

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Interacción sísmica de un sistema paso elevado-presa en suelos firmes

Daniel DE LA ROSA^{a,1}, Simón TEPALCAPA^a y Juan Manuel MAYORAL^a

^a *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*

Resumen. En ciudades densamente pobladas, las obras de infraestructura estratégica deben adaptarse a los espacios disponibles dentro del área urbana. Este artículo presenta el estudio del comportamiento sísmico de un paso elevado con el cruce de una presa. El ambiente sísmico se determinó a partir de espectros de peligro uniforme para un periodo de retorno 250 años para eventos normales y de subducción. La caracterización del subsuelo se realizó mediante los datos obtenidos a partir de sondeos de penetración estándar. Para evaluar la interacción del paso elevado con la presa se realizó un modelo tridimensional de diferencias finitas con el programa FLAC^{3D}. Este trabajo muestra la importancia de generar un espectro de sitio específico, debido a la importancia de la obra, así como de las características del terreno, para poder estimar de manera más precisa la acción sísmica a la cual estará sometida la estructura, y con ello poder garantizar un buen comportamiento durante un evento extremo.

Palabras Clave. Paso elevado, presa, efectos de sitio.

1. Introducción

En ciudades densamente pobladas, las obras de infraestructura estratégica deben acoplarse a la urbanización e infraestructura existente, algo que en la ciudad de México se ha atendido mediante el uso del espacio subterráneo o estructuras elevadas. El diseño moderno de puentes y pasos elevados, se ha enfocado a la evaluación basada en el desempeño [1-5]. Esta evaluación usualmente incluye varios escenarios sísmicos expresados en término de espectros de peligro uniforme, EPU, asociados a un cierto periodo de retorno [6-8], y un análisis en el dominio del tiempo para tomar en cuenta las no linealidades en la interacción del sistema suelo-cimentación-estructura [9-11]. Los efectos de variabilidad de los movimientos sísmicos se vuelven cruciales cuando la longitud del viaducto es significativa, por lo tanto, la variabilidad no solo es debida al cambio abrupto en las condiciones particulares del sitio, sino también a la incoherencia geométrica causada por la dispersión de las ondas sísmicas en el suelo heterogéneo, y en los efectos de paso de onda. En particular, en áreas densamente pobladas, tal como la ciudad de México, las restricciones con respecto a los desplazamientos permitidos tanto en la cimentación como en cabezales, son más restrictivas para evitar el daño en los cabezales, causado por los movimientos relativos entre los soportes de un puente. Este artículo presenta el estudio del comportamiento sísmico de un paso elevado y sus apoyos en el cruce de una presa localizada al poniente de la Ciudad de México (Figura 1). Se

¹ Investigador, Departamento de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Edificio N° 4, C.P. 04510, Ciudad de México, México. E-mail: jmayoralv@iingen.unam.mx

desarrolló un conjunto de modelos tridimensionales de diferencias finitas usando el programa FLAC^{3D}, los cuales fueron calibrados con los resultados obtenidos con el programa SHAKE. Se consideró caracterizar el ambiente sísmico mediante un espectro de peligro uniforme, EPU, asociado a un periodo de retorno de 250 años considerando eventos normales y de subducción, debido a que es el considerado en las Notas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México.

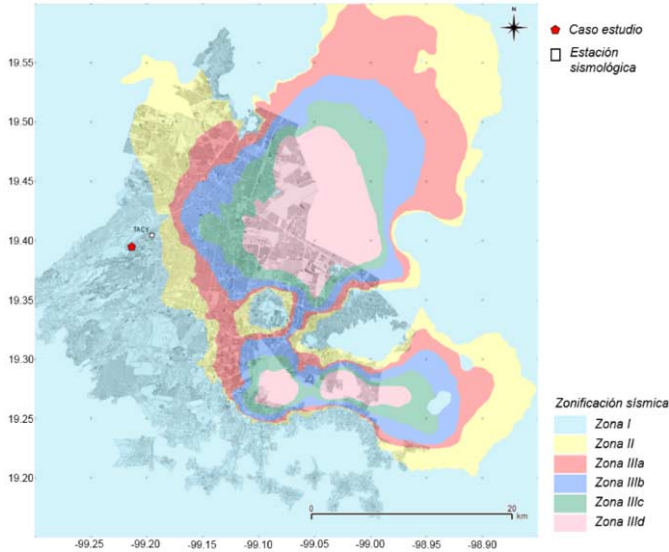


Figura 1. Localización del caso estudio, y zonificación sísmica de la Ciudad de México.

2. Caracterización Geo dinámica del suelo.

Debido a que no se realizaron pruebas in-situ para determinar la velocidad de onda de cortante, V_s , esta se tuvo que estimar con base en correlaciones empíricas que están en función del número de golpes de la prueba de penetración estándar. La utilización de estas correlaciones es limitada en arcillas de consistencia blanda, sin embargo, su aplicabilidad ha sido establecida por otros autores [12-16] para arenas y limos arcillosos como los encontrados en el sitio, y arcillas arenosas de consistencia media a dura. La Figura 1 resume la distribución de velocidad de onda de corte estimada del sitio en estudio.

3. Definición del ambiente sísmico.

Para desarrollar una historia de aceleraciones cuyo espectro de respuesta se ajuste razonablemente al espectro de peligro uniforme, EPU, para un periodo de retorno (i.e. $T_r = 250$ años), la historia de aceleraciones seleccionada usualmente llamada historia de aceleraciones semilla, fue modificada usando el método propuesto por Lihanand y Tseng [17] y modificado por Abrahamson [18]. Este enfoque se basa en la modificación de una

historia de aceleraciones para hacerlo compatible con un espectro objetivo definido por el usuario. Se seleccionaron los registros de la estación sismológica TACY del 19/09/1985 para eventos de subducción, y los del 19/09/2017 para eventos normales como sismos semilla, ya que es la estación más cercana al sitio (i.e. 2.2 km), que cuenta con un mayor número de registros, en terreno firme. La Figura 3 presenta la comparación del EPU, con el generado por el sismo sintético, tal y como se puede observar, el espectro de respuesta calculado a partir de la historia de aceleraciones modificada coincide razonablemente con el espectro objetivo.

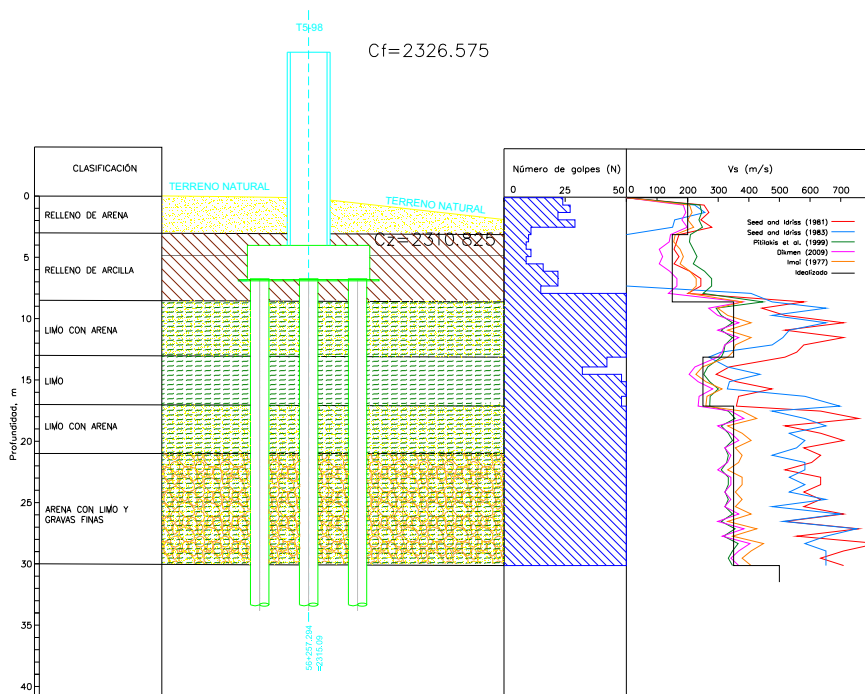


Figura 2. Perfil geotécnico del sondeo.

4. Modelo numérico

Para conocer el comportamiento dinámico de la presa, se desarrolló un modelo tridimensional de diferencias finitas con el software FLAC^{3D}. Se modelaron nueve apoyos que influyen en el cruce de la presa en estudio, tomando en consideración las unidades geotécnicas correspondientes (Figura 4). En la Tabla 1 y 2 se muestran las características geométricas de los apoyos y las resistencias de los concretos con las que fueron diseñadas. Las propiedades de las unidades geotécnicas utilizadas para desarrollo del modelo se muestran en la Tabla 3. El modelo tridimensional, que forma la presa se encuentra constituida por elementos sólidos tridimensionales, que a su vez se integran con un ensamble de elementos tetraédricos. Se consideró un criterio de falla bilineal, descrito por el modelo elasto-plástico tipo Mohr Coulomb.

5. Análisis de interacción suelo estructura.

Para evaluar el comportamiento dinámico de los apoyos que se desplantan sobre la presa, se desarrollaron modelos tridimensionales de diferencias finitas con el Programa FLAC^{3D} [19] (Figura 5). La superestructura se modeló con elementos Beam que se muestran como líneas que se desplantan sobre las zapatas modeladas (color rosa). En la Figura 5 se muestran los puntos monitoreados a lo largo del análisis. La Figura 6 muestra los sismos sintéticos considerados en los análisis de interacción sísmica.

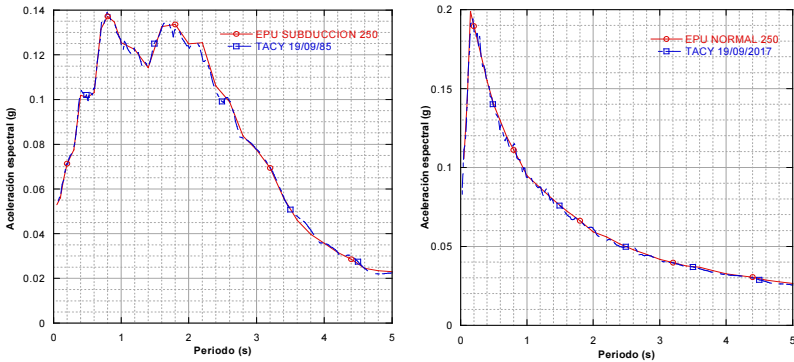


Figura 3. Espectros de respuesta sintéticos y objetivos considerando EPU con un Tr= 250 años.

Tabla 1. Características geométricas de los apoyos.

Apoyo	Longitud de Columna (m)	No de Pilas	Diámetro de Pilas (m)	Longitud de Pilas (m)
A-1	10.50	6	1.5	34.00
A-2	10.50	6	1.5	34.00
A-3	11.50	6	1.5	34.00
A-4	12.25	6	1.5	34.00
A-5	12.75	6	1.5	34.00
A-6	12.75	6	1.5	26.50
A-7	15.50	6	1.5	30.00
A-8	16.75	12	1.8	45.00
A-9	24.50	12	1.8	45.00

Tabla 2. Resistencia del concreto.

Elemento	Resistencia del Concreto f'c (MPa)
Tablero	45
Columnas y Cabezales	45
Zapatas	30
Pilas	25

Tabla 3. Propiedades mecánicas de las unidades geotécnicas.

Unidad Geotécnica	γ (kN/m ³)	c (kPa)	Φ (°)	E (MPa)	ν
UG-1	18.5	20	35	25	0.45
UG-3	18.5	20	36	55	0.33
UG-4	19.0	20	40	65	0.33

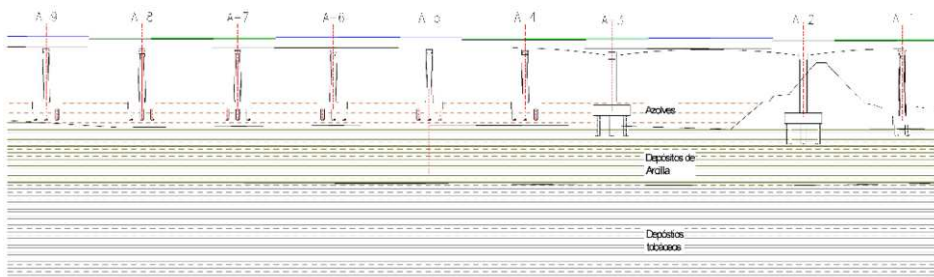


Figura 4. Modelo geotécnico.

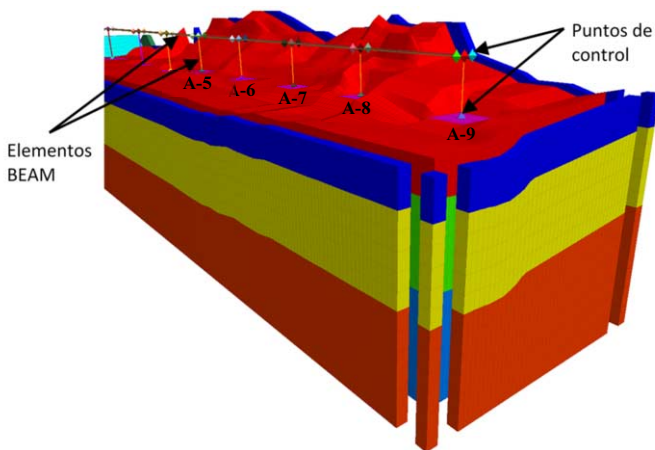


Figura 5. Puntos de control para el análisis dinámico.

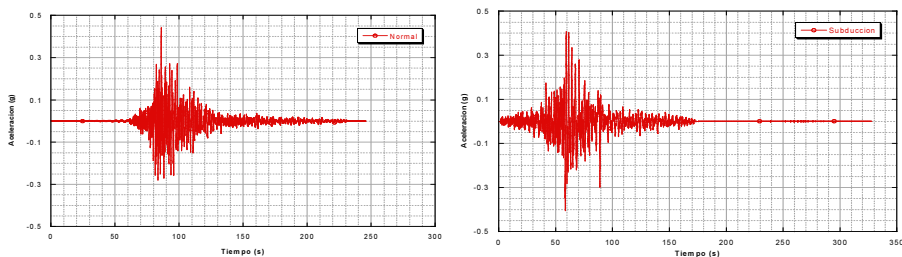


Figura 6. Sismos sintéticos considerando eventos normales y de subducción.

Para evaluar la interacción suelo-estructura, se obtuvieron los espectros de respuesta en cada uno de los apoyos considerados en el análisis (Figura 5). Los espectros obtenidos en el desplante de cada apoyo considerando eventos normales se muestran en la Figura 7, donde se puede observar que las aceleraciones espectrales máximas son de 0.35g y se presentan en periodos de entre 0.23 y 1.0s, siendo amplificando considerablemente las del EPU que establece el reglamento.

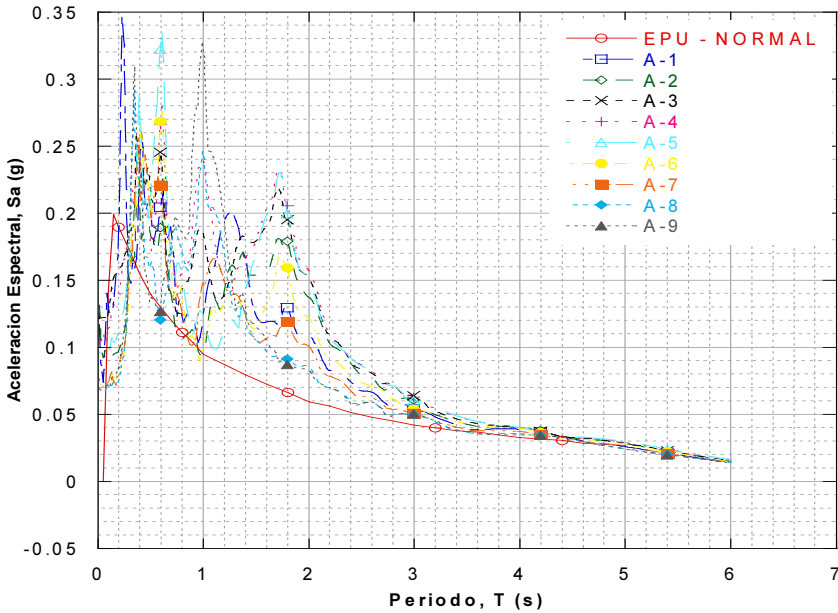


Figura 7. Espectros de respuesta en cada apoyo (sismo normal).

Las historias de aceleraciones y de desplazamientos en los puntos de control, muestran, que en casi todos los apoyos el máximo desplazamiento relativo entre la base y el cabezal de la columna es menor a 4cm. Los tres puntos de control en el cabezal de la columna tienen la misma historia de desplazamientos, permitiendo suponer que se mueven esencialmente como un cuerpo rígido, debido a la alta rigidez relativa del sistema de soporte.

Tabla 4. Desplazamiento relativo en cada apoyo considerando eventos normales.

Apoyo	Máximo Desplazamiento en la Base (m)	Máximo Desplazamiento en el Cabezal (m)	Máximo Desplazamiento Diferencial (cm)
A-1	-0.06	-0.08	1.96
A-2	-0.06	-0.09	2.61
A-3	-0.07	-0.10	3.63
A-4	-0.07	-0.10	4.07
A-5	-0.06	-0.10	4.51
A-6	-0.06	-0.12	6.08
A-7	-0.05	-0.12	7.24
A-8	-0.05	-0.10	7.90
A-9	-0.05	-0.07	7.44

El mayor desplazamiento diferencial se presenta en los apoyos cercanos a la presa, es decir los apoyos A-8 y A-9. Asimismo, considerando eventos de subducción, los espectros de respuesta obtenidos en el desplante de cada apoyo se muestran en la Figura 8, donde se puede observar las aceleraciones espectrales máximas en todos los casos con excepción del A-1 son de aproximadamente 0.40g y se presentan en periodos de entre 1.0 y 2.0s.

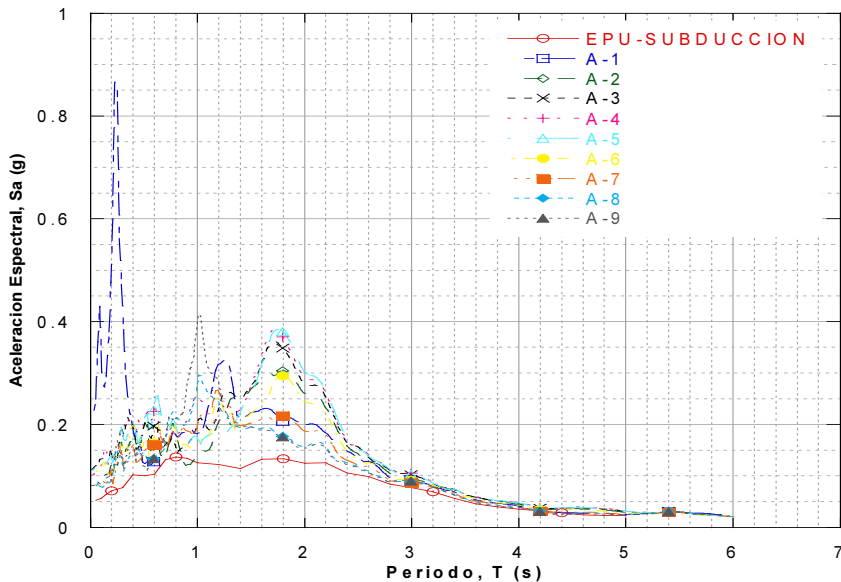


Figura 8. Espectros de respuesta en cada apoyo (sismo subducción).

Las historias de aceleraciones y de desplazamientos en los puntos de control, muestran que, en casi todos los apoyos el máximo desplazamiento relativo entre la base y el cabezal de la columna es menor a 10cm. Los tres puntos de control en el cabezal de la columna tienen la misma historia de desplazamientos, permitiendo suponer que se mueven como un cuerpo rígido, de igual forma que para el caso del sismo normal.

Tabla 5. Desplazamiento relativo en cada apoyo considerando eventos de subducción.

Apoyo	Máximo Desplazamiento en la Base (m)	Máximo Desplazamiento en el Cabezal (m)	Máximo Desplazamiento Diferencial (cm)
A-1	-0.07	-0.08	2.77
A-2	-0.09	-0.09	3.71
A-3	-0.09	-0.10	4.75
A-4	-0.09	-0.12	6.18
A-5	-0.08	-0.14	7.58
A-6	-0.08	-0.17	11.96
A-7	-0.07	-0.18	13.10
A-8	-0.07	-0.18	13.37
A-9	-0.07	-0.14	9.37

El mayor desplazamiento diferencial se presenta en los apoyos próximos a la presa, es decir los apoyos A-7 y A-8, debido a la interacción negativa entre ambas estructuras, y el tipo de suelo (i.e. arenas arcillosas) encontradas en las cercanías de la presa.

6. Conclusiones.

Este artículo presenta el estudio del comportamiento sísmico de un paso elevado con el cruce de una presa. El ambiente sísmico se determinó a partir de espectros de peligro

uniforme para un periodo de retorno de 250 años para eventos normales y de subducción. La caracterización del subsuelo se realizó mediante los datos obtenidos a partir de sondeos de penetración estándar. Para evaluar la interacción del paso elevado con la presa se realizó un modelo tridimensional de diferencias finitas con el programa FLAC^{3D}, donde se puede observar que las aceleraciones espectrales máximas son de 0.35g y se presentan en periodos de entre 0.23 y 1.0s para eventos normales, y de 0.40g y se presentan en periodos de entre 1.0 y 2.0s considerando eventos de subducción. Al compararlas con los EPU considerados en el reglamento de la Ciudad de México, se puede observar una amplificación de las aceleraciones espectrales, mismas que están asociadas a los materiales arenos-arcillosos que existen dentro del embalse de la presa. Este trabajo muestra la importancia de generar un espectro de sitio específico, debido a la importancia de la obra, así como de las características del terreno, para poder estimar de manera más precisa la acción sísmica a la cual estará sometida la estructura, y con ello poder garantizar un buen comportamiento durante un evento extremo.

Referencias

- [1] Mwafy A, Kwon O-S, Elnashai A. Seismic assessment of an existing non seismically designed major bridge-abutment-foundation system. *Eng Struct* 2010; 32:2192–209.
- [2] Dryden M, Fenves GL. The integration of experimental and simulation data in the study of reinforced concrete bridge systems including soil-foundation-structure interaction. (ReportPEER2009/03). Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California; 2009.
- [3] Zhang J, Makris N. Seismic response analysis of highway overcrossings including soil-structure interaction. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California; 2001 (ReportPEER2001/02).
- [4] Fenves GL, Ellery M. Behavior and failure analysis of a multiple-frame highway bridge in the 1994 Northridge Earthquake. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California; 1998 (Report PEER 1998/08).
- [5] Goel RK, Chopra AK. Evaluation of bridge abutment capacity and stiffness during earthquakes. *Earthq Spectra* 1997;13(1):1–23.
- [6] Parolai S, Grunthal G, Wahlstrom R. Site-specific response spectra from the combination of microzonation with probabilistic seismic hazard assessment an example for Cologne (Germany) area. *Soil Dyn Earthq Eng* 2007;27:49–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.03.007>.
- [7] Klugel J-U, Mualchin L, Panza GF. A scenario-based procedure for seismic risk analysis. *Eng Geol* 2006;88:1–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.006>.
- [8] Chandler AM, Lam NTK. Scenario predictions for potential near-field and far-field earthquakes affecting HongKong. *Soil Dyn Earthq Eng* 2002;22:29–46.
- [9] Nakamura N. Nonlinear response analysis of a soil-structure interaction system using transformed energy transmitting boundary in the time domain. *Soil Dyn Earthq Eng* 2009;29:799–808. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.08.004>.
- [10] Maheshwari BK, Truman KZ, El Naggar MH, Gould PL. Three-dimensional nonlinear analysis for seismic soil-pile structure interaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 2004;24:343–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.01.001>.
- [11] Zamaro G, Hao H, Modena C. Seismic response of multi-span simply supported bridges to a spatially varying earthquake ground motion. *Earthq Eng Struct Dyn* 2002; 31:1325–45. <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.166>.
- [12] Seed, H.B., Idriss, I.M., 1981. Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes. ASCE National Convention (MO), pp. 481–544.
- [13] Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *J. Geotech. Eng., ASCE* 109, 458–482.
- [14] Pitilakis K, Raptakis D, Lontzetidis KT, Vassilikou T, Jongmans D. 1999. S Geotechnical and geophysical description of Euro-Seistests, using field and laboratory tests, and moderate strong ground motions. *Journal of Earthquake Engineering* 3: 381-409.
- [15] Dikmen U. 2009. Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering* 6: 61-72.

- [16] Imai T. 1977. P and S wave velocities of the ground in Japan. Proceeding of IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 2: 127-132.
- [17] Lilhanand Ky Tseng WS. Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra. In: Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering (Tokyo, Japan), Vol. II; 1988. P 819–824.
- [18] Abrahamson NA. State of the practice of seismic hazard evaluation. Proceedings of GeoEng 2000, Melbourne, 19–24 November, 1; 2000. p. 659–685.
- [19] Itasca Consulting Group. FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, User's Guide (Minneapolis, Minnesota, USA).