

مدل سازی اتصالات تیر به ستون پیش ساخته بتنی گروتی - تزریقی تحت بارگذاری چرخه‌ای

مهرا آفرین ناصرخاکی^۱، اکبر واثقی^{۲*}، بابک منصوری^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

^۲ دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت: ۹۷/۱۱/۱۰، پذیرش: ۹۹/۹/۲۹، نشر آنلاین: ۹۹/۹/۲۹)

چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از سازه‌های پیش‌ساخته بتنی در صنعت ساختمان، نیاز به انجام مطالعات بر روی این سازه‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. در قاب‌های پیش‌ساخته بتنی، تیر از میان یک دهانه تا میان دهانه کناری به صورت یک‌تکه و پیش‌ساخته تولید می‌شود و بر روی ستون طبقه زیرین قرار می‌گیرد. در ناحیه اتصال تیر به ستون، سوراخ‌هایی در تیر برای عبور میلگردهای ستون تعبیه می‌شوند. میلگردهای انتظار ستون تحتانی از درون این سوراخ‌ها عبور کرده و پس از اجرای طبقه فوقانی درون داکت‌های (Duct) فولادی موج‌دار که در زیر ستون فوقانی تعبیه شده‌اند قرار می‌گیرند و سپس درون تمام سوراخ‌ها و داکت‌ها گروت تزریق می‌شود. عملکرد لرزه‌ای قاب‌های پیش‌ساخته بتنی به رفتار اتصالات تیر به ستون وابسته است و برای طراحی این سازه‌ها لازم است رفتار غیرخطی اتصالات در مدل تحلیلی سازه لحاظ شود. در این مقاله مطالعه‌ای آزمایشگاهی که پیش از این توسط محققین دیگر بر روی اتصالات پیش‌ساخته بتنی انجام شده است معرفی می‌گردد. سپس مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی اتصالات تیر به ستون بتنی ارائه می‌شود و نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از این مدل تحلیل می‌گردند. براساس نتایج این مطالعه، مدل پیشنهادی رفتار هیستریز (Hysteretic) اتصالات پیش‌ساخته را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. این مدل قادر است سختی و مقاومت و همچنین زوال مقاومت و جمع‌شدگی منحنی هیستریز اتصالات را به خوبی شبیه‌سازی کند.

کلیدواژه‌ها: اتصالات تیر به ستون بتنی، سازه‌های پیش‌ساخته گروتی-تزریقی، مطالعه تحلیلی، صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی.

۱- مقدمه

طراحی سازه‌های پیش‌ساخته تدوین شده است (Mazzarolo, ۲۰۱۲). اتصالات بتنی معرفی شده در این دستورالعمل به دو دسته قوی و شکل‌پذیر تقسیم‌بندی می‌شوند. در اتصالات قوی، رفتار چشمه اتصال به صورت الاستیک می‌باشد؛ ولی اتصالات شکل‌پذیر به نحوی طراحی می‌شوند که می‌توانند وارد ناحیه غیرخطی شوند (Ghosh و همکاران، ۱۹۹۷).

طبق دستورالعمل استفاده از سازه‌های پیش‌ساخته ساختمانی نیوزلند (۱۹۹۹) و استاندارد طراحی لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی پیش‌ساخته (۲۰۰۳) یک نوع از اتصالات قاب‌های خمشی شکل-پذیر، اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته بتنی گروتی-تزریقی^۱ است. نشریه FIB 27 مربوط به فدراسیون بین‌المللی بتن (FIB، ۲۰۰۳) نیز در این راستا به نکات و جزئیات طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های پیش‌ساخته پرداخته است. به عنوان مثال شکل (۱) نمایی از اتصال موردنظر را نشان می‌دهد.

استفاده از سازه‌های بتنی پیش‌ساخته در صنعت ساختمان به دلیل اجرا و عمل‌آوری صحیح بتن در محیط کنترل‌شده کارخانه و در نتیجه در نتیجه دارا بودن کیفیت نسبتاً خوب قطعات پیش-ساخته و سرعت اجرای بالا، در کشورهای مختلف رو به افزایش است. در سال‌های گذشته به دلیل عدم شناخت کافی از عملکرد لرزه‌ای اتصالات، این سازه‌ها عموماً برای تحمل بارهای ثقلی طراحی می‌شدند و برای تحمل بارهای لرزه‌ای از سیستم‌های باربر جانبی دیگر مانند دیوار برشی استفاده می‌شده است (Park, ۲۰۰۲؛ PCI Handbook, ۲۰۰۴). در سال‌های اخیر مطالعاتی در کشورهای نیوزلند و ایالات متحده آمریکا جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها و امکان استفاده از آن‌ها به عنوان سیستم باربر لرزه‌ای انجام شده است. براساس مطالعاتی که در نیوزلند بر روی اتصالات سازه‌های پیش‌ساخته انجام گرفت دستورالعملی برای

1. Injection grouted

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹-۲۲۸۳۱۱۱۶-۲۱۰

آدرس ایمیل: mhrnsr1994@gmail.com (م. ناصرخاکی)، vasseghi@iiees.ac.ir (ا. واثقی)، mansouri@iiees.ac.ir (ب. منصوری).

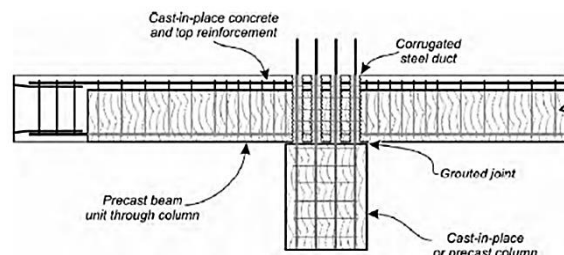
دو سازه بزرگ پارکینگ طبقاتی (شش طبقه و نه طبقه) مدفون در زمین با اعضای پیش ساخته و اتصالات گروتی- تزریقی طراحی و اجرا شده‌اند. لذا با افزایش نیاز و اقبال سازه‌های پیش ساخته برای انبوه‌سازی صنعتی، دستیابی به شناخت کافی از رفتار لرزه‌ای این اتصالات ضروری است چراکه حصول اطمینان از شیوه جدید اجرا و در نتیجه صدور مجوزها و تدوین الزامات مربوطه در دستورالعمل‌ها و آئین‌نامه‌ها می‌بایست براساس این نوع مطالعات صورت پذیرد. در این مقاله، به منظور دستیابی به مدل رفتاری اتصالات پیش ساخته گروتی- تزریقی، مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط سایر محققین بر روی این نوع اتصالات معرفی می‌گردند و مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی رفتار این اتصالات ارائه و صحت‌سنجی می‌شود.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

Restrepo و همکاران (۱۹۹۵)، پنج نمونه اتصالات پیش-ساخته گروتی- تزریقی را مورد آزمایش قرار دادند. این نمونه‌ها شامل یک اتصال صلیبی و چهار اتصال اچ (H) شکل بودند. تمامی اتصالات تحت بار چرخه‌ای قرار گرفتند. نتیجه این پژوهش نشان داد تمامی نمونه‌های مذکور به جز نمونه با اتصال تیر به تیر از طریق میلگرد قطری عملکرد خوب و رضایت بخشی از خود نشان دادند. قابل ذکر است که وجود داکت‌ها و درزهای سرد تأثیر قابل توجهی روی رفتار اتصالات نداشت.

Lin (۱۹۹۹)، در دانشگاه کنتربری^۵ نیوزلند چندین نمونه اتصالات صلیبی تیر به ستون از نوع پیش ساخته گروتی- تزریقی را در مقیاس ۷۰ درصد تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که رفتار این اتصالات مشابه رفتار اتصالات متداول بتنی است.

آزمایش بار جانبی شبه استاتیکی چرخه‌ای بر روی نمونه‌های اتصال ستون‌های بتنی پیش ساخته به پایه بتنی توسط کوپلرهای مکانیکی^۶ و نمونه متداول اتصال ستون به پایه توسط Kim (۲۰۰۰) انجام شد. طبق نتایج این مطالعه، نمونه پیش ساخته در مقایسه با نمونه متداول عملکرد رضایت بخشی داشتند. همچنین این تحقیق مشخص کرد که می‌توان از اتصال پیش ساخته در نواحی لرزه خیز استفاده نمود.



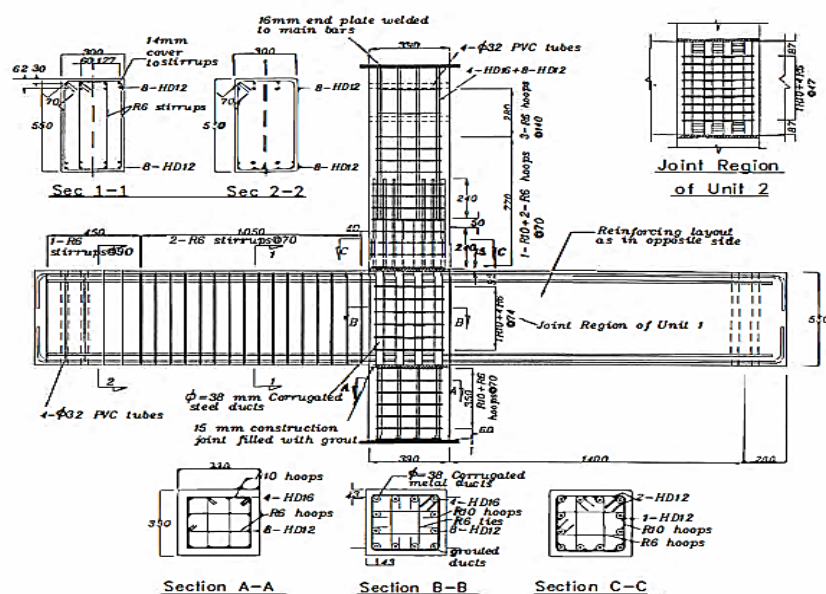
شکل ۱- طرح اتصال گروتی- تزریقی (FIB, ۲۰۰۳)

در اتصالات گروتی- تزریقی تیر به ستون، تیر از میان یک دهانه تا میان دهانه کناری به صورت یک تکه و پیش ساخته تولید می‌شود، به این ترتیب جزئیات میلگردگذاری پیچیده محل اتصال تیر به ستون در کارخانه و تحت شرایط کنترل شده و دقیق اجرا می‌شود. قسمت پایینی تیر که پیش ساخته است روی ستون طبقه زیرین قرار می‌گیرد و به وسیله تکیه‌گاه‌های موقت، پایدار شده و برای مراحل بعدی اجرا آماده می‌گردد. در ناحیه اتصال تیرها، داکت‌هایی و یا سوراخ‌هایی در تیر برای عبور میلگردهای انتظار ستون زیرین از داخل اتصال تعبیه می‌شوند. داکت‌های درون تیرها معمولاً از نوع داکت‌های فولادی موج‌دار^۲ هستند. میلگردهای انتظار ستون زیرین از اتصال عبور کرده و از بالای اتصال بیرون می‌زنند. سپس ستون طبقه بالایی روی اتصال قرار می‌گیرد و میلگردهای انتظار ستون زیرین برای حفظ یکپارچگی اتصال توسط کوپلرهای فولادی گروتی^۳ و یا داکت‌های فولادی موج‌دار در قسمت تحتانی ستون طبقه بالا مهار می‌شوند. در پایان در تمامی درزها و داکت‌ها گروت تزریق می‌شود و سپس دال طبقه اجرا می‌شود. همان‌طور که طبق نشریه کمیته ۵۵۰ انستیتوی بتن آمریکا با جامعه مهندسی عمران آمریکا (ACI 550, ۲۰۰۱) توصیه شده است، رفتار اتصال پیش ساخته باید مشابه رفتار اتصال متداول (روش درجاریز) باشد.

اتصالات پیش ساخته در روش اجرای سریع پل‌های بزرگراهی (ABC)^۴ و بهره‌گیری از سیستم‌های برگشت پذیر مورد آزمایشات سازه‌ای متعدد، مدل سازی و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (Mashal و Palermo ۲۰۱۹؛ واثقی و همکاران، ۱۳۹۹). به دلیل کارایی روش، اهمیت موضوع و همچنین پیچیده تر بودن رفتار لرزه‌ای در ساختمان‌ها، لازم است تا مطالعات عمیقی در این راستا صورت پذیرد. در سال‌های اخیر، در منطقه بیست‌ودو شهرداری تهران نیز

5. University of Canterbury
6. Mechanical couplers

2. Corrugated steel duct
3. Grouted steel sleeves
4. Accelerated Bridge Construction



شکل ۲- طرح یکی از نمونه‌های مطالعه Lin (۱۹۹۹)

برای میلگرد طولی و از میلگرد با مقاومت اسمی ۳۰۰ مگاپاسکال برای میلگرد عرضی استفاده شد. ابعاد تمام نمونه‌ها یکسان بود ولی این نمونه‌ها در جزئیات میلگردگذاری با یکدیگر تفاوت داشتند. شکل (۲) طرح یکی از این اتصالات را نشان می‌دهد. نمونه‌های ۱ و ۲ از نظر آرماتورگذاری تیر و ستون کاملاً یکسان هستند اما در نمونه ۲ نسبت به ۱ در ناحیه اتصال آرماتور عرضی بیشتری به کار رفته است. نمونه‌های ۳ و ۴ تعداد آرماتور عرضی کمتری نسبت به نمونه‌های ۱ و ۲ در ناحیه اتصال دارند. نمونه شماره ۵ از نظر آرماتور عرضی ستون و ناحیه اتصال نسبت به سایر نمونه‌ها متفاوت است. میزان آرماتور عرضی در محل اتصال و همچنین میزان آرماتور موجود در تیر و ستون هر نمونه در جدول (۱) ارائه شده است. مشخصات مکانیکی میلگردها در جدول (۲) و مقاومت بتن و گروت مصرفی در هر یک از نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

۲-۲- بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها پس از طراحی و ساخت تحت بار محوری و بار جانبی چرخه‌ای آزمایش شدند. لازم به ذکر است در ساخت نمونه‌ها، سطوح بتنی پیش از تزریق گروت مضرس^۷ گردیدند. شکل (۳) نحوه استقرار نمونه در قاب عکس‌العمل را نشان می‌دهد. پروتکل بارگذاری جانبی در شکل (۴) نشان داده شده است. نمونه‌ها ابتدا به صورت محوری بارگذاری شدند و سپس تحت بار جانبی چرخه‌ای قرار گرفتند. برای نمونه‌های ۱ و ۲ مقدار بار محوری برابر با $0.43 f_c' A_g$ و برای سایر نمونه‌ها این مقدار برابر $0.1 f_c' A_g$ بود.

در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی برای مشخص شدن نقش کوپلرهای مکانیکی با بررسی نمونه اتصال ستون پیش‌ساخته به پایه با کوپلر توسط Riva (۲۰۰۶) انجام شد. نتایج نشان داد با وجود استهلاک انرژی کم‌تر اتصال با کوپلر نسبت به اتصالات متداول، این اتصال شکل‌پذیری مشابهی با اتصالات متداول دارد.

Popa و همکاران (۲۰۱۵) بر روی اتصال ستون پیش‌ساخته به پایه با داکت موج تحقیق کردند. در این تحقیق جابه‌جایی جانبی چرخه‌ای به نمونه‌های تحت دو بار محوری متفاوت وارد شد. نمونه‌های پیش‌ساخته برای استفاده در مناطق لرزه‌خیز مناسب ارزیابی شدند. در مطالعه Minghini و Tullini (۲۰۱۶) اتصالات پیش‌ساخته ستون به ستون توسط غلاف‌های موج تحت بار محوری و خمش چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این اتصالات شکل‌پذیری خوبی دارند.

Lu و همکاران (۲۰۱۸)، نمونه‌های اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته با بتن انعطاف‌پذیر و آرماتورهای U شکل را تحت بار چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. طبق نتیجه این مطالعه استفاده از این نوع اتصالات در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا مجاز است زیرا عملکرد لرزه‌ای این اتصالات مشابه اتصالات متداول است.

۲-۱- مطالعه آزمایشگاهی Lin

در مطالعه‌ای که Lin (۱۹۹۹) در دانشگاه کنتربری انجام داد، رفتار لرزه‌ای اتصالات پیش‌ساخته بررسی شد. تمام نمونه‌ها به صورت صلیبی شکل با مقیاس ۷۰ درصد ساخته شدند. در ساخت نمونه‌ها از میلگردهای پر مقاومت با مقاومت اسمی ۵۰۰ مگاپاسکال

Lin لغزش آرماتور در تیرها و شکست برشی چشمه اتصال را به- عنوان عوامل تخریب نمونه‌ها در آزمایش معرفی کرد.

جدول ۱- میزان آرماتور موجود در نمونه‌های مطالعه Lin

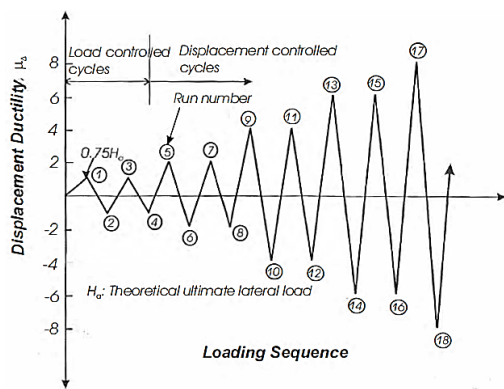
نمونه	میزان آرماتور طولی ستون (%)	میزان آرماتور طولی تیر (%)	میزان آرماتور عرضی در محل اتصال (%)
نمونه ۱	۱/۱۲	۱/۰۹	۰/۷۷
نمونه ۲	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۱۶
نمونه ۳	۱/۱۲	۰/۸۲	۰/۵۱
نمونه ۴	۱/۱۲	۰/۸۲	۰/۵۱
نمونه ۵	۱/۵۸	۱/۰۹	۰/۹۵

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی میلگردها

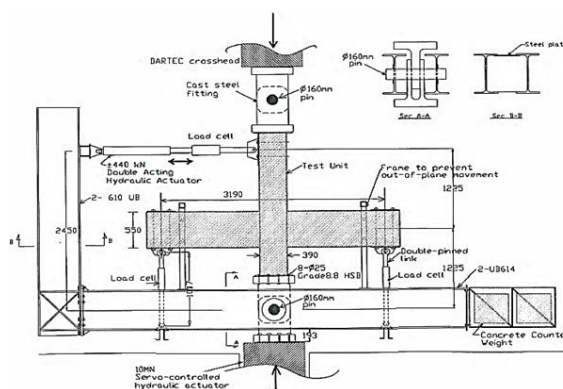
رده	f_y (MPa)	ϵ_y	ϵ_{sh}	f_u (MPa)	ϵ_u	نوع میلگرد
۳۰۰	۳۵۲	۰/۰۰۱۷۶	۰/۰۱۲۳	۵۰۲	۰/۱۱۳	R6
۳۰۰	۳۵۴	۰/۰۰۱۷۷	۰/۰۱۲۰	۴۸۸	۰/۱۲۶	R10
۵۰۰	۵۲۵	۰/۰۰۲۶۳	۰/۰۲۵۷	۶۵۲	۰/۱۶۰	HD12
۵۰۰	۵۱۸	۰/۰۰۲۵۹	۰/۰۱۹۷	۶۶۸	۰/۱۷۵	HD16

جدول ۳- خصوصیات بتن هر نمونه

نمونه	مقاومت گروت (MPa)	مقاومت بتن ستون (MPa)	مقاومت بتن تیر (MPa)
نمونه ۱	۴۹/۸	۳۶/۸	۳۳/۳
نمونه ۲	۴۹/۸	۳۶/۸	۳۳/۳
نمونه ۳	۵۰/۵	۳۵/۰	۳۷/۰
نمونه ۴	۵۵/۰	۳۵/۰	۳۷/۰
نمونه ۵	۵۸/۶	۵۱/۷	۳۳/۲



شکل ۴- پروتکل بارگذاری جانبی (Lin, ۱۹۹۹)

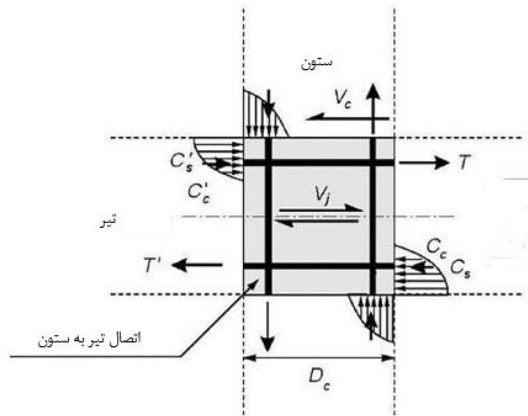


شکل ۳- نمونه مستقر شده در قاب عکس‌العمل (Lin, ۱۹۹۹)

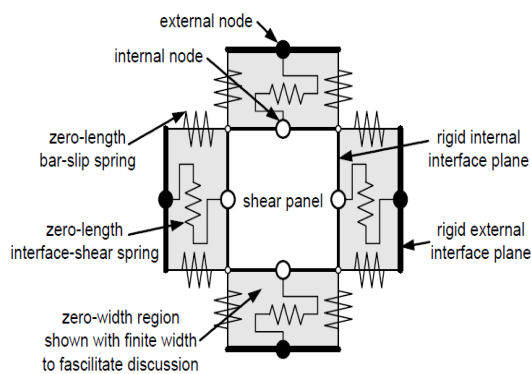
۳- مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی Lin در نرم‌افزار ساینمو استراکت^۸ (۲۰۱۸) انجام شد. این نرم‌افزار قادر است رفتار قاب‌های فضایی را تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی کند (Yu, ۲۰۰۶). در مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی از المان‌های فایبر^۹ برای تیر و ستون استفاده شد. رفتار بتن با استفاده از

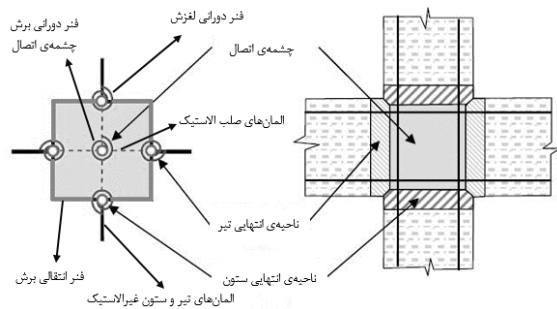
– یک فنر دورانی که در مرکز اتصال قرار می‌گیرد و رفتار برشی چشمه اتصال را شبیه‌سازی می‌کند.^{۱۲}
 فنرهای دورانی لغزش میلگرد و فنرهای انتقال برشی با المان‌های صلب به مرکز اتصال تیر به ستون متصل می‌شوند. شکل (۹) جانمایی المان‌ها در مدل Yu (۲۰۰۶) را نشان می‌دهد. در این تحقیق از این مدل برای مدل‌سازی اتصالات پیش‌ساخته استفاده می‌شود.



شکل ۷- نیروهای اتصال داخلی تیر به ستون (Lowe و همکاران، ۲۰۰۳)

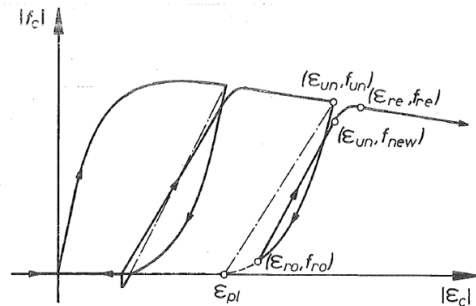


شکل ۸- مدل Lowe برای اتصال تیر به ستون (Lowe و همکاران، ۲۰۰۳)

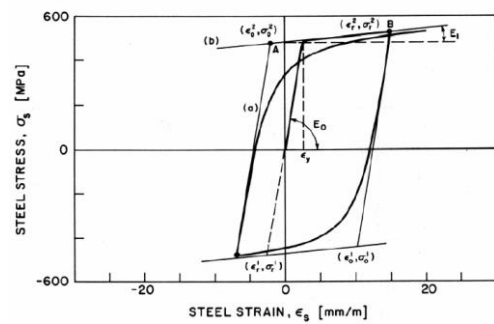


شکل ۹- جانمایی المان‌ها در مدل Yu

مدل Mander و همکاران (۱۹۸۸) و رفتار فولاد با استفاده از مدل Menegotto و Pinto (۱۹۷۳) مدل‌سازی شدند (شکل‌های (۵) و (۶)).



شکل ۵- منحنی تنش- کرنش بتن (Mander و همکاران، ۱۹۸۸)



شکل ۶- منحنی تنش- کرنش فولاد (Pinto و Menegotto، ۱۹۷۳)

۳-۱- مدل رفتاری اتصال

نیروهای داخلی چشمه اتصال در شکل (۷) نشان داده شده است. رفتار اتصال بتنی دارای سه مکانیسم اصلی است که عبارت‌اند از:

- لغزش آرماتورهای تیر و ستون
 - شکست برشی چشمه اتصال
 - لغزش در سطح مشترک چشمه اتصال با تیر و ستون
- مدل تحلیلی Lowe و همکاران (۲۰۰۳) می‌تواند این سه مکانیسم را شبیه‌سازی کند. نحوه مدل‌سازی اتصال در این مدل در شکل (۸) نشان داده شده است. Yu (۲۰۰۶) مدلی بر پایه مدل Lowe و همکاران ارائه داد که شامل اجزا زیر می‌باشد:
- چهار فنر دورانی که در سطح مشترک چشمه اتصال با تیر و ستون قرار می‌گیرند و چرخش مقاطع در اثر لغزش میلگرد را شبیه‌سازی می‌کنند.^{۱۲}
 - چهار فنر انتقالی که برش سطح مشترک را شبیه‌سازی می‌کنند.^{۱۱}

12. Shear panel rotational spring

10. Rotational spring

11. Interface-shear spring

لغزش نهایی ۳۰ برابر لغزش الاستیک می‌باشد. برای به‌دست آوردن دوران، میزان لغزش بر عمق مقطع تقسیم می‌گردد. مقادیر پارامترهای لازم برای مدل‌سازی فنرهای دورانی لغزش تیر و ستون در جدول (۴) ارائه شده است. رفتار چرخه‌ای این فنر با مدل Ibarra و همکاران (۲۰۰۵) مدل‌سازی شده است. پارامترهای K_f و K_d برای فنر دورانی لغزش به ترتیب برابر 0.2 و 0.25 در نظر گرفته شده‌اند. در محدوده افت مقاومت، نسبت سختی به سختی اولیه برابر با ۱ درصد در نظر گرفته شده است.

برای مدل کردن رفتار فنرهای انتقالی برش در سطح مشترک تیر و چشمه اتصال، از مدل Walraven (۱۹۹۴) استفاده شده است. رفتار این فنر در ناحیه خطی با استفاده از مقاومت نمونه مکعبی بتن به‌کار رفته در تیر یا ستون و اندازه بزرگ‌ترین سنگ-دانه بتن تعیین می‌شوند. برای محاسبه تنش برشی در ناحیه الاستیک از رابطه زیر استفاده می‌شود:

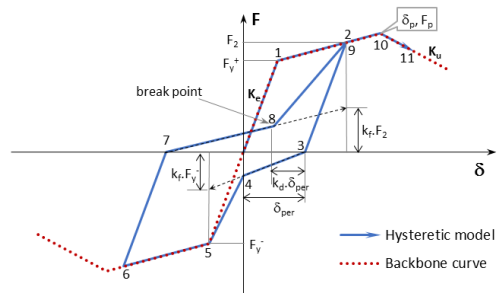
$$\tau_{cr} = \frac{f_{cu}}{30} + [1.8 w^{(-0.8)} + (0.234^{(-0.707)} - 0.2) f_{cu}] S \quad (1)$$

در این رابطه τ_{cr} برابر با تنش برشی در راستای ترک؛ S برابر با جابه‌جایی لغزشی ترک؛ w برابر با پهنای ترک و f_{cu} برابر با مقاومت نمونه مکعبی بتن به‌کار رفته تیر یا ستون است. برای محاسبه تنش برشی تسلیم در این مدل از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$\tau_y = 0.18 v_{cimax} + 1.64 f_{ci} - 0.82 \frac{f_{ci}^2}{v_{cimax}} = \frac{\sqrt{f'_c}}{0.13 + 24w/(a+16)} \quad (4)$$

$$f_{ci} = \rho_v f_y \quad (5)$$

در این روابط τ_y برابر تنش برشی تسلیم؛ v_{cimax} برابر با حداکثر مقاومت برشی ترک؛ f_{ci} برابر تنش نرمال در ترک؛ w برابر با پهنای ترک؛ a برابر با اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه بتن؛ f_y برابر با مقاومت تسلیم فولاد برشی و ρ_v برابر با درصد میلگرد برشی (خاموت) است. در سطح مشترک ستون پیش‌ساخته به تیر پیش‌ساخته، طبق بند ۹-۱۵-۱۳-۲-۵-ب میحت نهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲)، ضریب اصطکاک برابر 0.9 در نظر گرفته شده است و مقاومت فنر انتقالی برش از حاصل ضرب نیروی محوری ستون در این ضریب به‌دست می‌آید. مدل رفتاری فنرهای انتقالی برش به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است. سختی و مقاومت این فنرها در جدول (۵) ارائه شده‌اند.



شکل ۱۰- جمع‌شدگی در منحنی رفتاری Ibarra (Ibarra و همکاران، ۲۰۰۵)

۳-۲- مدل رفتاری فنرهای دورانی در بارگذاری چرخه‌ای

برای شبیه‌سازی رفتار فنرهای دورانی تحت اثر بار چرخه‌ای از مدل رفتاری Ibarra و همکاران (۲۰۰۵) استفاده می‌شود. در این مدل با تعریف یک نقطه شاخص δ^* در نمودار نیرو-جابه‌جایی، میزان جمع‌شدگی منحنی هیستریزس تعیین می‌شود. مختصات این نقطه با استفاده از دو ضریب K_d و K_f مطابق شکل (۱۰) تعیین می‌شود. در این مدل، نیروی تسلیم و نیرو در نقطه شروع افت مقاومت به ترتیب با پارامترهای F_p ، F_y ، سختی اولیه و سختی پس از افت مقاومت به ترتیب با پارامترهای K_u و K_e و جابه‌جایی در نقطه شروع افت مقاومت با پارامتر u_p معرفی می‌شود. ضرایب K_f و K_d با مقایسه منحنی‌های هیستریزس تحلیلی و آزمایشگاهی و به روش آزمون و خطا تعیین می‌شوند. برای محاسبه پارامترهای فنرهای دورانی لغزش، ظرفیت خمشی مقاطع و همچنین مقدار لغزش میلگردها اهمیت دارند. در این تحقیق برای محاسبه ظرفیت خمشی مقاطع از نرم‌افزار ریسپانس ۲۰۰۰ (Bentz ۲۰۰۰) استفاده شده و برای محاسبه میزان لغزش از مدلی که Zhao و Sritharan (۲۰۰۷) ارائه دادند بهره‌گرفته شده است. در مدل Sritharan و Zhao میزان لغزش الاستیک میلگرد با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$(s_y(\text{mm})) = 2.54 \times \left(\frac{d_b(\text{mm})}{8437} \frac{f_y(\text{MPa})}{\sqrt{f'_c(\text{Mpa})}} (2\alpha_s + 1) \right)^{1/\alpha_s} + 0.34 \quad (1)$$

در این رابطه s_y برابر با میزان لغزش الاستیک؛ d_b برابر با قطر میلگرد؛ f_y برابر با تنش تسلیم میلگرد؛ f'_c برابر با مقاومت فشاری بتن و α_s پارامتری است که برابر 0.4 در نظر گرفته می‌شود. میزان

جدول ۴- پارامترهای منحنی رفتاری فنر دورانی لغزش تیر و ستون

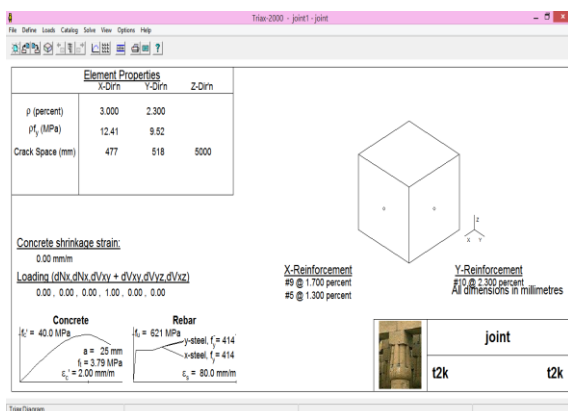
K_e (MN.m)	F_y (KN.m)	F_p (KN.m)	u_p (Rad)	پارامتر	
				نمونه	
۳۴۵	۲۲۱	۲۶۱	۰/۰۱۹۱۸	تیر نمونه ۱ و ۲	
۳۶۱	۳۲۸	۳۲۸	۰/۰۲۷۲۳	ستون نمونه ۱	
۳۵۹	۳۲۶	۳۲۶	۰/۰۲۷۲۳	ستون نمونه ۲	
۲۶۶	۱۷۰	۲۰۲	۰/۰۱۹۱۰	تیر نمونه ۳	
۲۳۰	۲۰۹	۲۲۰	۰/۰۲۷۲۲	ستون نمونه ۳	
۳۴۸	۲۲۲	۲۵۱	۰/۰۱۹۱۰	تیر نمونه ۴ (شاخه مثبت)	
۱۸۳	۱۱۷	۱۴۵	۰/۰۱۹۱۰	تیر نمونه ۴ (شاخه منفی)	
۲۳۱	۲۰۹	۲۲۰	۰/۰۲۷۲۲	ستون نمونه ۴	
۳۴۵	۲۲۱	۲۶۱	۰/۰۱۹۱۸	تیر نمونه ۵	
۳۲۸	۲۹۶	۳۱۱	۰/۰۲۷۰۳	ستون نمونه ۵	

جدول ۵- پارامترهای منحنی رفتاری فنر انتقالی برش

K_v (KN/mm)	F_y (KN)	پارامتر	
		نمونه	
۸۶۶۶	۲۱۶۶	ستون نمونه ۱ و ۲	
۸۶۸۶	۹۱۶	تیر نمونه ۱ و ۲	
۸۳۲۷	۴۷۹	ستون نمونه ۳ و ۴	
۹۴۴۲	۸۳۹	تیر نمونه ۳ و ۴	
۱۱۴۷۷	۷۰۷	ستون نمونه ۵	
۸۶۶۵	۹۱۵	تیر نمونه ۵	

جدول ۶- پارامترهای منحنی رفتاری فنر دورانی چشمه اتصال

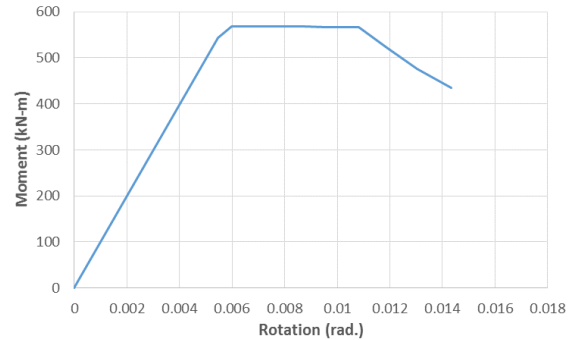
K_y (MN.m)	F_y (KN.m)	F_p (KN.m)	u_p (Rad)	K_u (MN.m)	پارامتر	
					نمونه	
۹۴	۵۶۸	۵۶۸	۰/۰۱۱	-۳۸	نمونه ۱	
۱۰۲	۶۱۳	۶۱۳	۰/۰۰۹	-۴۵	نمونه ۲	
۸۸	۴۸۵	۴۸۵	۰/۰۱۴	-۲۳	نمونه ۳ و ۴	
۱۲۶	۵۴۶	۵۴۶	۰/۰۱۱	-۳۶	نمونه ۵	



شکل ۱۱- تصویری از محیط نرم‌افزار تریاکس ۲۰۰۰

برای محاسبه پارامترهای فنر دورانی چشمه اتصال از نظریه میدان فشاری اصلاح‌شده^{۱۵} (Collins و Vecchio، ۱۹۸۶) استفاده شده است. منحنی رفتار چشمه اتصال با استفاده از نرم‌افزار تریاکس ۲۰۰۰ (Bentz، ۲۰۰۰) و با در نظر گرفتن مقاومت بتن و درصد میلگردهای عمودی و افقی در چشمه اتصال به دست آمده است. تصویری از محیط نرم‌افزار در شکل (۱۱) و منحنی ظرفیت چشمه اتصال یکی از نمونه‌ها در شکل (۱۲) ارائه شده است. مقادیر پارامترهای فنرهای چشمه اتصال در جدول (۶) ارائه شده‌اند. رفتار این فنر تحت بار چرخه‌ای نیز با استفاده از مدل Ibarra و همکاران (۲۰۰۵) مدل شده است. پارامترهای K_d و K_f برای این فنر به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است.

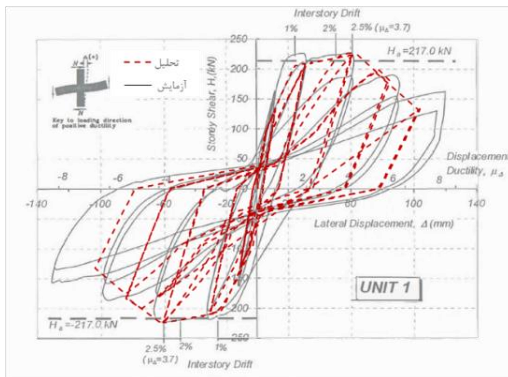
شبیه‌سازی شده است. در شکل‌های (۱۴)، (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) منحنی‌های هیستریزس حاصل از آزمایش و تحلیل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، مدل رفتاری اتصال با تقریب خوبی سختی را پیش‌بینی می‌کند. جمع‌شدگی و افت مقاومت و سختی باربرداری نیز به خوبی پیش‌بینی شده‌اند. همچنین در تمام اتصالات مقاومت حاصل از نتایج تحلیل به نتایج آزمایش نزدیک است.



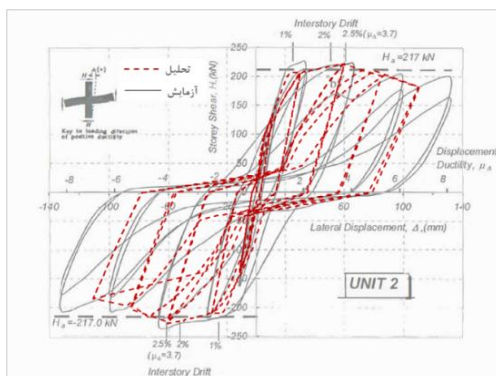
شکل ۱۲- منحنی ظرفیت چشمه اتصال نمونه شماره ۱

۴- تحلیل نمونه‌های آزمایشگاهی و صحت‌سنجی مدل تحلیلی

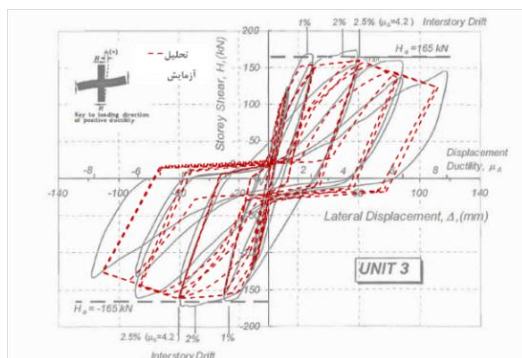
شکل (۱۳) مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش (شکل (۳))، پای ستون با تکیه‌گاه مفصلی و انتهای تیرها با تکیه‌گاه غلتکی مدل‌سازی شد. ناحیه اتصال با استفاده از مدل γ_u و پارامترهایی که در جداول (۴) تا (۶) ارائه شده‌اند مدل‌سازی شد و برای مدل‌سازی تیر و ستون از آلمان فایبر استفاده گردید. بارگذاری در بالای ستون ابتدا با اعمال بار محوری و سپس بار جانبی به صورت چرخه‌ای انجام شد.



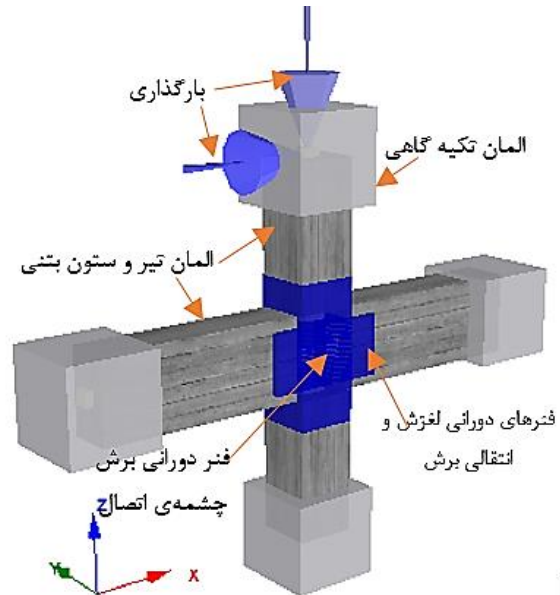
شکل ۱۴- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی با نتایج آزمایش- نمونه ۱



شکل ۱۵- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی با نتایج آزمایش- نمونه ۲

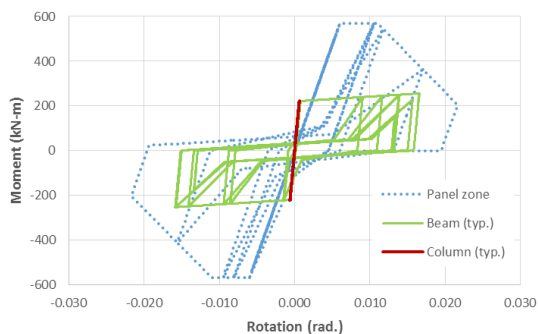


شکل ۱۶- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی با نتایج آزمایش- نمونه ۳



شکل ۱۳- مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایشگاهی

مطابق نتایج آزمایش، در نمونه‌های ۱ و ۵ لغزش آرماتور در تیرها رخ می‌دهد ولی عامل شکست این اتصالات زوال مقاومت برشی چشمه اتصال است. مدل تحلیلی قادر به پیش‌بینی این دو رخداد بوده است. در سایر نمونه‌ها، عامل شکست اتصالات لغزش آرماتورها در محل تیر بوده که این رخداد نیز در مدل تحلیلی



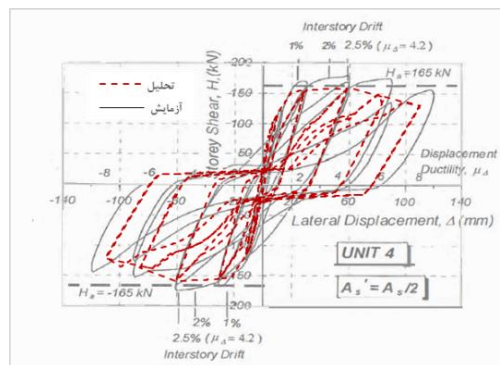
شکل ۱۹- رفتار هیستریزس فنرهای دورانی - نمونه شماره ۱

در نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ کاهش مقاومت ابتدا در فنرهای دورانی حدفاصل چشمه اتصال با تیر رخ می‌دهد و عامل شکست در این نمونه‌ها لغزش میلگردهای طولی تیر می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

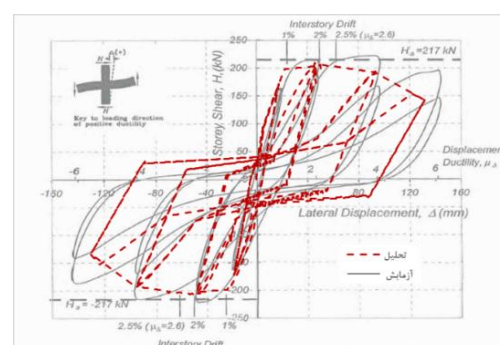
در این پژوهش، به معرفی مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های صلیبی اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته بتنی تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای پرداخته شده است. پس از معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی، روشی برای مدل‌سازی و تحلیل این نوع اتصالات ارائه و مدل پیشنهادی با نتایج مطالعه آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- مدل تحلیلی با تقریب خوبی رفتار هیستریزس نمونه‌های آزمایشگاهی را از مهم‌ترین عوامل، سستی، جمع‌شدگی و افت مقاومت را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند.
- در نمونه‌هایی که بر اثر شکست چشمه اتصال خراب شده‌اند، مود شکست در مدل تحلیلی به‌درستی پیش‌بینی شده است.
- مدل ارائه‌شده در پیش‌بینی مود شکست نمونه‌هایی که بر اثر لغزش آرماتورها دچار افت مقاومت شده‌اند نیز موفق بوده است.
- به صورت کلی مدل تحلیلی رفتار اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته بتنی گروتی-تزیقی را با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند.



شکل ۱۷- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی با نتایج

آزمایش - نمونه ۴



شکل ۱۸- مقایسه منحنی هیستریزس تحلیلی با نتایج

آزمایش - نمونه ۵

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در تمام نمونه‌ها، فنرهای برشی در حدفاصل چشمه اتصال با تیر و ستون در محدوده خطی باقی می‌مانند و پاسخ غیرخطی نمونه‌ها ناشی از رفتار غیرخطی فنرهای دورانی چشمه اتصال و فنرهای دورانی چشمه اتصال با تیرها می‌باشد. همچنین در تمام تحلیل‌ها، فنرهای دورانی حدفاصل چشمه اتصال با ستون‌ها در محدوده خطی باقی می‌مانند. این نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر ترک خوردن چشمه اتصال، میلگردهای طولی تیرها دچار لغزش می‌گردند ولی لغزش در میلگردهای ستون‌ها رخ نمی‌دهد. شکل (۱۹) رفتار هیستریزس فنر دورانی چشمه اتصال و فنرهای دورانی حدفاصل چشمه اتصال با تیر و ستون را برای نمونه شماره ۱ نشان می‌دهد. در این شکل رفتار غیرخطی چشمه اتصال و فنر دورانی تیر و همچنین رفتار خطی فنر دورانی ستون کاملاً مشهود است. در این نمونه، چشمه اتصال در دوران بیش از ۰/۱۱ رادیان دچار کاهش مقاومت و شکست می‌گردد درحالی‌که رفتار غیرخطی فنر دورانی تیر به‌صورت پایدار و بدون کاهش مقاومت می‌باشد. پاسخ غیرخطی نمونه شمار ۵ همانند نمونه شماره ۱ است و عامل شکست در این نمونه نیز افت مقاومت در چشمه اتصال است.

for precast structures under reverse cyclic loading", Engineering Structures, 2018, 169, 131-140.

Mander JB, Priestley MJN, Park R, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, 1988, 114 (8), 1804-1826.

Mashal M, Palermo A, "Low-damage seismic design for accelerated bridge construction", Journal of Bridge Engineering, 2019, 24 (7), 04019066.

Mazzarolo E, "Analysis and development of an innovative prefabricated beam-to-column joint", PhD Thesis, University of Trento, Italy, 2012.

Menegotto M, Pinto PE, "Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending", Proc of Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, International Association for Bridge and Structural Engineering, Lisbon, Portugal, 1973.

New Zealand Concrete Society and the New Zealand Society for Earthquake Engineering", Guidelines for the use of structural precast concrete in buildings", Christchurch, University of Canterbury, 1999.

Park R, "Seismic design and construction of precast concrete buildings in New Zealand", PCI Journal, 2002, 47 (5), 60-75.

PCI Handbook Committee, "PCI design handbook 6th edition (precast and prestressed concrete)", Chicago, US, 2004.

Popa V, Papurcu A, Cotofana D, Pascu R, "Experimental testing on emulative connections for precast columns using grouted corrugated steel sleeves", Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13, 2429-2447.

Restrepo JI, Park R, Buchanan AH, "Tests on connections of earthquake resisting precast reinforced concrete perimeter frames of buildings", PCI Journal, 1995, 40 (4), 44-61.

Riva P, "Seismic behaviour of precast column-to-foundation grouted sleeve connections", Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction, 2006, 121-128.

SeismoSoft Ltd, "SeismoStruct. 2018", Pavia, Italy, 2018.

Tullini N, Minghini F, "Grouted sleeve connections used in precast reinforced concrete construction-experimental investigation of a column to column joint", Engineering Structures, 2016, 127, 784-803.

Vecchio FJ, Collins MP, "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", ACI Journal, 1986, 83 (22), 219-231.

Walraven J, "Rough cracks subjected to earthquake loading", Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (5), 1510-1524.

Yu W, "Inelastic modeling of reinforcing bars and blind analysis of the benchmark tests on beam-column joints under cyclic loading", Master's Thesis, ROSE School, Pavia, Italy, 2006.

Zhao J, Sritharan S, "Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures", ACI Structural Journal, 2007, 104 (2), 133-141.

۶- فهرست علائم

a	اندازه بزرگترین سنگدانه بتن
db	قطر میلگرد
f_c'	مقاومت فشاری بتن
f_{ci}	تنش نرمال در ترک
f_{cu}	مقاومت نمونه مکعبی بتن
F_p	نیروی در نقطه شروع افت مقاومت در مدل Ibarra و همکاران
f_u	مقاومت نهایی فولاد
f_y	مقاومت تسلیم فولاد
F_y	نیروی تسلیم در مدل Ibarra و همکاران
K_d	ضریب جابه‌جایی نقطه شاخص در مدل Ibarra و همکاران
K_e	سختی اولیه در مدل Ibarra و همکاران
K_f	ضریب مقاومت نقطه شاخص در مدل Ibarra و همکاران

۷- مراجع

وائقی ا، منصوری ب، رویین تن ص، "مطالعه امکان‌سنجی سیستم سازه‌ای مرکزگرا برای پایه متداول پل‌های بزرگراهی در کشور"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۱۳۹۹، ۵۳ (۱۰)، ۳۰-۱۵.

دفتر مقررات ملی ساختمان، وزارت راه و شهرسازی، "مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نهم، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه"، ویرایش چهارم، تهران، ایران، ۱۳۹۲.

ACI-ASCE Committee 550, "Emulating cast-in-place detailing in precast concrete structures, 550.1R-01", Farmington Hills, US, 2001.

Bentz EC, "Response-2000. 1.0.5", Toronto, Canada, 2000.

Bentz EC, "Triax-2000. 1.0.0", Toronto, Canada, 2000.

FIB, "Seismic design of precast concrete building structures, FIB27", Lausanne, Switzerland, 2003.

Ghosh SK, Nakaki SD, Krishnan K, "Precast structures in regions of high seismicity: 1997 UBC design provisions", PCI Journal, 1997, 42 (6), 76-93.

Ibarra LF, Medina RA, Krawinkler H, "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34, 1489-1511.

Kim YM, "A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections", Masters Thesis, University of Texas, Austin, US, 2000.

Lin CM, "Seismic behaviour and design of reinforced concrete interior beam column joints", PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1999.

Lowes LN, Mitra N, Altoontash A, "A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames", Prepared by Pacific Earthquake Engineering Research Center California, University of California, Berkeley, US, 2003.

Lu C, Dong B, Pan J, Shan Q, Hanif A, Yin W "An investigation on the behavior of a new connection

EXTENDED ABSTRACT

Analytical Modeling of Precast Concrete Grouted Beam-column Joints under Cyclic Load

Mehrafarin Naserkhaki, Akbar Vasseghi*, Babak Mansouri

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran 02122830830, Iran

Received: 30 January 2019; Accepted: 20 December 2020

Keywords:

Precast concrete, Frame structure, Beam-column joints, Grouted sleeves, Analytical model, Experimental verification.

1. Introduction

Precast concrete frame structures are in many respects superior to the traditional cast-in-place concrete structures. The structural components are built with good quality assurance in a controlled environment, and building construction requires less site work and can be done at a rapid pace. However, the seismic performance of these structures is significantly affected by the behavior of beam-column connections. Fig. 1 shows a typical connection in which the column reinforcements are passed through corrugated steel ducts (sleeves) within the precast beam. The moment resisting connection is finally formed by grouting the sleeves after the top column is set in place. In this paper, a simplified model is presented to simulate the behavior of such joints under cyclic loading conditions. The analytical model is verified with experiments that were carried out on five large-scale specimens representing such connections.

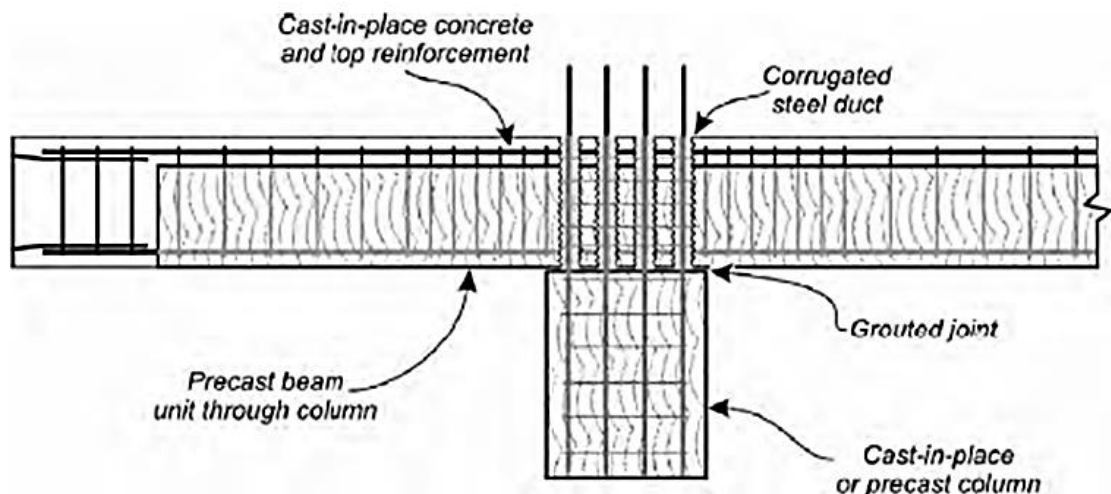


Fig. 1. Precast concrete grouted beam-column joint

* Corresponding Author

E-mail addresses: mhrnsr1994@gmail.com (Mehrafarin Naserkhaki), vasseghi@iiees.ac.ir (Akbar Vasseghi), mansouri@iiees.ac.ir (Babak Mansouri).

2. Methodology

The precast concrete joint model should simulate the failure mechanisms which may occur when the joint is subjected to cyclic loading. These mechanisms include:

- Joint shear failure within the panel zone,
- Bar-slip occurring at beams and columns interface with the joint,
- Shear failure at the joint's interface with beam and column.

In this paper, the joint is modeled using the method presented in Naserkhaki's research (2018). Fig. 2 shows the analytical model of the joint. The following elements are used to simulate the three possible failure mechanisms:

- Four rotational springs are located at the interface of the joints with beams and columns that simulate the rotational response due to bar-slip.
- Four transitional springs that simulate the shear response at the interface of joint with beams and columns.
- A rotational spring located at the center of the joint which simulates the shear behavior of the panel zone.

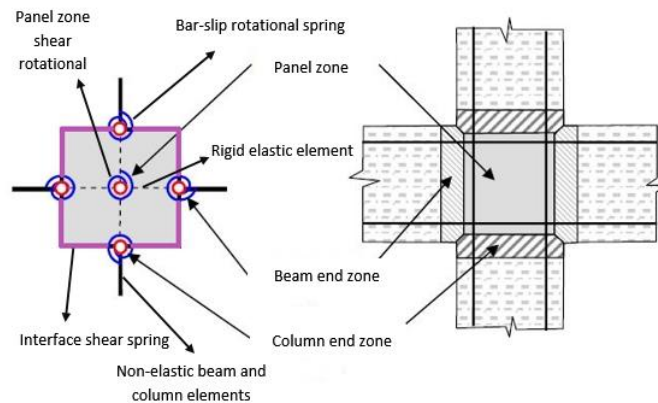


Fig. 2. Analytical model of the beam-column joint

2.1. Experimental study

In the experimental study conducted by Lin at the University of Canterbury (1999), the seismic behavior of several precast concrete joints was investigated. Specimens in this study were grouted precast concrete beam-column joints with a scale of 70%. Fig. 3 shows the test setup, and Fig. 4 shows details of one of the specimens. The specimens were first loaded axially and then subjected to cyclic lateral loads. In this paper, the test results from five specimens with various details and axial loads are used to verify the analytical model.

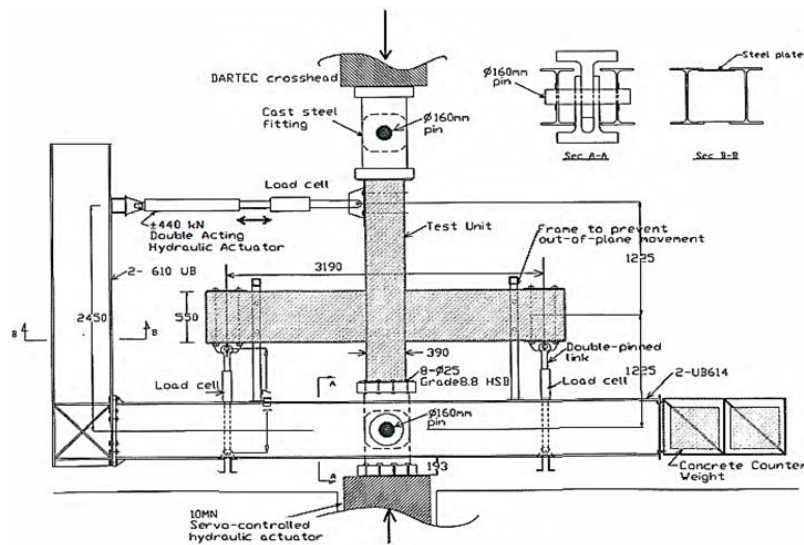


Fig. 3. Test set-up (Lin 1999)

Menegotto M, Pinto PE, "Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending", Proceedings of IABSE Symposium, Lisbon, Portugal, 1973.

Naserkhaki M, "Evaluation of seismic performance of precast concrete buildings with grouted joints", Masters Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, 2018.

SeismoSoft Ltd, "SeismoStruct. 2018", Pavia, Italy, 2018.