

## Analytical-Technical and Economic Evaluation of Seismic Retrofit Techniques for an Existing Highway Bridge

Mahmood Hosseini

Associate Professor, Structural Engineering Research Center

hosseini@iiees.ac.ir

Seyyed Reza Khavari

The seismic vulnerability of an existing two span reinforced concrete slab bridge with round columns as piers was studied for making decision about its retrofit design, and after realizing that it is highly vulnerable, three different techniques were proposed for its seismic retrofit, and were compared with both technical and cost aspects. First, the bridge design was checked by the seismic provisions of American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), showing that the bridge is seismically weak in bending resistance and particularly shear resistance of its piers' columns. Next, a push over analysis (POA) was performed, for which the target displacement was calculated by shear-displacement relationship at the center of gravity of the bridge deck. The rotations of plastic hinges in columns, obtained by POA were compared with the FEMA 356 acceptance levels, which confirmed the high vulnerability of the bridge. Finally, three various retrofit designs, including: 1) adding the strength and stiffness of pier columns by R/C jackets, 2) adding some steel diagonal elements in both lateral and longitudinal directions, and 3) fixing the deck to abutments connections in lateral direction to make it possible to use the abutment walls as shear walls, were considered and checked by POA as well as Nonlinear Time History Analyses (NLTHA), through applying the three-component accelerograms of a set of selected appropriate earthquakes.

The bridge was modeled using the CSI Bridge software assuming the average values for mechanical properties of concrete as well as steel bars. The bridge specifications for POA and NLTHA were defined according FEMA 356 regulations according to the AASHTO design spectra. Several selected three-component accelerograms, with the peak ground acceleration values compatible with the level of seismic hazard in the site, and the frequency contents compatible with the conditions of the bridge site soil, were used for NLTHA. Seismic excitations were applied with various incident angles to make sure that the maximum seismic responses of the bridge are obtained. The response values considered for comparison of the proposed retrofit techniques included shear force and bending moment in the bridge piers and abutments, resulting in maximum combined

## ارزیابی تحلیلی-فنی و اقتصادی روش‌های بهسازی لرزه‌ای برای یک پل بزرگراهی موجود

محمود حسینی

دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه hosseini@iiees.ac.ir

سید رضا خاوری

در این پروژه پژوهشی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک پل دالی بتنی مسلح دو دهانه موجود با ستون‌های گرد در بخش پایه‌ها برای تصمیم‌گیری در مورد طراحی مقاوم‌سازی آن مورد مطالعه قرار گرفت و پس از پی بردن به اینکه پل مورد نظر بسیار آسیب‌پذیر است، سه تکنیک مختلف برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای آن پیشنهاد شدند و از جنبه‌های فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفتند. ابتدا، طرح پل توسط مقررات لرزه‌ای انجمن بزرگراه‌های ایالتی و حمل‌ونقل آمریکا (AASHTO) بررسی شد و نشان داد که پل از نظر مقاومت خمشی و به ویژه مقاومت برشی ستونهای پایه‌های آن در برابر زلزله ضعیف است. سپس، یک تحلیل بارافزایی (POA) انجام شد که برای آن جابه‌جایی هدف با رابطه برش-جابه‌جایی در مرکز عرشه پل محاسبه شد. چرخش لولاهای پلاستیک در ستونها، بدست آمده توسط POA با سطوح پذیرش FEMA 356 مقایسه شد که آسیب‌پذیری بالای پل را تأیید می‌کند. در نهایت، سه طرح مختلف مقاوم‌سازی شامل: (۱) افزودن استحکام و سختی ستونهای پایه توسط جاکت‌های بتنی مسلح، (۲) افزودن برخی عناصر مورب فولادی در هر دو جهت جانبی و طولی، (۳) تثبیت عرشه به اتصالات تکیه‌گاه‌های کناری پل در جهت جانبی برای ایجاد امکان استفاده از دیوارهای تکیه‌گاه به عنوان دیوار برشی. این سه روش توسط POA و همچنین تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NLTHA)، با اعمال شتابانگشت‌های سه مؤلفه‌ای مجموعه‌ای از زلزله‌های مناسب انتخاب شده بررسی شدند.

پل مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار CSI Bridge با فرض مقادیر متوسط برای خواص مکانیکی بتن و همچنین میلگردهای فولادی مدلسازی شد. مشخصات پل برای POA و NLTHA بر اساس مقررات FEMA 356 بر اساس طیف طراحی AASHTO تعریف شد. از شتابانگشت سه مؤلفه‌ای انتخاب شده، با مقادیر اوج شتاب زمین سازگار با سطح خطر لرزه‌ای ساختگاه پل و محتوای فرکانسی سازگار با شرایط خاک ساختگاه پل، برای NLTHA استفاده شد. پاسخ‌های لرزه‌ای با زوایای برخورد مختلف اعمال شد تا اطمینان حاصل شود که حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای پل به دست می‌آید. مقادیر پاسخ در نظر گرفته شده برای مقایسه تکنیک‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی شامل نیروی برشی و لنگر خمشی در پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌ها بود که منجر به حداکثر تنش ترکیبی و همچنین جابه‌جایی نسبی عرشه پل در هر دو جهت طولی و جانبی برای بررسی برخورد بین عرشه و تکیه‌گاه‌های پل بود.

نتایج تجزیه و تحلیل بدست آمده توسط هر دو روش POA و NLTHA

در هر دو مدل اصلی و مقاوم‌سازی شده پل نشان می‌دهد که:

• پل موجود در شرایط فعلی در برابر زلزله‌های احتمالی منطقه بسیار آسیب‌پذیر است؛

• هر سه روش مقاوم‌سازی پیشنهادی از نظر فنی قابل قبول هستند، اما

stress, and also the relative displacement of the bridge deck in both longitudinal and lateral directions, in order to check if collision occurs between deck and abutments of the bridge.

The analyses results obtained by both POA and NLTHA on both original and retrofitted models of the bridge show that:

- The existing bridge in its current condition is highly vulnerable against the probable earthquakes in the region;
- All three proposed retrofit methods are technically acceptable, however, the third method, namely fixing the deck to abutments connections in lateral direction to make it possible to use the abutment walls as shear walls, seems to be practically and economically more feasible;
- It should be noted that in this study the soil-structure-interaction (SSI) was not taken into consideration, and for more reliable results it is recommended to consider SSI in seismic analysis as well;
- It should also be notified that in this study the effect of corrosion of the steel reinforcing bars was not taken into consideration, and therefore, it is recommended to repeat the corresponding analyses with reduced values of the cross-sectional areas of steel reinforcing bars for taking the corrosion effect into account;
- Finally, it is notified that, since in this study there were no sampling possibility of the bridge concrete and steel materials for testing, and obtaining their mechanical properties, only some average values were used. However, it is highly recommended to conduct the required test on the materials and use more realistic values in the corresponding analysis.

**Keywords:** Reinforced concrete bridges, Flexural and shear strengths, Pushover and nonlinear time history analyses, Retrofitting techniques, Jacketing

روش سوم یعنی تثبیت عرشه به اتصالات تکیه‌گاه در جهت جانبی برای امکان استفاده از دیوارهای تکیه‌گاه به عنوان دیوار برشی، از نظر عملی و اقتصادی امکان پذیرتر به نظر می‌رسد؛

• لازم به ذکر است که در این مطالعه اندرکنش خاک-سازه (SSI) در نظر گرفته نشده است و برای حصول نتایج قابل اطمینان‌تر پیشنهاد می‌شود SSI در تحلیل لرزه‌ای نیز در نظر گرفته شود؛

• همچنین لازم به ذکر است که در این مطالعه اثر خوردگی میلگردهای فولادی مورد توجه قرار نگرفته است، و لذا توصیه می‌شود تحلیل‌های مربوطه با در نظر گرفتن اثر خوردگی از طریق کاهش مقادیر سطوح مقطع میلگردهای فولادی تکرار شود؛

• در انتها، از آنجایی که در این تحقیق امکان نمونه‌برداری از مصالح بتن و فولاد پل برای آزمایش و به دست آوردن خواص مکانیکی آنها وجود نداشت، تنها از مقادیر متوسط استفاده شد. از این رو، قویاً توصیه می‌شود که آزمایش‌های مورد نیاز بر روی مواد انجام شود و از مقادیر واقعی‌تر در تجزیه و تحلیل مربوطه استفاده گردد.

**واژه‌های کلیدی:** پلهای بتن مسلح، مقاومت خمشی و برشی، تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی، تحلیل بارافزایی، روش‌های مقاوم‌سازی، جاکتینگ