

تأثیر مقاومت باقیمانده بر رفتار مستهلک کننده انرژی در قاب فولادی مهاربندی با سیستم خسارت کم

الهه تاجیک

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه-دانشکده عمران- دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
e.tajik.h@gmail.com

عبدالرضا سروق مقدم

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
moghadam@iiees.ac.ir

کلیدواژه‌ها: سیستم مقاوم جانبی، فیوز، تاندون پس کشیده، تغییر شکل الاستیک، مقاومت باقیمانده

چکیده

تجاری که از زلزله‌های گذشته در سرتاسر جهان بدست آمده است، نیاز به طراحی و اجرای سازه‌هایی با آسیب‌پذیری و خسارت کمتر و تعمیر آسان تر بعد از یک زلزله بزرگ را گوشزد می‌کند. در طول یک زلزله بزرگ سیستم‌های مقاوم جانبی لرزه‌ای سنتی، خسارات جدی را در سیستم سازه‌ای می‌توانند تحمیل کنند و جابه‌جایی‌های نسبی باقی‌مانده در سازه، تعمیر سازه را بعد از زلزله بسیار سخت و غیراقتصادی می‌کند. لذا در سال‌های اخیر استفاده از این نوع سیستم سازه‌ای، که به سیستم با خسارت کم معروف است، ترویج یافته است. این سیستم‌ها شامل قاب با جابه‌جایی کنترل شده، فیوزهای سازه‌ای قابل جایگزین جهت تامین ایمنی کافی در برابر زلزله (مستهلک کننده انرژی) و تاندون‌های پس کشیده ی عمودی جهت بازگشت سازه به حالت اول خود، می‌باشد. پارامترهای مختلفی بر رفتار فیوز و متعاقباً بر رفتار قاب تاثیرگذار هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به پارامتر مقاومت باقی مانده اشاره کرد. هدف از ارائه ی این مقاله بررسی رفتار فیوزها در قاب فولادی با سیستم خسارت کم و تاثیری که تغییرات مقاومت باقیمانده بر آن می‌گذارد، می‌باشد.

مقدمه

طراحی، مدل‌سازی و اجرای سازه‌هایی با این ویژگی که بتوان (الف) توجه را روی خسارت متمرکز نمود (ب) بعد از زلزله‌های بزرگ قابل استفاده باشد (پ) هزینه‌های آن منطقی و اقتصادی باشد، در چندین سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. سیستم قاب فولادی مهاربندی با خسارت کم، یک سیستم مقاوم با عملکرد بالا در برابر نیروی لرزه‌ای، برای ساختمان‌های قاب فولادی می‌باشد. در این سیستم، قاب‌ها با جابه‌جایی کنترل شده و فیوزهای سازه‌ای قابل جایگزین جهت تامین امنیت و مقاومت کافی در برابر زلزله به کار گرفته شده است. این سیستم ترکیبی از ویژگی‌های مطلوب قاب مهاربندی فولادی معمولی و فیوزهای برشی مستهلک کننده ی انرژی است و شامل سه بخش زیر می‌باشد:

(۱) قاب‌های فولادی که ذاتاً الاستیک باقی می‌مانند و اجازه دارند که حرکت کنند.
(۲) تاندون‌های پس کشیده ی عمودی جهت افزایش مقاومت واژگونی و ویژگی‌های برگشت‌پذیری که سازه را بعد از زلزله به حالت اول خود برمی‌گرداند.

(۳) المان‌های قابل جایگزین مستهلک کننده ی انرژی که همان فیوزها هستند و به‌صورت موثری نیروهای واردشده به پایه ی سازه را محدود می‌کنند. هر کدام از این اجزا نقش بسزایی را در رفتار این سیستم ایفا می‌کند.

روشی که اخیراً طراحان سازه برای جلوگیری از خرابی‌های وسیع در سازه، بعد از زلزله های بزرگ، به کار می‌برند، روش طراحی بر اساس عملکرد است. در این روش طراح می‌تواند بر اساس موقعیت لرزه‌خیزی منطقه، خاص بودن سازه ی مورد نظر و... سازه را بر اساس یک سطح عملکرد خاص طراحی کند. مثلاً اگر سازه خیلی ویژه و در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا باشد می‌تواند سازه را Operational طراحی کند که بعد از زلزله هیچ آسیبی سازه نبیند. به‌طور معمول سازه‌ها را بر اساس سطح عملکرد Life Safety طراحی می‌کنند که در این صورت بعد از زلزله پیکر

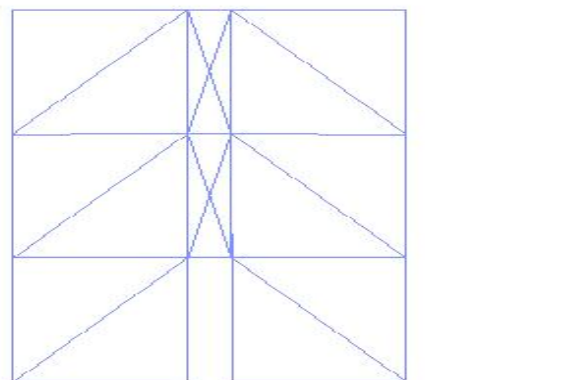


سازه حفظ می شود ولی خرابی را شامل می شود. حال برای حداقل کردن این خرابی و امکان استفاده از سازه بعد از زلزله از سیستم های خسارت کم، استفاده می کنند که روی خرابی متمرکز می شود و جابه جایی های نسبی بعد از زلزله را به حداقل می رساند و با استفاده از تاندون و حفظ ویژگی برگشت پذیری، سازه را بعد از زلزله به حالت اول خود بازمی گرداند و قسمت اعظمی از انرژی زلزله را به واسطه ی فیوزها مستهلک می کند. در این روش نیازمند به طراحی قاب هایی در سازه هستند که بتوانند جابه جایی آن را تحت کنترل خود گیرند. برای نیل به این هدف استفاده از آلمان هایی چون فیوز با قابلیت تعویض، تاندون های پس کشیده، اجازه ی جابه جایی به یک سری از ستون ها، به کار گرفته شده است که استفاده از هر کدام از موارد بالا آنها را در رسیدن به سازه ای با کمترین خسارت یاری می دهد (Eatherton et al., 2010).

در این مقاله برای بررسی رفتار قاب فولادی مهاربندی سه طبقه با سیستم خسارت کم از تحلیل دینامیکی غیرخطی در نرم افزار OpenSEES استفاده شده است. از آنجائیکه پارامتر مقاومت باقیمانده بر رفتار مستهلک کننده ی انرژی و به تبع آن بر رفتار قاب فولادی موثر است، در این مقاله مقدار این پارامتر تغییر یافته و برای هر بار تغییر، قاب تحلیل شده و نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته است.

معرفی مدل

مدل ارائه شده در این مطالعه شامل قاب فولادی مهاربندی سه طبقه می باشد. در سیستم به کار گرفته شده در این قاب، سیستم خسارت کم، کلیه ی ستون های طبقه ی اول قابلیت بلند شدن دارند. قاب شامل سه دهانه می باشد. دو دهانه ی کناری که شامل مهاربند همگرا می باشد و دهانه ی وسطی که مستهلک کننده های انرژی، فیوز، به شکل مهاربندی در آن تعبیه شده اند. در کنار تمام ستون ها، از پایه تا سقف، تاندون های پس کشیده قرار گرفته شده است. جلوگیری از تسلیم کابل پس کشیده در ساختمان های با ارتفاع کم مسئله ی مهمی می باشد. نمونه ای از مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: قاب سه طبقه ی فولادی مهاربندی با سیستم خسارت کم در اوپن سیس

معرفی شتاب نگاشت ها و ویژگی های آنها

برای مدل مورد مطالعه هفت رکورد زمین لرزه در نظر گرفته شده و سازه تحت این هفت رکورد قرار داده شده است. این شتاب نگاشت ها شامل زلزله هایی با بزرگی بیشتر از ۶ ریشتر می باشند. دسته بندی این رکوردها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: دسته بندی رکوردهای استفاده شده

Record ID	Event	Year	M_w	Station	R	Mechanism	PGA(g)	Rec.length(s)
BM68elc	Borrego Mountain	1968	6.8	El centro Array	46	Strike-Slip	0.057	40
BO42elc	Borrego	1942	6.5	El centro Array	49	-	0.068	40
CO83c05	Coulinga	1983	6.4	Parkfield-cholame5w	47.3	Reverse-oblique	0.131	40
CO83co8	Coulinga	1983	6.4	Parkfield-cholame8w	50.7	Reverse-oblique	0.098	32
IV79cal	Imperial valley	1979	6.5	Culipatria Fire station	23.8	Strike-Slip	0.078	39.5
IV79cc4	Imperial Valley	1979	6.5	Comchella canul	49.3	Strike-Slip	0.128	28.5
IV79chi	Imperial Valley	1979	6.5	Chihuahua	28.7	Strike-Slip	0.27	40

شتاب نگاشت های به کار گرفته شده شامل دو مکانیسم می باشند. یکی از مکانیسم ها شکست گسل تحت برش (لغزش) و دیگری شکست تحت فشار (معکوس) می باشد.

رکوردها از پایگاه مهندسی زلزله اقیانوس آرام ۱ گرفته شده است. در تمامی حالات مولفه ی افقی رکورد لحاظ شده و هیچ پس لرزه ای را شامل نمی شود. هم چنین در این مطالعه اثرات خاک نرم لحاظ نشده است.

معرفی پارامتر مقاومت باقیمانده و تاثیر آن بر رفتار فیوز

عملکرد فیوز

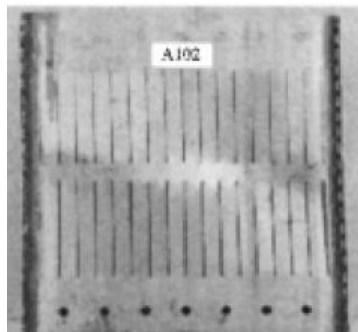
در سیستم خسارت کم برای محو کردن و از بین بردن انرژی لرزه ای و مطمئن شدن از تعمیر آسان بعد از خسارتی که زلزله وارد می کند، مستهلک کننده های انرژی با عنوان فیوز در سیستم مقاوم جانبی استفاده می شود. در طول آزمایشات انجام شده بر روی این سیستم ها، فیوزها تغییر شکل های برشی به بزرگی ۷-۱۲٪ که به هندسه ی سیستم بستگی دارد را تجربه می کنند. برای رسیدن به تغییر شکل های برشی بزرگ، فیوزها با شکل پذیری بالا می بایستی کشف و طراحی شوند.

قرار گرفتن فیوزها در دهانه ی وسط و اجازه ی بلند شدن ستون ها در سیستم خسارت کم، کرنش در فیوز را دو برابر می کند. این کار خسارت را روی فیوز متمرکز می کند و بدین ترتیب تعمیر سازه بعد از زلزله ساده سازی می شود. هر چه قدر نسبت اندازه ی دهانه ی مهاربندی به دهانه ی وسط که فیوز در آن قرار گرفته کمتر باشد، کرنش فیوز کمتر خواهد بود.

جنسی و شکل فیوز

اجزای فیوز با شکل پذیری و سختی کافی می بایستی طراحی شوند تا بتوانند انرژی را در طول بارگذاری چرخه ای که در طول زمین لرزه ی بزرگ انتظار می رود که به وجود آید، مستهلک کند. علاوه بر این، فیوزها باید طوری طراحی شوند که به راحتی بعد از وقوع یک زمین لرزه، جا به جا شوند.

به طور معمول فیوزها، ورق های فولادی نازک با ضخامت ۶ میلی متر و پروانه ای شکل هستند. نمونه ای از فیوزهای مورد استفاده در سیستم خسارت کم در شکل ۲ آمده است. (Hall et al., 2010)



شکل ۲: فیوز فولادی شیار دار (Hall et al., 2010)

نحوه ی استخراج نتایج

جهت بررسی تاثیر پارامتر مقاومت باقیمانده و تاثیر آن بر رفتار فیوز و قاب فولادی مهاربندی، آنچه در این مقاله انجام شده است به شرح زیر می باشد:

در ابتدا هفت رکورد زمین لرزه با شدت های بالای شش ریشتر انتخاب شده و قاب فولادی مهاربندی با سیستم خسارت کم تحت این هفت شتاب نگاشت تحلیل شده است.

خروجی های مورد بررسی شامل نیروی محوری کششی و فشاری ستون های طبقه ی اول، بلند شدگی، جابجایی نسبی طبقات و شتاب طبقه در جهت افقی و شتاب طبقه در جهت قائم می باشد. کلیه ی نتایج گرفته شده و گراف های رسم شده بر اساس میانگین ماکزیمم مقادیر خروجی می باشد.

در ادامه پارامتر مقاومت باقیمانده، یکبار دو برابر و یکبار نصف شده، بقیه ی پارامترها ثابت نگه داشته می شود، و برای هر کدام از حالت های تغییر داده شده، یکبار سیستم تحلیل و خروجی های لازم گرفته شده و با حالت اصلی سیستم که مقادیر واقعی هستند و هیچ گونه تغییری در مقدار پارامترهای آن ها داده نشده، مقایسه و گراف های مربوط رسم شده است.



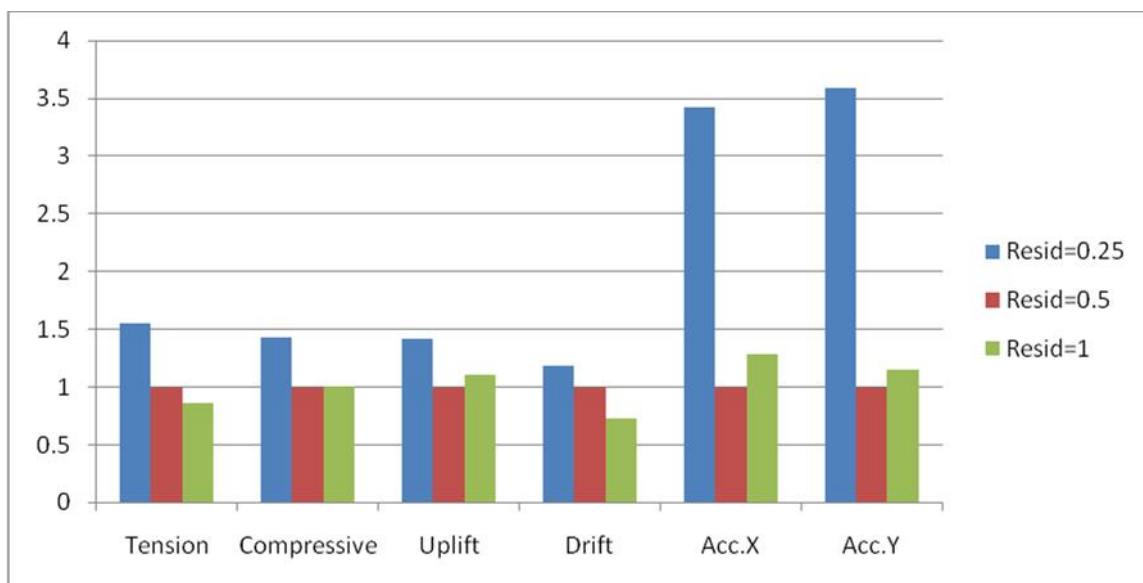
بررسی اثر پارامتر مقاومت باقیمانده بر فیوز و تاثیر آن بر رفتار لرزه ای قاب فولادی مهاربندی سه طبقه با سیستم خسارت کم

یکی از پارامترهایی که در تعریف مصالح مستهلک کننده ی انرژی در مدل اوپن سیزی آورده شده، مقاومت باقیمانده می باشد. این پارامتر، به صورت نسبتی از مقاومت باقی مانده به مقاومت تسلیم به برنامه داده شده است. قاب برای سه حالت، مقدار واقعی این نسبت برابر با ۰.۵، نصف مقدار واقعی و دو برابر مقدار واقعی تحلیل شده و برای هر کدام از حالات، سیستم به طور جداگانه تحلیل شده و خروجی های مورد نظر شامل نیروی محوری کششی و فشاری ستون های طبقه ی اول، بلند شدگی، جابجایی نسبی طبقات و شتاب افقی طبقات و شتاب قائم طبقات از نرم افزار گرفته شده است. میانگین ماکزیمم ها بدست آمده و در جدول ۲ نتایج آن با درصد های افزایشی و یا کاهش می آورده شده است.

جدول ۲: میانگین ماکزیمم های بدست آمده برای پارامتر مقاومت باقی مانده

	MAX AVE FOR AXIAL FORCE(+ Tension)	MAX AVE FOR AXIAL FORCE(- Compressive)	MAX AVE FOR Uplift	MAX AVE FOR Drift	MAX AVE FOR ACC.X	MAX AVE FOR ACC.Y
Resid=0.25	1937.8213 +55.5%	7740.91 +43.07%	242.685 +42.23%	0.0467 +17.85%	247157.4 +242.6%	417825 +259%
Resid=0.5	1245.86	-5410.3	170.64	0.0396	72140.3	116303
Resid =1	1071.3793 -14%	5442.2571 +0.5%	188.7105 +10.6%	0.0286 -27.87%	92586.72 +28.35%	133964 +15%

حالتی که سیستم با مقدار واقعی مقاومت باقیمانده تحلیل شده را مبنا قرار داده و دو حالت Resid=0.25 و Resid=1 نسبت به حالت اصلی مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: تاثیر حالات مختلف مقاومت باقی مانده بر رفتار قاب

نتیجه گیری

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که، با نصف کردن پارامتر مدنظر، نیروی محوری کششی در ستون های طبقه ی اول نسبت به حالت پایه، قاب با مقاومت باقی مانده برابر با ۰.۵، ۱.۵ برابر، نیروی فشاری ۱.۴ برابر، آپلیفت ۱.۴ برابر، جابجایی نسبی طبقه ۱.۱۷ برابر، شتاب طبقه در جهت افقی ۳.۴ برابر و شتاب قائم در حدود ۳.۶ برابر افزایش داشته است.

با دو برابر شدن پارامتر مورد نظر، نیروی محوری کششی در ستون های طبقه ی اول نسبت به حالت پایه، قاب با مقاومت باقی مانده برابر با ۰.۵، ۰.۸ برابر کاهش داشته، نیروی فشاری ۱ برابر افزایش، آپلیفت ۱.۱ برابر افزایش، جابجایی نسبی طبقه ۰.۷ برابر کاهش و شتاب طبقه در جهت افقی ۱.۳ افزایش و شتاب قائم طبقه ۱.۱۵ برابر افزایش داشته است.

با توجه به موارد ذکر شده، رفتار سیستم به حالتی که مقدار مقاومت باقی مانده نسبت به مقاومت تسلیم نصف می شود به شدت حساسیت نشان داده و در حدود ۲۵٪ شتاب افقی و قائم طبقه افزایش پیدا کرده است. هم چنین در این حالت مقادیر نیروی محوری کششی و فشاری ستون و آپلیفت افزایش ۴۰٪ نسبت به حالت اصلی داشته اند.

نصف شدن نسبت مقاومت باقی مانده به مقاومت تسلیم، با فرض ثابت بودن مقاومت تسلیم، به معنی نصف شدن مقاومت باقی مانده است و طبیعی است با کم شدن مقاومت سیستم، مقادیر آپلیفت و شتاب افقی و قائم طبقات افزایش پیدا کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که پارامتر مقاومت باقی مانده جزء پارامترهایی است که سیستم نسبت به افزایش و یا کاهش آن حساسیت نشان می دهد. لذا جنس فیوز در این سیستم ها می بایستی به نحوی در نظر گرفته شود که حتی الامکان مقدار این پارامتر در بازه ۰.۵ تا ۱ باقی بماند و کمتر نشود.

مراجع

Eatherton M, Hajjar J, Ma X, Krawinkler H and Deierlein G (2010) Seismic Design and Behavior of Steel Frames with Controlled Rocking—Part I: Concepts and Quasi-Static Subassembly Testing. *Structures Congress 2010*: pp. 1523-1533

Hall K, Eatherton M and Hajjar J(2010) Nonlinear Behavior of Controlled Rocking Steel-Framed Building Systems with Replaceable Energy Dissipating Fuses. NSEL Report Series.Report No. NSEL-026

Pacific Earthquake Engineering Research Center (2000) Strong Motion Database, August 25, 2006, <<http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>>