

Influencia de la distribución espacial de la excitación en la respuesta sísmica de puentes

M. A. Millán, J. Domínguez

*Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n.
95.448. 72.93 mangelmm@us.es*

Resumen

Se presenta un método general para estudiar la interacción dinámica suelo-estructura en la respuesta sísmica de puentes sometidos a una excitación sísmica con variabilidad espacial. Se ha desarrollado un modelo mixto de elementos de contorno y elementos finitos en tres dimensiones que permite tener en cuenta la respuesta sísmica del puente para distintos tipos de excitación, configuraciones geométricas del puente, naturaleza y geometría del subsuelo y del terreno. Se presentan resultados para un puente recto tipo viaducto, sobre semiespacio elástico, sometido a distintos tipos de ondas incidentes, con ángulo variable respecto a la vertical y al eje de la estructura.

Palabras Clave: respuesta sísmica, puentes, interacción dinámica suelo-estructura.

1. Introducción

El estudio de la distribución espacial de la excitación sísmica cobra especial importancia en el análisis de estructuras de gran longitud, como es el caso de puentes, hasta tal punto que un análisis que basado en un movimiento uniforme del suelo en los apoyos no debe considerarse adecuado.

En este tipo de estructuras, las ondas sísmicas no alcanzan los distintos apoyos simultáneamente y, por lo tanto, aparecen movimientos asíncronos en los mismos que alteran la respuesta de la estructura.

Análogamente, las heterogeneidades geológicas y geotécnicas del suelo provocan amplificaciones o modificaciones locales en la excitación sísmica que se traducen en una alteración de la respuesta esperada de la estructura.

Por fin, un modelo adecuado debe incluir la interacción suelo - estructura, incluyendo la existente entre cimentaciones contiguas.

En este trabajo se presenta un modelo mixto de elementos de contorno (MEC) y elementos finitos (MEF) en tres dimensiones que es capaz de tener en cuenta todos los

efectos citados anteriormente de una forma adecuada.

2. Formulación

2.1 Modelo de puente con elementos finitos tipo barra

Se han empleado elementos barra en 3 dimensiones, con masa distribuida y posibilidad de amortiguamiento proporcional dependiente de la matriz de rigidez y de la matriz de masas. Se permite cualquier posibilidad de unión entre barras, tipo de vínculos y tipología de cargas.

La formulación se ha hecho en el dominio de la frecuencia. El conjunto de ecuaciones obtenido puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} S_{ss} & S_{sb} \\ S_{bs} & S_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s \\ P_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde S es la matriz de rigidez, u son los desplazamientos de los nodos y P las fuerzas en los mismos. El subíndice b se refiere a los nodos del puente conectados al suelo y s al resto de nodos de la estructura. El superíndice t indica que los desplazamientos

son totales, no relativos. Los valores u_b^1 y P_b son incógnitas ambos.

2.2 Modelo de suelo con elementos de contorno tridimensionales

Se han empleado elementos de contorno 3-D cuadráticos, rectangulares o triangulares, pudiéndose reproducir cualquier geometría, recta o curva.

La formulación se ha hecho en el dominio de la frecuencia. El conjunto de ecuaciones obtenido a partir del MEC puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} H_{gg} & H_{gc} \\ H_{cg} & H_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_g \\ u'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{gg} & G_{gc} \\ G_{cg} & G_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_g \\ t_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde u y t representan movimientos y tracciones en los nodos respectivamente y H y G son las matrices obtenidas por integración sobre el elemento. El subíndice c se refiere a los nodos del suelo pertenecientes a la conexión con el puente y g al resto de nodos del suelo. Tras condensar:

$$\begin{bmatrix} H_{gg} & -G_{gc} \\ -G_{cg} & G_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_g \\ t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s \\ T_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Los valores u'_g y t_c son incógnitas ambos.

Condensando el sistema a los nodos de la conexión,

$$H_c \cdot u'_c = G_c \cdot t_c + T_c \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} H_c & -G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_c \\ t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 Modelización de la conexión elementos de contorno - elementos barra

Reduciendo el estudio a los nodos de la barra que pertenecen a la conexión y a los nodos de los elementos que integran la placa rígida (conexión), puede obtenerse la siguiente ecuación de conexión de movimientos:

$$U_c = D \cdot U_b \quad (6)$$

donde D es la matriz de transformación de movimientos del nodo de la barra conectado al suelo en movimientos de los nodos de la conexión MEC, con la hipótesis de deformación lineal.

En cuanto al equilibrio de fuerzas:

$$P_b = E \cdot t_c \quad (7)$$

siendo E la matriz que obtiene la equivalencia entre tracciones en los nodos MEC y las fuerzas resultantes en el punto de conexión.

2.4 Montaje del sistema completo

Usando las expresiones anteriores, los sistemas de ecuaciones quedan:

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \{H_c D\} & G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_c \\ t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s \\ T_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

y montando en un solo sistema:

$$\begin{bmatrix} S_{bb} & S_{sb} & 0 \\ S_{bs} & S_{bb} & E \\ 0 & \{H_c D\} & -G_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_s \\ u'_b \\ t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s \\ 0 \\ T_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. Descripción del modelo

Se ha considerado un puente tipo viaducto, de cuatro vanos iguales de 30 m., con tres pilas centrales y dos estribos. Todas las cimentaciones se han considerado directas y superficiales, así como sin masa. El suelo se ha representado como un semiespacio viscoelástico. Se ha considerado un suelo arenoso con $G = 37.10^6$ Pa, $\rho = 2000$ Kg/m³ y $\nu = 0,25$. No se ha tenido en cuenta amortiguamiento.

Las características del tablero y las pilas se indican en la tabla 1. Corresponden a una sección de tablero de cajón doble con plataforma de 8m y pilas circulares de radio 80cm.

Tabla 1. Características mecánicas del tablero y las pilas

	Area (m ²)	I _s (m ⁴)	I _y (m ⁴)	masa (kg/ml)
Tablero	3.71	3.484	15.085	9.646
Pilas	2.011	0,3217	0,3217	5.229

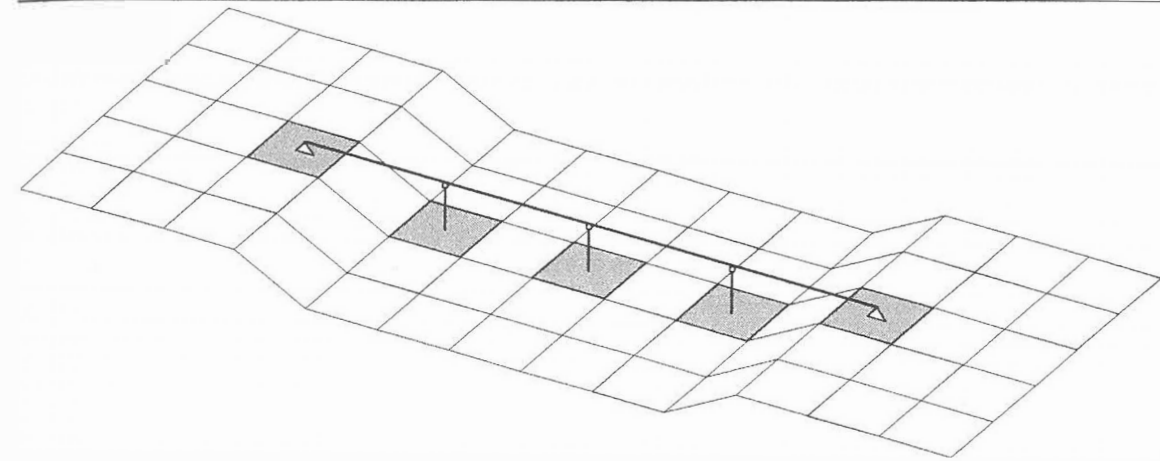


Figura 1. Esquema del modelo de puente y terreno

En la Figura 1 se representa gráficamente el modelo y la discretización empleada.

4. Resultados y conclusiones

Se ha sometido el modelo complejo a la excitación provocada por distintos tipos de onda incidente con diferentes ángulos verticales (con respecto a la superficie del terreno) y horizontales (con respecto a la directriz del puente).

En particular se presentan en este trabajo los resultados obtenidos para ondas SH.

En la Figura 2 se representan las curvas de respuesta en frecuencia para distintos

ángulos de incidencia, tanto verticales como horizontales.

Los resultados para la onda SH muestran que los movimientos de los nodos de coronación de pilas son mínimos cuando el ángulo de incidencia vertical es de 0°, es decir la onda es paralela a la superficie, y máximos cuando la incidencia es vertical, con excitación simultánea de todos los apoyos. Con respecto a la respuesta a la excitación simultánea con base rígida, puede observarse que los movimientos son bastante inferiores si se tiene en cuenta la interacción suelo - estructura, sobretodo a partir de la primera frecuencia natural del sistema.

En la respuesta del nodo de la pila lateral aparece, sin embargo, un segundo pico en la

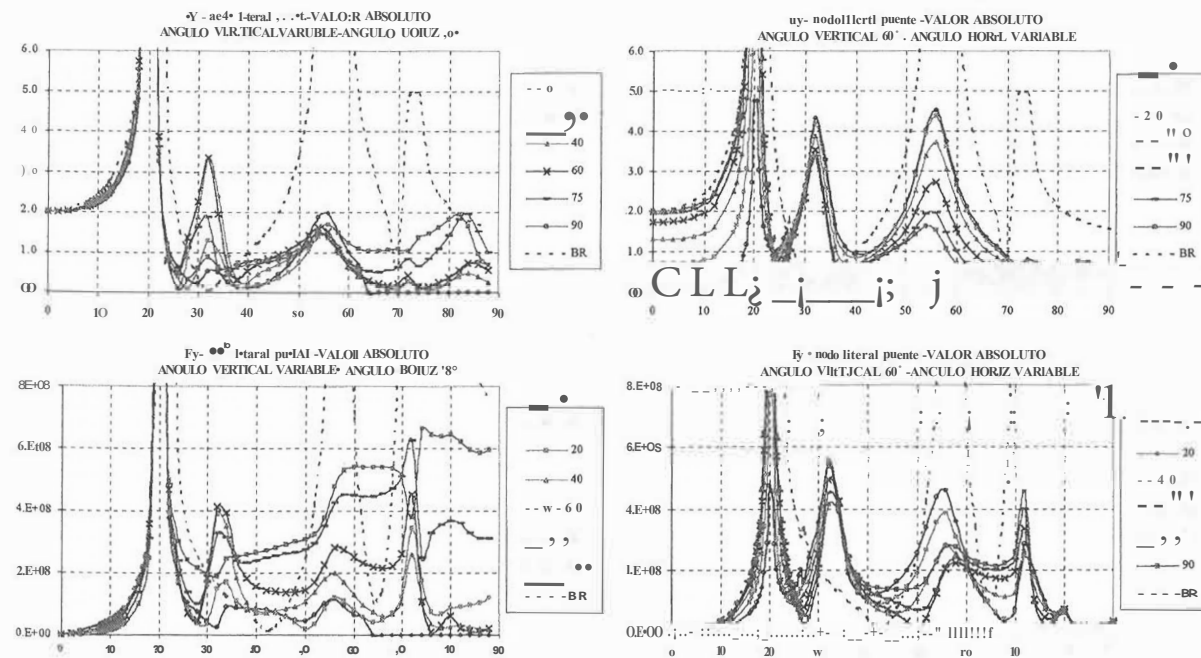


Figura 2. Resultados obtenidos para onda SH. Movimiento transversal y esfuerzo cortante en coronación de la pila lateral del puente

respuesta característico de la variabilidad de la excitación, dado que debido a ésta última la excitación de las distintas pilas está desfasada, provocando un mayor movimiento para esta frecuencia (10 en el entorno de 30 rad/seg).

Mayores diferencias se observan en el cortante en coronación de pilas laterales, donde además de aparecer el pico característico de la variabilidad de la excitación, se observa que la respuesta F_y no reproduce tan claramente los picos de la excitación de base rígida, sino que aumenta uniformemente con la frecuencia.

Queda puesta de manifiesto en los resultados obtenidos, la influencia clara que en la respuesta del puente tiene un análisis completo que contemple todas las variables que pueden influir en la misma, siendo muy diferente esta respuesta de la obtenida considerando una excitación simultánea de los apoyos y base rígida.

Se ha presentado asimismo un modelo que permite considerar todas estas variables de forma rigurosa sin que ello suponga un esfuerzo de discretización ni computacional excesivo.

5. Referencias

[1] R.S. Harichadran, A Hawwari, B. Sweidan, "Response of long-span bridges to

spatially varying ground motion", *Journal of Structural Engineering*, v 122 n 5 (Mayo 1996) p. 476-484.

[2] A.S. Nazmy, A.M. Abdel-Ghaffar, "Effects of ground motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v 21 (1992) p. 1 - 20.

[3] M. Shrikhande, V.K. Gupta, "Dynamic soil-structure interaction effects on the seismic response of suspension bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v 28 (1999) p. 1383 - 1403.

[4] D.R. Somaini, "Seismic behaviour of girder bridges for horizontally propagating waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v 15 (1987) p. 777-793.

[5] Zbigniew Zembaty, "Vibrations of bridge structure under kinematic wave excitations", *Journal of Structural Engineering*, v 123 n 4 (Abril 1997) p. 479-488.

6. Agradecimientos

A la Dirección General de Investigación del Ministerio de Ciencia y Tecnología por el proyecto DPI 2001-2377-C02-01.