

CALIBRACIÓN DE MÉTODOS DE MODELIZACIÓN DE EFECTOS LOCALES: EUROSEISTEST (GRECIA)

S. Figueras⁽¹⁾, J. Cid⁽²⁾, X. Goula⁽¹⁾, T. Susagna⁽¹⁾, A. Roca⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Institut Cartogràfic de Catalunya*

⁽²⁾ *Direcció de Serveis de Protecció Civil. Ajuntament de Barcelona, jcid@mail.bcn.es*

RESUMEN

Con el objetivo de calibrar los distintos métodos de simulación numérica de efectos sísmicos locales se han organizado, en los últimos años y en distintos países, ejercicios de predicción del movimiento del suelo. Se presentan los resultados obtenidos en nuestra participación en un ejercicio (Benchmark) propuesto en el marco de un proyecto de la Comunidad Europea: Euroseistest-Euroseismod en el que se escogió el valle de Volvi (Salónica). Se han aplicado métodos de simulación 1D lineal y lineal-equivalente así como en algunos casos un método 2D lineal. Para el ejercicio se dispone de un modelo geológico y geotécnico de estructura del subsuelo y de los registros en roca para distintos sismos, se calcula cuál sería el movimiento en los emplazamientos en suelo aplicando distintos métodos de simulación numérica. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos con los registros realmente observados.

Palabras clave: efectos locales, simulación numérica, calibración de métodos.

ABSTRACT

With the purpose to calibrate different ground motion prediction methodologies for the site effects analysis, "blind" experiments are organised in the last years in various countries. We present the results obtained in our participation in the benchmark experiment proposed in the European Community project: Euroseistest-Euroseismod to predict the ground motion observed at the Volvi's Valley (Thessaloniki). 1D linear, 1D equivalent linear and 2D linear methods had been applied. For the exercise a geological and geotechnical structural model and records in rock site corresponding to different earthquakes were available. The ground motion in different soil sites of the valley are predicted with the application of different numerical simulation methods and the results are compared with the actual records.

Key words: site effects, numerical simulation, calibration of methodologies.

Introducción

El valle de Volvi, Salónica, Grecia, ha sido objeto de diferentes estudios pertenecientes al campo de la ingeniería sísmica. Dos proyectos europeos han configurado el marco general de estos estudios dentro del programa de la Comisión Europea *Environmental and Climate 1994-1998*, EUROSEISTEST (EV.5V-Ct.93-0281), y el actual EUROSEISMOD (ENV4-CT96-0255): *Development and Experimental Validation of Advanced Modelling Techniques in Engineering Seismology and Earthquake Engineering*, dentro del cual han sido desarrollados los procesos de simulación numérica de este estudio.

Para nuestra participación en el ejercicio se han aplicado distintos métodos de simulación numérica considerando diferentes modelos geotécnicos de estructura y como señal de entrada registros en roca correspondientes a sismos de distintas características así como también pulsos de Ricker de distinta frecuencia predominante. Los registros calculados en diferentes estaciones en suelo se han comparado con los registros reales. Se ha realizado además un estudio detallado de la variación a lo largo del valle de distintos parámetros como son la duración del registro, el valor máximo de aceleración y la amplitud y frecuencia del primer pico de amplificación de la función de transferencia.

En este trabajo presentamos, a modo de resumen, un ejemplo de aplicación de los métodos de simulación considerando distintos modelos de estructura y como señales de entrada un pulso de Ricker de frecuencia predominante 1Hz. Se presenta también la modelización del sismo de Arnaia ($M=5.3$) en un emplazamiento situado en la parte central del valle.

Presentación del ejercicio

Los objetivos globales del proyecto europeo *EUROSEISMOD* son: desarrollo y validación de códigos numéricos avanzados, o perfeccionamiento de existentes, para predecir el movimiento del suelo teniendo en cuenta efectos locales, perfeccionamiento de métodos para la respuesta sísmica estructural y localización de terremotos; aplicación de los modelos y técnicas en varias ciudades europeas seleccionadas: Salónica, Benevento, Lieja, Grenoble, Niza, Lisboa y Barcelona; y creación de una base de datos Europea de las experimentaciones realizadas en el proyecto anterior *EUROSEISTEST*, ofreciendo a los científicos europeos la oportunidad de verificar y calibrar sus herramientas numéricas y experimentales, experiencia y conocimiento.

Dentro del proyecto europeo *EUROSEISMOD*, se ha planteado un *Benchmark* entre las Instituciones participantes, entre ellas el *Servei Geològic de Catalunya* del *Institut Cartogràfic de Catalunya*. En este trabajo presentaremos algunos resultados obtenidos de nuestra participación en el *Benchmark*. La investigación comparativa consistía a grandes rasgos en la simulación numérica del movimiento del suelo en el valle de Volvi en base a diferentes métodos, modelos de estructura del suelo y señales de entrada, tal como se había realizado en investigaciones como Turkey Flat (Cramer y Real, 1992) y Ashigara Valley (Midorikawa, 1992; Kudo, 1992),

La zona de estudio se sitúa en el Valle de Volvi (Noroeste de Grecia), situada entre los lagos de Langadha y Volvi, zona epicentral del terremoto de 1978 (Chávez García et al., 1990). Aquí se han aplicado diferentes técnicas multidisciplinarias sobre un perfil de estudio longitudinal siguiendo la parte central del valle. Como resultado de los diferentes experimentos realizados en campañas anteriores geofísicas y geotécnicas, (Lgih, 1997; Auth.sf, 1997; Riepl, 1997) se define un modelo de estructura del suelo que para el ejercicio se ha simplificado proponiéndose dos modelos: detallado (Auth) y simplificado (Simp). En el perfil de estudio ha sido instalada una red de estaciones de movimiento fuerte y otra de movimiento débil con el objetivo de caracterizar las propiedades del movimiento del suelo y sus implicados efectos locales. En este trabajo hemos considerado los registros de las estaciones de movimiento fuerte, en total 9 estaciones, 7 en superficie: PRO, GRA, GRB, TST, FRM, STC y STE; y dos en profundidad, TSD12 a 17 metros y TSD16 a 72 metros. La situación de estas estaciones en la estructura Simp se puede observar en la figura 1. La estación en roca PRO (Profitis) será considerada como emplazamiento de referencia del perfil de estudio.

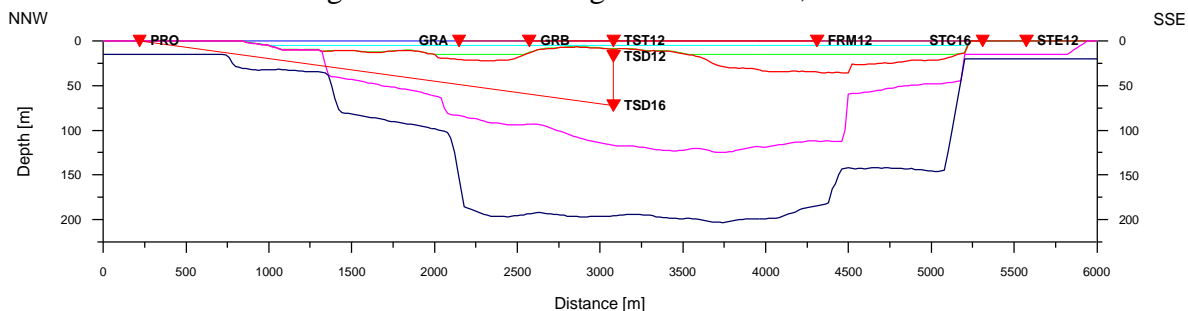


Figura 1. Situación de las estaciones de movimiento fuerte en la estructura Simp (Cid, 1998b).

Para la comparación de los resultados obtenidos por todos los participantes se proponen los siguientes cálculos:

- ♦Variación, a lo largo del valle, de la respuesta a un pulso de Ricker de frecuencia predominante de 1 Hz y $PGA=0.1g$ cada $\Delta x = 100m$.
- ♦Variación, a lo largo del valle, de la respuesta a un pulso de Ricker de frecuencia predominante de 5 Hz y $PGA=0.1g$ cada $\Delta x = 100m$.
- ♦Simulación del sismo del 25 de junio de 1994 ($M=2.5$) en las distintas estaciones, a partir del registro en Profitis.
- ♦Simulación del sismo de Arnaia, 04.05.95 ($M=5.3$) en las estaciones de movimiento fuerte, a partir del registro en Profitis.
- ♦Simulación del sismo de Kozani, 05.95 ($M=6.6$) en las estaciones de movimiento fuerte, a partir de un registro obtenido a 20 km asimilado a Profitis.
- ♦Cálculo de diferentes parámetros síntesis de los resultados obtenidos frecuentemente y temporalmente.

Simulación numérica aplicando distintos métodos

Para los diferentes cálculos solicitados se han aplicado tres métodos de simulación numérica: 1D lineal, Kennett y Kerry (1979), 1D lineal equivalente Shake'91, Idriss y Sun (1992), y 2D lineal, Aki y Larner (1970). Presentamos como ejemplo, algunos de los resultados obtenidos, un estudio completo y detallado se puede consultar en Cid (1997), Cid (1998a), Cid (1998b) y Cid et al. (1998).

En la figura 2 se comparan los resultados obtenidos en la aplicación de métodos lineales 1D y 2D considerando un modelo de estructura modificada (la estructura Simp ha sido suavizada y consideradas sus capas planas por las propias características del método Aki-Larner) y como señal de entrada un pulso de Ricker de frecuencia predominante de 1Hz con un desplazamiento máximo de 1cm en roca aflorante. Se presentan el conjunto de señales sísmicas o pulsos de Ricker calculados en superficie en 61 puntos a lo largo del perfil con $\Delta x=100m$.

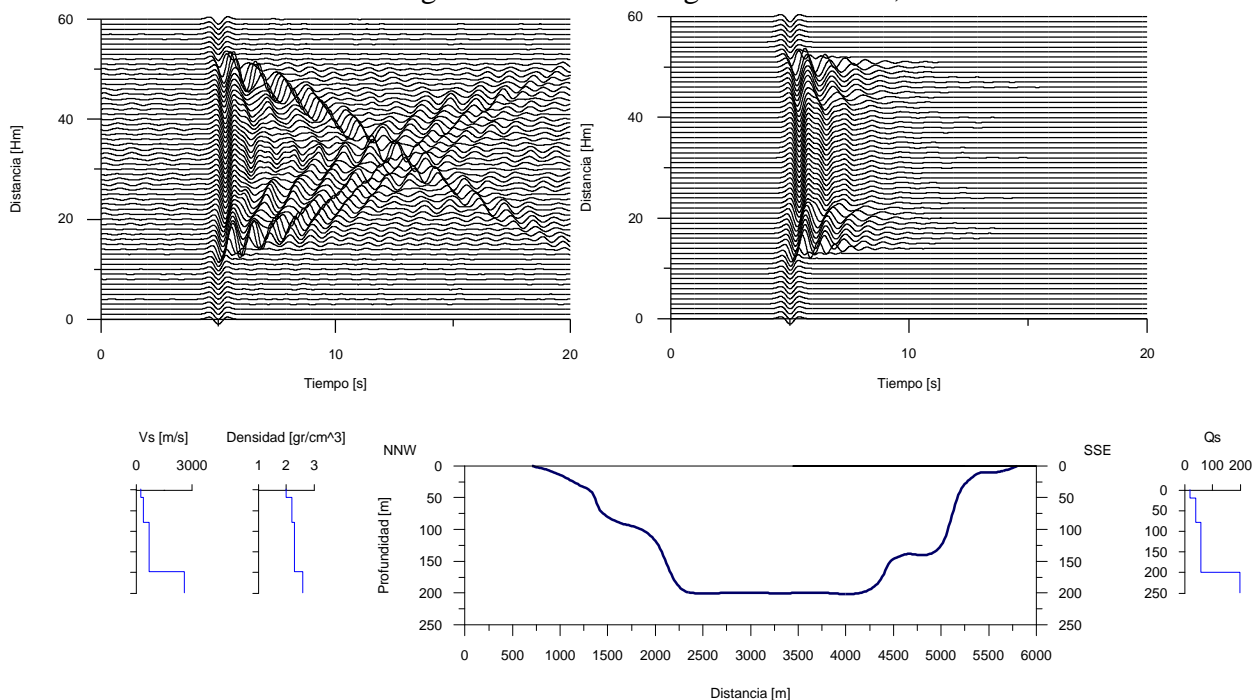


Figura 2. Representación gráfica de los 61 pulsos de Ricker simulados con los métodos Aki-Larner 2D (izquierda) y Kennett 1D (derecha) y la estructura modificada (Basado en Cid, 1998b).

Los resultados obtenidos con el método bidimensional se diferencian notablemente de los del unidimensional. La duración de las señales obtenidas con el método Aki-Larner ha sido claramente aumentada debido a la presencia de ondas difractadas, marcando las figuras propias de las interferencias entre ondas. Otra observación que se puede realizar es la posición de la máxima amplificación temporal o máximo desplazamiento en el pulso de Ricker, que la encontramos en los bordes de la estructura sedimentaria profunda debido a un mayor contraste de impedancias.

Para analizar la influencia del modelo de estructura se presenta en la figura 3 la variación a lo largo del perfil del valle de las relaciones espectrales calculadas con el método lineal 1D de Kennett para un pulso de Ricker de frecuencia predominante 1Hz considerando las estructuras detallada (Auth) y simplificada (Simp). Se destacan zonas del perfil en las que parece apreciarse que la frecuencia fundamental no es la predominante o de máxima amplificación en la función de transferencia. Comparando ambos resultados observamos cómo la geometría del basamento rocoso del valle queda reflejada por las bajas frecuencias o fundamentales de los depósitos de relleno. Para la estructura Simp observamos una línea de frecuencia fundamental mucho más escalonada, que marcan los saltos de fallas modelados en dicha estructura. Mientras que para la estructura Auth encontramos una hilera de primeras frecuencias mucho más suavizada, debido en parte a la complejidad de dicha estructura en comparación con la Simp.

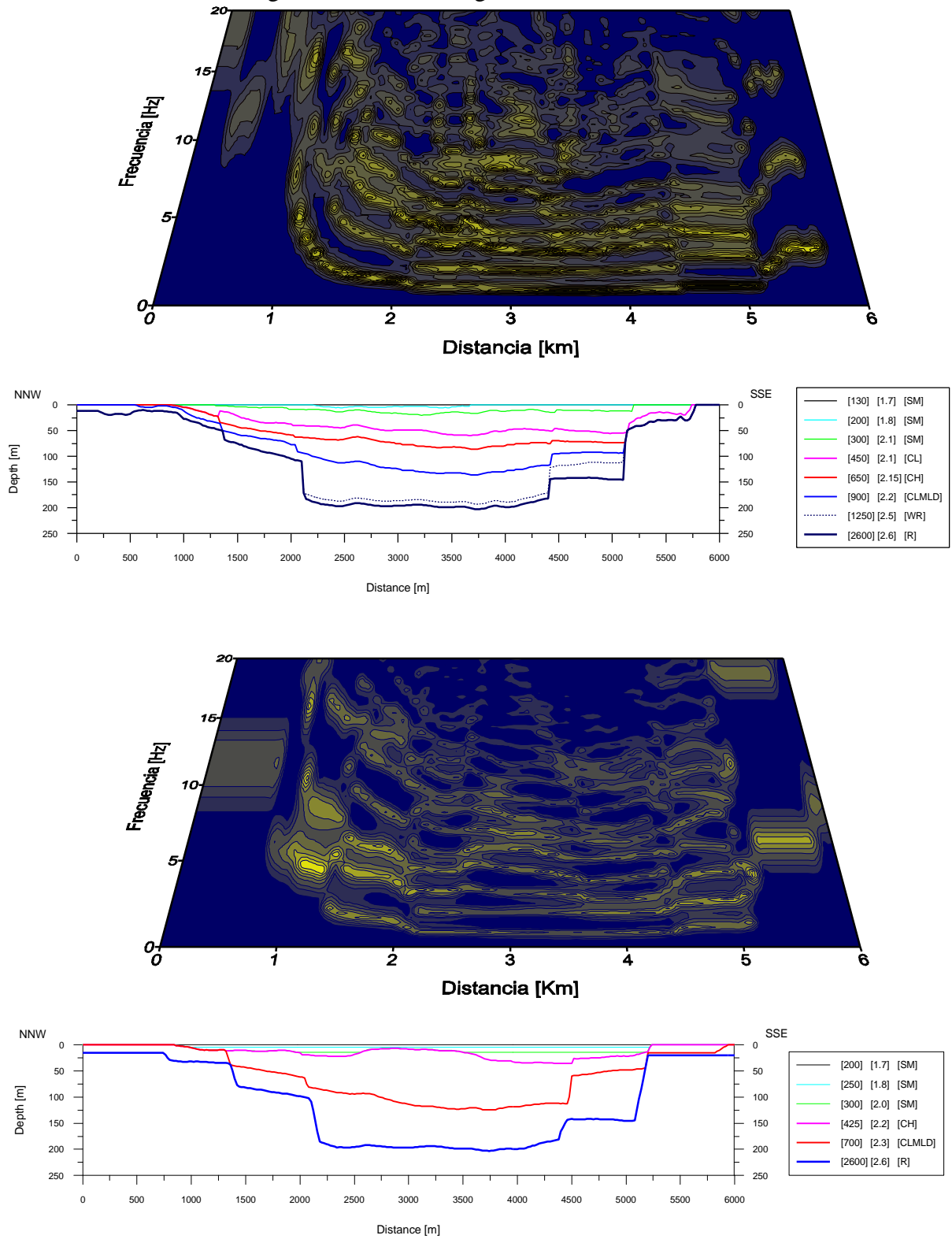


Figura 3. Relaciones espectrales calculadas a partir del método 1D, Kennett, a lo largo del perfil del valle considerando un pulso de Ricker de 1Hz. En la figura superior se ha utilizado el modelo de estructura detallado (Auth) y en la figura inferior el simplificado (Simp) (Basado en Cid, 1998b).

Modelización del sismo de Arnaia (4/5/95, M=5.3)

Uno de los sismos mejor documentados en forma de registros sísmicos, en el tiempo de permanencia de la red de estaciones sísmicas de movimientos fuertes en el valle de Volvi es el correspondiente al sismo de Arnaia.

La elección de la estación de referencia es un punto muy delicado en cualquier estudio de efectos sísmicos locales. Lo ideal es escoger una estación en roca aflorante, pero en el caso de este estudio, por diferentes características geológicas y técnicas, la estación de referencia del sistema de estudio, Profitis, no está situada en roca aflorante, por lo que tiene que ser considerado en los cálculos.

Como ejemplo de los cálculos realizados en cada estación, se presenta en la figura 4 en forma de pseudoespectros de respuesta elásticos en velocidad para un 5% de amortiguamiento el resultado de la aplicación de los métodos unidimensionales Kennett y Shake'91 en el emplazamiento TST (Test Site) situado en el centro del valle, considerando los dos modelos de estructura Auth y Simp.

El proceso seguido para los cálculos realizados con el método Shake'91 difiere del proceso del método Kennett, pero con igual objetivo final. Para los cálculos realizados con Shake'91 se ha procedido de la siguiente forma:

1. Deconvolución del registro del sismo de Arnaia en Profitis al basamento rocoso del valle (considerado aflorante), considerando la columna de suelo en Profitis definida en las estructuras Simp y Auth.
2. Introducción de la señal deconvolucionada en la base de cada una de las columnas de suelo específicas de cada estación, en nuestro ejemplo TST.
3. Cálculo del pseudoespectro de respuesta elástico en velocidad para un amortiguamiento del 5% para cada una de las estaciones, en nuestro ejemplo TST, modelos de estructura y componentes.

Para el método lineal de reflectividad de Kennett el proceso seguido ha sido el siguiente:

1. Cálculo de las funciones de transferencia en cada una de las estaciones de estudio, en nuestro ejemplo TST, cuya columna de suelo ha sido definida en las estructuras Simp y Auth.
2. División de las calculadas por la de la estación de Profitis siguiendo las estructuras de cálculo generales, obteniendo la *Relative Spectral Ratio* (RSR).
3. Convolución de las señales originales en Profitis con las respectivas RSR.
4. Cálculo del pseudoespectro de respuesta elástico en velocidad para un amortiguamiento del 5% en cada una de las estaciones, en nuestro ejemplo TST, estructuras y componentes.

De la comparación de espectros de la figura 4 podemos realizar las siguientes observaciones:

- ♦La simulación realizada en TST utilizando la estructura Auth concuerda en general con el registro real de Arnaia (referencia PGA). Las diferencias que se observan entre la utilización del modelo de estructura Auth y Simp se deben fundamentalmente a la diferente función de transferencia del emplazamiento de referencia (Profitis) en cada una de las dos estructuras, mientras que su frecuencia fundamental se sitúa en torno a 12 Hz para la Simp, en la Auth la encontramos a 17 Hz, siendo a su vez esta última menos amplificada, y a la diferencia de contraste de impedancias en ambas estructuras, mientras que el afloramiento en el Test Site posee una velocidad de cizalla de 200 m/s en la estructura Simp, en la Auth es de 130 m/s.
- ♦Tanto el método 1D lineal como el lineal-equivalente presentan resultados concordantes, siendo de nivel superior el método de Kennett debido a su linealidad.

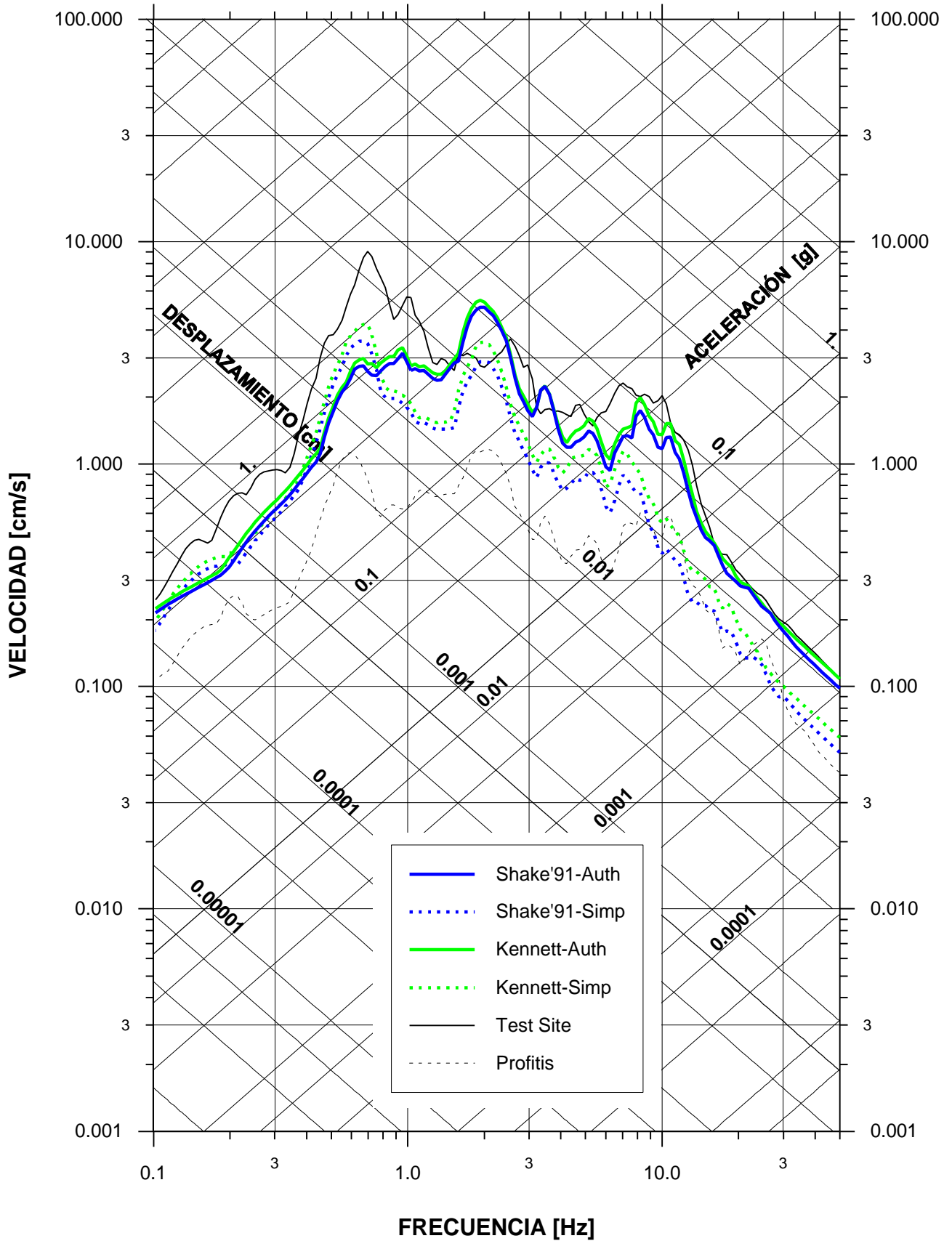


Figura 4. Comparación entre los pseudoespectros de respuesta elástica en velocidad para un 5% de amortiguamiento de los registros experimentales del sismo de Arnaia en Profitis y Test Site y los simulados variando el tipo de estructura considerado y el método de simulación numérica.

Conclusiones

Los cálculos realizados en el valle de Volvi (Salónica) han servido para validar distintos métodos de simulación numérica de efectos sísmicos locales. Del ejemplo aquí presentado de la aplicación de métodos de simulación numérica de efectos locales en el valle de Volvi podemos destacar las siguientes conclusiones:

- ♦ En la comparación con registros experimentales hemos aplicado métodos de simulación unidimensionales, observando que tanto el método lineal-equivalente Shake'91 como el método de reflectividad de Kennett ofrecen resultados similares. En esta aplicación se ha puesto de manifiesto la notable influencia de la elección del emplazamiento de referencia, así como las características propias de la señal de entrada.
- ♦ Se han observado diferencias en los resultados del método bidimensional Aki-Larner con respecto al método unidimensional Kennett, afectando básicamente a la duración temporal, aunque en general se obtienen resultados similares respecto al nivel de amplificación máxima.
- ♦ La influencia del modelo de estructura ha sido puesta de relieve, observándose importantes variaciones en los resultados obtenidos de la consideración de la estructura Simp con respecto a la Auth. Igualmente se ha constatado que las capas más superficiales de la estructura son las que más contribuyen en la amplificación resultante, siendo claramente relacionable la profundidad del basamento rocoso con la frecuencia fundamental del depósito.

Referencias

- Aki, K. y Larner, K.L., (1970). "Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 75. No. 5, p. 933-954.
- Auth. SF, (1997). "Development and experimental validation of advanced modelling techniques in engineering seismology and earthquake engineering". Annual Report. EUROSEISMOD. Project: ENV4-CT96-0255.
- Chávez-García, F.J., D.Hatzfeld, G. Pedotti y P.-T. Bard, (1990). "An experimental study of site effects near Thessaloniki (Northern Greece)". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 80, p. 784-806.
- Cid, J., (1997). "Estudi comparatiu de mètodes de simulació 1D d'efectes sísmics locals (Benchmark)". EUROSEISMOD. Informe Institut Cartogràfic de Catalunya. No. GS-99/97, p. 178.
- Cid, J., (1998a). "Aplicació de mètodes de simulació 1D i 2D d'efectes sísmics locals a la vall de Volvi. Síntesi dels resultats obtinguts". EUROSEISMOD. Informe Institut Cartogràfic de Catalunya. No. GS-104/98, p. 133.
- Cid, J., (1998b). "Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, p. 215.
- Cid, J., Figueras, S. y Goula, X., (1998). "Benchmark. Final Report". EURO-SEISMOD. Project: ENV4-CT96-0255. Development and experimental validation of advanced modelling techniques in engineering seismology and earthquake engineering. Task 3.4. Validation of Numerical Codes (Benchmark), p. 46.
- Cramer, C.H. y C.R. Real, (1992). "A statistical analysis of submitted site-effects predictions for the weak motion blind prediction test conducted at the Turkey Flat, USA, site effects test area near Parkfield, California". *International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion ESG1992*. Odawara. Japón. Vol. II, p. 15-20.
- Idriss, I. M. y Sun J. I., (1992). "Shake'91: a computer program for conducting equivalent linear

- seismic response analyses of horizontally layered soil deposits". User's Guide. University of California, p. 13.
- Kennett, B.L.N. y Kerry, N.S., (1979). "Seismic waves in a stratified half space". Geophys. Journal Royal Astron. Soc. Vol. 57, p. 557-583.
- Kudo, K., (1992). "Earthquake motions: given and blinded data". International Symposium The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, ESG1992. Odawara, Japón. Vol. 2, p. 53-64.
- Lgih, (1997). "Annual Report. EUROSEISMOD. Project: ENV4-CT96-0255". Development and experimental validation of advanced modelling techniques in engineering seismology and earthquake engineering.
- Midorikawa, S., (1992). "A statistical analysis of submitted predictions for the Ashigara Valley blind prediction test". International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion ESG1992. Odawara. Japón. Vol. II, p. 65-77.
- Riepl, J., (1997). "Effects de site: évaluation expérimentale et modélisations multidimensionnelles. Application au site-test EUROSEISTEST (Grèce)". Tesis Doctoral. Université Joseph Fourier de Grenoble, p. 227.