

Análisis estructural de integridad en puente por carga lateral sísmica

Structural integrity analysis in bridge by lateral seismic load

J. L. Félix Hernández¹, R. Alvarado-Corona², C. I. Mota-Hernández² & L. Esteva M.³

¹José L. Félix H. UJAT (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), Dpto. Academia ing. civil, Carretera Cunduacán-Jalpa KM. 1. Col. La Esmeralda CP. 86690. Tel. (993) 3581500 Ext. 6752, 3581577 ó (914) 336 09 40. Cunduacán, Tabasco, México.

²Universidad Da Vinci

³L. Esteva M. Institute of Engineering, National University of México, Ciudad Universitaria, México, DF, México

Jose.felix@ujat.mx
jfelixhmx@gmail.com

Resumen: Analizar las condiciones y características de diseño y comportamiento en estructuras tipo puente, se considera fundamental dada su relevancia para facilitar el transporte de productos, traslados, desplazamientos y en general por facilitar la condición humana. El artículo reporta los desplazamientos por carga lateral sísmica en una estructura tipo puente, al estar sometidos el puente a excitación sísmica, su seguridad estructural es vulnerable ante la presencia de carga lateral tanto en su superestructura como en su infraestructura, influyendo en su integridad estructural, para su análisis se usa la metodología del trabajo virtual, los resultados del análisis de los desplazamientos por carga lateral, denota en porcentaje de 45 % de su colapso, al recibir el primer impulso de carga lateral en la cubierta del puente y con una probabilidad de falla en un 67%, lo anterior con base en el análisis, reflexión y síntesis aplicados. Más investigación es necesaria, empleando otras herramientas para evaluar y comparar los resultados obtenidos y así enriquecer el proceso.

Palabras clave: Confiabilidad, Sismo, Puentes, Carga lateral.

Summary: Analyzing the conditions and characteristics of design and behavior in bridge structures, is considered fundamental given its relevance to facilitate the transport of products, transfers, movements and in general to facilitate the human condition. The article reports the displacements by lateral seismic load in a bridge type structure, when the bridge is subject to seismic excitation, its structural safety is vulnerable to the presence of lateral load both in its superstructure and in its infrastructure, influencing its structural integrity, for its analysis, it uses the methodology of virtual work, the results of the analysis of the displacements by lateral load, it denotes in 45% percentage of its collapse, when receiving the first impulse of lateral load in the deck of the bridge and with a probability of fails by

67%, the above based on the analysis, reflection and synthesis applied. More research is necessary, using other tools to evaluate and compare the results obtained and thus enrich the process.

Key words: Reliability, earthquake, bridges, displacement.

1 Introducción

Analizar las condiciones y características de diseño y comportamiento en estructuras tipo puente de vigas, se considera fundamental dada su relevancia para facilitar el transporte de productos, traslados, desplazamientos y en general por facilitar la condición humana. El movimiento sísmico tectónico puede llegar a generar consecuencias catastróficas en una sociedad poco resiliente, entre otros, con estructuras inadecuadamente diseñadas para resistir fuerzas horizontales y verticales, por mencionar algunas, no consideradas y de elevada magnitud. Los puentes, al ser sometidos a movimiento sísmico generan fuerzas laterales, transversales y horizontales principalmente, afectando el estado límite de las columnas soporte de su estructura y de su capacidad en resistir deformaciones laterales excesivas, causando daños a su sistema estructural, en ocasiones, por un inadecuado diseño integral, reflejándose, agrietamiento por deflexión o cortante, desprendimiento del concreto, deficiencia de refuerzo longitudinal o de refuerzo transversal, colisión de tableros y desplazamientos continuos, ladeo excesivo y alteraciones residuales. La imposición de deformación excesiva y, la resultante tensional en los elementos estructurales produce inestabilidad lateral. Así mismo, las fuerzas laterales dependen de la masa y altura de la estructura que dan muestra de la capacidad restringida al desplazamiento lateral por carga sísmica acotada a la estructura particular bajo análisis, lo anterior, evitando generalizar para cualquier estructura, el estado limitado de los puentes en absorber deformaciones inelásticas, dan muestra que entre más peso posea la parte de la superestructura mayor será la fuerza lateral que se genere por el movimiento sísmico, en la vasta cantidad de normas sísmicas existentes, se propone el 10 por ciento del valor de la gravedad como fuerza lateral para simular el efecto sísmico en la estructura, dado que existen evidencias de colapso sísmico en puentes por carga lateral, ésta propuesta se considera insuficiente [1, 2, 3, 4, 5, 7].

Estudios recientes sugieren que la probabilidad de falla en torres para puentes, rebasa las recomendaciones estandarizadas por la normatividad internacional vigente, debido a la carga lateral sísmica [8]. Así mismo, el valor de diseño por movimiento sísmico en distintos apoyos de los puentes ocurre en fase y con igual amplitud, pero anteriores estudios muestran que dichos valores difieren cualitativa y cuantitativamente cuando el movimiento no sucede en fase y según los criterios probabilísticos que representan a la excitación sísmica. Sin embargo, estudios recientes, sostienen que los sismos tectónicos son iguales en forma, pero existen diferencias en tiempos de desfase debido al tren de ondas que viaja con

mínima distorsión a través de la litósfera, en particular, la región en la que se propagan, dando lugar a desplazamientos laterales en los apoyos del puente que se manifiestan en carga lateral sísmica en la superestructura del puente. A la par, los desplazamientos basados en daño a la estructura se pudrían identificar en columna crítica [9, 10]. Estimándose la determinación de dispersión en desplazamientos con base en la simulación de Monte Carlo [11, 12, 13].

Actualmente, es aceptado el análisis de la fuerza lateral equivalente para cualquier tipo de estructura; siendo esta, una aproximación simple de la respuesta espectral modal, para el primer modo de respuesta lateral de la estructura, sin embargo, para estructuras de periodos largos, considerando que la respuesta modal es significativa y puede llegar a afectar la estructura [14, 15]. En base a incertidumbres existentes de las aproximaciones de carga lateral sísmica, se considera a la teoría de confiabilidad para determinar los valores de seguridad del sistema estructural complejo, debido a su combinación de forma ordenada para cumplir la función destinada, con cierto límite de seguridad, garantizando el comportamiento adecuado en las condiciones normales de servicios [16, 17, 18]. La carga lateral puede ser un punto de partida para el colapso catastrófico, con el agravante de que las columnas son uno de los componentes en puentes, con mayor vulnerabilidad ante la eventualidad sísmica, generándose tipos de fallas como: por flexión, pandeo, deficiencia de ductilidad, sin confinamiento, cortante, entre otros [19, 20, 21, 22]. El objetivo de este trabajo es robustecer, enriquecer y contribuir a solidificar el conocimiento en el desplazamiento lateral por movimiento sísmico en puentes de vigas, invitando al análisis y a la reflexión.

2 Respuesta sísmica del desplazamiento

El desplazamiento en una estructura elástica que está en equilibrio sujeto a un sistema de carga sísmica, permanece en este estado, si en pequeñas variaciones de desplazamiento para un estado compatible de deformación se satisface, si se realiza cuando la fuerza y el desplazamiento está en la misma dirección [23, 24].

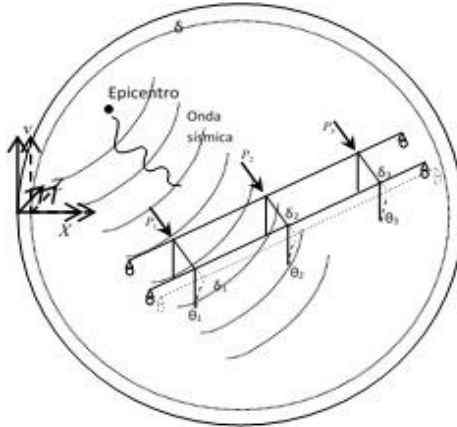


Figura 1: Desplazamiento estructural por onda sísmica.

La Figura 1; presenta que durante la deformación sísmica, se generan fuerzas interiores en la estructura llamadas fuerzas de reacción elástica, propias del sistema. Su función es la oposición a los desplazamientos relativos originados como consecuencia de las cargas presentes en la estructura. Estas fuerzas y desplazamientos virtuales deben satisfacer el principio de conservación de la energía. La expresión siguiente indica que el trabajo desarrollado por las fuerzas exteriores actuantes sobre la estructura es igual a la energía potencial elástica virtual acumulada por la estructura, igualando ambas expresiones se obtiene el desplazamiento [25].

$$W_e = W_i$$

$$\sum_{i=1}^N P_i(\delta d)_i = \int_V \delta \varepsilon(\sigma_p) dV \quad (1)$$

Donde, δd es el desplazamiento virtual, $\delta \varepsilon$ es la deformación virtual, σ_p es el esfuerzo interno debido a la carga, W_e representa el trabajo virtual total debido al sistema de fuerzas Externas y W_i es la energía de deformación interna virtual de la estructura. La siguiente ecuación, representa el principio de trabajo virtual y es utilizada para calcular desplazamiento real de la estructura:

$$\sum_{i=1}^n D_i(\delta P)_i = \int_V \varepsilon(\delta \sigma p) dV \quad (2)$$

Sin embargo, el trabajo externo que realiza la carga unitaria cuando las cargas externas afectan la estructura tipo puente de vigas, se puede expresar de la forma siguiente:

$$W_e = 1x\delta \quad (3)$$

El trabajo interno para marcos estructurales es determinado por la siguiente ecuación.

$$W_i = \int_0^L \frac{M_v(x)m(x)}{EI} dx \quad (4)$$

Por lo que el desplazamiento en cualquier parte de la estructura como en el caso de la Figura 1:, está dado por [25, 26, 27, 28]:

$$\delta = \int_0^L \frac{M_v(x)m(x)}{EI} dx \quad (5)$$

Siendo que m es el momento en cualquier sección del marco, debido a la carga externa y M_v es el momento en cualquier sección del marco debido a la carga unitaria. Por lo que la siguiente expresión matemática, muestra el mecanismo de desplazamiento límite para el colapso estructural por consecuencia sísmica.

$$M(t) = h \left(\frac{4\pi^2(w/g)}{T^2} \right) \left(\int_0^L \frac{M_v(x)m(x)}{EI} dx \right) \quad (6)$$

Donde h es la altura del puente, w peso de la cubierta, g la aceleración debida a la gravedad, T periodo de movimiento sísmico, E es la elasticidad del material, I es el momento de inercia del elemento y $M(t)$ es el momento del colapso de la estructura [5].

En términos de probabilidad de falla definida como pf en las estructuras de puente de vigas, y en la que se destacan los criterios seguro e inseguro, así como la falla, producida cuando $g < 0$, y definida de forma común en cualquier estado límite, no implica necesariamente el colapso u otros eventos catastróficos, lo anterior, descrito en la ecuación (7). La función de desempeño $g(x)$ o de falla, está definida para un estado considerado favorable, y en el funcionamiento de una estructura, es positiva cuando $g(x) \geq 0$, y para un estado desfavorable la función de desempeño es negativa $g(x) < 0$. En la mayoría de la función de desempeño o de estado límite, la probabilidad de falla es expresado como:

$$P_f = p\{g(x) < 0\} \quad (7)$$

Definiéndose a la probabilidad en.

$$P_f = p(R - S \leq 0) \tag{8}$$

Así mismo, la función de confiabilidad, debido a carga y resistencia está definida por:

$$\mathfrak{R} = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(x) f_s(x) dx \tag{9}$$

Al presentar la solución de la ecuación (9), destacan los métodos de confiabilidad de primer y segundo orden [16]. El término equivalente a la probabilidad de falla es el índice de confiabilidad β , formalmente definido como un valor negativo de una variable normal normalizada correspondiente a la probabilidad de fallo p_f .

$$\beta = \frac{(\mu_R - \mu_s)}{\left(\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}\right)} \tag{10}$$

El índice de confiabilidad β es una medida comúnmente utilizada en confiabilidad estructural, por varios autores [28, 29, 30, 31, 32, 33]

3 Resultados y discusión

La excitación sísmica, cumplen un rol importante en la evaluación de la respuesta dinámica de la estructura, debido a que se encuentran relacionados con la forma en que el sistema responde ante una excitación. La respuesta de la estructura ante la frecuencia de excitación sísmica. La Figura 2:, muestra la distribución del desplazamiento ante la función de densidad de distribución probabilística del colapso por carga lateral sísmica, generada a partir de un ejercicio simulado en una herramienta computacional.

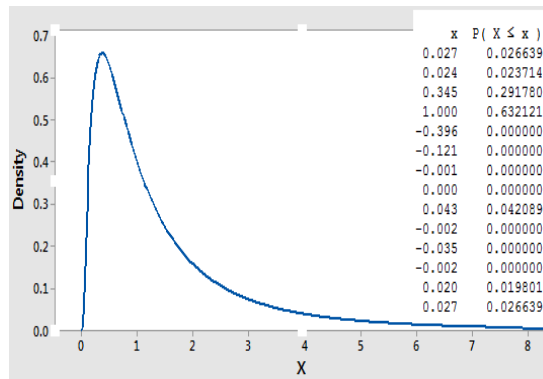


Figura 2: Función de distribución de desplazamiento.

Se observa que la probabilidad de colapso por carga lateral, es del 67 % en el primer impulso dinámico que recibe a la estructura de los apoyos del puente, y que en la disipación sísmica esta carga lateral deja de tener consecuencia drástica ya que los desplazamientos disminuyen.

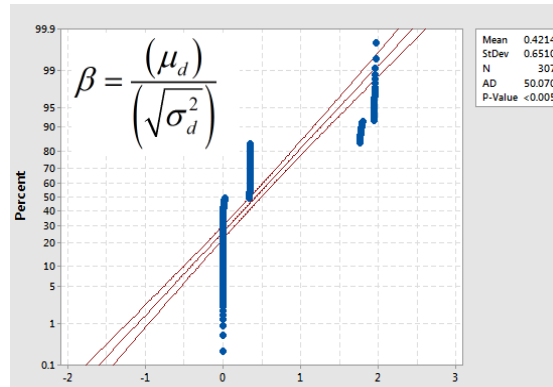


Figura 3: Índice de confiabilidad por colapso en función del desplazamiento.

La Figura 3;, presenta la distribución de confiabilidad misma que está orientado a dicho índice y corresponde a una simulación teórica de la fórmula que se representa, la cual exhibe un 45 % del espectro total de que colapse la estructura en el primer impulso que recibe de carga lateral sísmica, la Tabla 1, destaca el índice de seguridad.

Tabla 1. Índice de Seguridad.

Periodo (s)	Desplazamiento (cm)	Índice de seguridad
6.20E+05	1.974700	0.4522
5.05E+05	1.966900	
2.62E+05	1.962400	
2.46E+05	1.961800	
1.08E+05	1.961000	
0.99143+05	1.961000	
3.132	1.960700	
1.153	1.960400	
0.973	1.958000	
0.589	1.956000	
0.476	1.951500	
0.363	1.950700	

0.342	1.950600
6.20E+05	1.950500

4 Conclusiones

Un análisis estructural de integridad en puente de vigas por carga lateral sísmica fue desarrollado y expuesto. Dada la relevancia del impacto que los sismos tectónicos pueden generar en una sociedad, se analizó el comportamiento del puente por carga lateral sísmico, mostrando la vulnerabilidad estructural en que se encuentra al impacto sísmico en el primer impulso, para posteriormente disipar la energía sísmica, afectando a su seguridad, influyendo en la confiabilidad, la Figura 2: y 3, muestran el comportamiento del desplazamiento estructural por carga lateral sísmica. Denota a su índice de seguridad en un 45 % de colapso en el primer impulso de carga lateral sísmica, lo anterior, sugiere que el análisis realizado refleja las diversas cargas a las que una estructura tipo puente puede estar sometida y su comportamiento con base en índices de confiabilidad por colapso en función del desplazamiento, más investigación es necesaria para robustecer y enriquecer los resultados que, entre otros, inviten a la reflexión.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, CONACyT, Universidad Da Vinci y demás instituciones, organismos y personas que directa e indirectamente han participado/contribuido y facilitado el desarrollo de la presente investigación.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. Zhang, N. Makris (2002) Kinematic response functions and dynamic stiffnesses of bridge embankments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- [2] Murota Tatsuo (1995) Concepto de la regulación del diseño sísmico de las construcciones en Japon. CENAPRED Centro Nacional de Prevencion de Desastres. México.
- [3] Avelino Amado Lamus, et.al, (2003) Estimación del Daño Sísmico para Puentes de Varios Vanos a Partir de los Modelos de Park y Delatc 6.2. Rev. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas UIS Ingenierías, Volumen 2, No. 1, pags. 41-50.

-
- [4] David Arribas Mazarracín, et. al, (2014) Viaducto Gilberto Borja Navarrete. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U, <http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2015.01.002>.
- [5] Darío Rivera Vargas, (2007) Evaluación Simplificada de la Vulnerabilidad Sísmica de Puentes Urbanos. CENAPRED CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, México.
- [6] Edgar Muñoz et al. (2008) Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 N°3, PAG. 125- 144
- [7] Federica tubino, luigi Carassale and Giovanni Solari. (2003) Seismic response of multi-supported structures by proper srthogonal decomposition. Vol. 32. DOI: 10.1002/eqe.292. pp 1639–1795.
- [8] V.G. Bardakis and M.N. Fardis (2008) Displacement-Based Seismic Design of Concrete Bridges. The 14, World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [9] Mervyn J. Kowalsky. (2002) A displacement-based approach for the seismic design of continuous concrete bridges. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Earthquake Engng Struct. Dyn. Pp. 719–747 (DOI: 10.1002/eqe.150)
- [10] F. Casciati & L. Faravelli. (2007) Design bases vs. expected performance for long span suspension bridges. Aspects of Structural Reliability – Faber, Vrouwenvelder. ISBN 978-3-8316-0752-5.
- [11] F. Bortot, D. Zonta & R. Zandonini. (2006) A Bridge Management Strategy Based on Future Reliability and Semi-Markov Deterioration Models. University of Trento, Italy.
- [12] Mark G. Stewart, David V. Rosowsky, Dimitri V. Val, (2001) Reliability-based bridge assessment using risk-ranking decision analysis. Elsevier, structural safety, pp. 397–405
- [13] Alberto Decò and Dan M. Frangopol, M.EERI, (2013) Life-Cycle Risk Assessment of Spatially Distributed Aging Bridges under Seismic and Traffic Hazards. Earthquake Spectra, Volume 29, No. 1, pages 127–153.
- [14] FEMA 450, (2003) NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: PROVISIONS, pp. 274-277.
- [15] Wai-Fah Chen and Charles Scawthorn (2003) Earthquake Engineering Handbook. Boca Raton London New York Washington, D.C, pp. 590-599

- [16] M. del Sagrario Gómez Lera y Enrique Alarcón Álvarez, (1992) Introducción a la Fiabilidad Estructural y Algunas Aplicaciones. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, N-408. Pp. 7-8.
- [17] Jorge E. H. Gómez, (2000) Introducción a la Dinámica de Estructuras. Facultad de Ingeniería y Arquitectura Universidad Nacional de Colombia, Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, pp. 21-32.
- [18] Slobodan P. Simonovic, (2003) Civil Engineering Systems. The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering, London, pp. 5-23.
- [19] Tianshu Sun et.al., (2017) Linear elastic lateral load analysis and seismic design of pin-supported wall-frame structures with yielding dampers. Rev. Earthquake Engineering Struct Dyn. Pp1-26.
- [20] Enrique Hernández Montes y Mark A. Aschheim, (2017) A Seismic Design Procedure for Moment-Frame Structures. Rev. Journal of Earthquake Engineering. DOI: 10.1080/13632469.2017.1387196.
- [21] Guillermo M. Gerbaudo, et. al. (2012) Estimación de Daños Probables en un Puente con Pilas Esbeltas Debido a Efectos Sísmicos. Rev. Mecánica Computacional, Vol XXXI, Pp. 1189-1206.
- [22] Sawsan Yaseenl Khudhair, et. al. (2017) Study of the Vertical Irregularities in Tall RC Structures under Lateral Load. Rev. International Journal of Engineering Science and Computing, Volume 7 Issue No.4. Pp. 11129-11136.
- [23] J.D. Todd, (1974) Structural Theory and Analysis. 1era. Ed. (MACMILLAN PRESS LTD, London), Pp. 9-55-168-199-330.
- [24] Priestley, M.J., Seible, F. y Calvis, GM. (1993) Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley & Sonns, Inc, pg 686.
- [25] T.H.G. Megson, (205) Structural and Stress Analysis. 2do. Ed. Elsevier, Pp. 415-454.
- [26] Gianluca Ranzi and Raymond Ian Gilbert, (2015). "Structural Analysis: Principles, Methods and Modelling. CRC Press Taylor & Francis Group, Pp. 242-249.
- [27] Hayrettin Kardestuncer, (1975) Introducción al Análisis Estructural con Matrices. Mac Graw-Hill, Pp. 32-35.
- [28] EN 1990/A1-Application for bridges. CEN, Brussels, 2002.
- [29] ISO 2394 general principles on reliability for structures, ISO, 1998

-
- [30] C. A. Cornell. (1969) A Probability-based Structural Code. ACI Journal. Vol. 66, pp. 974-985.
- [31] Esteva, L. and Díaz-Lopez, O., (2006) Seismic reliability functions for complex systems based on a secant-stiffness reduction index. In: Proceedings of 13th IFIP WG7.5 working conference, Kobe, Japan
- [32] Madsen et al. (1986) Methods of Structural Safety. Prentice-Hall.
- [33] JCSS: Probabilistic model code. JCSS working materials, <http://www.jcss.ethz.ch/>, 2001