

RESPUESTA, ANI'E SOLICITACIOES SISMICAS, DE CIMENTACIOES RIGIDAS SOBRE SUEUJS ID HOM:X;ENIDS

Jos Domínguez Abascal y Ramón Abascal García

Cátedra de Estructuras
E.T.S. de Ingenieros Industriales
Universidad de SEVILLA

Resumen. La respuesta de cimentaciones rígidas ante trenes de ondas de origen sísmico se ve afectada por la forma del perfil del suelo en las inmediaciones y la deformabilidad de la base rocosa sobre la que se asienta el suelo. Se analiza en el artículo la influencia de estos factores mediante el uso del Método de los Elementos de Contorno en el dominio de la frecuencia. Se emplean elementos de tipo constante para un dominio formado por zonas viscoelásticas como una de las cuales es homogénea.

1. INTRODUCCIÓN

La observación de los daños ocurridos a los edificios durante algunos terremotos recientes, muestra que el comportamiento de el sistema suelo-estructura se ve influenciado, no sólo por la geometría del cimiento y las características mecánicas del suelo inmediatamente debajo de él, sino también por la topografía superficial y subterránea en las zonas próximas a la construcción.

El análisis de la respuesta sísmica de las estructuras, teniendo en cuenta los efectos de interacción con el suelo, se realiza en la mayoría de los casos mediante el uso del Método de los Elementos Finitos. Para poder representar el suelo sin que se produzcan falsas reflexiones de ondas en los límites del modelo, se desarrollaron en los años setenta los "contornos absorbentes" [7, 11] que, permiten modelar suelos estratificados que horizontalmente se extienden hasta el infinito. No obstante, el uso de contornos absorbentes implica un modelo de suelo que debe estar limitado a una profundidad rodeada por una base rocosa que se supone rígida, y unos estratos en la parte superior, que deben ser paralelos, e infinitos en dirección horizontal (Fig. 1). Dado que existen situaciones reales en las que no existe una base rocosa muy rígida a poca profundidad o el perfil subterráneo del suelo dista mucho de ser un conjunto de estratos horizontales, deben analizarse cuidadosamente los efectos de la existencia de un medio deformable que se extienda hasta gran profundidad y de un perfil subterráneo no estratificado.

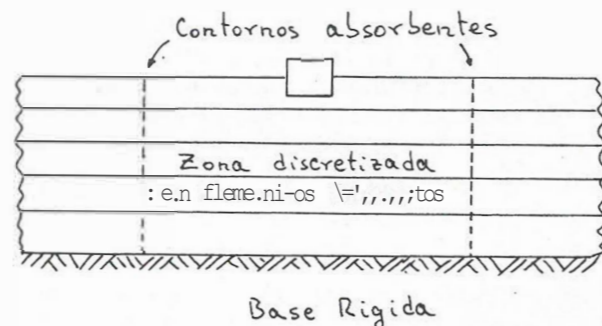


Fig. 1: Modelo empleado en elementos finitos.

Hay en la bibliografía de los últimos años, un cierto número de soluciones exactas a problemas de difracción de ondas por inclusiones o cavidades y a problemas de respuesta de cimentaciones ante ondas que inciden en ellas, propagándose desde el infinito. La mayor parte estudian el modelo antiplano para ondas SH suponiendo un medio elástico homogéneo [10, 12]. También se ha empleado para este tipo de problemas, particularmente para el estudio de difracción de ondas por valles y depósitos de suelo, un método numérico conocido como "Método de las Fuentes" [2, 13]. En todos los estudios citados, o bien se supone un suelo homogéneo para calcular la respuesta de un cimiento ante ondas incidentes, o se estudia la difracción de ondas debi-

da a una inclusión o cavidad en un medio homogéneo.

En el trabajo presente, se analiza la respuesta de una cimentación que descansa sobre un depósito de suelo que se halla sobre un medio viscoelástico. De esta forma, puede estudiarse la influencia de la forma del depósito de suelo y de la rigidez de la base, sobre la respuesta de cimentaciones ante ondas incidentes. El modelo es bidimensional y el depósito de suelo es semi-elíptico o en forma de estrato horizontal (Fig. 2). Se suponen ondas SV que llegan desde zonas profundas con ángulos de incidencia diversos. Para tener en cuenta el efecto del perfil del depósito de suelo, y cada excitación sísmica, se supondrán semielipses con relación de diámetros que van desde la unidad (sección circular) hasta infinito (estrato horizontal). Para cada geometría, la rigidez del material de

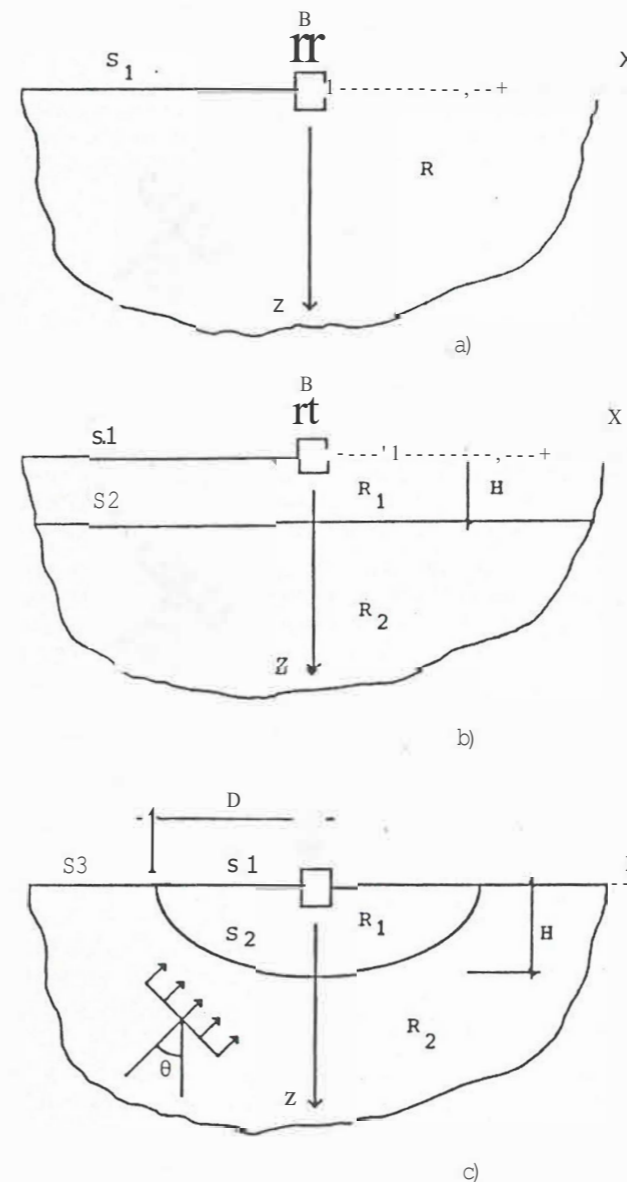


Fig. 2: Tipos de problemáticas analizadas.

la base tomará valores que van desde el mismo del depósito de suelo (con lo cual el medio sería un semiespacio homogéneo), hasta infinito (base rocosa rígida).

Los modelos anteriormente indicados son analizados haciendo uso de la formulación dinámica en el dominio de la frecuencia del Método de los Elementos de Contorno, planteada sobre las distintas zonas homogéneas que conforman el medio. Los elementos empleados son de tipo constante.

2. TRATAMIENTO NUMÉRICO

El uso de los Elementos de Contorno (MOC) resulta muy apropiado para problemas de interacción suelo-estructura, por su capacidad de representar fácilmente dominios que se extienden hasta el infinito. La formulación dinámica del MOC fue presentada por Cruse y Rizzo [2] en 1968. Desde entonces se ha empleado en numerosas aplicaciones utilizando la transformada de Laplace, la transformada de Fourier o la formulación en el dominio del tiempo [a]. El uso del MOC en el campo de la interacción suelo-estructura ha recibido gran importancia tanto en el dominio de la frecuencia [1, 3, 4] como en el dominio del tiempo [6, 9].

En el presente trabajo se emplea la formulación dinámica en el dominio de la frecuencia para analizar la respuesta ante ondas de tipo SV y P de cimentaciones ubicadas sobre suelos que pueden ser representados por alguno de los modelos de la Fig. 2. En ella R1 y R2 son regiones homogéneas de propiedades viscoelásticas.

Los problemas de difracción de ondas en medios infinitos o semi-infinitos se formulan normalmente descomponiendo tensiones y movimientos en dos partes: una, el campo de movimientos y tensiones no perturbado (u^(f), σ^(f)) y otra, el campo difractado (u^(s), σ^(s)); es decir, las difracciones que sobre el primero produce la presencia de discontinuidades en el medio distintas de la superficie libre horizontal. Para el caso de los modelos de las Figs. 2b y 2c, el campo no perturbado sólo será, restado del total en la zona R2, de modo que:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad u &= u^{(f)} + u^{(s)} \quad \downarrow \times E R2 \\
 \sigma &= \sigma^{(f)} + \sigma^{(s)} \quad \downarrow \cdot \\
 (2) \quad u &= u^{(s)} \quad \downarrow \\
 \sigma &= \sigma^{(s)} \quad \downarrow \quad 6 R1
 \end{aligned}$$

Se presenta en primer lugar la formulación para el modelo de la Fig. 2c. En él, haciendo uso de la representación integral del campo difractado sobre R2, se tiene para puntos de los contornos s2 ó s3:

$$c_{1i}^k(y) u_{1i}^{(s)}(y) = \int_{S2} [(:i) t_{1i}^{(s)}(x) - (:l) u_{1i}^{(s)}(x)] ds(x) + \int_{S3} [U_{1i}^k(x;y) t_{1i}^{(s)}(x) - T_{1i}^k(x;y) u_{1i}^{(s)}(x)] ds(x) \quad (3)$$

donde y representa puntos del contorno; $u_{1i}(y)$ y $t_{1i}(y)$ son las componentes del desplazamiento y tracción en los puntos y ; $(:i)$ y $(:l)$ representan las componentes del desplazamiento y tracción en y cuando una carga armónica unidad es aplicada en y según la dirección k , c_{1i} es un coeficiente que depende de la geometría del contorno en y ($c_{1i}^k = 0.5$ ó 1 , si el contorno es suave).

la ecuación (3) puede escribirse como

$$c_{1i}^k(y) u_{1i}^{(s)}(y) = I_{S2}^{(s)} + I_{S3}^{(s)} \quad (4)$$

Análogamente, el desplazamiento en puntos de $s1$ ó $s2$ como parte de $R1$ puede escribirse como

$$c_{1i}^k(y) u_{1i}^{(s)}(y) = J_{S1} + J_{S2} \quad (5)$$

donde J representa integrales con el mismo núcleo que I pero referidas a $R1$. Además en este caso $u^{(s)}(y) = u(y) / s(y) = u'(y)$.

Para poder establecer con facilidad las condiciones de equilibrio y compatibilidad a lo largo de $s2$ la ecuación (4) puede escribirse de nuevo como

$$c_{1i}^k(y) [u_{1i}(y) - u_1^{(f)}(y)] = I_{S2}^{(f)} - I_{S2}^{(s)} + I_{S3}^{(f)} - I_{S3}^{(s)} \quad (6)$$

donde $u_1^{(f)}$, $t_1^{(f)}$ e $I_{S2}^{(f)}$ son conocidos. $I_{S3}^{(s)}$ por parte es:

$$I_{S3}^{(s)} = I_{S3}^{(f)} - I_{S3}^{(s)} = \int_{S3} [u_{1i} - u_1^{(f)}] ds \quad (7)$$

Debe notarse que el contorno $s3$, sobre el que se realiza la integral de la ecuación (7), se extiende hasta el infinito. Sin embargo, cuando la distancia del punto de integración a la región $R1$ aumenta, el movimiento total tiende a hacerse igual al irruperturbado $u_{1i} - u_1^{(f)} > 0$. Este hecho, además de las condiciones de regularidad de u , hace que las partes de $s3$ alejada

de $R1$ tengan poca influencia sobre la ecuación (6) cuando es escrita para puntos próximos a la cimentación. De acuerdo con estas características de las integrales, la discretización del contorno $s3$ se extenderá únicamente a una distancia moderada del depósito semi-elíptico del suelo.

El problema del cálculo del movimiento de la cimentación de la Fig. 2c ante un tren de ondas quedará resuelto, una vez discretizados los contornos $s1$, $s2$ y $s3$, mediante el uso de las ecuaciones (5) y (6), de las condiciones de equilibrio y compatibilidad a lo largo de $s2$, y de las condiciones de contorno a lo largo de $s1$ y $s3$, parte de las cuales han sido tenidas en cuenta al establecer la forma de I_{S3} indicado en (7). Sobre la forma de establecer las condiciones de contorno se hablará más adelante.

Cuando el perfil del suelo corresponde al estrato horizontal de la Fig. 3b, la formulación es análoga al caso anterior. Para los puntos de $R2$ en el contorno $s2$ puede escribirse:

$$c_{1i}^k(y) [u_{1i}(y) - u_1^{(f)}(y)] = I_{S2}^{(f)} - I_{S2}^{(s)} \quad (8)$$

y para los puntos de $s1$ ó $s2$ como parte de $R1$

$$c_{1i}^k(y) u_{1i}(y) = J_{S2} + J_{S1} \quad (9)$$

Todo es igual que en el caso previo con la única diferencia que las integrales a lo largo de $s1$ y $s2$ deben ser también truncadas y desprecias

en ellas la contribución de las partes más alejadas del cimiento sobre los puntos próximos a éste, de acuerdo con las condiciones de regularidad y radiación.

En el caso de un semiespacio homogéneo como el de la Fig. 2a, únicamente habrá que establecer ecuaciones del tipo

$$c_{1i}^k(y) [u_{1i}(y) - u_1^{(f)}(y)] = I_{S2}^{(f)} - I_{S1}^{(f)} \quad (10)$$

para los puntos a lo largo de $s1$.

Una vez establecido el sistema de ecuaciones, el movimiento de la cimentación se obtiene aplicando las condiciones de contorno según los dos pasos siguientes.

1. Para unos valores conocidos de $u^{(f)}$ y $t^{(f)}$, correspondientes a un tren de ondas, se prescriben condiciones de tracción nula en la superficie libre del suelo y desplazamiento nulo debajo del cimiento. Así, se calculan las tracciones debajo del cimiento y su resultante R según las tres componentes como sólido rígido.

2. El movimiento de sólido rígido del cimiento ($u^{(r)}$) es obtenido resolviendo el sistema $K u^{(r)} =$

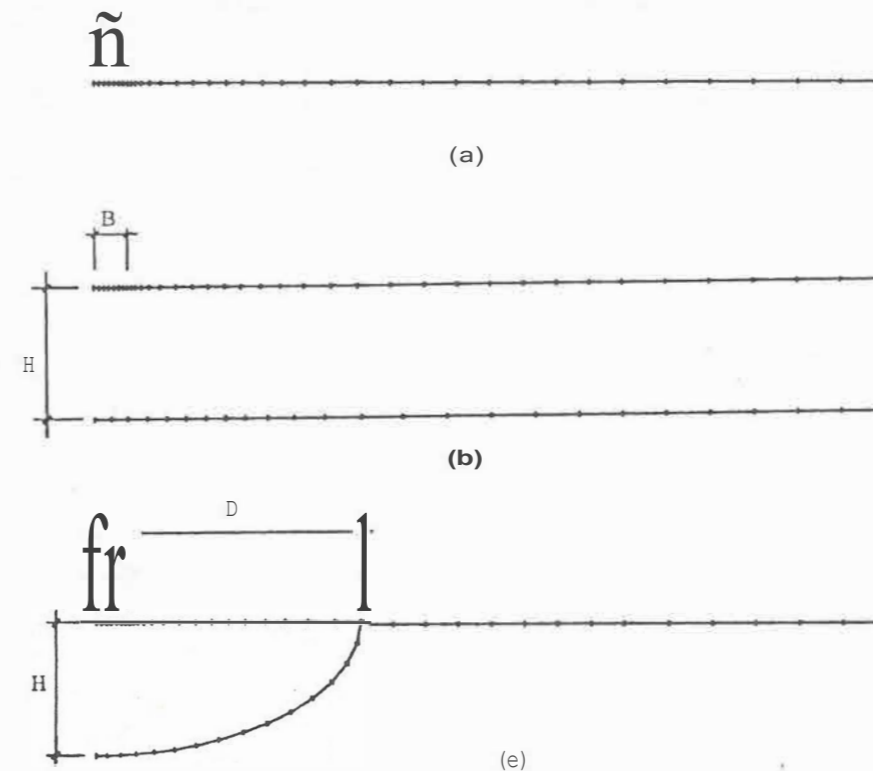


Fig. 3: Discretizaciones mediante elementos de contorno empleadas.

= $-R$, donde K es la matriz de rigidez del cimiento. Esta matriz de rigidez, se obtiene simultáneamente con el paso 1 resolviendo el mismo problema pero con condiciones de movimiento de sólido rígido en la parte del contorno debajo del cimiento. Se prescriben sucesivamente no movimientos unidad según los tres grados de libertad del cimiento rígido. Sólo se necesita un pequeño esfuerzo extra, ya que únicamente se trata de resolver simultáneamente el mismo sistema con condiciones de contorno de movimiento nulo y de movimientos unidad según los tres grados de libertad del cimiento supuestamente rígido.

3. SUELO HOMOGÉNEO DE MATERIAL VISCOELÁSTICO

Se analiza en primer lugar el caso de una cimentación superficial sobre un suelo viscoelástico homogéneo. En la Fig. 3.a se representa la discretización de elementos de contorno empleada que consta de 36 elementos constantes. La excitación consistirá en una onda P incidente y las correspondientes SV y P reflejadas. Se obtienen resultados para frecuencias adimensionales $\omega_0 = \omega B/c_s$ comprendidas entre 0 y 2.5

(ω = frecuencia angular, B = semiancho del cimiento y c_s = velocidad de propagación de las ondas S). Se supone un módulo de Poisson $\nu = 0.4$ y un amortiguamiento viscoso de un 5%. Los desplazamientos del cimiento serán referidos al desplazamiento en el origen del campo no perturbado.

La Fig. 4 muestra los nodulos del desplazamiento horizontal, vertical y de giro para ondas incidentes de tipo P con varios fulguros de llegada de las ondas. Como puede apreciarse, los desplazamientos horizontales y verticales disminuyen su amplitud de forma semejante según aumenta la frecuencia (Figs. 4a y 4b). Asimismo, se aprecia una reducción de la amplitud de los desplazamientos del cimiento cuando el fulguro de incidencia θ se separa de la vertical. Este hecho es congruente con los anteriores, ya que un aumento de θ implica un aumento de la frecuencia aparente de las ondas proyectadas sobre la superficie libre del suelo. El movimiento de giro (Fig. 4c), presenta un crecimiento con la frecuencia en toda la gama presentada. Cabe esperar que se alcanzará un máximo cuando la longitud de las ondas del campo imperturbado alcancen un valor doble del ancho del cimiento. El estudio de la respuesta entre ondas de tipo SV , puede realizarse de igual manera, empleando la misma discretización y modificando únicamente las condiciones prescritas para el campo imperturbado.

3. ESIRATO HORIZONTAL DE SUELO SOBRE BASE DEFORMABLE

Para analizar el efecto de la existencia de una base deformable sobre la respuesta de cimentaciones ante ondas incidentes, se estudia el modelo de la Fig. 2b empleando la discretización mediante elementos de contorno de tipo

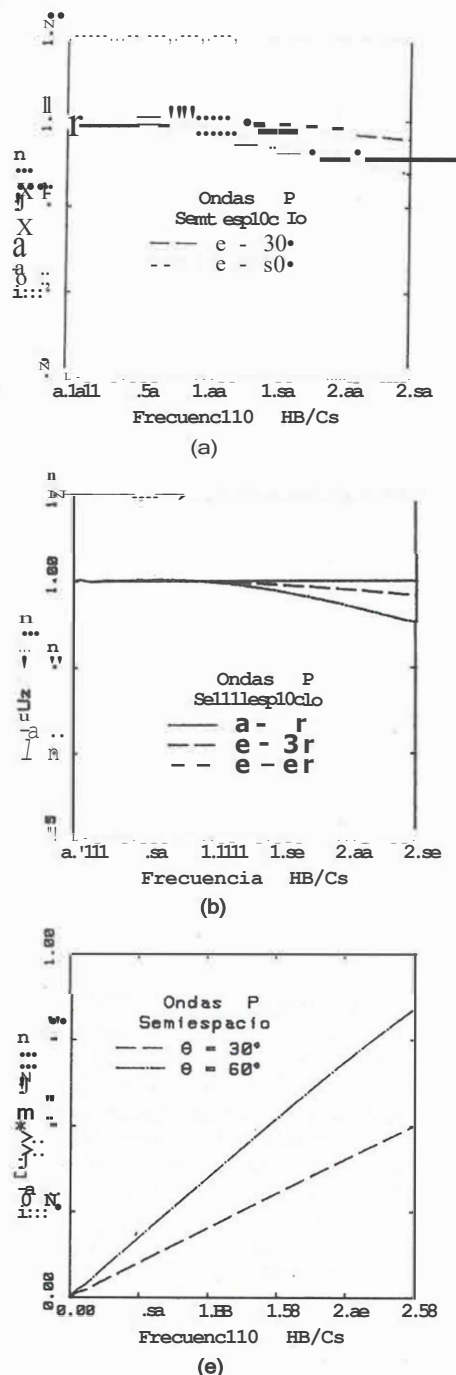


Fig. 4: Amplitudes de desplazamientos de cimentaciones en el semi.espacio viscoelastico.

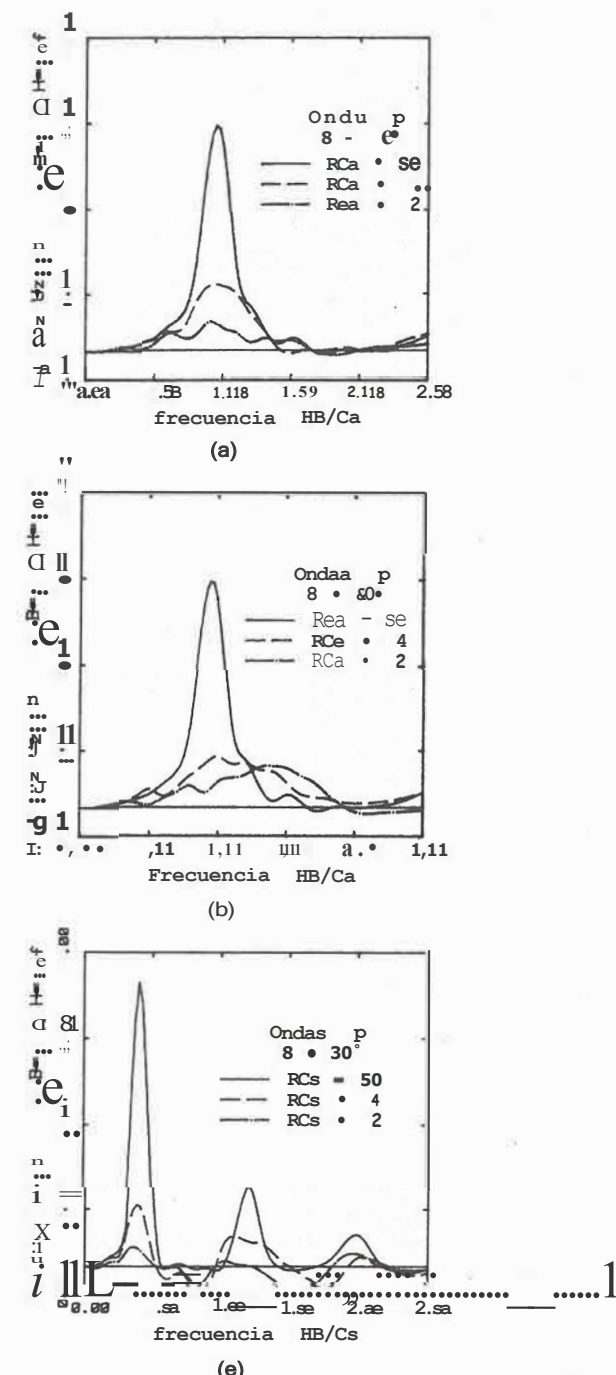


Fig. 5: Amplitudes de desplazamientos de cimentaciones en estrato horizontal sobre base viscoelastica.

(H/B = 4). La excitación será la de un tren de ondas P con ángulo de incidencia que tana sucesivamente valores de 0°, 30° y 60° respecto a la vertical. Los valores del campo irrperturbado corresponden a un serniplano harogeneo que se ob tendría suponiendo que el estrato de suelo ue también las propiedades de la base visco-elástica. El desplazamiento imperturbado en el origen de coordenadas será tarado caro referencia para medir los desplazamientos de la cimentación.

En la Fig. 5 se muestran los desplazamientos

verticales y horizontales de una cimentación superficial cuando trenes de ondas P inciden sobre el nódulo. En todos los casos, se representan los rovimientos para tres grados distintos de rigidez de la zona inferior del modelo (RCS = es /Cs con valores de 2, 4 y 50). En la

Fig. 5a se representan los rovimientos verticales para una onda incidente también vertical. En ella, para RCS = 50 aparece un pico situado en un valor de ω_0 que coincide con la primera frecuencia de resonancia del estrato que puede predecirse con la teoría rronodimensional ($\alpha_1 = 0.96$). A medida que la base del rrodelo se hace más flexible, la amplitud de los desplazamientos, en la zona próxima a la frecuencia indicada, va decreciendo. Cuando el ángulo de incidencia de las ondas se establece en $\theta = 60^\circ$ (Fig. 5b), la respuesta de la cimentación para RCS = 50 coincide prácticamente con la del caso $\theta = 0^\circ$, lo cual es fácilmente explicable ya que las ondas refractadas en el estrato para una relación de rigideces tal alta, serán prácticamente verticales. Para valores menores de la relación RCS , el máxirro de las curvas se ve desplazado, lo cual hace que para ciertos valores de la frecuencia, y con ángulos de incidencia bastante alejados de la vertical, los desplazamientos del cimientto para base flexible sean mayores que para base rígida. En la figura 5c se presentan las arrplitudes de los desplazamientos horizontales con ondas P incidiendo en el modelo con un ángulo de 30°. En esta figura se aprecia que para $RCS = 50$ se presentan unos picos de resonancia, que coinciden con las frecuencias naturales del estrato predichas por la teoría rronodimensional para el caso de ondas SV. Este hecho es totalmente explicable ya que con RCS muy grande, se producirá una onda SV refractada en el estrato que se propaga prácticamente en dirección vertical y que es la causante del rovimiento horizontal del cimientto. En la Fig. 5c se se aprecia además como la respuesta del cimientto se va haciendo más pequeña según aumenta la flexibilidad de la base; esto es, según decrece RCS .

4. DEPOSITO DE SUELO DE GIDMETRIA SEMIELIPTICA SOBRE BASE DEFORMABLE

Para analizar el efecto de la topografía subterránea en la respuesta de cimentaciones superficiales ante un tren de ondas incidentes, se ha supuesto un depósito sernielíptico de suelo (Fig. 2c) de anchura variable, que está incluido en una base cuya rigidez será también un parámetro que tonará distintos valores. La profundidad del depósito de suelo en su punto máxirro es del doble del ancho del cimientto. Las propiedades del depósito de suelo y de la base serán las mismas del problara del estrato antes estudiado. La excitación está constituida por ondas P ó SV; en ambos casos propagandose en dirección vertical. La relación D/H entre los serniejes de la elipse tona los valores de ∞ (estrato horizontal), 4, 2 y 1. La rigidez relativa de la base tana de nuevo los valores RCS = 50, 4 y 2 sucesivamente. La arrplitud de referencia es también en este caso la del desplazamiento del

origen de coordenadas supuesto que el depósito de suelo tuviera las mismas propiedades de la base sobre la que se asialta. En la Fig. 3c se puede ver la discretización empleada para el caso en que D/H = 2, la cual consta de 51 elementos. En los demás casos se ha utilizado discretizaciones con un refinamiento de la nalla similar.

En la Fig. 6 se representa el desplazamiento vertical de la cimentación producido por ondas P que inciden en dirección vertical. Cuando

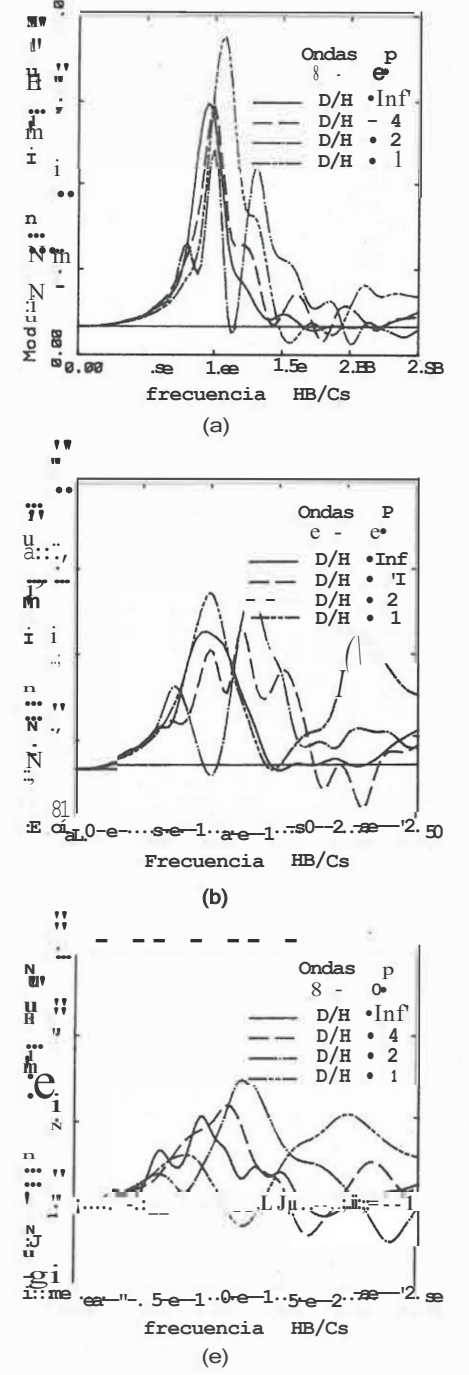


Fig. 6: Amplitudes de desplazamientos verticales de cimentaciones en deposito de suelo sernielíptico sobre base viscoelastica.

la base es muy rígida (Fig. 6a), todos los anchos de depósito (D/H) muestran un comportamiento semejante hasta la frecuencia crítica correspondiente al estrato recto de igual profundidad. Se aprecia igualmente en la Fig. 6a que el mayor de los picos se produce para el valle más estrecho, esto es $D/H = 1$. Las Figs. 6b y 6c muestran la respuesta para los casos de base deformable ($\rho_s = 4$ y $\rho_s = 2$). En ambos casos se aprecia para un rango amplio de frecuencias, un aumento de la respuesta según el depósito de suelo se hace más estrecho. Comparando las tres

partes de la Fig. 6, puede apreciarse que a medida que la base se hace más flexible, disminuye el desplazamiento del cimiento.

Por último, se presenta en la Fig. 7 el desplazamiento horizontal del cimiento para ondas SV propagándose verticalmente. Para todas las rigideces de la base, $\rho_s = 50, 4$ y 2 , se aprecia un desplazamiento del primer pico de resonancia según se va estrechando el depósito de suelo. Desde el primer pico, el comportamiento está muy condicionado por el ancho del depósito, aunque no se aprecia una ley de variación clara. Comparando las Figs. 7a, 7b y 7c se aprecia una notable reducción de la respuesta según se toman valores más bajos (nótese las escalas de las figuras).

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran, en primer lugar, una posibilidad de aplicación de la formulación dinámica en el dominio de la frecuencia del Método de los Elementos de Contorno. Por otra parte, se puede decir que la deformabilidad de la base del modelo y la topografía subterránea afectan de manera apreciable a la respuesta de cimentaciones ante ondas incidentes. Estos factores no pueden ser tenidos en cuenta en los modelos de elementos finitos. Por último, debe indicarse que para la mayor parte de las situaciones, la mayor deformabilidad de la base representa una disminución en la amplitud de los desplazamientos; sin embargo, el efecto del ángulo de incidencia se ve incrementado según se hace la base más flexible.

6. REFERENCIAS

1. Abascal R. "Estudio de Problemas Dinámicos en Interacción Suelo Estructura por el Método de los Elementos de Contorno". Tesis. E. T.S.I.I., Sevilla, Abril, 1984.
2. Cruse T.A. y Rizzo F.J. "A Direct Formulation of the General Transient Elastic Dynamic Problem I". International Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol. 22, 1968, pp. 244-259.
3. Domínguez J. "Response of Embedded Foundations to Travelling Waves". Research Report R78-24, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, Agosto 1978.
4. Domínguez J., Alarcón E. y Abascal R. "The Boundary Element Method in Elastodynamics". 10th IMACS World Congress, Montreal, Canadá, 1982.
5. Dravinski M. "Scattering of SH Waves by Surface Topography". J. of the Engineering Mech. Div. ASCE., Vol. 108, No. EM1, Feb, 1982, pp. 1-7.
6. Karabalis D.L. y Beskos D.E. "Dynamic Response of 3-D Rigid Surface Foundations by Time Main Boundary Element Method". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 12, No. 1, 1984, pp. 73-94.

7. Kausel E. "Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media", Research Report R74-11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1974.

8. Manolis G.D. "A Comparative Study of three Boundary Element Method Approaches to Problems in Elastodynamics". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, 1983, pp. 73-91.

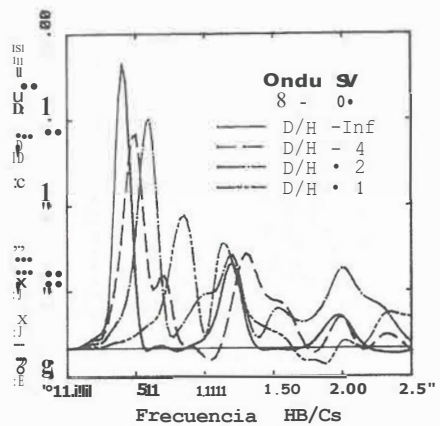
9. Spyrakos E.E. "Dynamic Response of Two-Dimensional Foundations". Tesis presentada en Univ. of Minnesota, Minneapolis, 1984.

10. Trifunac M.D. "Scattering of Plane SH Waves by a Semicircular Canyon", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, 1973, pp. 267-281.

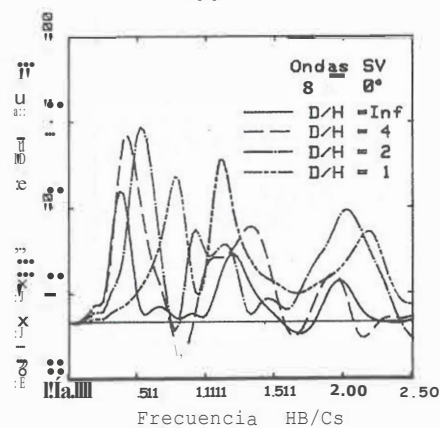
11. Wass G. "Linear Two-Dimensional Analysis of Soil Dynamics Problems in Semi-Infinite Layered Media", Tesis presentada en Univ. of California, Berkeley, 1972.

12. Wong H.L. y Trifunac M.D. "Scattering of Plane SH Waves by a Semi-Elliptical Canyon", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, 1974, pp. 157-169.

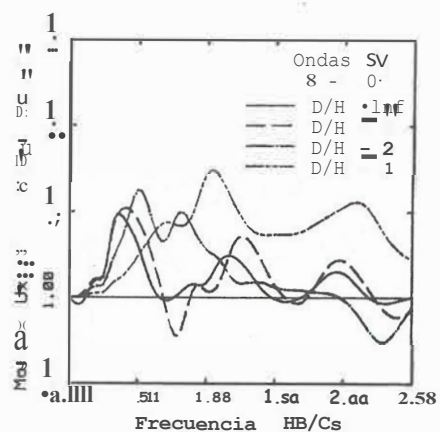
13. Wong H.L. "Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by Surface Topographies". Report No. 79-05, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, Calif., 1979.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7: Amplitudes de desplazamientos horizontales de cimentaciones en depósito de suelo semi-elíptico sobre base viscoelástica.