

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.

Respuesta sísmica de arcillas de alta plasticidad durante eventos extremos

Juan Manuel MAYORAL^{a,1}, Ernesto CASTAÑÓN^a y Simón TEPALCAPA^a

^a*Instituto de Ingeniería, UNAM, México*

Resumen. En este artículo se presentan los trabajos de campo; laboratorio y análisis numéricos enfocados a el estudio de los efectos de la no linealidad de las arcillas de alta plasticidad, durante eventos sísmicos extremos. El perfil de velocidades de onda de cortante fue caracterizado mediante las mediciones de dos pruebas de sonda suspendida. Las curvas experimentales de módulo de rigidez y relación de amortiguamiento fueron ajustadas con modelos simplificados y se estableció la importancia de la deformación angular de referencia. El ambiente sísmico característico de eventos moderados se estableció directamente de una historia de aceleraciones registrada en el arreglo vertical TX5B localizada en el sitio de estudio, por otra parte, para eventos extremos, se determinó a partir de un espectro de peligro uniforme, EPU, desarrollado para un afloramiento de roca cercano al sitio estudiado, el cual está asociado un periodo de retorno, T_r , de 2475 años. Se realizó un ajuste espectral en el dominio del tiempo, para desarrollar historias de aceleraciones compatibles con el EPU. Se llevaron a cabo análisis de respuesta de sitio tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo considerando cada escenario sísmico. Se pudo observar claramente que el comportamiento no lineal del suelo incrementa cuando se consideran sismos extremos, lo cual debe tomarse en cuenta para evitar la sobreestimación o subestimación de los efectos de sitio y diseños sísmicos costosos o potencialmente inseguros. Finalmente, las predicciones de los análisis de respuesta de sitio son comparadas con mediciones en la superficie del arreglo vertical.

Palabras Clave. Arcillas de alta plasticidad, respuesta sísmica, no linealidades del suelo, eventos sísmicos extremos.

1. Introducción

Usualmente se ha considerado que las arcillas de alta plasticidad (i.e. aquellas con índice de plasticidad mayor a 250%), tal como las que se encuentran en el Valle de la Ciudad de México, el comportamiento no lineal es poco significativo durante eventos sísmicos extremos, tal como el observado durante terremoto de Michoacán de 8.1 Mw, incluso para deformaciones angulares del orden de 0.1% [1-3].

Actualmente, los criterios de diseño sísmico utilizados en todo el mundo, se han esforzado por tener periodos de retorno más grandes para caracterizar el ambiente sísmico cuando se trata de infraestructura estratégica, esta caracterización se realiza dentro de un marco de análisis de riesgo sísmico probabilista, PSHA. Sin embargo, cuando se realiza un análisis de respuesta de sitio con grandes periodos de retorno, la demanda sísmica puede incrementar de manera poco realista si no se toma en cuenta la

¹ Corresponding Author, Investigador titular, Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México; E-mail: jmayoralv@iingen.unam.mx.

no linealidad del suelo, esto debido al desconocimiento de la magnitud de la aceleración espectral y del contenido de frecuencias, lo cual conduce a diseños sísmicos costosos e incluso algunas veces peligrosos. En el pasado, varios autores han establecido la importancia de tomar en cuenta los efectos no lineales tanto en la atenuación de los movimientos telúricos como en la modificación del contenido de frecuencias, para arcillas de baja plasticidad y arenas [4,5]. Sin embargo, este sigue siendo un tema controvertido entre los sismólogos y los ingenieros geotécnicos cuando se trata de eventos sísmicos extremos en depósitos de arcilla de alta plasticidad, donde el efecto del índice de plasticidad, que es uno de los parámetros más importantes para definir la degradación del suelo durante una carga sísmica [6], es comúnmente ignorado. Este artículo presenta el estudio de la respuesta sísmica de los depósitos arcillosos de alta plasticidad encontrados en el Valle de la Ciudad de México, sujetos a eventos sísmicos extremos. A partir de los resultados recopilados, es evidente la importancia de considerar la no linealidad del suelo, incluso en arcillas de alta plasticidad, con el fin de evitar diseños sísmicos costosos e incluso inseguros.

2. Caracterización de los parámetros sísmicos

Las condiciones típicas del subsuelo que se encuentran en el ex Lago de Texcoco han sido estudiadas por varios investigadores, una descripción completa de estas condiciones se puede encontrar en [7,8]. Con el fin de resaltar la importancia de llevar a cabo un análisis de respuesta de sitio no lineal para eventos sísmicos extremos, se realizó un caso estudio. Para este caso estudio se utilizaron los datos de una estación sismológica denominada TX5B, la cual se localiza dentro de la zona del ex Lago de Texcoco (Figura 1a). Esta estación cuenta con un arreglo vertical, el cual está compuesto por cuatro acelerómetros tridimensionales situados a 0, 10, 20 y 40 metros de profundidad. Debido a la falta de datos en el sitio TX5B y que la estratificación en la zona estudiada es casi horizontal [8], se consideró apropiado utilizar un perfil de velocidad de onda cortante promedio entre los valores medidos en los sitios TXS1 y TXS2, para establecer la variación de V_s con la profundidad, la Figura 1b presenta el perfil de V_s utilizado para el sitio TX5B. Las curvas de degradación del módulo de rigidez, $G/G_{\max}$, y de relación de amortiguamiento, λ , se obtuvieron mediante una serie de ensayos dinámicos de columna resonante y triaxial cíclica, en muestras gemelas de suelo. Aunque las muestras de suelo ensayadas no fueron obtenidas en el sitio TX5B, estas proceden de los sitios TXS1 y TXS2, los cuales se consideran lo suficientemente cercanos (Figura 1a) al sitio en estudio. Las curvas experimentales de degradación del módulo de rigidez normalizado y de relación de amortiguamiento son representadas en la Figura 2, en la cual se puede apreciar que las arcillas de alta plasticidad tienen un comportamiento casi lineal para deformaciones angulares del orden de 0.03 a 0.1%. Cuando se realiza un análisis de respuesta de sitio se suelen utilizar curvas empíricas para modelar las propiedades dinámicas, debido a la dificultad que representa la obtención de estas. La Figura 2 muestra la comparación de los datos experimentales con las curvas empíricas propuestas por Romo *et al.* [9]. Para la zona virgen del lago de Texcoco, se puede observar que el efecto del tiempo (i.e. alrededor de 30 años) no ha afectado significativamente los límites superior e inferior que se espera de las curvas de degradación del módulo de rigidez y, por lo tanto, los datos experimentales caen de manera precisa dentro del rango propuesto, del mismo modo, la curva promedio de relación de amortiguamiento reportada por Romo *et al.* [9] también sigue la tendencia obtenida a partir de los datos experimentales.

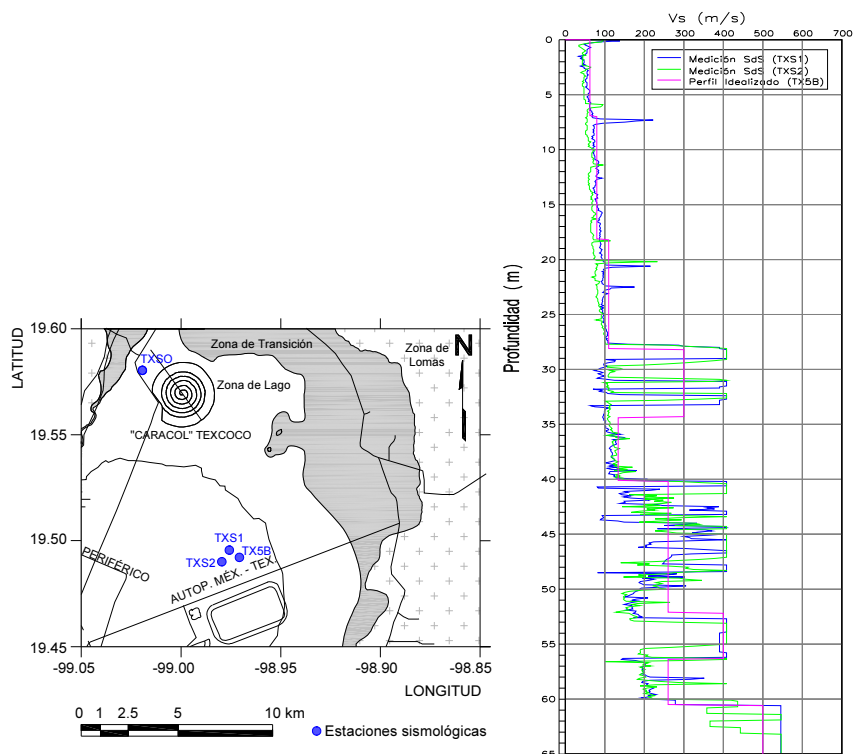


Figura 1. Localización del área de estudio (a), y perfil de V_s utilizado en el análisis para la estación TX5B (b).

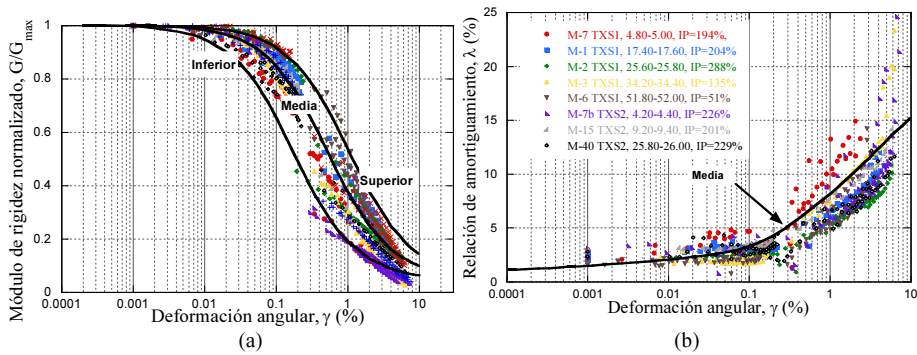


Figura 2. Comparación de las curvas experimentales con las propuestas por Romo *et al.*, [9].

Varios autores han propuesto la implementación de modelos matemáticos para reproducir las curvas experimentales. La Figura 3a presenta la comparación de los datos experimentales con la predicción de dos de los modelos más utilizados en la actualidad para predecir las propiedades dinámicas de suelos de grano fino, Darendeli & Stokoe [10] y González & Romo [11], así como las correspondientes curvas de Vucetic & Dobry [12]. Debido a las discrepancias que presentan los datos experimentales con las predicciones de los modelos, se decidió considerar un enfoque basado directamente en

los datos de laboratorio [13], para obtener los valores de la deformación de referencia, γ_r , y de esta manera mejorar la predicción de los modelos. Como se puede ver en la Figura 3b el ajuste de las propiedades dinámicas mejora de manera significativa al utilizar la deformación angular de referencia, γ_r , obtenida directamente de los datos experimentales. Debido a la dificultad práctica del muestreo en las capas de arena, los límites superior e inferior propuestos por Seed & Idriss [14] para las curvas de degradación del módulo de rigidez normalizado y de relación de amortiguamiento fueron consideradas como apropiadas, ya que éstas han sido utilizadas en análisis 1-D de propagación de ondas e.g. [9,15], cuyas predicciones fueron concordantes con las respuestas medidas.

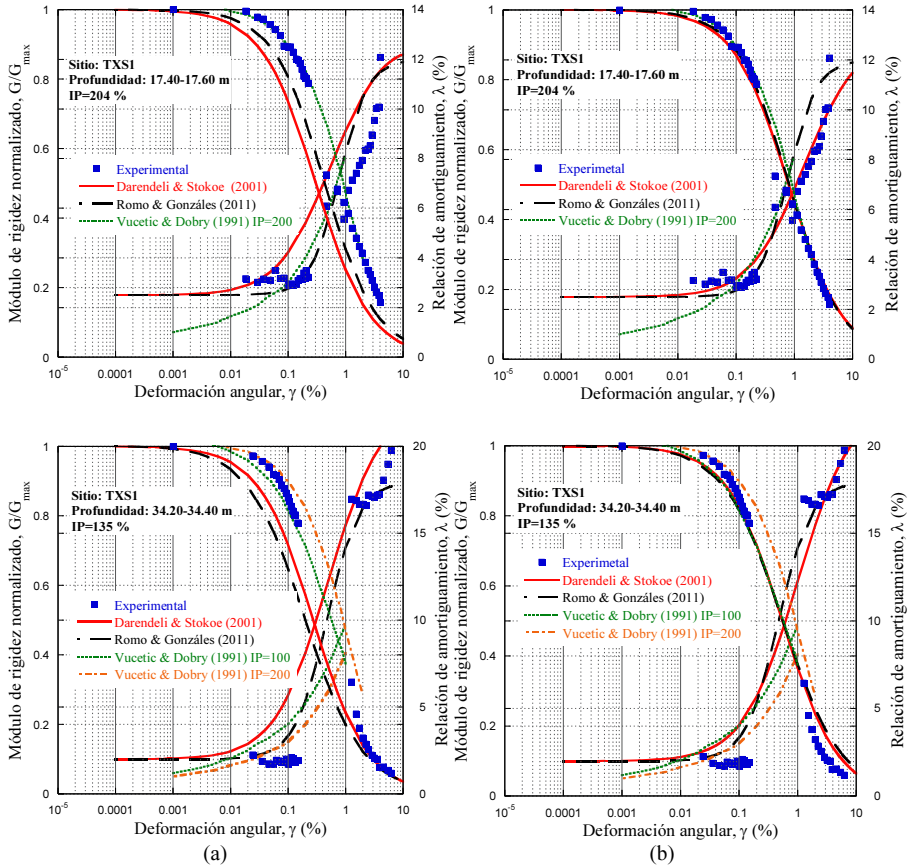


Figura 3. Datos experimentales (puntos) y curvas estimadas de $G/G_{\max}$ antes (a) y después (b) de tomar en cuenta los valores experimentales de γ_r .

3. Ambiente sísmico

El ambiente sísmico del sitio TX5B para eventos moderados, se estableció directamente de sismo registrado el 22 de enero de 2003, el cual presenta las características que se resumen en la Tabla 1. El epicentro de este sismo se localizó a 561 kilómetros del sitio, en la zona de subducción mexicana. Por otra parte, para eventos extremos, se desarrolló un espectro de peligro uniforme, EPU, para un afloramiento de roca cercano al sitio de

estudio, en el cual se encuentra la estación sismológica identificada como TXCR y está asociado a un periodo de retorno, T_r , de 2475 años, mediante un análisis de riesgo probabilista, PSHA, tal y como se describe en [8]. El EPU desarrollado se presenta en la Figura 4, el cual fue utilizado para obtener el movimiento de entrada para los análisis de respuesta del sitio que consideran eventos extremos. Para desarrollar historias de aceleraciones en el que los espectros de respuesta coincidan razonablemente con el EPU, una historia de aceleraciones semilla se ajustó utilizando el método propuesto por Lilhanand y Tseng [16], el cual es una modificación del método presentado por Abrahamson y Somerville [17]. La historia de aceleraciones semilla es un registro de larga duración (i.e. 200 s) típico de la zona de subducción de la costa del Pacífico, el cual fue medido el 14 de septiembre de 1995 en la estación sismológica TXCR durante un terremoto de 7.3Mw, la PGA del mismo es de 0.0026 g. El epicentro de terremoto tuvo lugar en la costa del estado de Guerrero, a unos 122 km de la ciudad de Acapulco. La estación TXCR se encuentra, como se ha indicado anteriormente, en un afloramiento de roca, a unos 19,20 kilómetros de distancia del sitio estudiado [8]. El amortiguamiento utilizado para obtener todos los espectros de respuesta fue de 5%, la comparación entre el espectro de respuesta objetivo y el obtenido a partir de la historia de aceleraciones modificada es presentada en la Figura 4.

Tabla 1. Datos del sismo de 22 de Enero de 2003.

Sitio	Evento	Ms	Distancia Epicentral (km)	Suelo	PGA (gal)
TX5B	22/01/2003	7.6	5561	0.326	0.326

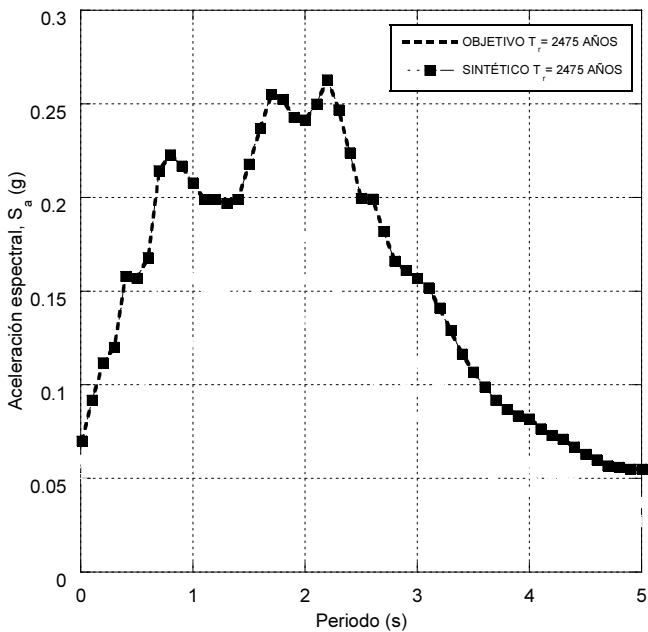


Figura 4. EPU y espectro de respuesta del sismo sintético.

4. Análisis de la respuesta de sitio

Inicialmente, el programa SHAKE [18] fue utilizado para llevar a cabo un análisis lineal equivalente 1D de la respuesta de sitio, posteriormente, se realizó un análisis no lineal de la respuesta de sitio con el programa FLAC^{3D} [19], para estudiar más a fondo la no linealidad del suelo. Se generó un modelo 3D de diferencias finitas de 40m de profundidad y una sección transversal de 10m por 10m (Figura 5). Se consideraron condiciones de campo libre a lo largo de las fronteras del modelo y se implementó una base rígida en la parte inferior del modelo con el fin de simular el contraste de impedancia dinámica existente en el lugar en el que una arcilla con baja velocidad de onda cortante superpone a una base con alta velocidad de onda cortante. El modelo 3D fue calibrado con los resultados obtenidos con el programa el SHAKE, considerando un modelo elástico-lineal en FLAC^{3D} caracterizado con las propiedades lineales equivalentes derivadas a partir de los análisis del programa SHAKE. Para el análisis no lineal se utilizó el modelo histerético disponible en FLAC^{3D} [19], para considerar la variación del módulo de rigidez y de la relación de amortiguamiento durante el evento sísmico.

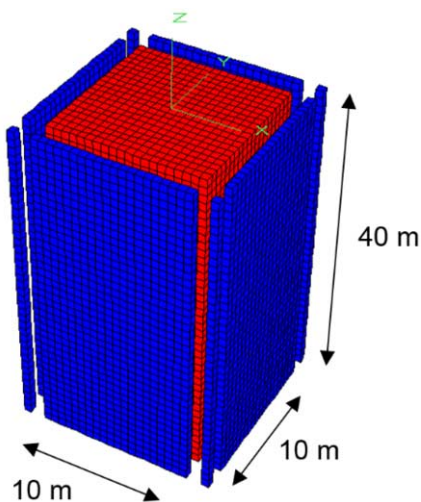


Figura 5. Modelo tridimensional.

Se calculó la respuesta de sitio con los programas SHAKE y FLAC^{3D}, mediante análisis elástico-lineales, lineales-equivalentes y no lineales, considerando eventos sísmicos moderados y extremos. La Figura 6a presenta la comparación entre los espectros de respuesta medidos y los calculados, correspondiente a cuatro diferentes profundidades (i.e. 0, 10, 20 y 40 m), considerando eventos sísmicos moderados. Asimismo, la Figura 6b presenta la comparación entre los espectros de respuesta considerando eventos sísmicos extremos (EPU asociado a un periodo de retorno de 2475 años), en la cual se observa que, como se esperaba, los análisis lineales y lineales-equivalentes sobre estiman los efectos no lineales en la respuesta de suelo para eventos sísmicos extremos.

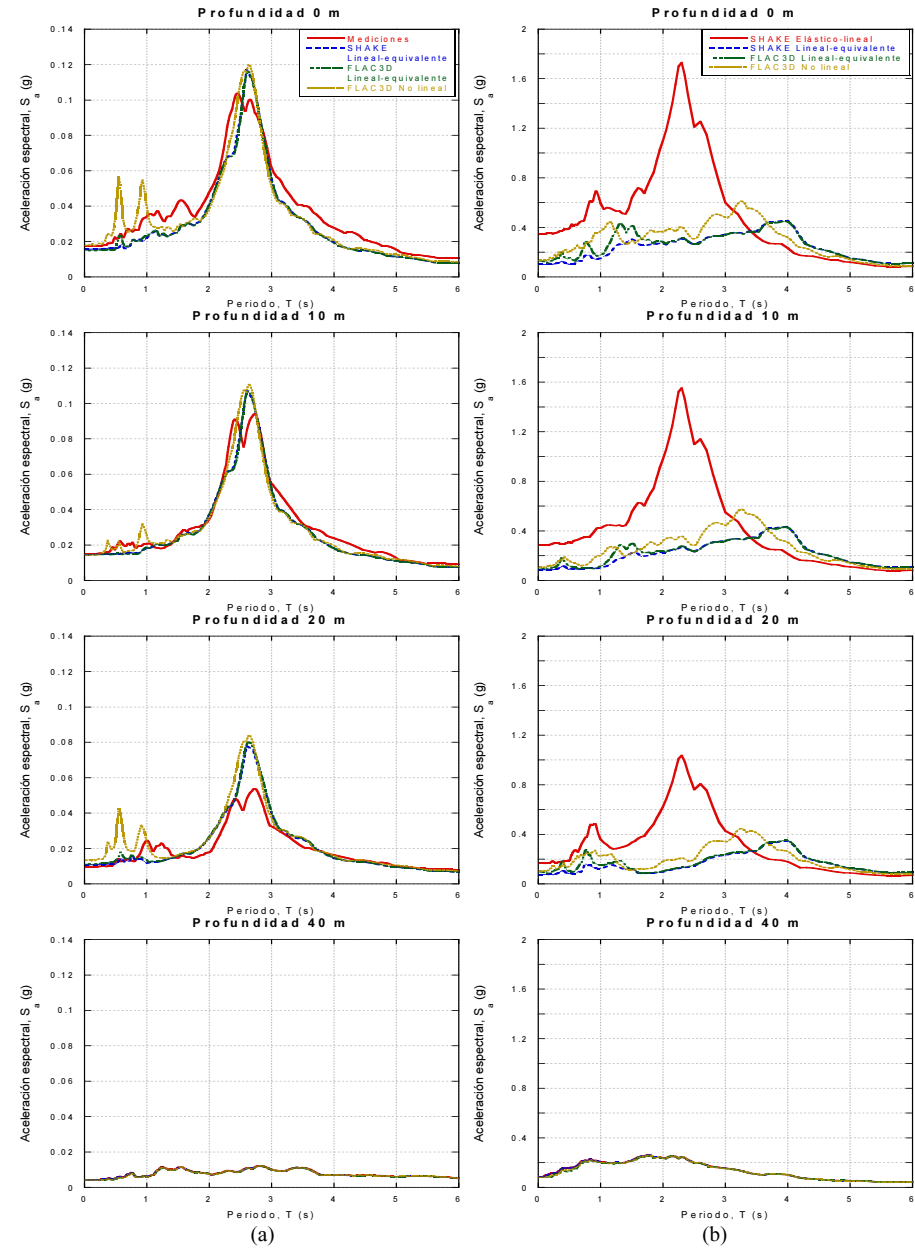


Figura 6. Respuestas de sitio, para un periodo de retorno, T_r , de 125 años (a) y 2475 años (b).

5. Conclusiones

Usualmente se ha considerado que las arcillas de alta plasticidad (i.e. aquellas con índice de plasticidad mayor a 250%), exhiben una reducción de la degradación de su rigidez, y del incremento de amortiguamiento en un rango cuasi-lineal durante la carga sísmica

incluso para deformaciones angulares del orden de 0.1%. Sin embargo, los resultados obtenidos proporcionan una evidencia de que, durante eventos sísmicos extremos, se pueden desarrollar importantes no linealidades en el suelo. Finalmente, por medio de un caso estudio se validaron los resultados obtenidos. Este artículo también presenta los principales resultados de laboratorio con respecto a las arcillas de alta plasticidad encontradas en la zona del Ex Lago de Texcoco, concluyendo que, para este tipo de arcillas, la deformación angular de referencia, parece ser un mejor parámetro, que el índice de plasticidad, para caracterizar las curvas de degradación del módulo de rigidez y de relación de amortiguamiento.

Referencias

- [1] Bard P.-Y., Campillo M., Chávez-García F. J. & Sánchez-Sesma F. (1988). "The Mexico Earthquake of September 19, 1985—A Theoretical Investigation of large and Small-scale Amplification Effects in the Mexico City Valley México". *Earthquake Spectra*, 4(3): 609-633
- [2] Singh S. K. & Ordaz M. (1993). "On the origin of the long coda observed in the lake-bed strong-motion records of Mexico City". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83: 1298-1306.
- [3] Ordaz M. & Faccioli E. (1994). "Site response analysis in the Valley of Mexico: selection of input motion and extent of non-linear soil behaviour". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons Ltd, (23): 895-908.
- [4] Lee C., Tsai Y. & Wen K. (2006). "Analysis if nonlinear site response using the LSST downhole accelerometer array data". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ELSEVIER, 26: 435-460.
- [5] Yee E., Stewart J. P. & Tokimatsu K. (2013). "2Elastic and large-strain nonlinear seismic site response from analysis of vertical array recordings". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 139(October): 1789-1801.
- [6] Vucetic M. (1992). "Soil properties and seismic response". In *Proceedings of the Tenth world conference earthquake engineering*, Balkema, Rotterdam y Brookfield, Madrid, Spain, 1199-1204.
- [7] Mayoral J. M., Romo M. P. & Osorio L. (2008). "Seismic parameters characterization at Texcoco Lake, Mexico". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ELSEVIER, 28: 507-521.
- [8] Osorio L. & Mayoral J. M. (2013). "Seismic microzonation for the northeast Texcoco lake area, Mexico". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ELSEVIER, 48: 252-266.
- [9] Romo M. P., Jaime A. & Reséndiz D. (1988). "General soil conditions and clay properties in the Valley of Mexico". *Earthquake Spectra*, 4: 687-730.
- [10] Darendeli M. B. & Stokoe K. H. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves". *Geotechnical Engineering Report GD01-1*, University of Texas at Austin, Austin, US.
- [11] González C. & Romo M. P. (2011). "Estimación de propiedades dinámicas de arcillas". *Revista de ingeniería sísmica*, Publicación SMIS, (84): 1-23
- [12] Vucetic M. & Dobry (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response". *Journal of geotechnical engineering*. ASCE 1991;117(1).
- [13] Mayoral J. M., Castañón E., Alcantara L. & Tepalcapa S. (2016). "Seismic response characterization of high plasticity clays". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ELSEVIER, 84: 174-189.
- [14] Seed H. B. & Idriss I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. UCB/EERC-70/10, University of Berkeley, California, US.
- [15] Seed H. B., Romo M. P., Sun J., Jaime A. & Lysmer J. (1988). "Relationships between soil conditions and earthquake ground motions". *Earthquake Spectra*, 4: 687-730.
- [16] Lilhanand K. & Tseng WS, (1988). "Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra". *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo, Japan, II: 819-824.
- [17] Abrahamson N. A. & Somerville P. G. (1993). "Estimation of hanging wall and footwall effects on peak acceleration". In *Proceedings of the international workshop on strong motion data*, 13-17 December, Menlo Park, California, US.
- [18] Schnabel B., Lysmer J. & Seed H. B. (1972). "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites". *User's guide Manual*, University of Berkeley, California, US.
- [19] Itasca Consulting Group (2005). "FLAC^{3D}, Fast Lagragian Analysis of Continua". *User's guide*, Minneapolis Minnesota, US.