Archive of SID

به یاد مرحوم دکتر رضا عباس نیا

شیوه ی زندگی از ابتدای آفرینش تا پایان خلقت بر این بوده و هست که انسانهایی قدم در عرصه وجود بگذارند و پس از چند صباحی چشم از جهان فروبندند، اما در این میان مردانی وجود دارند که یاد آنها هیچگاه از صفحه روزگار محو نمی شود، گرچه در این جهان نباشند، این شیوه شامل اندک مردان فرزانه و انگشت شماری است که درساخت تاریخ زمان خویش نقش بزرگی ایفا می کنند. کسی که در تعلیم و آموزش نسل های جوان کشور نقش آفرینی داشته باشد هیچگاه در تلاطم تاریخ محو نمی شود.

دکتر رضا عباس نیا استاد فرهیخته مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت و عضو وارسته ی هیأت تحریریه ی مجله ی علمی و پژوهشی شریف از جمله انسانهایی است که صفات برجسته و بارز او به صورت نماد انسانی شایسته در قاموس اندیشمندان به ثبت رسیده است.

مجله مهندسی عمران شریف ضمن تقدیم این شماره از مجله به ایشان، یاد و خاطره ی وی را همواره گرامی می دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۳-۱۰

Original Article

مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده ساختمان‌های بتنی با شکل‌پذیری‌های مختلف

رضا عباس‌نیا (دانشیار)
ابوالفضل یوسف‌پور اوندری * (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

اطمینان از سازه همیشه به‌عنوان یک اصل برای مهندسانی که مسئول طراحی پروژه‌های عمرانی بوده‌اند، مطرح بوده است. یکی از مکانیزم‌هایی که در دهه‌های اخیر توجه به آن افزایش پیدا کرده، خرابی پیش‌رونده است. از این رو در این پژوهش، با استفاده از آیین‌نامه‌ی GSA به بررسی میزان مقاومت خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف بر طبق آیین‌نامه‌های ایران پرداخته شده است. ساختمان‌ها پس از طراحی برای بارگذاری‌های متداول، توسط دو روش تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی برای حالت‌های مختلف حذف ستون تحلیل شده‌اند. براساس بارگذاری‌های تعریف‌شده در GSA، قاب خمشی معمولی و متوسط به ترتیب اضافه مقاومتی در حدود ۸۰ و ۳۳ درصد دارند. ولی با توجه به ضوابط راهنمای GSA، قاب خمشی ویژه‌ی طراحی‌شده براساس آیین‌نامه‌های ایران، قادر به تحمل بارهای مربوط به خرابی پیش‌رونده نبوده و برخی از حالت‌های حذف ستون در آن منجر به خرابی شده است. در واقع این‌گونه می‌توان بیان کرد که یک طراحی لرزه‌یی ویژه، هنگامی که شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با طراحی معمولی دارد، الزاماً عملکرد بهتری تحت فرایند حذف ستون نخواهد داشت.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، شکل‌پذیری، تحلیل دینامیکی، تحلیل پوش‌داون، قاب خمشی بتنی.

abbasnia@iust.ac.ir
a.yousefpoor70@gmail.com

۱. مقدمه

اطمینان از سازه همیشه به‌عنوان یک اصل برای مهندسانی که مسئول طراحی پروژه‌های عمرانی بوده‌اند، مطرح بوده است. یکی از مکانیزم‌هایی که در دهه‌های اخیر توجه به آن افزایش پیدا کرده، خرابی پیش‌رونده است. خرابی پیش‌رونده در آیین‌نامه‌ی GSA-۲۰۱۳ به‌عنوان حالتی از انهدام مطرح است، که در آن شکست محلی عضو سازه‌یی اصلی منجر به خرابی یکی پس از دیگری اعضاء مجاور و در نهایت موجب خرابی اضافی می‌شود.[۱] توجه به موضوع خرابی پیش‌رونده در جامعه‌ی مهندسان، اولین بار به دلیل خرابی موضعی ساختمان رونان پوینت، که در سال ۱۹۶۸ اتفاق افتاده‌است، به‌وجود آمده و حادثه‌ی ۱۱ سپتامبر (۲۰۰۱)، به‌عنوان نیروی محرکی در جهت مطالعات بیشتر در این زمینه بوده است. یکی از مسائلی که در خرابی پیش‌رونده بررسی شده است، پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های طراحی‌شده براساس آیین‌نامه‌های موجود و بدون استفاده از آیین‌نامه‌های خرابی پیش‌رونده بوده است. از جمله مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، می‌توان به این موارد اشاره کرد: برخی پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴، خرابی پیش رونده را در دو ساختمان بلند بتنی با سیستم دیوار برشی ارزیابی کرده و به بررسی کارایی قاب خمشی و دیوار برشی در خرابی پیش‌رونده برای سازه‌های بلند پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهش مذکور نشان می‌دهد که قاب ساختمان A با دیوار برشی ضعیف‌تر و قاب قوی‌تر، نامعینی بالاتری را برای پایستگی در برابر خرابی پیش‌رونده دارد. این امر به علت تمرکز سختی در یک نقطه (دیوارهای برشی) و ضعیف‌شدن باقی بخش‌ها در ساختمان B با دیوار برشی قوی‌تر و قاب ضعیف‌تر بوده و از طرف دیگر سیستم قاب خمشی، به دلیل توزیع تنش مناسب در کلیه‌ی اعضا و نیز انعطاف‌پذیری زیاد، قابلیت باز توزیع مناسبی داشته است.[۲]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۱، خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های طراحی‌شده با و بدون بارهای لرزه‌یی بررسی و جزء‌قاب‌های بتنی ساختمان‌های قاب خمشی ۵ و ۸ طبقه‌یی که با و بدون بار لرزه‌یی طراحی شده بودند، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند. یافته‌های پژوهش مذکور نشان داده است که در نمونه‌ی غیرلرزه‌یی، بتن اتصال قبل از فعال‌شدن عملکرد زنجیری خرد شده است. ولی در نمونه‌ی لرزه‌یی، رفتار زنجیری توسط میلگردها فعال شده است. بر پایه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، این نتیجه به‌دست آمده است که رفتار زنجیری تیرها در ساختمان‌های قاب خمشی بتنی طراحی‌شده با آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌یی، در مقابل خرابی پیش‌رونده با حذف ناگهانی ستون فعال می‌شود.[۳]

در سال ۲۰۱۲ نیز محققان با بررسی تأثیر معیارهای طراحی لرزه‌یی در مقاومت انفجاری سازه‌های قاب خمشی بتنی نتیجه گرفتند که معیارهای طراحی لرزه‌یی نیز

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۱۹، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۲۴.

www.SID.ir

Archive of SID

مقاومت سازه‌یی کافی را در مقابل حالت‌های مختلف انفجار تأمین نمی‌کنند، ولی نسبت به ساختمان غیرلرزه‌یی، آسیب کمتری در انفجار می‌بینند.[۴]

همچنین برخی پژوهشگران، پژوهشی را در سال ۲۰۱۲ روی قاب‌های خمشی بتنی با هدف بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده‌ی قاب‌ها تحت حذف ناگهانی ستون طبقه‌ی اول انجام داده‌اند، که طبق نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، سازه‌های بتن مسلحی که برای بار لرزه‌یی طراحی نشده‌اند، آسیب‌پذیری بالایی در برابر خرابی پیش‌رونده دارند، در حالی که سازه‌های طراحی‌شده با بار لرزه‌یی عملکرد قابل قبولی در مقابل خرابی پیش‌رونده دارند.[۵]

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۱۴، رفتار یک ساختمان قاب خمشی بتنی ۶ طبقه برای خرابی پیش‌رونده تحلیل و بررسی شده است. ساختمان مذکور برای مناطق لرزه‌یی با خطر لرزه‌خیزی کم ($a_g = ۰/۰۸\,g$)، متوسط ($a_g = ۰/۱۶\,g$)، و زیاد ($a_g = ۰/۲۴\,g$) طراحی شده است، تا اثر طراحی لرزه‌یی در آن مشاهده شود. آن‌گونه که مشخص است، ظرفیت باربری نهایی سازه‌های ۶ طبقه‌ی طراحی‌شده، با افزایش شتاب مبنای طرح افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل هر چه نیروی‌های جانبی در مرحله‌ی طراحی بیشتر شود، مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده بهبود می‌یابد.[۶]

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۵، تأثیر طراحی لرزه‌یی و الزامات پیوستگی سازه‌یی در مقاومت خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان‌های قاب خمشی بتنی ارزیابی شده و این نتیجه به‌دست آمده است که هر دو پارامتر مقاومت و شکل‌پذیری، مشخصه‌های سازه‌یی مهمی در مقاومت ساختمان در برابر حرکات شدید زمین‌لرزه و همچنین خرابی پیش‌رونده تحت آسیب اولیه هستند. اما در حرکات شدید زمین‌لرزه، ظرفیت‌های جابه‌جایی جانبی و شکل‌پذیری سازه، مشخصه‌های اصلی در تعریف مقاومت لرزه‌یی سازه هستند، در حالی که مشخصه‌ی مهم سازه‌یی در خرابی پیش‌رونده، مقاومت سازه است.[۷]

در سال ۲۰۱۴ نیز در پژوهش دیگری، تأثیر جزئیات لرزه‌یی و الزامات پیوستگی سازه‌یی ACI۳۱۸ در مقاومت خرابی پیش‌رونده‌ی سازه‌های قاب خمشی بتنی ارزیابی شده و با مدل‌سازی تیرهای طراحی‌شده با شکل‌پذیری کم و زیاد و مقایسه‌ی نتایج، این‌گونه درک شده است که تیر با شکل‌پذیری معمولی در سراسر پاسخ خود از تیر ویژه قوی‌تر است. یعنی در کل روند تحلیل، جابه‌جایی قائم در برابر بار می‌تواند مقاومت بیشتری داشته باشد. به طور خلاصه در این نظریه پیشنهاد شده است که یک طراحی لرزه‌یی ویژه، هنگامی که شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با طراحی معمولی دارد، الزاماً عملکرد بهتری تحت فرایند حذف ستون نخواهد داشت.[۸]

از مطالعات و پژوهش‌های پیشین این‌گونه برداشت می‌شود که طراحی لرزه‌یی تأثیر به‌سزایی در مقاومت قاب‌های خمشی بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده در مقایسه با طراحی غیرلرزه‌یی دارد. چرا که در ارزیابی رفتار غیرخطی سازه‌ها و برای به‌دست‌آوردن پایستگی لازم، شکل‌پذیری یک سازه بسیار کلیدی است.[۹] لیکن طراحی لرزه‌یی و افزایش شکل‌پذیری به دلیل عملکرد مناسبی که در برابر زلزله ایجاد می‌کند، امکان کاهش نیروهای زلزله را در روند طراحی ساختمان‌ها ممکن می‌سازد و در نتیجه، ظرفیت باربری ساختمان کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش مقاومت ساختمان در برابر خرابی پیش‌رونده می‌شود. یعنی یک عامل در دو مکان، اثرات متقابل دارد. از طرفی در بهبود عملکرد ساختمان و از طرف دیگر در تضعیف ساختمان در برابر خرابی پیش‌رونده تأثیر دارد. لذا این‌گونه برداشت می‌شود که بررسی و رفع این تناقض در تصمیم‌گیری‌های بعدی طراحان اهمیت زیادی خواهد داشت.

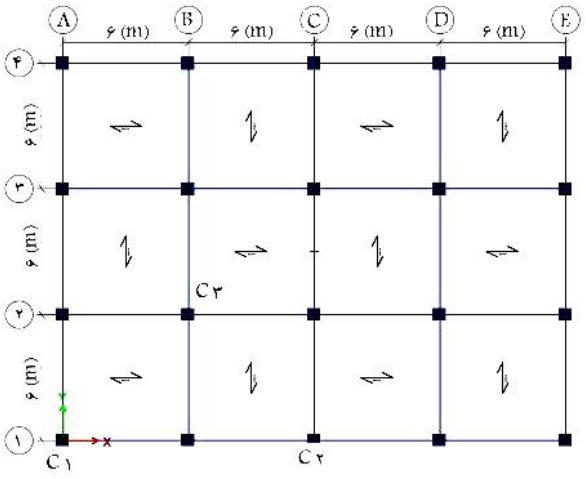
۲. هدف تحقیق

کمیته‌های گوناگونی موضوع خرابی پیش‌رونده را بررسی و بازبینی کرده و استانداردهای خود را برای طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده ارتقاء داده‌اند. این کمیته‌ها شامل وزارت دفاع آمریکا (DOD)[۱]، مدیریت تعمیرات کلی آمریکا (GSA)[۲] و کدهای اروپایی هستند.[۱۰] در پژوهش حاضر با استفاده از آیین‌نامه‌ی GSA به بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های بتنی طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف بر طبق آیین‌نامه‌های ایران پرداخته شده است. ساختمان‌ها پس از طراحی با بارگذاری‌های متداول براساس آیین‌نامه‌های ایران، توسط دو روش تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی برای حالات مختلف حذف ستون تحلیل شده‌اند. به طور خلاصه می‌توان گفت که این پژوهش سعی در بررسی تأثیر شکل‌پذیری و الزامات آیین‌نامه‌یی ایران در خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان‌های قاب خمشی بتنی دارد. رویکرد نوشتار حاضر، تأثیر شکل‌پذیری در رفتار و عملکرد اعضاء سازه در خرابی پیش‌رونده است. در ادامه، جزئیات مدل‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳. روش تحقیق

در پژوهش حاضر از ساختمانی ۵ طبقه با پلان منظم (شکل ۱) که برخی از مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده، استفاده شده است. ساختمان مذکور با قاب خمشی بتنی با کاربری مسکونی برای شهر تهران طراحی شده است. در طراحی ساختمان‌ها از آیین‌نامه‌های مقررات ملی برای بارگذاری و طراحی استفاده شده و بار زلزله نیز براساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ محاسبه و به ساختمان‌ها اعمال شده است.[۱۱و۱۲] ساختمان‌ها ابتدا در نرم‌افزار ETABS طراحی و سپس در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ به‌صورت دقیق مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌سازی شامل میلگردهای طولی، خاموت‌ها و تأثیر خاموت‌ها در محصورشدگی بتن است. در تحلیل‌های دینامیکی نیز با استفاده از نمودارهای هیسترزیس مناسب، آثار کاهش مقاومت و سختی در چرخه‌های ارتعاشی در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، ساختمان‌ها برای ۳ نوع قاب خمشی بتنی مطرح در مبحث نهم مقررات ملی از نظر شکل‌پذیری‌های مختلف طراحی و تحلیل شده‌اند. برای مقایسه‌ی بهتر و بررسی همه‌جانبه‌ی موضوع، از قاب خمشی با شکل‌پذیری کم نیز در



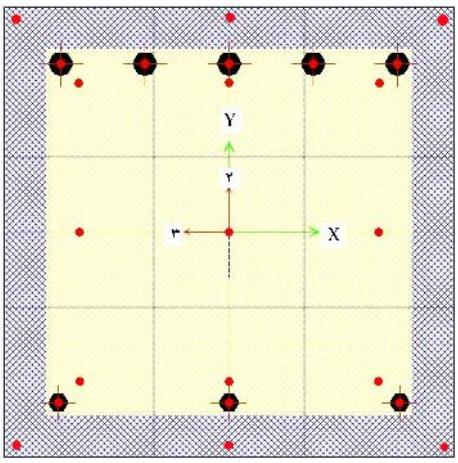
شکل ۱. پلان ساختمان‌های مدل‌سازی‌شده.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مشخصات طراحی ساختمان‌ها.

پارامترهای طراحی	مقدار
بار مرده	۶ (KN/m^2)
بار زنده	۲ (KN/m^2)
ارتفاع طبقات	۳٫۲ (KN/m^2)
طول دهانه	۶ (KN/m^2)
نوع خاک	III
بتن	C۲۵
فولاد	S۴۰۰
ضریب زلزله در شکل‌پذیری کم	۰٫۳ g
ضریب زلزله در شکل‌پذ یری متوسط	۰٫۱۸ g
ضریب زلزله در شکل‌پذیری زیاد	۰٫۱۲ g



شکل ۲. محل قرارگیری فایبرها در مقطع تیرها.

تحلیل و طراحی‌ها بدون تغییر در منطقه‌ی لرزه‌خیزی و فرضیات دیگر استفاده شده است. ساختمان‌های با شکل‌پذیری‌های کم، متوسط، و زیاد در شکل‌ها و نمودارها به ترتیب با علائم اختصاری LD [۳]، MD [۴] و HD [۵] نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش از مفصل فایبر برای تعریف رفتار اندرکنش نیروی محوری و خمش دو محوری در اجزاء قاب استفاده شده است، هر چند که این مفاصل از یک رویکرد متفاوت پیروی می‌کنند، ولی دقت مناسبی در تحلیل‌های دینامیکی دارند. در مفصل فایبر مقطع به یک سری از الیاف محوری، نماینده‌ی سایر نقاط، تفکیک شده است، که طولی از آن در امتداد طول مفصل مذکور گسترش یافته است. بسته به نوع مواد در منطقه‌ی مشخصه‌ی آن، هر فیبر یک رابطه‌ی تنش ـ کرنش دارد. مدل مفصل فایبر در رابطه‌ی مواد غیرخطی در هر یک از فیبرها به طور خودکار اندرکنش تغییرات در امتداد منحنی لنگر ـ چرخش و کرنش محوری خمیری را محاسبه می‌کند. نرم‌افزار برای محاسبات دقیق‌تر، فیبرها را بیشتر فشرده می‌کند. به‌عنوان مثال در شکل ۲، محل قرارگیری فایبرها در مقطع تیرها با نقاط قرمز رنگ نشان داده شده است. از آنجایی که مفاصل فایبر اثرات هیسترزیس غیرخطی را در نظر می‌گیرند، برای تحلیل رفتار دینامیکی ایده‌آل هستند.[۱۳]

در مدل‌سازی‌ها، مشخصات دینامیکی مصالح و سازه شامل میرایی و ضریب اضافه مقاومت در نظر گرفته شده است. همچنین محصورشدگی بتن با استفاده از روابط مندرج تعریف و نمودارهای هیسترزیس کینماتیک و تاکدا به ترتیب برای فولاد و بتن در مدل‌ها مورد استفاده قرارگرفته است.

۴. تحلیل حذف ستون

۱.۴. کلیات

سازه توسط روش مسیر جایگزین بار به ۴ روش تحلیل می‌شود که شامل روش‌های استاتیکی و دینامیکی خطی و غیرخطی می‌شوند. در اینجا برای تحلیل دقیق سازه از روش دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. این تحلیل بر طبق آیین‌نامه‌ی GSA انجام شده است، که بارگذاری مورد استفاده در مرحله‌ی تحلیل خرابی پیش‌رونده با مرحله‌ی طراحی متفاوت است. در مرحله‌ی تحلیل حذف ستون، بارهای ثقلی یکنواختی مطابق رابطه‌ی ۱ به کل سازه اعمال می‌شود. این بارها در روش‌های استاتیکی شامل یک ضریب افزایش دینامیکی نیز می‌شود:

$$G_{ND} = ۱٫۲D + (۰٫۵L \text{ یا } ۰٫۲S) \qquad (۱)$$

برای به‌دست‌آوردن مقاومت نهایی ساختمان‌ها در خرابی پیش‌رونده، نیاز است تا تحلیل پوش‌داون نیز انجام شود. تحلیل پوش‌داون سازه‌ی آسیب‌دیده به ۳ روش صورت می‌گیرد، که شامل روش‌های: پوش‌داون یکنوا (UP)؛ پوش‌داون دهانه‌یی (BP)؛ و پوش‌داون افزایشی دینامیکی (IDP) می‌شود. عوامل اضافه بار محاسبه‌شده از روش‌های مذکور، با حالت فروپاشی مربوط، با هم به‌عنوان میزانی از استحکام سیستم سازه‌یی در خرابی پیش‌رونده ارائه می‌شود.[۱۴]

نتایج تحلیل استاتیکی از طریق نموداری که محور افقی آن جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده و محور قائم آن، عامل اضافه بار است، بیان می‌شود. عامل اضافه بار به‌صورت نسبت بار وارده به بار اسمی تعریف می‌شود. منظور از بار وارده، باری است که در تحلیل پوش‌داون تا فروپاشی ساختمان افزایش می‌یابد و بار اسمی، باری است که آیین‌نامه‌ی GSA برای تحلیل استاتیکی خرابی پیش‌رونده تعیین کرده است. رابطه‌ی ۲، عامل بار بر طبق بارهای تعریف‌شده توسط GSA را نشان می‌دهد:

$$\lambda = \frac{P}{\Omega_N(۱٫۲DL + ۰٫۵LL)} \qquad (۲)$$

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌های مورد بررسی از تحلیل حذف ستون با روش پوش‌داون دهانه‌یی در ۳ مکان مختلف پلان ساختمان استفاده شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی تأثیر جانمایی ستون‌ها در طبقات مختلف، تحلیل حذف ستون‌های C۱، C۲ و C۳ که در شکل ۱ نشان داده شده است، در طبقات ۱، ۳ و ۵ نیز انجام شده است. در واقع در هر ساختمان، ۹ حالت حذف ستون وجود دارد.

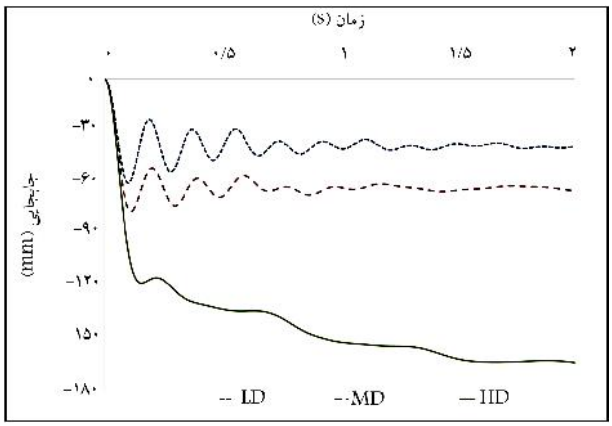
۲.۴. حذف ستون‌های طبقه‌ی همکف

مقاومت سازه در تحلیل‌های دینامیکی با مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده بررسی می‌شود. در تحلیل ستون گوشه‌ی ساختمان‌های طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف، قاب ویژه توانایی بازتوزیع نیروها را نداشته و وارد مرحله‌ی رفتار زنجیری شده است. اما قاب معمولی علاوه بر اینکه به تعادل رسیده است، ۲۰٪ جابه‌جایی کمتر نسبت به قاب متوسط دارد. این نتایج نشان از ظرفیت باربری بیشتر قاب خمشی معمولی است (شکل ۳).

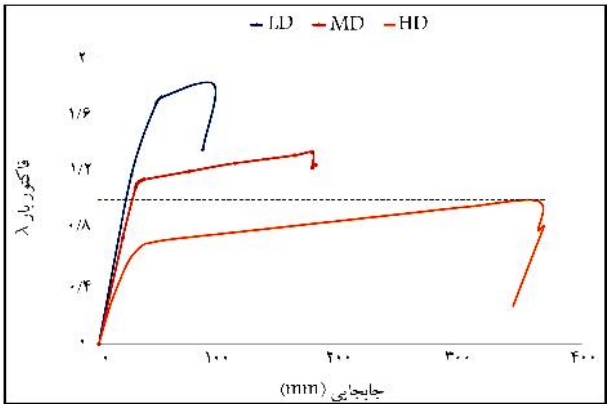
مطابق شکل ۴، نتایج تحلیل استاتیکی نیز نشان می‌دهد که قاب خمشی معمولی در حذف ستون گوشه، ۳۵٪ مقاومت بیشتر در برابر خرابی پیش‌رونده نسبت به قاب خمشی متوسط و ۸۰٪ مقاومت بیشتر در برابر خرابی پیش‌رونده نسبت به قاب خمشی ویژه دارد.

www.SID.ir

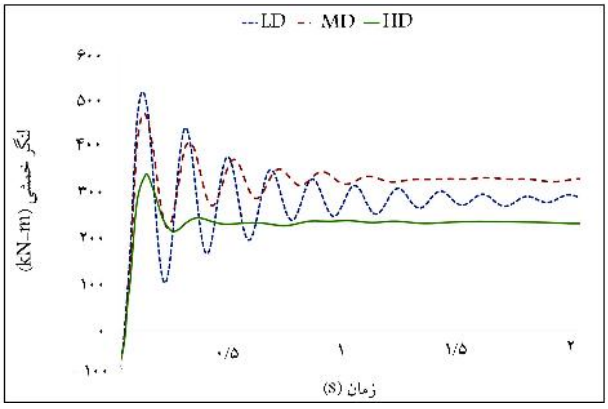
Archive of SID



شکل ۳. جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه.



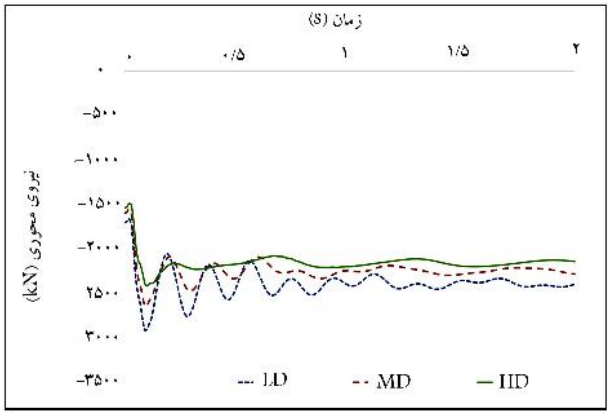
شکل ۴. پوش بار دهانه‌های بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه.



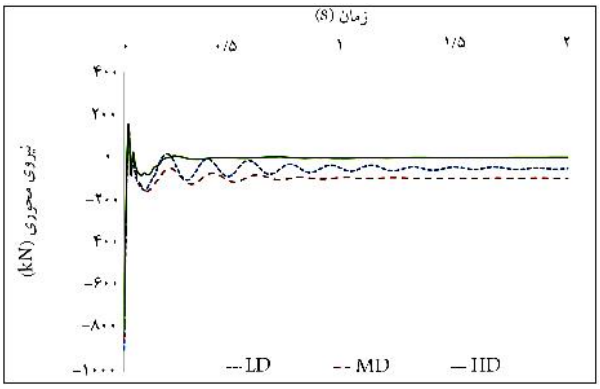
شکل ۵. تغییرات لنگر خمشی تیرهای متصل به ستون حذف‌شده‌ی گوشه.

شکل ۵، تغییرات لنگر خمشی تیر در بر ستون حذف‌شده؛ شکل ۶، تغییرات نیروی محوری ستون مجاور ستون حذف‌شده؛ و شکل ۷، تغییرات نیروی محوری ستون بالای ستون حذف‌شده برای ساختمان‌های طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف را نشان می‌دهند.

با بررسی مکانیزم‌های خرابی ساختمان‌ها و از آنجا که ساختمان با شکل‌پذیری زیاد، ظرفیت تغییرشکل بیشتری نسبت به ساختمان‌های با شکل‌پذیری کم و متوسط دارد، لذا ساختمان با شکل‌پذیری زیاد در روند تشکیل مفاصل خمیری، اجازه‌ی رسیدن به ظرفیت نهایی تغییرشکل را به بیشتر تیرها می‌دهد. در صورتی که در ساختمان‌های با شکل‌پذیری کم و متوسط، انهدام تیرهای بام قبل از رسیدن تیرهای



شکل ۶. تغییرات نیروی محوری ستون مجاور ستون حذف‌شده‌ی گوشه.



شکل ۷. تغییرات نیروی محوری ستون بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه.

طبقات پایین‌تر به تغییرشکل‌های بزرگ اتفاق می‌افتد.

با توجه به شکل ۷، نیروی محوری ستون‌های بالای ستون حذف‌شده بعد از حذف ستون و رسیدن به تعادل، همه تقریباً به یک مقدار می‌رسند، که این امر عملکرد جداگانه‌ی جزءقاب‌ها را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، بارگذاری تیرها در طبقات یکسان است. بنابراین هر طبقه تقریباً یک نیروی یکسانی را بعد از حذف ستون باید تحمل کند، که این امر با ضعیف‌شدن مقاطع تیرها در طبقات بالاتر در تناقض است. تحلیل‌های دینامیکی نشان می‌دهد که ستون‌های بالای ستون حذف‌شده، در حین ارتعاش به کشش می‌افتند. یعنی در حین ارتعاشات دینامیکی، نیروی محوری کششی به آنها وارد می‌شود. با اینکه در نهایت بعد از به تعادل‌رسیدن ساختمان، نیروی محوری ستون‌ها در بیشتر موارد فشاری و در برخی از موارد صفر می‌شود.

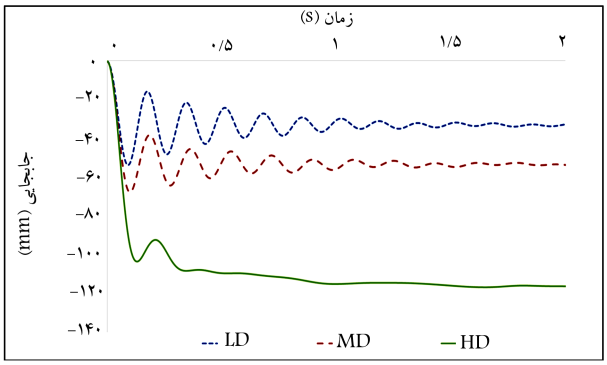
همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، در تحلیل‌های دینامیکی ستون‌های کناری و میانی، در مورد خرابی پیش‌رونده نیز قاب‌های متوسط و معمولی رفتار مناسب‌تری نسبت به قاب ویژه از خود نشان می‌دهند.

۳.۴. ساختمان‌های با ضرایب زلزله‌ی یکسان

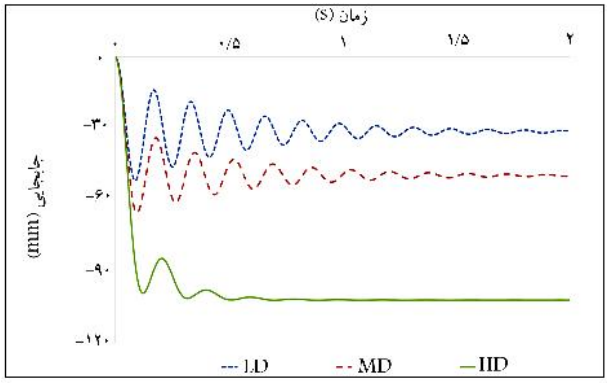
در اینجا برای بررسی اثر فقط ضوابط شکل‌پذیری آیین‌نامه، ساختمان‌ها برای ضریب زلزله‌ی یکسان g ۰٫۱۸ طراحی شده‌اند. اما در آنها ضوابط مربوط به شکل‌پذیری‌های زیاد، متوسط، و کم در هر یک از ساختمان‌ها رعایت شده است. در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، نتایج تحلیل دینامیکی حذف ستون گوشه، حذف ستون‌های کناری و میانی در ساختمان‌های مذکور به ترتیب ارائه شده است.

www.SID.ir

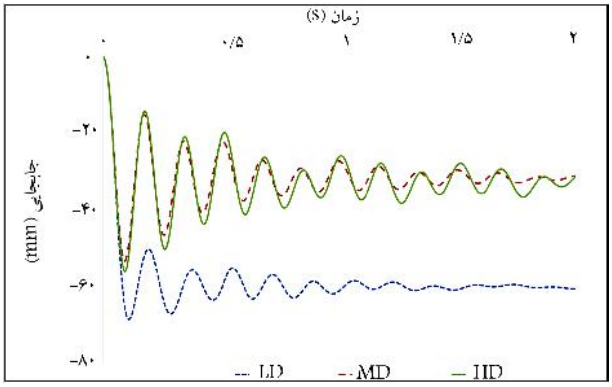
Archive of SID



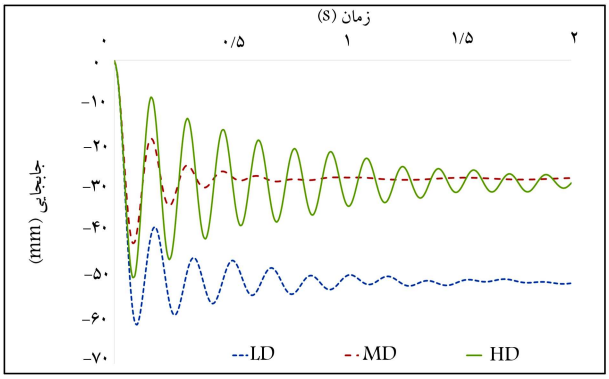
شکل ۸. جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده‌ی کناری.



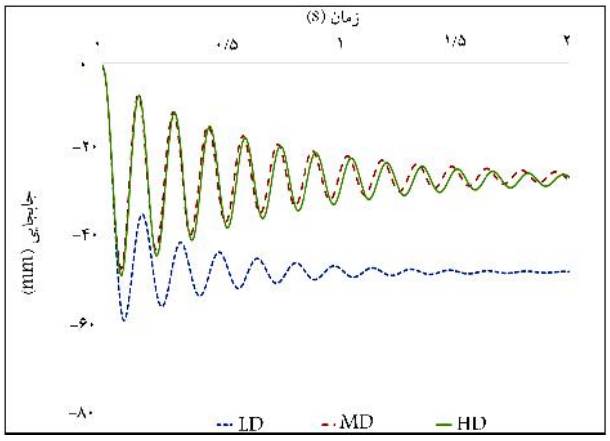
شکل ۹. جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده‌ی میانی.



شکل ۱۰. جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه.



شکل ۱۱. جابه‌جایی بالای ستون حذف‌شده‌ی کناری.



شکل ۱۲. جابه‌جایی گره بالای ستون حذف‌شده‌ی میانی.

با مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که با افزایش شکل‌پذیری، دامنه و مدت زمان ارتعاشات در ساختمان‌ها افزایش می‌یابد و همچنین در سناریوی حذف ستون گوشه نسبت به دو ستون دیگر، افزایش دامنه و مدت زمان ارتعاشات رخ داده است، که این ارتعاشات زیاد در شکل‌پذیری زیاد باعث جابه‌جایی بیشتر در ساختمان می‌شود.

در روند بررسی ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی این مطلب قابل توجه است که مبحث نهم مقررات ملی ضوابطی در مورد طراحی شکل‌پذیر سازه‌ها دارد که باعث افزایش فولاد فشاری در طول تیرها می‌شود. برای مثال، این دو بند بر افزایش فولاد فشاری و همچنین افزایش کلی فولادهای طولی تأکید دارد:

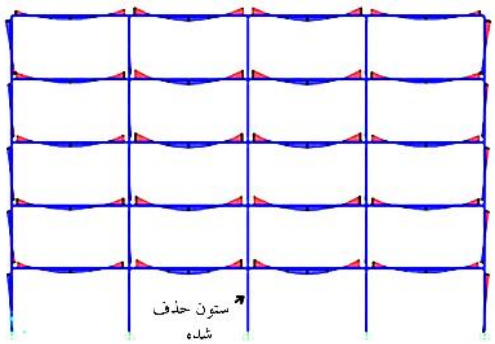
- در تکیه‌گاه‌های عضو خمشی، مقاومت خمشی مثبت هر تکیه‌گاه باید برابر کمینه‌ی نصف مقاومت خمشی منفی همان تکیه‌گاه باشد.
- مقاومت خمشی مثبت و منفی هر مقطع در سراسر طول تیر نباید کمتر از $\frac{1}{4}$ مقاومت بیشینه‌ی تکیه‌گاه باشد.[۱۵]

از طرفی فولاد فشاری تأثیر زیادی در مقاومت مقطع ندارد، بلکه با افزایش عمق محور خنثی از شکست تُرد جلوگیری می‌کند. در پدیده‌ی خرابی پیش‌رونده، افزایش فولاد فشاری زمانی اهمیت پیدا می‌کند که با حذف ستون، لنگر تکیه‌گاه‌ها در بر ستون حذف‌شده از منفی به مثبت تغییر کنند. در این حالت در صورت نبودن فولاد کششی کافی در مقطع، خرابی به راحتی اتفاق می‌افتد. در واقع این ضابطه به طور غیرمستقیم در کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده سازه‌ها نقش دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود، لنگر خمشی تیرها در بر ستون حذف‌شده قبل از حذف ستون منفی بوده و بعد از آن مثبت شده است.

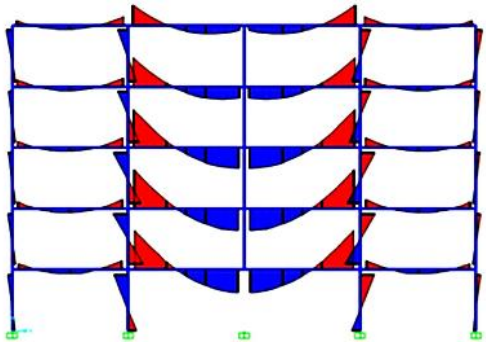
یکی دیگر از ضوابط شکل‌پذیری زیاد، ضابطه‌ی تیر ضعیف ـ ستون قوی است، که در آیین‌نامه‌های طراحی، الزامی به رعایت آن در قاب‌های خمشی متوسط و معمولی وجود ندارد. بنابراین می‌توان تیرها و ستون‌های قاب را برای بارگذاری وارده به آنها طراحی کرد و هنگامی که تغییرشکل جانبی نسبی طبقات بیشتر از حدود آیین‌نامه باشد، برای رسیدن به طرح بهینه با بزرگ‌ترکردن مقاطع تیرها، سختی سازه را افزایش داد. در این صورت است که عملکرد سازه در برابر خرابی پیش‌رونده نیز بهتر می‌شود، چون که مسیر اصلی جایگزین بار در قاب‌های خمشی بعد از حذف ستون از طریق تیرهاست.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۳. لنگر خمشی اعضا قبل از حذف ستون.



شکل ۱۴. لنگر خمشی اعضا بعد از حذف ستون.

۵. بررسی تأثیر جانمایی ستون‌ها

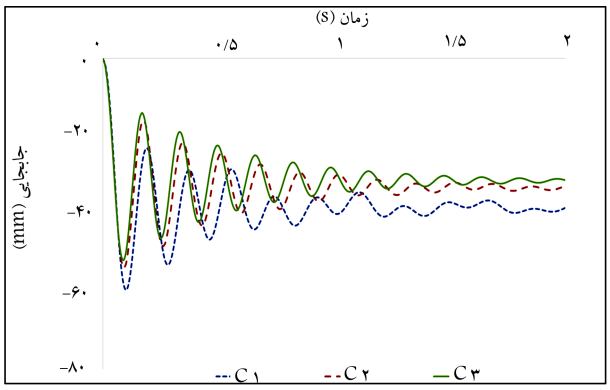
در نمودارهای این بخش برای مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های ستون‌های گوشه، کناری، و میانی از علائم اختصاری C۱، C۲ و C۳ به ترتیب برای مشخص‌کردن ستون‌های گوشه، کناری، و میانی استفاده شده است.

۱.۵. تأثیر جانمایی ستون‌ها در پلان

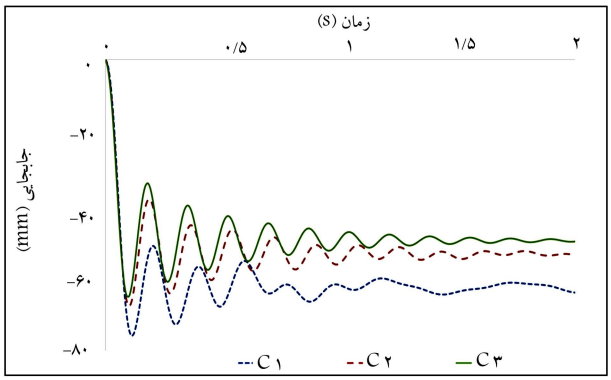
در شکل ۱۵، نتایج تحلیل دینامیکی حذف ستون‌های گوشه، کناری، و میانی طبقه‌ی اول ساختمان با شکل‌پذیری کم با هم مقایسه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که اتصال بالای ستون میانی با بیشینه‌ی جابه‌جایی قائم ۵۱٫۸ میلی‌متر، اتصال بالای ستون کناری با بیشینه‌ی جابه‌جایی قائم ۵۳٫۹ میلی‌متر، و ستون گوشه با بیشینه‌ی جابه‌جایی قائم ۵۹٫۶ میلی‌متر است. در واقع بیشینه‌ی جابه‌جایی در حذف ستون میانی، ۱۵٪ کمتر از ستون گوشه است.

به طورکلی ستون‌های کناری و میانی به دلیل نامعینی بیشتر، مسیرهای بیشتری برای جایگزینی بار دارند. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که بیشینه‌ی جابه‌جایی قائم اتصال بالای ستون میانی ۶۵ میلی‌متر است، که ۲۷٫۵٪ کمتر از بیشینه‌ی جابه‌جایی ستون گوشه است.

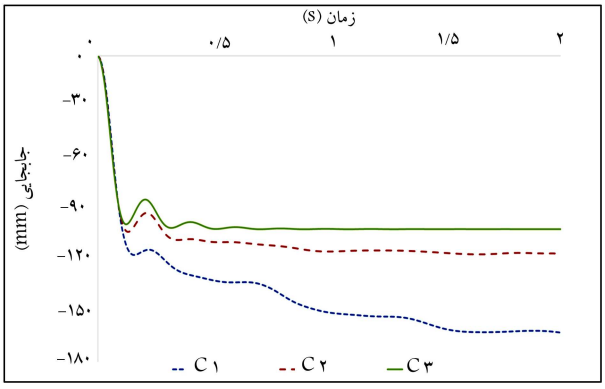
با توجه به نمودار ارتعاشی حذف دینامیکی ستون‌ها در ساختمان با شکل پذیری زیاد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ضعف این ساختمان در برابر خرابی پیش رونده در مقایسه با شکل پذیری‌های کم و متوسط قابل برداشت است. نمودار شکل ۱۷ نشان می‌دهد که ساختمان با شکل پذیری زیاد قابلیت ارتعاشی خود را در حذف ستون‌ها از دست داده و به آستانه خرابی نزدیک شده است.



شکل ۱۵. جابه‌جایی گره بالای ستون‌های گوشه، کناری، و میانی برای شکل‌پذیری کم.



شکل ۱۶. جابه‌جایی بالای ستون‌های گوشه، کناری، و میانی برای شکل‌پذیری متوسط.



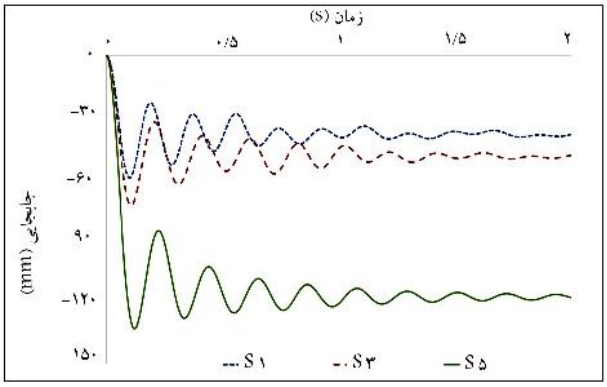
شکل ۱۷. جابه‌جایی گره بالای ستون‌های حذف‌شده‌ی گوشه، کناری، و میانی برای شکل‌پذیری زیاد.

۲.۵. تأثیر جانمایی ستون‌ها در طبقات

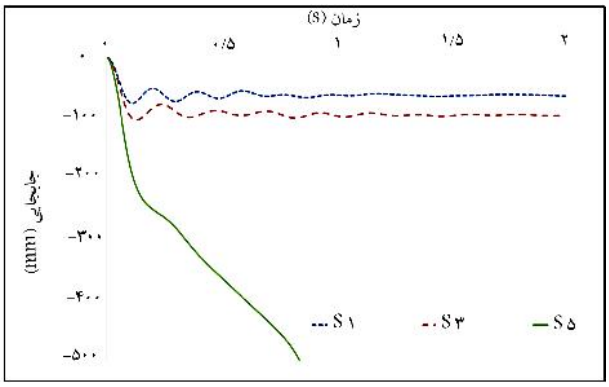
در راهنمای GSA چند سناریوی خاص حذف فقط ستون در طبقه‌ی اول مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که شاید لازم باشد بررسی خرابی پیش‌رونده در کل سازه مورد ارزیابی قرار گیرد و کل سازه در برابر این پدیده ایمن شود. برای نشان‌دادن اهمیت این موضوع و بررسی پتانسیل خرابی پیش‌رونده در طبقات بالاتر، حالات حذف ستون طبقه‌ی اول، در طبقات سوم و پنجم نیز تحلیل شده و نتایج آنها به ترتیب در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ ارائه شده است.

www.SID.ir

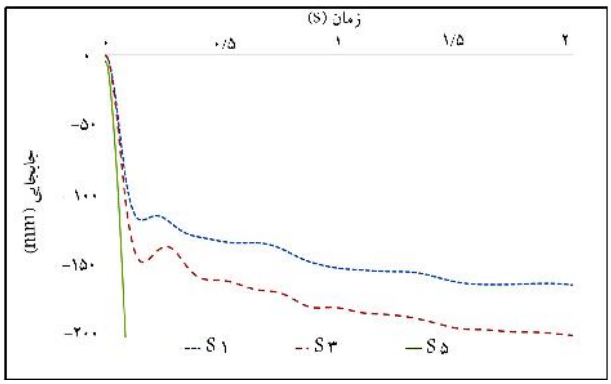
Archive of SID



شکل ۱۸. جابه‌جایی قائم اتصال بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه برای شکل‌پذیری کم.



شکل ۱۹. جابه‌جایی قائم اتصال بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه برای شکل‌پذیری متوسط.



شکل ۲۰. جابه‌جایی قائم اتصال بالای ستون حذف‌شده‌ی گوشه برای شکل‌پذیری زیاد.

۶. نتیجه‌گیری

با بررسی و تحلیل ساختمان‌های طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف در ابعاد مختلف، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. در ارزیابی نتایج تحلیل دینامیکی و استاتیکی حذف ستون ساختمان‌های طراحی‌شده با شکل‌پذیری‌های مختلف، این نتیجه حاصل شده است که پتانسیل خرابی پیش‌رونده در قاب خمشی ویژه خیلی بیشتر از قاب خمشی متوسط و معمولی است. در واقع براساس بارگذاری‌های تعریف‌شده در GSA، قاب خمشی معمولی و متوسط به ترتیب اضافه مقاومتی در حدود ۸۰ و ۳۳ درصد دارند. ولی با توجه به ضوابط راهنمای GSA، قاب خمشی ویژه‌ی طراحی‌شده براساس آیین‌نامه‌های ایران، قادر به تحمل بارهای مربوط به خرابی پیش‌رونده نیست و برخی از حالت‌های حذف ستون در آن منجر به خرابی شده است.

۲. در بررسی مکانیزم‌های خرابی مشخص شده است که خرابی از طبقات بالا شروع می‌شود. یعنی مفاصل خمیری ابتدا در تیرهای طبقات بالا تشکیل می‌شوند و سپس به مقاومت نهایی خود می‌رسند.

۳. ارزیابی جانمایی حذف ستون در طبقات نشان می‌دهد که پتانسیل خرابی پیش‌رونده در طبقات بالاتر افزایش می‌یابد.

۴. یک طراحی لرزه‌یی ویژه، هنگامی که شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با طراحی معمولی دارد، الزاماً عملکرد بهتری تحت فرایند حذف ستون نخواهد داشت. یعنی مشخصه‌ی مهم در مهار خرابی پیش‌رونده، مقاومت یا همان ظرفیت باربری سازه است. لیکن در ارزیابی رفتار غیرخطی سازه‌ها و برای به‌دست‌آوردن پایستگی لازم، شکل‌پذیری سازه بسیار کلیدی است، لذا باید توجه داشت که یک کمینه‌ی شکل‌پذیری برای مقابله با خرابی پیش‌رونده لازم است.

۵. در بررسی‌های انجام‌شده، این نتیجه به‌دست آمده است که آیین‌نامه از ظرفیت باربری قاب خمشی ویژه خیلی کاسته و آن را با کوچک‌کردن ضریب زلزله ضعیف کرده است. با اینکه می‌دانیم قاب خمشی ویژه بهترین عملکرد را در برابر زلزله نسبت به سایر سیستم‌های باربر جانبی دارد، ولی آیین‌نامه با کاهش ضریب زلزله برای شکل‌پذیری‌های زیاد از سطح باربری (مقاومت) ساختمان به شدت کاسته و بر ظرفیت جذب انرژی سازه افزوده است. لیکن معیاری که در خرابی پیش‌رونده اهمیت دارد، ظرفیت باربری سازه است.

پانوشت‌ها

1. department of defense
2. general services administration
3. low ductility
4. medium ductility
5. high ductility

www.SID.ir

Archive of SID

منابع (References)

1. GSA, *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project*, Washington DC (2013).
2. Ren, P., Li, Y. Guan, H. and Lu, X. "Progressive collapse resistance of two typical high-rise RC frame shear wall structures", *Journal of Performance of Constructed Facilities,* **29**(3), pp. 1-9 (2014).
3. Choi, H. and Kim, J. "Progressive collapse-resisting capacity of RC beam–column sub-assemblage", *Magazine of Concrete Research,* **63**(4), pp. 297-310 (March 2011).
4. Parisi, F. and Augenti, N. "Influence of seismic design criteria on blast resistance of RC framed buildings: A case study", *Engineering Structures*, **44**, pp. 78-93 (2012).
5. Kim, J. and Yu, J. "Analysis of reinforced concrete frames subjected to column loss", *Magazine of Concrete Research,* **64**(1), pp. 21-33 (2012).
6. Marchis, A.G. and, Ioami, A.M. "Numerical investigation of progressive collapse resistance for seismically designed RC buildings", *Buletinul Institutului Politehnic DIN IASI*, Publicat de Universitatea Tehnica, Gheorghe Asachi, din Iasi Tomul LX (LXIV), Fasc., **1**, pp. 123-136 (2014).
7. Li, M. and Sasani, M. "Integrity and progressive collapse resistance of RC structures with ordinary and special moment frames", *Engineering Structures*, **95**, pp. 71-79 (2015).
8. Livingston, E. and Sasani, M. "Integrity, robustness and progressive collapse resistance of RC structures designed for different levels of seismic loads", *ASCE, Structures Congress*, pp. 919-930 (2014).
9. Wight, J.K. and MacGregor, J.G., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 5th International Edition, Published by PIE (PS) (2009).
10. NIST, *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*, U.S. Department of Commerce (2007).
11. Ministry of Road & Urban Development, *Seismic Resistant Design of Buildings Code (Standard No. 2800)*, Tehran, 4th Edition (2013).
12. Ministry of Road & Urban Development, *National Building Regulations of Iran (Part 6),* Tehran (2013).
13. SAP2000®Version 16.0., *Analysis Reference Manual*, Computers and Structures Inc., Berkeley (CA, USA) (2013).
14. Khandelwal, K. and El-Tawil, S. "Pushdown resistance as a measure of robustness in progressive collapse analysis", *Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2653-2661 (2011).
15. Ministry of Road & Urban Development, *National Building Regulations of Iran (Part 9)*, Tehran (2013).

www.SID.ir