

Study on Seismic Performance of Typical Highway Bridges in Iran Using Precast Bents and Accelerated Bridge Construction (ABC)

Akbar Vasseghi

Associate Professor, Structural Engineering Research Center
vasseghi@iiees.ac.ir

Babak Mansouri, Sadaf Rointan

In seismic regions, highway bridges are usually designed using capacity design principles by enforcing formation of plastic hinges in the columns. The columns are expected to undergo major inelastic deformations during severe earthquakes, leading to significant residual drift. The residual drift is one of the decisive seismic serviceability parameters, and it defines whether a bridge can be used after the earthquake or not. For example, after the Kobe earthquake in 1995, more than 100 bridges with residual drift of more than 1.75% had to be demolished, although most of these bridges were sufficiently stable [1]. The residual drift is also an important parameter for estimating the post-earthquake resistance and the stability of the bridge structure against aftershocks [2]. The effects of residual drift on post-earthquake performance have led the scientific communities to develop self-centering structural systems with low residual drift and limited potential damage. In this system, the bridge bents are constructed using precast cap-beams and columns. The precast members are connected to each other and to the foundation by unbounded tendons as shown in Figure (1). The tendons and the superstructure weight provide the self-centering forces for the bridge bend. Internal or external energy dissipation devices are also commonly used at the joints to absorb the seismic energy.

In this project, the seismic performance of a self-centering system proposed by Guerrini et al. [3, 4] is compared with the conventional system for three typical bridges in Iran. An analytical model that simulates the rocking motion of a self-centering system is first developed and validated by test results. Then, typical bents of the three bridges are analyzed as a conventional system and a self-centering system, and the seismic performance of these two systems is compared with each other.

An analytical model is developed for simulation of rocking motion and the self-centering column tested by Guerrini et al., Figure (2) is selected to verify the model. The rocking motion is simulated by using a combination of gap and nonlinear spring elements in order to model the mortar bed underneath the column, Figure (3).

The hysteresis response of the test specimen is compared with the results of the analysis in Figure (4). This figure shows that the hysteresis curves of the analytical model are

بررسی عملکرد لرزه‌ای پل‌های متداول بزرگراهی کشور با استفاده از پایه‌های پیش‌ساخته و روش ساخت پرسرعت

اکبر وائقی

دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه vasseghi@iiees.ac.ir

بابک منصورى، صدف روبین تن

اخیراً در کشورهای پیشرفته انواع سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا با استفاده از پایه‌های پیش‌ساخته و روش ساخت پرسرعت (Accelerated Bridge Construction) 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 نوع سیستم سازه‌ای، ستونها و تیر سرستون پایه میانی به صورت پیش‌ساخته آماده می‌شوند و با استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده به یکدیگر و به فونداسیون متصل می‌گردند، شکل (۱). در این سیستم، تاندون‌های پس کشیده در طول ستون به صورت غیرچسبیده (Unbonded) و داخل غلاف قرار می‌گیرند و به همراه بارهای ثقلی (وزن عرشه پل) باعث برگشت پایه پل به حالت اولیه می‌شوند. برای جذب انرژی لرزه‌ای معمولاً در محل اتصالات از میراگرهای داخلی و یا خارجی استفاده می‌شود.

در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای یک نوع سیستم مرکزگرا 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 صحت‌سنجی 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 تغییرمکان نسبت به سیستم متداول، تغییرمکان پسماند به شدت کاهش می‌یابد. کاهش قابل توجه تغییرمکان پسماند باعث کاهش خسارات لرزه‌ای می‌شود و امکان بهره‌برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌کند. برای توسعه مدل تحلیلی و شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای سیستم مرکزگرا، سیستم پیشنهادی گیورینی و همکاران [۳] 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 (۲) ارائه شده است. در مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای، لایه ملات زیر ستون با استفاده از دو المان گپ و فنر غیرخطی به صورت سری مدل‌سازی شده است، شکل (۳). در شکل (۴)، منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی با نتایج تحلیل مقایسه شده است که نشان می‌دهد منحنی‌های هیستریزس مدل تحلیلی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

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

in good agreement with the test results.

Three different bridges with various span lengths constructed in Iran are selected for this study. Typical concrete bends of the three bridges are modeled and analyzed once as a conventional system and once as a self-centering system, and the seismic performance of these two systems is compared with each other. Nonlinear response history analyses are conducted for each bridge bend using seven earthquake records. Figure (5) shows the typical displacement responses of the two systems. As shown in this figure, the residual displacement of the self-centering system is very small, but the peak displacement is higher compared to the conventional system. The residual drift ratios in one of the bridges are shown in Figure (6). In the conventional system, the residual drift ratio is between 0.9% and 1.9% and the potential seismic damage would be severe. The residual drift in self-centering system is less than 0.4% and thus the potential damage would be negligible.

In this project, typical bends of three bridges in Iran were modeled with the conventional system and the self-centering system, and the seismic performance of these two systems was compared. Seismic response of each system was evaluated by nonlinear time history analyses using seven earthquake records. The results of this study show that the peak lateral drift in the self-centering system increases significantly. However, due to the lack of displacement sensitive non-structural items on highway bridges, the increase in the peak drift is not expected to cause serious problems. In this system, despite the increase in the peak drift, the residual drift is greatly reduced. In some cases, the residual drift ratios of the conventional system are more than the critical level of 1.75%. In these cases, the potential damage will be severe and based on previous experience, the bridges need to be demolished. The residual displacement of the self-centering system in all cases is less than 0.4 percent and the potential damage is negligible. The significant reduction of the residual displacement in the self-centering system drastically reduces the repair costs and allows for the operation of the bridge immediately after the earthquake.

References:

- [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] 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.

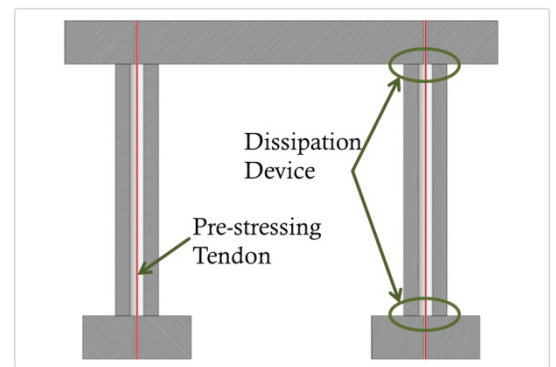
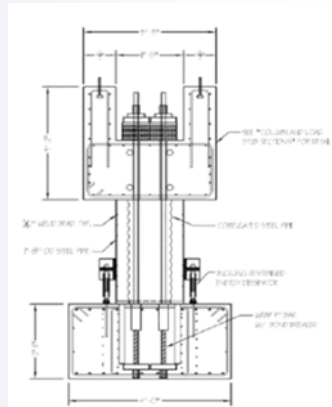
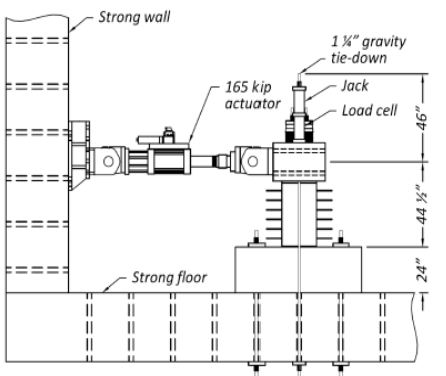
شدند. در سیستم مرکزگرا، قطر ستونها از ۱۲۰ سانتی متر به ۸۰ سانتی متر کاهش یافته و برای هر ستون از ۴ عدد تاندون با نیروی مؤثر پیش تنیدگی ۱۶۰۰ کیلو نیوتن جهت تامین مرکزگرایی سیستم و ۱۲ عدد میراگر BRB جهت استهلاک انرژی زلزله استفاده شده است. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پایه میانی این پلها با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا، با انجام تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای هفت شتابنگاشت دور و نزدیک گسل با بزرگای بیش از ۶٫۵ انجام شد. نمودار جابه‌جایی بالای پایه برای یکی از موارد در شکل (۵) ارائه شده است. مرکزگرایی و برگشت‌پذیری سیستم مرکزگرا در منحنی هیستریزیس کاملاً مشهود است. نمودار جابه‌جایی پایه پل نشان می‌دهد که جابه‌جایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابه‌جایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. در شکل (۶) جابه‌جایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در سیستم متداول، جابه‌جایی نسبی پسماند بین ۰٫۹ تا ۱٫۹ درصد است و در دو مورد این جابه‌جایی 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 جابه‌جایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰٫۴ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد.

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 مؤثر پیش‌تنیدگی ۱۶۰۰ کیلو نیوتن جهت تأمین مرکزگرایی 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 تاریخیچه 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 جابه‌جایی جانبی در سیستم مرکزگرا به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. حداکثر مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی در سیستم متداول و سیستم مرکزگرا به ترتیب ۸٫۴ درصد و ۱۰٫۶ درصد می‌باشند ولی به دلیل عدم وجود اقلام غیرسازه‌ای حساس به جابه‌جایی در پلهای بزرگراهی، انتظار نمی‌رود که افزایش جابه‌جایی جانبی در سیستم مرکزگرا منجر به خسارت جدی به پل شود. در این سیستم با وجود افزایش بیشینه جابه‌جایی جانبی نسبت به سیستم متداول، جابه‌جایی پسماند به شدت کاهش می‌یابد. جابه‌جایی 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 حالیکه جابه‌جایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰٫۴ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد. کاهش قابل توجه تغییرمکان پسماند در سیستم مرکزگرا، هزینه‌های بازسازی را به شدت کاهش می‌دهد و امکان بهره‌برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌سازد.

[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.

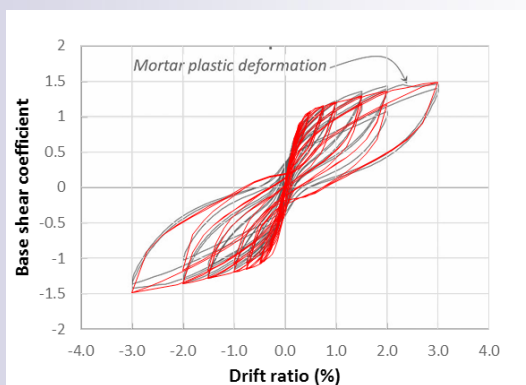
واژه‌های کلیدی: پیش‌ساخته، ساخت پرسرعت، سیستم هیبریدی، کابل پیش‌تنیده، جابه‌جایی پسماند

Keywords: Bridge, Earthquake, Self-centering system, Resilient structure, Residual displacement

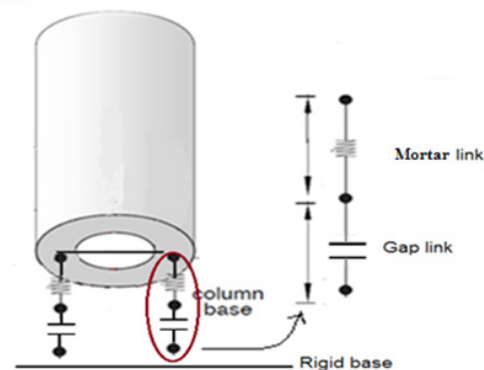


شکل (۲): نمای کلی نمونه آزمایشگاهی و ابزاربندی آزمایش [۴]

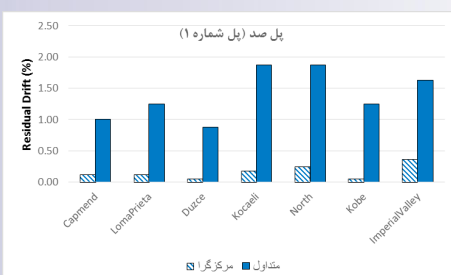
شکل (۱): سیستم سازه‌ای مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای



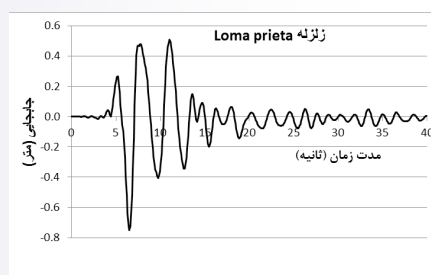
شکل (۴): مقایسه منحنی هیستریزس مدل تحلیلی با آزمایش



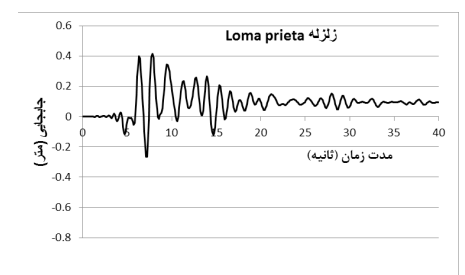
شکل (۳): نحوه مدلسازی لایه ملات زیر ستون



شکل (۶): جابه‌جایی نسبی پسماند در پل شماره ۱



ب) سیستم مرکزگرا



الف) سیستم متداول

شکل (۵): نمونه نمودار جابه‌جایی پایه پل