

# COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE TÚNELES<sup>1</sup>

Antonio Bobet<sup>2</sup>

**Resumen:** Existe suficiente evidencia de campo que demuestra que las estructuras enterradas son vulnerables a los efectos sísmicos y por tanto se deben diseñar para poder soportar las deformaciones del suelo durante el terremoto. Si la estructura está suficientemente alejada del epicentro, se puede realizar un cálculo estático con el que se obtiene con suficiente aproximación la respuesta dinámica de la estructura. Los cálculos deben realizarse considerando la interacción suelo-estructura ya que la presencia de ésta modifica las deformaciones del suelo en campo libre (“free-field”). En este artículo se presentan resultados para poder estimar las deformaciones sísmicas inducidas en estructuras enterradas profundas de sección rectangular o circular.

**Palabras clave:** diseño sísmico, estructuras subterráneas, interacción suelo-estructura, rigidez relativa.

## SEISMIC RESPONSE OF TUNNELS

**Abstract:** There is enough field evidence to conclude that underground structures are vulnerable to seismic deformations, and thus they must be designed to accommodate the ground motions imposed by the earthquake. If the structure is far from the epicenter of the earthquake, a static analysis may be sufficient to approximate the dynamic response of the structure. The analysis, however, must include ground-structure interaction because the presence of the structure changes the free-field deformations of the ground. Solutions are provided to estimate seismically-induced deformations on deep underground structures with circular or rectangular cross sections.

**Keywords:** relative stiffness, seismic design, soil–structure interaction, underground structures.

### INTRODUCCIÓN

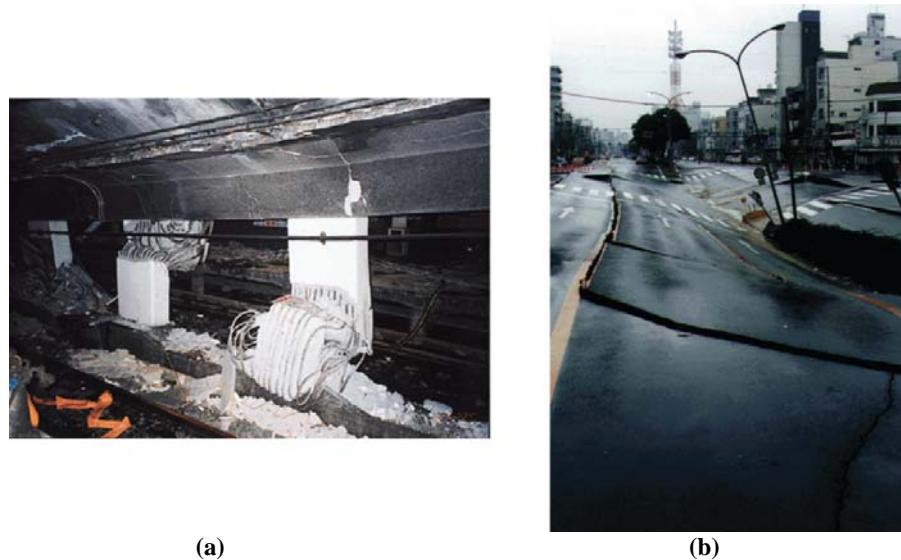
Las estructuras enterradas deben estar diseñadas de manera que resistan las cargas del terreno durante condiciones de trabajo normales, así como las deformaciones inducidas por el sismo de diseño. Hasta hace relativamente poco, la percepción dentro de la comunidad de ingeniería era que las estructuras enterradas no necesitaban diseñarse para resistir esfuerzos sísmicos porque éstas se mueven con el terreno debido a su menor masa comparada con la del terreno circundante, y por lo tanto no experimentan esfuerzos significativos. Esta percepción cambió drásticamente a raíz de la falla de la estación de metro de Daikai, en Kobe, Japón, durante el terremoto de Kobe en 1995. La Figura 1 muestra dos fotografías de la estación fallada. La Figura 1a muestra el interior de la estación con las columnas centrales falladas y la losa de soporte en el techo hundida. La Figura 1b muestra el estado de la carretera 28 en Kobe que circula por encima de la estación. La carretera, en la zona de la estación, sufrió deformaciones verticales de unos dos metros y medio como resultado del hundimiento de la estación. La estructura falló porque no estaba diseñada para resistir esfuerzos sísmicos. Las deformaciones impuestas por el sismo no pudieron absorberse por las columnas de la estación, las cuales fallaron a cortante, lo que causó la rotura de la losa superior (Huo et al., 2005; Parra-Montesinos et al., 2006).

Un estudio detallado de los efectos que causan los sismos en las estructuras enterradas muestra inequívocamente que estas estructuras son susceptibles al daño durante terremotos. Dowding y Rozen (1978) encontraron diversos grados de daño en 42 (59%) túneles de un total de los 71 investigados. En algunos casos el sismo causó la clausura del túnel. Estudios más detallados llevados a cabo por Owen y Scholl (1981), que incorporaron 56 nuevos túneles a los casos previamente estudiados, y más tarde por Sharma y Judd (1991) que compilaron un total de 192 túneles con 85 terremotos ocurridos en todo el mundo, confirman que las estructuras enterradas pueden sufrir un daño importante si no están diseñadas para resistir deformaciones sísmicas. Sharma y Judd (1991) encontraron que de los 192 túneles analizados, 94 (49%) sufrieron daños comprendidos entre leves y severos. A conclusiones similares se ha llegado también recientemente. Asakura y Sato (1996) recopilaron un gran número de casos de túneles de montaña en Japón. Se observaron diferentes niveles de daño en 124 de los túneles; 53 (43%) túneles sufrieron daños graves. La Figura 2 muestra la clasificación del daño observado en túneles de montaña durante el terremoto de Chi-Chi de Taiwán en 1999 y el lugar donde se registró el daño; es decir, por falla que

<sup>1</sup> Artículo recibido el 29 de agosto de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

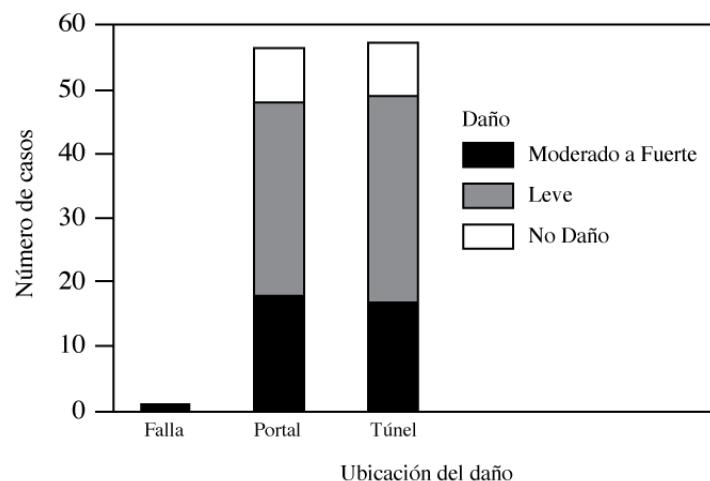
<sup>2</sup> Profesor, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Purdue, 550 Stadium Mall Drive, West Lafayette, IN 47907, USA. E-mail: bobet@purdue.edu

atraviesa el túnel, en los portales del túnel o en el interior del túnel (Wang et al., 2001). Del total de 57 túneles investigados, 49 (86%) resultaron dañados.



**Figura 1: Falla de la estación de Daikai en Kobe, Japón interior de la estación; (b) carretera 28 encima de la estación**

Por lo tanto, la experiencia recopilada a través de los años y de distintos terremotos y estructuras indica claramente que es necesario el diseño sísmico de las estructuras enterradas. Existen fundamentalmente tres mecanismos distintos que pueden imponer deformaciones dinámicas a las estructuras enterradas: (1) falla del terreno; (2) desplazamientos de fallas atravesadas por la estructura; y (3) vibraciones del terreno. El mecanismo de falla del terreno comprende roturas por desprendimiento de los taludes en los portales del túnel o por licuefacción del terreno alrededor de la estructura. El fenómeno de licuefacción resulta en una pérdida de la capacidad resistente del suelo y en grandes deformaciones. En general, no es aconsejable diseñar las estructuras de manera que resistan estas grandes deformaciones, y así es prudente evitar aquellos suelos que puedan licuar o tratarlos de manera que no se produzca el fenómeno durante el sismo, por ejemplo densificándolos o haciéndolos resistentes con tratamientos químicos (Hashash et al., 2001). No es posible, en la mayoría de los casos, evitar el atravesar fallas activas que pueden imponer deformaciones en la estructura y tampoco es aconsejable, o posible, diseñar la estructura para resistir los desplazamientos de la falla. La solución normalmente consiste en un diseño flexible que permita el movimiento de la falla, limite el daño, facilite una reparación rápida de la estructura y que al mismo tiempo permita mantener la función del túnel aun después de que los desplazamientos de falla reduzcan la sección útil del túnel. Este artículo se concentra en el diseño de túneles sometidos a vibraciones del terreno.



**Figura 2: Tipo y ubicación del daño en túneles de montaña en Taiwán causados por el terremoto de Chi-Chi de 1999 (datos obtenidos de Wang et al., 2001)**

## RESPUESTA DEL TÚNEL A DEFORMACIONES SÍSMICAS

Existen dos tipos de ondas sísmicas en un medio continuo: las ondas de compresión u ondas P y las ondas de cortante u ondas S. Las ondas de compresión producen movimientos paralelos a su dirección de propagación mientras que las ondas de cortante generan movimientos perpendiculares. Las ondas sísmicas producen las siguientes deformaciones en un túnel (véase la Figura 3):

1. Compresión axial (longitudinal) y extensión (Figura 3a), debidas a las ondas P que viajan paralelas al eje del túnel.
2. Compresión y extensión transversal (Figura 3b), debida a las ondas P que se mueven perpendicularmente al eje del túnel.
3. Flexión axial (longitudinal) o de arrastre (Figura 3c), causada por ondas S que viajan a lo largo del eje del túnel.
4. Cortante axial (longitudinal), (Figura 3d) debido a ondas S que se propagan en sentido perpendicular al eje del túnel con movimientos paralelos al eje del túnel.
5. Ovalización o deformación transversal (Figura 3e para ovalización y Figura 3f para deformación transversal), inducida por ondas S que se propagan perpendicularmente al eje del túnel e inducen movimientos del terreno también perpendiculares al eje del túnel. En términos generales, las deformaciones por ovalización y las transversales son las más críticas (Wang, 1993).

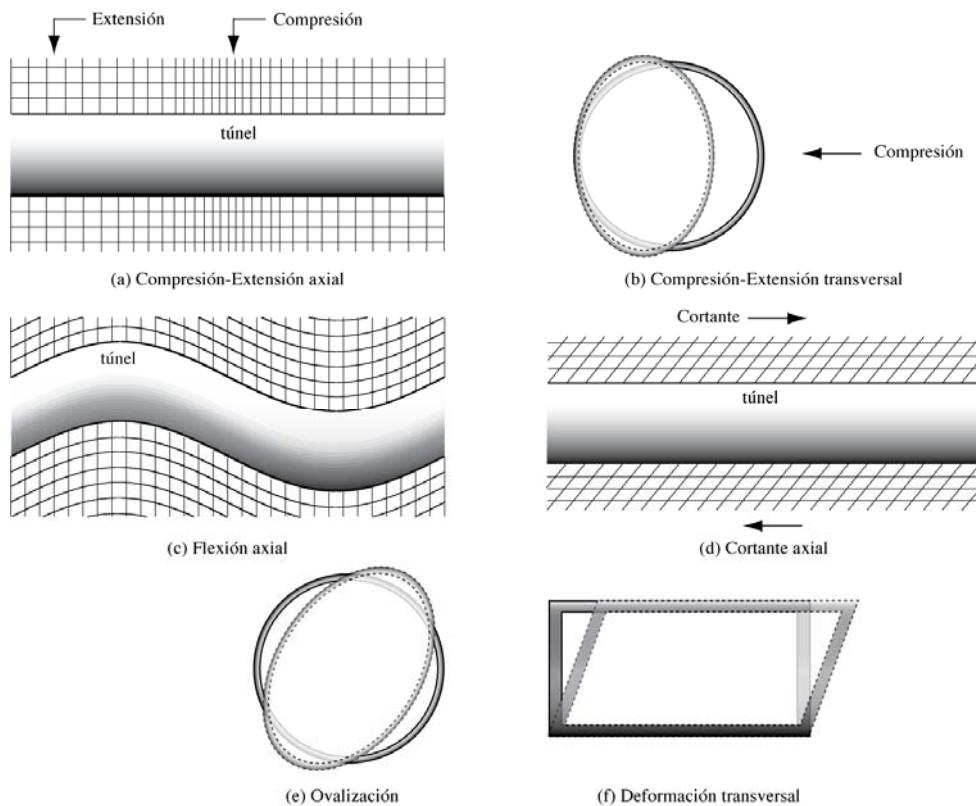


Figura 3: Modos de deformación de túneles producidos por ondas sísmicas (adaptado de Owen y Scholl, 1981).

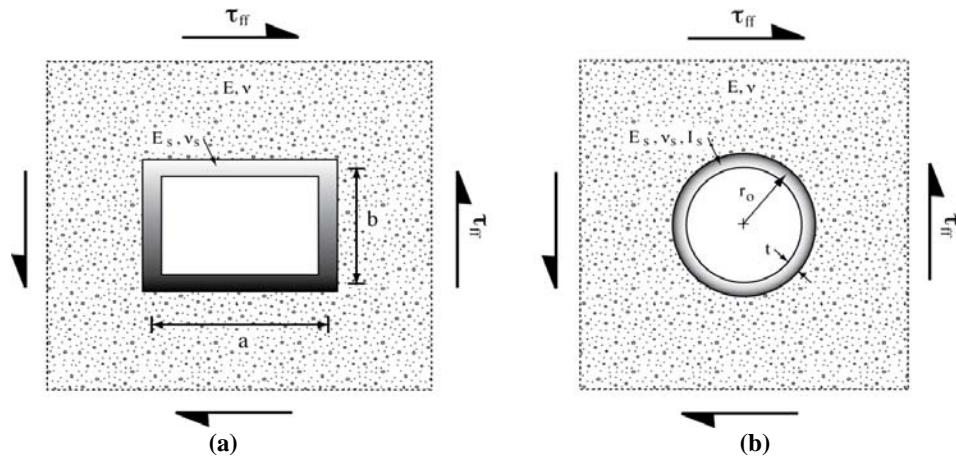
Mow y Pao (1971) observaron que los esfuerzos dinámicos en una estructura enterrada sometida a ondas de compresión y cortante perpendiculares al eje del túnel (Figuras 3e y 3f) eran sólo 10% a 15% mayores que los esfuerzos obtenidos en un análisis estático en el que los esfuerzos o deformaciones del suelo lejos de la estructura son los máximos producidos por el terremoto. Hendron y Fernández (1983), Merritt et al. (1985) y Monsees y Merritt (1988) llegaron a las mismas conclusiones y demostraron que la amplificación dinámica de las ondas de esfuerzos en un túnel se puede ignorar cuando la longitud de onda de las velocidades máximas es al menos ocho veces mayor que el ancho del túnel. En estos casos, la fuerza sísmica se puede calcular como una carga estática. Esta aproximación produce normalmente errores aceptables en túneles que se hallan lejos del epicentro, donde las frecuencias de las vibraciones del terreno se encuentran típicamente dentro del rango de 0.1 a 10 hertzios. En la sección siguiente se presentan métodos de cálculo sencillos para determinar,

usando métodos estáticos, los desplazamientos de las estructuras enterradas sometidas a deformaciones sísmicas. Cuando el túnel está expuesto a frecuencias más altas, por ejemplo explosiones, o cuando la condición requerida a las velocidades de onda no se cumple, la aproximación estática no es adecuada y los cálculos se han de hacer necesariamente utilizando métodos dinámicos numéricos.

## CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES SÍSMICAS DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS

La presencia de la estructura dentro del terreno afecta a las deformaciones del suelo alrededor de la estructura de manera que es de esperar que una estructura más rígida que el terreno que sustituye resulte en deformaciones menores que las del terreno si no hubiera estructura. De igual manera, una estructura cuya rigidez es menor que la rigidez del terreno que reemplaza, experimentará deformaciones mayores que las del terreno sin la estructura. Por tanto, el cálculo de las deformaciones sísmicas de estructuras enterradas requiere incluir en los análisis la interacción entre el suelo y la estructura. En lo que sigue se presentan soluciones sencillas para estimar las deformaciones inducidas por sismos en estructuras profundas en las que el comportamiento tanto de la estructura como del suelo es elástico y tanto la estructura como el suelo son homogéneos. Un comportamiento elástico de la estructura es razonable si el túnel está bien diseñado de manera que el daño en la estructura es leve, pero no es realista en suelos, salvo para aquéllos muy rígidos, por ejemplo arcillas duras y rocas, y para deformaciones sísmicas pequeñas. La solución que se presenta puede sin embargo aplicarse a casos de suelos blandos y relativamente no homogéneos siguiendo un proceso iterativo como el que se describe en Bobet et al. (2008).

La Figura 4a muestra un túnel de sección rectangular de dimensiones  $a \times b$ , propiedades elásticas del terreno  $E, v$ , y propiedades elásticas del soporte  $E_s, v_s$ . La Figura 4b presente un túnel de sección circular con radio  $r_o$ , y con las mismas propiedades elásticas y momento de inercia  $I_s$ . Estas estructuras están sometidas a un esfuerzo de corte  $\tau_{ff}$  en el terreno lejos de la estructura. Este es el cortante que se produce en el suelo en la deformación de campo libre o “free-field”, o sea el que se obtiene en el lugar y a la profundidad donde se ubica el túnel sin que se incluya la estructura. El esfuerzo o la deformación de cortante pueden obtenerse considerando las propiedades del terreno actuales y el terremoto de diseño usando el programa SHAKE o similares (Schnabel et al., 1972).



**Figura 4: Estructuras enterradas profundas: (a) Estructura rectangular; (b) Estructura circular.**

La Figura 5 muestra la distorsión de una estructura rectangular  $\Delta_{stru}$ , normalizada con relación a la distorsión de campo  $\Delta_{ff}$ , con respecto a  $F^W$ , que es la flexibilidad relativa de la estructura con respecto a la del terreno circundante. La distorsión de la estructura  $\Delta_{stru}$  es la diferencia del desplazamiento entre las losas superior e inferior de la estructura. La relación de flexibilidad  $F^W$  se expresa como (Wang, 1993):

$$F^W = G \frac{a}{b} \Delta_1 \quad (1)$$

donde  $a$  y  $b$  ( $a > b$ ) son la longitud y la altura de la estructura, respectivamente (ver la Figura 4),  $G$  es el módulo de cortante del suelo, y  $\Delta_1$  es el desplazamiento en deformación plana de la estructura producido por una fuerza horizontal unitaria aplicada en la parte superior de la estructura, como se indica en la Figura 5. Dos tipos de cálculos se presentan en la figura: cálculos dinámicos realizados por Wang (1993) utilizando el método de elementos finitos dinámico, es decir incorporando la inercia en la solución, y cálculos estáticos, también utilizando el método de elementos finitos, en los que la inercia tanto del suelo como de la estructura se han ignorado (Bobet, 2009). Los cálculos dinámicos se realizaron considerando diversos sismogramas y diferentes geometrías y propiedades tanto del suelo como de los elementos

estructurales. Los cálculos estáticos se han realizado para un número diverso de casos abarcando un rango amplio de los valores de la rigidez relativa  $F^W$ . Como puede verse en la figura, la distorsión de la estructura depende claramente de la rigidez relativa de la estructura con respecto a la del medio que la rodea,  $F^W$ . Hay que hacer notar que casos distintos pueden producir valores diferentes de la distorsión aunque tengan la misma rigidez relativa. Huo et al. (2006) demuestran que estas diferencias se deben a las distintas formas de la estructura, dadas por la razón  $a/b$ , pero las diferencias, como se puede ver en la figura, son pequeñas. La figura también muestra que los cálculos estáticos producen resultados similares a los de los cálculos dinámicos. Esto se debe a que las estructuras cumplen con la relación entre tamaño y longitud de onda de las velocidades máximas sísmicas descrita en la sección anterior.

Como se ha comentado previamente, la presencia de la estructura modifica las deformaciones del suelo. Así, si una estructura es muy rígida,  $F^W = 0$ , y ésta no se deforma independientemente de los desplazamientos impuestos por el terreno circundante. Si  $F^W < 1$ , la estructura es más rígida que el terreno y se deforma menos que el terreno sin estructura; si  $F^W = 1$  la estructura se deforma igual que el suelo debido a que tiene la misma rigidez, y si  $F^W > 1$  la estructura es más flexible que el terreno y se deforma más que el terreno sin estructura. En el caso límite, a medida que  $F^W \rightarrow \infty$ , las deformaciones de la estructura corresponden a las de una abertura rectangular de dimensiones  $a$  x  $b$  sin soporte.

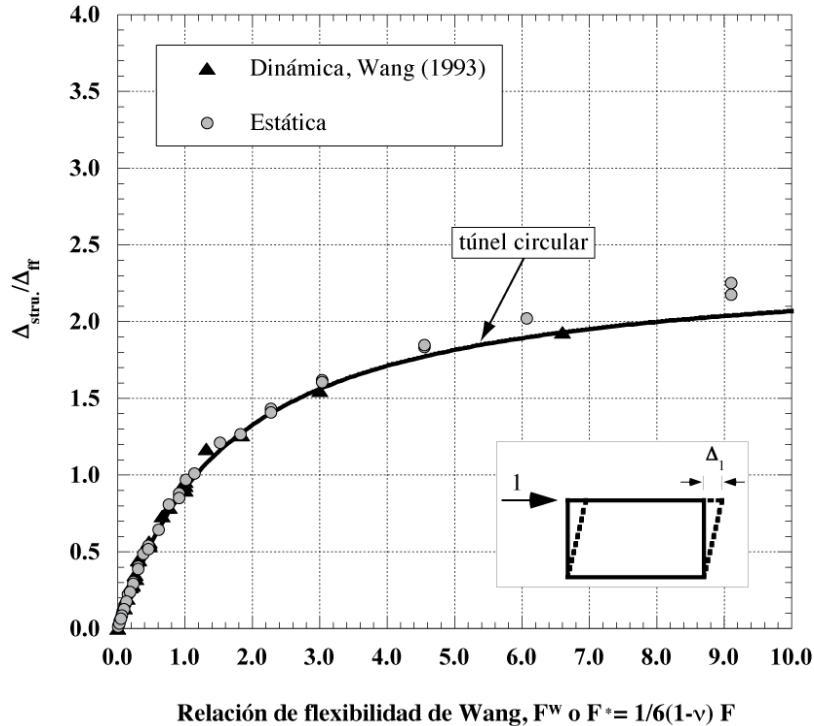


Figura 5: Estructuras enterradas profundas. Comparación entre cálculos dinámicos y estáticos.

Los errores cometidos asumiendo que la estructura es profunda se presentan en la Figura 6. La figura presenta la distorsión de una estructura rectangular en un medio continuo y elástico, colocada a distintas profundidades, determinadas por el parámetro  $d/b$ , donde  $d$  es el espesor del suelo por encima de la losa superior de la estructura y  $b$  es la altura de la estructura, como se indica en la figura. Para facilitar las comparaciones, la distorsión de la estructura está normalizada por la distorsión de la estructura cuando ésta es profunda. Así, valores de la distorsión normalizada iguales a 1 indican que la estructura se comporta como si fuera profunda, mientras que valores menores que 1 indican distorsiones más pequeñas que las de la misma estructura cuando ésta es profunda. Los resultados indican una cierta dependencia con la geometría de la estructura, es decir los resultados dependen del factor  $a/b$ , que puede considerarse como una medida de la forma de la estructura. De todas maneras, como puede verse en la figura, los valores de las distorsiones normalizadas son siempre menores que la unidad, lo que indica que las estructuras superficiales se deforman menos que las profundas. Estos errores son pequeños, con valores máximos entre el 10% y el 15% de los de las estructuras profundas y se producen con  $d = 0$ , es decir cuando la losa superior de la estructura coincide con la superficie del terreno. Otra conclusión que se obtiene de la figura es que para valores de  $d/b$  igual o mayores que 1.5, la estructura puede considerarse como profunda independientemente de la forma de la estructura.

Resultados semejantes a los obtenidos para estructuras rectangulares pueden obtenerse para estructuras profundas de sección circular. La ventaja es que existen soluciones analíticas que dan directamente la solución completa del problema en términos de esfuerzos y deformaciones tanto del terreno como del soporte; véase por ejemplo, Einstein y Schwartz (1979) y

Bobet (2009). La Figura 5 también muestra las distorsiones de un túnel circular normalizadas por las del suelo lejos de la estructura, o “free field”. Los cálculos se han realizado para un valor del coeficiente de Poisson del suelo de  $\nu = 0.25$ . Los datos de las estructuras circulares dependen del valor  $F^*$  (los de las rectangulares dependen de  $F^W$ ), que es una modificación del valor de la flexibilidad relativa propuesto por Einstein y Schwartz (1979), necesaria para que los valores de la rigidez relativa de las estructuras circulares puedan compararse con los de las estructuras rectangulares.

$$F^* = \frac{1}{6} (1 - \nu) F$$

$$F = \frac{E r_o^3 (1 - \nu_s^2)}{E_s I_s (1 - \nu^2)} \quad (2)$$

En las ecuaciones (2) los valores de las propiedades elásticas son los definidos en la Figura 4. Como puede observarse en la Figura 5, las diferencias entre las distorsiones de una estructura enterrada circular y rectangular son pequeñas, siempre y cuando los valores de las rigideces relativas sean comparables. Esta observación está de acuerdo con la conclusión previa de que la forma de las estructuras enterradas tiene una influencia pequeña en las distorsiones sísmicas.

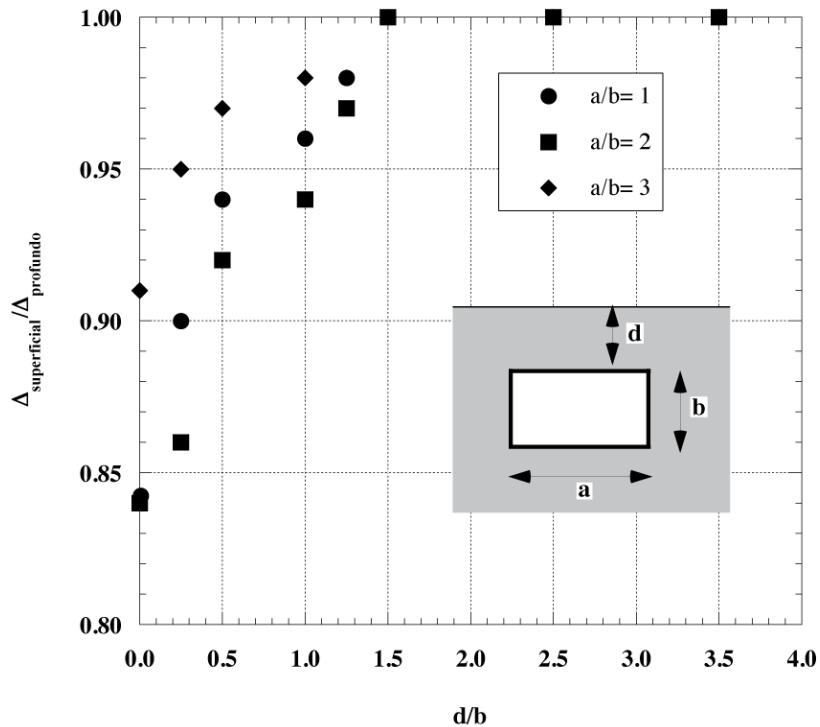


Figura 6: Comparación de deformaciones entre estructuras superficiales y profundas.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes a las que se ha llegado en este artículo son las siguientes:

- (1) Las estructuras enterradas son vulnerables a las deformaciones sísmicas inducidas por los terremotos, y por tanto se deben diseñar con suficiente ductilidad de manera que puedan absorber las deformaciones inducidas por el sismo sin daño.
- (2) La presencia de la estructura cambia las deformaciones del terreno y por lo tanto los cálculos de deformación sísmica deben incluir la interacción suelo-estructura.
- (3) Las deformaciones sísmicas de túneles situados lejos del epicentro del terremoto se pueden aproximar con suficiente exactitud mediante cálculos estáticos en los que lejos de la estructura se imponen los esfuerzos o deformaciones que ocurren en el terreno, obtenidas en “free field”, es decir en el terreno sin la estructura.
- (4) La flexibilidad relativa entre el terreno y la estructura es el parámetro más importante para la determinación de las deformaciones sísmicas de estructuras enterradas. La forma de la estructura tiene una importancia secundaria.
- (5) Los cálculos de deformación sísmica pueden realizarse asumiendo que la estructura es profunda. Los resultados, en términos de deformaciones, resultan conservativos y son del orden del 10% al 15% mayor que los de una estructura superficial.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo financiero proporcionado por la U.S. National Science Foundation, proyecto No. CMS-0000136, y por Purdue University.

## REFERENCIAS

- Asakura, T. y Sato, Y. (1996). "Damage to mountain tunnels in hazard area", *Soils and Foundations*, Special Issue on the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No. 1, pp. 301-310.
- Bobet, A., Fernández, G., Huo, H. y Ramírez, J. (2008). "A practical procedure to estimate seismic-induced deformations of shallow rectangular structures", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 7, pp. 923-938.
- Bobet, A. (2009). "Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, pp. 21-31.
- Dowding, C.H. y Rozen, A. (1978). "Damage to rock tunnels from earthquake shaking", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE 104 GT2, pp. 175-191.
- Einstein H.H. y Schwartz, C.W. (1979). "Simplified analysis for tunnel supports", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT4, pp. 499-518.
- Hashash, Y., Hook, J.J., Schmidt, B. y Yao, J. (2001). "Seismic design and analysis of underground structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16, pp. 247-293.
- Hendron, A.J. y Fernández, G. (1983). "Dynamic and static design considerations for underground chambers", en: *Seismic Design of Embankments and Caverns*, Howard, T.R., ed., ASCE, Nueva York, pp.157-197.
- Huo, H., Bobet, A., Fernández, G. y Ramírez, J. (2005). "Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai Station", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 12, pp. 1522-1533.
- Huo, H., Bobet, A., Fernández, G. y Ramírez, J. (2006). "Analytical solution for deep rectangular structures subjected to far-field shear stresses", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 613-625.
- Merritt, J.L., Monsees, J.E. y Hendron Jr., A.J. (1985). "Seismic design of underground structures". *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Mann, C.D. y Kelley, M.N., eds., Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, pp. 104-131.
- Monsees, J.E. y Merritt, J.L. (1988). "Seismic modeling and design of underground structures". *Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck 1988. Proceedings of the Sixth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Swoboda, G., ed., pp. 1833-1842.
- Mow, C.C. y Pao, Y.H. (1971). *The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations*, documento No. R-482-PR, The Rand Corporation, Santa Mónica, California.
- Owen, G.N. y Scholl, R.E. (1981). *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*, Informe No. FHWA/RD-80/195, Federal Highway Administration, Department of Transportation.
- Parra-Montesinos, G.J., Bobet, A. y Ramírez, J. (2006). "Evaluation of soil-structure interaction and structural collapse in Daikai subway station during Kobe earthquake", *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, pp. 113-122.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", *Report No. UCB/EERC-72/12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 102 pp.
- Sharma, S. y Judd, W.R. (1991). "Underground opening damage from earthquakes". *Engineering Geology*, Vol. 30, pp. 263-276.
- Wang, J.N. (1993). "Seismic Design of Tunnels - A Simple State-of-the-Art Design Approach". *Monograph 7*, Nueva York: Parsons Brickerhoff Quade & Douglas, Inc., Parsons Brinckerhoff Inc., New York.
- Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng C.R. y Huang, T.H. (2001). "Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 133-150.