

## **Influential Article Review — The Effect of Seismic Excitation on the Passive Stiffness of a Seismically Isolated Bridge Deck**

**Christina Butler**

**Eric Guzman**

*This paper examines the performance of modified bridge elements under simulated earthquake excitations. We present insights from a highly influential paper. Here are the highlights from this paper: This study is on the seismic performance assessment of a seismically isolated bridge structure with passive stiffness modification implementation. Performance of the passive stiffness modification approach is compared with semi-active control implementation on the bridge deck. El Centro NS (north-south) and Kobe EW (east-west) earthquake excitations are used for the dynamic simulations of the passive case. Results are given in a comparative way for the uncontrolled bridge deck, passive stiffness modification implemented and semi-actively controlled, seismically isolated bridge deck (Yanik & Aldemir, 2018). Frequency dependent acceleration, velocity and displacement response transmissibility ratios are defined to examine the results. For our overseas readers, we then present the insights from this paper in Spanish, French and German.*

*Keywords: strategic innovation, business, seismic performance, seismically isolated*

### **HIGHLY INFLUENTIAL ARTICLE**

We used the following article as a basis of our evaluation:

Yanik, A., & Aldemir, U. (2018). Passive Stiffness Modification of a Seismically Isolated Bridge Deck under Seismic Excitation. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 13(5).

This is the link to the publisher's website:

<https://articlegateway.com/index.php/JSIS/article/view/166>

### **EDITOR'S NOTES**

This paper, titled "Passive Stiffness Modification of a Seismically Isolated Bridge Deck under Seismic Excitation," was penned by authors Arcan Yanik and Unal Aldemir back in 2018. This article review aims to point the spotlight toward the points raised by the study by both Yanik and Aldemir, as well as to emphasize its importance as an example of structural engineering research.

In the study, Yanik and Aldemir described and assessed the performance of a bridge structure that's been seismically isolated; this particular structure was implemented with what's called a passive stiffness modification (PSM). The study implemented a single degree-of-freedom (SDOF) dynamic model that was

placed under both seismic-type and harmonic-type excitations. Passive case dynamic simulations, meanwhile, were determined using El Centro North-South (El Centro-NS) and Kobe East-West (Kobe-EW) earthquake excitations.

The performance of this modified bridge model was compared to a semi-controlled, seismically-isolated variant simulated on the deck of the bridge, as well as an uncontrolled bridge deck simulation; the authors defined both in their previous work (Yanik & Aldemir, 2018a). Meanwhile, two semi-active control policies were considered compared to PSM: continuous (pseudo-skyhook) control and bang-bang control.

Results show that bang-bang control was not enough to reduce bridge deck responses compared to the PSM model, while PSM reduced uncontrolled seismic responses when under harmonic El Centro-NS and Kobe-EW excitations. On the other hand, implementing the PSM method led to smaller relative displacement and velocity ratios compared to the semi-active continuous control case.

Overall, Yanik and Aldemir thus concluded that using their PSM method was truly beneficial, considering that it required no control device implementation, it was more effective compared to a semi-active damper implementation under bang-bang control, and it was also more efficient compared to a semi-active damper implementation under continuous control.

The work in question maintains its relevancy in that it makes use of simulation methods apt for its application during its time of writing. After all, the nature of the field this particular work falls under often lends itself better to such approaches, especially in terms of practicality. This is all the more relevant considering the tolerances considered in such structural implements, which require engineers and scientists to approach their analyses in a measured and methodical manner.

Additionally, the supporting figures and equations give proper context and reason behind the measurements and conclusions made by authors Yanik and Aldemir. If anything, readers may only find the introduction of the work lacking enough establishment of context to guide the, through the ideas being explored in the paper.

Overall, Yanik and Aldemir wrote out a study that tackled an engineering problem in the most efficient and effective way, through the power of computer simulation. The work of the two joins the multitudes of research works both inside and outside the field of structural research and engineering which make proper use of the computational technologies made available to us in the present day. Works like the one discussed here serve as the basis for future research, perhaps to be done with even more sophisticated technologies, that serve to make humanity's future safer, more efficient, and ultimately, better than the ones used and thought up before.

## REFERENCES

- Yanik, A., & Aldemir, U. (2018a). A numerical study on semi-active control of a bridge deck under seismic excitation. *International Journal of Architectural, Civil and Construction Sciences*, 11.0(8). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1340573>
- Yanik, A., & Aldemir, U. (2018b). Passive stiffness modification of a seismically isolated bridge deck under seismic excitation. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 13(5). <https://doi.org/10.33423/jsis.v13i5.166>

## INTRODUCTION

There has been a remarkable interest, on passive control and semi-active control of structures, in the area of earthquake engineering for the last decade (Yanik & Aldemir, 2018; Bitaraf, et al., 2010; Behnam & Khoshnoudian, 2012). Some important and up to date studies on semi-active control of structures are given in this paragraph. An implementable proposed predictive control algorithm for suppressing the earthquake response using a nonlinear semi-active damper was defined in (Aldemir, 2010). The performance of a simple 2-DOF base-isolated structure was investigated numerically in this study. Two semi-active control methods for seismic protection of structures using MR dampers were presented in (Bitaraf, et al., 2010). They used a simple shear frame structure incorporating two MR dampers for

numerical simulations under two far field and two near field earthquakes. Development of a semi-active control algorithm, based on several performance levels anticipated from an isolated building, during different levels of ground shaking corresponding to various earthquake hazard levels was given in (Behnam & Khoshnoudian, 2012). Their proposed performance-based algorithm was based on a modified version of the well-known semi-active skyhook control algorithm. A fuzzy rule-based semi-active control of building frames, using semi-active hydraulic dampers (SHDs), was presented in (Ghaffarzadeh, et al., 2013). Their control approach was validated by using 3-story and 10 story shear frame structures under El Centro earthquake. A direct semi-active control method is introduced to mitigate the seismic responses of structures equipped with magneto-rheological (MR) dampers was presented in (Mohajer Rahbari, et al., 2013). Their algorithm was applied to control seismic vibrations of a three-story and an 11-story sample shear building that have been equipped with the MR damper control system. A 3-DOF per floor tier building analytical model which can incorporate models of either traditional tuned mass dampers (TMD) or MR dampers (MR-MD) was presented in (Yanik, et al., 2013). Their 2D building plan is converted to a 3DOF tier building and given in They stated that a desired damper force can be calculated from the present values of the state vector and mod-el parameters estimated off-line. A wavelet neural network-based semi-active control model was proposed in order to provide accurately computed input voltage to the magneto-rheological dampers to generate the optimum control force of structures in (Hashemi et al., 2016). Their model was optimized by a localized genetic algorithm and then applied to a nine-story benchmark structure subjected to  $1.5 \times$  El Centro earthquake. They performed the dynamic analysis in one direction (north-south) and used the benchmark structure numerical model for their validations. A semi-active control strategy, in which  $H_{\infty}$  control algorithm was used and magneto-rheological dampers were employed for an actuator, was presented to suppress the nonlinear vibration in (Yan et al., 2016). Their numerical example was a twenty story benchmark building. The application of a semi-active fuzzy based control system for seismic response reduction of a single degree-of- freedom (SDOF) framed structure using a Magneto-rheological (MR) damper was presented in (Braz-Cesar & Barros, 2018). They mentioned that the results of the numerical simulations showed the effectiveness of the suggested semi-active control system in reducing the response of the SDOF structure. Besides semi-active control of structures, this study is related with passive stiffness modification methods and seismically isolated structures. Therefore, the literature review on the passive control studies presented during the last decade, are given below.

Among passive control devices, seismic isolation systems (base isolation systems) are mostly researched and widely applied in practice. Base isolation systems are effective in reducing the inter-story displacements of the superstructure. However, the excessive overturning moments for the base isolated multi-story buildings and the excessive base displacements due to the near fault excitations are the issues to be addressed for these systems (De Iuliis et al., 2008). Two new models for the simplified seismic analysis of seismically isolated highway bridges with massive piers were proposed in (Mao et al., 2017). The dynamic response of a seismically isolated bridge located in the vicinity of a surface fault rupture ("Case A") or crossing a fault rupture zone ("Case B") was calculated by utilizing a near-fault ground motion record processed with and without a displacement offset in (Yang et al., 2017). The effects of vertical excitation on the seismic performance of a seismically isolated bridge with sliding friction bearings and different bearing friction coefficients and different stiffness levels (pier diameter) were discussed using example calculations, and the effects of excitation direction for vertical excitation on the analysis results were explored by (Wang et al., 2016). The failure modes of isolated continuous girder bridge subjected to strong ground motions by developed weighted rank sum ratio method, in combination with developed 3D finite element bridge models were investigated in (Tan et al., 2017). A parametric probabilistic demand hazard analysis is performed over a grid in the isolation bearing parameter space, using high-throughput cloud-computing resources, for a California high-speed rail (CHSR) prototype bridge by (Li & Conte, 2018). Another commonly used passive device is passive viscous damper (tuned mass damper) (Xiang & Nishitani, 2014; Sun & Nagarajaiah, 2014). Probabilistic models for estimating the seismic demands on reinforced concrete (RC) bridges with base isolation was proposed in (Gardoni & Trejo, 2013). Although they are widely studied, the effectiveness of these devices is limited due to the mistuning effect (Casati

& Giuliani, 2009). If the tuning frequency of the mass damper differs from the main frequency of the structure, tuned mass damper will have little effect on reduction of seismic responses.

The dynamic behavior of a bridge deck system, with isolation bearing (seismic isolator) and stiffness modification method is analyzed in this paper. The dynamic simulations are performed under the effect of seismic type and harmonic type of excitations. The bridge deck is idealized by a single degree of freedom (SDOF) dynamic model. El Centro NS(north-south), and Kobe EW(east-west) earthquake excitations are used for the dynamic simulations. Kanai-Tajimi spectrum is adopted for generating the harmonic excitation. For comparison purposes, the semi-active control case, and bridge deck example defined in (Yanik & Aldemir, 2018), are used in this paper. In comparison with the passive stiffness modification method, two semi-active control policies are considered. These control policies are continuous (pseudo-skyhook) control and bang-bang control. Different damping levels are analyzed to fully understand the behavior of the bridge deck system.

## DISCUSSION

In this model the mass of the bridge deck  $m_0$  is 1065.7 tons, pier stiffness  $k_0$  is  $189 \times 10^6$  N/m, structural damping coefficient  $c_0$  is  $1.42 \times 10^6$  N/m/s. The dynamic analysis is performed for El Centro 1940 NS and Kobe EW excitations. The results for passive stiffness modification method implementation on the bridge deck system, with isolation bearing are given in Figure 4. Frequency dependent acceleration, velocity and displacement response transmissibility ratios with respect to natural vibration periods, for different stiffness levels are shown in Figure 4 under the effect of El Centro NS earthquake.

The curves in Figure 4 represent different damping ratios as defined in the section of passive stiffness modification method. Transmissibility ratios of the bridge deck with passive stiffness modification method under the effect of El Centro EW earthquake are given in Figure 5 for different damping levels. The comparison for passive stiffness modification method and continuous control cases are carried out considering harmonic, and El Centro NS excitations. Kanai-Tajimi spectrum was used in generating the harmonic excitation.

Passive stiffness modification method implementation under the effect of harmonic excitation is given in Figure 8. In this paper it has been observed that in comparison with passive stiffness modification method, bang-bang control was not effective in reducing the bridge deck responses. Under the effect of harmonic and El Centro NS and Kobe EW excitations, passive stiffness modification method showed reasonable performance on reducing the uncontrolled seismic responses. It was indicated from transmissibility ratios that correspond to harmonic excitation, passive stiffness modification method implementation resulted in smaller relative displacement and velocity ratios than semi-active continuous control case.

Besides, the acceleration ratios are at the same extent for passive stiffness modification method and continuous control. For El Centro earthquake, it has been observed that both control cases showed similar uncontrolled bridge deck response reduction performance. Passive stiffness modification method does not require any control device implementation to the structure, and it is more effective than a semi-active damper implementation case with bang-bang control.

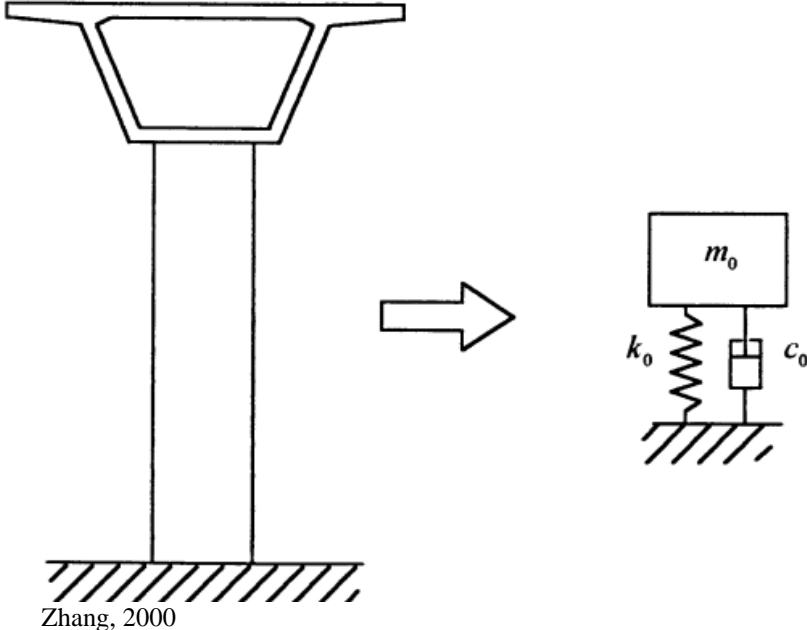
## CONCLUSION

In this paper it has been observed that in comparison with passive stiffness modification method, bang-bang control was not effective in reducing the bridge deck responses. Under the effect of harmonic and El Centro NS and Kobe EW excitations, passive stiffness modification method showed reasonable performance on reducing the uncontrolled seismic responses. It was indicated from transmissibility ratios that correspond to harmonic excitation, passive stiffness modification method implementation resulted in smaller relative displacement and velocity ratios than semi-active continuous control case. Besides, the acceleration ratios are at the same extent for passive stiffness modification method and continuous control. For El Centro earthquake, it has been observed that both control cases showed similar uncontrolled bridge

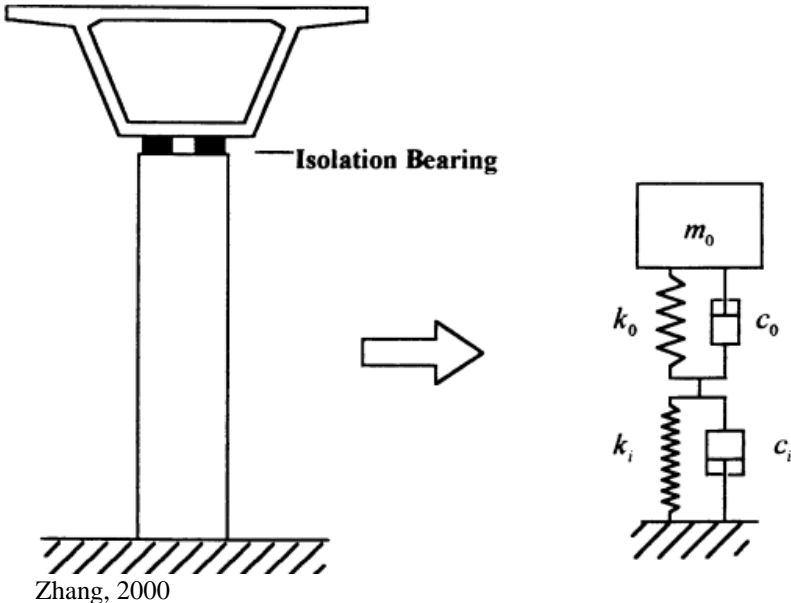
deck response reduction performance. Passive stiffness modification method does not require any control device implementation to the structure, and it is more effective than a semi-active damper implementation case with bang-bang control. In addition, it is slightly more efficient than the semi-active damper case with continuous control.

**APPENDIX**

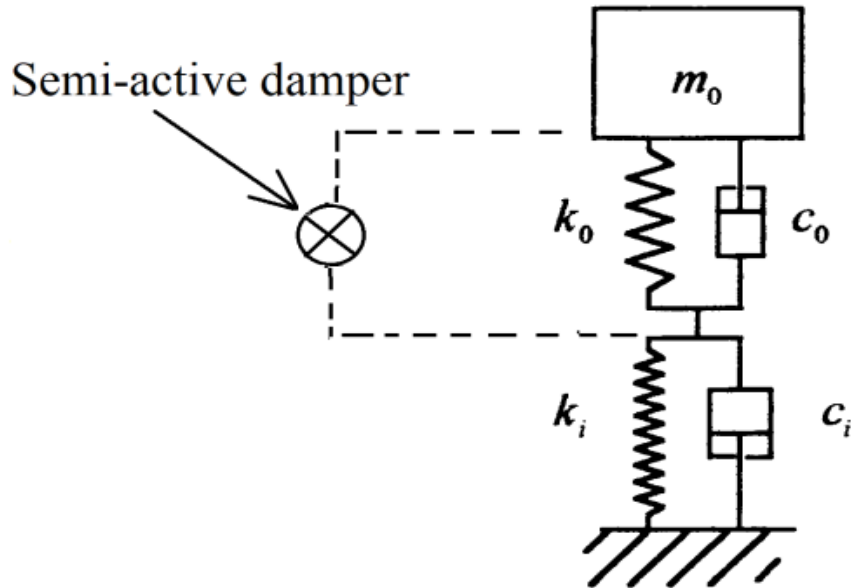
**FIGURE 1  
SDF BRIDGE DECK DYNAMIC MODEL**



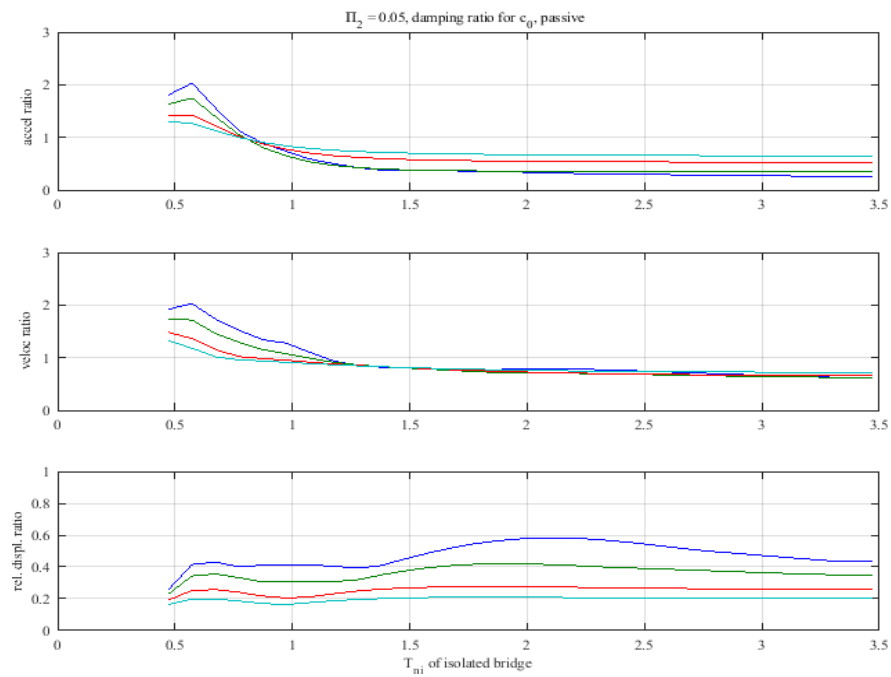
**FIGURE 2  
BRIDGE DECK WITH ISOLATION BEARING**



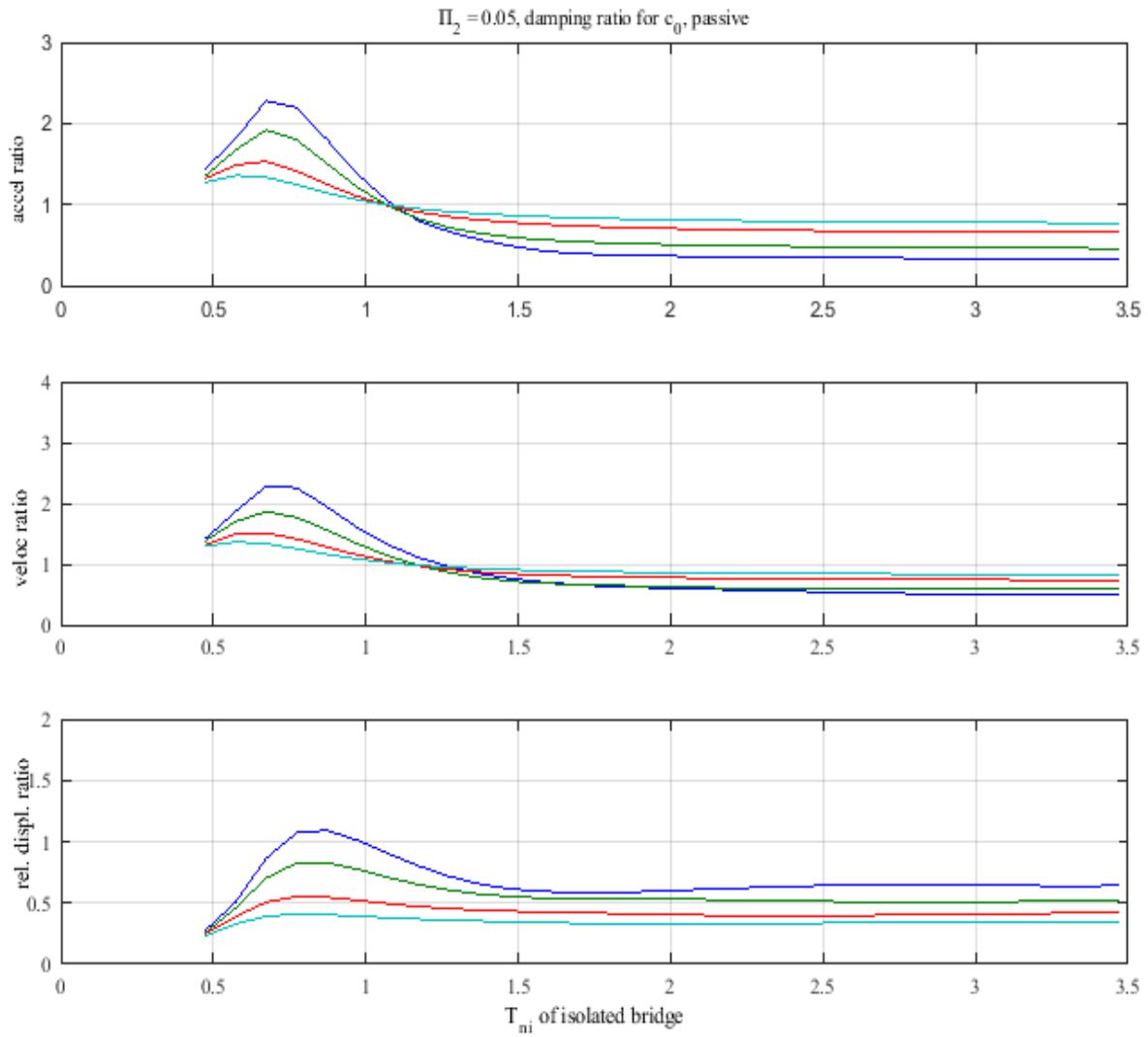
**FIGURE 3**  
**DYNAMIC MODEL OF THE BRIDGE DECK WITH ISOLATION BEARING AND SEMI-ACTIVE DAMPER**



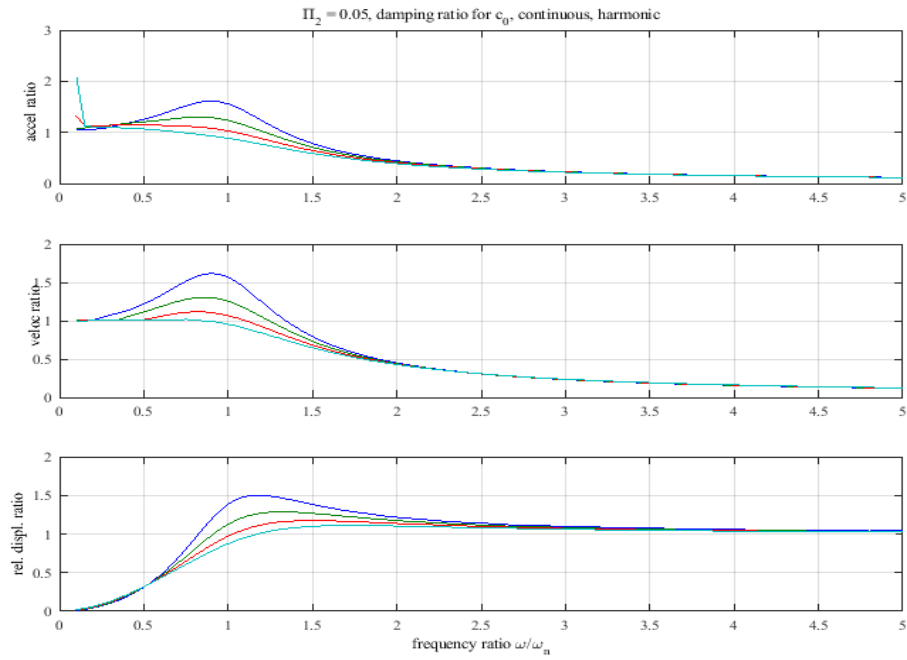
**FIGURE 4**  
**TRANSMISSIBILITY RATIOS FOR PASSIVE STIFFNESS MODIFICATION METHOD UNDER EL CENTRO NS EXCITATION**



**FIGURE 5**  
**TRANSMISSIBILITY RATIOS FOR PASSIVE STIFFNESS MODIFICATION**  
**METHOD UNDER KOBE EW EXCITATION**

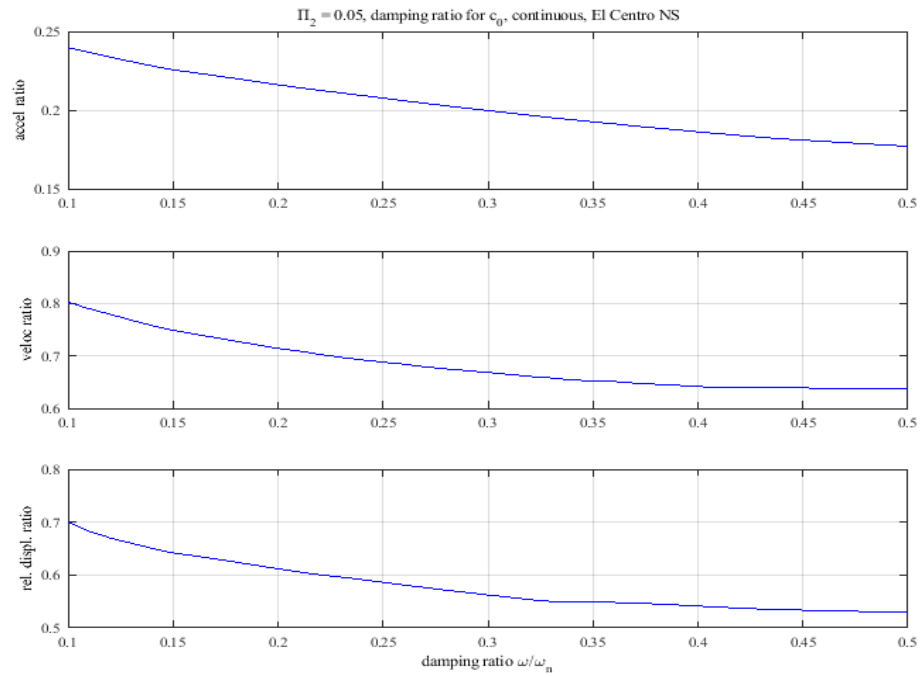


**FIGURE 6**  
**TRANSMISSIBILITY RATIOS FOR CONTINUOUS CONTROL UNDER HARMONIC EXCITATION**



Yanik & Aldemier, 2018

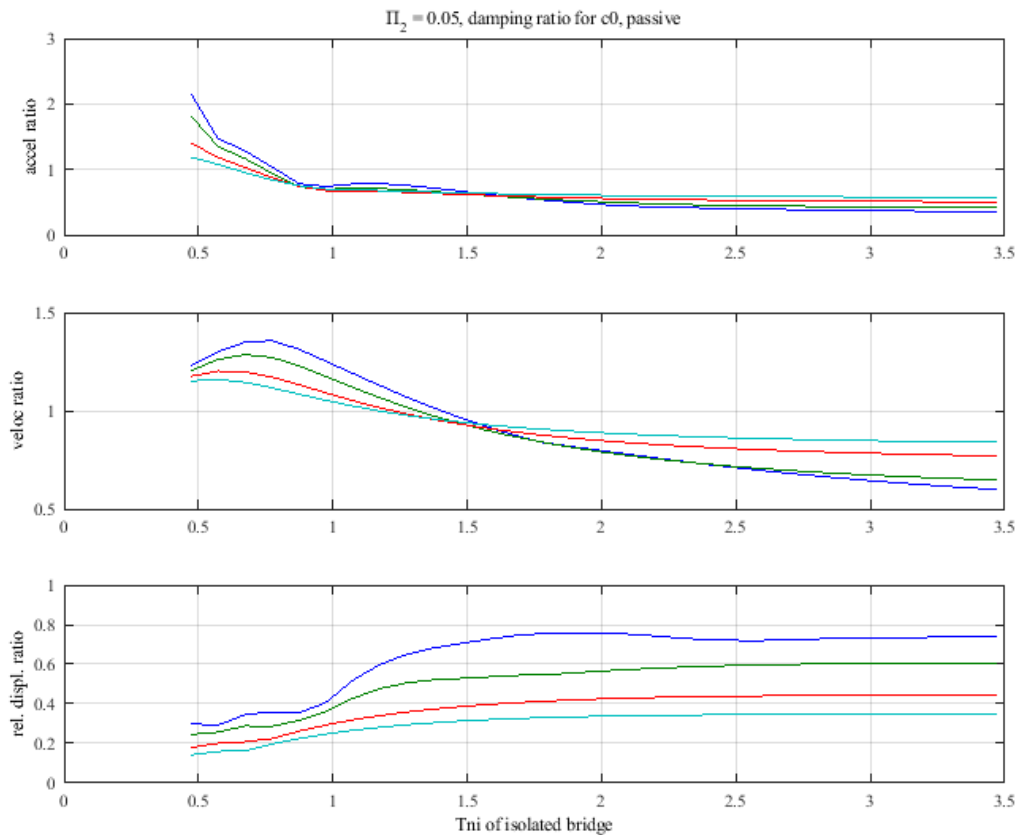
**FIGURE 7**  
**TRANSMISSIBILITY RATIOS FOR CONTINUOUS CONTROL UNDER EL CENTRO EXCITATION**



Yanik & Aldemier, 2018



**FIGURE 8**  
**TRANSMISSIBILITY RATIOS FOR PASSIVE STIFFNESS MODIFICATION**  
**METHOD UNDER HARMONIC EXCITATION**



## REFERENCES

- Abramovitz, M. (1956). Resource and output trends in the United States since 1870. In *Resource and output trends in the United States since 1870* (pp. 1–23). NBER.
- Arrow, K. J. (1972). Economic welfare and the allocation of resources for invention. In *Readings in industrial economics* (pp. 219–236). Palgrave, London.

## TRANSLATED VERSION: SPANISH

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

## VERSION TRADUCIDA: ESPAÑOL

A continuación se muestra una traducción aproximada de las ideas presentadas anteriormente. Esto se hizo para dar una comprensión general de las ideas presentadas en el documento. Por favor, disculpe cualquier error gramatical y no responsabilite a los autores originales de estos errores.

## INTRODUCCIÓN

Ha habido un notable interés, en el control pasivo y el control semiactivo de estructuras, en el área de la ingeniería sísmica durante la última década (Yanik & Aldemir, 2018; Bitaraf, et al., 2010; Behnam & Khoshnoudian, 2012). En este párrafo se presentan algunos estudios importantes y actualizados sobre el control semiactivo de las estructuras. Se definió un algoritmo de control predictivo propuesto implementable para suprimir la respuesta sísmica utilizando un amortiguador semiactivo no lineal en (Aldemir, 2010). El rendimiento de una estructura simple aislada de base 2-DOF se investigó numéricamente en este estudio. Se presentaron dos métodos de control semiactivo para la protección sísmica de estructuras utilizando amortiguadores MR en (Bitaraf, et al., 2010). Utilizaron una estructura de marco de cizallamiento simple que incorpora dos amortiguadores MR para simulaciones numéricas bajo dos terremotos de campo lejano y dos de campo cercano. Se dio el desarrollo de un algoritmo de control semiactivo, basado en varios niveles de rendimiento anticipados desde un edificio aislado, durante diferentes niveles de sacudida del suelo correspondientes a varios niveles de peligro sísmico (Behnam & Khoshnoudian, 2012). Su algoritmo propuesto basado en el rendimiento se basó en una versión modificada del conocido algoritmo de control semiactivo skyhook. Se presentó un control semiactivo difuso basado en reglas de los marcos de construcción, utilizando amortiguadores hidráulicos semiactivos (SHD), en (Ghaffarzadeh, et al., 2013). Su enfoque de control fue validado mediante el uso de estructuras de marco de cizallamiento de 3 y 10 pisos bajo el terremoto de El Centro. Se introduce un método de control semiactivo directo para mitigar las respuestas sísmicas de estructuras equipadas con amortiguadores magneto-reológicos (MR) en (Mohajer Rahbari, et al., 2013). Su algoritmo se aplicó para controlar las vibraciones sísmicas de un edificio de cizalla de muestra de tres pisos y 11 pisos que han sido equipados con el sistema de control de amortiguadores MR. Se presentó un modelo analítico de construcción de 3 DOF por piso que puede incorporar modelos de amortiguadores de masa sintonizados (TMD) tradicionales o amortiguadores MR (MR-MD) (Yanik, et al., 2013). Su plan de construcción 2D se convierte en un edificio de nivel 3DOF y se da en Ellos declaró que se puede calcular una fuerza de amortiguación deseada a partir de los valores actuales del vector de estado y los parámetros mod-el estimados fuera de línea. Se propuso un modelo de control semiactivo basado en redes neuronales wavelet con el fin de proporcionar voltaje de entrada calculado con precisión a los amortiguadores magneto-reológicos para generar la fuerza de control óptima de las estructuras en (Hashemi et al., 2016). Su modelo fue optimizado por un algoritmo genético localizado y luego aplicado a una estructura de referencia de nueve pisos sometida a  $1.5\times$  terremoto de El Centro. Realizaron el análisis dinámico en una dirección (norte-sur) y utilizaron el modelo numérico de estructura de referencia para sus validaciones. Se presentó una estrategia de control semiactivo, en la que se utilizó el algoritmo de control  $H_{\infty}$  y se emplearon amortiguadores magneto-reológicos para un actuador, para suprimir la vibración no lineal en (Yan et al., 2016). Su ejemplo numérico fue un edificio de referencia de veinte pisos. Se presentó la aplicación de un sistema de control semiactivo basado en borrosidad para la reducción de la respuesta sísmica de una estructura enmarcada en un solo grado de libertad (SDOF) utilizando un amortiguador magneto-reológico (MR) (Braz-Cesar & Barros, 2018). Mencionaron que los resultados de las simulaciones numéricas mostraron la efectividad del sistema de control semiactivo sugerido para reducir la respuesta de la estructura SDOF. Además del control semiactivo de estructuras, este estudio está relacionado con métodos de modificación de rigidez pasiva y estructuras aisladas sísmicamente. Por lo tanto, la revisión de la literatura sobre los estudios de control pasivo presentados durante la última década, se dan a continuación.

Entre los dispositivos de control pasivo, los sistemas de aislamiento sísmico (sistemas de aislamiento de base) se investigan principalmente y se aplican ampliamente en la práctica. Los sistemas de aislamiento de base son efectivos para reducir los desplazamientos entre pisos de la superestructura. Sin embargo, los excesivos momentos de vuelco para los edificios de varios pisos aislados de la base y los desplazamientos excesivos de la base debido a las excitaciones cercanas a la falla son los problemas que deben abordarse para estos sistemas (De Iuliis et al., 2008). Se propusieron dos nuevos modelos para el análisis sísmico simplificado de puentes de carreteras aislados sísmicamente con muelles masivos en (Mao et al., 2017). La respuesta dinámica de un puente aislado sísmicamente ubicado en las cercanías de una ruptura de falla

superficial ("Caso A") o cruzando una zona de ruptura de falla ("Caso B") se calculó utilizando un registro de movimiento de tierra cercano a la falla procesado con y sin una compensación de desplazamiento en (Yang et al., 2017). Los efectos de la excitación vertical en el rendimiento sísmico de un puente aislado sísmicamente con rodamientos de fricción deslizantes y diferentes coeficientes de fricción del rodamiento y diferentes niveles de rigidez (diámetro del muelle) se discutieron utilizando cálculos de ejemplo, y los efectos de la dirección de excitación para la excitación vertical en los resultados del análisis fueron explorados por (Wang et al., 2016). Se investigaron los modos de falla del puente de viga continua aislado sometido a fuertes movimientos del suelo mediante el método desarrollado de relación de suma de rango ponderada, en combinación con los modelos de puente de elementos finitos 3D desarrollados en (Tan et al., 2017). Se realiza un análisis probabilístico paramétrico de riesgos de demanda sobre una cuadrícula en el espacio de parámetros de rodamiento de aislamiento, utilizando recursos de computación en la nube de alto rendimiento, para un puente prototipo de ferrocarril de alta velocidad de California (CHSR) por (Li y Conte, 2018). Otro dispositivo pasivo de uso común es el amortiguador viscoso pasivo (amortiguador de masa sintonizado) (Xiang & Nishitani, 2014; Sun & Nagarajaiah, 2014). Se propusieron modelos probabilísticos para estimar las demandas sísmicas en puentes de hormigón armado (RC) con aislamiento de base (Gardoni & Trejo, 2013). Aunque están ampliamente estudiados, la efectividad de estos dispositivos es limitada debido al efecto de desajuste (Casciati & Giulani, 2009). Si la frecuencia de sintonización del amortiguador de masa difiere de la frecuencia principal de la estructura, el amortiguador de masa sintonizado tendrá poco efecto en la reducción de las respuestas sísmicas.

El comportamiento dinámico de un sistema de cubierta de puente, con cojinete de aislamiento (aislador sísmico) y método de modificación de rigidez se analiza en este artículo. Las simulaciones dinámicas se realizan bajo el efecto de excitaciones de tipo sísmico y tipo armónico. La cubierta del puente está idealizada por un modelo dinámico de un solo grado de libertad (SDOF). Las excitaciones sísmicas de El Centro NS (norte-sur) y Kobe EW (este-oeste) se utilizan para las simulaciones dinámicas. El espectro Kanai-Tajimi se adopta para generar la excitación armónica. Para fines de comparación, el caso de control semiactivo y el ejemplo de cubierta de puente definido en (Yanik y Aldemir, 2018), se utilizan en este documento. En comparación con el método de modificación de la rigidez pasiva, se consideran dos políticas de control semiactivo. Estas políticas de control son el control continuo (pseudo-skyhook) y el control bang-bang. Se analizan diferentes niveles de amortiguación para comprender completamente el comportamiento del sistema de cubierta del puente.

## DISCUSIÓN

En este modelo, la masa de la cubierta del puente  $m_0$  es de 1065.7 toneladas, la rigidez del muelle  $k_0$  es de  $189 \times 10^6$  N / m, el coeficiente de amortiguación estructural  $c_0$  es de  $1.42 \times 10^6$  N / m / s. El análisis dinámico se realiza para las excitaciones El Centro 1940 NS y Kobe EW. Los resultados para la implementación del método de modificación de rigidez pasiva en el sistema de cubierta de puente, con cojinete de aislamiento se dan en la Figura 4. Las relaciones de transmisibilidad de respuesta a la velocidad, velocidad y desplazamiento dependientes de la frecuencia con respecto a los períodos de vibración natural, para diferentes niveles de rigidez se muestran en la Figura 4 bajo el efecto del terremoto de El Centro NS.

Las curvas de la Figura 4 representan diferentes relaciones de amortiguación tal como se definen en la sección del método de modificación de rigidez pasiva. Las relaciones de transmisibilidad de la cubierta del puente con método de modificación de rigidez pasiva bajo el efecto del terremoto de El Centro EW se dan en la Figura 5 para diferentes niveles de amortiguación. La comparación para el método de modificación de rigidez pasiva y los casos de control continuo se realizan considerando excitaciones armónicas y el Centro NS. El espectro Kanai-Tajimi se utilizó para generar la excitación armónica.

La implementación del método de modificación de la rigidez pasiva bajo el efecto de la excitación armónica se da en la Figura 8. En este trabajo se ha observado que en comparación con el método de modificación de rigidez pasiva, el control bang-bang no fue efectivo para reducir las respuestas de la cubierta del puente. Bajo el efecto de las excitaciones armónicas y el Centro NS y Kobe EW, el método de modificación de la rigidez pasiva mostró un rendimiento razonable en la reducción de las respuestas

sísmicas no controladas. Se indicó a partir de relaciones de transmisibilidad que corresponden a la excitación armónica, la implementación del método de modificación de rigidez pasiva resultó en relaciones de desplazamiento relativo y velocidad más pequeñas que el caso de control continuo semiactivo.

Además, las relaciones de aceleración son en la misma medida para el método de modificación de rigidez pasiva y el control continuo. Para el terremoto de El Centro, se ha observado que ambos casos de control mostraron un rendimiento similar de reducción de la respuesta incontrolada de la cubierta del puente. El método de modificación de rigidez pasiva no requiere ninguna implementación de dispositivo de control en la estructura, y es más efectivo que un estuche de implementación de amortiguador semiactivo con control bang-bang.

## **CONCLUSIÓN**

En este trabajo se ha observado que en comparación con el método de modificación de rigidez pasiva, el control bang-bang no fue efectivo para reducir las respuestas de la cubierta del puente. Bajo el efecto de las excitaciones armónicas y el Centro NS y Kobe EW, el método de modificación de la rigidez pasiva mostró un rendimiento razonable en la reducción de las respuestas sísmicas no controladas. Se indicó a partir de relaciones de transmisibilidad que corresponden a la excitación armónica, la implementación del método de modificación de rigidez pasiva resultó en relaciones de desplazamiento relativo y velocidad más pequeñas que el caso de control continuo semiactivo. Además, las relaciones de aceleración son en la misma medida para el método de modificación de rigidez pasiva y el control continuo. Para el terremoto de El Centro, se ha observado que ambos casos de control mostraron un rendimiento similar de reducción de la respuesta incontrolada de la cubierta del puente. El método de modificación de rigidez pasiva no requiere ninguna implementación de dispositivo de control en la estructura, y es más efectivo que un estuche de implementación de amortiguador semiactivo con control bang-bang. Además, es ligeramente más eficiente que la caja de amortiguación semiactiva con control continuo.

## **TRANSLATED VERSION: FRENCH**

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

## **VERSION TRADUITE: FRANÇAIS**

Voici une traduction approximative des idées présentées ci-dessus. Cela a été fait pour donner une compréhension générale des idées présentées dans le document. Veuillez excuser toutes les erreurs grammaticales et ne pas tenir les auteurs originaux responsables de ces erreurs.

## **INTRODUCTION**

Il y a eu un intérêt remarquable, sur le contrôle passif et le contrôle semi-actif des structures, dans le domaine de l'ingénierie sismique au cours de la dernière décennie (Yanik & Aldemir, 2018; Bitaraf, et coll., 2010; Behnam et Khoshnoudian, 2012). Quelques études importantes et à jour sur le contrôle semi-actif des structures sont données dans ce paragraphe. Un algorithme de contrôle prédictif proposé implémentable pour supprimer la réponse aux tremblements de terre à l'aide d'un amortisseur semi-actif non linéaire a été défini dans (Aldemir, 2010). La performance d'une structure simple isolée de base 2-DOF a été étudiée numériquement dans cette étude. Deux méthodes de contrôle semi-actif pour la protection sismique des structures à l'aide d'amortisseurs MR ont été présentées dans (Bitaraf, et al., 2010). Ils ont utilisé une structure de cadre de cisaillement simple incorporant deux amortisseurs MR pour des simulations numériques sous deux tremblements de terre en champ lointain et deux tremblements de terre en champ proche. Le développement d'un algorithme de contrôle semi-actif, basé sur plusieurs niveaux de

performance anticipés à partir d'un bâtiment isolé, lors de différents niveaux de secousses du sol correspondant à différents niveaux de risque sismique a été donné dans (Behnam & Khoshnoudian, 2012). L'algorithme basé sur les performances proposé était basé sur une version modifiée de l'algorithme de contrôle semi-actif bien connu du skyhook. Un contrôle semi-actif flou basé sur des règles des cadres de bâtiment, à l'aide d'amortisseurs hydrauliques semi-actifs (SHD), a été présenté dans (Ghaffarzadeh, et al., 2013). Leur approche de contrôle a été validée en utilisant des structures de cadre de cisaillement de 3 et 10 étages sous le tremblement de terre d'El Centro. Une méthode de contrôle semi-actif direct est introduite pour atténuer les réponses sismiques des structures équipées d'amortisseurs magnéto-rhéologiques (MR) a été présentée dans (Mohajer Rahbari, et al., 2013). Leur algorithme a été appliqué pour contrôler les vibrations sismiques d'un bâtiment de cisaillement d'échantillons de trois étages et de 11 étages qui ont été équipés du système de contrôle des amortisseurs MR. Un modèle analytique de bâtiment à 3 DOF par étage qui peut incorporer des modèles d'amortisseurs de masse réglés traditionnels (TMD) ou d'amortisseurs MR (MR-MD) a été présenté dans (Yanik, et al., 2013). Leur plan de construction 2D est converti en un bâtiment de niveau 3DOF et donné dans Ils ont déclaré qu'une force d'amortissement souhaitée peut être calculée à partir des valeurs actuelles du vecteur d'état et des paramètres mod-el estimés hors ligne. Un modèle de contrôle semi-actif basé sur un réseau neuronal d'ondelettes a été proposé afin de fournir une tension d'entrée calculée avec précision aux amortisseurs magnéto-rhéologiques afin de générer la force de contrôle optimale des structures dans (Hashemi et al., 2016). Leur modèle a été optimisé par un algorithme génétique localisé, puis appliqué à une structure de référence de neuf étages soumise à  $1,5\times$  tremblement de terre d'El Centro. Ils ont effectué l'analyse dynamique dans une direction (nord-sud) et ont utilisé le modèle numérique de la structure de référence pour leurs validations. Une stratégie de contrôle semi-actif, dans laquelle un algorithme de contrôle  $H_\infty$  a été utilisé et des amortisseurs magnéto-rhéologiques ont été utilisés pour un actionneur, a été présentée pour supprimer la vibration non linéaire dans (Yan et al., 2016). Leur exemple numérique était un bâtiment de référence de vingt étages. L'application d'un système de contrôle semi-actif à base floue pour la réduction de la réponse sismique d'une structure encadrée à un seul degré de liberté (SDOF) à l'aide d'un amortisseur magnéto-rhéologique (MR) a été présentée dans (Braz-Cesar & Barros, 2018). Ils ont mentionné que les résultats des simulations numériques montraient l'efficacité du système de contrôle semi-actif suggéré pour réduire la réponse de la structure SDOF. Outre le contrôle semi-actif des structures, cette étude est liée aux méthodes de modification passive de la rigidité et aux structures isolées sismiquement. Par conséquent, la revue de la littérature sur les études de contrôle passif présentées au cours de la dernière décennie est donnée ci-dessous.

Parmi les dispositifs de contrôle passif, les systèmes d'isolation sismique (systèmes d'isolation de base) sont principalement étudiés et largement appliqués dans la pratique. Les systèmes d'isolation de base sont efficaces pour réduire les déplacements entre les étages de la superstructure. Cependant, les moments de renversement excessifs pour les bâtiments isolés de base à plusieurs étages et les déplacements excessifs de la base dus aux excitations de quasi-faille sont les problèmes à résoudre pour ces systèmes (De Iuliis et al., 2008). Deux nouveaux modèles pour l'analyse sismique simplifiée de ponts routiers isolés sismiquement avec des piles massives ont été proposés dans (Mao et al., 2017). La réponse dynamique d'un pont isolé sismiquement situé à proximité d'une rupture de faille de surface (« cas A ») ou traversant une zone de rupture de faille (« cas B ») a été calculée à l'aide d'un enregistrement de mouvement du sol proche de la faille traité avec et sans décalage de déplacement dans (Yang et al., 2017). Les effets de l'excitation verticale sur la performance sismique d'un pont isolé sismiquement avec des roulements à friction coulissants et différents coefficients de frottement des roulements et différents niveaux de rigidité (diamètre de la pile) ont été discutés à l'aide d'exemples de calculs, et les effets de la direction d'excitation verticale sur les résultats de l'analyse ont été explorés par (Wang et al., 2016). Les modes de défaillance des ponts à poutres continues isolés soumis à de forts mouvements du sol par la méthode développée du rapport de somme pondérée, en combinaison avec des modèles de pont à éléments finis 3D développés, ont été étudiés dans (Tan et al., 2017). Une analyse probabiliste paramétrique des risques liés à la demande est effectuée sur une grille dans l'espace des paramètres de roulement d'isolement, en utilisant des ressources de cloud computing à haut débit, pour un pont prototype de train à grande vitesse (CHSR) de Californie par (Li & Conte, 2018). Un autre dispositif passif couramment utilisé est l'amortisseur visqueux passif (amortisseur

de masse accordé) (Xiang & Nishitani, 2014; Sun et Nagarajaiah, 2014). Des modèles probabilistes pour estimer les exigences sismiques sur les ponts en béton armé (RC) avec isolation de base ont été proposés dans (Gardoni & Trejo, 2013). Bien qu'ils soient largement étudiés, l'efficacité de ces dispositifs est limitée en raison de l'effet de mauvais réglage (Casciati & Giulani, 2009). Si la fréquence de réglage de l'amortisseur de masse diffère de la fréquence principale de la structure, l'amortisseur de masse accordé aura peu d'effet sur la réduction des réponses sismiques.

Le comportement dynamique d'un système de tablier de pont, avec roulement d'isolation (isolateur sismique) et méthode de modification de la rigidité est analysé dans cet article. Les simulations dynamiques sont réalisées sous l'effet du type sismique et du type harmonique des excitations. Le tablier du pont est idéalisé par un modèle dynamique à degré de liberté unique (SDOF). Les excitations sismiques El Centro NS (nord-sud) et Kobe EW (est-ouest) sont utilisées pour les simulations dynamiques. Le spectre Kanai-Tajimi est adopté pour générer l'excitation harmonique. À des fins de comparaison, le boîtier de contrôle semi-actif et l'exemple de tablier de pont défini dans (Yanik & Aldemir, 2018) sont utilisés dans cet article. Par rapport à la méthode de modification de la rigidité passive, deux politiques de contrôle semi-actives sont envisagées. Ces politiques de contrôle sont le contrôle continu (pseudo-skyhook) et le contrôle bang-bang. Différents niveaux d'amortissement sont analysés pour bien comprendre le comportement du système de tablier du pont.

## DISCUSSION

Dans ce modèle, la masse du tablier du pont  $m_0$  est de 1065,7 tonnes, la rigidité de la pile  $k_0$  est de  $189 \times 10^6$  N/m, le coefficient d'amortissement structurel  $c_0$  est de  $1,42 \times 10^6$  N/m/s. L'analyse dynamique est effectuée pour les excitations El Centro 1940 NS et Kobe EW. Les résultats de la mise en œuvre de la méthode de modification de la rigidité passive sur le système de tablier de pont, avec roulement d'isolation, sont donnés à la figure 4. Les rapports de transmissibilité de l'accélération, de la vitesse et de la réponse au déplacement en fonction de la fréquence par rapport aux périodes de vibration naturelles, pour différents niveaux de rigidité, sont représentés à la figure 4 sous l'effet du tremblement de terre d'El Centro NS.

Les courbes de la figure 4 représentent différents rapports d'amortissement tels que définis dans la section de la méthode de modification de la rigidité passive. Les rapports de transmissibilité du tablier du pont avec la méthode de modification de la rigidité passive sous l'effet du tremblement de terre d'El Centro EW sont donnés à la figure 5 pour différents niveaux d'amortissement. La comparaison pour la méthode de modification de la rigidité passive et les cas de contrôle continu est effectuée en tenant compte des excitations harmoniques et El Centro NS. Le spectre Kanai-Tajimi a été utilisé pour générer l'excitation harmonique.

La mise en œuvre de la méthode de modification de la rigidité passive sous l'effet de l'excitation harmonique est donnée à la figure 8. Dans cet article, il a été observé que, par rapport à la méthode de modification de la rigidité passive, le contrôle bang-bang n'était pas efficace pour réduire les réponses du tablier du pont. Sous l'effet des excitations harmoniques et El Centro NS et Kobe EW, la méthode de modification passive de la rigidité a montré des performances raisonnables pour réduire les réponses sismiques incontrôlées. Il a été indiqué à partir de rapports de transmissibilité qui correspondent à l'excitation harmonique, la mise en œuvre de la méthode de modification de la rigidité passive a entraîné des rapports de déplacement et de vitesse relatifs plus faibles que le cas de contrôle continu semi-actif.

En outre, les rapports d'accélération sont dans la même mesure pour la méthode de modification de la rigidité passive et le contrôle continu. Pour le tremblement de terre d'El Centro, il a été observé que les deux cas de contrôle présentaient des performances similaires de réduction de la réponse incontrôlée du tablier du pont. La méthode de modification de la rigidité passive ne nécessite aucune mise en œuvre de dispositif de contrôle sur la structure, et elle est plus efficace qu'un boîtier de mise en œuvre d'amortisseur semi-actif avec contrôle bang-bang.

## CONCLUSION

Dans cet article, il a été observé que, par rapport à la méthode de modification de la rigidité passive, le contrôle bang-bang n'était pas efficace pour réduire les réponses du tablier du pont. Sous l'effet des excitations harmoniques et El Centro NS et Kobe EW, la méthode de modification passive de la rigidité a montré des performances raisonnables pour réduire les réponses sismiques incontrôlées. Il a été indiqué à partir de rapports de transmissibilité qui correspondent à l'excitation harmonique, la mise en œuvre de la méthode de modification de la rigidité passive a entraîné des rapports de déplacement et de vitesse relatifs plus faibles que le cas de contrôle continu semi-actif. En outre, les rapports d'accélération sont dans la même mesure pour la méthode de modification de la rigidité passive et le contrôle continu. Pour le tremblement de terre d'El Centro, il a été observé que les deux cas de contrôle présentaient des performances similaires de réduction de la réponse incontrôlée du tablier du pont. La méthode de modification de la rigidité passive ne nécessite aucune mise en œuvre de dispositif de contrôle sur la structure, et elle est plus efficace qu'un boîtier de mise en œuvre d'amortisseur semi-actif avec contrôle bang-bang. De plus, il est légèrement plus efficace que le boîtier d'amortisseur semi-actif avec contrôle continu.

## TRANSLATED VERSION: GERMAN

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

## ÜBERSETZTE VERSION: DEUTSCH

Im Folgenden finden Sie eine grobe Übersetzung der oben vorgestellten Erkenntnisse. Dies geschah, um ein allgemeines Verständnis der in dem Papier vorgestellten Ideen zu vermitteln. Bitte entschuldigen Sie alle grammatikalischen Fehler und machen Sie die ursprünglichen Autoren nicht für diese Fehler verantwortlich.

## EINLEITUNG

In den letzten zehn Jahren gab es ein bemerkenswertes Interesse an passiver und semiaktiver Kontrolle von Strukturen im Bereich der Erdbebentechnik (Yanik & Aldemir, 2018; Bitaraf, et al., 2010; Behnam & Khoshnoudian, 2012). Einige wichtige und aktuelle Studien zur semiaktiven Kontrolle von Strukturen werden in diesem Absatz gegeben. Ein implementierbarer vorgeschlagener prädiktiver Steuerungsalgorithmus zur Unterdrückung der Erdbebenreaktion unter Verwendung eines nichtlinearen semiaktiven Dämpfers wurde in (Aldemir, 2010) definiert. Die Leistungsfähigkeit einer einfachen 2-DOF-Base-isolierten Struktur wurde in dieser Studie numerisch untersucht. Zwei semi-aktive Kontrollmethoden zum seismischen Schutz von Bauwerken mittels MR-Dämpfern wurden in (Bitaraf, et al., 2010) vorgestellt. Sie verwendeten eine einfache Scherrahmenstruktur mit zwei MR-Dämpfern für numerische Simulationen unter zwei Fernfeld- und zwei Nahfeldbeständen. Die Entwicklung eines semi-aktiven Steuerungsalgorithmus, der auf mehreren Leistungsstufen basiert, die von einem isolierten Gebäude während verschiedener Bodenerschütterungen erwartet werden, die verschiedenen Erdbebengefährdungsstufen entsprechen, wurde in (Behnam & Khoshnoudian, 2012) angegeben. Ihr vorgeschlagener leistungsbasierter Algorithmus basierte auf einer modifizierten Version des bekannten semi-aktiven Skyhook-Steuerungsalgorithmus. Eine unscharfe, regelbasierte semi-aktive Steuerung von Gebäuderahmen unter Verwendung von semi-aktiven hydraulischen Dämpfern (SHDs) wurde in (Ghaffarzadeh, et al., 2013) vorgestellt. Ihr Kontrollansatz wurde durch die Verwendung von 3-stöckigen und 10-stöckigen Scherrahmenstrukturen unter El Centro-Erdbeben validiert. Eine direkte semi-aktive Kontrollmethode wird eingeführt, um die seismischen Reaktionen von Strukturen zu mildern, die mit

magneto-rheologischen (MR) Dämpfern ausgestattet sind, wurde in (Mohajer Rahbari, et al., 2013) vorgestellt. Ihr Algorithmus wurde angewendet, um seismische Schwingungen eines dreistöckigen und eines 11-stöckigen Probensergebäudes zu steuern, die mit dem MR-Dämpfersteuerungssystem ausgestattet wurden. Ein analytisches 3-DOF-Gebäudemodell pro Stockwerk, das Modelle von traditionellen abgestimmten Massendämpfern (TMD) oder MR-Dämpfern (MR-MD) enthalten kann, wurde in (Yanik, et al., 2013) vorgestellt. Ihr 2D-Bauplan wird in ein 3DOF-Tier-Gebäude umgewandelt und in angegeben Sie gaben an, dass eine gewünschte Dämpferkraft aus den aktuellen Werten des Zustandsvektors und der Model-Parameter berechnet werden kann, die offline geschätzt werden. Ein Wavelet-neuronales Netzwerk-basiertes semi-aktives Steuerungsmodell wurde vorgeschlagen, um genau berechnete Eingangsspannung für die magneto-rheologischen Dämpfer bereitzustellen, um die optimale Steuerkraft von Strukturen in zu erzeugen (Hashemi et al., 2016). Ihr Modell wurde durch einen lokalisierten genetischen Algorithmus optimiert und dann auf eine neunstöckige Benchmark-Struktur angewendet, die dem 1,5× El Centro-Erdbeben ausgesetzt war. Sie führten die dynamische Analyse in eine Richtung (Nord-Süd) durch und verwendeten für ihre Validierungen das numerische Modell der Benchmark-Struktur. Eine semi-aktive Steuerungsstrategie, bei der  $H_{\infty}$ -Steueralgorithmus verwendet und magneto-rheologische Dämpfer für einen Aktuator verwendet wurden, wurde vorgestellt, um die nichtlineare Schwingung in zu unterdrücken (Yan et al., 2016). Ihr numerisches Beispiel war ein zwanzigstöckiges Benchmark-Gebäude. Die Anwendung eines semi-aktiven Fuzzy-basierten Steuerungssystems zur Reduzierung der seismischen Reaktion einer einzelnen SDOF-Framed-Struktur (Single Degree-of-Freedom) unter Verwendung eines magneto-rheologischen (MR) Dämpfers wurde in (Braz-Cesar & Barros, 2018) vorgestellt. Sie erwähnten, dass die Ergebnisse der numerischen Simulationen die Wirksamkeit des vorgeschlagenen semiaktiven Kontrollsystems bei der Reduzierung der Reaktion der SDOF-Struktur zeigten. Neben der semiaktiven Kontrolle von Strukturen ist diese Studie mit passiven Steifigkeitsmodifikationsmethoden und seismisch isolierten Strukturen verbunden. Daher ist die Literaturübersicht über die passiven Kontrollstudien, die während des letzten Jahrzehnts vorgestellt wurden, unten angegeben.

Unter den passiven Steuergeräten werden meist seismische Isolationssysteme (Basisisolationssysteme) erforscht und in der Praxis breit eingesetzt. Basisisolationssysteme sind wirksam, um die Verschiebungen des Überbaus zwischen den Stockwerken zu reduzieren. Die übermäßigen Umsturzmomente für die sockelisierten mehrstöckigen Gebäude und die übermäßigen Verschiebungen des Sockels aufgrund der Beinahe-Fehleranregungen sind jedoch die Probleme, die für diese Systeme angegangen werden müssen (De Juliis et al., 2008). Zwei neue Modelle für die vereinfachte seismische Analyse von seismisch isolierten Autobahnbrücken mit massiven Pfeilern wurden in (Mao et al., 2017) vorgeschlagen. Die dynamische Reaktion einer seismisch isolierten Brücke, die sich in der Nähe eines Oberflächenbruchs ("Fall A") befindet oder eine Verwerfungsbruchzone ("Fall B") durchquert, wurde unter Verwendung eines fehlernahen Bodenbewegungsdatensatzes berechnet, der mit und ohne Verschiebungsversatz verarbeitet wurde (Yang et al., 2017). Die Auswirkungen der vertikalen Anregung auf die seismische Leistung einer seismisch isolierten Brücke mit Gleitlagern und unterschiedlichen Lagerreibwerten und unterschiedlichen Steifigkeitsstufen (Pfeilerdurchmesser) wurden anhand von Beispielrechnungen diskutiert und die Auswirkungen der Anregungsrichtung für die vertikale Anregung auf die Analyseergebnisse untersucht (Wang et al., 2016). Die Ausfallmodi isolierter Dauerträgerbrücken, die starken Bodenbewegungen ausgesetzt sind, wurden durch die entwickelte Methode des gewichteten Rangsummenverhältnisses in Kombination mit entwickelten 3D-Finite-Elemente-Brückenmodellen untersucht (Tan et al., 2017). Eine parametrische probabilistische Bedarfsgefährdungsanalyse wird über ein Raster im Isolationstragenden Parameterraum unter Verwendung von Cloud-Computing-Ressourcen mit hohem Durchsatz für eine kalifornische Hochgeschwindigkeitszug-Prototypbrücke (CHSR) durchgeführt (Li & Conte, 2018). Ein weiteres häufig verwendetes passives Gerät ist der passive viskose Dämpfer (abgestimmter Massendämpfer) (Xiang & Nishitani, 2014; So & Nagarajaiah, 2014). Probabilistische Modelle zur Schätzung der seismischen Anforderungen an Stahlbetonbrücken (RC) mit Sockelisolierung wurden in (Gardoni & Trejo, 2013) vorgeschlagen. Obwohl sie umfassend untersucht werden, ist die Wirksamkeit dieser Geräte aufgrund des Fehlabbümmungseffekts begrenzt (Casciati & Giuliani, 2009). Wenn die



Abstimmfrequenz des Massendämpfers von der Hauptfrequenz der Struktur abweicht, hat der abgestimmte Massendämpfer wenig Einfluss auf die Verringerung der seismischen Reaktionen.

Das dynamische Verhalten eines Brückendecksystems mit Isolationslager (seismischer Isolator) und Steifigkeitsmodifikationsmethode wird in diesem Artikel analysiert. Die dynamischen Simulationen werden unter dem Einfluss des seismischen Typs und der harmonischen Art der Anregungen durchgeführt. Das Brückendeck wird durch ein dynamisches Modell mit einem einzigen Freiheitsgrad (SDOF) idealisiert. El Centro NS (Nord-Süd) und Kobe EW (Ost-West) Erdbebenanregungen werden für die dynamischen Simulationen verwendet. Das Kanai-Tajimi-Spektrum wird zur Erzeugung der harmonischen Anregung verwendet. Zu Vergleichszwecken werden in diesem Artikel das semiaktive Steuergehäuse und das in (Yanik & Aldemir, 2018) definierte Beispiel für das Brückendeck verwendet. Im Vergleich zur passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode werden zwei semi-aktive Kontrollrichtlinien in Betracht gezogen. Diese Kontrollrichtlinien sind kontinuierliche (Pseudo-Skyhook-) Kontrolle und Bang-Bang-Steuerung. Verschiedene Dämpfungsstufen werden analysiert, um das Verhalten des Brückendecksystems vollständig zu verstehen.

## DISKUSSION

In diesem Modell beträgt die Masse des Brückendecks  $m_0$  1065,7 Tonnen, die Pfeilerhärte  $k_0$  beträgt  $189 \times 10^6$  N/m, der strukturelle Dämpfungskoeffizient  $c_0$   $1,42 \times 10^6$  N/m/s. Die dynamische Analyse wird für El Centro 1940 NS und Kobe EW Anregungen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Implementierung der passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode auf dem Brückendecksystem mit Isolationslager sind in Abbildung 4 dargestellt. Frequenzabhängige Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Verschiebungsreaktions-Übertragbarkeitsverhältnisse in Bezug auf natürliche Schwingungsperioden für verschiedene Steifigkeitsstufen sind in Abbildung 4 unter dem Einfluss des El Centro NS-Erdbebens dargestellt.

Die Kurven in Abbildung 4 stellen unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse dar, wie sie im Abschnitt der passiven Steifigkeitsmodifiziermethode definiert sind. Die Übertragbarkeitsverhältnisse des Brückendecks mit passiver Steifigkeitsmodifikationsmethode unter dem Einfluss des El Centro EW-Erdbebens sind in Abbildung 5 für verschiedene Dämpfungsstufen angegeben. Der Vergleich für passive Steifigkeitsmodifikationsmethoden und kontinuierliche Kontrollfälle wird unter Berücksichtigung von Oberschwingungs- und El Centro NS-Anregungen durchgeführt. Das Kanai-Tajimi-Spektrum wurde zur Erzeugung der harmonischen Anregung verwendet.

Die Implementierung der passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode unter dem Einfluss der harmonischen Anregung ist in Abbildung 8 dargestellt. In dieser Arbeit wurde beobachtet, dass im Vergleich zur passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode die Bang-Bang-Kontrolle nicht wirksam war, um die Reaktionen des Brückendecks zu reduzieren. Unter dem Einfluss von harmonischen und El Centro NS- und Kobe EW-Anregungen zeigte die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode eine angemessene Leistung bei der Reduzierung der unkontrollierten seismischen Reaktionen. Es wurde durch Übertragbarkeitsverhältnisse angezeigt, die der harmonischen Anregung entsprechen, die Implementierung der passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode führte zu kleineren relativen Verschiebungs- und Geschwindigkeitsverhältnissen als der semiaktive kontinuierliche Kontrollfall.

Außerdem sind die Beschleunigungsverhältnisse im gleichen Ausmaß für die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode und die kontinuierliche Kontrolle. Für das El Centro-Erdbeben wurde beobachtet, dass beide Kontrollfälle eine ähnliche unkontrollierte Reaktionsleistung auf dem Brückendeck zeigten. Die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode erfordert keine Implementierung eines Steuergeräts für die Struktur und ist effektiver als ein semiaktiver Dämpferimplementierungsfall mit Bang-Bang-Steuerung.

## **SCHLUSSFOLGERUNG**

In dieser Arbeit wurde beobachtet, dass im Vergleich zur passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode die Bang-Bang-Kontrolle nicht wirksam war, um die Reaktionen des Brückendecks zu reduzieren. Unter dem Einfluss von harmonischen und El Centro NS- und Kobe EW-Anregungen zeigte die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode eine angemessene Leistung bei der Reduzierung der unkontrollierten seismischen Reaktionen. Es wurde durch Übertragbarkeitsverhältnisse angezeigt, die der harmonischen Anregung entsprechen, die Implementierung der passiven Steifigkeitsmodifikationsmethode führte zu kleineren relativen Verschiebungs- und Geschwindigkeitsverhältnissen als der semiaktive kontinuierliche Kontrollfall. Außerdem sind die Beschleunigungsverhältnisse im gleichen Ausmaß für die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode und die kontinuierliche Kontrolle. Für das El Centro-Erdbeben wurde beobachtet, dass beide Kontrollfälle eine ähnliche unkontrollierte Reaktionsleistung auf dem Brückendeck zeigten. Die passive Steifigkeitsmodifikationsmethode erfordert keine Implementierung eines Steuergeräts für die Struktur und ist effektiver als ein semiaktiver Dämpferimplementierungsfall mit Bang-Bang-Steuerung. Darüber hinaus ist es etwas effizienter als das semiaktive Dämpfergehäuse mit kontinuierlicher Kontrolle.