

تأثیر نوع اتصال در رفتار لرزه‌ای و نحوه گسیختگی قاب‌های فولادی خمشی تیر مرکب

مجتبی فتحی^۱، فرهاد دانشجو^{۲*}، حمیدرضا قنبری رفعتیه^۳

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

۲- استاد گروه سازه دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

fdanesh@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۱۰

چکیده - در این تحقیق به بررسی رفتار دینامیکی قابهای فولادی خمشی دارای تیر مرکب با اتصالات جوشی پرداخته شده است. برای انجام این مطالعه دو نمونه قاب خمشی فولادی یک طبقه دو دهانه با تیر مرکب و بدون تیر مرکب با اتصالات مفصلی و صلب به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS مدلسازی و تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی شتابنگاشت زلزله قرار گرفته و نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در اعضا، دوران مفاصل پلاستیک، ظرفیت استهلاک انرژی، نوع مکانیسم ترک در دال در مجاور اتصال میانی و کناری بررسی شد. نتایج این تحلیلها نشان می دهد که قابهای تیر مرکب دارای اتصال صلب جوشی تیر به ستون دارای کمترین مقادیر ظرفیت استهلاک انرژی، زمان تناوب قاب، دوران مفاصل پلاستیک و تشکیل زود هنگام و وسیع مفاصل پلاستیک در اعضا و اتصالات هستند. همچنین از تحلیل ترک در دالهای این قابها می توان نتیجه گرفت نحوه مکانیسم کلی شکست در اتصال کناری به صورت پیش کشیدگی بتن از گوشه ستون و گسترش آن به صورت مایل به سمت لبه های دال و در اتصال میانی به صورت اثر متمرکز تنش فشاری بر وجه بیرونی بال ستون است.

واژگان کلیدی: تحلیل دینامیکی غیر خطی، قاب فولادی خمشی، مدلسازی المان محدود، تیر مرکب، گسیختگی در دال

۱- مقدمه

در [1] Euro Code 8 قوانینی برای مکانیسم های انتقال نیرو بین دال بتنی و ستون فولادی در حالت لنگر مثبت و منفی وضع شده است. مکانیسم انتقال نیروی موجود در نواحی ممان منفی و مثبت هنگامی که دال بتنی، ستون فولادی را محصور کرده در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق مکانیسم ۱، نیروی فشاری مستقیماً بر روی وجه بیرونی بال ستون اعمال می شود و مطابق مکانیسم ۲، بتن

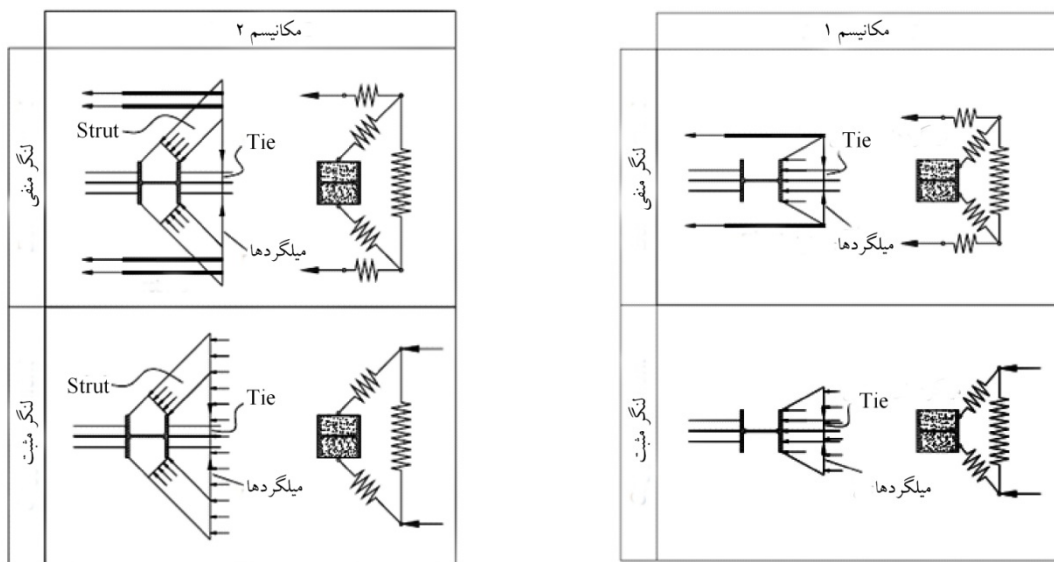
در سالهای اخیر استفاده از سیستم های ترکیبی دال بتنی و تیر فولادی به خاطر بهره گیری از خصوصیات توأم مقاومت و شکل پذیری فولاد در کشش و سختی بتن در فشار و همچنین کاربرد تیرهای مرکب در دهانه های بلند به واسطه ظرفیت خمشی بالای این تیرها رشد چشم گیری داشته است.

منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد برای خاک تیپ II مطابق آیین نامه ایران طراحی شده است. مشخصات تیر و ستونها مطابق شکل ۲ آمده است. مشخصات فولاد از نوع ST37 و بتن از نوع C35 است که توسط 36 عدد گلمیخ از نوع $L80*8$ به تیرهای فولادی متصل شده است. اعضای قاب فولادی همانند اعضای فولادی قاب مرکب انتخاب شده‌اند. اتصال مفصلی با استفاده از ورق جان $PL100*70*8$ و اتصال صلب توسط ورق زیر سری $PL300*100*8$ و ورق روسری $PL300*60*14$ و ورق جان $2PL120*80*10$ ایجاد شده است.

دال فشار را با زاویه 45° درجه از کناره‌ها به جان محصور شده ستون اعمال می‌کند. عملکرد مکانیسم ۱ باعث می‌شود تا اصطکاک تماسی مابین بتن دال و ستون حذف شود و عملکرد مکانیسم ۲ باعث حذف المان تماسی (Hard Contact) مابین بتن دال و قسمت داخلی بال و جان ستون می‌شود. لذا فعال شدن هر دو مکانیسم عملکرد مطلوبتری را از سیستم نشان می‌دهد. [۲]

۲- نحوه مدلسازی قابها

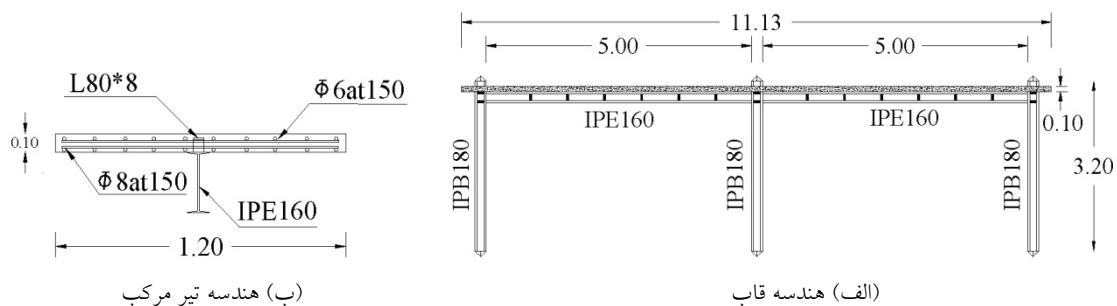
در این تحقیق، قاب مرکب خمشی ویژه با اهمیت زیاد در



(ب) مکانیسم نوع ۲

(الف) مکانیسم نوع ۱

شکل (۱) نحوه انتقال نیروی مابین دال بتنی و ستون فولادی تحت لنگر خمشی مثبت و منفی [۳]

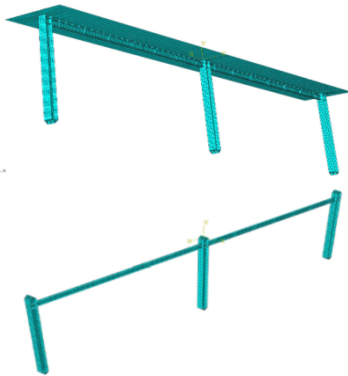


(ب) هندسه تیر مرکب

(الف) هندسه قاب

شکل (۲) قاب خمشی مورد مطالعه

ستون مفصلی و C-9 بیانگر قاب با تیر مرکب با اتصال تیر به ستون صلب است. همچنین Internal معرف اتصال میانی تیر به ستون و External بیانگر اتصال کناری تیر به ستون است.



شکل (۳) مدل سه بعدی قاب خمشی فولادی و مرکب با نرم افزار المان محدود ABAQUS

۳- ارزیابی تحلیل ها

۳-۱- زمان تناوب ارتعاش

شکل ۶ زمان تناوب ارتعاش قاب های مورد مطالعه را نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد که تأثیر اتصال صلب در قابهای فولادی، حدود ۱۵٪ و در قابهای مرکب حدود ۱۰٪ سبب کاهش زمان تناوب شده است.

۳-۲- توزیع مفاصل پلاستیک

شکل ۷ نحوه توزیع مفاصل پلاستیک را برای قاب های مدل سازی شده نشان می دهد. در این شکل شماره های روی قاب، ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک را نشان می دهند. دایره نشان دهنده تشکیل مفاصل پلاستیک در پای ستون، مربع نشان دهنده تشکیل مفصل پلاستیکی در تیر فولادی، لوزی نشان دهنده تشکیل مفصل پلاستیک در اتصال، مثلث نشان دهنده تشکیل مفاصل پلاستیک در ناحیه چشمه اتصال ستون و پنج ضلعی نشان دهنده تشکیل مفاصل پلاستیک در دال بتنی است.

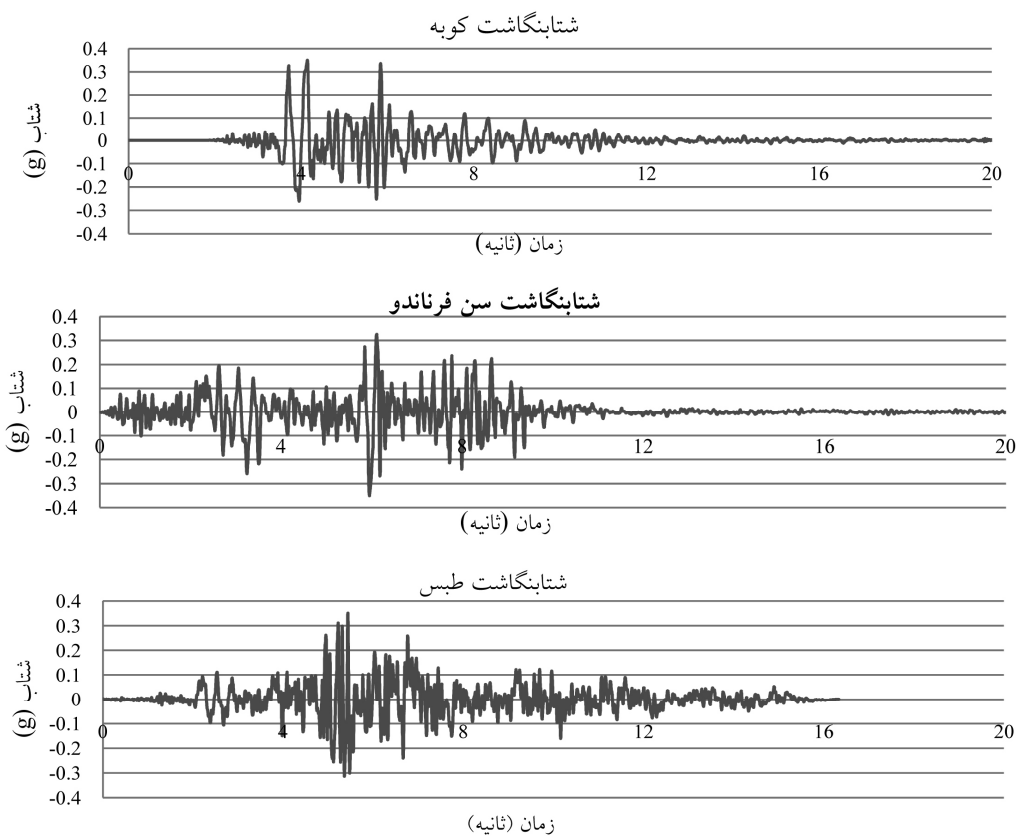
مدل سه بعدی المان محدود برای نرم افزار ABAQUS [۴] در شکل ۳ نشان داده شده است. تمامی قسمت های فولادی و بتنی توسط المانهای پوسته ای سه بعدی چهارگره ای S4R (برای در نظر گرفتن تغییر شکل های برشی عرضی، دوران های بزرگ و کرنش های محدود) و با استفاده از روش انتگرالگیری کاهش یافته (بمنظور کاهش زمان تحلیل و ارائه نتایج دقیقتر برای المانهای که هیچ نوع توزیع بارگذاری در صفحه خمش ندارند) شبیه سازی شده اند.

مدلسازی دال بتنی و آرماتورهای آن، به کمک یک Section از نوع Homogeneous و Shell که به المان های پوسته ای Shell اختصاص یافته و توانائی مدلسازی بتن مسلح شده را فراهم می کند، صورت گرفته است.

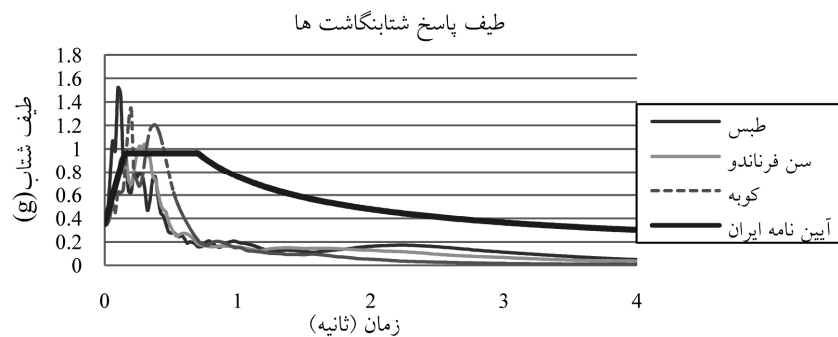
برای مدل کردن اتصال صلب پایه های ستون، از گزینه Ancestry و برای مدل کردن رفتار واقعی بتن از مدل پلاستیسیته تخریب "Smearred Crack" استفاده شده است. همچنین برای اعمال شتابنگاشت زلزله از گزینه Amplitude که شتاب تاریخیچه زمانی زلزله را به صفحه ستون اعمال می کند استفاده شده است. شتابنگاشت های مورد مطالعه عبارتند از طبس، کوبه و سن فرناندو که در شکل ۴ آورده شده اند. در شکل ۵ طیف حاصل از این شتابنگاشت ها با طیف آیین نامه ایران همپایه شده اند.

برای بررسی دقیقتر رفتار قابها به خصوص در مرحله غیر خطی، تحلیلها در بازه های 0.35g, 0.70g, 1.05g, 1.40g و 1.75g انجام شده است. برای هر شتابنگاشت پنج تحلیل و برای هر قاب ۱۵ تحلیل و جمعاً ۶۰ تحلیل بر روی قاب سه بعدی مدل شده با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. نتایج تحلیلها از بیشینه مقادیر حاصل از تحلیلهای دینامیکی تحت شتابنگاشت استخراج شده اند.

برای سادگی، در متن زیر S-0 معرف قاب فولادی با اتصال مفصلی تیر به ستون، S-9 معرف قاب فولادی با اتصال تیر به ستون صلب، C-0 معرف قاب با تیر مرکب با اتصال تیر به



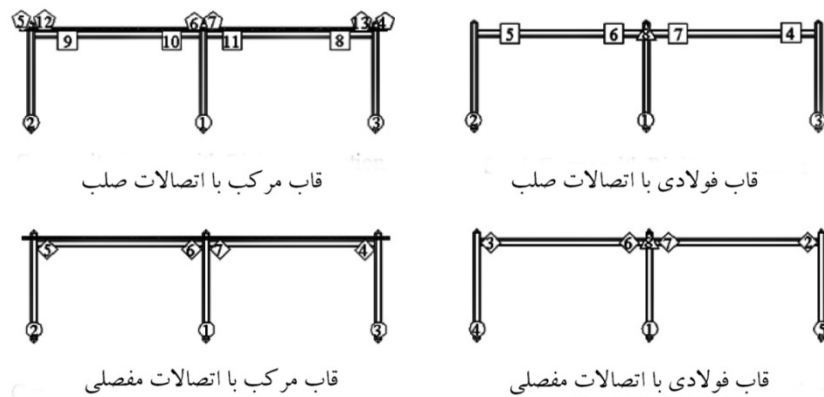
شکل (۴) شتابنگاشتهای مورد استفاده



شکل (۵) مقایسه طیف شتابنگاشت های مورد مطالعه هم پایه شده با طیف استاندارد آیین نامه ایران



شکل (۶) زمان تناوب اصلی ارتعاش قابها



شکل (۷) توزیع مفصل پلاستیک در قابها

در قابهای صلب، لنگر منفی در ناحیه بتن اتصال و وجود صلبیت زیاد ناشی از دورگیری بتن و اتصال جوشی سبب خورد شدگی بتن و اعمال تنشهای ناگهانی به جوشهای ناحیه فوقانی تیر شده و در نهایت موجب گسیختگی جوش و عدم استفاده از ظرفیت کامل استهلاک انرژی و دورانهای ارتجاعی بزرگتر دیگر اعضاء این نوع قابها شود. اما آنچه که پیداست بالاتر بودن ظرفیت نهایی گسیختگی قابهای مرکب مفصلی نسبت به قابهای مرکب صلب است. تشکیل مفصل پلاستیک در دال بتنی نشان دهنده شکل پذیری متوسط (DCM) این نوع قابهاست. زیرا مطابق با استاندارد Euro Code 8 در سازه های مرکب شکل پذیر متوسط، محل تشکیل مفصل پلاستیک در بتن تیر مرکب است ولی در سازه شکل پذیر بالا (DCH) محل تشکیل مفصل پلاستیک در قسمت فولادی تیر مرکب است.

۳-۳- دوران پلاستیک مفصل تیر به ستون

شکل ۸ منحنی های دوران پلاستیک را برای ناحیه چشمه اتصال، اتصال تیر به ستون و در مجموع دوران پلاستیک اتصال تیر به ستون کناری و میانی را تحت بیشینه شتابنگاشتهای طبرس، کوبه و سن فرناندو در بازه $PGA=1.75g$ نشان داده است. با مقایسه این منحنی ها

نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در قابها بدین صورت است که مفاصل ابتدا در پای ستونها و بخصوص در پای ستون میانی تشکیل و سپس به سایر اعضاء، اتصالات و یا دال بتنی گسترش می یابد.

در قابهای فولادی با اتصالات مفصلی و صلب، مفصل پلاستیک شماره ۱ در بازه $PGA=1.05g$ ، مفاصل پلاستیک شماره ۲ تا ۵ در بازه $PGA=1.40g$ و مفاصل پلاستیک شماره ۶ تا ۸ در بازه $PGA=1.75g$ تشکیل می شوند. در قابهای مرکب با اتصالات مفصلی، مفصل پلاستیک شماره ۱ در بازه $PGA=0.70g$ ، مفاصل پلاستیک شماره ۲ و ۳ در بازه $PGA=1.05g$ ، مفاصل پلاستیک شماره ۴ و ۵ در بازه $PGA=1.40g$ و مفاصل پلاستیک شماره ۶ و ۷ در بازه $PGA=1.75g$ تشکیل می شوند. در قابهای مرکب با اتصالات صلب، مفصل پلاستیک شماره ۱ در بازه $PGA=0.70g$ ، مفاصل پلاستیک شماره ۲ و ۳ در بازه $PGA=1.05g$ ، مفاصل پلاستیک شماره ۴ تا ۱۱ در بازه $PGA=1.40g$ و مفاصل پلاستیک شماره ۱۲ و ۱۳ در بازه $PGA=1.75g$ تشکیل می شوند.

در قابهای فولادی مرکب با اتصال مفصل، عمده مفاصل پلاستیک بجای تشکیل در تیرها، بدلیل تمرکز تنش در جوشهای اتصال جان تیر به ستون شکل گرفته اند که نشان از گسیختگی ترد در این نوع قابهاست. این در حالیکه

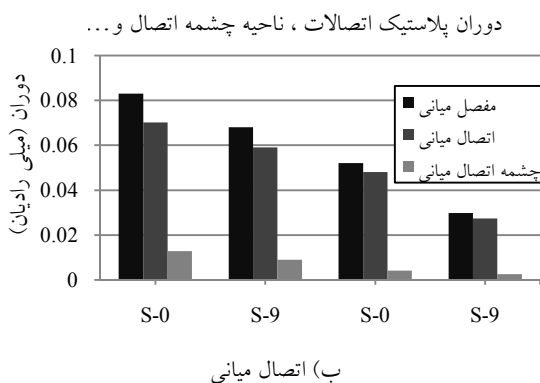
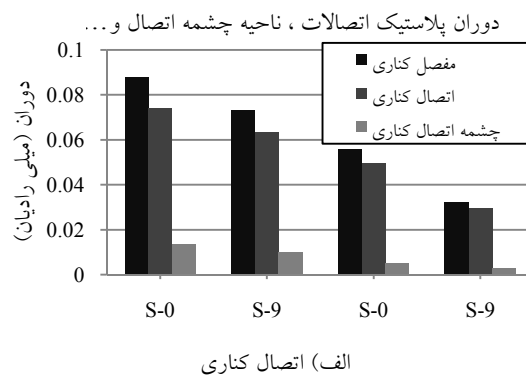
مقدار انرژی مستهلک شده کل قاب، در قابهای صلب و قابهای با تیر مرکب کمتر از قابهای مفصل و یا با تیر فولادی است. با جایگزینی اتصال مفصلی با اتصال صلب و همچنین استفاده از تیر مرکب، استهلاک انرژی غیر ارتجاعی در اتصالات کاهش و در اعضای دیگر به خصوص در تیرها و پای ستونها افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج فوق و منحنی‌های بدست آمده، بیشترین میزان استهلاک انرژی مربوط به قاب‌های فولادی با اتصالات مفصلی است.

با توجه به نتایج فوق، قابهای صلب تیر مرکب، دارای کمترین ظرفیت استهلاک انرژی هستند. زیرا صلیبیت اتصال و سختی اضافی ناشی از دورگیری ستون فولادی توسط دال بتنی، باعث شده تا عمده نیروی زلزله وارده به اجزای قاب به تیر مرکب و به عبارتی به دال بتنی اعمال گردد و در نتیجه ضعف بتن و شکست آن در حالت پلاستیک سبب کاهش ظرفیت استهلاک انرژی این گونه قابها شده که در نهایت به تمرکز تنش ناگهانی در جوش و شکست اتصال جوشی منجر می‌شود. همچنین ضعف قابهای فولادی با اتصال مفصلی در اتصالات و تشکیل سریع این مفاصل، سبب تخریب سریعتر این قابها در مقایسه با قابهای دیگر شده است.

۳-۵- مکانیسم‌های انتقال نیرو در دال بتنی

توزیع تنش اصلی در دال بتنی برای اتصال کناری تیر به ستون در قابهای با اتصال صلب و مفصل در شکل ۱۰ آمده است. با توجه به نتایج فوق می‌توان مشاهده کرد که نحوه مکانیسم بتن به صورت پیش کشیدگی بتن از گوشه ستون آغاز و با زاویه ۴۵ درجه به سمت لبه‌های دال گسترش می‌یابد. بعبارت دیگر می‌توان گفت در اتصال کناری، تأثیر مکانیسم ۲ بیشتر از مکانیسم ۱ است (شکل ۱۱).

می‌توان مشاهده کرد که در قابهای با اتصال صلب و یا قابهای تیر مرکب، نسبت به قابهای با اتصال مفصلی و یا قابهای فولادی، مقدار بیشینه دوران پلاستیک مفاصل تیر به ستون کناری و میانی کمتر است.

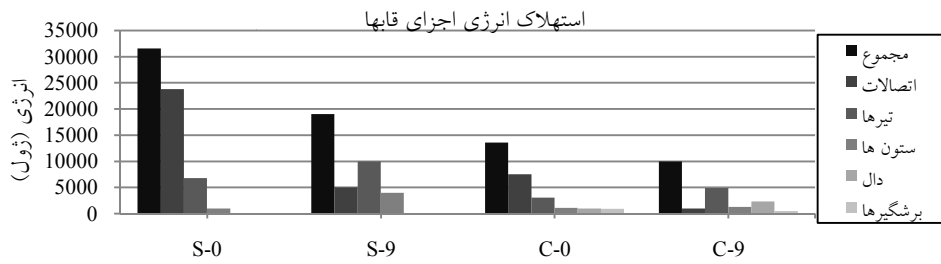


شکل (۸) دوران پلاستیک اتصالات، ناحیه چشمه اتصال و مفاصل تیر به ستون

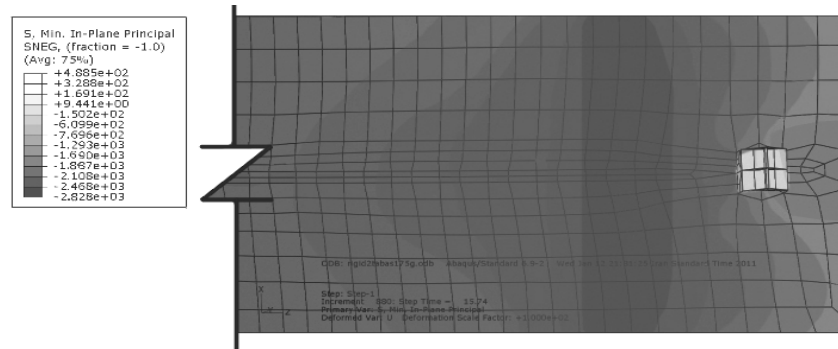
برای اتصال میانی، صلب شدن اتصال در قابهای فولادی حدوداً ۱۵٪ و در قابهای مرکب حدوداً ۱۰٪ مقدار دوران را کاهش می‌دهد. این میزان کاهش دوران پلاستیک برای اتصال کناری ۵٪ از مقادیر فوق کمتر به دست آمده است.

۳-۴- استهلاک انرژی اجزای قابها

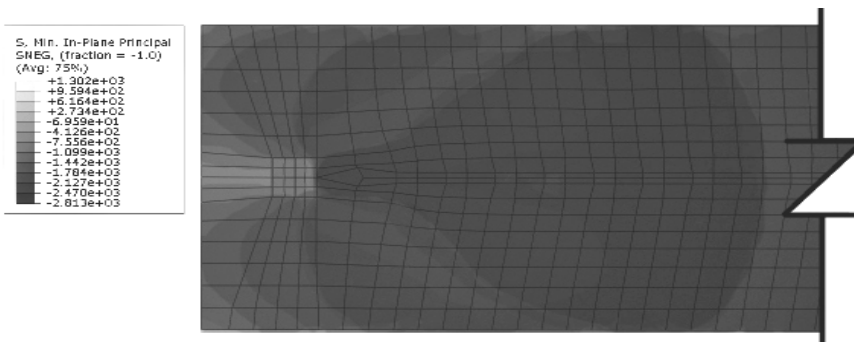
انرژی پلاستیک مستهلک شده به وسیله اجزای سازه قاب‌های مدلسازی شده تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست



شکل (۹) استهلاك انرژی اجزای قابها

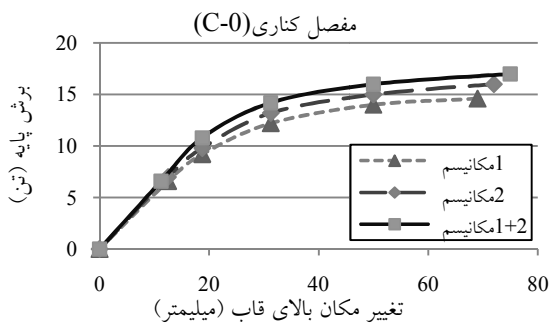


الف) قاب C-9

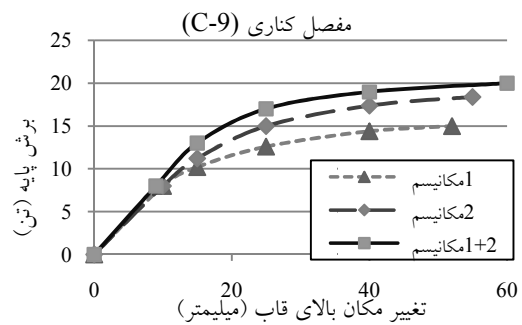


ب) قاب C-0

شکل (۱۰) توزیع تنش اصلی در دال بتنی اتصال کناری برای ترکیب مکانیسم اول و دوم



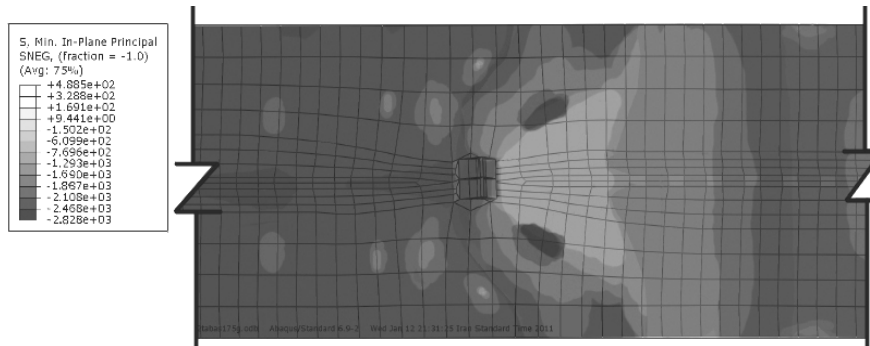
ب) قاب C-0



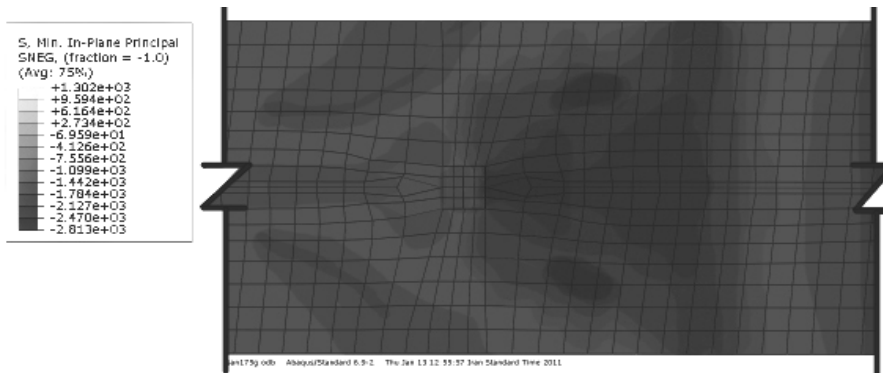
الف) قاب C-9

شکل (۱۱) سهم مشارکت مکانیسم های ۱ و ۲ برای اتصال تیر به ستون کناری

توزیع تنش اصلی در دال بتنی برای اتصال میانی تیر به ستون در قابهای با اتصال صلب و مفصل در شکل ۱۲ آمده است.

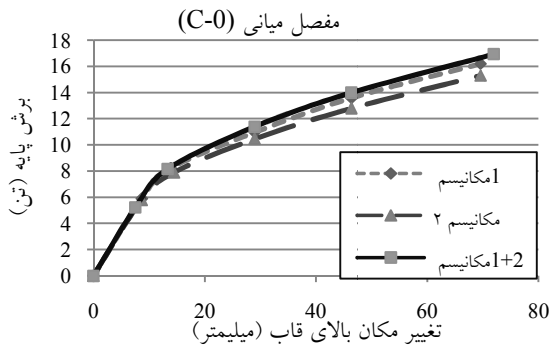


الف) قاب C-9

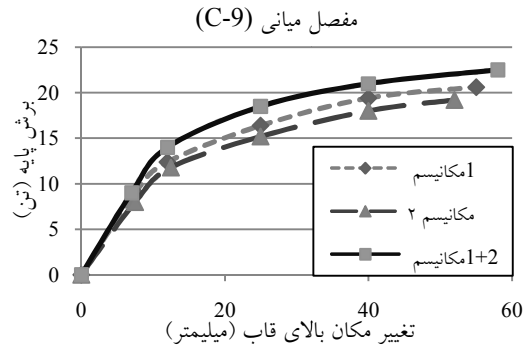


ب) قاب C-0

شکل (۱۲) توزیع تنش اصلی در دال بتنی اتصال تیر به ستون میانی تحت عملکرد ترکیب مکانیسم ۱ و ۲



ب) قاب C-0



الف) قاب C-9

شکل (۱۳) سهم مشارکت مکانیسم های ۱ و ۲ برای اتصال تیر به ستون میانی

بیرونی ستون تقریباً یکنواخت تر و گسترده است. لذا می توان گفت در اتصال میانی، تأثیر مکانیسم ۱ بیشتر از مکانیسم ۲ است (شکل ۱۳).

توزیع تنش فشاری در مدل اتصال صلب بر وجه بیرونی بال ستون فولادی به صورت متمرکز اعمال شده در حالی که در مدل اتصال مفصل این توزیع بر وجه بال

۴- نتیجه گیری

از تحقیق حاضر می توان نتیجه گرفت که دورگیری بتن در اطراف ستون فولادی و اضافه سختی اعمال شده به این ناحیه، تاثیر منفی در سازه های مرکب فولادی با اتصالات صلب جوشی دارد که باعث تسریع در شکل گیری مفاصل پلاستیک در تیر مرکب و گسیختگی های ترد و ناگهانی به خصوص در ناحیه جوش اتصال با ستون می شود و در نهایت موجب می شود که نتوانیم به ظرفیت های استهلاک انرژی بالاتر و دورانهای ارتجاعی بزرگتر سایر اعضاء تیر و ستون دست پیدا کنیم. همچنین صلب شدن اتصال تیر به ستون و اضافه شدن تیر مرکب به قاب های فولادی باعث کاهش زمان تناوب قابها، تسریع در شکل گیری مفاصل پلاستیک در سازه، کاهش دوران پلاستیک در ناحیه اتصال، کاهش تغییر مکان جانبی قابها و کاهش استهلاک انرژی اجزای قاب و افزایش استهلاک انرژی در پایه ستون شده است.

۵- مراجع

- [1] Eurocode 8 (prEN 1998-1:200X). Design of structures for earthquakes resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings 2003. January 2003.
- [2] G. Vasdravellis, M. Valente, C.A. Castiglioni. Behavior of exterior partial-strength composite beam-to-column connections: Experimental study and numerical simulations. Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, P.zza Leonardo Da Vinci 32, Italy. January 2008.
- [3] Walter Salvatore, Oreste S. Bursi, Daniele Lucchesi. Design, testing and analysis of high ductile partial-strength steel-concrete composite beam-to-column joints. Department of Structural Engineering, University of Pisa, Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa, Italy. 18 March 2005.
- [4] ABAQUS/standard user's manual, Version 9.7.2 Providence (RI): Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, Inc.; 2009.

Seismic Behavior and Failure Mechanism of the Steel Moment Frames with Composite Beams

M. Fathi¹, F. Daneshjoo^{2*}, H.R. Ghanbari³

1. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Razi University

2. Professor of Structural Engineering, Tarbiat Modares University

3. Master of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Razi University

fdanesh@modares.ac.ir

Abstract:

This paper examines the dynamic behavior of steel moment-resisting frames with steel-concrete composite beams with welded connections. One story-two bay frames with and without composite beams with rigid and simple connections were modeled with ABAQUS software and analyzed under earthquake accelerations. The distribution pattern of plastic hinges, rotation of plastic beam to column joints, plastic energy dissipation capacities of frame components and crack mechanism of slabs near the interior and exterior connections were studied. The results revealed that the frames with composite beams and welded rigid connections have the lowest values of period, plastic energy dissipation capacity, plastic rotation of joints and early frame mechanism. Failure mechanism in the exterior connection was in the form of concrete pre-tensioning from the starting at the corner of the column stretching in oblique around the edges of the slab. At the interior connections, it was in the form of concentrated compressive stress over the outer flange of the column.

Strength and ductility of steel in tension and compression capacity of concrete in steel-concrete beams (composite beams) make this system suitable for long spans and considerable growth in recent years.

In Euro Code 8, rules are stated for mechanisms between concrete slab and steel column in bending and sagging moment modes. The mechanism in bending and sagging moment regions, where concrete slab has enclosed steel column, is shown in Figure 1. In the first mechanism, the compressive stress is applied directly onto the outer side flange of the column. Whereas in the second mechanism, the concrete slab exerts pressure through a 45 degree angle to the column web. The performance of the first mechanism leads to removal of contact friction between the concrete slab and the column. But the second mechanism leads to removal of contact element (Hard Contact) between the concrete slab and the inner core of the column web and flange. Therefore, activation of both mechanisms manifests a better performance of the system.

Formation the plastic hinges in frames generally start at the column base, particularly at the middle column and then expand to other members, connections and the concrete slab.

In this study, the use of composite beam, instead of steel beam, causes plastic hinges to form in the connections instead of beams. In composite frames with simple connections, due to stress concentration, the major plastic hinges are formed at the welded connections. In these frames, the first plastic hinge is formed earlier than others. But the failure capacity of these frames is higher than rigid ones. In rigid connections, the added rigidity due to enclosure by concrete slab causes initial stiffness for the frame and delays the formation of the first plastic hinge. However, it induces sudden stresses on the welds at the upper part of the beam. Thus will eventually lead to weld rupture and slab failure. This produces early failure in the frames.

The amount of dissipated plastic energy in frames with composite beams and/or rigid connections is lower than that of other frames. By replacing the simple connections with rigid connections and also steel beams with composite beams, plastic energy dissipation will be reduced in the joints. But it will be increase in other members, especially in column bases and beams. In view of the above results, the highest rate of plastic energy dissipation is in steel frames with simple connections.

The results also show that composite frames with rigid connections have the lowest plastic energy dissipation capacity. This is due to the weakness of concrete and its plastic failure that imposes a sudden stress concentration in the weld and causes connection failure.

Distribution of compressive stresses in the rigid connection model is transferred in a concentrated form to the outer face of the column flange. But in the simple connection model, the distribution in the outer flange of the column is more uniform. It can be said that in the case of the middle connection, the direct effect of mechanism 1 is greater than that of mechanism 2.

The concrete surrounding the steel columns in composite beams causes additional stiffness in this area and has a negative effect on the nonlinear behavior of these frames. This accelerates the formation of plastic hinges in composite beams and results in sudden brittle failures, especially at the welded connections. Consequently the structure can not achieve higher energy dissipation. So it can be concluded that composite frames with rigid connections cause a reduction in the natural period and the capacity of plastic energy dissipation and result in failure mechanisms in frame.

Keywords: nonlinear dynamic analysis, steel moment-resisting frame, finite element modeling, steel-concrete composite beam, slab failure