزشی با صلبیت جداگر نرمال شده برابر با $0(m^{-1})$ در جداگر O6 نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با استفاده از جابجایی جداگر با میانگین 3-04، در مقایسه با 04-1، افزایش ۲۶/۵٪ وجود داشته و میانگین شتاب کف حدود ۲۵/۴٪ کاهش یافته است. در مقایسه با 04-2، این تفاوت‌ها به ترتیب ۲/۹ و ۲۱٪ کاهش یافته است. شکل (۳ الف) رفتار جداگر O4 را از طریق حلقه‌های هیستریزس حالت شماره ۸ با جابجایی‌های ویژه متفاوت (04-1، 04-2، 04-3) تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال نشان می‌دهد.

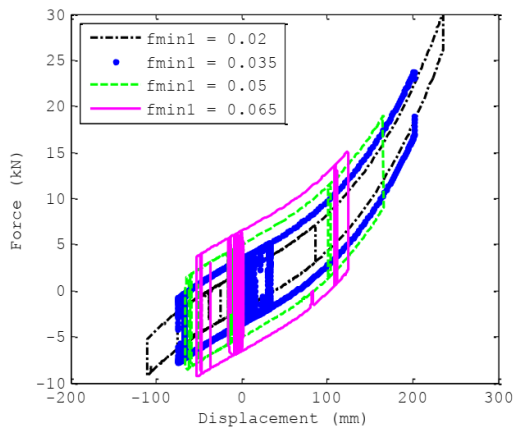
نتایج بالا را می‌توان برای اهداف طراحی با انتخاب D مناسب در VCFP با تابع لغزشی O4 استفاده کرد. با انتخاب مقدار بالا برای D ، جداگر رفتار صلبی در مقایسه با موارد دارای D کوچک‌تر دارد. در این حالت، جابجایی جداگر بیشتر است ولی نیروی تبدیلی به سازه، مقدار کمتری خواهد داشت. طبق مقدار بهینه برای D جهت کنترل هم‌زمان جابجایی جداگر و شتاب کف، به تحلیل دیگر پارامترهای طراحی به‌عنوان ضریب اصطکاک و دوره اولیه ایزولاسیون نیاز داریم.

نتایج مرتبط با منحنی انحناء لغزشی O6 نشان داد که افزایش جابجایی ویژه (D)، تأثیر مشابهی بر عملکرد دینامیک سازه با تابع لغزشی O4 دارد. میانگین جابجایی‌های جداگر در 06-1، 06-2، به میزان ۱۰/۴ و ۳/۲ درصد کمتر از VCFP با 06-3 می‌باشد درحالی که میانگین شتاب کف ۴۶ و ۲۱٪ بالاتر از سیستم مجزا با 06-3 می‌باشد.

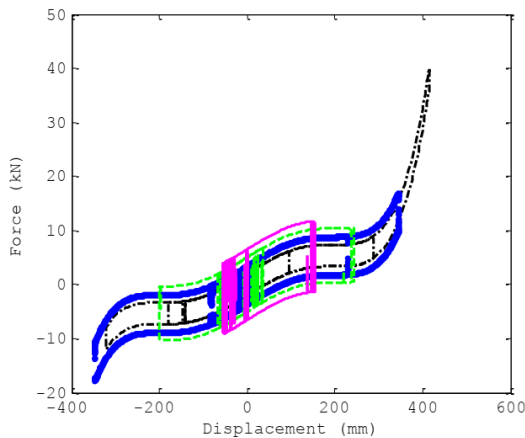
شکل (۳ ب) حلقه‌های هیستریزس جداگر O6 را با جابجایی‌های ویژه متفاوت (06-1، 06-2، 06-3) در معرض زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال نشان می‌دهد. مشابه با شکل (۳ الف)، جابجایی ویژه بالا، صلبیت جداگر را کاهش داده و به حداکثر جابجایی بیشتری منجر می‌گردد.

تأثیر ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک، صلیبیت سطح لغزشی را نشان می‌دهد که نیروی مقاوم در برابر لغزش دو سطح را عرضه می‌کند. ضریب اصطکاک، پارامتر طراحی مهمی است که نقش سازنده‌ای در عملکرد لرزه‌ای جداگرهای لغزشی دارد. تأثیر ضریب اصطکاک بر رفتار لرزه‌ای جداگرهای VCFP در شکل (۵) نشان داده شده است. حلقه‌های هیستریزاس حالت O4-2 و O6-2 با T_0 برابر با ۲ ثانیه و ضریب اصطکاک متفاوت تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- نمونه‌ای از تأثیر ضریب اصطکاک بر حلقه‌های هیستریزاس جداگرهای (الف) O4-2 و (ب) O6-2 با $T_0=2$ تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال

همان گونه که نشان داده شده است، انتخاب مقدار بالاتر برای حداقل ضریب اصطکاک، حرکت لغزنده را از منبع دور می‌کند. جداگر O4 می‌تواند با مسئله جابجایی باقیمانده به خاطر نیروی بازبایی بالای آن در شروع لغزش رفع شود. این مرحله سخت کاری، نیروی بازبایی را حتی برای ضرایب اصطکاک بالا افزایش می‌دهد.

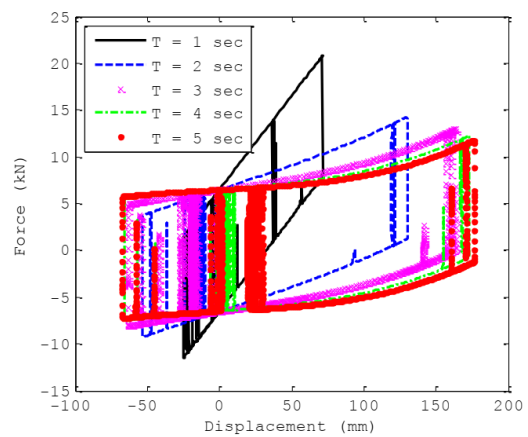
برای جداگر O6 که سطح لغزشی آن با فاز نرم کاری تا نقطه‌ای که با صلیبیت صفر ادامه یافته، شروع می‌گردد، تأثیر متفاوت برای ضریب اصطکاک مشاهده شده است. بهترین واکنش‌های جداگر O6 تحت هفت زلزله حوزه‌ی نزدیک از دو ضریب اصطکاک برابر با ۰/۰۳۵ و ۰/۰۵ پیشرفت کرده است.

قسمت تکیه‌گاه بار FPS است. این رفتار را می‌توان در حلقه هیستریزاس جداگر O4-3 با حالت $T_0=1$ sec در شکل (۴ الف) مشاهده کرد. رفتار هیستریزاس دیگر موارد ($T_0 \neq 1$) نمونه سازگاری با تغییر دوره اولیه نیست.

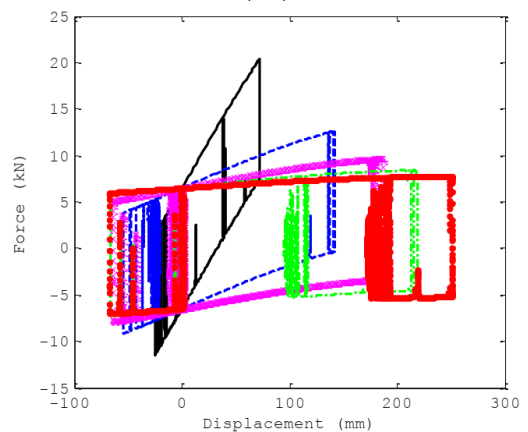
برای جداگر O6، شکل (۴ ب) نشان می‌دهد که جداگر O6 با دوره اولیه ۱ ثانیه به جداگری با صلیبیت بالای اولیه منتهی می‌گردد که دقیقاً مانع از لغزش شده و باعث نیروی انتقالی بالا و شتاب سازه‌ای می‌گردد. جداگرها با دوره اولیه طولانی، باعث شتاب سازه‌ای اندک و جابجایی‌های جداگر بالاتر می‌گردد.

انحراف معیار نسبی داده‌ها نشان داد که واکنش‌های سازه‌ای به دیگر پارامترهای طراحی و خصوصیات تحریک ورودی، بستگی دارد. همین‌طور، تعیین مقدار انحصاری به‌عنوان صلیبیت اولیه بهینه، کار آسانی نیست.

در اینجا، مناسب‌ترین ترکیب برای کنترل حداکثر جابجایی جداگر و شتاب سقف به‌طور هم‌زمان به قسمت تحمل‌کننده بار O4 با دوره‌های اولیه طولانی بین ۴ و ۵ ثانیه مرتبط است، زمانی که لغزش اصطکاک‌ی بالایی وجود دارد.



(الف)

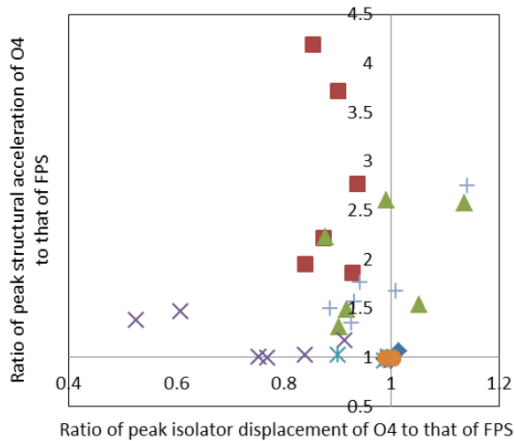


(ب)

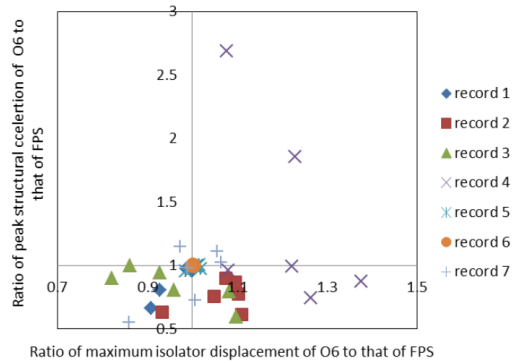
شکل ۴- تأثیر دوره اولیه ایزولاسیون بر حلقه‌های هیستریزاس جداگرهای (الف) O4-3 و (ب) O6-3 با $f_{min}=0.065$ تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال

مقایسه نتایج

به منظور ارزیابی تأثیر هم‌زمان پارامترهای تشریح شده در عملکرد لرزه‌ای سازه جداسازی شده با VCFP، حداکثر واکنش سیستم با ۱۲۰ جداگر متفاوت با حالات متناظر جداگرهای FPS مقایسه شده است. شکل (۶)، اوج شتاب کف و حداکثر جابجایی جداگر سازه نصب شده در ۲۰ مورد هر جداگر VCFP و FPS را تشریح می‌کند.



O4 (الف)



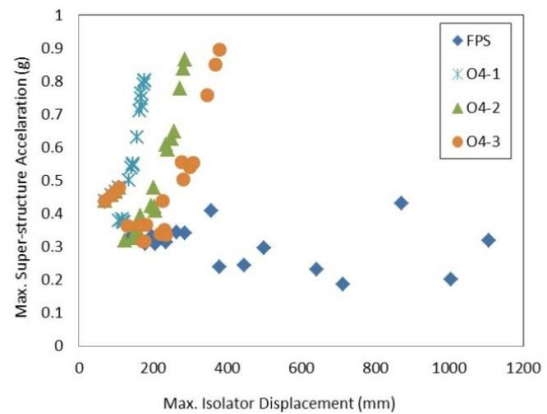
O6 (ب)

شکل ۷- نسبت میانگین واکنش‌های سازه‌های جداگر بهینه VCFP به جداگر FPS متناظر تحت زلزله حوزه نزدیک

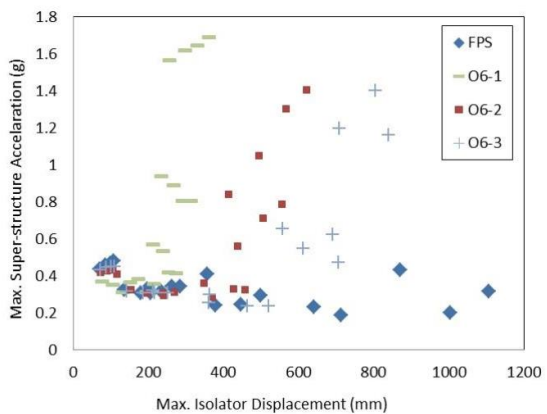
بحث و نتایج

نتایج نشان داد که حداکثر جابجایی جداگر سازه با جداگر O4 در مقایسه با جداگر FPS کاهش یافته است. در بیش از ۸۰٪ موارد O4-1 ($K_D=4$) و حداکثر جابجایی کمتر از تکیه‌گاه‌های FPS است؛ اما اوج شتاب کف در ۷۲٪ موارد، بالاتر از واکنش سازه‌های مجزا شده با سیستم‌های FPS است. حداکثر جابجایی جداگر O6 در ۶۲٪ موارد بالاتر از جداگر متناظر FPS است در حالی که اوج شتاب طبقه آن در ۵۶٪ موارد کمتر از سیستم FPS می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً تشریح گردید، جابجایی ویژه (D) و ضریب اصطکاک یک نقش مهم در رفتار لرزه‌ای جداگرهای O4 و O6 دارد.

نتایج فوق را می‌توان برای طراحی بهینه جداگرهای VCFP با توابع O4 یا O6 استفاده کرد. در جداگرهای VCFP با تابع O4، جابجایی ویژه ۰/۳ متری با دوره اولیه طولانی مانند ۴ تا ۵ ثانیه در ترکیب با حداقل ضریب اصطکاک بیش از ۰/۰۵ می‌تواند اوج شتاب کف و حداکثر جابجایی جداگر را کاهش دهد. برای ترکیب جداگر O6 جابجایی ویژه بین ۰/۲ تا ۰/۳ متر، دوره اولیه بیش از ۲ ثانیه و حداقل ضریب اصطکاک بین ۰/۰۳ و ۰/۰۵، بهترین واکنش‌های سازه‌ای را نشان می‌دهد. جداگر پاندولی - اصطکاکی با انحنای متغیر (VCFP) دارای سطح لغزشی غیرکروی با انحراف متغیر



O4 (الف)



O6 (ب)

شکل ۶- حداکثر واکنش‌های ۲۰ حالت سه جداگر متفاوت O4 (الف) و O6 (ب) تحت زلزله ۱۹۷۹ دره امپریال

علیرغم عملکرد مطلوب ایزولاسیون، عامل مهم دیگر جهت انتخاب تابع سطح لغزشی، شدت حداکثر زمین لرزه‌های احتمالی است. شکل (۷)، میانگین نسبت واکنش‌های سازه‌ای جداگرهای بهینه O4 و O6 را به جداگر FPS تحت هفت زلزله نزدیک حوزه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، برای جداگر O4، بهترین نتایج تحت زلزله دره امپریال مشاهده شده است که حداقل PGA داشته و شدیدترین واکنش‌ها تحت زلزله‌های Chi-Chi و Northridge مشاهده گردید که با تقریباً بالاترین سطح PGA ثبت شده است. برخلاف حداکثر کنترل شتاب کف به‌طور هم‌زمان به‌عنوان جابجایی جداگر، عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها با جداگرهای O6 تحت زلزله‌های قوی‌تر مثل Chi-Chi و Northridge بهتر از رفتار جداگرها تحت زلزله‌های با شدت ضعیف‌تر می‌باشد.

قابل ملاحظه‌ای می‌دهد؛ لذا پیشنهاد می‌گردد با توجه به گسترش استفاده از این فناوری مفید در کشور مراجع ذیصلاح و مراکز کنترل و نظارت بر طراحی سازه‌های جداسازی شده از نرم‌افزار استفاده نمایند. همچنین پیشنهاد می‌گردد تحقیقات آینده به موضوع طراحی جداگر پاندولی اصطکاکی با انحنای متغیر پرداخته و از نظر سیستمی و کارایی، پارامترهای مناسب برای این نوع جداگرها را تعیین نمایند. براساس نتایج این پژوهش، عدم همخوانی نتایج با مقادیر ارائه شده به‌وسیله آیین‌نامه‌ی مربوط به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک است که نیازمند افزایش مقادیر ارائه شده در آیین‌نامه خواهد بود.

ارزیابی انرژی سیستم سازه‌ای برای درک مکانیک رفتار سیستم بسیار مفید است. لذا خصوصیات انرژی در معیارهای تعیین پارامترهای جداگر از اهمیت بالایی برخوردار است. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی به انرژی و ویژگی‌های آن در تعیین پارامترهای انواع جداگرها پرداخته شود. پیشنهاد می‌گردد از جداگر اصطکاکی پاندولی با انحنای متغیر (VCFP) به صورت عملی در کشور استفاده گردد زیرا این نوع جداگر در مقاومت لرزه‌ای سازه‌های مجاور با حوزه‌ی نزدیک بسیار سازگاری و انطباق‌پذیری دارند. درنهایت، پیشنهاد می‌گردد پژوهشگران و محققان در آینده پژوهشی پیرامون تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای جداگر اصطکاکی پاندولی با انحنای متغیر تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور را انجام دهند.

منابع و مراجع

- خدادادی، ع.؛ میری، م.؛ جلالی، ع. (۱۳۹۳). بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه مجهز به جداساز پاندولی اصطکاکی سه قوسی در حوزه‌ی نزدیک گسل. پنجمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، جهاد دانشگاهی استان کرمان.
- عسگری، م.؛ یوسفیه، ع. (۱۳۸۷). تأثیر میراگر اصطکاکی لغزشی در کنترل پاسخ سازه. فصلنامه علمی تخصصی عمران، ۴۹-۵۵.
- مظاهری، ک.؛ وکیل‌زاده، م.؛ بختیاری آزاد، م. (۱۳۹۴). اثر نسبت مقاومت مشخصه در رفتار لرزه‌ای سازه با جداگر هسته سربی. فصلنامه آنالیز سازه (زلزله)، ۱۲(۱)، ۳۳-۲۷.
- ملکی، ا.؛ خدایاری، ر.؛ یوسف‌پور، ح. (۱۳۹۵). کنترل فعال سازه‌ها با استفاده از تاندون فعال تحت زلزله‌های حوزه نزدیک. فصلنامه آنالیز سازه (زلزله)، ۱۳(۳)، ۵۱-۴۳.
- معین درباری، ح.؛ تقی‌خانی، ت. (۱۳۹۳). تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک. مهندسی عمران شریف، ۳۰(۲)، ۴۵-۳۱.
- وکیل‌زاده، م.؛ مظاهری، ک.؛ بختیاری آزاد، م. (۱۳۹۴). تأثیر میراگرهای ویسکوز در مقاوم سازی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی. فصلنامه آنالیز سازه (زلزله)، ۱۲(۴)، ۵۰-۴۱.
- Gillich, G.R., Minda, A.A., Gillich, N., Jurcau, S.C. & Iavornic, C.M. 2012. Robust friction pendulum with parameterized sliding surfaces. *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Development, Sustainable Chemical Industry, Pollution, Hazards and Environment*.
- Lu, L.Y. & Hsu, C.C. 2013. Experimental study of variable-frequency rocking bearings for near-fault seismic isolation. *Eng. Struct.*, 46, 116-129.

می‌باشد. به عبارت دیگر برای شتاب کم از تابع O4 می‌توان استفاده کرد که این تابع منجر به جابجایی بالا می‌شود ولی برای جابجایی کم از تابع O6 استفاده می‌گردد که این تابع شتاب بالایی دارد.

یک مسئله اصلی در موضوع کاربرد جداگرهای VCFP، فرایند طراحی آن است که زمان و انرژی زیادی را نسبت به جداگرهای متداول به خاطر تعداد پارامترهای طراحی صرف می‌کند؛ بنابراین، تحقیقات انجام شده خصوصاً در زمینه تحلیل حساسیت و بررسی تجربی انجام گرفت تا رفتار جداگرهای VCFP درک شده و مقادیر بهینه پارامترهای طراحی مشخص گردد.

نتیجه گیری

- در اینجا، تحقیق پارامتری بر روی ۱۲۰ مورد جداگر VCFP متفاوت انجام گردید و با موارد FPS متناظر آن با دو نوع سطح لغزشی مقایسه گردید. به‌منظور کنترل واکنش‌های القایی مازاد سازه‌های مجزا در معرض زلزله حوزه‌ی نزدیک، دو تابع چندجمله‌ای متفاوت با درجه ۴ (O4) و درجه ۶ (O6) در موارد متفاوت انتخاب گردید. عملکرد مطلوب طبق کنترل شتاب کف به علاوه جابجایی جداگر تحت زلزله حوزه‌ی نزدیک تعریف شده است. برخی از نکات مهم در این پژوهش به‌صورت زیر انجام گرفته است:
- مناسب‌ترین تابع جهت پیشرفت عملکرد مطلوب سازه مجزا، O4 است زمانی که در معرض زلزله با سطح شدت پایین (حوزه دور) و O6 است زمانی که در معرض حرکات قوی و شدید (حوزه نزدیک) می‌باشد.
 - جابجایی ویژه مناسب (D) برای جداگرهای O4 برابر ۰/۳ متر و برای O6 بین ۰/۲ و ۰/۳ متر می‌باشد.
 - واکنش‌های لرزه‌ای سازه مجزا به عملکرد مطلوب برای O4 نزدیک است زمانی که دوره اولیه (T0) بیش از ۴ ثانیه است و برای O6 زمانی که بیش از ۲ ثانیه می‌باشد.
 - حداقل ضریب اصطکاک بیش از ۰/۰۵ برای جداگر O4 و بین ۰/۰۳۵ و ۰/۰۵ برای O6 دامنه بهینه برای این دو تابع است.
 - بهترین عملکرد لرزه‌ای جداگرهای VCFP بررسی شده در این پروژه، تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک به جداگرهای O6 تعلق دارد که دریفت درون طبقه‌ای را با کاهش شتاب سازه‌ای به طور مؤثر کاهش می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش تسای و همکاران (۲۰۰۳)، بیرامی و همکاران (۱۳۹۱)، باجلان و زندی (۱۳۹۳) و خدادادی و همکاران (۱۳۹۳) همخوانی دارد. تسای و همکاران دریافته‌اند که شعاع انحنای سیستم پاندولی اصطکاکی انحنای متغیر با افزایش جابجایی افزایش یافته است. بیرامی و همکاران نیز در پژوهش خود دریافته‌اند که وقتی مقداری جابه‌جایی در جداگر ایجاد می‌گردد، یک نیروی بازگرداننده به جداگر اعمال می‌شود. باجلان و زندی نیز دریافته‌اند که با به‌کارگیری جداگرهای لرزه‌ای می‌توان انتقال انرژی موجود در حرکات ارتعاشی زمین را به ساختمان محدود نمود. همچنین نصب سیستم‌های جداگر لرزه‌ی منجر به افزایش در زمان تناوب سازه می‌شود. خدادادی و همکاران نیز دریافته‌اند که سیستم جداسازی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان در حالت‌های منظم و نامنظم بهبود مناسبی دارد و مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌دهد.

پیشنهادات

استفاده از سیستم جداسازی و جداگر بر عملکرد لرزه‌ای سازه در حالت‌های منظم و نامنظم بهبود مناسبی داشته و مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش

- Mostaghel, N. & Tanbakuchi, J. 1983. Response of sliding structures to earthquake support motion. *Earthq. Eng. Struct. D.*, 11(6), 729-748.
- Shahbazi, P. & Taghikhany, T. 2017. Sensitivity analysis of variable curvature friction pendulum isolator under near-fault ground motions. *Smart structures and systems*, Vol. 20, No. 1, 23-33.
- Sinha, R. & Pranesh, M. 2000. FPS isolator for structural vibration control. *Proceeding of the Int. Conf. on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics*.
- Tsai, C.S., Chiang, T.C. & Chen, B.J. 2003. Finite element formulations and theoretical study for variable curvature friction pendulum system. *Eng. Struct.*, 25(14), 1719-1730.
- Tsai, C.S., Chiang, T.C. & Chen, B.J. 2004. Experimental study for multiple friction pendulum system. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Zayas, V. A.; Low, S.S.; & Mahin, S.A. 1990. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. *Earthq. Spectra*, 6(2), pp. 317-334.

Influence of Geometric Functions of Frictional Pendulum Isolator with Variable Curvature under near-field Earthquake

Mahtab Ferasat

Department of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

Abstract

Frictional pendulum systems are one of the most widely used isolation systems. Frictional isolators are of the common type of the conventional isolators. Among this group, the frictional pendulum isolator has an important situation. Due to the advent of these systems in recent years, no significant research has been carried out regarding the design and analysis of this type of isolator. Therefore, in this study, an attempt has been made to fully study the behavior of frictional pendulum seismic isolators by examining this separator with variable curvature under near-field earthquake. In order to evaluate the seismic behavior of frictional pendulum separators with variable curvature, firstly, different geometric functions were selected for the non-spherical slip surface and the relationships required for their dynamic analysis were obtained. Then, a numerical model was presented to analyze the time history of the structure isolated by these isolators and the behavior of frictional pendulum isolators with variable curvature was simulated using MATLAB software. The results of this simulation for the three isolators *including* fourth order function (O4), sixth order function (O6) and FPS indicated that the frictional pendulum isolators perform better than FPS isolators. When structures are exposed to earthquakes with low intensity level (far-filed), the most suitable function to improve the optimal performance of an isolated structure is fourth order function and when the structure is subjected to severe earthquakes (near-filed), the sixth order function will perform well.

Keywords: friction pendulum isolator, variable curvature, near-filed earthquakes