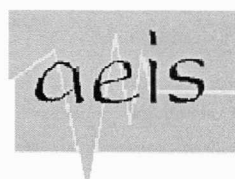


**CONGRESO
IBEROAMERICANO
DE INGENIERÍA
SÍSMICA**

Organizan:



Asociación Iberoamericana de Ingeniería
Sísmica



Asociación Española de Ingeniería
Sísmica

Colaboran:



Dirección General de
Protección Civil
Ministerio del Interior
(España)



Asociación Iberoamericana
de Organismos
Gubernamentales de Defensa
y Protección Civil



Colegio de Ingenieros de
Caminos Canales y Puertos
(España)

PRESENTACIÓN

Este Volumen contiene el centenar largo de ponencias informatizadas del II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, desarrollado en Madrid en Octubre de 2001, con el auspicio de la Asociación Iberoamericana de Ingeniería Sísmica (AIBIS) y la Asociación Española de Ingeniería Sísmica (aeis). Con la celebración de este evento se consolida definitivamente en el ámbito técnico intercontinental la AIBIS, cuyo compromiso de creación fue firmado en el transcurso de la X Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, que tuvo lugar en Madrid en julio de 1.992. En los casi diez años transcurridos desde entonces, la determinación personal y el entusiasmo de un nutrido grupo de investigadores de uno y otro lado del Atlántico han permitido que esta nueva Asociación haya alcanzado en la escena internacional el puesto que le corresponde, por historia y por derecho propio.

Baste mencionar que, en menos de una década, la AIBIS ha realizado ya dos Congresos Iberoamericanos (La Serena, 1997, y Madrid, 2001) y ha organizado institucionalmente la Sesión Especial sobre "Peligrosidad Sísmica de Países Latinoamericanos", encuadrada en la XI Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica (Acapulco, 1996).

Desde su creación la Asociación Iberoamericana ha impulsado también la continuidad de los tradicionales Seminarios Regionales Latinoamericanos, colaborando en la celebración de tres encuentros de este tipo en los últimos años, a saber: Mérida (Venezuela, 1993), Santo Domingo (Rep. Dominicana, 1996) y San José (Costa Rica, 1998). Si a ello unimos que la Asociación ha adquirido ya carta de naturaleza jurídica, al elaborar y registrar oficialmente sus Estatutos, y ha actuado como catalizador en la creación de nuevas Sociedades de Ingeniería Sísmica en Iberoamérica, no podemos menos que concluir que las metas diseñadas en 1992 en Madrid se han alcanzado plenamente. Y todo eso evidencia que la AIBIS constituye, hoy por hoy, una vigorosa y fecunda realidad. Una prueba más de ello son las Memorias de este Congreso, que nos complacemos en presentar aquí a la comunidad científico-técnica en general y a los profesionales iberoamericanos de la Ingeniería Sísmica en particular.

POR EL COMITÉ ORGANIZADOR:

Rafael Blázquez
Presidente de AEIS
Presidente Fundador de
AIBIS

María Hausen
Coordinadora 2º CISS

Antonio Jiménez
Vicepresidente de AEIS



SISMOTECTÓNICA

PELIGROSIDAD Y RIESGO SÍSMICO

DISEÑO ANTISÍSMICO

NORMATIVA

DINÁMICA ESTRUCTURAL

PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CIVIL

VULNERABILIDAD

DINÁMICA DE SUELOS

REPARACIÓN Y REHABILITACIÓN ESTRUCTURAS

INSTRUMENTACIÓN / ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS

ENSAYOS EXPERIMENTALES

CONTROL Y AISLAMIENTO SÍSMICO

LÍNEAS VITALES

DISEÑO ANTISÍSMICO

RICARDO O. FOSCHI

Evaluación de confiabilidad y diseño en Ingeniería Sísmica

011.0.pfd

AMADEO BENAVENT-CLIMENT, FRANCISCO LÓPEZ-ALMANSA, L. G. PUJADES, L.M. BOZZO

Capacidad límite última de disipación de energía de estructuras porticadas de hormigón armado proyectadas en España

013.1.pfd

AMADEO BENAVENT-CLIMENT, FRANCISCO LÓPEZ-ALMANSA, L. G. PUJADES, L.M. BOZZO

Propuesta de espectros de input de energía para el proyecto sismorresistente de estructuras en zonas de sismicidad moderada

013.2.pfd

JOSÉ DE JESÚS ALVAREZ, SERGIO M. ALCOCER, JOAQUÍN CONTRERAS

Comportamiento analítico no lineal de muros de mampostería con aberturas sujetos a fuerzas laterales

016.1.pfd

ORLANDO MAESO, JUAN JOSÉ AZNÁREZ, JOSÉ DOMÍNGUEZ

Influencia de la distribución espacial de la sollicitación en la respuesta sísmica de presas bóveda

028.0.pfd

ALEJANDRO MUÑOZ, ANGEL SAN BARTOLOMÉ, CARLOS RODRÍGUEZ

Fuerzas sísmicas de diseño para edificaciones de albañilería en el Perú

039.3.pfd

ENRIQUE CASTILLA C, AIMÉ GUERRERO, NORBERTO FERNÁNDEZ

Evaluación del comportamiento de barras de acero con bajo contenido de carbono soldadas a tope y sometidas a ciclos severos de carga axial

047.0.pfd

HÉCTOR G. URREGO

Diseño sismorresistente de pórticos de edificios con elementos postensados

050.0.pfd

RAÚL BERTERO, VITELMO BERTERO

Ingeniería Sísmica basada en el desempeño de las construcciones

054.0.pfd

ROBERTO T. LEÓN, JAMES A. SWANSON, GONZALO BARLUENGA

Modelización del comportamiento sísmico de uniones atornilladas

063.0.pfd

JORGE A. AVILA, ENRIQUE ÁVALOS

Comparación del comportamiento sísmico elástico e inelástico de edificios de estructura metálica diseñados para diferentes niveles de resistencia y de deformación lateral permisible

080.0.pfd

RODRIGO DÜNNER, LEONARDO CARRIÓN, IVÁN FERNÁNDEZ-DÁVILA

Método simplificado para la determinación de respuestas sísmicas en chimeneas industriales

089.1.pfd

DARÍO LOBOS, IVÁN FERNANDEZ-DÁVILA

Respuestas originadas en edificios de un piso solicitados por excitaciones sísmicas bi-direccionales con ángulos de incidencia variables

089.2.pfd

HUMBERTO BEGLIOMINI, IVÁN FERNÁNDEZ-DÁVILA

Consideraciones generales para el diseño de estructuras resistentes a tsunamis

089.3.pfd

MAURICIO MUÑOZ, IVÁN FERNANDEZ-DÁVILA

Análisis y diseño sísmico de estanques elevados

089.4.pfd

RICARDO GARCÍA ARRIBAS, RICARDO GARCÍA GARCÍA

Las estructuras con muros portantes de fábrica como alternativa

106.0.pfd

INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA SOLICITACIÓN EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA

O. Maeso*, J. Aznárez* y J. Domínguez**

* IUSIANI, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, maeso@cicei.ulpgc.es

** Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, pepon@cica.es

RESUMEN

En este trabajo se hace uso de un modelo tridimensional de Elementos de Contorno con el que se estudia la influencia del ángulo de incidencia de las ondas viajeras en el valor de la respuesta sísmica de presas bóveda. El modelo de Elementos de Contorno utilizado permite una representación rigurosa de la interacción entre los tres medios implicados en el análisis (presa, agua y terreno) así como tener en cuenta el efecto provocado por la variación espacial de la onda excitadora. Se analiza la respuesta sísmica de la presa de Morrow Point provocada por ondas longitudinales, transversales y ondas de Rayleigh, incidentes con ángulo variable. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de los efectos de la distribución espacial de la excitación y del ángulo de incidencia de la onda sísmica.

Palabras clave: Interacción suelo-agua-estructura. Presas bóveda. Elementos de Contorno.

SUMMARY

A three dimensional Boundary Element model is applied to the study of the effects of the spatial variation of the ground motion on the dynamic response of arch dams during the event of an earthquake. A Boundary Element model which allows for the rigorous representation of the dynamic interaction between the dam, the foundation rock and the water is used. The seismic response of the Morrow Point arch dam under the effects of time harmonic longitudinal, shear and Rayleigh waves impinging the dam site from different directions is analyzed. The obtained results show the importance of the spatial distribution of the excitation and the angle of incidence of the waves.

Key words: Soil-water-structure interaction. Arch dams. Boundary elements.

Introducción

En muchos casos el tamaño de una presa puede ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de las ondas sísmicas. Como consecuencia, el campo de desplazamientos en los estribos de la presa provocado por un sismo no es uniforme, y puntos diferentes de la cimentación de una gran presa bóveda pueden verse sometidos a valores de aceleración distintos (incluso en desfase) en el mismo instante de tiempo. La importancia de este efecto depende del tamaño de la presa, de la longitud de las ondas sísmicas y de su dirección de propagación, pero en cualquier caso asumir una simplificación de la excitación sísmica que suponga un campo uniforme de desplazamientos-aceleraciones a lo largo de la interfase presa-terreno no sólo deja de representar los efectos de interacción mutua entre la presa y la base rocosa, sino que también altera la naturaleza real de la solicitación y puede llevar a conclusiones erróneas como quedará de manifiesto a lo largo de este artículo.

La figura 1 muestra el tipo de problema que se pretende resolver. Se trata de una presa bóveda que cierra un cañón de geometría completamente general. El nivel de llenado del embalse podrá asimismo ser variable. Se desea conocer la respuesta dinámica de la presa ante una excitación consistente en una onda armónica plana que incide con ángulo variable desde zonas alejadas. Se trata, por tanto, de un problema tridimensional que involucra medios de diferente naturaleza (presa de hormigón, suelo y agua) para los cuales cabe esperar un comportamiento acoplado muy distinto al que presentarían actuando independientemente. Cualquier modelo que pretenda abordar el problema habrá de tener en cuenta el efecto de interacción mutua así como la naturaleza espacial de la excitación. El modelo propuesto en este artículo tiene en cuenta ambos aspectos.

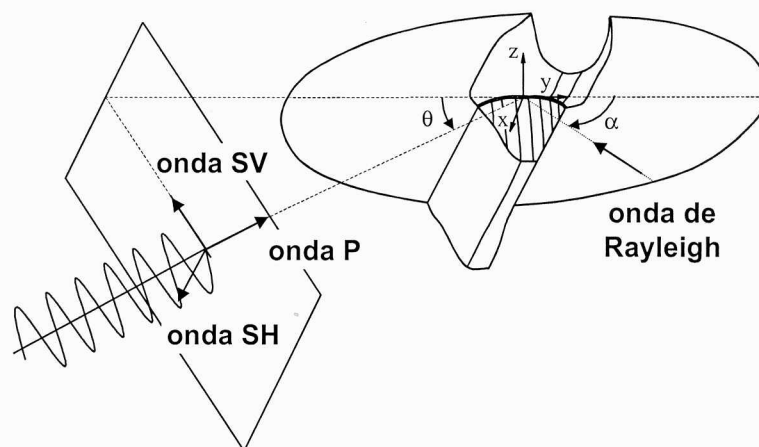


Figura 1. Descripción del problema.

El primer modelo numérico tridimensional que incluye la existencia de los tres medios, la compresibilidad del agua y la flexibilidad del suelo fue desarrollado por Fok y Chopra (1986, 1987). Es un modelo de elementos finitos que incluye el agua como un fluido compresible, la presa como lámina delgada, y el suelo como continuo elástico sin masa que se extiende hasta cierta distancia de la presa. La interacción agua-suelo se aproxima a través de un coeficiente de absorción que debe estimarse a partir de las propiedades del fondo del embalse. Las principales limitaciones de este modelo derivan de la representación del suelo como un medio elástico acotado y sin masa. Más recientemente Zhang y Chopra (1991) y Tan y Chopra (1995) han mejorado el modelo anterior de elementos finitos. En esta nueva versión la base rocosa se representa mediante una formulación bidimensional de elementos de contorno combinada con una expansión en serie a lo largo de la dirección axial del cañón.

Como alternativa, el trabajo que aquí se presenta está basado en el modelo tridimensional de Elementos de Contorno presentado por Maeso y Domínguez (1993) y Domínguez y Maeso (1993). Dicho modelo permite el estudio dinámico simultáneo de regiones sólidas viscoelásticas (presa y suelo), regiones fluidas compresibles (agua embalsada), al tiempo que tiene en cuenta los efectos de interacción entre cualesquiera dos de estos dominios en sus interfases. También contempla la naturaleza no finita del suelo que es representado como un sólido continuo tridimensional con sus verdaderas propiedades. Así, no sólo tiene en cuenta la presencia de desplazamientos diferenciales que son importantes debido al tamaño de la estructura, sino que también permite representar otros factores (topográficos, geológicos, etc) que afectan a la definición de la excitación. Más recientemente este modelo ha sido ampliado por Maeso et al. (1999) y Aznárez et al. (2001) para incluir el efecto de los sedimentos de fondo del embalse en el amortiguamiento de las

ondas hidrodinámicas, incorporando para ello una nueva región de elementos de contorno con propiedades poro elásticas.

Objetivos

En la misma línea de un trabajo reciente, Maeso et al. (2000), los autores están interesados en estudiar la influencia de la distribución espacial de la excitación sobre el comportamiento dinámico de un presa bóveda. Esta excitación se impone prescribiendo en el suelo un tren de ondas armónicas planas que atacan a la presa desde zonas alejadas con ángulo variable. Se han considerado ondas volumétricas longitudinales y transversales, y ondas superficiales de Rayleigh. Se verá que la influencia de la distribución espacial de la excitación y el ángulo de incidencia de las ondas afectan sensiblemente a los desplazamientos de la presa para los tres tipos de onda considerados.

Elementos de Contorno

El punto de partida para el análisis dinámico en el dominio de la frecuencia mediante el Método de los Elementos de Contorno (MEC) de los medios viscoelásticos presa y terreno, lo constituye la representación integral de desplazamientos y tensiones en el contorno Γ de cada uno de ellos. En notación vectorial, para cualquier punto i de Γ puede escribirse:

$$\mathbf{c}^i \mathbf{u}^i + \int_{\Gamma} \mathbf{t}^* \mathbf{u} d\Gamma = \int_{\Gamma} \mathbf{u}^* \mathbf{t} d\Gamma \quad (1)$$

donde \mathbf{u} y \mathbf{t} representan los vectores desplazamiento y tensión en el contorno, siendo \mathbf{u}^* y \mathbf{t}^* los tensores correspondientes a la solución fundamental en los mismos puntos, y \mathbf{c}^i una matriz de coeficientes conocidos que sólo depende de la geometría local en i .

La formulación del MEC para el problema escalar (región agua) es similar:

$$\mathbf{c}^i \mathbf{p}^i + \int_{\Gamma^a} \frac{\partial \mathbf{p}^*}{\partial \mathbf{n}} \mathbf{p} d\Gamma = \int_{\Gamma^a} \mathbf{p}^* \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} d\Gamma \quad (2)$$

siendo \mathbf{p} el vector de presiones hidrodinámicas, \mathbf{p}^* la solución fundamental para la misma variable, Γ^a los contornos del embalse excluyendo la superficie libre, y \mathbf{n} la normal unitaria exterior al contorno.

La discretización del contorno en elementos permite plantear numéricamente estas ecuaciones. Así la ecuación (1) se convierte en el sistema de $3N$ ecuaciones:

$$\mathbf{H}\mathbf{u} = \mathbf{G}\mathbf{t} \quad (3)$$

siendo N el número de nodos en el contorno Γ , y donde \mathbf{u} y \mathbf{t} incluyen todos los valores nodales de desplazamientos y tensiones. Análogamente la ecuación (2) se convierte en un sistema de N^a ecuaciones:

$$\mathbf{H}^a \mathbf{p} = \mathbf{G}^a \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} \quad (4)$$

siendo N^a el número de nodos en Γ^a . Las matrices \mathbf{H} , \mathbf{G} , \mathbf{H}^a y \mathbf{G}^a contienen los coeficientes de integración de la solución fundamental sobre cada elemento. La representación del comportamiento dinámico acoplado presa-suelo-embalse se obtiene a partir de las ecuaciones (3) y (4), y de las condiciones de equilibrio y compatibilidad sobre las interfaces. Detalles de este modelo pueden encontrarse en Maeso y Domínguez (1993) y Domínguez (1993).

Modelo de la excitación sísmica

Se ha considerado un campo de ondas elásticas armónicas planas en el terreno que incide desde el infinito. La presencia del sistema cañón-presa-embalse provoca una distorsión del campo de movimientos respecto del producido en zonas alejadas. Así, el campo de desplazamientos puede considerarse como la superposición de dos problemas (figura 2). El primero lo constituye el campo provocado por el tren de ondas incidente sobre el semiespacio viscoelástico uniforme (\mathbf{u}_I^s) cuya expresión analítica es perfectamente conocida (ver p.e. Eringen y Suhubi, 1975). El segundo representa el campo difractado por la presencia del sistema cañón-presa-embalse (\mathbf{u}_D^s). El campo total en el suelo será la suma de los dos ($\mathbf{u}_T^s = \mathbf{u}_I^s + \mathbf{u}_D^s$), mientras que en la presa y el embalse sólo existe campo difractado ($\mathbf{u}_T^p = \mathbf{u}_D^p$, $\mathbf{u}_T^a = \mathbf{u}_D^a$). El sistema de ecuaciones se obtiene planteando el MEC para el campo difractado en cada región. Así, considerando el suelo y la presa como medios viscoelásticos y el agua embalsada como un medio compresible no viscoso, se obtiene:

$$\text{Suelo} \quad \mathbf{H}^s \mathbf{u}_D^s = \mathbf{G}^s \mathbf{t}_D^s \quad (5.a)$$

$$\text{Presa} \quad \mathbf{H}^p \mathbf{u}_D^p = \mathbf{G}^p \mathbf{t}_D^p \quad (5.b)$$

$$\text{Agua} \quad \mathbf{H}^a \mathbf{p}_D^a = \mathbf{G}^a \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} \right)_D^a \quad (5.c)$$

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas para el campo total en cada dominio, la ecuación (5) puede escribirse como sigue:

$$\text{Suelo} \quad \mathbf{H}^s \mathbf{u}_T^s - \mathbf{G}^s \mathbf{t}_T^s = \mathbf{H}^s \mathbf{u}_I^s - \mathbf{G}^s \mathbf{t}_I^s \quad (6.a)$$

$$\text{Presa} \quad \mathbf{H}^p \mathbf{u}_T^p - \mathbf{G}^p \mathbf{t}_T^p = \mathbf{0} \quad (6.b)$$

$$\text{Agua} \quad \mathbf{H}^a \mathbf{p}_T^a - \mathbf{G}^a \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} \right)_T^a = \mathbf{0} \quad (6.c)$$

Sobre esta ecuación, ya en términos de campo total, se aplican las condiciones de contorno y las condiciones en las interfases. En la superficie libre del terreno y el paramento aguas abajo de la presa se prescribe ausencia de tensiones. En los elementos de la interfase presa-terreno se prescribe equilibrio de tensiones y continuidad de desplazamientos. En las interfases entre la región agua y las regiones sólidas se establece la ausencia de tensión tangencial en el sólido, así como la igualdad de la tensión normal y la presión hidrodinámica, siendo la condición cinemática la igualdad de desplazamientos normales a la interfase.

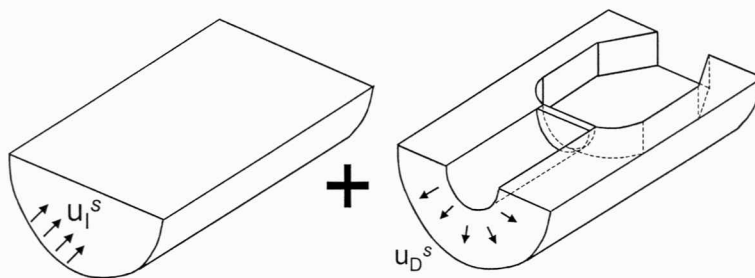


Figura 2. Modelo de la excitación sísmica.

Resultados del modelo

Para el análisis se ha elegido la presa de Morrow Point (de 142 m de altura) que ya ha sido estudiada anteriormente por diferentes autores. Datos sobre la geometría de la presa y el embalse pueden encontrarse en Hall y Chopra (1983). Las propiedades de los

materiales se ha tomado del ya citado artículo de Maeso y Domínguez (1993). La presa de hormigón y el suelo de cimentación se consideran medios viscoelásticos lineales e isotrópicos. El hormigón tiene densidad $\rho = 2481.5 \text{ Kg/m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$, módulo de elasticidad transversal $G = 11500 \text{ Mpa}$, y coeficiente de amortiguamiento interno $\beta = 0.05$. El suelo tiene una densidad $\rho = 2641.65 \text{ Kg/m}^3$, y el mismo módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y amortiguamiento interno que el hormigón. El agua está caracterizada por una velocidad de propagación de las ondas de presión de $1,438 \text{ m/s}$ y una densidad $\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$. La discretización de elementos de contorno empleada se presenta en la figura 3 (sólo se presenta la mitad al tratarse de un modelo simétrico). Se han usado elementos de contorno cuadriláteros de nueve nodos y triangulares de seis, con aproximación parabólica tanto de la geometría como de las variables en el contorno.

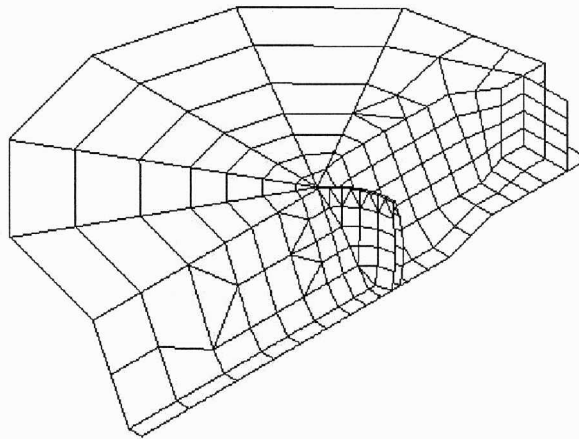


Figura 3. Discretización en elementos de contorno de la presa de Morrow Point y su entorno.

Debido al efecto de radiación, y en menor medida al amortiguamiento del suelo, el campo difractado se amortigua a cierta distancia de la presa, con lo que sólo es necesario discretizar la superficie libre del terreno hasta una cierta distancia, que en el modelo presentado es del orden de 2.5 veces la altura de la presa. Discretizaciones más extensas no representan cambios apreciables en los resultados. Asimismo, cambios en la topografía del cañón aguas abajo a distancias donde se trunca la discretización no produjeron diferencias significativas.

Para el dominio fluido se ha empleado una solución fundamental que satisface automáticamente la condición de presión nula en su superficie, por lo que no es necesario discretizarla. La geometría escogida del embalse supone que, tras una zona irregular cercana a la presa, el embalse se extiende indefinidamente aguas arriba como un canal de sección rectangular uniforme. Un nuevo contorno permite modelar los efectos de radiación de ondas hidrodinámicas imponiendo en él la relación entre la presión y su derivada longitudinal, que es conocida para un canal rectangular (Domínguez y Meise, 1991). Se ha adoptado esta geometría infinita regular para el embalse por coherencia con otros trabajos previos. Embalses no muy extensos en dirección aguas arriba pueden ser representados en su geometría real con elementos de contorno.

Los casos analizados se esquematizan en la figura 1. Se ha estudiado la influencia del ángulo θ de incidencia para ondas volumétricas (SH, P y SV) que se propagan en direcciones contenidas en el plano yz (perpendicular al eje longitudinal x del cañón). También se analiza la influencia de la distribución espacial de ondas superficiales de Rayleigh que se propagan aguas arriba o abajo formando diferentes ángulos α con el cañón. La respuesta se representa mediante la amplitud de la respuesta compleja de la

componente x del desplazamiento en puntos de la presa a cota de coronación, debidos a ondas que producirían un desplazamiento unitario en el origen de coordenadas si el suelo fuese un semiespacio uniforme. Se representa la amplificación anteroposterior del punto del plano de simetría de la presa para ondas SH, P y ondas de Rayleigh. Para ondas SV se presenta la respuesta en un punto situado en la cota de coronación a 13.25° del plano de simetría (en este caso la respuesta en el plano de simetría es nula si la incidencia de la onda SV es vertical). En todos los casos la amplificación anteroposterior se representa frente a la frecuencia adimensional. Se normaliza con la frecuencia del primer modo simétrico de la presa sobre base rígida y embalse vacío en los casos de ondas de Rayleigh, P y SH, y del primer modo antisimétrico para el caso de incidencia de onda SV.

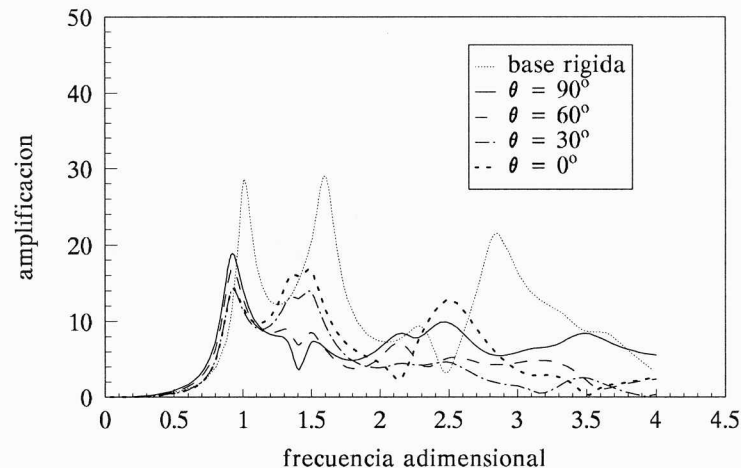


Figura 4. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda SH incidente. Embalse vacío.

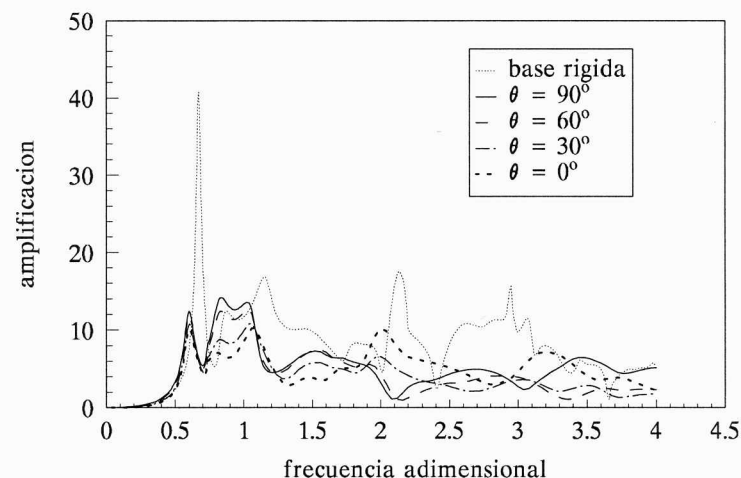


Figura 5. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda SH incidente. Embalse lleno.

La figura 4 corresponde al caso de una onda incidente SH y condiciones de embalse vacío. Se ha incluido la respuesta sobre base rígida que pone de manifiesto que la inclusión de la flexibilidad del suelo y del carácter espacial de la excitación disminuye la frecuencia fundamental del sistema, al tiempo que reduce las amplitudes máximas. El efecto de la flexibilidad de la base rocosa es doble: por un lado tiende a disminuir la respuesta debido a la interacción suelo-estructura; por otro introduce un perfil de sollicitación variable que hace que los máximos de la sollicitación no se produzcan al unísono en los puntos de la interfase

suelo-presa. Este segundo efecto cambia con el ángulo de incidencia, apreciándose diferencias de más del veinte por ciento en la respuesta para la frecuencia fundamental del sistema acoplado, y sensibles diferencias para el rango de frecuencias intermedias. La figura 5 corresponde a la situación de embalse lleno para el mismo tipo de onda incidente. La consideración de la flexibilidad del suelo implica una destacable disminución de la respuesta a la frecuencia fundamental, que en este caso está gobernada por la región fluida. Este efecto se mantiene para todos los ángulos de incidencia.

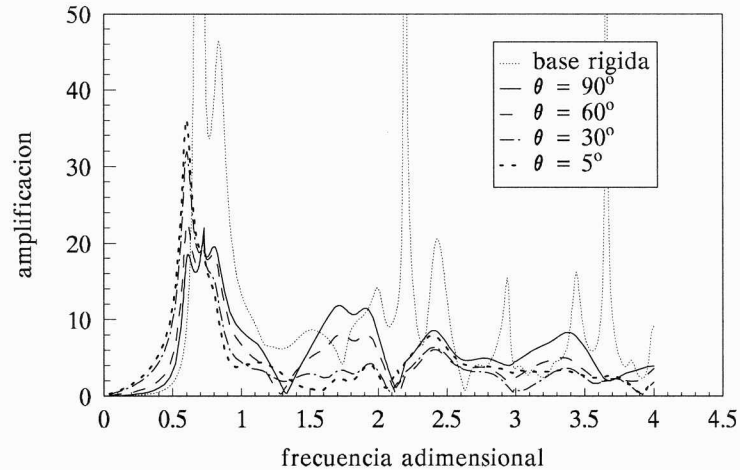


Figura 6. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda P incidente. Embalse lleno.

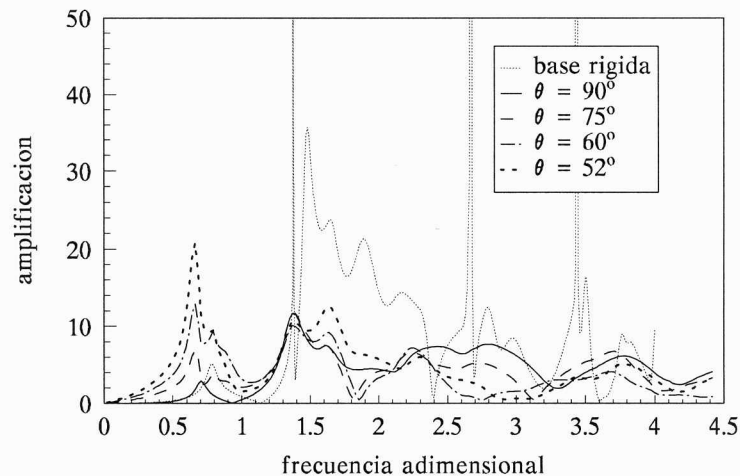


Figura 7. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda SV incidente. Embalse lleno.

La figura 6 representa la amplificación en el mismo punto cuando una onda P incide con ángulo θ variable sobre la presa, en el caso de embalse completamente lleno. La figura 7 corresponde a la amplificación en el punto fuera del plano de simetría ya comentado cuando la onda incidente es del tipo SV, para ángulos de incidencia comprendidos entre $\theta=0^\circ$ y el ángulo crítico $\theta=52^\circ$, también para embalse lleno. En ambas figuras se acompaña la solución correspondiente a base rígida (excitación uniforme) para un ángulo $\theta=90^\circ$. Es obvio comentar que la solución del semiespacio de campo libre es una combinación de ondas P y SV en ambos casos, excepto cuando la incidencia es vertical. Se aprecia en ambas figuras el importante efecto de la flexibilidad del suelo y del ángulo de incidencia de las ondas. A medida que θ disminuye, la respuesta en la frecuencia fundamental crece

significativamente y va convirtiéndose en dominante. Para el caso de ondas P incidentes esto es especialmente claro cuando $\theta < 60^\circ$, apreciándose que el segundo pico que aparece en el rango de frecuencia adimensional entre 1.5 y 2 decrece significativamente con el ángulo de incidencia θ . La respuesta a frecuencias más altas presenta menores discrepancias. En el caso de ondas SV (figura7) el efecto del ángulo de incidencia es importante en casi todo el rango de frecuencias estudiado. En este caso la contribución de los modos simétricos a la respuesta es nula para incidencia vertical, pero no para el resto de valores de θ , lo que altera ligeramente la posición del primer pico para los diferentes ángulos de incidencia.

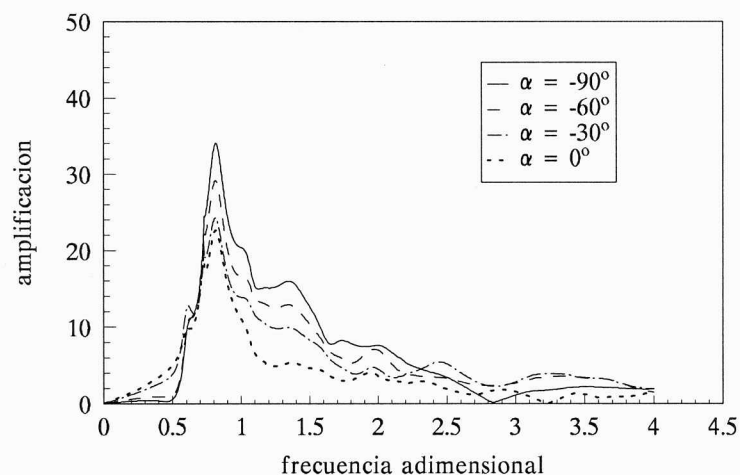


Figura 8. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda de Rayleigh incidente aguas abajo. Embalse lleno.

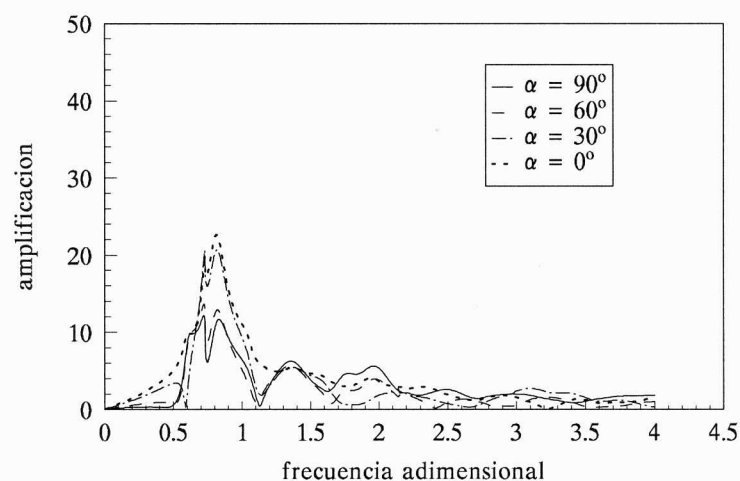


Figura 9. Respuesta en la coronación de la presa ante una onda de Rayleigh incidente aguas arriba. Embalse lleno.

El último caso estudiado corresponde a la incidencia de ondas superficiales de Rayleigh propagándose en diferentes direcciones (figura 1). Se han considerado siete valores del ángulo de incidencia de manera que valores positivos de α representan sentidos de propagación con componente aguas arriba. En las figuras 8 y 9 se presenta la función de respuesta compleja de la amplificación anteroposterior del desplazamiento en el punto medio de la presa, en su coronación. La respuesta se normaliza con el módulo del

desplazamiento máximo (desplazamiento vertical) correspondiente al origen de coordenadas en situación de campo libre. En ambas figuras se estudia el problema para la situación de embalse completamente lleno de agua. Del análisis de los resultados se concluye que la importancia del ángulo de incidencia es variable con el rango de frecuencias. Es preponderante para frecuencias cercanas a la fundamental del sistema. A medida que aumenta la frecuencia se obtienen menores amplificaciones, al tiempo que disminuye la influencia del valor de α en la respuesta. Este resultado está de acuerdo con la naturaleza de la onda de Rayleigh, que produce un campo de desplazamientos que es máximo en la superficie del semiespacio y que decrece de forma exponencial con la profundidad, más rápidamente a mayores frecuencias. Puede decirse por tanto que, para altas frecuencias, la perturbación está confinada en una estrecha capa bajo la superficie libre, por lo que puntos de los estribos de la presa estarán menos solicitados conforme aumente su profundidad, en una proporción que depende de la profundidad del cañón, del coeficiente de Poisson del terreno y de la frecuencia considerada. Se aprecia que para ondas con propagación aguas abajo ($-90^\circ < \alpha < 0^\circ$) la amplitud es muy alta cuando α tiende a -90° para una parte importante del rango de frecuencias, y de forma especial en la frecuencia fundamental. El efecto del ángulo de incidencia es menor, y en un rango más acotado de frecuencias, para ondas propagándose con $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

Conclusiones

Se ha utilizado un modelo de Elementos de Contorno desarrollado previamente por dos de los autores que permite el análisis dinámico conjunto de sistemas constituidos por regiones viscoelásticas y líquidas, de geometría cualquiera. Este modelo ha sido aplicado al estudio de la respuesta sísmica de sistemas presa-suelo-embalse, considerando el agua como un fluido compresible no viscoso, y la presa y el terreno como sólidos viscoelásticos isotrópicos con comportamiento lineal. El modelo permite definir la excitación como un tren de ondas elásticas con cualquier variación espacial prescrita, que se propagan a través del terreno e inciden sobre la presa desde zonas alejadas.

El efecto de la variación espacial de la excitación se ha estudiado considerando diferentes ondas armónicas, analizando la sensibilidad del sistema al ángulo de incidencia de ondas volumétricas tipo P, SV y SH, y ondas superficiales de Rayleigh. Los resultados permiten apreciar diferencias importantes en la respuesta del sistema para las distintas direcciones de propagación de la onda incidente. La amplificación de los desplazamientos respecto a los de campo libre es especialmente sensible al ángulo de incidencia en el entorno de las frecuencias propias del sistema, que es donde se obtienen las mayores respuestas. Puede concluirse que junto con otros factores como la compresibilidad del agua, la flexibilidad del suelo y la caracterización correcta de la geometría del embalse, la variación espacial de la excitación a lo largo de la interfase presa-base rocosa tiene un efecto muy significativo sobre el comportamiento dinámico de la presa. En este sentido el MEC se presenta como una herramienta muy adecuada pues permite incorporar de forma simple todos estos fenómenos.

Referencias:

- Aznárez, J., Maeso, O. and Domínguez, J. (2001), "A 3-D boundary element model for the dynamic análisis of arch dams with porous sediments", Proc. III Congr. Int. Resistant Engineering Structures, ERES2001, Málaga, A. Corz and C. Brebbia (Eds.), CD-ROM.

- Domínguez, J. and Meise, T. (1991), "On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains", *Engrg. Anal. with B.E.* 8(3), 132-138.
- Domínguez, J. (1993), "Boundary elements in dynamics", *Computational Mechanics Publications, Southampton and Elsevier, London.*
- Domínguez, J. and Maeso, O. (1993), "Earthquake análisis of arch dams II: Dam-water-foundation interaction", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 119(3), 513-530.
- Eringen, A.C. and Suhubi, (1975), "Elastodynamics II, linear theory", *Academic Press.*
- Fok, K. and Chopra A.K. (1986), "Earthquake analysis of arch dams including dam-water-interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility". *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 14(2), 155-184.
- Fok, K. and Chopra A.K. (1987), "Water compressibility in earthquake response of arch dams". *J. Struct. Engrg., ASCE*, 113(5), 958-975.
- Hall, J.F. and Chopra A.K. (1983), "Dynamic análisis of arch dams including hydrodynamic effects", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 19(3), 496-512.
- Maeso, O. and Domínguez, J. (1993), "Earthquake análisis of arch dams I: Dam-foundation interaction", *J. Engrg. Mech., ASCE*, 119(3), 496-512.
- Maeso, O., Aznárez, J. and Domínguez, J. (1999), "A 3-D model for the seismic análisis of concrete dams including poroelastic sediments effects", *Proc. 13th ASCE Engineering Mechanics Conference, Johns Hopkins U., N. Jones and R. Ghanem (Eds.), CD-ROM.*
- Maeso, O., Aznárez, J. and Domínguez, J. (2000), "Travelling wave effects on the seismic response of arch dams", *Proc. 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Texas at Austin, J.L. Tassoulas (Ed.), CD-ROM.*
- Tan, H. and Chopra. A.K. (1995), "Earthquake análisis of arch dams including dam-water-foundation rock interaction", *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 24, 1453-1474.
- Tan, H. and Chopra. A.K. (1995), "Dam-foundation rock interaction effects in frequency-reponse functions of arch dams", *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 24, 1475-1489.
- Zhang, L. and Chopra, A.K. (1991), "Impedance functions for three-dimensional foundation supported on an infinitely long canyon of uniform cross-section in a homogeneous half-space", *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 20(11), 1011-1027.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado con financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología Español, a través del Proyecto de Investigación PB96-1322-C03-03.