نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۰، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۳۵۹ تا ۴۳۷۸
DOI: 10.22060/ceej.2020.18323.6835

مطالعه امکان‌سنجی سیستم سازه‌ای مرکزگرا برای پایه ی متداول پل‌های بزرگراهی در کشور

اکبر واثقی*، بابک منصوری، صدف رویین‌تن

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

خلاصه: اخیراً در کشورهای پیشرفته انواع سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا با استفاده از پایه‌های پیش ساخته و روش ساخت پرسرعت ABC با هدف کاهش زمان ساخت، افزایش ایمنی، کاهش خسارت لرزه‌ای، کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی و کاهش زمان بازیابی سیستم به حالت اولیه توسعه داده شده‌اند. عملکرد لرزه‌ای این نوع سیستم مبتنی بر حرکت گهواره‌ای برگشت‌پذیر پایه پل می‌باشد. در این سیستم علاوه بر قطعات پیش ساخته از کابل‌های پیش تنیده جهت برگرداندن سیستم به حالت اولیه و تجهیزات مستهلک کننده انرژی برای جذب انرژی لرزه‌ای استفاده می‌گردد. استفاده از این سیستم خسارت ناشی از زلزله و جابجایی پسماند را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین به دلیل استفاده از قطعات پیش ساخته، سرعت ساخت پل نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در این مقاله عملکرد لرزه‌ای یک نوع سیستم مرگزگرا با سیستم متداول سازه‌ای برای سه پل موجود در کشور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور، ابتدا مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ناشی از حرکت گهواره‌ای در سیستم مرکزگرا توسعه داده شده و با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی می‌شود. سپس پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور به صورت سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سیستم مرکزگرا با وجود افزایش بیشینه تغییر مکان نسبت به سیستم متداول، تغییر مکان پسماند به شدت کاهش می‌یابد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند باعث کاهش خسارات لرزه‌ای می‌شود و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

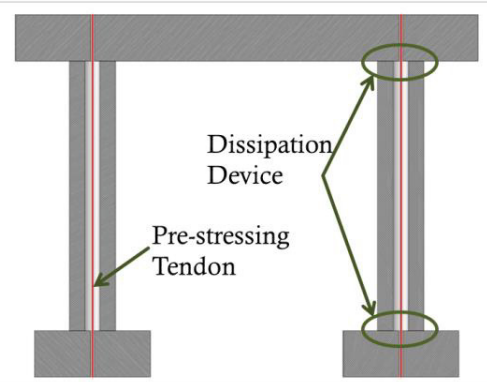
کلمات کلیدی:
پل
زلزله
سیستم مرکزگرا
سازه تاب‌آور
جابجایی پسماند

۱-مقدمه

وضعیت ایمنی لرزه‌ای و تاب‌آوری شبکه راه‌ها با توجه به خطر نسبتاً زیاد زلزله در کشور و لزوم استفاده از این شبکه برای کمک رسانی پس از زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پل‌های بزرگراهی از عناصر حیاتی این شبکه محسوب می‌شوند و خسارت لرزه‌ای به هر یک از پل‌های درون این شبکه می‌تواند به شدت جریان ترافیک را مختل کند و این موضوع بر اقتصاد منطقه، پاسخهای اضطراری بعد از زلزله و عملیات تعمیر و بازسازی تاثیر زیادی می‌گذارد. در مناطق لرزه‌خیز، پل‌های بزرگراهی معمولاً طوری طراحی می‌شوند که مفاصل پلاستیک در ستون‌ها تشکیل شوند و انتظار می‌رود که ستون‌ها در هنگام وقوع زمین‌لرزه شدید دچار تغییر شکل‌های غیرالاستیک بزرگی شوند که منجر به تغییر مکان دائمی یا پسماند در پایه پل می‌گردد. تغییر مکان پسماند پایه پل یکی از پارامترهای بسیار مهم و تعیین کننده برای احراز شرایط سرویس‌دهی پل بعد از زلزله است و مشخص می‌کند که آیا یک پل پس از زلزله قابل استفاده است یا خیر. به عنوان مثال، پس از زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ میلادی، بیش از صد پل با دریفت پسماند فراتر از ۱/۷۵٪ برای اجرای عملیات بازسازی

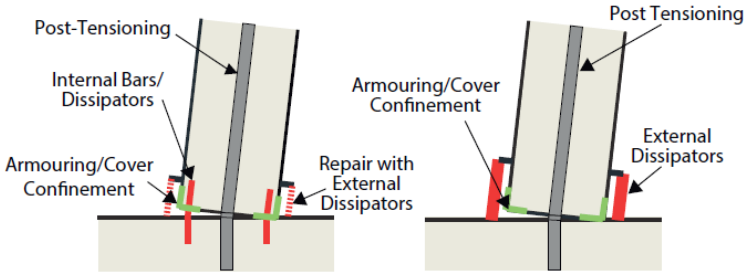
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vasseghi@iiees.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. سیستم سازه‌ای مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای

Fig. 1. Self-centering rocking system



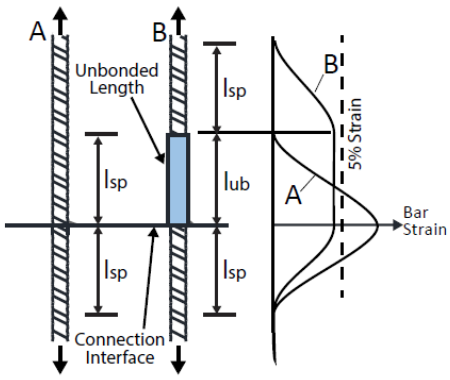
شکل ۲. میراگرهای داخلی و خارجی [۳]

Fig. 2. Internal and external dissipators

تخریب شدند، اگر چه اغلب این پل‌ها به لحاظ ایستایی از استحکام کافی برخوردار بودند [۱]. همچنین تغییر مکان پسماند پایه پل یک پارامتر مهم برای برآورد مقاومت پس از زلزله و اطمینان از ایستایی سازه پل در برابر پس‌لرزه‌ها محسوب می‌شود [۲].

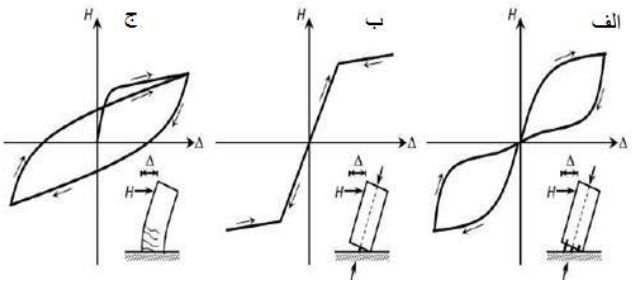
اثرات تغییر مکان پسماند بر عملکرد پس از زلزله پل، جوامع علمی را به سمت توسعه‌ی سیستم‌هایی با تغییر مکان پسماند کم و خسارت محدود، همراه با هدایت انرژی لرزه‌ای به سمت اعضای قابل تعویض سوق داده است. یکی از رویکردهای نوین برای طراحی و ساخت پایه پل‌ها، استفاده از سیستمهای مرکزگرا[1] مبتنی بر حرکت گهواره‌ای[2] می‌باشد. در این نوع سیستم سازه‌ای، ستون‌ها و تیر سرستون پایه میانی به صورت پیش ساخته آماده می‌شوند و با استفاده از کابل‌های پیش تنیده به یکدیگر و به فونداسیون متصل می‌گردند (شکل ۱). در این سیستم، تاندون‌های پیش تنیدگی در طول ستون به صورت غیرچسبیده[3] و داخل غلاف قرار می‌گیرند و به همراه بارهای ثقلی (وزن عرشه پل) باعث برگشت پایه پل به حالت اولیه می‌شوند. استفاده از تاندون غیرچسبیده برای جلوگیری از افزایش بیش از حد تنش در هنگام زلزله و توزیع یکنواخت کرنش در طول تاندون می‌باشد. همچنین برای جذب انرژی لرزه‌ای معمولاً در محل اتصالات از میراگرهای داخلی و یا خارجی استفاده می‌شود (شکل ۲). برای میراگر خارجی معمولا از عناصر کمانش تاب (BRB) و برای میراگر داخلی از میلگردهای نسبتاً قطور که با تزریق گروت در درون غلاف محل استقرار آن‌ها مهار می‌شوند، استفاده می‌گردد. به منظور کاهش تمرکز تنش و شکست زود هنگام میلگردهای داخلی، بخشی از طول میلگرد در مجاورت اتصال با استفاده از نوار مناسب دورپیچ می‌شود تا از چسبندگی میلگرد با گروت جلوگیری گردد [۳]. این عدم چسبندگی باعث توزیع یکنواخت کرنش و کاهش تمرکز

1 Self-centering
2 Rocking
3 Unbonded



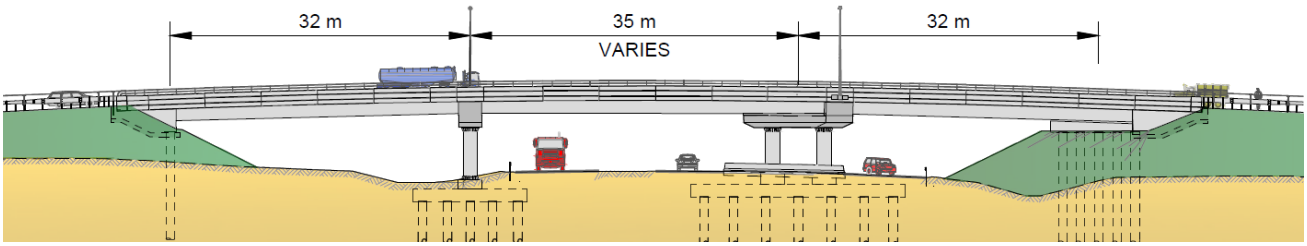
شکل ۳. توزیع کرنش در میلگرد داخلی [۳]

Fig. 3. Rebar strain distributions at interface



شکل ۴. مقایسه نمودارهای هیسترزیس سیستم مرکزگرا با میراگر و بدون میراگر با سیستم متداول [۴]

Fig. 4. Hysteresis response of self-centering and conventional systems



شکل ۵. پل ارتباطی ویگدام-ماگدالا در کشور نیوزلند [۵]

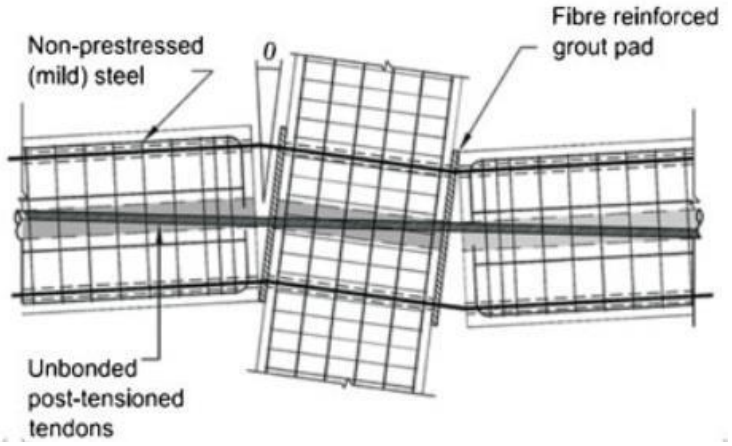
Fig. 5. Wigram-Magdala link bridge in New Zealand

تنش در هنگام حرکت گهواره‌ای می‌شود (شکل ۳).

استفاده از سیستم مرکزگرا خسارت ناشی از زلزله و جابجایی پسماند را به شدت کاهش می‌دهد. در شکل ۴ نمودار هیسترزیس سیستم متداول سازه‌ای با نمودارهای سیستم مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای مقایسه شده‌اند. در سیستم متداول سازه‌ای جابجایی پسماند نسبتاً زیاد و خسارت به سازه اصلی محتمل می‌باشد در صورتی که در سیستم مرکزگرا جابجایی پسماند و احتمال خسارت به سازه اصلی بسیار ناچیز است. در حالتی که از میراگر در سیستم مرکزگرا استفاده شود، نمودار هیسترزیس به صورت پرچمی است و علاوه بر برگشت‌پذیری، این سیستم قابلیت جذب انرژی لرزه‌ای را نیز دارا می‌باشد [۴]. همچنین به دلیل به کارگیری قطعات پیش ساخته، سرعت ساخت پل در سیستم مرکزگرا نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

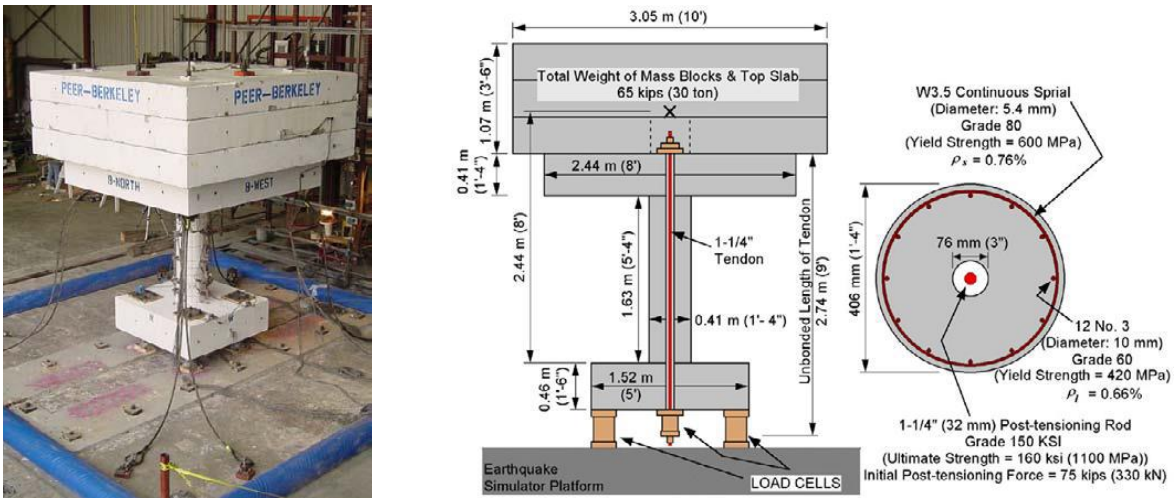
اخیراً مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی گسترده‌ای در کشورهای نیوزیلند، ژاپن و امریکا در مورد انواع سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا برای پل‌ها انجام شده است که نتایج آن‌ها نوید استفاده از این سیستم‌ها را در مناطق لرزه‌ای می‌دهد. همچنین در سال ۲۰۱۶ میلادی و بر اساس تحقیقاتی که در دانشگاه کنتابری انجام شد [۵]، برای اولین بار یک پل در نیوزیلند [۶] با استفاده از این نوع سیستم ساخته شد (شکل ۵). این پل زلزله ۱۴ نوامبر ۲۰۱۶ کیاکورا را بدون هیچگونه خسارتی تجربه کرده است [۵].

در این مقاله به منظور تسهیل پذیرش به موقع فناوری سیستم مرکزگرا توسط مهندسین پل در ایران، عملکرد لرزه‌ای این سیستم با سیستم متداول سازه‌ای برای سه پل موجود در کشور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور، ابتدا یک مدل تحلیلی برای شبیه سازی حرکت گهواره‌ای توسعه داده شده و با نتایج آزمایشگاهی یک نمونه سیستم مرکزگرا صحت سنجی می‌شود. سپس پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور به صورت سیستم متداول و سیستم مرکزگرا



شکل ۶. سیستم مرکزگرا در ساختمان [۷]

Fig. 6. Self-centering system in buildings



شکل ۷. آزمایش پایه تک ستونه پل بر روی میز لرزان [۱۷]

Fig. 7. Shake table test of a bridge pier

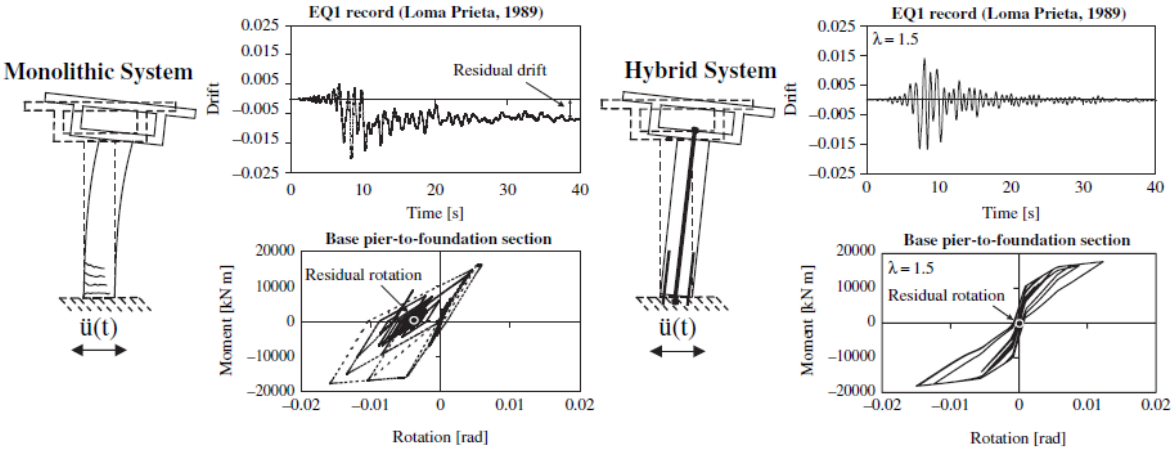
مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

۲-مروری بر ادبیات فنی

در سال‌های اخیر توسعه سیستم‌های مرکزگرا یا به عبارتی سیستم‌های برگشت‌پذیر با خسارت محدود به منظور کاهش جابجایی پسماند و خسارت سازه‌ای در کانون توجه پژوهشگران مهندسی زلزله بوده است. برنامه تحقیقاتی سیستم‌های پیش ساخته لرزه‌ای[1] [۷]، اولین مطالعات کاربردی در مورد چنین سیستمی می‌باشد. در این مطالعه چندین سیستم لرزه‌ای جدید برای ساختمان‌های پیش ساخته بتنی در مقیاس بزرگ مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۶ یکی از این سیستم‌ها که در آن از تاندون‌های غیرچسبیده[2] به عنوان تنها وسیله اتصال تیر و ستون پیش ساخته استفاده شده است را نشان می‌دهد. رفتار تیر و ستون در این سیستم کاملاً صلب است و رفتار غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای ناشی از باز و بسته شکاف در محل تلاقی این دو عضو متمرکز می‌باشد. چندین مطالعه تحلیلی در مورد مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای قاب‌هایی با این نوع اتصالات توسط تعدادی از محققان انجام شده است [۸-۱۱].

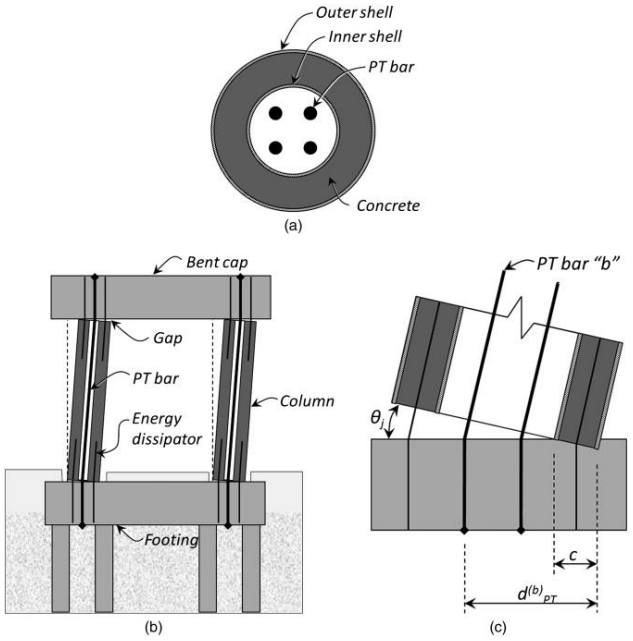
1 Precast Seismic Structural Systems (PRESSS)

2 Unbonded



شکل ۸. مقایسه رفتار سیستم یکپارچه معمولی با سیستم مرکزگرا [۲۰]

Fig. 8. Comparison of behavior of self-centering and conventional systems



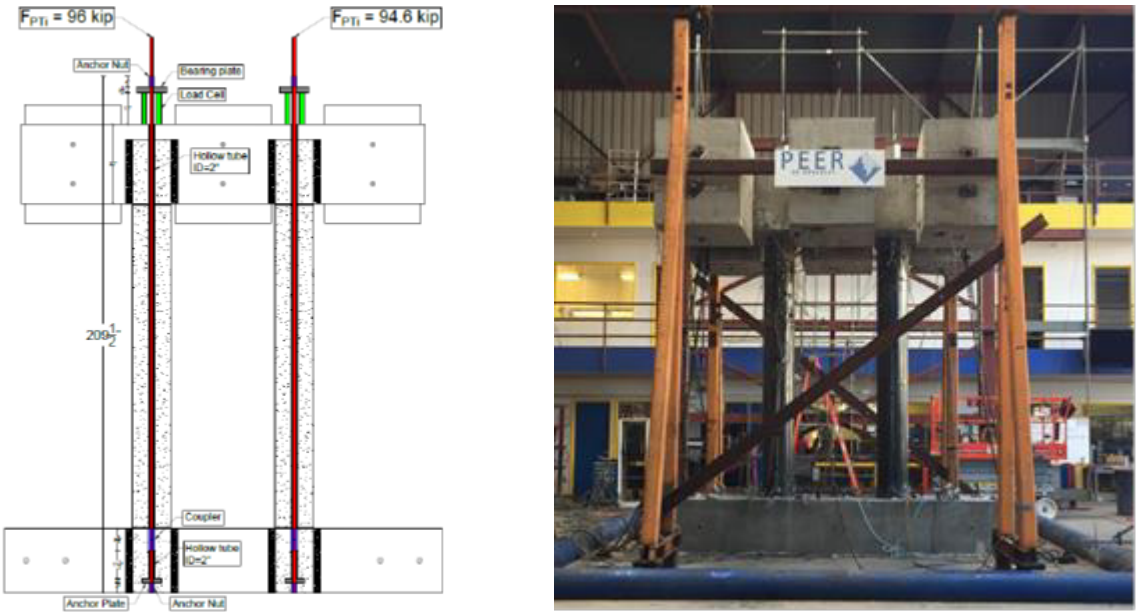
شکل ۹. سیستم مرکزگرا گیورینی و همکاران [۲۸]

Fig. 9. Self-centering column proposed by Guerrini et al.

سیستم‌های مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای با استفاده از پیش تنیدگی عمودی در ستون پایه پل‌ها از سال ۱۹۹۷ میلادی در تحقیقات زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این تحقیقات ابتدا بر روی سیستم‌های مرکزگرا بدون میراگر متمرکز بوده است [۱۶-۱۲] و سپس از سال ۲۰۰۴ میلادی سیستم‌های ترکیبی (هیبرید[1]) متشکل از سیستم مرکزگرا و سیستم مستهلک کننده انرژی با استفاده از میلگردهای داخلی یا میراگرهای خارجی توسعه داده شدند. از سال ۲۰۰۴ میلادی تاکنون تعداد زیادی مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی [۳۲-۱۷] به منظور توسعه سیستم‌های ترکیبی برای طراحی و ساخت پل‌ها انجام شده است. در ادامه چند نمونه از این مطالعات تشریح می‌گردد.

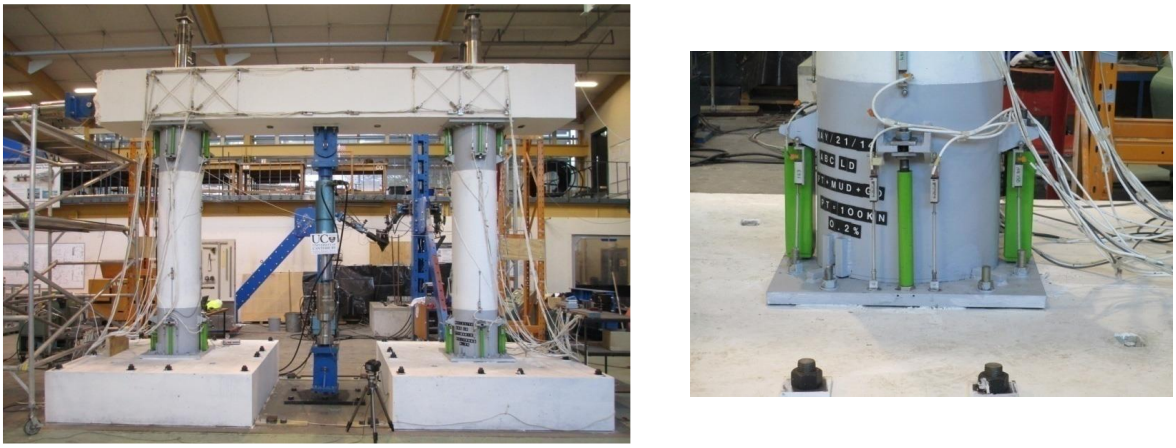
ساکای و مهین [۱۷] در سال ۲۰۰۴ میلادی بر اساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیرامون رفتار دینامیکی ستون‌های پیش ساخته و پیش تنیده پایه پل، توصیه‌هایی برای طراحی این نوع ستون‌ها شامل جایگزین نمودن آرماتورهای طولی با یک تاندون در

1 Hybrid



شکل ۱۰. نمونه آزمایشگاهی نما [۳۱]

Fig. 10. Specimen tested by Nema



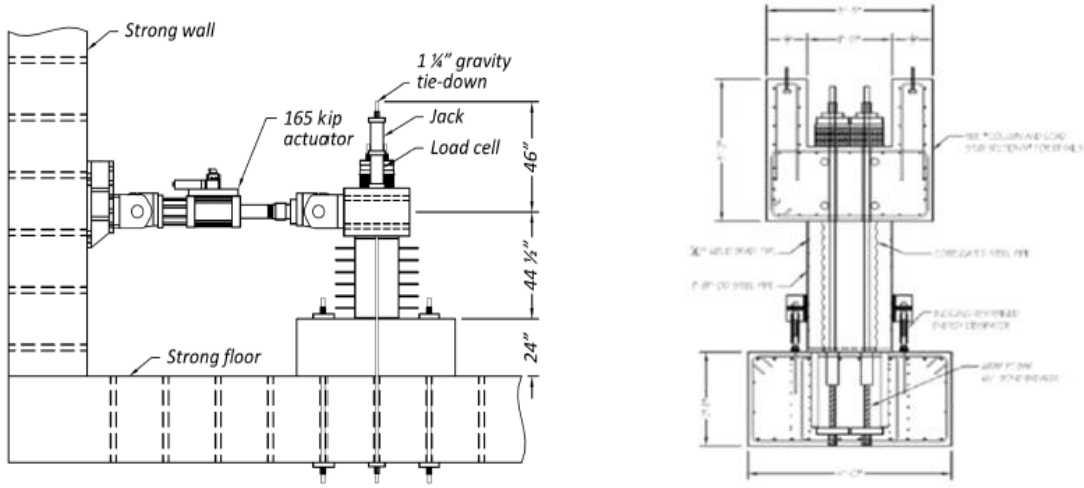
شکل ۱۱. نمونه آزمایشگاهی مشعل و پالرمو [۳۲]

Fig. 11. Specimen tested by Mashal and Palermo

مرکز ستون ارائه نمودند. تحلیل‌های تاریخچه زمانی در این مطالعه نشان دادند که در مقایسه با ستون‌های معمولی، بیشینه جابجایی تقریباً یکسان ولی جابجایی پسماند به طور قابل توجهی کمتر است. نمونه‌های آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ بر اساس رهنمودهای به دست آمده از مطالعات تحلیلی طراحی شدند و بر روی یک میز لرزان و در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۷). این آزمایش‌ها نتایج تحلیل‌ها مبنی بر کاهش جابجایی پسماند بدون افزایش قابل ملاحظه بیشینه جابجایی را تأیید کردند.

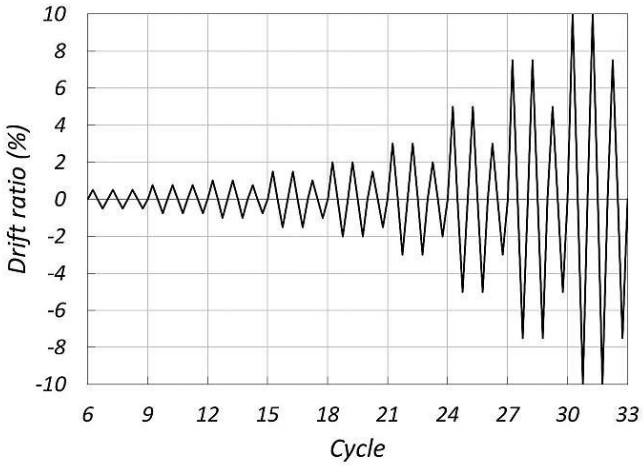
پالرمو و همکاران [۲۰-۱۸] سیستم‌های مرکزگرای هیبرید[1] متشکل از تاندون غیرچسبیده در مرکز ستون و میلگردهای داخلی برای استهلاک انرژی را به عنوان یک راه حل مناسب و کارآمد برای عملکرد مناسب لرزه‌ای پایه پل در مقایسه با سیستم‌های یکپارچه معمولی گسترش دادند. پالرمو و پامپانین [۲۰] با مدل‌سازی عددی

1 Hybrid



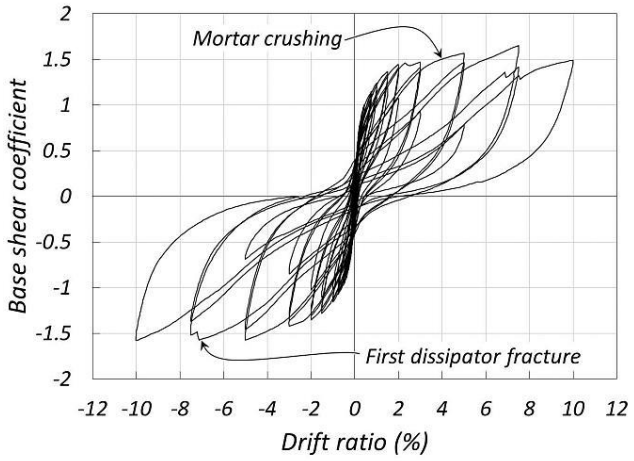
شکل ۱۲. نمای کلی نمونه آزمایشگاهی و ابزاربندی آزمایش [۴]

Fig. 12. Test setup and specimen



شکل ۱۳. پروتکل بارگذاری نمونه آزمایشگاهی [۴]

Fig. 13. Loading protocol



شکل ۱۴. منحنی هیسترزیس نمونه آزمایشگاهی [۴]

Fig. 14. Hysteresis curves of test specimen

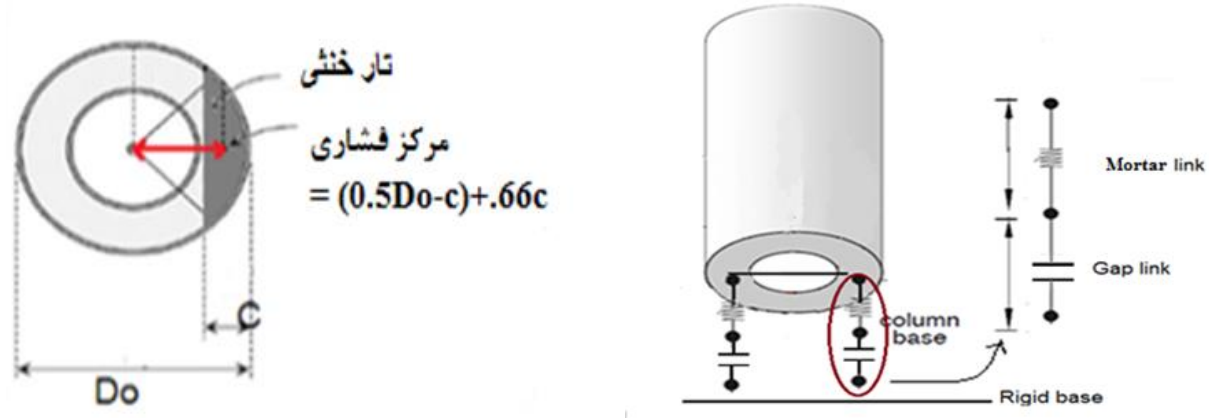
و تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، رفتار پل‌های تک ستونه چند دهانه با سیستم مرکزگرا و سیستم یکپارچه معمولی را مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی پارامترهای اصلی موثر بر رفتار این نوع پل پرداختند (شکل ۸). در این مطالعه تحلیل‌های پارامتریک با متغیرهای مختلف از قبیل توزیع ارتفاع پایه در پیکربندی نامنظم پل، سختی عرشه و کوله انجام شد. همچنین تأثیرات P-D و شدت زلزله بر پاسخ کلی پل بررسی شد و عملکرد بهتر سیستم مرکزگرا گزارش گردید.

گیورینی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۵ میلادی یک سیستم مرکزگرا که از ستون دو جداره غلاف‌دار فولادی و بتن محصور شده استفاده شده بود (شکل ۹) را تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار دادند. در این مطالعه از هر دو نوع مستهلک کننده انرژی (میلگردهای داخلی و میراگرهای خارجی) استفاده گردید. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که خسارت ایجاد شده در ستون بسیار

الف- ملات ب- میراگر

شکل ۱۵. تصاویر خرابی در نمونه آزمایشگاهی [۴]

Fig. 15. Pictures of damages in test specimen



شکل ۱۶. نحوه مدل‌سازی لایه ملات زیر ستون

Fig. 16. Modeling of mortar bed

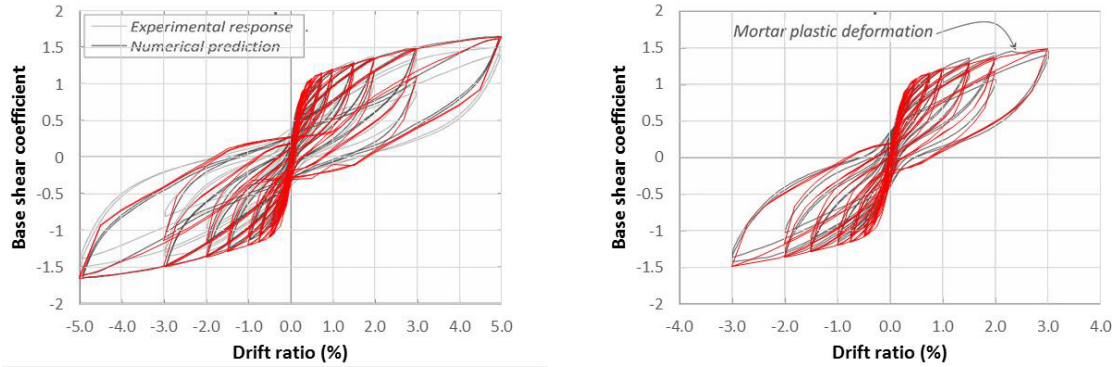
محدود است و خسارت اصلی در میراگرها و لایه ملات حد فاصل بین ستون و فونداسیون رخ می‌دهد. در این مطالعه ضوابط طراحی این سیستم توسعه داده شده‌اند.

نما [۳۱] در سال ۲۰۱۸ میلادی پایه دو ستونه یک پل مرکزگرا را در مقیاس ۳۵٪ بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار داد (شکل ۱۰). نمونه آزمایشگاهی از دو ستون فولادی پر شده با بتن، تاندون‌های پیش تنیده، تیر سرستون و فونداسیون پیش ساخته تشکیل شده بود. همچنین از میلگردهای داخلی به عنوان میراگر استفاده شده و تاندون‌ها تا ۴۰٪ ظرفیت‌شان پیش تنیده شده بودند. در مجموع ۱۲ رکورد لرزه‌ای سه محوره شامل سه رکورد با شدت بیش از زلزله سطح طراحی به این نمونه وارد گردید. به طور کلی عملکرد این نمونه با خسارت بسیار محدود در نقاط تقاطع ستون‌ها با تیر سرستون و فونداسیون خیلی خوب ارزیابی شد. نتایج حاصل از این آزمایش برای توسعه یک مدل تحلیلی و سپس برای مطالعه پاسخ یک پل موجود تحت اثر پارامترهای مختلف پیش تنیدگی و ظرفیت استهلاک انرژی مورد استفاده قرار گرفت.

مشعل و پالرمو [۳۲] در سال ۲۰۱۹ میلادی یک نمونه پایه دو ستونه مرکزگرا را در مقیاس ۱/۲ تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی آزمایش کردند. در این نمونه از یک تاندون در مرکز هر ستون برای پیش تنیدگی، غلاف فلزی برای تقویت موضعی ستون در محل اتصالات، و دو تیپ میراگر خارجی برای استهلاک انرژی استفاده گردید (شکل ۱۱). همچنین برای جلوگیری از خسارت ناشی از حرکت گهواره‌ای در محل اتصالات، صفحات فلزی بر روی تیر سرستون و فونداسیون تعبیه گردید. در این آزمایش پس از تعداد

شکل ۱۷. مدل تحلیلی نمونه آزمایشگاهی

Fig. 17. Analytical model of test specimen



ب- تا جابجایی نسبی ۵٪

الف – تا جابجایی نسبی ۳٪

شکل ۱۸. مقایسه منحنی هیسترزیس مدل تحلیلی با نمونه آزمایشگاهی

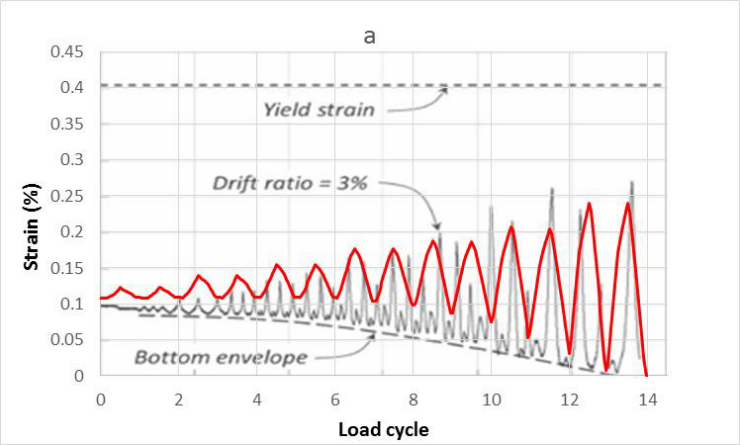
Fig. 18. Comparison of analytical and experimental hysteresis curves

زیادی چرخه‌های بارگذاری در دریفت بالا ، هیچ خسارت و جابجایی پسماندی در نمونه مشاهده نگردید.

۳-شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای سیستم مرکزگرا

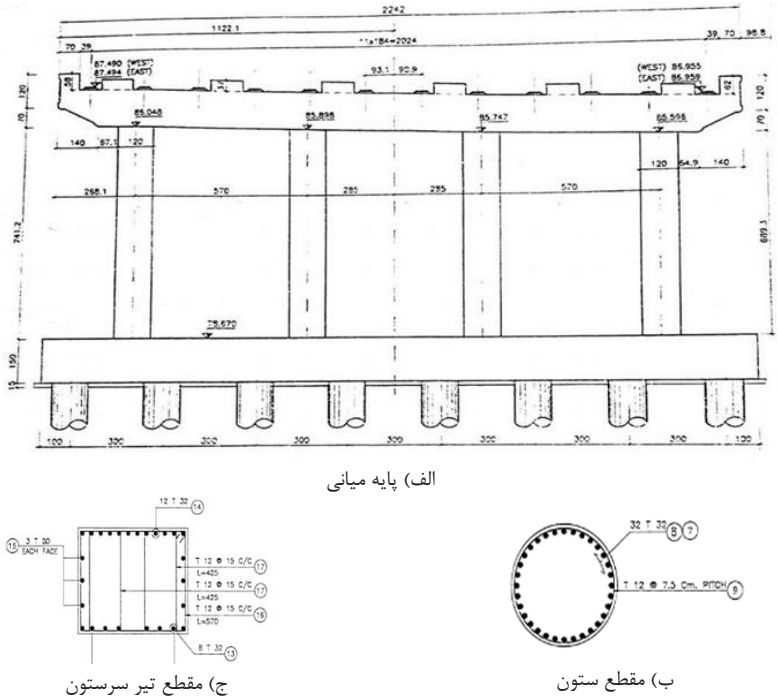
برای توسعه مدل تحلیلی و شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای سیستم مرکزگرا، سیستم پیشنهادی گیورینی و همکاران [۲۸ و ۴] و نتایج آزمایشگاهی یک نمونه ستون مرکزگرا با میراگر خارجی جهت صحت‌سنجی مدل تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه آزمایشگاهی نیمه پایین یک ستون از پایه پل تحت بار جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. نمای کلی نمونه آزمایشگاهی و ابزاربندی آزمایش در شکل (۱۲) ارائه شده است. نمونه آزمایشگاهی شامل یک ستون دو جداره با قطر خارجی ۵۶۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۶۰ میلی‌متر و ۴ عدد تاندون A722به قطر ۳۵ میلیمتر و نیروی موثر پیش تنیدگی ۸۴۵ کیلونیوتن می باشد. در امتداد هر تاندون پنج حلقه الاستومر به صورت سری با سختی محوری ۱۴۶ مگانیوتن بر متر قرار داده شده است. همچنین از یک لایه ملات فیبردار در محل اتصال ستون به فونداسیون استفاده شده است. ضخامت این لایه ۱۲/۷ میلیمتر و مقاومت فشاری آن ۵۰ مگاپاسگال است. به منظور استهلاک انرژی از ۶ عدد میراگر خارجی BRB با هسته مرکزی به قطر ۱۴/۳ میلیمتر و ارتفاع ۱۶۵ میلیمتر و فولاد A576 با مقاومت تسلیم ۳۳۱ مگاپاسکال استفاده شده است. مقاومت تسلیم هر دو جداره ستون ۳۴۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری بتن محصور شده بین این دو جداره ۶۵ مگاپاسکال می‌باشند.

بارگذاری جانبی این نمونه آزمایشگاهی به صورت چرخه‌ای و



شکل ۱۹. مقایسه کرنش تاندون در مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی

Fig. 19. Comparison of analytical and experimental response of tendons



الف) پایه میانی

ب) مقطع ستون

ج) مقطع تیر سرستون

شکل ۲۰. پایه میانی پل شماره ۱

Fig. 20. Middle bend in bridge 1

مطابق با شکل ۱۳ انجام شده است. منحنی هیسترزیس این نمونه در شکل ۱۴ ارائه شده است. در این آزمایش خسارت ایجاد شده در ستون بسیار محدود بود و خسارت اصلی در لایه ملات و میراگرها رخ داد. شروع خردشدگی لایه ملات در دریفت ۴ درصد و اولین شکست در میراگر BRB در دریفت ۶/۵ درصد اتفاق افتاد. تصاویر خرابی در لایه ملات و میراگر در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند.

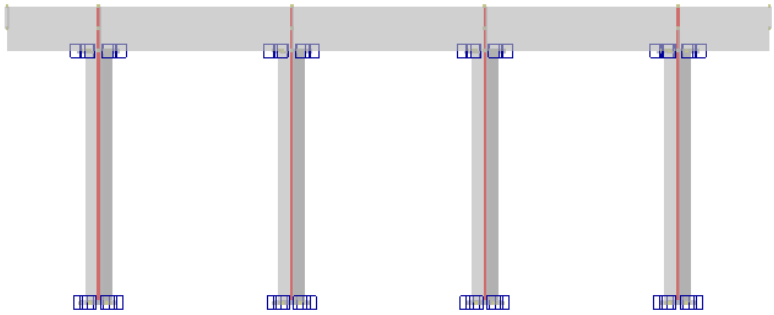
برای مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی از نرم افزار سایزمواستراکت[1] [۳۳] استفاده گردید. در مدل تحلیلی، رفتار غیرخطی ناشی از حرکت گهواره‌ای، جاری شدن میراگرها، و خرد شدن مصالح در محل تلاقی ستون با فونداسیون در نظر گرفته شد. در این مدل، ستون غلاف‌دار با المان الاستیک، تاندون‌ها با المان محوری غیر خطی، الاستومرها با

1 SiesmoStruct

جدول ۱. مشخصات رکوردهای زلزله

Table 1. Earthquake records

شماره	زلزله	ایستگاه	بزرگای لرزه‌ای (M)	PGAmax (g)	PGVmax (cm/s)	فاصله (km)
۱	Cape Mendocino	Petrolia	۷/۰	۰/۶۳	۸۲/۱	۴/۵
۲	Duzce, Turkey	Duzce,	۷/۱	۰/۵۲	۷۹/۳	۱/۶
۳	Loma prieta	Saratoga - Aloha	۶/۹	۰/۳۸	۵۵/۶	۲۷/۲
۴	Kocaeli	Izmit	۷/۵	۰/۲۲	۲۹/۸	۵/۳
۵	northridge	Sylmar - Olive View	۶/۷	۰/۷۳	۱۲۲/۸	۱۶/۸
۶	kobe	KJMA	۶/۹	۰/۵۱	۳۷/۰	۸/۷
۷	Imperial valley	El Centro Array #6	۶/۵	۰/۴۴	۱۱۱/۹	۲۷/۵

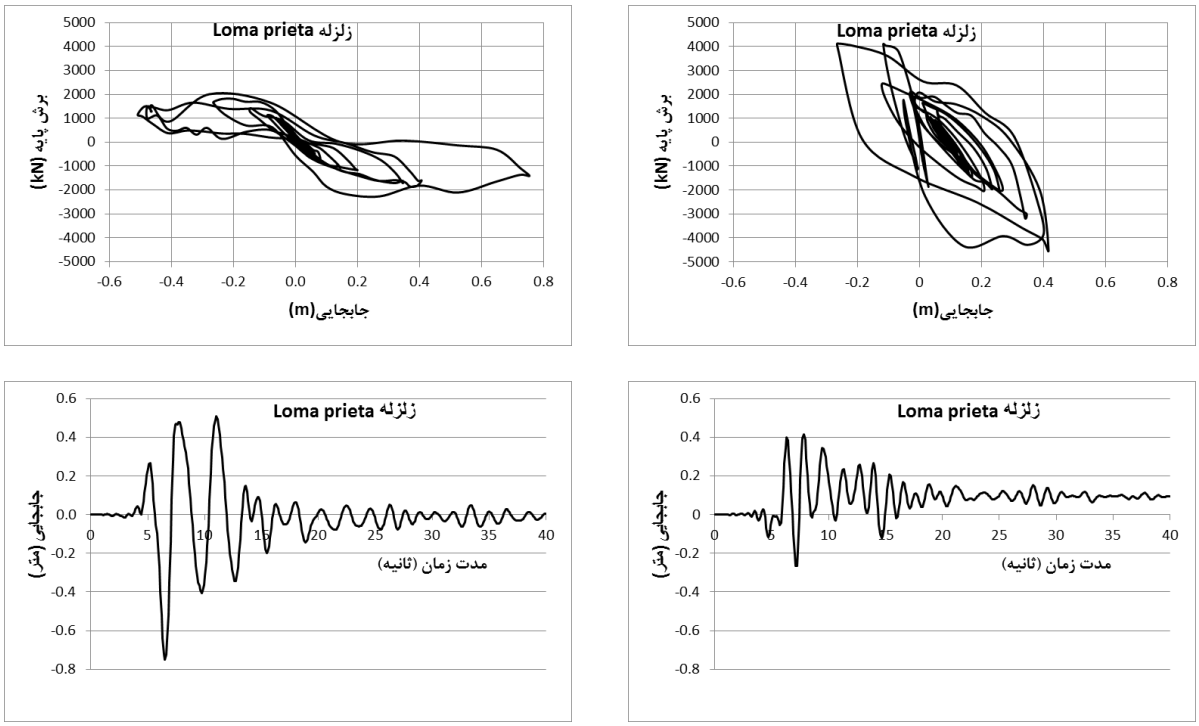


شکل ۲۱. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۱

Fig. 21. Analytical model of middle bend in bridge 1

یک فنر معادل الاستیک، و میراگرها با فنرهای غیرخطی مدل‌سازی شدند. برای مدل‌سازی لایه ملات از دو المان گپ و فنر غیرخطی به صورت سری استفاده شد (شکل ۱۶). مدل‌سازی ستون با استفاده از المان میله‌ای و تعریف مقطع دو جداره فولادی-بتنی برای این المان انجام شد و برای لحاظ کردن خروج از مرکز المان‌های ملات و میراگر و اتصال آن‌ها به ستون از المان صلب استفاده گردید. مشخصات مصالح ستون و فنرهای خطی و غیرخطی (الاستومر و میراگر) مطابق مشخصات نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. برای شبیه سازی ۴ تاندون از یک تاندون معادل در مرکز ستون استفاده گردید و پیش تنیدگی اولیه با اعمال جابجایی به انتهای تحتانی آن صورت گرفت. هر دو گره آلمان‌های گپ و فنرهای غیرخطی و خطی که برای شبیه سازی ملات، میراگر و الاستومر مورد استفاده قرار گرفتند، بر روی یکدیگر قرار دارند و لذا این المان‌ها بدون بعد می‌باشند. شکل ۱۷ جانمایی المان‌های مدل تحلیلی را قبل و بعد از بارگذاری جانبی نشان می‌دهد. در این شکل آلمان‌های بدون بعد گپ و فنر با مربع آبی رنگ نشان داده شده‌اند و جابجایی ماندگار پس از بارگذاری چرخه‌ای در المان‌هایی که برای مدل‌سازی میراگرها و لایه ملات در پای ستون استفاده شده است کاملاً مشهود است.

اهم نتایج صحت سنجی مدل تحلیلی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۸ منحنی هیسترزیس نمونه آزمایشگاهی با نتایج تحلیل در محدوده جابجایی نسبی ۳٪ و ۵٪ مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در محدوده جابجایی نسبی ۳٪، منحنی‌های هیسترزیس مدل تحلیلی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در این محدوده سختی اولیه، مقاومت، سختی باربرداری و سختی بارگذاری مجدد با خطای کمتر از ۱۰ درصد با نتایج آزمایشگاهی مطابقت می‌کند. در جابجایی نسبی ۵٪، میزان خطا در برآورد مقاومت ۱۲ درصد است ولی میزان خطا در برآورد سختی بارگذاری و باربرداری همچنان کمتر از ۱۰ درصد است. در شکل ۱۹ تغییرات کرنش تاندون



الف) سیستم متداول

ب) سیستم مرکزگرا

شکل ۲۲. نمونه منحنی هیسترزیس پایه پل و نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۱

Fig. 22. Hysteresis curves and displacement response of bend in bridge 1

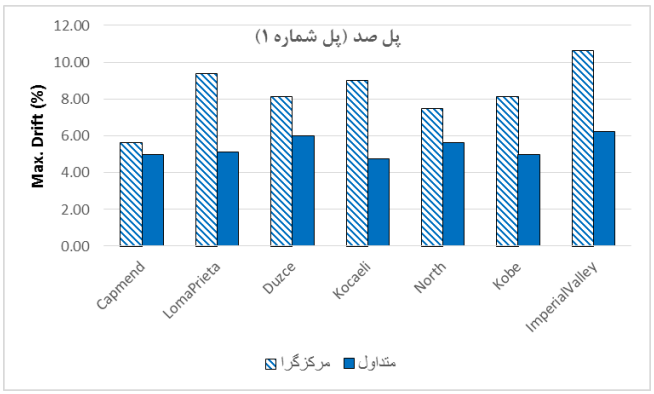
در طول آزمایش با نتایج مدل تحلیلی مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که نوسانات کرنش در هر سیکل بارگذاری قابل توجه می‌باشد و این نوسانات با افزایش جابجایی نسبی در سیکل‌های بالاتر بسیار زیاد است. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، کرنش کمینه و در نتجیه نیروی موثر تاندون به دلیل رفتار غیرخطی و نشست ملات کاهش می‌یابد. شکل ۱۹ نشان می‌دهد که مدل تحلیلی نوسانات کرنش تاندون را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند.

۴- مطالعه تحلیلی پل‌های بزرگراهی

به منظور ارزیابی کاربرد و مزیت سیستم مرکزگرا برای پلهای متداول در ایران، سه پل با تعداد دهانه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفتند. این مطالعات با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و با اعمال ۷ رکورد زلزله به پلها و بررسی رفتار آنها صورت گرفت. مشخصات رکوردهای زلزله در جدول ۱ ارائه شده است. این رکوردها با بزرگای بیش از ۶/۵ و فاصله کانونی ۱/۶ تا ۲۷/۵ کیلومتر شامل زلزله‌های شدید در حوزه دور و حوزه نزدیک می‌باشند. برای انجام تحلیل‌ها از شتاب‌نگاشت هر رکورد (بدون مقیاس طیفی) استفاده شد. پایه میانی پلها با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شدند. در مدل مرکزگرا از سیستم پیشنهادی گیورینی و همکاران [۲۸] استفاده شده است. در این مدل ستون‌ها به صورت دو جداره با قطر خارجی ۸۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۴۴۰ میلی‌متر و ۴ عدد تاندون به قطر ۴۵ میلیمتر و نیروی موثر پیش تنیدگی ۱۶۰۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شده‌اند. همانند نمونه آزمایشگاهی مقاومت تسلیم هر دو جداره ستون ۳۴۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری بتن محصور شده بین این دو جداره ۶۵ مگاپاسکال می‌باشند. همچنین از ملات فیبردار با ضخامت ۱۳ میلیمتر و مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسگال و ۶ عدد میراگر BRB با هسته مرکزی به قطر ۳۰ میلیمتر و ارتفاع ۴۵۰ میلیمتر در محل اتصالات ستون به تیر سرستون و فونداسیون استفاده شده است.

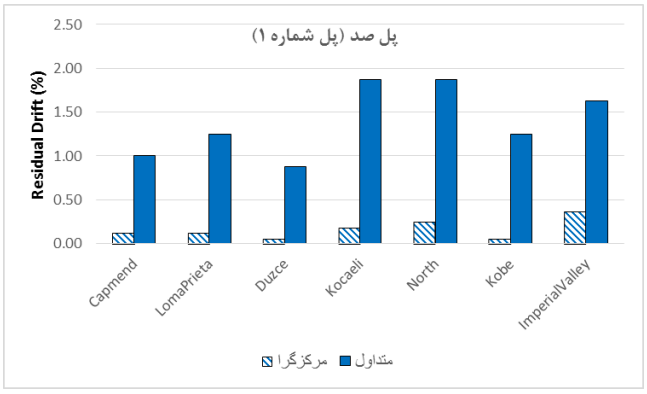
۴-۱-پل شماره ۱

پل شماره ۱ که در طرح ادامه بزرگراه رسالت تهران به بهره



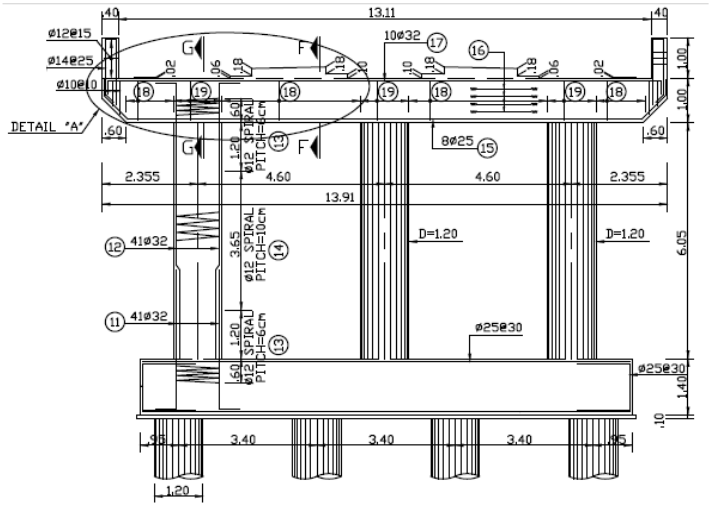
شکل ۲۳. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۱

Fig. 23. Peak drift ratios in bridge 1

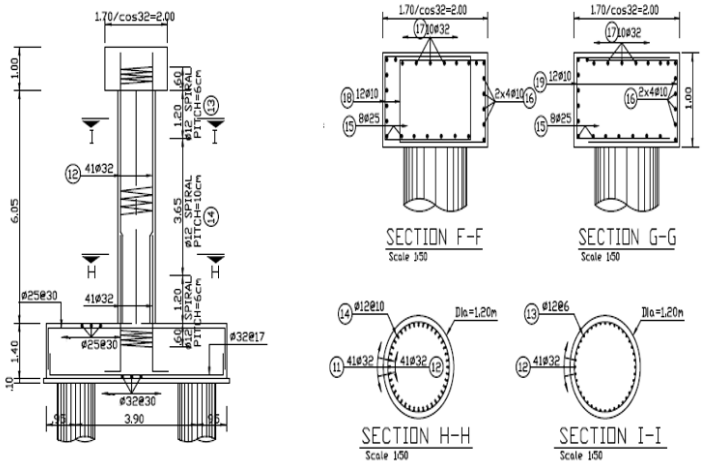


شکل ۲۴. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۱

Fig. 24. Residual drift ratios in bridge 1



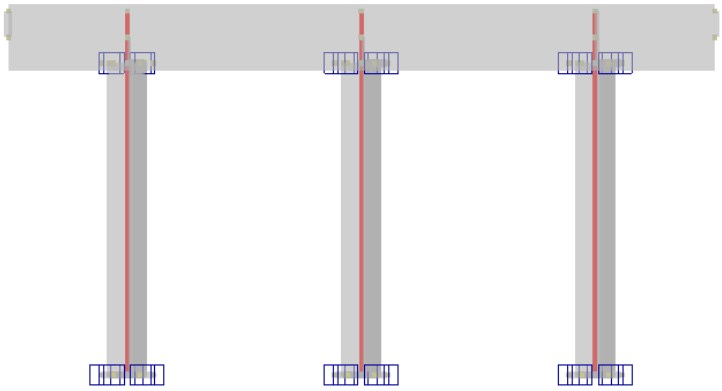
الف) پایه میانی



ب) جزئیات آرماتور گذاری

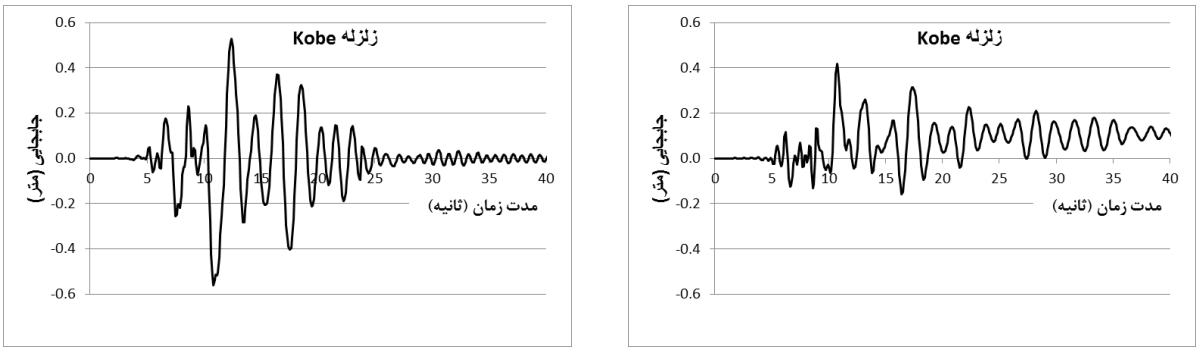
شکل ۲۵. پایه میانی پل شماره ۲

Fig. 25. Typical bend in bridge 2



شکل ۲۶. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۲

Fig. 26. Analytical model of middle bend in bridge 2



الف) سیستم متداول

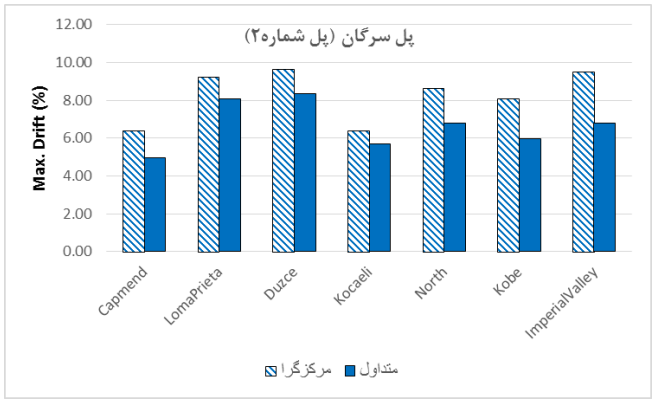
ب) سیستم مرکزگرا

شکل ۲۷. نمونه نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۲

Fig. 27. Displacement response of bend in bridge 2

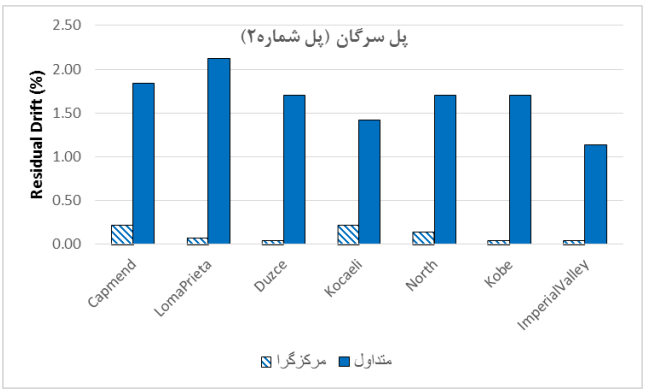
برداری رسیده است با طول کل ۸۸ متر و عرض ۲۲/۴ متر دارای دو دهانهی میانی ۲۵ متری و دو دهانه کناری ۱۹ متری می‌باشد. تابلیه پل از نوع تیر و دال بتنی شامل ۱۲ عدد تیر پیش ساخته و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر است. پایه های میانی شامل ۴ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱/۲ متر و سرستون به ارتفاع ۱/۰ متر می‌باشد (شکل ۲۰). مقاومت مشخصه ی بتن پایه پل ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و آرماتور مصرفی از نوع آجدار A3 با مقاومت جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد.

پایه میانی این پل با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شدند. در مدل تحلیلی سیستم متداول، ستون و تیر سرستون با استفاده از المان‌های فایبر و اتصالات با روش لوز و التونتاش [۳۴] مدل‌سازی شدند. برای شبیه سازی رفتار غیرخطی بتن و میلگرد در ستون و تیر سرستون به ترتیب از مدل مندر و همکاران [۳۵] و مدل منگوتو و پینتو [۳۶] استفاده شده است. در مدل تحلیلی سیستم مرکزگرا، تیر سرستون با المان فایبر، ستون دو جداره با المان الاستیک، میراگرها با فنرهای غیرخطی و تاندون‌ها با المان محوری غیرخطی مدل‌سازی شدند. مدل‌سازی حرکت گهواره‌ای ستون‌ها و رفتار غیر خطی لایه ملات در بالا و پایین ستون نیز همانند آنچه در بند ۳ تشریح شده است انجام شد. برای شبیه سازی ۴ تاندون از یک تاندون معادل در مرکز ستون استفاده گردید و پیش تنیدگی اولیه با اعمال جابجایی به انتهای تحتانی آن صورت گرفت. مدل پایه پل مرکزگرا در شکل ۲۱ ارائه شده است. در هر دو مدل تحلیلی از بار



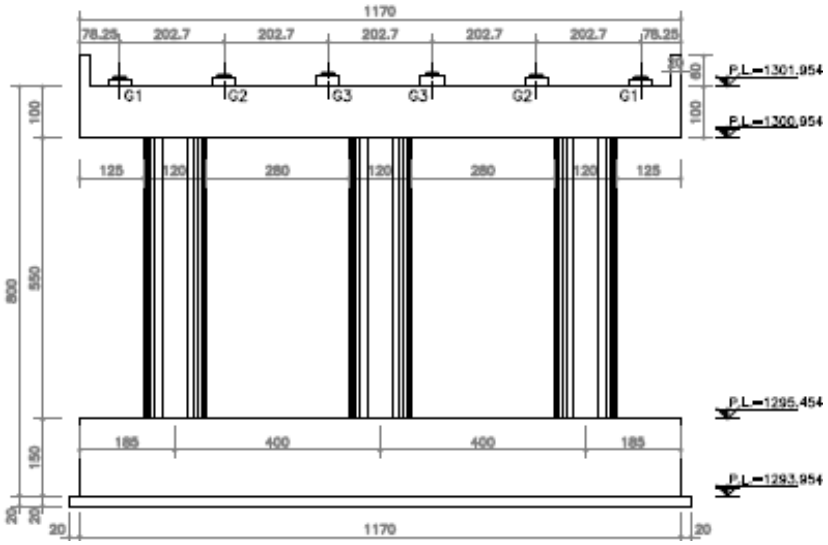
شکل ۲۸. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۲

Fig. 28. Peak drift ratios in bridge 2

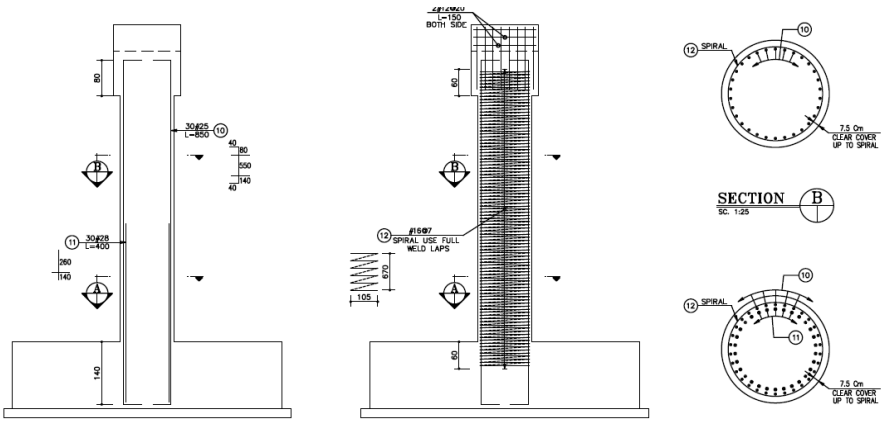


شکل ۲۹. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۲

Fig. 29. Residual drift ratios in bridge 2



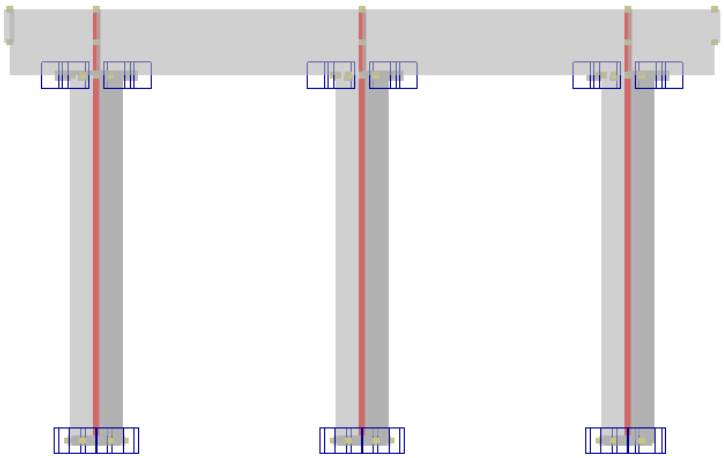
الف) پایه میانی



ب) جزئیات آرماتور گذاری

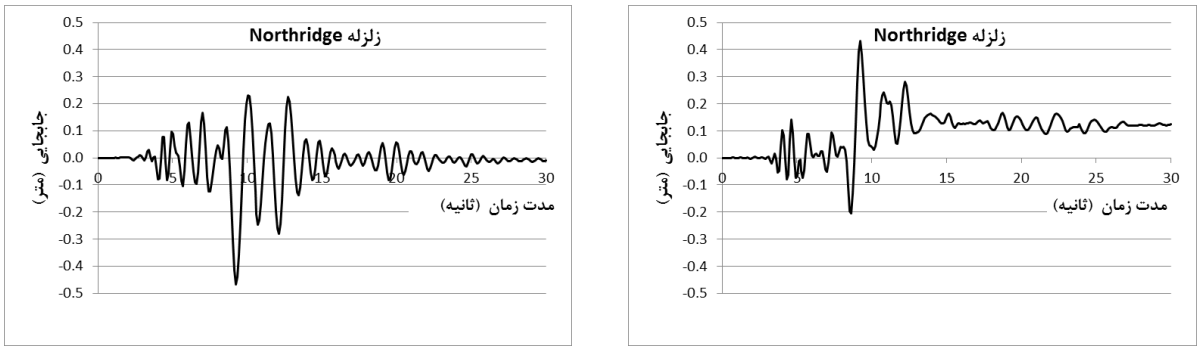
شکل ۳۰. پایه میانی پل شماره ۳

Fig. 30. Typical bend in bridge 3



شکل ۳۱. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۳

Fig. 31. Analytical model of middle bend in bridge 3



ب) سیستم مرکزگرا

الف) سیستم متداول

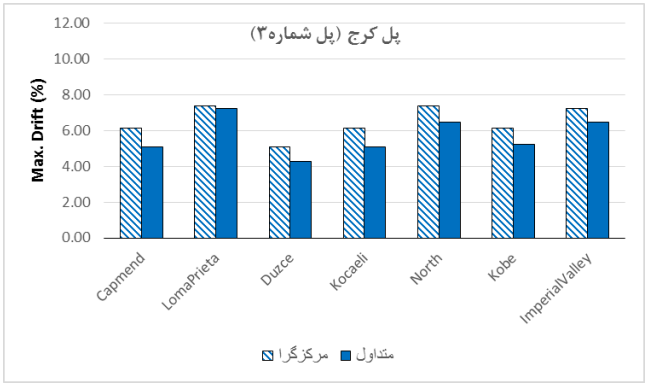
شکل ۳۲. نمونه نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۳

Fig. 32. Displacement response of bend in bridge 3

زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (۸۹۶ تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین از اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده و شرایط تکیه گاهی فونداسیون به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شده است. پریود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا ۱/۶ ثانیه و با سیستم متداول ۰/۷۲ ثانیه می‌باشد.

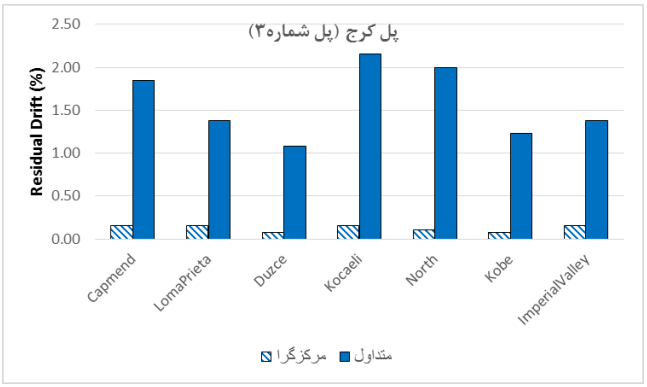
منحنی هیسترزیس پایه پل و نمودار جابجایی بالای پایه برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۲۲ ارائه شده است. مرکزگرایی و برگشت‌پذیری سیستم مرکزگرا در منحنی هیسترزیس کاملاً مشهود است. نمودار جابجایی پایه پل نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. منحنی‌های هیسترزیس نشان می‌دهند که در سیستم مرکزگرا سختی اولیه حدود ۸۰ درصد کمتر از سیستم متداول است. کاهش محسوس برش پایه و افزایش جابجایی در سیستم مرکزگرا را می‌توان به سختی جانبی نسبتاً کم این سیستم نسبت داد.

در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین ۴/۷۵ تا ۶/۲۵ درصد و در سیستم مرکزگرا بین ۵/۶ تا ۱۰/۶ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین ۰/۹ تا ۱/۹ درصد است و در دو مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود و بر اساس



شکل ۳۳. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۳

Fig. 33. Peak drift ratios in bridge 3



شکل ۳۴. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۳

Fig. 34. Residual drift ratios in bridge 3

تجربیات قبلی لازم است پل تخریب و بازسازی گردد. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۴ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند در سیستم مرکزگرا، هزینه‌های بازسازی را به شدت کاهش می‌دهد و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌سازد.

۴-۲-پل شماره ۲

پل شماره ۲ بر روی رودخانه سرگان در مسیر جاسک - کنارک احداث شده است. این پل با عرض کل ۱۱/۸ متر دارای ۵ دهانه ۲۰ متری است. تابلیه پل شامل ۶ عدد تیر بتن مسلح پیش ساخته به ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. پایه-های میانی شامل ۳ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱/۲ متر و سرستون با عرض ۲/۰ متر و ارتفاع ۱/۰ متر می باشد (شکل ۲۵). مقاومت مشخصه بتن ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و حد جاری شدن آرماتور مصرفی از نوع آجدار A2 و A3 به ترتیب ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. پایه میانی این پل نیز همانند پل شماره ۱ با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شدند. در هر دو مدل تحلیلی از بار زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (۳۷۸ تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه ای در نظر گرفته شده است. پریود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا ۰/۸۵ ثانیه و با سیستم متداول ۰/۶۲ ثانیه می‌باشد. مدل پایه مرکزگرا در شکل ۲۶ ارائه شده است.

نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۲ برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۲۷ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. در شکل ۲۸ و شکل ۲۹ بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین ۵/۰ تا ۸/۴ درصد و در سیستم مرکزگرا بین ۶/۴ تا ۹/۶ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین ۱/۱ تا ۲/۱ درصد است و در دو مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد و در دو مورد دیگر این جابجایی ۱/۷ درصد است. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۲۲ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد.

۴-۳-پل شماره ۳

پل شماره ۳ پل ارتباطی پایانه شهید کلانتری در کرج است. این پل با عرض ۱۱/۷ متر دارای ۲ دهانه ۱۶ متری است. تابلیه پل شامل ۶ عدد تیرورق فولادی به ارتفاع ۶۵ سانتیمتر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. پایه های میانی شامل ۳ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱۲۰ سانتی‌متر و سرستون با عرض ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر میباشد (شکل ۳۰). مقاومت مشخصه بتن پایه پل ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و حد جاری شدن آرماتور مصرفی ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر (نوع آجدار A3) می‌باشد. پایه میانی این

پل نیز همانند پل شماره ۱ با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شدند. در هر دو مدل تحلیلی از بار زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (۲۸۰ تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. پریود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا ۰/۷۰ ثانیه و با سیستم متداول ۰/۴۵ ثانیه می‌باشد. مدل پایه مرکزگرا در شکل ۳۱ ارائه شده است.

نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۳ برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۳۲ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله در شکل ۳۳ و شکل ۳۴ ارائه شده است. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین ۴/۳ تا ۷/۲ درصد و در سیستم مرکزگرا بین ۵/۱ تا ۷/۴ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین ۱/۱ تا ۲/۲ درصد است. در سه مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد و خسارت احتمالی شدید خواهد بود. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۱۵ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد.

۵-نتیجه گیری

در این مقاله پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شدند. در سیستم مرکزگرا، قطر ستون‌ها از ۱۲۰ سانتی‌متر به ۸۰ سانتی‌متر کاهش یافته و برای هر ستون از ۴ عدد تاندون با نیروی موثر پیش تنیدگی ۱۶۰۰ کیلونیوتن جهت تامین مرگزگرایی سیستم و ۱۲ عدد میراگر BRB جهت استهلاک انرژی زلزله استفاده شده است. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پایه میانی این پل‌ها با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا، با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای هفت شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل با بزرگای بیش از ۶/۵ انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در هر دو نوع زلزله دور و نزدیک، بیشینه جابجایی جانبی در سیستم مرکزگرا به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. حداکثر مقادیر بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول و سیسستم مرکزگرا به ترتیب ۸/۴ درصد و ۱۰/۶ درصد می‌باشند ولی به دلیل عدم وجود اقلام غیرسازه‌ای حساس به جابجایی در پل‌های بزرگراهی، انتظار نمی‌رود که افزایش جابجایی جانبی در سیستم مرکزگرا منجر به خسارت جدی به پل شود. در این سیستم با وجود افزایش بیشینه جابجایی جانبی نسبت به سیستم متداول، جابجایی پسماند به شدت کاهش می‌یابد. جابجایی نسبی پسماند پایه هر سه پل با سیستم متداول در چند مورد بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود و بر اساس تجربیات قبلی لازم است پل تخریب و بازسازی گردد. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۴ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند در سیستم مرکزگرا، هزینه‌های بازسازی را به شدت کاهش می‌دهد و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌سازد.

مراجع

[1] Kawashima, K. (2000). Seismic design and retrofit of bridges. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 33(3), 265-285.

[2] Mackie, K. and Stojadinovic, B. Residual Displacements and Post-Earthquake Capacity of Highway Bridges, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August, 2004. Paper No. 1550.

[3] White, S. L. (2014). Controlled damage rocking systems for accelerated bridge construction, Master's Thesis, University of Canterbury.

[4] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Vervelidis, A., & Massari, M. (2015). Self-centering precast concrete dual-steel-shell columns for accelerated bridge construction: seismic performance, analysis, and design. Report No. PEER 2015, 13.

[5] Routledge, P., McHaffie, B., Cowan, M., & Palermo, A. (2019). Wigram–Magdala Link Bridge: Low-Damage Details for a More Efficient Seismic Design Philosophy. Structural Engineering International, 1-8.

[6] Routledge, P. J., Cowan, M. J., & Palermo, A. (2016). Low-damage detailing for bridges—a case study of Wigram–Magdala Bridge. In Proceedings, New Zealand

Regions, Greece, May, 2003.

[17] Sakai, J., & Mahin, S. A. 2004. Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns. In Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering (pp. 1-13).

[18] Palermo, A., Pampanin, S., and Calvi, G. M. (2005). Concept and Development of Hybrid Solutions for Seismic Resistant Bridge Systems. Journal of Earthquake Engineering, 9(6):899–921.

[19] Palermo, A., Pampanin, S., and Marriott, D. (2007). Design, Modeling, and Experimental Response of Seismic Resistant Bridge Piers with Posttensioned Dissipating Connections. Journal of Structural Engineering, 133(11):1648–1661.

[20] Palermo, A. and Pampanin, S. (2008). Enhanced Seismic Performance of Hybrid Bridge Systems: Comparison with Traditional Monolithic Solutions. Journal of Earthquake Engineering, 12(8):1267–1295.

[21] Kwan, W. and Billington, S. 2003. Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers. I: Monotonic and Cyclic Analyses, Journal of Bridge Engineering, 8(2): 92-101.

[22] Kwan, W. and Billington, S. 2003. Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers. II: Seismic Analyses, Journal of Bridge Engineering, 8(2): 101-111.

[23] Ou, Y. C. (2007). Precast segmental post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions. PhD Thesis. University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.

[24] Cohagen, L. S., Pang, J. B. K., Stanton, J. F., & Eberhard, M. O. (2008). A precast concrete bridge bent designed to re-center after an earthquake. Washington State Department of Transport, Seattle, WA.

[25] Elgawady, M. A., & Sha'Lan, A. (2011). Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents. Journal of Bridge Engineering, 16(3), 328–339.

[26] Sideris, P., Aref, A. J., & Filiatrault, A. (2014). Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system. Journal of Structural Engineering, 140(6), 1–12.

society for earthquake engineering 2016 conference. Christchurch.

[7] Priestley, M.J.N., Sritharan, S., Conley, J. and Pampanin, S. 1999. Preliminary Results and Conclusions form the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building, PCI Journal, 44(6): 42-67.

[8] Priestley, M.J.N., and Tao, J. 1993. Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons, PCI Journal, 38(1): 58-69.

[9] El-Sheikh, M., Pessiki, S., Sause, R. and Lu, W. 2000. Moment Rotation Behavior of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Connections, ACI Structural Journal, 97(1): 122-131.

[10] Cheokh, G., Stone, W. and Kunnath, S. 1998. Seismic Response of Precast Concrete Frames with Hybrid Connections, ACI Structural Journal, 95(5): 527-539.

[11] El-Sheikh, M., Sause, R., Pessiki, S. and Lu, W. 1999. Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Frames, PCI Journal, 44(3): 54-71.

[12] Mander, J. B., & Cheng, C.-T. (1997). Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design. Technical Report NCEER-97-0014. US National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.

[13] Zatar, M. and Mutsuyoshi, H. 2000. Reduced Residual Displacements of Partially Prestressed Concrete Bridge Piers, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, January-February, 2000.

[14] Hewes, J. T. (2003). Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns. PhD Thesis, University of California at San Diego.

[15] Billington, S. and Yoon, J. 2004. Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete, Journal of Bridge Engineering, 9(4): 353-363.

[16] Rouse, M. and Billington, S. 2003. Behavior of Bridge Piers with Ductile Fiber Reinforced Hinge Regions and Vertical, Unbonded Post-Tensioning, Proceedings of the FIB Symposium on Concrete Structures in Seismic

[27] Trono, W., Jen, G., Panagiotou, M., Schoettler, M., & Ostertag, C. P. (2015). Seismic response of a damage-resistant recentering posttensioned-HYFRC bridge column. Journal of Bridge Engineering, 20(7), 04014096.

[28] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Massari, M., & Vervelidis, A. (2015). Seismic behavior of posttensioned self-centering precast concrete dual-shell steel columns. Journal of structural engineering, 141(4), 04014115.

[29] Thonstad, T., Mantawy, I. M., Stanton, J. F., Eberhard, M. O., & Sanders, D. H. (2016). Shaking table performance of a new bridge system with pretensioned rocking columns. Journal of Bridge Engineering, 5(4), 4015079.

[30] Varela, S., & Saiidi, M. (2017). Resilient deconstructible columns for accelerated bridge construction in seismically active areas. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 28(13), 1751-1774.

[31] Nema, A. (2018). Development of Low Seismic Damage Structural Systems (Doctoral dissertation, UC San Diego).

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

[33] SeismoStruct. (2018). Pavia: SeismoSoft Ltd.

[34] Lowes, L. N., & Altoontash, A. (2003). Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. Journal of Structural Engineering, 129(12), 1686-1697.

[35] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering, 114(8), 1804-1826.

[36] Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal forces and bending moment. IASBE Proceedings.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Vasseghi , B. Mansouri, S. Rointan, Feasibility Study on Utilizing Self-centering Structural System for Typical Highway Bridges in Iran, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4359-4378.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18323.6835