

ارائه روشی برای تعیین ضرایب کاهش مفاصل پلاستیک در سازه‌های قاب خمشی آسیب‌دیده

بهرخ حسینی هاشمی

دانشیار، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
behrokh@iiees.ac.ir

آران ناصرپور

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
aran.naserpour@gmail.com

کلید واژه‌ها: پس لرزه، رفتار چرخه‌ای، مفصل پلاستیک، ضرایب اصلاح مفاصل، قاب خمشی ویژه

چکیده

پژوهش حاضر به ارائه روشی برای ارزیابی تحلیلی المان‌های سازه‌های قاب خمشی فولادی می‌پردازد. در این تحقیق ابتدا یک نمونه تیر و ستون با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده و سپس رفتار لرزه‌ای این المان‌ها تحت اثرات زلزله‌های متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از پروتکل بارگذاری جدیدی جهت در نظر گرفتن این اثرات استفاده شده است. ملاک آسیب اولیه وارده به المان‌ها براساس شاخص تغییر مکان نسبی المان‌ها بوده و رفتار این المان‌ها به ازای تمامی مقادیر آسیب از ۱ درصد تا ۴ درصد استخراج شده است. سپس برای المان‌های آسیب‌دیده منحنی رفتاری (مفصل پلاستیک) به ازای درصدهای مختلف آسیب اولیه ارائه شده است که این منحنی‌ها با منحنی مندرج در دستورالعمل‌های ارزیابی مانند ASCE 41-06 کالیبره شده اند تا بتوان از آن‌ها جهت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی سازه‌های قاب خمشی فولادی استفاده کرد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای تیرها با درصد آسیب ۱ و ۲ درصد، افت در مقادیر سختی و مقاومت آن‌ها مشاهده نشده است. در حالی که برای المان ستون افت زیادی را در آسیب‌های ۱ و ۲ درصد مشاهده خواهیم کرد. شکل منحنی رفتار چرخه‌ای المان تیر برای آسیب‌های بیش از ۲ درصد به صورت نامتقارن خواهد بود. بنظر می‌رسد این رفتار نامتقارن تأثیرات زیادی روی رفتار کل سازه خواهد داشت.

مقدمه

تنش‌های موجود در گسل‌ها مسبب لرزه‌های شدیدی می‌گردند که زلزله اصلی نام دارند. باز توزیع کوچک تنش‌ها و مقاومت اصطکاکی باعث پیشرفت بیشتر گسل‌ها شده و پس‌لرزه ایجاد می‌گردد. وقوع پس‌لرزه‌های قوی پس از زلزله اصلی از مواردی است که در زلزله‌های پیشین سبب آسیب‌های بسیاری گشته و در بعضی موارد حتی فروریزش سازه را در پی داشته است. به دلیل پیچیدگی منظور کردن این اثرات، در هیچ کدام از آیین‌نامه‌های طراحی و دستورالعمل‌های ارزیابی اثر توالی زلزله و پس‌لرزه دیده نشده است. هدف از این پژوهش ارائه روش نوین برای ارزیابی رفتار المان‌های سازه‌ای آسیب‌دیده و همچنین ارائه منحنی‌های رفتاری برای المان تیر و ستون جهت ارزیابی‌های گسترده سازه‌های قاب خمشی ویژه فولادی می‌باشد. (ATC 35(1999)

پژوهش‌های بسیاری در راستای ارزیابی اثرات توالی زلزله و پس‌لرزه صورت گرفته است. اکثر مطالعات پیشین در این زمینه به سازه‌های یک‌درجه و چنددرجه آزادی با ارتفاع کم محدود شده‌اند. نکته قابل‌تأمل در بین تمام پژوهش‌های پیشین این است که رفتار المان‌های سازه‌ای در تحلیل‌های غیرخطی برای ارزیابی اثرات زلزله اصلی و پس‌لرزه به طور یکسان در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مشکل، زمان بر بودن و پیچیدگی تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات توالی در شتاب‌نگاشت‌ها، خود زمینه‌ساز بروز مشکلاتی در ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده شده است. (Li Q, Ellingwood BR. (2007), Lee K, Foutch DA. (2004))

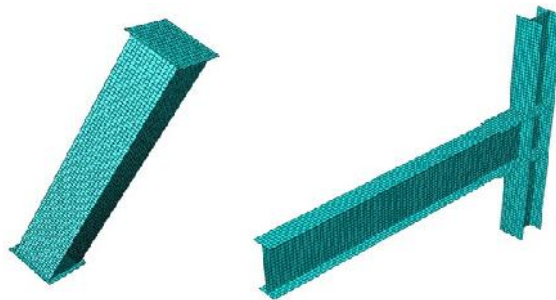
نشریه FEMA 306-307 روشی جهت ارزیابی میانقاب‌ها و دیوارهای بتنی آسیب‌دیده ارائه داده است. این نشریه از تغییر در پیش‌بینی رفتار المان‌های سازه‌ای در جریان زلزله‌های آینده به‌عنوان معیار آسیب بهره گرفته است. اثرات آسیب‌های وارده بر سازه تحت تحریکات متوالی، می‌تواند در مدل رفتاری مصالح منظور گردد. (FEMA 306 (1998).



صحت سنجی مدل های عددی

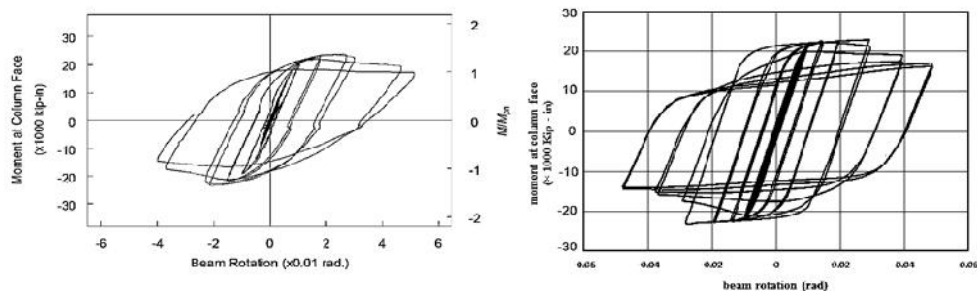
نمونه مورد بررسی برای ارزیابی رفتار تیر آسیب دیده، یک مجموعه تیر و ستون با اتصالات خمشی ورق بال پیچی (BFP) بدون در نظر گرفتن اثرات دال بتنی بوده که در دانشگاه سن دیگو (San Diego) کالیفرنیا ساخته شده است و تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته است. نمونه مورد بررسی برای ارزیابی رفتار ستون آسیب دیده، یک ستون با مقطع قوطی و با اتصالات صلب انتهایی بوده که در سال 2004 در دانشگاه رز اسکول (Rose School) ساخته شده است و تحت بارگذاری سیکلی به همراه بار محوری ثابت قرار گرفته است. در این پژوهش از نرم افزار المان محدود ABAQUAS 6-11 جهت مدل سازی استفاده شده است. در مدل سازی از المان صفحه (Shell) استفاده شده است تا بتوان رفتار مجموعه را هرچه بهتر و نزدیک تر به واقعیت مدل سازی نمود. از مش چهارگانه (Quad) در مش بندی کل مجموعه بهره گرفته شده است. شرایط مرزی مدل ها کاملاً مشابه شرایط گفته شده در مراجع اشاره شده است. نحوه مدل سازی، مش بندی و شرایط مرزی در جدول (1-1) شکل 1، نشان داده شده است. (Sato A et al.(2007), Kurata M(2004)

انتخاب ابعاد مقاطع مورد استفاده باید با توجه به در نظر گرفتن چگونگی دامنه مشخصات مقادیر برای المان های با خصوصیات فشرده لرزه ای باشد. مقادیر این مقاطع برای المان های فشرده لرزه ای دارای توزیع نرمال است. (FEMA 355C(2000), PEER (2005)

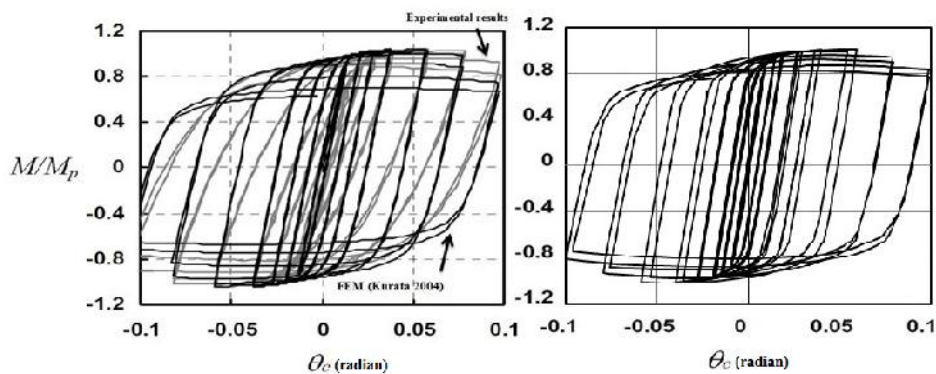


شکل 1: نمونه تیر مدل سازی در نرم افزار

در این قسمت به منظور صحت سنجی مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، منحنی لنگر- دوران نمونه آزمایشگاهی تیر، ستون و مدل های عددی آن ها با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل 2 و 3 نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی قابل مشاهده است. همان طور که دیده می شود تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی عددی مشاهده می شود.



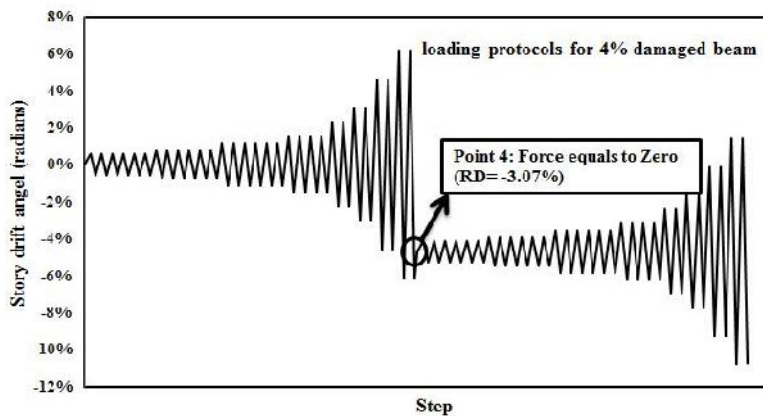
شکل 2: نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی رفتار چرخه ای تیر (Sato A et al.(2007)



شکل 3: نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی رفتار چرخه ای ستون (Kurata M(2004)

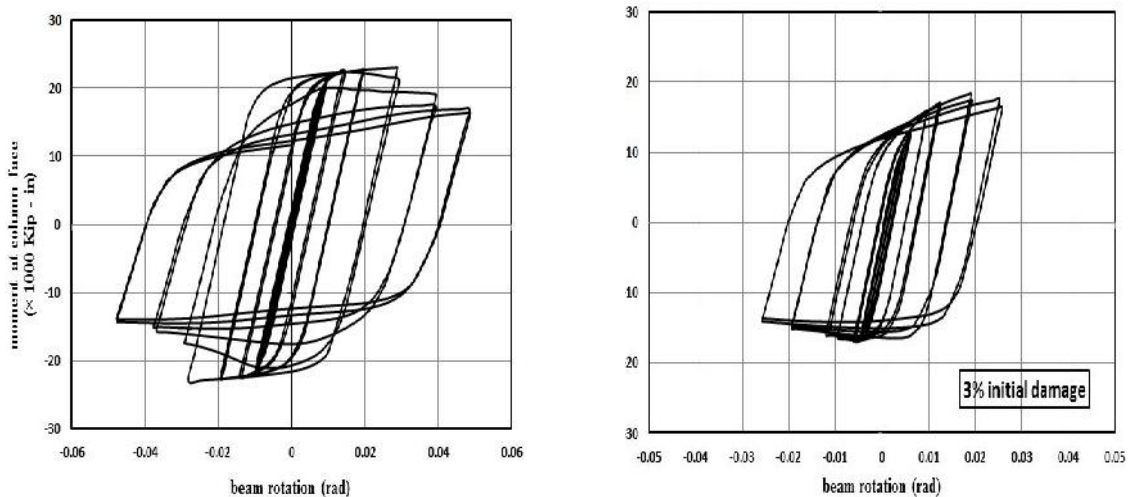
روش ارزیابی سازه آسیب دیده

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرات آسیب‌های متوالی ایجاد شده روی المان‌های سازه‌ای است. ارزیابی کمی اثرات آسیب زلزله بر سازه نیاز به انتخاب پارامترهای اندازه‌گیری دارد. در این پژوهش جابجایی نسبی به عنوان شاخص آسیب اولیه انتخاب شده است. برای در نظر گرفتن اثرات آسیب‌های متوالی باید المان‌ها تحت بارگذاری متفاوتی قرار بگیرند. در این پژوهش شکل خاصی از پروتکل بارگذاری سیکلی ارائه شده است تا بتوان هرچه دقیق‌تر اثرات آسیب را در منحنی چرخه‌ای المان‌ها در نظر گرفت. شکل این پروتکل برای تیر با ۴ درصد آسیب اولیه به صورت شکل ۴ می‌باشد. در پروتکل نشان داده شده در شکل ۴ المان تیر تا ۴ درصد جابجایی نسبی بارگذاری شده است. سپس تا نقطه‌ای که نیروها صفر شود باربرداری و سپس المان آسیب‌دیده مجدداً از نقطه معادل نیروی صفر بارگذاری می‌گردد.



شکل ۴: پروتکل بارگذاری برای تیر با ۴ درصد آسیب اولیه

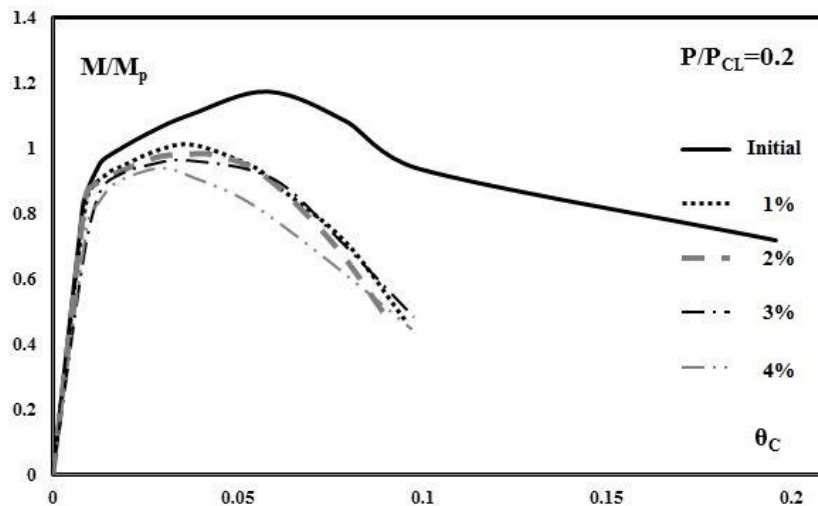
المان تیر تحت بارگذاری طبق پروتکل اشاره شده قرار گرفته و رفتار لنگر-انحنای آن به ازای درصدهای آسیب اولیه مختلف استخراج شده است. این رفتار با فرض درصد آسیب‌های اولیه مختلف صورت گرفت که برای مثال در ۰ رفتار چرخه‌ای تیر با ۴ درصد آسیب اولیه و بدون آسیب اولیه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۵: مقایسه منحنی رفتاری تیر با ۴ درصد آسیب و بدون آسیب

ارزیابی رفتار ستون آسیب‌دیده به ازای نسبت P/P_{CL} گوناگون با درصد آسیب‌های مختلف محاسبه شده است. در ۰ این رفتار برای نمونه ستون اشاره شده با نسبت P/P_{CL} برابر ۰/۲ در ناحیه مثبت قابل مشاهده است.





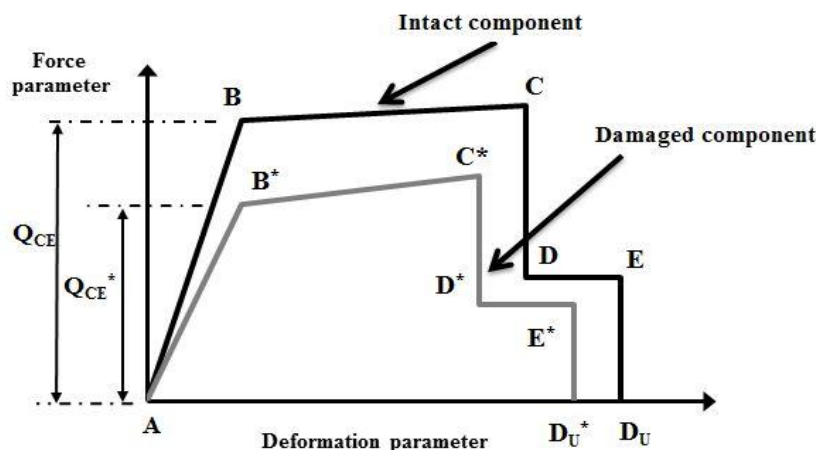
شکل ۶: رفتار چرخه‌ای ستون در ناحیه مثبت یا نسبت بار ۰/۲ به ازای درصد مختلف آسیب

منحنی رفتاری آسیب‌دیده

پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری جهت ایجاد یک بانک اطلاعاتی گسترده از رفتار المان‌های سازه‌ای سال‌ها است که در جریان است. منحنی‌های ساده‌شده ارائه شده در دستورالعمل‌های ارزیابی از هزاران نمونه آزمایشگاهی با شرایط مرزی و ابعاد گوناگون استخراج شده‌اند. در نتیجه نمی‌توان تنها با ایده‌آل سازی تعداد محدودی نمونه آزمایشگاهی به این منحنی ساده‌شده مطابق آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های ارزیابی رسید. (FEMA 355C(2000), PEER (2005)

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، نمی‌توان برای هر رفتار چرخه‌ای، منحنی رفتاری جهت تحلیل‌های غیرخطی ارائه داد. در نتیجه برای این منظور در این پژوهش بعد از ساده‌سازی کردن رفتار چرخه‌ای به منحنی چندخطی، منحنی ایده‌آل شده با رفتار دستورالعمل ASCE 41-06 کالیبره شده است تا بتوان از این منحنی‌ها جهت تحلیل غیرخطی سازه‌ها بهره گرفت. (ASCE 41-06 (2007)

نکته مهم در مورد ایده‌آل سازی مقادیر این است که این نحوه کالیبراسیون تنها می‌تواند برای مقاطعی مورد استفاده قرار بگیرد که منحنی رفتاری آن‌ها به طور مستقیم با ایده‌آل سازی خصوصیات رفتار چرخه‌ای قابل محاسبه باشد که وابسته به نوع سیستم سازه‌ای می‌باشد. در حالت کلی اثرات آسیب بر روی منحنی رفتاری بسیار پیچیده است و قطعاً شکل منحنی آسیب‌دیده با منحنی رفتاری المان سالم متفاوت خواهد بود. در 0 نحوه تغییر رفتار اعضا بر اثر آسیب به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه منحنی رفتاری ساده شده المان سالم و آسیب‌دیده

با توجه به 0 برای رسیدن به منحنی مذکور باید از یکسری ضرایب کاهش استفاده شود. می‌توان برای ارزیابی سازه آسیب‌دیده ضرایب کاهشی را به صورت زیر ارائه کرد:

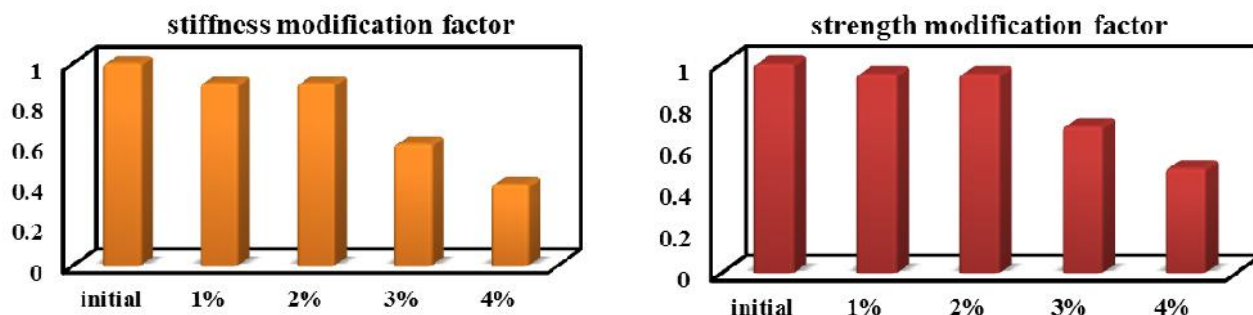
$$K = \{ K' \} \quad (K' = \text{اصلاح سختی})$$

۲- λ_Q : ضریب اصلاح مقاومت ($Q_{CE}' = \lambda_Q \times Q_{CE}$)

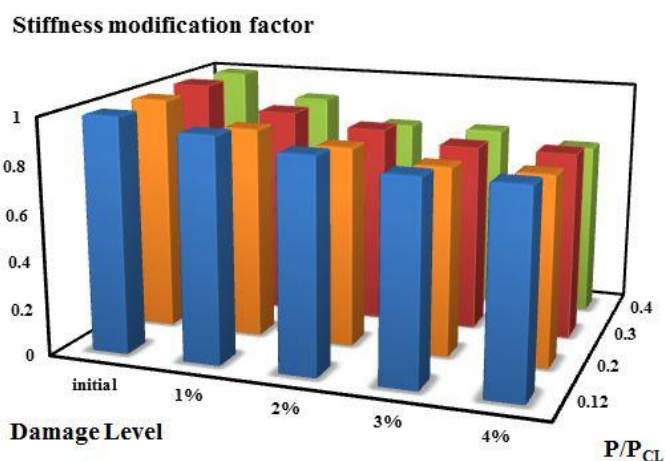
۳- λ_D (a): ضریب اصلاح تغییر مکان متناظر نقطه حداکثر مقاومت ($D' = \lambda_D \times D$)

۴- λ_D (b): ضریب اصلاح تغییر مکان متناظر نقطه ۸۰٪ افت مقاومت- حد آستانه فروریزش ($D'_{ultimate} = \lambda_D \times D_{ultimate}$)

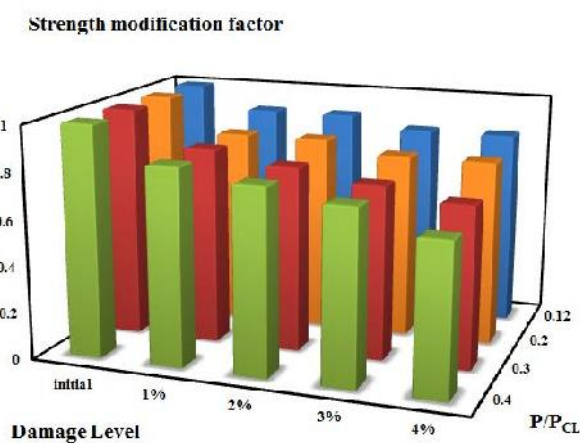
در واقع در بالا ضریب ضریبی جهت کاهش خصوصیات اعضای سالم و تبدیل آن به خصوصیات رفتاری اعضای آسیب دیده است. مقادیر ضریب های کاهش سختی و مقاومت برای المان تیر و ستون در ۰، ۹، ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸: ضرایب کاهش سختی و مقاومت برای المان تیر



شکل ۹: ضرایب کاهش سختی برای المان ستون



شکل ۱۰: ضرایب کاهش مقاومت برای المان ستون



نتیجه گیری

این پژوهش به ارائه روشی نوین به منظور ارزیابی سازه‌های آسیب‌دیده پرداخته است. بدین منظور برای یک نمونه تیر و ستون صحت‌سنجی شده، با تغییراتی در پروتکل بارگذاری اولیه، منحنی‌های بار- تغییر مکان آن‌ها استخراج شده است. این منحنی‌ها به ازای درصدهای مختلف آسیب اولیه وارده به تیر و ستون محاسبه شده است.

برای منحنی‌های لنگر- انحنا تیر آسیب‌دیده با آسیب اولیه ۱ و ۲ درصد به‌طور تقریبی افت سختی و مقاومت قابل‌توجهی در منحنی‌های رفتار چرخه‌ای آن‌ها دیده نشده است. این نتیجه به تجربه برای مهندسين به اثبات رسیده است که درصدهای آسیب کم برای المان تیر، افت سختی و مقاومت قابل‌توجهی را به همراه نخواهد داشت. در نتیجه به نظر می‌رسد از المان تیر سالم برای ارزیابی تیر آسیب‌دیده تا ۲ درصد می‌توان استفاده کرد. با افزایش آسیب اولیه، به‌ویژه در درصد آسیب‌های بیش از ۲٪، شکل منحنی لنگر انحنا نامتقارن خواهد شد. در واقع در درصدهای آسیب زیاد دیگر رفتار متقارن در دو ربع منحنی لنگر- انحنا قابل‌مشاهده نخواهد بود. می‌توان گفت مقدار سخت شدگی کرنشی برای تیر با درصد آسیب بیش از ۲ درصد از تیر با درصد آسیب ۱٪ و ۲٪ خیلی بیشتر است.

اثرات P- در سازه‌های آسیب‌دیده بیش از حالت معمولی قابل‌مشاهده است. این اثر گاهی تغییر مکان نقطه حداکثر مقاومت را تا ۷۵ درصد مقدار اولیه کاهش می‌دهد. در نتیجه برای ارزیابی سازه آسیب‌دیده با هر درصد آسیب اثرات کاهش سختی و مقاومت در ارزیابی رفتار ستون‌ها باید در نظر گرفته شود. سپس از رفتار هیسترسیس المان‌های آسیب‌دیده با توجه به دستورالعمل‌های ارزیابی سازه‌ها منحنی ایده‌آل شده استخراج شده است. این منحنی‌ها به منحنی دستورالعمل‌های ارزیابی چون ASCE 41-06 ایده‌آل شده‌اند تا بتواند در ارزیابی سازه‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.

مراجع

ASCE SEI 41-06 (2007) Seismic rehabilitation of existing buildings, ASCE standard, published by the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia

ATC 35 (1999) Earthquake aftershocks-entering damaged building, Applied Technology Council, Redwood City, California. Technical brief 2

FEMA 306 (1998) Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings– basic procedures

FEMA-355C (2000) State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking. Prepared by the SAC Joint Venture for FEMA, Washington, D.C

Haselton CB, Goulet C, Mitrani-Reiser J, Beck J, Deierlein GG, Porter KA, Stewart J and Taciroglu E(2005) An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced-Concrete Moment-Frame Building, PEER Report 2005/xx, University of California, Berkeley, California.

Journal of Struct Eng; 130:588–99

Kurata M (2004) Effect of column base behavior on the overall response of steel moment frames. A Dissertation of Master Degree, Rose School, Advisor: Prof. Masayoshi Nakashima

Lee K and Foutch DA (2004) Performance evaluation of damaged steel frame buildings subjected to seismic loads

Li Q and Ellingwood BR (2007) Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock–aftershock sequences. *Journal of Earthq Eng Struct Dyn*; 36:405–27

manual. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC

Sato A, Newell J and Uang CM (2007) Cyclic testing of bolted flange plate steel moment connections for special moment frames. Report No.SSRP-07/10 Division of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA

