

بررسی تأثیر استفاده از کابل‌های پس‌تنیده CFRP در رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی فولادی با عملکرد گهواره‌ای

حسن امیرذهنی^۱، اباذر اصغری^{۲*}، عرفان شافعی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- استادیار مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- استادیار مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه

* a.sghari@uut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۷/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۰/۲۷]

چکیده

قاب‌های فولادی با عملکرد گهواره‌ای، نوع جدیدی از سیستم‌های باربر جانبی هستند که با هدف کاهش خرابی‌های سازه‌ای و ایجاد قابلیت تعمیر آسان و کم هزینه‌ی سازه‌ها پس از وقوع زمین‌لرزه‌های شدید، ایجاد شده‌اند و به سرعت در حال گسترش هستند. در قاب فولادی با عملکرد گهواره‌ای، پای ستون‌ها به پی متصل نشده و ستون‌ها می‌توانند آزادانه از روی پی بلند شوند. وظیفه بازگرداندن قاب دوران یافته به محل اولیه خود بر عهده کابل‌های پس‌تنیده‌ای است که قاب را به پی متصل می‌کنند. طراحی کابل‌ها و اعضای قاب مهاربندی شده به گونه‌ای است که حین وقوع زلزله در محدوده الاستیک باقی بمانند. انرژی لرزه‌ای وارد بر سازه توسط بروز تغییر شکل‌های پلاستیک در فیوزها در هر دوران قاب مستهلک خواهد شد. در این سیستم کابل‌های پس‌تنیده به عنوان کلیدی‌ترین اعضا در تأمین قابلیت خودمرکزی قاب شناخته می‌شوند و ایجاد کوچکترین تغییر شکل پلاستیک در آن‌ها پایداری کلی سیستم را به خطر خواهد انداخت. در این مقاله با جایگزینی مصالح از جنس الیاف پلیمری کربنی (CFRP) به جای فولاد در کابل‌های پس‌تنیده و انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، تأثیر این جایگزینی روی رفتار قاب و سایر اجزای سیستم، بررسی و مدل قابل اعتمادتری برای پایداری این نوع از سیستم‌های باربر جانبی ارائه شده است. در این پژوهش همچنین معلوم شد، جایگزینی کابل‌های CFRP با کابل‌های فولادی علاوه بر کنترل تغییر مکان جانبی قاب، مانع بروز شکست زود هنگام در فیوزها تحت زمین لرزه‌های شدید می‌شود و قابلیت اتلاف انرژی لرزه‌ای در سازه را نیز افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: سیستم گهواره‌ای، فیوز استهلاک انرژی، کابل پس‌تنیده، الیاف پلیمری کربنی، خودمرکزی.

۱- مقدمه

۱-۱ معرفی

تغییر شکل‌ها منجر به وارد شدن خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای قابل ملاحظه‌ای می‌شود. در بسیاری از موارد تعمیر این خرابی‌ها حتی در صورت امکان‌پذیر بودن، بسیار پرهزینه خواهد بود. استفاده از عملکرد گهواره‌ای در قاب‌های فولادی مجهز به فیوزهای استهلاک انرژی با هدف کاهش میزان

سیستم‌های باربر جانبی متداول، انرژی وارد شده به سازه تحت اثر وقوع زمین‌لرزه را از طریق متحمل شدن تغییر شکل‌های پلاستیک در اعضای کلیدی خود جذب می‌کنند که بروز این

لرزه‌ای وارد بر سازه را مستهلک خواهند کرد. مطابق شکل (۲) منحنی رفتار نیرو-تغییر مکان قاب مهاربندی‌شده با عملکرد گهواره‌ای، پرچمی شکل است. حلقه‌های این منحنی به علت جذب انرژی لرزه‌ای که توسط فیوز انجام می‌شود، ایجاد شده است و ناچیز بودن تغییر شکل پسماند نیز نتیجه بازگرداندن شدن قاب به محل اولیه خود به وسیله کابل است.

شکل ۲. رفتار نیرو-تغییر مکانی سیستم گهواره‌ای

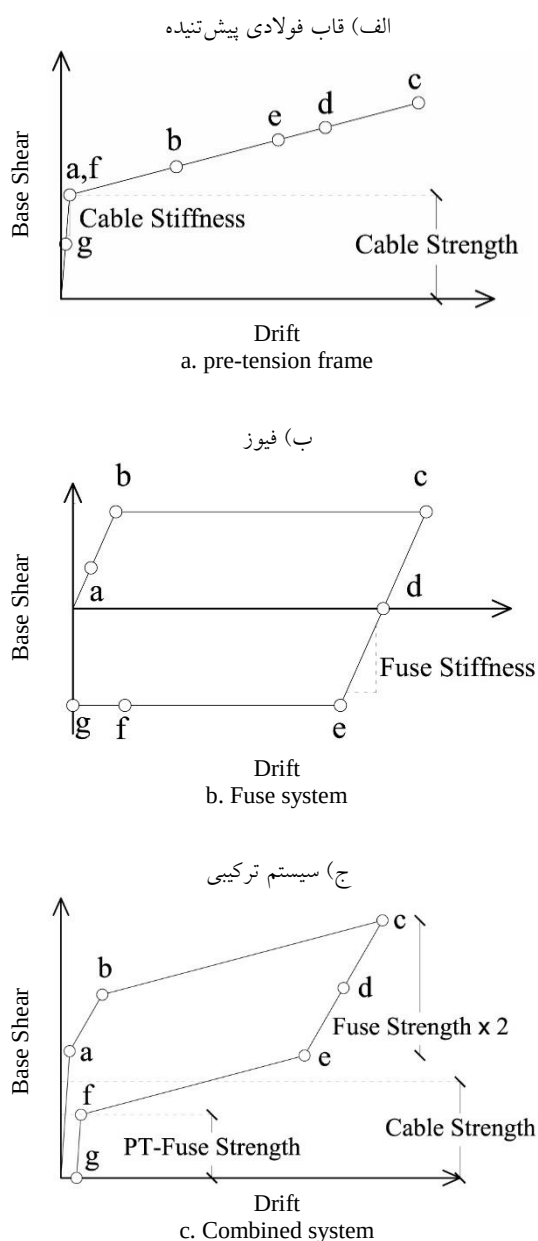


Fig. 2. Load-deflection behavior of rocking frame system [5]

خرابی‌های سازه‌ای و هدایت این خرابی‌ها به سمت اعضایی قابل تعویض و نیز کاهش تغییر شکل‌های جانبی ماندگار در سازه پس از وقوع زلزله‌های شدید مورد توجه قرار گرفته و به سرعت در حال گسترش است. مطابق شکل (۱)، یک قاب فولادی مهاربندی‌شده با عملکرد گهواره‌ای شامل سه جزء اصلی است: (۱) قاب مهاربندی‌شده فولادی که در پایه‌های خود به پی متصل نمی‌شود و تحت بارگذاری‌های جانبی قادر است آزادانه روی پی دوران کند. (۲) کابل‌های پس‌تینده، که قاب را به پی متصل می‌کنند و وظیفه بازگرداندن سازه به مکان اولیه خود را بعد از هر دوران بر عهده دارند. و (۳) فیوزهای استهلاک انرژی که انرژی لرزه‌ای وارد شده به سازه را از طریق متحمل شدن تغییر شکل‌های پلاستیک جذب می‌کنند.

شکل ۱. شمای کلی سیستم قاب مهاربندی با عملکرد گهواره‌ای

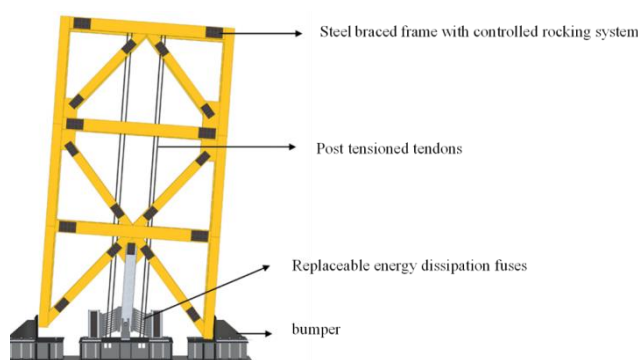


Fig. 1. Schematic of steel braced frame with rocking system

برخلاف فیوز که عضو کنترل‌شونده توسط تغییر شکل است و با تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک، انرژی لرزه‌ای را جذب می‌کند، اعضای قاب مهاربندی‌شده و همچنین رشته‌های پس‌تینده فولادی، باید به گونه‌ای طراحی شوند که حین وقوع زلزله در محدوده الاستیک باقی بمانند. در واقع در این نوع از سیستم‌ها تمامی اعضای قاب مهاربندی شامل تیرها، ستون‌ها و بادبندها و همچنین کابل‌های پس‌تینده اعضای کنترل‌شونده به وسیله نیرو محسوب می‌شوند و وظیفه تأمین سه معیار مقاومت، سختی و پایداری سازه را بر عهده دارند. در مقابل، فیوزهای جایگزین‌پذیر به عنوان اعضای کنترل‌شونده به وسیله تغییر شکل در نظر گرفته می‌شوند که در هر دوران قاب انرژی

۱-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار قاب‌های با عملکرد گهواره‌ای، تاکنون پژوهش‌های آزمایشی در قالب سه برنامه آزمایشگاهی به همراه مدل‌سازی کامپیوتری این آزمایش‌ها طراحی و انجام شده است (شکل ۳). در دانشگاه استنفورد آمریکا^۱، الگوهای مختلفی از صفحات فولادی تحت عنوان فیوز، طراحی آزمایش شد و در نهایت صفحات با الگوی پروانه‌ای شکل به علت شکل‌پذیری بالاتر و قابلیت جذب انرژی بیشتر در کنار متحمل شدن آسیب‌های کمتر، به عنوان المان‌های مناسب برای جذب انرژی در سیستم با عملکرد گهواره‌ای معرفی شدند [1].

برای بررسی رفتار قاب با عملکرد گهواره‌ای، آزمایش بارگذاری چرخه‌ای در دانشگاه ایلینویز آمریکا^۲ انجام گرفت. این آزمایش شامل ۹ نمونه قاب فولادی سه طبقه با مقیاس یک‌دوم می‌شد که هر کدام در المان فیوز، میزان پس‌تندگی کابل‌ها و تاریخچه بارگذاری، با هم تفاوت داشتند تا اثر این متغیرها روی رفتار سیستم بررسی شود. جزئیات کامل این آزمایش به وسیله Eatherton و Hajjar گزارش شده است [2]. نتایج این آزمایش نشان داد که حتی به ازای بارگذاری ۱/۲ برابر زلزله کوبه^۳ که ۲/۶ برابر زلزله سطح DBE^۴ و ۱/۷۴ برابر زلزله سطح MCE^۵ است، تغییر مکان جانبی نسبی قاب ۲/۵٪ و تغییر مکان ماندگار سازه نزدیک به صفر است. همچنین، میزان خرابی ایجاد شده در فیوز و افت سطح پس‌تندگی کابل‌ها بسیار ناچیز است [3].

به منظور بررسی رفتار دینامیکی و مطالعه امکان اجرایی بودن سیستم، آزمایش میز لرزه روی قاب با عملکرد گهواره‌ای، روی دستگاه میز لرزه E-Defense در شهر Miki ژاپن انجام گرفت [4]. این پروژه آزمایشگاهی شامل یک قاب فولادی سه طبقه با مقیاس دوسوم، با سه نوع فیوز

متفاوت بود که تحت دو شتابنگاشت JMA Kobe و Northridg، با مقیاس‌های متفاوت قرار گرفت. در این آزمایش، برای شبیه‌سازی بهتر اثر جرم لرزه‌ای سایر دهانه‌های ساختمان روی قاب مهاربندی، از یک دستگاه شبیه‌ساز جرم استفاده شد که نیروی زلزله از طریق اهرم‌های این دستگاه و در تراز هر طبقه به قاب مهاربندی شده وارد شد.

شکل ۳. مطالعات پیشین در زمینه سیستم‌های فولادی گهواره‌ای

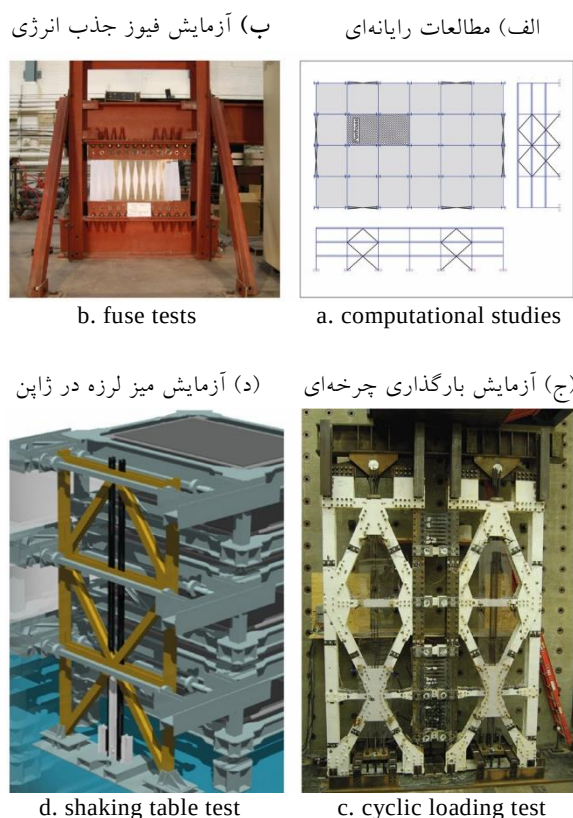


Fig. 3. Graphical depiction of steel rocking frame project phases [2]

تاریخچه جابه‌جایی (شکل ۴-الف) نسبی نقطه بام (Roof Drift Ratio, RDR) و میزان بلندشدگی پای ستون (Uplift Ratio, ULR) را برای یکی از نمونه‌های آزمایش شده نشان می‌دهد. هماهنگی مقادیر این دو پاسخ با هم، بیانگر وقوع دوران صلب در قاب است. بیشترین میزان تغییر مکان نسبی نقطه بام، RDR، ۲/۴٪ به ازای ۶۵٪ زلزله کوبه بود. اگرچه این مقدار برای سازه‌های متداول می‌تواند

1 Stanford University

2 University of Illinois at Urbana-Champaign

3 Kobe-Japan

۴ زلزله با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال

۵ زلزله با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال

ناپایداری خواهد شد. این مقاله قصد دارد با جایگزینی مصالح از جنس الیاف پلیمری کربنی، CFRP، که تنش تسلیم بالاتری نسبت به فولاد (۱/۶ برابر) دارند [6]، با مصالح فولاد در کابل‌های پس‌تینده، احتمال ورود کابل به ناحیه غیرالاستیک تحت اثر زلزله‌های شدید را کاهش داده و ضریب اطمینان در برابر واژگونی سازه را افزایش دهد. همچنین، تأثیر این جایگزینی روی پاسخ رفتاری اعضای کلیدی سیستم، شامل قاب مهاربندی‌شده، فیوز و کابل‌های پس‌تینده بررسی خواهد شد.

۲- مدل‌سازی رایانه‌ای

۲-۱- معرفی مدل درستی آزمایشی

با هدف بررسی بیشتر رفتار قاب‌های فولادی با عملکرد گهواره‌ای و همچنین بررسی تأثیر تغییر جنس مصالح کابل‌ها از فولاد به الیاف پلیمری کربنی (CFRP)، یک مدل دو بُعدی از سازه در نرم‌افزار OpenSees^۱ ساخته شد و مورد درستی آزمایشی قرار گرفت. مشخصات این مدل مشابه نمونه A1J5 در آزمایش میزلرزه E-Defense است که مربوط به قاب مهاربندی مجهز به فیوز نوع A است [5] که تحت ۶۵٪ شتابنگاشت کوبه قرار گرفته است. پارامترهای کلیدی مدل ساخته شده در نرم‌افزار نشان داده شده است (شکل ۵). برای ایجاد امکان بلندشدن ستون‌ها و دوران آزادانه قاب از فنرهای با طول صفر^۲ و مصالحی که تنها دارای سختی فشاری هستند استفاده شده است. کابل‌ها و فیوزها نیز با المان‌های خربایی^۳ و مصالح فولاد^۴، به ترتیب با اختصاص رفتار تنش-کرنش و نیرو-تغییر مکان ساخته شده‌اند. دستگاه شبیه‌ساز جرم در آزمایش میزلرزه نیز با یک ستون معادل پای‌مفصلی مدل شده و جرم لرزه‌ای وارد بر سازه به شکل جرم‌های متمرکز در تراز طبقات بر روی این ستون قرار داده شده است.

منجر به وقوع آسیب‌های سازه‌ای شود اما در قاب با عملکرد گهواره‌ای به علت وقوع دوران صلب، مشکلی ایجاد نخواهد شد [5]. نمودار لنگر واژگونی قاب بررسی شده در شکل (۴-ب) نشان داده شده است که رفتار پرچمی شکل قاب با عملکرد گهواره‌ای را به خوبی نشان می‌دهد.

شکل ۴. منحنی‌های رفتاری نمونه آزمایش شده تحت ۶۵٪ کوبه

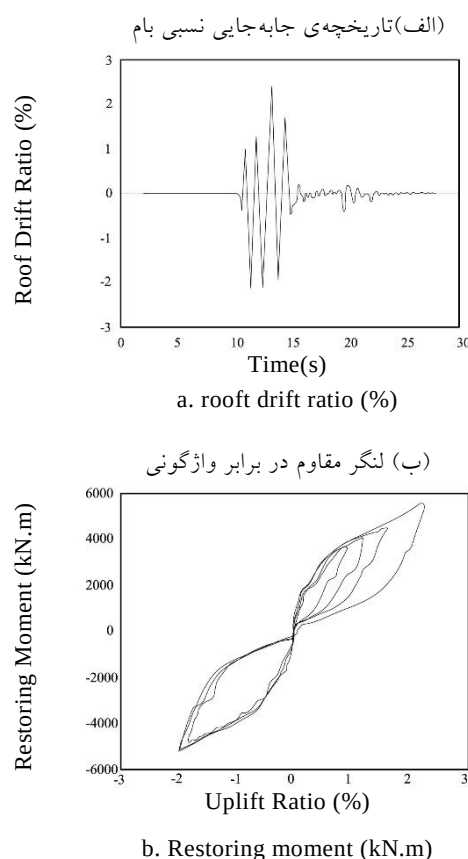


Fig. 4. Experimental results for specimen under 65% JMA-Kobe [5]

عملکرد مطلوب سیستم با عملکرد گهواره‌ای در جذب انرژی لرزه‌ای، در کنار تغییر مکان ماندگار ناچیز، تا زمانی تأمین می‌شود که کابل‌های پس‌کشیده در ناحیه الاستیک باقی بمانند. در صورت ورود کابل‌ها به ناحیه پلاستیک عملاً قابلیت خودمرکزی در سازه از بین می‌رود و پایداری سازه به خطر می‌افتد. بنابراین، افزایش تنش تسلیم در مصالح به کار رفته برای کابل‌ها منجر به ایمن‌تر شدن سازه در برابر

1 Open System for Earthquake Engineering Simulation
2 zeroLength element
3 truss element
4 Steel01 material

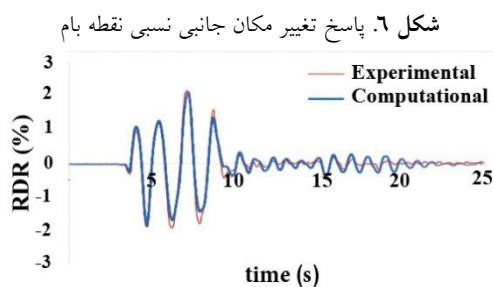


Fig. 6. RDR response history

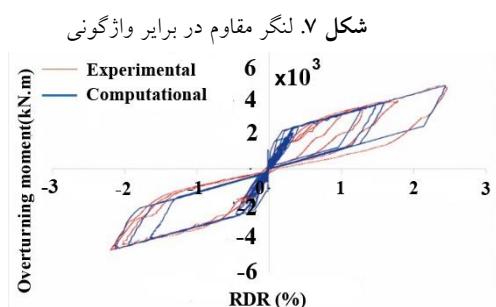


Fig. 7. Resisting moment response history [9]

جدول ۱ مقادیر خطاهای مدل‌سازی را به ازای سایر پاسخ‌های کلیدی سیستم نشان می‌دهد. مطابق این جدول مقدار بیشترین خطای مدل‌سازی، ۶/۲٪ است که مربوط به بیشینه نیروی ایجاد شده در کابل می‌شود.

جدول ۱. میزان خطای مدل‌سازی

parameter	shaking table test results	Model results	difference	Error (%)
Max PT force (kN)	223.5	219	-14.5	-6.2
Fuse residual force (kN)	569	569	-24.2	-4.2
Max RDR (%)	2.41	2.41	-0.04	-1.6
Max ULR (%)	2.26	2.26	-0.06	-2.65

Table 1. Error percentage of computational model

۲-۳- معرفی مدل‌ها

به منظور بررسی تأثیر جایگزینی کابل‌های CFRP با کابل‌های فولادی، در پاسخ پارامترهای کلیدی سیستم با عملکرد گهواره‌ای، شش نمونه مدل رایانه‌ای، شامل دو قاب، یکی مجهز به کابل‌های فولادی و دیگری مجهز به کابل‌های CFRP مدل‌سازی شد و هر قاب تحت شتابنگاشت کوبه با سه

شکل ۵ شمای مدل ساخته شده در نرم‌افزار OpenSees

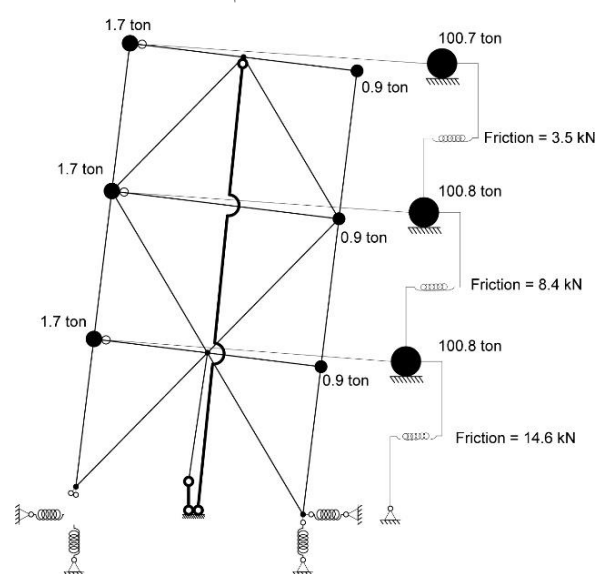
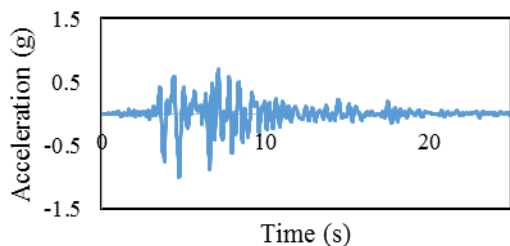


Fig. 5. Scheme of OpenSees model

اصطکاک ایجاد شده بین طبقات دستگاه شبیه‌ساز جرم نیز با فنرهای با طول صفر مدل شده‌اند که سختی این فنرها از نتایج آزمایش میز لرزه برداشت شده است. جرم مربوط به اجزای خود قاب و اتصالات آن نیز بین گره‌های قاب توزیع شده است. هر نقطه توپر روی شکل، معرف اتصالی با درجات آزادی دورانی و انتقالی (اتصال صلب) و هر نقطه توخالی، معرف اتصالی تنها با درجات آزادی انتقالی (اتصال مفصلی) است. برای مدل، میرایی رایلی ۵/۰٪ در نظر گرفته شده که این مقدار بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل‌های Takeuchi [8] برداشت شده است.

۲-۲- درستی آزمایشی مدل

تاریخچه پاسخ تغییر مکان جانبی نسبی نقطه بام، RDR، برای آزمایش میز لرزه و برای مدل رایانه‌ای، در (شکل ۶) نشان داده شده است. بیشینه جابه‌جایی نسبی ثبت شده در آزمایش میز لرزه، ۲/۴۱٪ و در مدل رایانه‌ای، ۲/۳۷٪ است که بیانگر خطای قابل قبول ۱/۶٪ است. نمودار لنگر مقاوم در برابر واژگونی را شکل (۷) برای نمونه آزمایش‌شده و نمونه مدل‌سازی شده نشان می‌دهد



c. 1.2 JMA Kobe

Fig. 8. JMA Kobe ground motion record

شکل ۹. منحنی تنش-کرنش مصالح فولاد و CFRP

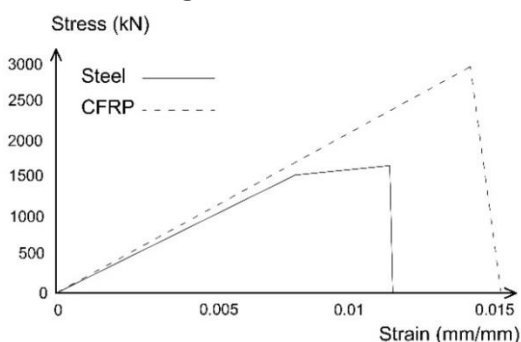


Fig. 9. Steel and CFRP material

جدول ۲ مشخصات مدلها

specimen	code	material	ground motion intensity
1	S69	steel	0.69 Kobe
2	S100	steel	1 Kobe
3	S120	steel	1.2 Kobe
4	C69	CFRP	0.69 Kobe
5	C100	CFRP	1 Kobe
6	C120	CFRP	1.2 Kobe

Table.2. models specifications

شکل ۱۰. پارامترهای کلیدی ارزیابی پاسخ سیستم

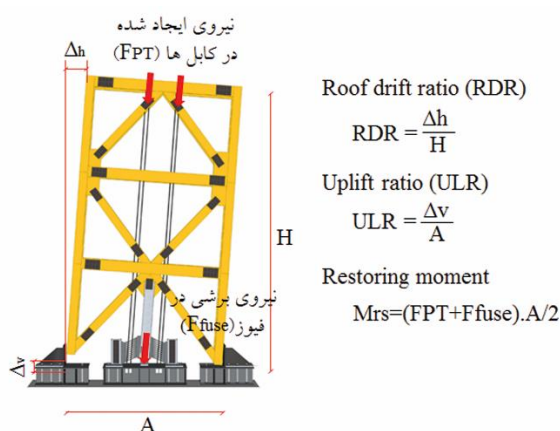
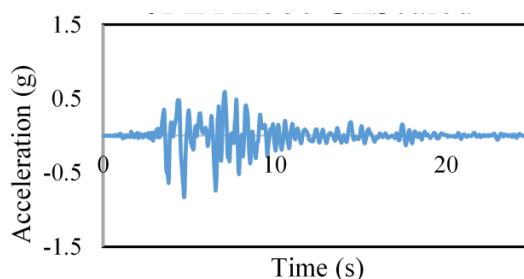


Fig.10. Key response parameters of rocking system

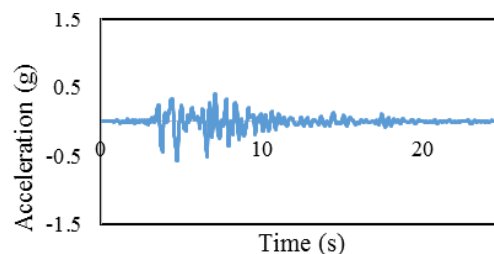
مقیاس ۰.۶۹٪، ۱.۰۰٪ و ۱.۲۰٪ که به ترتیب متناظر با زلزله سطح^۱ MCE، ۱/۴۵ MCE و ۱/۷۴ MCE است، قرار گرفت. شتابنگاشت کوبه با سه مقیاس مذکور نشان داده شده است (شکل ۸).

مشخصات هندسی هر شش نمونه کاملاً مشابه است و شامل یک قاب سه طبقه با طول دهانه ۶ متر و ارتفاع هر طبقه، ۴ متر می‌شود. (جدول ۲) جزئیات این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در مدل‌سازی کابل‌های پس‌تنیده در هر دو حالت از ماده فولاد ۲۰۱ با رفتار تنش-کرنش مطابق شکل (۹) استفاده شده است. اعمال پس‌تندگی از طریق تعریف کرنش اولیه، توسط مصالح کرنش اولیه^۳ و حد گسیختگی برای هر دو مصالح با استفاده از مصالح MinMax^۴ تعریف شده است. با توجه به رویکرد این پژوهش که فقط بررسی اثر تغییر مصالح کابل‌ها از فولاد به CFRP روی رفتار سازه است، مشخصات مدل‌سازی فیوز برای هر شش نمونه یکسان در نظر گرفته شده است. پارامترهای کلیدی ارزیابی پاسخ سیستم، معرفی شده‌اند (شکل ۱۰).

شکل ۸. شتابنگاشت کوبه



a. 0.69 JMA Kobe



b. 1 JMA Kobe

۱ زلزله با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال

- 2 Steel01 Material - OpenSees
- 3 InitStrain Material - OpenSees
- 4 MinMax Material - OpenSees

۳- نتایج

۳-۱- بررسی پاسخ‌های کابل‌ها و فیوز

با توجه به برابری تقریبی سختی اولیه مصالح فولاد و مصالح CFRP، نیروهای ایجاد شده در کابل‌ها، تا زمانی که در محدوده الاستیک باشند، با هم برابر خواهد بود. همچنین، با توجه به یکسان بودن مشخصات سایر اجزای سیستم، می‌توان نتیجه گرفت تا زمانی که هیچ یک از دو کابل وارد محدوده غیرخطی نشده‌اند، پاسخ تمام پارامترهای رفتاری هر دو قاب، تحت یک شتاب‌نگاشت مشخص یکسان خواهد بود.

شکل ۱۲. تاریخچه پاسخ نیروی کابل و نیروی فیوز

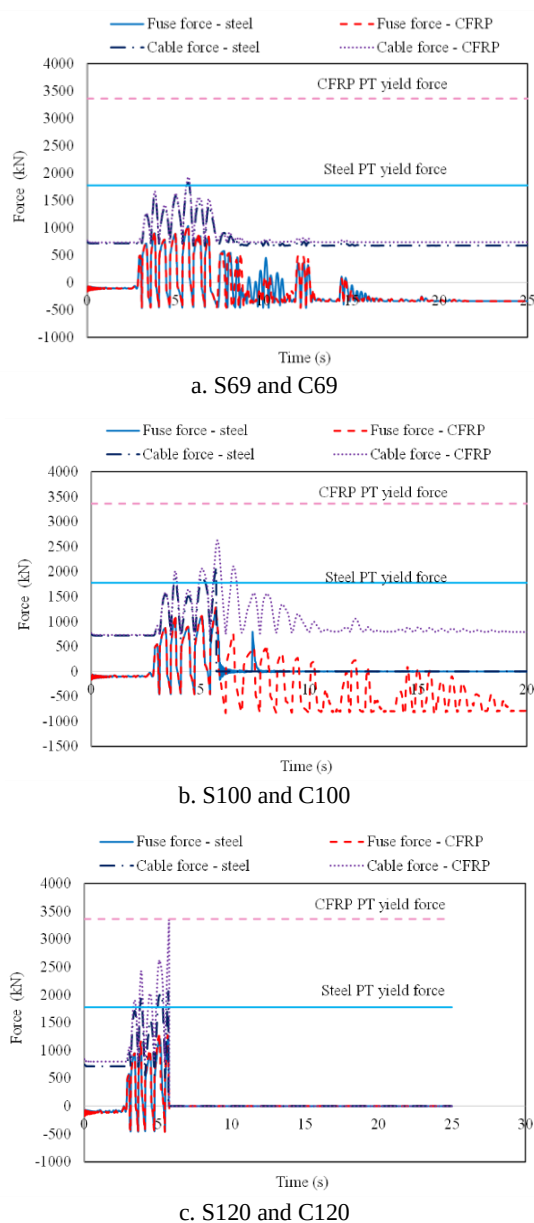


Fig. 12. Fuse and PT force response history

(شکل ۱۱) پاسخ نیروهای ایجاد شده در کابل، تحت مقیاس‌های مختلف شتاب‌نگاشت کوبه، برای هر دو قاب را نشان می‌دهد. مطابق این شکل کابل‌های فولادی تحت هر سه مقیاس بارگذاری، وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند. میزان تغییر شکل‌های پلاستیک در نمونه S69 بسیار ناچیز است ولی در نمونه‌های S100 و S120 این تغییر شکل‌ها موجب گسیختگی کابل شده‌اند. این در حالی است که کابل‌های CFRP تنها در نمونه C120 که تحت بارگذاری ۱/۲ برابر شتاب‌نگاشت کوبه قرار دارد، از ناحیه خطی خارج شده‌اند.

شکل ۱۱ نمودار نیرو کرنش کابل‌ها

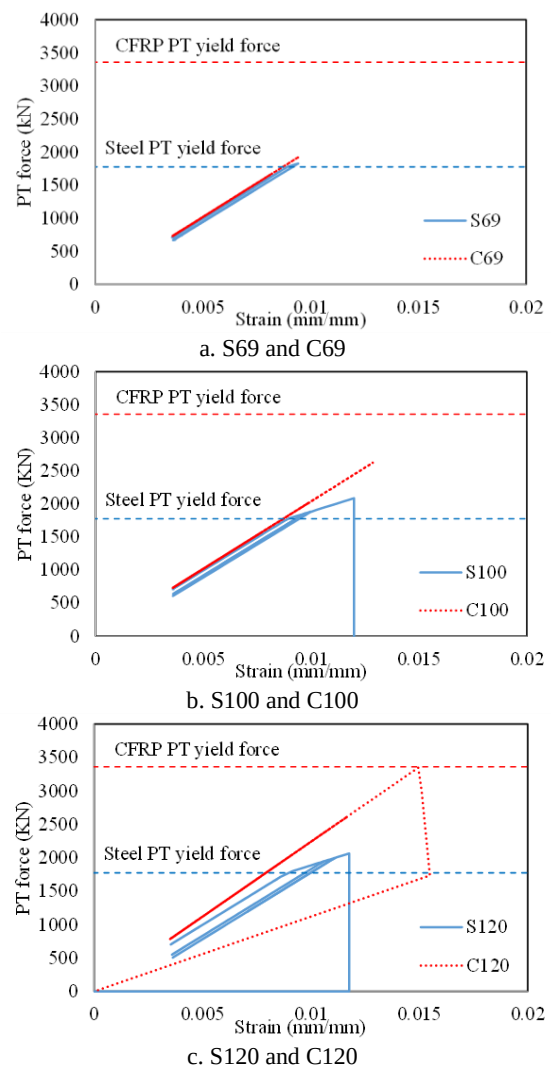


Fig. 11. Fuse strain-force

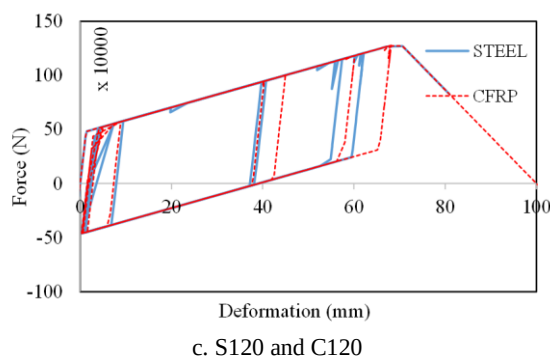


Fig. 13. Fuse force-deformation

تأثیر تسلیم کابل‌ها روی عملکرد استهلاک انرژی فیوز، نشان داده شده است (شکل ۱۳). بروز تسلیم در کابل، عملکرد فیوز را از دو جهت تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ نخست این که با تسلیم کابل، عملاً سازه قابلیت خودمرکزی خود را از دست می‌دهد و چرخه‌های رفت و برگشت دوران قاب که باعث ایجاد تغییرشکل برشی در فیوز و در نتیجه استهلاک انرژی می‌شوند، متوقف می‌شود. از سوی دیگر، کاهش سختی کابل، باعث افزایش نیروی برشی در فیوز به مقدار فراتر از حد گسیختگی آن می‌شود که شکست فیوز را در پی دارد.

۲-۳- بررسی پاسخ‌های قاب مهاربندی شده

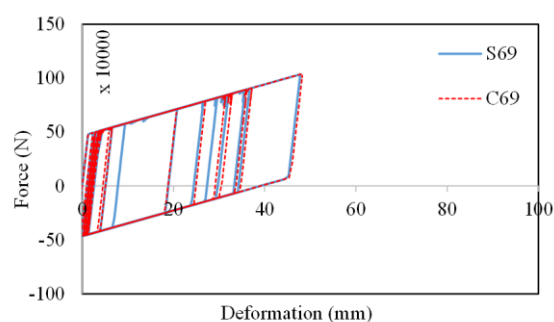
نمودار تاریخچه جابه‌جایی نسبی بام برای تمام نمونه‌ها، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تا پیش از وقوع تسلیم در کابل‌ها، پاسخ تغییر مکانی هر دو قاب بر هم منطبق است. این هماهنگی به ویژه در دو نمونه، S69 و C69 به خوبی قابل ملاحظه است.

در نمونه‌های S100، S120، C120، تسلیم کابل‌ها به عنوان کلیدی‌ترین عضو کنترل‌کننده پایداری موجب ناپایداری سازه شده است. همچنین، مطابق شکل (۱۴-ب) در نمونه C100 با وجود وقوع تغییر مکان‌های جانبی بیش از حد مجاز آیین‌نامه فولاد آمریکا^۱ (۳٪)، سیستم قابلیت خودمرکزی خود را حفظ کرده و دچار ناپایداری نشده است. این عملکرد همچنین باعث ادامه روند تشکیل حلقه‌های جذب انرژی در فیوز شده است که در شکل (۱۳-ب) ملاحظه شد. تغییر مکان

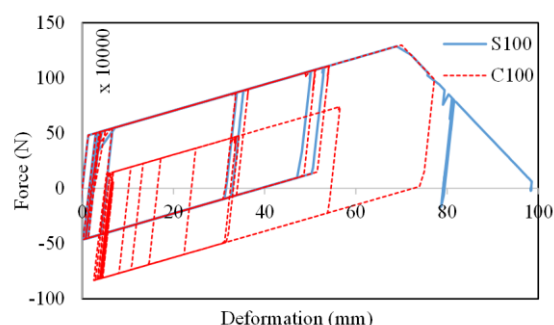
شکل ۱۲ پاسخ نیروهای ایجاد شده در کابل و فیوز را برای هر شش نمونه مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. مطابق این شکل، کابل‌های فولادی تحت اثر هر سه مقیاس بارگذاری، وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند. البته تغییر شکل پلاستیک رخ داده در نمونه S69 بسیار ناچیز بوده و مشکلی در پایداری سازه ایجاد نکرده است. این حالت، بیانگر عملکرد بسیار مطلوب سیستم‌های گهواره‌ای حتی به ازای زمین‌لرزه‌های سطح MCE می‌باشد. کابل‌های CFRP تحت بارگذاری‌های ۶۹٪ و ۱۰۰٪ کوبه الاستیک باقی مانده‌اند و تنها در نمونه C120 شاهد خروج کابل از ناحیه خطی هستیم.

در نمونه‌های S100 و S120 و C120، خارج شدن کابل از ناحیه خطی، باعث کاهش سختی کابل و در نتیجه کاهش سهم باربری آن شده که این امر موجب تحمیل نیروی اضافی به فیوز شده و در آخر باعث شکست فیوزها در هر سه نمونه شده است. در واقع باقی ماندن کابل در ناحیه الاستیک علاوه بر حفظ پایداری کلی سیستم، مانع از تحمیل تغییرشکل‌های برشی بزرگ در فیوزها و گسیختگی آن‌ها می‌شود. تأثیر تسلیم کابل‌ها روی عملکرد نیرویی فیوزها قابل مشاهده است (شکل ۱۲).

شکل ۱۳ نمودار بار-تغییر مکان فیوز



a. S69 and C69



b. S100 and C100

و C120، تسلیم کابل که با کاهش سختی آن همراه است، موجب کاهش سختی سازه و در نتیجه افزایش پاسخ‌های تغییر مکانی قاب شده و باعث تمایل سازه به ایجاد حلقه‌های استهلاک انرژی چاق‌تر می‌شود. این عملکرد در واقع به دلیل افزایش تغییر شکل‌های برشی تحمیل شده به فیوز در اثر افزایش تغییر مکان قاب است که افزایش میزان جذب انرژی در این المان را در پی دارد.

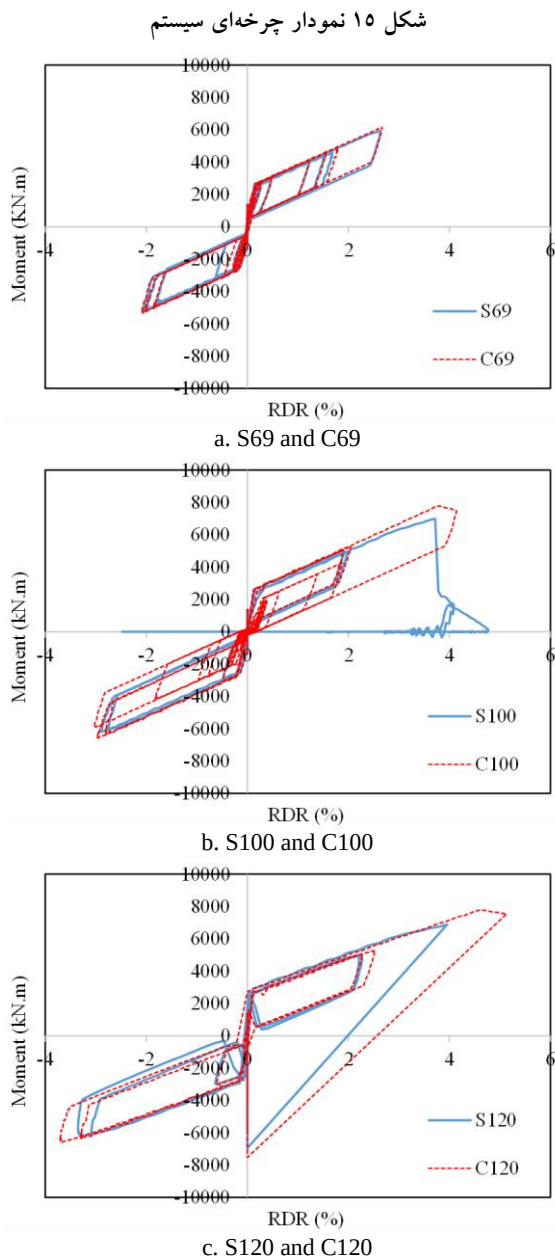


Fig. 15. System hysteresis

با توجه به این که فیوز، انرژی لرزه‌ای را از طریق متحمل شدن تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در اثر دوران‌های رفت و

جانبی پسماند در انتهای بارگذاری برای این نمونه نیز ناچیز است. (۰/۵٪) است.

شکل ۱۴. تاریخچه تغییر مکان جانبی نسبی بام

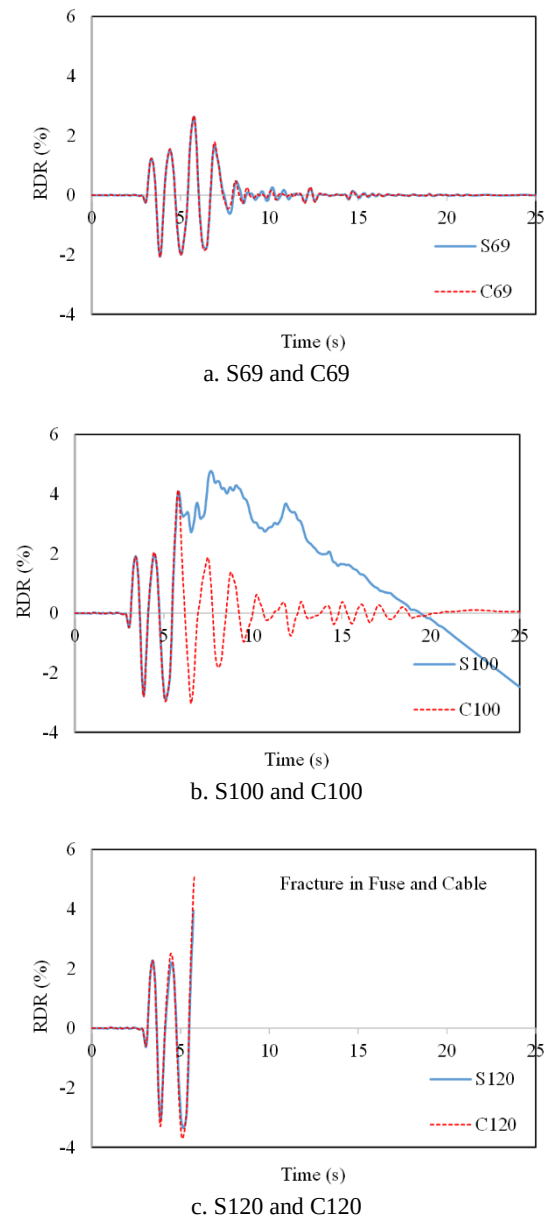


Fig. 14. RDR response history

شکل (۱۵) نمودار لنگر مقاوم سازه در برابر واژگونی را نشان می‌دهد. این لنگر برآیند لنگر ایجاد شده توسط نیروی محوری کششی موجود در کابل، لنگر ایجاد شده در اثر نیروی برشی موجود در فیوز و لنگر مقاوم ناشی از وزن اجزای قاب مهاربندی است. مطابق شکل (۱۵-ب و ۱۵-ج)، در نمونه‌های S120، S100،

حلقه‌های کامل پرچمی شکل در نمودار نیرو-تغییر مکان سیستم می‌شود. الاستیک باقی ماندن کابل‌های CFRP همچنین، با محدود نگاه داشتن میزان دوران قاب، از تحمیل تغییر شکل‌های برشی فراتر از ظرفیت فیوز جلوگیری کرده و مانع بروز شکست در این المان می‌شود.

برگشتی قاب جذب می‌کند، عدم توانایی سازه در خودمرکزی، مانع از تشکیل حلقه‌های کامل استهلاک انرژی در فیوز می‌شود و در نهایت به علت تحمیل تغییر شکل‌های فراتر از حد گسیختگی به فیوز، این المان دچار گسیختگی می‌شود و تشکیل حلقه‌های رفتاری در سیستم، عملاً متوقف می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار قاب‌های مهاربندی با عملکرد گهواره‌ای در دو حالت مجهز به کابل‌های فولادی و مجهز به کابل‌های CFRP، از طریق انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخیچه زمانی بررسی شد و تأثیر استفاده از کابل‌های CFRP بر پاسخ پارامترهای کلیدی سیستم، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم مجهز به کابل‌های فولادی تحت شتابنگاشت کوبه با مقیاس ۰.۶۹٪، کابل‌ها در محدوده خطی باقی می‌مانند و پایداری سازه تأمین می‌شود که این رفتار بیانگر عملکرد بسیار مطلوب سیستم‌های گهواره‌ای حتی به ازای بارگذاری‌های در سطح MCE است. این عملکرد مطلوب البته تا جایی ادامه می‌یابد که کابل‌های فولادی وارد ناحیه غیرخطی نشوند و بروز کوچکترین تغییر شکل پلاستیک در این اعضا در اثر افزایش شدت زلزله، قابلیت خودمرکزی سیستم را تحت تأثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر می‌اندازد.

جایگزینی کابل‌های CFRP به جای کابل‌های فولادی باعث تداوم پایداری و حفظ قابلیت خودمرکزی سیستم حتی به ازای بارگذاری شتابنگاشت کوبه با شدت ۰.۴۵٪ بیشتر از سطح MCE می‌شود که گامی مثبت برای ارتقای رفتار لرزه‌ای این نوع از سیستم‌های باربر جانبی محسوب می‌شود. همچنین، در این شدت از بارگذاری، کابل‌های CFRP، بر خلاف کابل‌های فولادی هنوز در محدوده الاستیک هستند و تغییر مکان جانبی ماندگار در قاب مجهز به کابل CFRP، برخلاف قاب مجهز به کابل فولادی، نزدیک به صفر است. قابلیت‌های جذب انرژی و خودمرکزی در سیستم برای قاب مجهز به کابل CFRP حتی در بارگذاری‌های با شدت ۱/۴۵ برابر زلزله سطح MCE نیز، تا انتهای مسیر بارگذاری تأمین شده و باعث تشکیل

۵- مراجع

References

- [1] Ma, X., Borchers, E., Pena, A., Krawinkler, H., and Deierlein, G. 2010 Design and behavior of steel shear plates with openings as energy dissipating fuses. Blume Earthquake Engineering Center, TR 173, Stanford Univ., Stanford, CA.
- [2] Eatherton, M. R., and Hajjar, J. F. 2010 Large-Scale cyclic and hybrid simulation testing and development of a controlled-rocking steel building system with replaceable fuses. Rep. No. NSEL-025, Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- [3] Eatherton, M. R., Ma, X., Krawinkler, H., Deierlein, G. G., and Hajjar, J. F. 2014 Quasi-static cyclic behavior of controlled rocking steel frames. J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001005, 04014083.
- [4] Ma, X., Krawinkler, H., and Deierlein, G. G. 2011 Seismic design and behavior of self-centering braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses. Rep. No. 174, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., Stanford, CA.
- [5] Ma, X., Deirlein, G.G., Eatherton, M.R., Krawinkler, H., Hajjar, J.F., Takeuchi, T., Kasai, K., Midorikawa, M., Hikino, T. 2010 Large-scale shaking table test of steel braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses. 9th US National and 10th Canadian Conf. on Earthquake Engineering, Toronto, Ontario, Canada. Paper No 1248.
- [6] Katsumata, H., Kobatake, Y., Takeda, T. 1998 A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns. 9th World Conf. on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, No12-4-20.
- [7] OpenSeesWebSite, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [8] Takeuchi, T., et al. 2008 Shaking Table Test Using Multipurpose Test Bed. Proceedings of 14WCEE, B
- [9] Amirzehni H. 2016 Seismic Response Evaluation of Steel Braced Frames with Controlled Rocking and Energy Dissipaters. Msc thesis, urmia university of technology (in Persian)

Seismic Evaluation of Rocking Steel Braced Systems with CFRP Post-Tensioned Cables

H. Amirzehni¹, A. Asghari^{2*}, E. Shafei²

1- M.Sc., Science, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

2- Assoc. Prof., Urmia University of Technology, Urmia, Iran

*a.asghari@uut.ac.ir

Abstract:

Conventional lateral force resisting systems dissipate seismic energy through plastic deformations in primary structural members that results in significant damage to buildings. In most cases, repairing these damaged members is impossible or is not economical from structural viewpoint. Recent research works try to localize the induced damage in specific elements (as fuse, dampers etc.) without plasticization of primary load-carrying elements to ensure the stability of structure. In steel structures, self-centering rocking braced system is an innovative type of seismic lateral force resisting systems that is developed to minimize structural damages and residual drifts and to enable repairing or replacing the damaged elements. Steel braced frame with controlled rocking system consists of three primary components: (1) steel braced frame with rigid joints and no connections to base foundation at the column bases that is free to rock cyclically during excitation; (2) post tensioning cables which are connected to the frame top and foundation base in order to provide retreat back or self-centering capability of the system; and (3) replaceable energy dissipating elements that act as structural fuses which absorb seismic energy through undergoing of inelastic deformations and provide the required ductility of the system prior to instability or collapse. In this type of lateral force resisting systems, the post tensioned cables and the members of the braced frame are designed to remain elastic during excitation and provide high stiffness, strength and global stability of the structure with minor local deformations. In this design concept, post tensioned strands play an important role in restoration of quake-imposed displacement into its initial position. They are the key members known in providing self-centering capability of the system and occurrence of any plastic deformation in these elements endangers overall stability of system. Probable exceeding of seismic force may result in yield of post-tensioned cables and consequent elimination of restoring functionality of self-centering mechanism. In current research work, the steel material is replaced by carbon fiber reinforced plastic (CFRP) fabric in post tensioning strands, and the consequent effects of proposed substitution is investigated on the behavior of braced frame and linked structural components. The research was conducted on two steel braced frames with controlled rocking system equipped with steel and CFRP cables and the models are analyzed using nonlinear dynamic time history analysis (NLTHA) procedure. The frames are subjected to JMA-Kobe ground motion record, which is scaled to 69%, 100% and 120% intensity groups corresponding to unit, 1.45 and 1.74 times of maximum considered earthquake (MCE) ground motion level. Derived results show that using CFRP post tensioned cable instead of steel cables, can protect the system against instability even under 100% Kobe ground motion record scale and leads to a more reliable type of controlled rocking systems. This study also revealed that keeping the CFRP cable on elastic region not only controls the frame lateral displacement, but also prevents early failure in fuses under severe earthquakes and ensures the seismic energy dissipating capability of the structure.

Keywords: Self-Centering System, Post-Tensioned Cable, Energy Dissipating Fuse, CFRP, Controlled Rocking System.