

PREDICCIÓN ESPECTRAL DE LA ACCIÓN SÍSMICA A PARTIR DEL MODELO DE BRUNE MODIFICADO

Catalán, A.*; Roca, A.** y Goula, X.**

*Universidad de Oviedo, e-mail: Ariel@etsiig.uniovi.es

**Institut Cartogràfic de Catalunya, e-mail: Roca@icc.es; Xgoula@icc.es

RESUMEN

Se propone un modelo semiempírico para la predicción de espectros (FSA, PSV) en roca, obtenido por modificación del conocido modelo de Brune, incorporándole una caída de esfuerzos, $\Delta\sigma$, y una frecuencia máxima, $f_{\text{máx}}$, variables.

Se relacionan los parámetros que intervienen en el modelo con un único parámetro, el momento sísmico M_0 (o magnitud), además de la distancia epicentral. Se hace un análisis de regresión para obtener $\Delta\sigma$ y $f_{\text{máx}}$ en función de M_0 , a partir de datos disponibles en diferentes áreas sísmicas. Se hallan así las frecuencias esquina y máxima, que controlan la forma del espectro.

El modelo se ha aplicado a una serie de acelerogramas de la red SMART-1 (Taiwán). A pesar de no disponer de valores de momento sísmico de estos terremotos, si estos se deducen de magnitudes obtenidas de forma homogénea, el ajuste al modelo propuesto es satisfactorio.

Palabras clave: Terremoto, espectro, modelo de Brune.

ABSTRACT

It is proposed a semiempirical model for predicting earthquake spectra (FSA, PSV) on rock through a modification of the well known Brune's model by introducing a stress drop, $\Delta\sigma$, and a maximum frequency, $f_{\text{máx}}$, both of them variable.

All the parameters involved in the model are related to a single parameter, the seismic moment, M_0 (or magnitude), in addition to the epicentral distance. A regression analysis for obtaining the dependence of $\Delta\sigma$ and $f_{\text{máx}}$ on M_0 has been carried out using data available from different seismic areas. The corner and maximum frequencies, which control the shape of the spectrum, are then obtained.

The model is applied to a set of accelerograms from the SMART-1 array in Taiwan. In spite of the fact that seismic moment values for these events are not available, if these M_0 values are deducted from homogeneous determinations of magnitude then there is a good agreement with the values predicted by the proposed model.

Keywords: Earthquake, spectrum, Brune's model.

Introducción

Cuando se quieren predecir fuertes movimientos de suelo, pensando en el desarrollo de un adecuado diseño antisísmico de estructuras y en la caracterización de la acción sísmica, aparece un desafío que no es fácil de resolver.

A partir de un gran número de estudios independientes realizados (11), se sabe que la forma del espectro de respuesta es muy dependiente de la magnitud (tomada como medida del tamaño de terremoto) y especialmente de las condiciones del suelo local. Los errores generados pueden ser parcialmente evitados con el conocido método de Newmark y Hall, en el cuál, la porción de cortos períodos del espectro son proporcionales al pico de aceleración, la porción intermedia (entre 0.3 y 2 seg.) al pico de velocidad y los altos períodos, al pico de desplazamiento. El factor de proporcionalidad entre la velocidad y los valores espectrales a períodos intermedios, sin embargo, varía significativamente con la magnitud y las condiciones del suelo local, como indican las ecuaciones de predicción de respuestas con picos de velocidad (10). Por otra parte, los picos de desplazamiento son altamente sensibles a la elección del filtro paso-alta utilizado en el proceso de los acelerogramas. Todo ello conlleva a que adoptar un método de este tipo, implicaría asumir algunas incertidumbres que podrían invalidarlo.

Una solución al problema es predecir los valores de respuesta directamente (10) utilizando relaciones matemáticas con las que muchas veces es difícil justificar físicamente el verdadero sentido y los parámetros característicos que están en juego. Otra solución es usar los picos de aceleración para escalar un espectro de formas normalizadas, que varíe con la magnitud y las condiciones locales del suelo. La búsqueda de un parámetro simple para caracterizar el movimiento del suelo parece estar condenado a fallar. Debido a que la forma del espectro cambia sensiblemente con la magnitud y las condiciones del suelo local, un simple parámetro que represente el movimiento del suelo a una frecuencia determinada, puede ser totalmente distinto para otra.

Aceptando que la forma de la respuesta espectral depende fuertemente de la magnitud y de las condiciones de la geología local, entonces, la magnitud, distancia epicentral y suelo local, son las principales variables usadas en la predicción de futuros movimientos de suelo.

Las últimas tendencias en predicciones espectrales se abordan por distintos caminos. Por un lado se hallan un gran número de relaciones de predicción, derivadas desde el análisis de regresión de terremotos con registros claros y fiables (17)(18), en sitios con una gran actividad sísmica. Por otro lado, se parte de registros de pequeños terremotos como funciones de Green (9) para modelar registros de terremotos de mayor magnitud. Estas funciones incluyen, además, en un modelo más sofisticado, los efectos de trayectoria y algunos efectos locales (19). Finalmente, se trabaja en una predicción teórica a partir de modelos estocásticos, que se tratan de definir con pocos parámetros obtenidos de forma empírica, en la mayoría de los casos.

Modelo de Brune

La mayoría de los estudios sismológicos han asumido directamente formas funcionales para las amplitudes espectrales (en la modelización del espectro en roca, es decir, efectos de fuente y trayectoria) siguiendo la forma del espectro de ondas de cizalla de Brune (1970). Estos modelos son especificados con algunos claros parámetros: el momento sísmico, M_0 , la frecuencia esquina, f_c , algún valor de caída de tensión en el plano de la falla, ΔS .

Brune definió el espectro de aceleración como:

$$A(w) = \frac{\Omega_0 w^2}{1 + (w/w_c)^2} \quad (1)$$

Donde es:

$$\Omega_0 = \frac{M_0 K R_{\text{qj}}}{4\pi r b^3 d}$$

siendo:

K = factor de amplificación en la superficie libre

R_{qj} = factor de radiación (depende del mecanismo focal)

r = densidad del medio

b = velocidad de las ondas de cizalla

d = distancia hipocentral

Para lograr representar el modelo, buscando formas espectrales características de distintas magnitudes y/o distancias epicentrales, se deben asumir valores para algunos parámetros que intervienen en el modelo. Se suele considerar $K=2$, $R_{\text{qj}}=0.4$, $r=2.8 \text{ g/cm}^3$ y $b=3.2 \text{ Km/s}$, como valores medios. El valor de M_0 (momento sísmico), generalmente se obtiene a partir de alguna relación establecida con la magnitud, dando una buena medida del tamaño del terremoto, al no contar en la mayoría de los casos con datos fiables de las dimensiones de la falla. Esta simplista relación se torna arbitraria si no se dispone de magnitudes fiables y además podría establecerse con varias de las magnitudes que se manejen en cada caso. Así, se adoptan diferentes tipos de magnitudes para trabajar y ello conlleva una complicación adicional al querer encontrar relaciones entre ellas.

Es muy utilizada la relación empírica entre M_0 y M_s de Kanamori y Anderson (12), que es:

$$\text{Log } M_0 = 1.5 M_s + 16 \text{ [dinas.cm]} \quad (2)$$

El valor de Ω_0 cuantifica la parte plana del espectro, para frecuencias superiores a la frecuencia esquina. La ecuación (1) establecida para el espectro de aceleración sigue el característico cambio de ley en las amplitudes espectrales, a partir de la frecuencia esquina. Un esquema típico representativo de estos espectros se ve en la Fig.1.

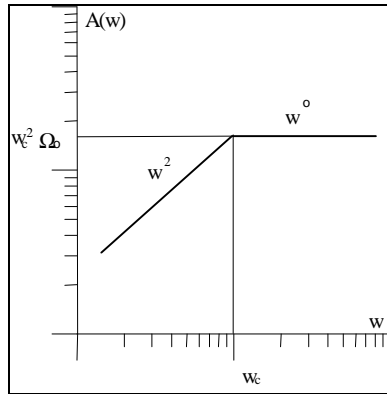


Fig. 1. Esquema típico del espectro de aceleración del modelo de Brune. Ejes en escala logarítmica.

Brune consideró que la caída media de tensión en la falla es $\Delta S = 100$ bar, y además, su relación con la frecuencia esquina como:

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 b \cdot (\Delta S / M_o)^{1/3} \quad (3)$$

Con estos parámetros definidos, se hallan los espectros de amplitudes de aceleración que fueron deducidos por Brune (ec. (1)). Las gráficas de los espectros serán de la forma que puede verse en la figura 2.

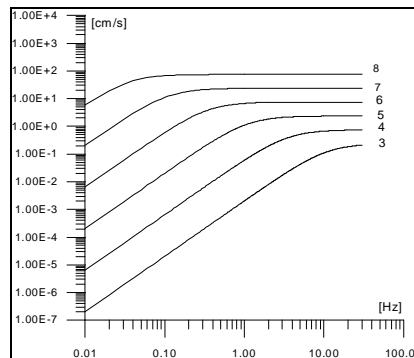


Fig. 2. Espectros de aceleración según el modelo de Brune, para sismos con 60 Km de distancia epicentral y para distintas magnitudes.

Análisis de la caída de tensión

Gran parte de los estudios realizados tendentes a establecer los parámetros de la falla se realizaron considerando que la caída de tensión en la falla era constante. Sin embargo, se ha constatado, como se verá más adelante, que la caída de tensión aumenta a medida que aumenta el tamaño del terremoto, por lo que se hace necesario considerar una aproximación más real.

El valor de ΔS es muy importante en la definición de la frecuencia esquina y, como ejemplo, se hace una comparación de los valores de f_c obtenidos con distintos valores de ΔS . Se toman dos valores de ΔS y un valor cualquiera de M_s y se comparan los resultados obtenidos. Aplicando la relación:

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 b \cdot (\Delta s / M_0)^{1/3}$$

Se adoptan $\Delta s = 10$ bar y $\Delta s = 100$ bar, y además, $M_s = 4$ y $\beta = 3.2$ Km/s

Considerando además:

$$\text{Log } M_0 = 1.5 M_s + 16 \text{ [dinas.cm]}$$

A partir de $\Delta s = 10$ bar, se obtiene una frecuencia esquina de 1.57 Hz, y considerando $\Delta s = 100$ bar, su valor es de $f_c = 3.38$ Hz.

Como se puede apreciar, se da una gran dispersión en los valores de f_c , a partir de la variación de Δs . Ello demuestra la importancia que tiene para la aplicación de un modelo fiable, poder aproximar correctamente los valores de la caída de tensión en la falla.

La suposición de considerar $\Delta s = \text{cte}$, simplifica mucho el problema, ya que es un parámetro de difícil determinación. El valor adoptado por Brune ($\Delta s = 100$ bar) no es arbitrario. Se observa que en el oeste de EEUU (en especial, California), el valor asignado a la caída de tensión se aproxima muy bien a los valores observados y el modelo resultante predice muy bien el espectro. No obstante, se ha constatado que este valor no siempre es extrapolable a otros lugares de análisis. Se han esbozado varias hipótesis tratando de encontrar sus dependencias y de explicar esta diferencia. Para comenzar, se observa que existe diferencia entre los valores hallados en eventos de igual magnitud que corresponden a zonas interplacas e intraplaca. En zonas interplacas, la caída de tensión que se manifiesta en la falla es de menor valor. En la zona este de los Estados Unidos (intraplaca), se ha observado que la caída de tensión, en promedio, es aproximadamente el doble que en la costa oeste (interplaca) (2)(3)(12).

El valor constante de 100 bar podría tomarse entonces, para eventos interplaca (tipo California) pero no se aproxima bien para los que no lo son. Por otra parte, se ha comprobado que existe una clara relación de dependencia entre la caída de tensión y el momento sísmico, que se pone claramente de manifiesto especialmente para pequeños eventos ($M_s < 5$). Una comparación de puntos Momento sísmico-caída de tensión obtenidos a partir del modelo de Brune para terremotos recopilados de distintas partes del mundo, con trabajos de De Natale et al, 1987; Mc Garr et al, 1985; Frankel, 1981; Scherbaum et al, 1984; Olivera, 1983; Roca, 1990 y Susagna, 1990; llevan a ésta conclusión (Fig. 3).

Si se busca la forma de relacionar la caída de tensión con parámetros de la falla, nos encontramos ante dos análisis aparentemente contrapuestos entre sí:

Por un lado, se ve que la caída de tensión es directamente proporcional, en forma logarítmica, al valor del momento sísmico (que representa el tamaño del terremoto). Esto indica por lo tanto, que también debe ser proporcional al área de ruptura de la falla (longitud y ancho de la falla).

Por otro lado, Mori y Frankel (13), y otros investigadores, indican que los valores relativamente mas altos de caída de tensión han sido registrados en áreas cercanas a muy bajos desplazamientos. Ellos investigaron esta relación de dependencia, $\Delta s = f(\Delta u)$, tratando pequeños eventos como funciones de Green (M_L entre 3 y 5). Esto indica que en presencia de grandes desplazamientos producidos, se podría decir que la falla se comporta de una forma "blanda" y la caída de tensión asociada no llega a valores importantes, mientras que para falla de tipo "dura" se encuentran caídas de esfuerzos mayores incluso para pequeños o moderados desplazamientos. En otras palabras, ante dos eventos de

igual magnitud y de igual área de falla, para igual caída de tensión tendrá mayor desplazamiento aquel que se encuentra en una falla "blanda".

Es posible que los eventos intraplaca, se comporten con un mecanismo de tipo "falla dura", que dan lugar a menores deslizamientos, lo que corroboraría la explicación anterior. Para sismos de pequeña magnitud, por ejemplo, en la zona de Cataluña, típico caso de eventos intraplaca, este fenómeno también se manifiesta y coincide con estas hipótesis, como se deduce a partir de algunos estudios (16).

Partiendo de puntos definidos en los trabajos mencionados, se ajusta una curva obtenida por medio de una ley de regresión no lineal (Fig. 3). Se verifica aquí que los puntos obtenidos desde los trabajos de Olivera (1983) y Susagna (1990), realizados en las regiones de Arette (Pirineos) y Cataluña, respectivamente; son sensiblemente superiores en caídas de esfuerzos para los mismos rangos de momentos sísmicos que los correspondientes a los otros trabajos y, como se comentó, estos trabajos cumplen las premisas de eventos intraplaca.

A pesar de que los puntos que han sido obtenidos para grandes valores de M_0 son escasos (afortunadamente), la tendencia parece romperse y adoptar valores limitados de caída de tensión. No obstante, esto también es asumible desde un punto de vista de la física de la falla, ya que no es posible aumentar indefinidamente el valor de la caída de esfuerzos, porque las características de los materiales no lo permitirían. Se observa (Fig. 3) que a partir de $M_0 = 10^{24} - 10^{25}$ [dinas.cm] ($M_s > 6.0$), los valores de ΔS se estabilizan en máximos, aunque con una dispersión considerable. El ajuste cuadrático da:

$$\text{Log } \Delta S = (-25.96 \pm 3.64) + (1.94 \pm 0.34) (\text{Log } M_0) + (-0.03 \pm 0.01) (\text{Log } M_0)^2 \quad (4)$$

donde M_0 viene expresado en (dinas.cm) y ΔS en (bar)

En la Fig. 3 se puede ver la dependencia encontrada y la dispersión en los valores de la caída de tensión, que podría ser asumida en la idea propuesta anteriormente sobre los distintos valores que se obtienen en zonas de fallas duras con terremotos intraplaca o zonas blandas de interplaca.

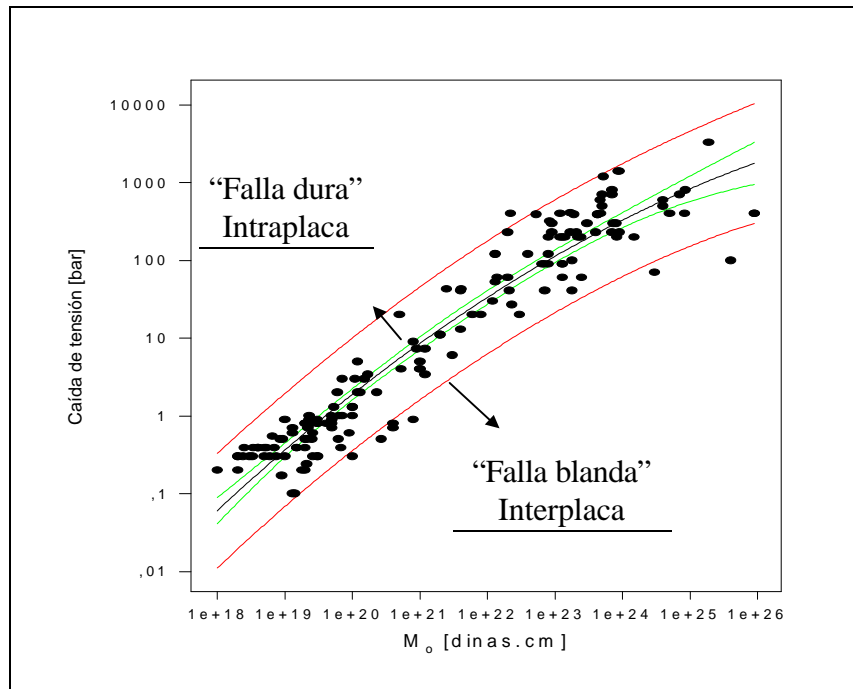


Fig. 3. Ajuste de curva y zonas del comportamiento distinto de fallas "blandas" y "duras".

Análisis de la frecuencia f_{max}

En la práctica, los espectros de aceleración no permanecen indefinidamente planos para las altas frecuencias (según el modelo w^{-2} definido por Brune), sino que se observa un decrecimiento a partir de una frecuencia característica, denominada normalmente en la literatura, f_{max} (6). Es atribuible, según unos autores a procesos característicos de la falla (radiación en los bordes, dispersión de energía, etc.); según otros, a la atenuación anelástica de la propagación de las ondas en la trayectoria; y algunos manifiestan que da la medida del tiempo característico de parada del frente de ruptura en la falla. Las últimas tendencias parecen indicar que en realidad se debe a una combinación de todos los factores citados anteriormente, lo que nos sugiere que su cálculo (o predicción) puede hacerse muy complicado (8).

Algunos autores, partiendo de la hipótesis de que f_{max} depende de características de la fuente, han hecho análisis para tratar de determinar algunas relaciones de dependencia con la magnitud y distancia epicentral (15), mientras que otros, partiendo de suponer que está relacionada con la atenuación del medio, la aplican de forma implícita en funciones de tipo exponencial. Las relaciones halladas de una u otra forma, son válidas para el estudio particular y específico que han hecho los autores en sitios determinados y con las muestras consideradas, por lo que, estas funciones no pueden ser extrapoladas con fiabilidad a otras zonas. Por todo lo anterior, se deduce que para obtener una simple relación aproximada de f_{max} , aplicable de forma general, se debe recurrir a datos de terremotos de distintas características en diferentes partes del mundo.

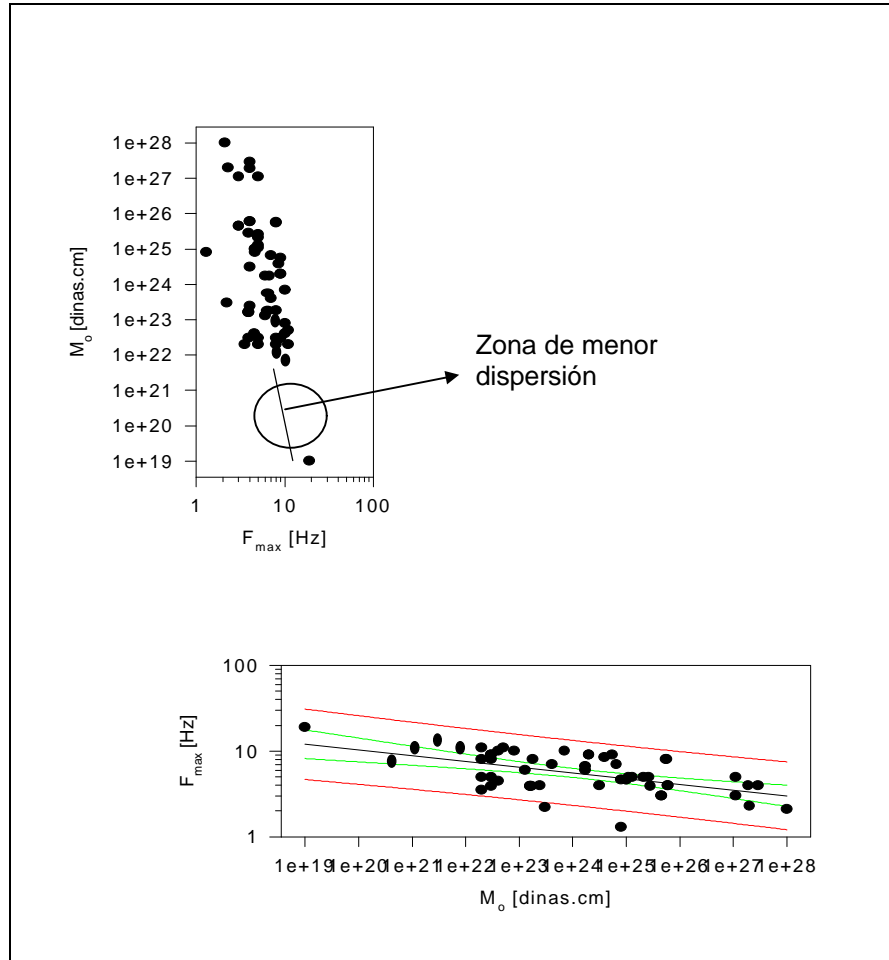


Fig. 4. Ajuste lineal a partir de datos empíricos para $f_{max} = f(M_0)$

Analizando los datos obtenidos por distintos autores (1)(15), considerando sismos de un amplio rango de magnitudes y situados en muy diferentes sitios, se observa (Fig. 4) una marcada tendencia a disminuir f_{max} al aumentar el momento sísmico (o la magnitud) y además, que en las bajas magnitudes, la dispersión es menor (en la Fig. 4 no se indican estos puntos por razones de claridad).

A partir de los datos, desarrollando un ajuste se obtiene (Fig. 4):

$$\text{Log } f_{max} = (2.53 \pm 0.37) + (-0.07 \pm 0.01) \text{Log } M_0 \quad (5)$$

Expresando las unidades de f_{max} en Hz y M_0 en dinas.cm. La gráfica resultante de la aplicación de esta expresión, indica que una aproximación lineal da un buen ajuste de la variación.

Propuesta de nuevo modelo (Brune Modificado).

Se modela el espectro de amplitudes de aceleración completo a partir de la relación de Brune, introduciendo un término debido a f_{max} . El modelo se define como:

$$A(f) = A_1(f) \cdot A_2(f) \quad (6)$$

donde son:

$$A_1(f) = \Omega_0 \frac{w^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (7)$$

$$A_2(f) = \frac{1}{1 + (f/f_{max})^n} \quad (8)$$

El primer término (7), ya fue definido en (1). El segundo término (8) representa la función que define las amplitudes descendentes en las altas frecuencias, de una forma cuadrática ($n = 2$) o cúbica ($n = 3$). Esta caída en las altas frecuencias, que inicialmente puede plantearse de forma cuadrática, con lo que se tendría un espectro simétrico, también podría tratarse con formas intermedias (n entre 2 y 3) y en forma cúbica. Combinando las dos modificaciones realizadas al modelo en apartados anteriores (caída de tensión y frecuencia máxima), se hace una aplicación del espectro completo. Considerando la ecuación (6), se analizan los valores de $n = 2$ y $n = 3$, para poder observar la diferencia en la caída de nivel espectral en altas frecuencias.

Adoptando $K = 2$; $R_{qj} = 0.4$; $r = 2.8 \text{ g/cm}^3$; $b = 3.2 \text{ Km/s}$ y $d = 60 \text{ Km}$, y además:

$\text{Log } M_0 = 1.5 M_s + 16$ [dinas.cm]

$\Delta S = f(M_0)$, ecuación (4)

$f_{max} = f(M_0)$, ecuación (5)

$f_c = 4.9 \cdot 10^6 b \cdot (\Delta S/M_0)^{1/3}$

Aplicando estas funciones y valores, se obtienen los espectros de la Fig. 5.

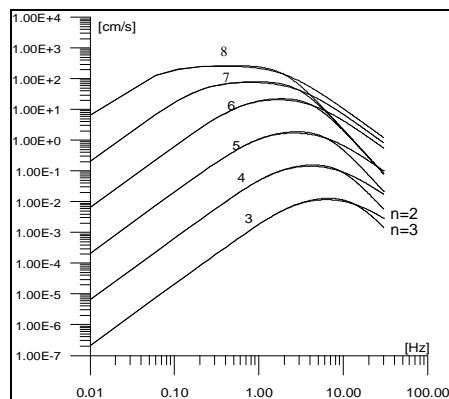


Fig. 5. Espectros de aceleración según el modelo propuesto. Caída de amplitud en altas frecuencias con $n = 2$ y $n = 3$, para distintos valores de magnitud (M_s) y una distancia epicentral de 60 km.

Aplicación a eventos de la Red Densa Smart-1 (Taiwán)

Desde esta red, se toman algunos terremotos que resultan de interés para el estudio a realizar (Tabla 1). Para empezar, sólo interesan registros disponibles en roca (para evitar efectos de suelo local que no son considerados en el modelo) y por otro lado, se escogen terremotos a distintas distancias epicentrales para poder sacar conclusiones respecto a la validez del método aplicado. Se comparan espectros compatibles, es decir, PSV (con amortiguamiento nulo, de las dos componentes horizontales) de los registros con el espectro generado por el modelo, que corresponde a un Fourier de aceleración.

EV.	LAT.	LONG.	D[Km]	h[Km]	D _h [Km]	M _L	Registros en
32	24.59 N	122.23 E	48.2	5.3	48.5	6.0	ROCA
33	24.57 N	122.19 E	44.9	3.3	45	6.5	ROCA
34	24.38 N	121.88 E	35	1	35	5.8	ROCA
37	24.41 N	121.83 E	30	2	30	5.3	ROCA
39	24.76 N	121.96 E	22.2	10.2	24.4	6.5	ROCA
41	24.05 N	121.62 E	71	22	74	6.2	ROCA
43	24.63 N	121.79 E	5	2	5	6.2	ROCA
44	24.64 N	121.80 E	5	2	5	4.9	ROCA
45	23.96 N	121.84 E	79	7	79	7.0	ROCA

Tabla 1. Red Smart-1, Taiwán. Eventos utilizados.

Se consideran nuevamente $K=2$; $R_{qj}=0.4$; $r=2.8 \text{ g/cm}^3$ y $b=3.2 \text{ Km/s}$; y las relaciones halladas para ΔS y f_{\max} (ecuaciones (4) y (5)) y $n=3$. Una relación muy utilizada para hallar M_0 es la de Kanamori y Anderson (que ya fue utilizada anteriormente). Las magnitudes disponibles en este estudio son locales (de tipo W-A), por lo que para evitar incertidumbres en el paso de M_L a M_s , se prefiere utilizar directamente la relación de M_0 con M_L dada por Roca (1990), para un estudio hecho en la misma red, que es:

$$\text{Log } M_0 = 1.47 M_L + 14.56 \quad (9)$$

Luego de hallados los espectros modelados con los valores de M_L dados para estos eventos por la Academia Sínica de Taiwán, se ha realizado un promedio de las distintas magnitudes locales encontradas por el mismo autor para los sismos de interés, utilizando varios métodos diferentes. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Evento	M _{LT}	M _{LR}	M _{JK}	M _{HB}	M _{ES}	M _(promedio)
32	6.0	5.70	5.58	5.69	5.84	5.76
33	6.5	6.18	6.09	6.20	6.29	6.25
34	5.8	5.58	5.54	5.665	5.60	5.63
37	5.3	5.62	5.70	5.80	5.94	5.67
39	6.5	6.64	6.88	7.03	6.39	6.68
41	6.2	6.43	6.33	6.43	6.51	6.38
43	6.2	5.91	6.09	5.92	5.62	5.95
44	4.9	4.71	4.89	4.72	4.99	4.84
45	7.0	7.43	7.33	7.38	7.10	7.24

Tabla 2. Tabla de magnitudes locales

Donde es:

M_{LT} : Magnitud local suministrada por A.S. Taiwán

M_{LR} : Magnitud local con atenuación de Richter

M_{JK} : Magnitud local con atenuación de Jennings y Kanamori (1983)

M_{HB} : Magnitud local con atenuación de Hutton y Boore (1987)

M_{Es} : Magnitud local con método de Espinosa (1990)
 $M_{(promedio)}$: Magnitud media de las 5 magnitudes anteriores

En la Figura 6 se comparan los espectros obtenidos (cm/s y Hz) a partir de M_{LT} (línea fina) y $M_{(promedio)}$ (línea gruesa), haciendo uso de (9) y (6), con los PSV experimentales de las componentes horizontales ya hallados.

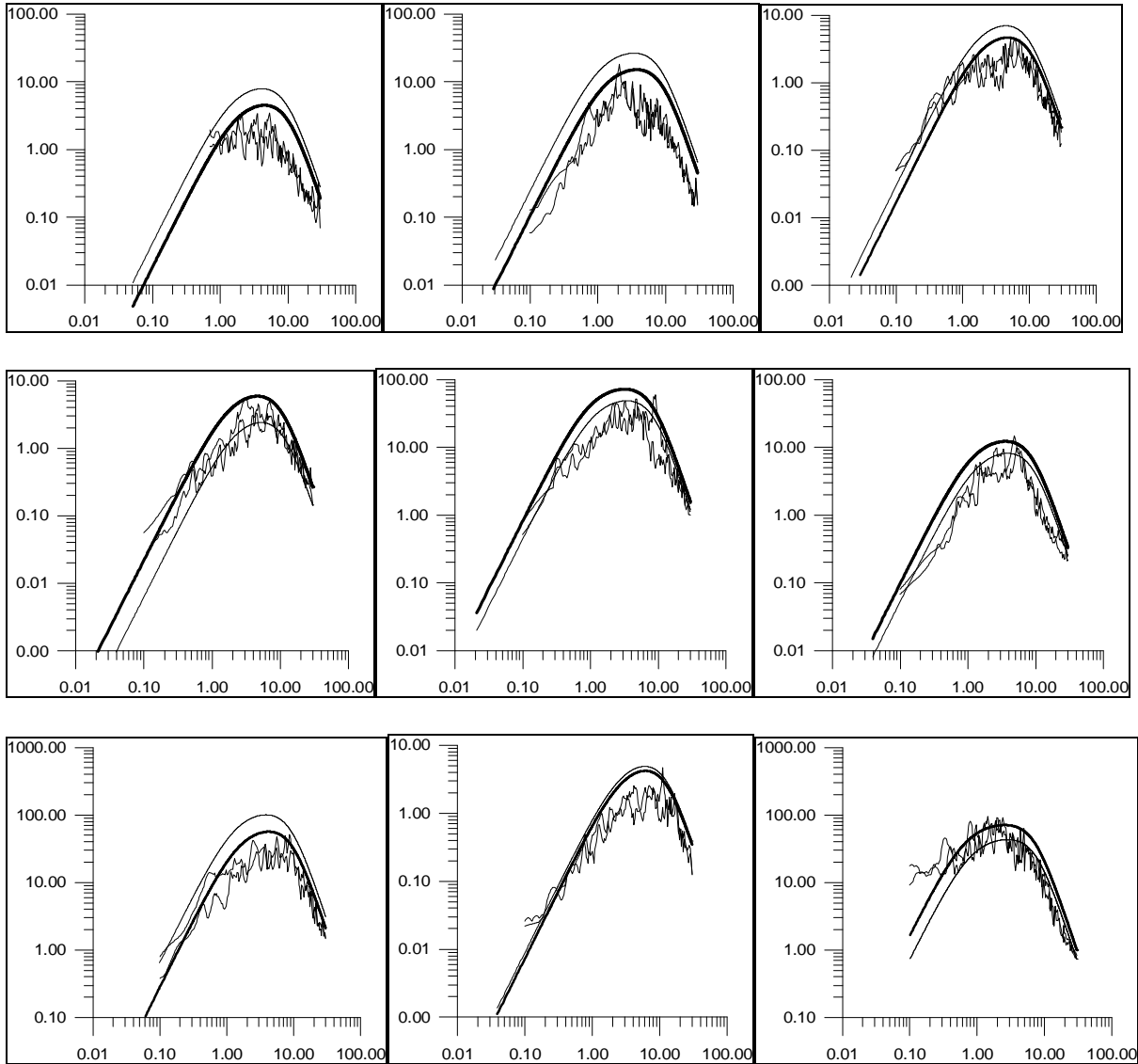


Fig. 6. Comparación de espectros. Componentes horizontales de eventos 32;33;34;37;39;41; 43;44 y 45 (de izq. a dcha. y de arriba a abajo). (cm/s) y (Hz).

Conclusiones

Se desarrolla un método a partir del modelo de Brune. Se relacionan los parámetros que intervienen en el modelo con un único y exclusivo parámetro, el momento sísmico (o magnitud), el cuál interviene directa o indirectamente en todos los valores que controlan la definición del espectro.

La imposición de un único parámetro de control redundante en un modelo extremadamente sencillo, aunque por otro lado, todo el peso de la precisión recae

justamente en él. Debido a esto es necesario realizar una predicción de M_0 lo más exacta y precisa posible y para ello, si lo hacemos depender de la magnitud del terremoto, se deben tener en cuenta dos aspectos muy importantes:

1- La magnitud del sismo (sea del tipo que sea) debe ser obtenida con exactitud (dentro de márgenes razonables) y debe ser muy fiable.

2- La relación que sea utilizada entre M_0 y M debe corresponder con el tipo de magnitud que se utilice y, por otro lado, debe verificarse bien para la zona en estudio.

- El ajuste realizado para la determinación de la caída de esfuerzos (que controla la frecuencia esquina) resulta ser satisfactorio.

- Los valores de las frecuencias máximas halladas y el uso de $n = 3$ (decrecimiento cúbico) demuestran un buen ajuste.

- Con la aplicación de la relación momento-magnitud local de Roca (1990) (determinada para esta zona) se evita la incertidumbre del paso de M_L a M_s para aplicar la relación de Kanamori y demuestra ser un buen ajuste, resultando todavía mejor si se considera un valor de magnitud promedio entre diferentes definiciones de M_L . Así, se comprueba, por ejemplo, que los sismos 34 y 37 tienen magnitudes similares, algo que ya había sido deducido anteriormente con el estudio de sus relaciones espectrales (5).

Agradecimientos

Los acelerogramas de la red SMART-1 fueron suministrados por la Estación Sismográfica de la UCLA, Berkeley y el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Academia Sinica, Taipei.

Referencias

- (1) Aki, K. (1988). Magnitude-frequency relation for small earthquakes: a clue to the origin of f_{max} of large earthquakes. J. Geophys. Res., 92, 349-1355
- (2) Atkinson, G. (1993). Earthquake source spectra in Eastern North America. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 6, 1778-1798.
- (3) Boatwright, J. (1994). Regional propagation characteristics and source parameters of earthquakes in northeastern North America. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1-15.
- (4) Brune, J. M. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
- (5) Catalán Goñi, A. (1995). Tesis Doctoral. Estudio de las relaciones entre movimientos fuertes y débiles para la predicción de espectros de diseño sísmico. ETSECCPB. 111 pp.
- (6) Hanks, T. and Mc Guire, R. (1981). The character of high-frequency strong ground motion. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 6, 2071-2095.
- (7) Haskell, N. A. (1969). Elastic displacement in the near-field of a propagating fault. Bull. Seism. Soc. Am., 77, 865-908.
- (8) Herrero, A. y Bernard, P. (1994). A kinematic self-similar rupture process for earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1216-1228.
- (9) Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquake. Bull. Dis. Prev. res. Inst., Kyoto Univ., 33, 2-298, 63-104.
- (10) Joyner, W. (1983). A scaling law for the spectra of large earthquake. Bull. Seism. Soc. Am., 74, 4, 1167-1188.

- (11) Joyner, W. and Boore, B (1988). Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. Proceeding of Earthquake Engineering and Soil Dynamics II. GT Div./ASCE, Park City, Utah. 43-48.
- (12) Kanamori, H. and Anderson, D. (1975). Theoretical basics of some empirical relations in seismology. Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1075-1095.
- (13) Mori, J. and Frankel, A. (1990). Source parameters for small events associated with the North Palm Springs, California, earthquake determined using empirical Green functions. Bull. Seism. Soc. Am., 80, 2, 278-295.
- (14) Olivera, C. (1983). Tesis Doctoral. Estudi de sismicitat i sismotectònica local. Aplicacions als Pirineus. Universitat de Barcelona. 263 pp.
- (15) Roca, A. (1990). Tesis Doctoral. Determinación del campo próximo de terremotos por redes de acelerógrafos. Univ. Comp. Madrid. 192 pp.
- (16) Susagna, T. (1990). Tesis Doctoral. Estaciones sísmicas digitales: proceso de datos y contribución a estudios de sismicidad. Universidad de Barcelona. 159 pp.
- (17) Trifunac, M. D. (1993). Long period Fourier amplitude spectra of strong motion acceleration. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 12. 363-382.
- (18) Trifunac, M. D., and Lee, V. W. (1989). Empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake acceleration in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 8, 3, 126-144.
- (19) Wennerberg, L. (1990). Stochastic summation of empirical Green's functions. B.S.S.A., 80, 1418-1432