



Efectos torsionales en estructuras sobre suelo blando

M. Suarez^a y J. Avilés^{b,*}

^a Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Apdo. Postal 70-472, Coyoacán 04510, México

^b Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec 62550, Morelos, México

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 3 de octubre de 2012

Aceptado el 17 de julio de 2013

On-line el 12 de noviembre de 2013

Palabras clave:

Efectos torsionales
Excentricidad dinámica
Excentricidad estática
Respuesta acoplada
Rotación de la base
Sistema suelo-estructura

Keywords:

Torsional effects
Dynamic eccentricity
Static eccentricity
Coupled response
Base rotation
Soil-structure system

R E S U M E N

En este trabajo se evalúan las vibraciones torsionales de estructuras sobre suelo blando causadas por los efectos combinados de la asimetría estructural y la rotación de la base. Se analiza un sistema suelo-estructura simplificado con 5 grados de libertad. La cimentación se considera enterrada en un estrato uniforme descansando sobre un semiespacio elástico, ante la incidencia inclinada de ondas SH. En lugar de ajustar los máximos momentos torsionantes debidos a los efectos independientes de la asimetría estructural y la rotación de la base, se aplica un nuevo enfoque para el cálculo de la excentricidad de diseño. Específicamente, se obtienen coeficientes de excentricidad torsional compatibles con la máxima respuesta lateral-torsional acoplada, usando un conjunto de temblores de banda angosta característicos de sitios blandos de la Ciudad de México. Se muestra que estos coeficientes no son constantes a lo largo de los ejes principales, sino que dependen de la posición del elemento resistente, por lo que es necesario calcularlos sin asumir una variación lineal como está ocurriendo hasta ahora. Los coeficientes de excentricidad torsional pueden diferir significativamente de los actuales valores reglamentarios, particularmente para estructuras torsionalmente flexibles en las que ambos coeficientes pueden ser negativos. Esto implica que el desplazamiento lateral se reduce por los efectos torsionales.

© 2012 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Torsional effects in structures on soft soil

A B S T R A C T

In this work the torsional vibrations of structures on soft soil caused by the combined effects of structural asymmetry and base rotation are evaluated. A simplified soil-structure system with five degrees of freedom is analyzed. The foundation is considered to be embedded into a uniform layer resting on an elastic half-space, under the incidence of inclined SH waves. Instead of matching the maximum torsional moments due to the independent effects of structural asymmetry and base rotation, a new approach for computing the design eccentricity is applied. Specifically, torsional eccentricity coefficients compatible with the peak coupled lateral-torsional response are obtained, using an ensemble of narrow-band earthquake motions typical of soft-soil sites in Mexico City. It is shown that these coefficients are not constant along the principal axes, but they depend on the position of the resistant element. Hence, it is necessary to compute them without assuming a linear variation, as is done nowadays. The torsional eccentricity coefficients can significantly differ from the currently codified values, particularly for torsionally flexible structures for which both coefficients may be negative. This implies that the lateral displacement is reduced by the effects of torsion.

© 2012 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

1. Introducción

Para estructuras diseñadas conforme a reglamento, los efectos de torsión se consideran aplicando una fuerza estática equivalente a una distancia $e_{dis} = \alpha e + \beta b$ del centro de rigidez, donde e es la excentricidad geométrica dada por la distancia entre los centros de masa y rigidez, y b la dimensión de la planta del edificio perpendicular

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: msl@unam.mx (M. Suarez),
javiles@tlaloc.imta.mx (J. Avilés).

al movimiento de la excitación. El coeficiente α tiene en cuenta la amplificación dinámica de la respuesta torsional debida a la asimetría de la planta y el coeficiente β es para considerar otras fuentes de torsión, como la rotación de la base por el paso de ondas y las discrepancias existentes entre las excentricidades real y calculada. El paso de ondas puede generar grandes excitaciones torsionales de la base, incluso para estructuras simétricas.

Los valores típicos especificados en las normas de diseño sísmico [1–3] para estos coeficientes son $\alpha = 1$ o 1,5 y $\beta = 0,05$ o 0,1. Estos valores están basados en análisis de estructuras desplantadas sobre base rígida, así como en el juicio ingenieril. Rosenblueth y Elorduy [4] fueron los primeros en definir un factor de amplificación para la excentricidad estática. Asimismo, el concepto de excentricidad accidental fue introducido en primer lugar por Newmark [5] para considerar las vibraciones torsionales inducidas por la rotación de la base. Desde entonces, varios autores han estudiado las excentricidades dinámica [6–8] y accidental [9–11] de estructuras apoyadas sobre base rígida, con el propósito de revisar las recomendaciones de los códigos de diseño.

Algunos estudios han revelado que la flexibilidad de la cimentación influye en el comportamiento a la torsión del sistema [12], si bien los patrones de respuesta siguen siendo similares a los observados en estructuras con base rígida. En particular, la amplificación dinámica de la excentricidad ha sido estudiada por Chandler y Hutchinson [13] suponiendo una excitación uniforme en la base, ignorando así los efectos del paso de las ondas sísmicas [14] y de la incoherencia del movimiento del terreno [15]. Estos autores demostraron que la máxima amplificación ocurre cuando la relación entre las frecuencias naturales desacopladas de torsión y traslación es cercana a la unidad. Al aumentar la flexibilidad de la cimentación, el efecto del acoplamiento entre los movimientos de traslación y torsión se incrementa para estructuras torsionalmente flexibles y se reduce para estructuras torsionalmente rígidas, respecto a los resultados de estructuras con base rígida.

El propósito de este trabajo es evaluar los efectos de torsión natural y accidental en estructuras con base flexible ante la incidencia no vertical de ondas SH. Los efectos combinados de la asimetría estructural y de la rotación de la base se interpretan por medio de coeficientes de excentricidad dinámica y accidental. Estos coeficientes se determinan ajustando el máximo desplazamiento acoplado de traslación y torsión que experimenta la estructura en distintos puntos de control entre el centro de rotación y el borde de la estructura, con el propósito de definir si a lo largo de estos puntos la variación de los desplazamientos máximos es lineal, como se ha supuesto hasta ahora. El método de análisis se describe brevemente, pues el énfasis está puesto en la presentación e interpretación de resultados para el caso particular de temblores de banda angosta característicos de la zona del lago de la Ciudad de México.

2. Ecuaciones de movimiento

Los efectos torsionales en estructuras con base flexible se estudian usando el modelo simplificado con excentricidad de masa mostrado en las figuras 1 y 2. La masa está distribuida de tal manera que el centro de masa se ubica a una distancia e del centro de rigidez. La altura de la estructura se denota con H_e , el radio de la cimentación con r y la profundidad de desplante con D . Las masas de la estructura y cimentación se identifican como M_e y M_c , sus momentos de inercia como I_e e I_c y sus momentos polares como J_e y J_c , respectivamente. La estructura se caracteriza por los periodos desacoplados de traslación y torsión, T_h y T_θ , para la condición de base rígida y sus correspondientes relaciones de amortiguamiento viscoso, ζ_h y ζ_θ . El suelo se idealiza como un estrato uniforme sobre un semiespacio elástico, caracterizados ambos con las velocidades

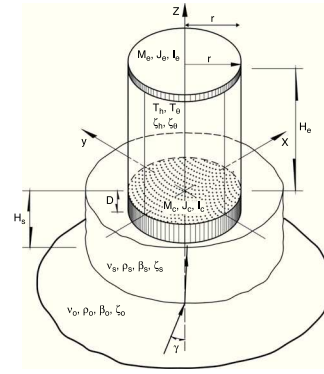


Figura 1. Modelo simplificado para evaluar efectos torsionales.

de ondas de corte β_s y β_o , densidades de masa ρ_s y ρ_o , relaciones de Poisson ν_s y ν_o y relaciones de amortiguamiento histerético ζ_s y ζ_o .

La excitación del sistema está dada por ondas planas de corte con movimiento paralelo al eje y , propagándose con un ángulo γ respecto al eje z . Con este tipo de excitación, los movimientos de entrada al nivel de desplante de la cimentación son el desplazamiento horizontal Δ_o , el cabeceo ϕ_o respecto al eje x y la torsión θ_o respecto al eje z . Referida al centro de rigidez, la respuesta de la estructura se describe por el desplazamiento lateral Δ_e y la torsión θ_e relativos a la base, mientras que la respuesta de la cimentación se define por el desplazamiento lateral Δ_c , el cabeceo ϕ_c y la torsión θ_c relativos al terreno.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del sistema en el dominio de la frecuencia pueden escribirse en notación matricial como [16]:

$$[K_s + i\omega C_s - \omega^2 M_s] \{ \delta_s \} = \omega^2 \Delta_g \{ Q_h M_o + Q_\phi I_o + Q_\theta J_o \} \quad (1)$$

donde $i = \sqrt{-1}$ es la unidad imaginaria y ω la frecuencia circular excitadora. Además, $\delta_s = \{ \Delta_e, \Delta_e^\theta, \Delta_c, \Delta_c^\phi, \Delta_c^\theta \}^T$ es el vector de amplitudes de los desplazamientos del sistema, siendo $\Delta_c^\phi = (H_e + D)\phi_c$ el desplazamiento de cabeceo en la parte superior de la estructura y $\Delta_e^\theta = d\theta_e$, $\Delta_c^\theta = d\theta_c$ los desplazamientos de torsión en la estructura y cimentación, respectivamente, en puntos de control ubicados sobre el eje x a una distancia d del centro de rigidez. Las relaciones $Q_h = \Delta_o / \Delta_g$, $Q_\phi = (H_e + D)\phi_o / \Delta_g$ y $Q_\theta = d\theta_o / \Delta_g$ representan las funciones de transferencia de los movimientos de entrada para traslación, cabeceo y torsión, respectivamente, siendo Δ_g el movimiento horizontal de campo libre en la superficie del suelo. En [16] pueden consultarse la forma y los elementos que constituyen los vectores de carga M_o , I_o y J_o , así como las matrices de masa M_s , amortiguamiento C_s y rigidez K_s del sistema.

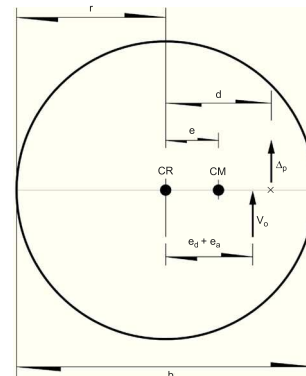


Figura 2. Excentricidades dinámica y accidental para representar efectos torsionales.

Un paso fundamental en la solución de la ecuación (1) es el cálculo de las funciones de impedancia del suelo y de los movimientos de entrada de la cimentación. Las funciones de impedancia se calcularon con el método de estrato finito propuesto por Tasoulas y Kausel [17], basado en modos de propagación del suelo discretos que satisfacen las condiciones de frontera de superficie libre y basamento flexible. Para el tratamiento de las condiciones de frontera absorbentes se utilizó la técnica propuesta por Andrade [18]. Se estudiaron cimentaciones cilíndricas enterradas en un estrato uniforme sobre un semiespacio elástico. Conocidas las funciones de impedancia, los movimientos de entrada se calcularon con el método promediador de Iguchi [19]. Para determinar la respuesta temporal del sistema ante excitación sísmica, se realizó la convolución de las funciones de transferencia Δ_e/Δ_g y Δ_e^θ/Δ_g con sismos reales debidamente seleccionados, aplicando la síntesis de Fourier [20].

3. Coeficientes de excentricidad torsional

En el diseño de estructuras es de especial importancia establecer la forma de combinar los efectos torsionales debidos a la asimetría estructural y la rotación de la base. Un criterio conservador es suponer que las máximas respuestas torsionales independientes ocurren al mismo tiempo y en la misma dirección. Alternativamente, las excentricidades dinámica y accidental pueden definirse tal que el desplazamiento estático del lado flexible de la estructura ocasionado por el cortante basal desacoplado sea igual al desplazamiento dinámico máximo producido por la excitación sísmica. En la figura 2 se ilustra la fuerza estática V_o aplicada excéntricamente para producir el desplazamiento dinámico Δ_p en el punto $x=d$. Este criterio más racional es una extensión del propuesto por Dempsey y Tso [7] para considerar los efectos de torsión por asimetría de la estructura, y posteriormente ajustado por De la Llera y Chopra [10] para considerar los efectos de torsión por rotación de la base.

De acuerdo con lo anterior, las excentricidades dinámica e_d y accidental e_a satisfacen el siguiente requerimiento:

$$\Delta_p = \frac{V_o}{K_h} + \frac{V_o(e_d + e_a)}{K_\theta} d \quad (2)$$

donde $\Delta_p = \max |\Delta_e + \Delta_e^\theta|$ es el máximo desplazamiento dinámico acoplado. El primer término de la ecuación (2) representa el desplazamiento lateral desacoplado, mientras que el segundo mide el incremento de este debido a los efectos del acoplamiento torsional y de la excitación rotacional. Nótese que $V_o = K_h \Delta_e^o$ es el cortante basal desacoplado debido a la excitación efectiva de traslación y cabeceo, siendo K_h la rigidez lateral de la estructura y $\Delta_e^o = \max |\Delta_e(e=0)|$ el máximo desplazamiento dinámico desacoplado.

Para determinar los valores de e_d y e_a , conviene descomponer la ecuación (2) de la siguiente forma:

$$(\Delta_p)_{h\phi} = \frac{V_o}{K_h} + \frac{V_o e_d}{K_\theta} d \quad (3)$$

$$\Delta_p - (\Delta_p)_{h\phi} = \frac{V_o e_a}{K_\theta} d \quad (4)$$

donde $(\Delta_p)_{h\phi} = \max |\Delta_e(Q_\theta = 0) + \Delta_e^\theta(Q_\theta = 0)|$ es el desplazamiento dinámico máximo debido a la excitación efectiva de traslación y cabeceo. Sustituyendo $V_o = K_h \Delta_e^o$ en las ecuaciones (3) y (4), las excentricidades dinámica y accidental resultan ser:

$$\frac{e_d}{e} = \alpha = \left(\frac{(\Delta_p)_{h\phi}}{\Delta_e^o} - 1 \right) \frac{\lambda^2}{e_r} \left(\frac{r_\theta}{r} \right)^2 \frac{r}{d} \quad (5)$$

$$\frac{e_a}{b} = \beta = \frac{\Delta_p - (\Delta_p)_{h\phi}}{\Delta_e^o} \frac{\lambda^2}{2} \left(\frac{r_\theta}{r} \right)^2 \frac{r}{d} \quad (6)$$

donde $b = 2r$, y:

$$\lambda = \frac{\omega_\theta}{\omega_h} = \frac{1}{r_\theta} \sqrt{\frac{K_\theta}{K_h}} \quad (7)$$

es la relación de frecuencias desacopladas de torsión y traslación, siendo $\omega_\theta = (K_\theta/J_e)^{1/2}$ y $\omega_h = (K_h/M_e)^{1/2}$; $r_\theta = (J_e/M_e)^{1/2}$ es el radio de giro polar y $e_r = e/r$.

La relación $(\Delta_p)_{h\phi}/\Delta_e^o$ es una medida de la modificación de la respuesta estructural por efectos del acoplamiento torsional. Nótese que si $(\Delta_p)_{h\phi}/\Delta_e^o < 1$, los valores de α serán negativos. Asimismo, la relación $[\Delta_p - (\Delta_p)_{h\phi}]/\Delta_e^o$ es una medida de la modificación de la respuesta estructural por efectos de la excitación rotacional. Es evidente que los valores de β serán negativos cuando $(\Delta_p)_{h\phi} > \Delta_p$. Valores negativos de α y β significan que el desplazamiento lateral se reduce por los efectos torsionales.

En el enfoque conservador se supone que $e_d = M_n/V_o$ y $e_a = M_a/V_o$, siendo $M_n = \max |\Delta_e^\theta(Q_\theta = 0)|K_\theta/d$ y $M_a = \max |\Delta_e^\theta(Q_h = Q_\phi = 0)|K_\theta/d$ los momentos por torsión natural y accidental, respectivamente. Considerando que $(\Delta_e^\theta)_{h\phi} = \max |\Delta_e^\theta(Q_\theta = 0)|$ y $(\Delta_e^\theta)_\theta = \max |\Delta_e^\theta(Q_h = Q_\phi = 0)|$, se llega a:

$$\frac{e_d}{e} = \alpha = \frac{(\Delta_e^\theta)_{h\phi}}{\Delta_e^o} \frac{\lambda^2}{e_r} \left(\frac{r_\theta}{r} \right)^2 \frac{r}{d} \quad (8)$$

$$\frac{e_a}{b} = \beta = \frac{(\Delta_e^\theta)_\theta}{\Delta_e^o} \frac{\lambda^2}{2} \left(\frac{r_\theta}{r} \right)^2 \frac{r}{d} \quad (9)$$

Nótese que $(\Delta_e^\theta)_{h\phi}$ y $(\Delta_e^\theta)_\theta$ son los desplazamientos dinámicos máximos debidos a las excitaciones efectivas lateral y torsional, respectivamente.

4. Resultados numéricos

Para fines de análisis estadístico, se usaron 90 movimientos horizontales registrados en 15 estaciones de campo libre localizadas en la Ciudad de México. Estos movimientos corresponden a 3 temblores de subducción con distancia epicentral entre 250 y 300 km. En la tabla 1 se listan las principales características de los movimientos seleccionados en sitios blandos donde se han observado las mayores amplificaciones espectrales. Además de la localización, se indican la magnitud (M_c =de coda, M_b =de ondas de compresión, M_s =de ondas superficiales), el periodo de la excitación (T_{ns} , T_{ew}) y la aceleración máxima del terreno (A_{ns} , A_{ew}). Los subíndices ns y ew indican la dirección en la que son consideradas estas variables (norte-sur y este-oeste, respectivamente). Con el propósito de promediar correctamente las respuestas de banda estrecha en sitios blandos [21], los registros sísmicos se normalizaron con el periodo dominante del sitio (para la Ciudad de México, se consideran temblores de banda estrecha los que ocurren en la zona de lago con periodos dominantes de 1 a 5 s).

En todos los cálculos se adoptaron los siguientes valores: $M_c/M_e = 0,25$, $I_c/I_e = J_c/J_e = 0,3$, $\beta_s/\beta_o = 0,5$, $\rho_s/\rho_o = 0,8$, $M_e/\rho_s r^2 H_e = 0,6$, $\zeta_h = \zeta_\theta = 5\%$, $\nu_s = 0,45$, $\nu_o = 0,33$, $\zeta_s = 0,05$ y $\zeta_o = 0,03$. Por su importancia, los demás parámetros del sistema se consideraron variables. Los cálculos se llevaron a cabo para los 90 registros de temblores. Los resultados que se presentan en este estudio corresponden al valor medio de todos los registros, como se ilustra en la figura 3.

Para reducir el número de ejemplos, se analizan estructuras bajas ($H_e/r = 1$) con periodos cortos ($T_h = 0,25$ y $0,5$ s) y estructuras altas ($H_e/r = 3$) con periodos largos ($T_h = 1$ y 2 s), apoyadas sobre cimentaciones superficiales ($D/r = 0$) y enterradas ($D/r = 0,5$ y 1), considerando relaciones de excentricidad $e_r = 0,1$ y $0,2$. Los puntos de control están colocados a distancias $d/r = 0,2, 0,6$ y 1 del centro de rotación de la estructura. Los resultados se presentan en

Tabla 1
Movimientos sísmicos seleccionados para análisis estadístico

Estación	Temblor: 89/04/25 Long. -99,40; Lat. 16,60 Mc = 6,5; Mb = 6,3; Ms = 6,9				Temblor: 93/10/24 Long. -98,98; Lat. 16,54 Mc = 6,5; Mb = 6,2; Ms = 6,6				Temblor: 95/09/14 Long. -98,88; Lat. 16,31 Mc = 6,4; Mb = 7,2; Ms = 7,3			
	T_{ns} (s)	T_{ew} (s)	A_{ns} (gal)	A_{ew} (gal)	T_{ns} (s)	T_{ew} (s)	A_{ns} (gal)	A_{ew} (gal)	T_{ns} (s)	T_{ew} (s)	A_{ns} (gal)	A_{ew} (gal)
01	2,09	2,10	45,8	37,4	1,86	1,08	9,0	9,5	1,89	1,59	41,0	35,2
08	2,00	2,19	32,4	47,3	1,58	1,70	8,4	8,1	2,05	1,97	26,7	28,9
15	1,38	1,48	40,5	27,5	1,23	1,26	12,1	13,9	1,28	1,45	28,7	24,4
19	2,65	2,57	54,6	29,7	2,66	2,67	9,4	7,3	2,72	2,80	51,3	25,0
22	1,41	1,36	23,6	23,7	1,45	1,42	12,0	11,3	1,40	1,57	23,6	28,7
29	2,93	2,88	49,6	47,4	2,50	2,68	13,5	11,5	2,86	2,83	27,7	28,9
39	2,68	2,95	33,5	37,2	2,28	2,75	9,9	13,6	2,22	2,88	30,7	44,0
45	2,28	2,60	42,6	52,3	2,16	2,41	13,0	12,1	2,10	1,97	34,6	32,2
49	3,05	3,07	54,4	58,9	2,44	2,74	14,4	17,7	2,81	2,90	31,8	39,4
51	2,27	2,12	47,0	39,1	1,77	1,91	11,0	11,7	2,00	2,08	40,3	32,3
53	1,36	1,29	39,4	33,0	1,43	1,36	9,7	9,2	1,40	1,26	26,7	30,9
62	2,11	2,15	52,6	45,4	1,82	1,61	9,6	9,5	1,96	2,02	30,0	26,1
84	1,43	1,41	27,0	30,0	1,39	1,36	13,0	10,4	1,42	1,34	27,6	26,7
RO	1,19	1,25	45,7	55,0	1,17	1,37	15,9	14,5	1,38	1,29	29,1	37,3
SC	2,19	2,06	37,5	37,1	1,73	1,83	10,9	11,0	1,52	1,98	26,3	31,8

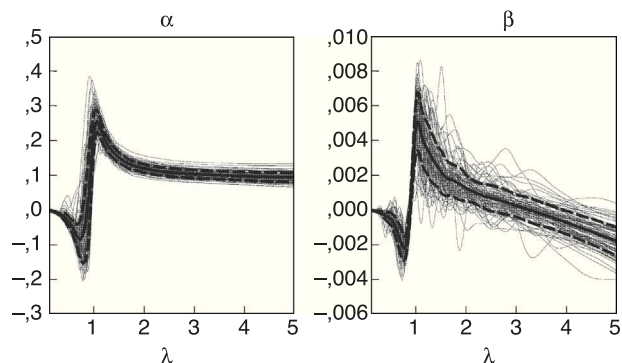


Figura 3. Coeficientes α y β para $e_r = 0,1$, $\beta_s/c = 0,05$, $D/r = 1$, $r/\beta_s = 0,15$ y $T_h = 1$ s, para todos los registros utilizados en el estudio. Las líneas gruesas representan la media (línea continua) y la desviación estándar (línea discontinua).

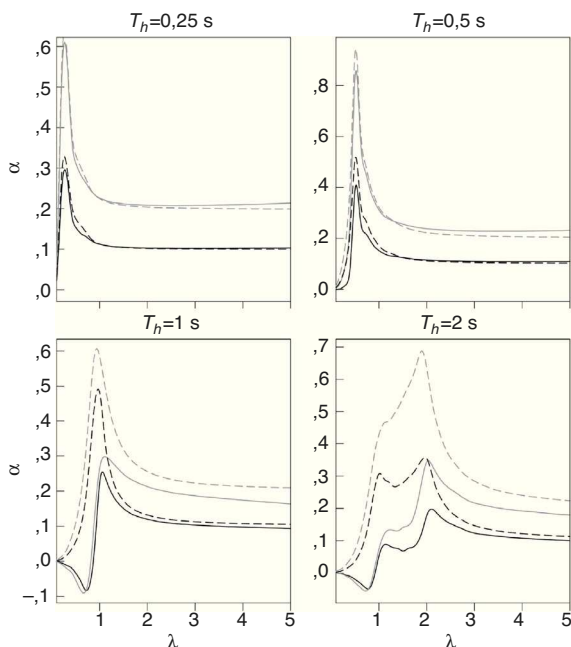


Figura 4. Variación del coeficiente α para $e_r = 0,1$ (negro) y $0,2$ (gris), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,025$, $r/\beta_s = 0,15$ y $D/r = 1$; criterio racional (—) versus conservador (---).

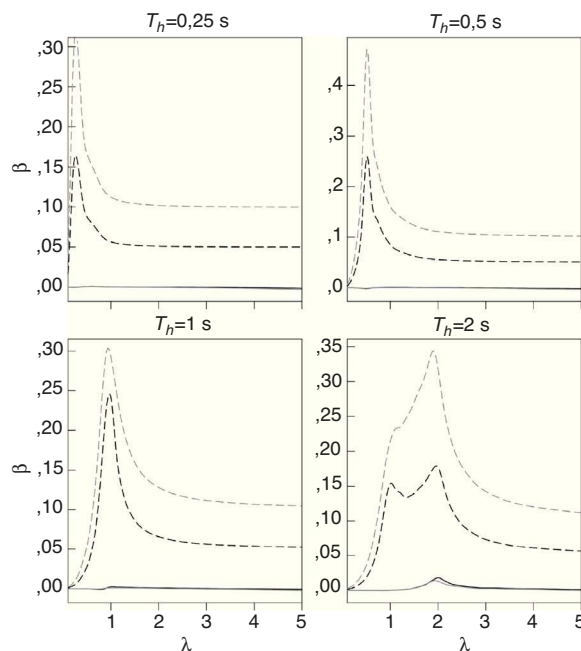


Figura 5. Variación del coeficiente β para $e_r = 0,1$ (negro) y $0,2$ (gris), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,025$, $r/\beta_s = 0,15$ y $D/r = 1$; criterio racional (—) versus conservador (---).

términos de valores medios de los coeficientes de excentricidad dinámica y accidental.

Para la caracterización de la excitación sísmica, el ángulo de incidencia se define como $\text{sen } \gamma = \beta_s/c$, siendo c la velocidad horizontal aparente de onda. Asimismo, la flexibilidad de la cimentación se representa mediante el tiempo de tránsito r/β_s . Los valores considerados para estos parámetros son $\beta_s/c = 0,025$ ($\gamma \approx 1,5^\circ$), $0,05$ ($\gamma \approx 3^\circ$) y $0,1$ ($\gamma \approx 6^\circ$), así como $r/\beta_s = 0,15$ y $0,3$ s.

En las figuras 4 y 5 se muestran comparaciones de los factores α y β calculados con los criterios racional y conservador cuando $d/r = 1$. Como se esperaba, hay grandes diferencias entre los 2 criterios, excepto en los valores de α para periodos $T_h \leq 0,5$ s, así como para periodos $T_h \geq 1$ s cuando $\lambda > 2$. Con el criterio conservador, ambos factores crecen notablemente al aumentar la relación de excentricidad. Con el criterio racional, los valores de estos factores son inferiores a los obtenidos con el criterio conservador; incluso llegan a ser negativos para estructuras torsionalmente flexibles ($\lambda < 1$), lo que representa una reducción del cortante basal

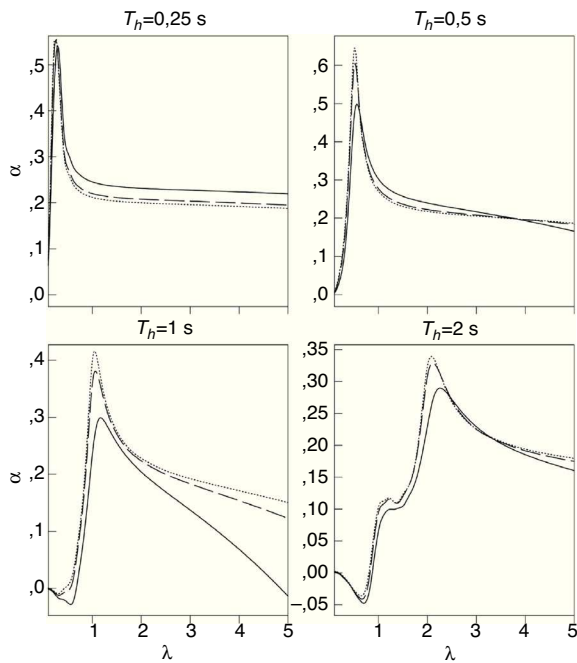


Figura 6. Variación del coeficiente α para $D/r = 0$ (—), $0,5$ (---) y 1 (.....), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,1$, $r/\beta_s = 0,3$ y $e_r = 0,2$.

acoplado respecto al desacoplado usado como referencia. Nótese que esta situación favorable no es posible reproducirla con el criterio conservador. Los valores pico se tienen en $\lambda < 1$ (estructuras torsionalmente flexibles) si $T_h \leq 0,5$ s y en $\lambda > 1$ (estructuras torsionalmente rígidas) si $T_h \geq 1$ s.

Como se aprecia en la figura 4, las curvas de α obtenidas con el criterio conservador tienen la misma tendencia que las obtenidas con el criterio racional cuando se trata de estructuras bajas ($H_e/r = 1$ con periodos cortos $T_h \leq 0,5$ s). Sin embargo, para estructuras altas ($H_e/r = 3$ con periodos $T_h \geq 1$ s) los resultados sí muestran una diferencia notable. Es importante señalar que en todos los casos examinados, sin importar el criterio que se utilice, el valor en el

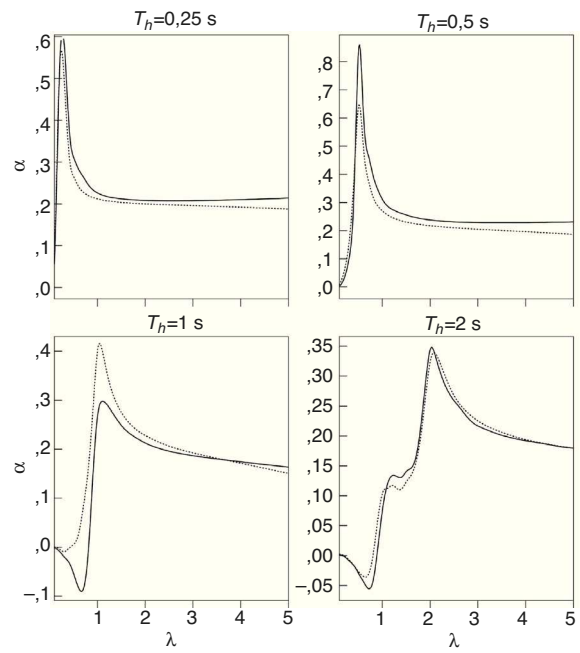


Figura 8. Variación del coeficiente α para $r/\beta_s = 0,15$ (—) y $0,3$ (.....), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,025$, $D/r = 1$ y $e_r = 0,2$.

reglamento para α (de 1 a 1,5) no es rebasado, por lo que se concluye que los valores de α especificados en las normas de diseño sísmico resultan muy conservadores para sitios blandos de la Ciudad de México.

Los valores de α con el criterio conservador siempre son positivos, mientras que con el criterio racional pueden llegar a ser negativos. Esta situación es evidente para periodos $T_h \geq 1$ s cuando $\lambda < 1$, y resulta porque los efectos torsionales reducen el cortante basal acoplado respecto al desacoplado usado como referencia.

Los valores de β con el criterio racional son muy inferiores a los del criterio conservador (fig. 5), pudiendo incluso ser negativos debido a la reducción del cortante basal acoplado. Esto último se

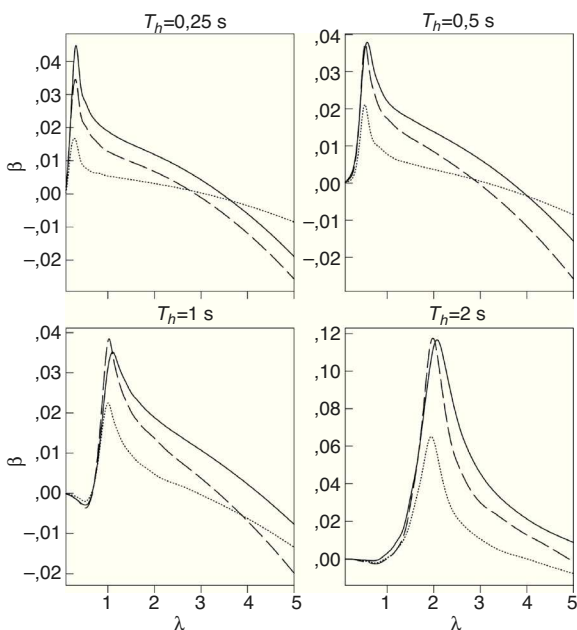


Figura 7. Variación del coeficiente β para $D/r = 0$ (—), $0,5$ (---) y 1 (.....), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,1$, $r/\beta_s = 0,3$ y $e_r = 0,2$.

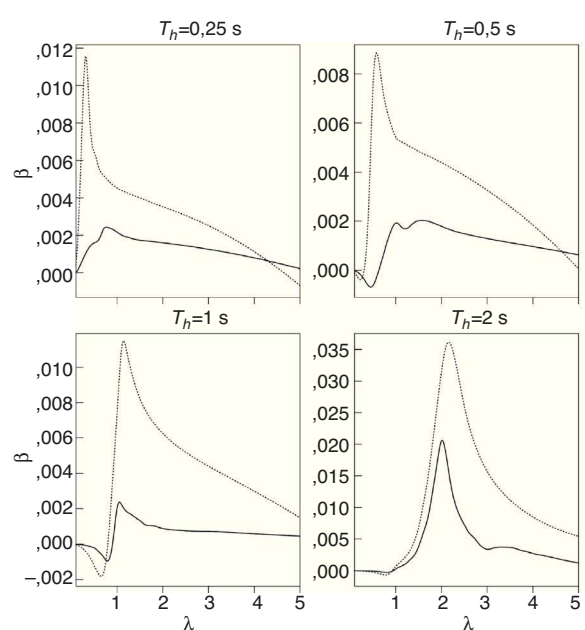


Figura 9. Variación del coeficiente β para $r/\beta_s = 0,15$ (—) y $0,3$ (.....), fijando $d/r = 1$, $\beta_s/c = 0,025$, $D/r = 1$ y $e_r = 0,2$.

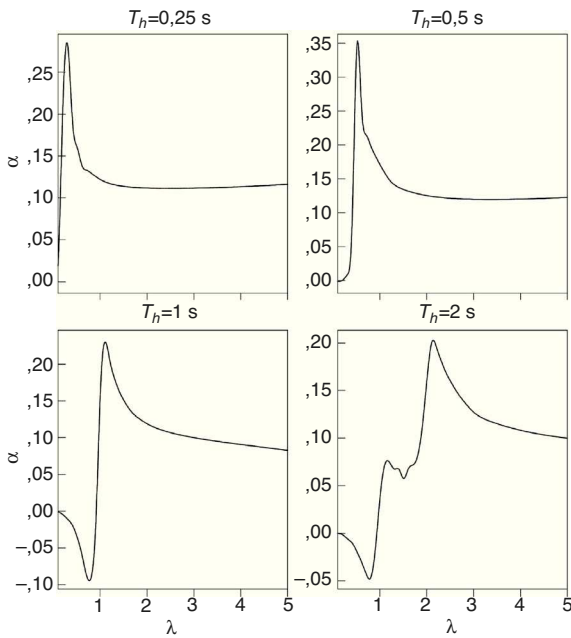


Figura 10. Variación del coeficiente α para $\beta_s/c = 0,025$ (—), $0,05$ (---) y $0,1$ (.....), fijando $d/r = 1$, $r/\beta_s = 0,15$, $D/r = 0$ y $e_r = 0,1$.

manifiesta claramente en puntos de control interiores a la periferia de la estructura, como se ilustra posteriormente para $d/r = 0,2$ y $0,6$ (fig. 13). El valor acotado en las normas de construcción ($\beta = 0,05$ a $0,1$) nunca es superado por los valores calculados utilizando el criterio racional, e incluso queda muy por debajo del valor de $0,05$. En cambio, al utilizar el criterio conservador, los valores pico sobrepasan por mucho la norma, alcanzando en algunos casos valores superiores a $0,4$ ($T_h = 0,5$ s), y superando en todos los casos la cota reglamentaria mínima ($0,05$) para λ mayores después de donde se presenta el pico (cuando la curva tiende a un valor constante).

De acuerdo con los resultados del criterio racional, los valores de α y β especificados en las normas de diseño sísmico resultan muy conservadores para sitios blandos de la Ciudad de México. Es interesante hacer notar que los valores de α no rebasan la unidad, lo que revela una deamplificación dinámica de la excentricidad estática más que una amplificación confirmada solo para temblores de banda ancha.

Aplicando solamente el criterio racional, enseguida se examina la influencia de los principales parámetros del sistema. En la figura 6 puede verse que los valores pico de α para $D/r = 1$ son mayores que para $D/r = 0$, siendo el efecto más notorio cuando $T_h = 0,5$ y 1 s. Esto se debe al cambio que sufre el cortante basal desacoplado por el incremento de rigidez en la cimentación al aumentar la profundidad de desplante.

Por el contrario, en la figura 7 se aprecia que los valores pico de β se reducen cuando crece la relación de enterramiento, notándose el efecto muy claro para $T_h = 0,25$ s. Esta situación es consecuencia de la difracción de ondas por las paredes de la cimentación, que altera las excitaciones efectivas lateral y torsional; a mayor profundidad de desplante de la cimentación, mayor es la difracción.

En las figuras 8 y 9 se muestra el efecto de la flexibilidad de la cimentación en los factores α y β , respectivamente. Los valores de $r/\beta_s = 0,15$ y $0,3$ corresponden, por ejemplo, a una cimentación con $r = 15$ m en un suelo blando con $\beta_s = 100$ y 50 m/s, respectivamente. Los efectos debidos a estas variaciones en el tiempo de tránsito son insignificantes para α pero importantes para β . Esto implica que la influencia de r/β_s es mayor en la excitación efectiva torsional (responsable de la excentricidad accidental) que en la excitación efectiva lateral (responsable de la excentricidad dinámica).

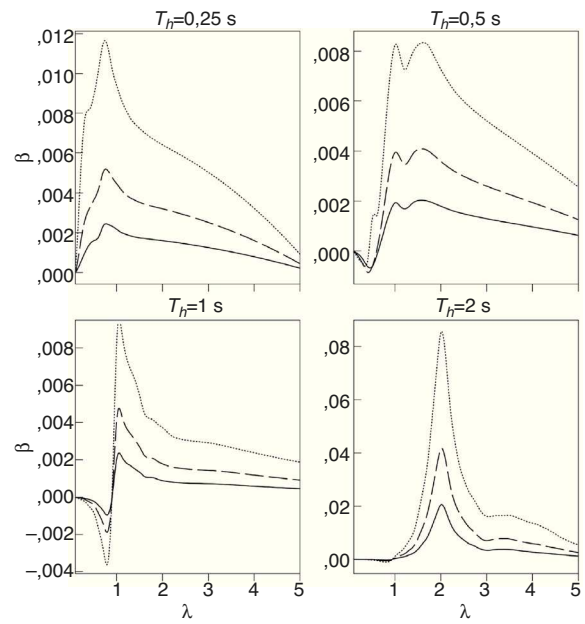


Figura 11. Variación del coeficiente β para $\beta_s/c = 0,025$ (—), $0,05$ (---) y $0,1$ (.....), fijando $d/r = 1$, $r/\beta_s = 0,15$, $D/r = 0$ y $e_r = 0,1$.

El parámetro relevante que mide el efecto del paso de las ondas sísmicas en el sistema es la velocidad horizontal aparente (c), debido a que indica el retraso que habrá en la llegada de la excitación de un punto a otro de la cimentación. En otras palabras, la parte iluminada del cimienta es la que empezará a moverse primero y los puntos ubicados en el lado de sombra serán los últimos. Es por ello que la relación $\beta_s/c = \text{sen } \gamma$ (γ es el ángulo de incidencia) es una mejor medida para caracterizar la excitación sísmica. El efecto del paso de las ondas sísmicas en los factores α y β se puede apreciar en las figuras 10 y 11, respectivamente. Se observa que α es insensible a la variación de β_s/c , en tanto que β es fuertemente dependiente de este parámetro. La razón es que la excitación

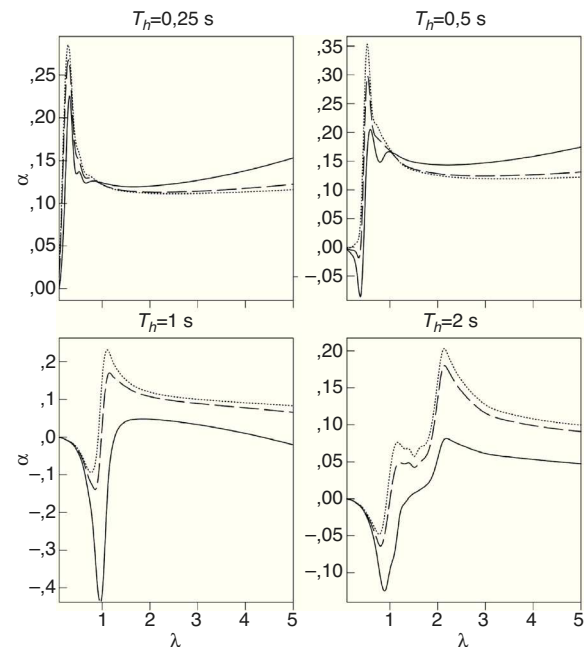


Figura 12. Variación del coeficiente α para $d/r = 0,2$ (—), $0,6$ (---) y 1 (.....), fijando $\beta_s/c = 0,025$, $r/\beta_s = 0,3$, $D/r = 0$ y $e_r = 0,2$.

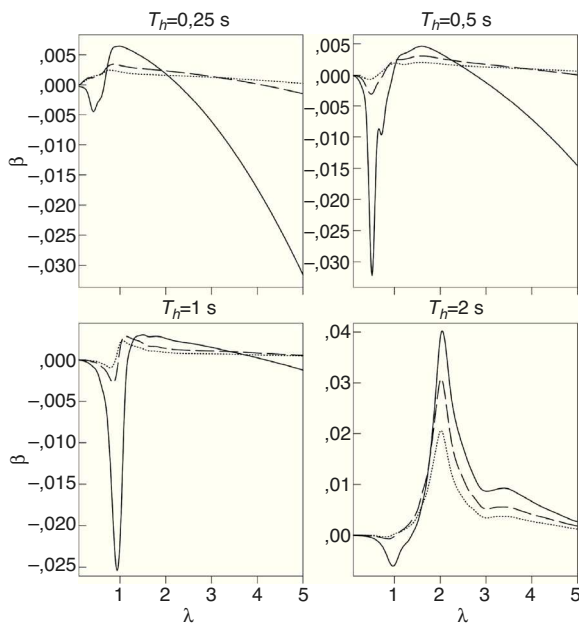


Figura 13. Variación del coeficiente β para $d/r = 0,2$ (—), $0,6$ (---) y 1 (.....), fijando $\beta_s/c = 0,025$, $r/\beta_s = 0,3$, $D/r = 0$ y $e_r = 0,2$.

efectiva torsional es proporcional a γ , que a su vez es proporcional a β_s/c . Nótese que los valores pico de β para $T_h = 2$ s son muy altos en comparación con los demás periodos estructurales.

Finalmente, la posición del punto de control influye considerablemente en los factores α y β , como se muestra, respectivamente, en las figuras 12 y 13. Esto tiene implicaciones en el diseño de estructuras asimétricas, pues erróneamente suele suponerse que la variación de los desplazamientos máximos a lo largo de los ejes principales es lineal. Puede observarse que los mayores picos negativos de ambos factores ocurren en $d/r = 0,2$, cuando $\lambda < 1$. Estos picos se producen para el mismo valor de λ , lo que significa que el desplazamiento generado por torsión va en el sentido opuesto al que ocurre por la traslación. Asimismo, los mayores picos positivos de α ocurren en $d/r = 1$ y los de β en $d/r = 0,2$. Los resultados para $T_h \geq 1$ s están mejor perfilados que para $T_h \leq 0,5$ s, independientemente de la posición del punto de control.

5. Conclusiones

En este trabajo se han evaluado los efectos torsionales en estructuras sobre suelo blando debidos a la asimetría estructural y la rotación de su base. Los efectos combinados se han representado por medio de coeficientes de excentricidad torsional compatibles con la máxima respuesta acoplada en distintos puntos de control entre el centro de rotación y el borde de la estructura.

Se ha mostrado que los factores α y β no tienen definición única, porque dependen de la selección del cortante basal de referencia y de la forma de separar los efectos de torsión por asimetría de la estructura y rotación de la base. Usando un conjunto de temblores de banda angosta característicos de sitios blandos de la Ciudad de México, se han calculado valores medios de estos factores para varias configuraciones del sistema suelo-estructura examinado.

Se han revisado 2 criterios para obtener los valores de α y β : uno que considera que las máximas respuestas torsionales debidas a la asimetría estructural y la rotación de la base ocurren al mismo tiempo, y otro donde se considera el máximo desplazamiento acoplado de traslación y torsión. De este análisis se concluye que las diferencias en los resultados al utilizar uno u otro enfoque pueden ser muy significativas.

Las formas de α y β varían ampliamente con λ , exhibiendo valores que van de pequeños a grandes en comparación con los actuales valores reglamentarios. Los valores observados incluso pueden ser negativos, en cuyo caso los desplazamientos de torsión actúan favorablemente en dirección contraria a los de traslación. Se observa que la excentricidad dinámica es más sensible a los cambios de e_r , mientras que la excentricidad accidental lo es a los cambios de δ_d y β_s/c .

Si bien no es práctico seleccionar valores constantes para cubrir cualquier combinación de parámetros del sistema, los máximos valores observados son $\alpha = 0,9$ y $\beta = 0,12$. En general, los valores de α crecen al acercarse a la periferia de la estructura, mientras que los valores de β crecen al acercarse al centro de rotación.

Bibliografía

- [1] Mexico Building Code, Federal District Government, Mexico City, 2004.
- [2] National Building Code of Canada, Associate Committee on National Building Code, Ottawa, Ontario, 1995.
- [3] Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1997.
- [4] E. Rosenblueth, J. Elorduy, Response of linear systems to certain transient disturbances, Proceedings 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 1969.
- [5] N.M. Newmark, Torsion in symmetric buildings, Proceedings 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 1969.
- [6] W.K. Tso, K.M. Dempsey, Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 8 (1980) 275–289.
- [7] K.M. Dempsey, W.K. Tso, An alternative path to seismic torsional provisions, Soil Dyn. Earthquake Eng. 1 (1982) 3–10.
- [8] A.M. Chandler, G.L. Hutchinson, Evaluation of code torsional provisions by a time history approach, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 15 (1987) 491–516.
- [9] G.D. Hahn, X. Liu, Torsional response of unsymmetric buildings to incoherent ground motions, J. Struct. Eng. 120 (1994) 1158–1181.
- [10] J.C. De la Llera, A.K. Chopra, Accidental torsion in buildings due to base rotational excitation, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 23 (1994) 1003–1021.
- [11] J.C. De la Llera, A.K. Chopra, Evaluation of code accidental-torsion provisions from building records, J. Struct. Eng. 120 (1994) 597–616.
- [12] Y. Li, X. Jiang, Parametric analysis of eccentric structure-soil interaction system based on branch mode decoupling method, Soil Dyn. Earthquake Eng. 48 (2013) 63–70.
- [13] A.M. Chandler, G.L. Hutchinson, Code design provisions for torsionally coupled buildings on elastic foundation, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 15 (1987) 517–536.
- [14] A.S. Veletsos, A.M. Prasad, Seismic interaction of structures and soils: Stochastic approach, J. Struct. Eng. 115 (1989) 935–956.
- [15] A.S. Veletsos, Y. Tang, Deterministic assessment of effects of ground-motion incoherence, J. Eng. Mech. 116 (1990) 1109–1124.
- [16] J. Avilés, M. Suarez, Natural and accidental torsion in one-storey structures on elastic foundation under non-vertically incident SH-waves, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 35 (2006) 829–850.
- [17] J.L. Tassoulas, E. Kausel, Elements for the numerical analysis of wave motion in layered strata, Int. J. Numer. Methods Eng. 19 (1983) 1005–1032.
- [18] P.W. Andrade, Implementation of second-order absorbing boundary conditions in frequency-domain computations [Ph.D. thesis], The University of Texas at Austin, 1999.
- [19] M. Iguchi, An approximate analysis of input motions for rigid embedded foundations, Trans of Architectural Institute of Japan 315 (1982) 61–75.
- [20] R.W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, McGraw-Hill (1975).
- [21] G. Mylonakis, G. Gazetas, Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental? J. Earthquake Eng. 4 (2000) 277–301.