

MICROZONIFICACION SISMICA DE BARCELONA UTILIZANDO EL METODO DE NAKAMURA VENTAJAS Y LIMITACIONES

A. Alfaro ⁽¹⁾, Navarro M. ⁽²⁾, Sánchez J. ⁽²⁾, Pujades, L.G. ⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.
dalfaro@etseccpb.upc.es

⁽²⁾Universidad de Almería. Departamento de Física

Introducción

De las diferentes técnicas que utilizan microtemblores para Microzonificación Sísmica, la de Nakamura(1989) ha tenido bastante aceptación debido a su fácil implementación tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de los datos. La instrumentación consiste en un velocímetro o acelerómetro triaxial con el cual se registran microtemblores en superficie, su procesamiento es simple, consistiendo en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes Horizontal(H) y vertical(V) y finalmente realizar la relación espectral H/V, lo cual según Nakamura da la función de transferencia aproximada del subsuelo.

La técnica de Nakamura se ha utilizado en varias ciudades (Euroseismod, 1998) cuyos suelos tienen características geotécnicas diferentes. Se ha comprobado en algunas ciudades que los resultados obtenidos por el método de Nakamura concuerdan con ensayos de laboratorio, o análisis de terremotos y modelación numérica, sin embargo, no en todos los sitios ha sido así.

En la ciudad de Barcelona se han registrado microtemblores en los diferentes tipos de suelo, con dos instrumentos diferentes y a diferentes horas del día y de la noche, está comunicación presenta las ventajas y desventajas de la aplicación del Método de Nakamura como herramienta para la microzonificación sísmica de la ciudad en lo referente a la determinación de los períodos predominantes del suelo.

Medición de los Microtemblores

La medición de los microtemblores en la ciudad de Barcelona se ha llevado a cabo en varias etapas y con dos equipos diferentes: un acelerómetro comercial K2 de Kinematics(1995); y con un velocímetro prototipo (Navarro et al., 1997) con el que también se realizaron las pruebas de estacionariedad en material de afloramiento rocoso y en suelo sedimentario de bajo espesor.

El acelerómetro triaxial tiene respuesta plana hasta 50 Hz , un rango dinámico de 114 db, y nivel de resolución del equipo de 19 bits, con lecturas máximas absolutas de 1g. Esto implica que la lectura mínima es de $37 \mu\text{m/s}^2$. Los niveles de ruido son mayores que el nivel mínimo de resolución del equipo (Alfaro, 1997). Se realizaron registros con duración de 180 segundos a cien muestras por segundo, realizando en cada sitio tres registros.

Con el velocímetro también se realizaron los ensayos de estacionariedad, estos se llevaron a cabo en afloramiento rocoso en el Observatorio Fabra (Figura 1) y en material sedimentario de bajo espesor en el Campus de la Universidad Politécnica de Cataluña (Figura 2), viendo la estabilidad de las mediciones durante un lapso de tiempo de 24 horas. Es importante anotar que se realizaron 10 medidas de forma simultánea con los dos

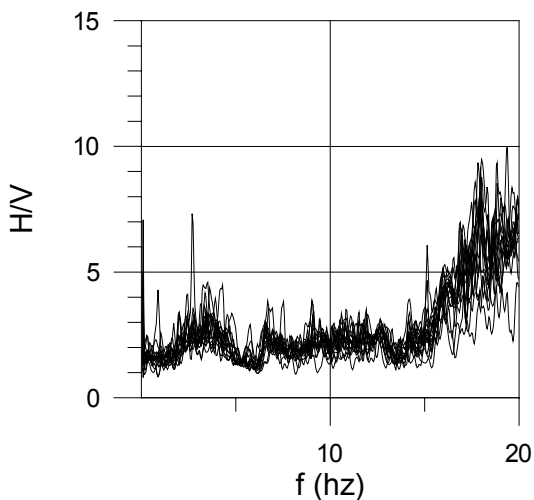


Fig. 1.- Ensayo de estacionariedad en afloramiento rocoso en el Observatorio Fabra

rocoso. Se considera además que los microtemblores horizontales se amplifican debido a multirreflexiones de la onda S, en tanto que los microtemblores verticales lo hacen por multirreflexiones de la onda P .

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical. De esta forma, la magnitud de su efecto puede ser conocida a partir de la relación

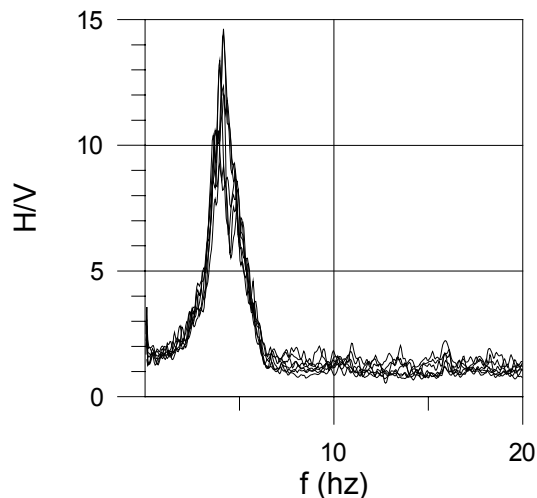


Fig. 2.- Ensayo de estacionariedad en material sedimentario de bajo espesor en el Campus de la Universidad Politécnica de Cataluña

incidente entre el basamento rocoso y las capas superficiales, respectivamente.

Sin embargo, el espectro de la componente horizontal en la superficie, S_{HS} , está afectado fácilmente por las ondas superficiales. Ya que en la mayoría de los casos el ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh, probablemente S_{HS} se encuentra afectado por éstas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie S_{VS} , pero no en el espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento S_{VB} .

equipos, para poder utilizar con alto grado de fiabilidad, indistintamente, los resultados con los datos registrados con el acelerómetro o con el velocímetro.

Método de Nakamura

El método propuesto por Nakamura(1989) para estimar la función de transferencia aproximada de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microtemblores está compuesto por varios tipos de ondas. El método pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que los microtemblores en la base rocosa son similares horizontal y verticalmente. Dichos microtemblores son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el substrato

Normalmente, el efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente la unidad. En la medida en que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Generalmente la función de transferencia S_T de estratos superficiales se define de la siguiente forma:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

donde S_{HS} y S_{HB} son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en la superficie y el

Nakamura asume que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales, E_S representa el efecto de la onda Rayleigh en el movimiento vertical: donde:

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

Si no hay onda Rayleigh, $E_S = 1$. Si se aumenta el efecto de la onda Rayleigh, E_S se hace mayor que la unidad.

También asume que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal, se considera que S_{TT}/E_S es una función de transferencia S_{TT} más fiable, después de eliminar el efecto de las ondas Rayleigh.

Si:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} \quad (3)$$

$$S_{TT} = \frac{R_S}{R_B}$$

Donde:

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}}$$

R_S y R_B obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical, para los microtemblores en superficie y en el basamento. R_B está cerca de la unidad para un rango, relativamente amplio, de frecuencias, para registros obtenidos en afloramiento rocoso. Esto implica que para el basamento la propagación es la misma en todas las direcciones.

y por lo tanto $R_S \cong 1$
 $S_{TT} \cong R_S$

Esto significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir, únicamente, del movimiento en superficie. En otras palabras, el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el sustrato. Pero R_S se vuelve más o menos 1 en el rango de frecuencias donde la onda Rayleigh prevalece, y esto no es notorio en la función de transferencia estimada. Hasta este punto se asume que R_S incluye dicho efecto con lo cual se elimina el efecto de la onda Rayleigh. Sin embargo, es importante recordar que la exactitud de la estimación decae cuando existe un ruido coincidente con la frecuencia predominante de la función de transferencia estimada.

R_B puede estar libre del efecto de las ondas Rayleigh y tener exclusivamente las características de un punto dado. Consecuentemente, una S_{TT} más fiable puede estimarse multiplicando por $1/R_B$ como un término de compensación cuando se suministra la información del basamento .

Ventajas

Sin lugar a dudas la ventaja más importante del método de Nakamura es la facilidad de la realización de las mediciones y el procesamiento de las mismas, lo cual se traduce en bajos costos. A lo largo del texto se ha recalcado el hecho de que Nakamura estima una

función de transferencia aproximada de los suelos sedimentarios ubicados sobre un basamento rocoso. El método es capaz de diferenciar diferentes tipos de material (Alfaro, 1997) no sólo en cuanto al período predominante sino también en cuanto a la amplitud del microtemblor.

Otra de las ventajas es que las mediciones se pueden realizar indistintamente con acelerómetro o con velocímetro (Alfaro, 1997) siempre y cuando los niveles de ruido ambiental son de cierta consideración, como es el caso de las grandes ciudades.

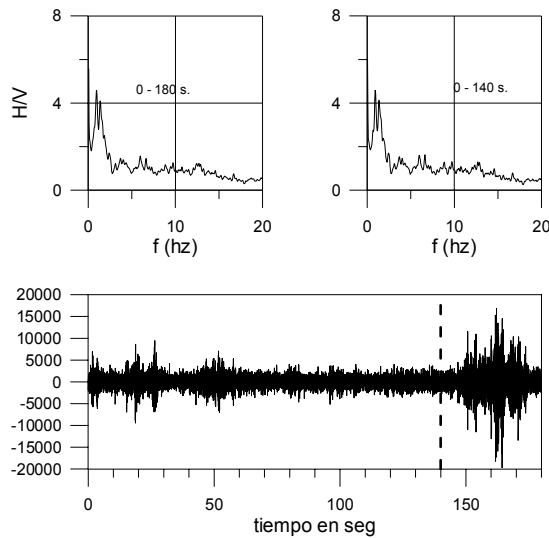


Fig. 3.-Comparación entre la función de transferencia utilizando toda la longitud del registro(0-180 s.) o la parte con amplitudes medias constantes(0-140 s.). Registro BAI3.

instrumento de medición. Se realizaron más de 30 pruebas al respecto determinando el período predominante analizando todo el registro o los intervalos en los cuales la amplitud media era aproximadamente constante, en las figuras 3 y 4 se observan dos ejemplos.

Limitaciones

Según Nakamura (1989) el método del cociente espectral permitiría obtener la función de transferencia aproximada del suelo tanto los períodos predominantes del suelo y las amplificaciones asociadas. Sin embargo, algunas investigaciones teóricas y trabajos experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que no es así, ya que el método únicamente permite la determinación del período predominante.

Pero tal vez la mayor limitación del método es que presenta vacíos teóricos, como han anotado Konno y Ohmachi (1998), lo que se traduce que en ciertos casos el método funcione

Los análisis de estacionariedad permiten identificar la presencia de fuentes fijas que excitan el suelo a una determinada frecuencia, como puede observarse en la Figura 1, en la cual aparece frecuencia espuria en tres hz y alguna fuente que excita durante ciertas horas del día la frecuencia alrededor de los 16 hz. Para el caso del suelo sedimentario de bajo espesor (Figura 2) se descarta la presencia de fuentes fijas que no actúen durante todo el día. También es importante mencionar que las mediciones y resultados son independientes de la hora del día en que se realicen, o lo que es lo mismo del nivel de ruido ambiente existente.

Otra de las ventajas encontradas es que no es necesario descartar del análisis aquellos intervalos del registro en los que hay fuentes puntuales identificadas, como es el caso del paso de un coche o de un peatón en las cercanías del

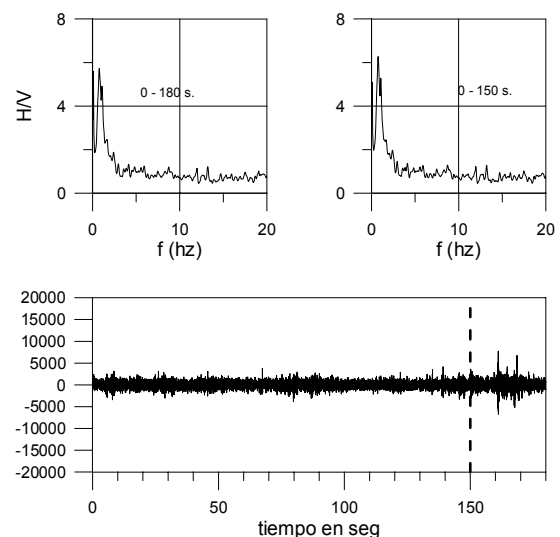


Fig. 4.-Comparación entre la función de transferencia utilizando toda la longitud del registro(0-180 s.) o la parte con amplitudes medias constantes(0-150 s). Registro BAL3.

y en otros no (Ingeominas, 1997). Para solucionar este inconveniente, Konno y Ohmachi (1998) han formulado la técnica de la razón espectral (H/V) en términos de ondas superficiales y proponen analizar los picos y también los valles de la relación H/V.

Desde el punto de vista de Análisis de Señales, Alfaro et al. (1999) proponen dos métodos alternativos para evaluar la relación H/V, una basada en el cociente energético de las señales, a partir de la evaluación de las densidades espectrales y un segundo método teniendo en cuenta la coherencia de las componentes vertical y horizontal, ya que la coherencia mostraría la linealidad del modelo considerado (Bendat y Piersol, 1986).

Discusión y Conclusiones

La utilización de microtemblores ha sido muy útil para la microzonificación sísmica (Kanai y Tanaka, 1961), la propuesta de Nakamura (1989) para estimar la función de transferencia del suelo no requiere de instrumentación ni procesamientos sofisticado, permitiendo en muchos casos la diferenciación de materiales del subsuelo, tanto por sus características físicas como por su espesor.

El método aporta gran cantidad de información en tiempos y a costos reducidos. Sin embargo, para las labores de microzonificación sísmica debe estar acompañado de otras metodologías para complementar la información obtenida.

Desde el punto de vista teórico es indispensable seguir trabajando en la conformación de un marco teórico adecuado que explique específicamente que tipos de ondas constituyen los microtemblores y como la transmisión de estas de información del suelo.

Referencias

- Alfaro, A. (1997). Estimación de Períodos Predominantes de los Suelos de Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc. Thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona. España. Informe ICC No. GS091-97.
- Alfaro A., J. J. Egozcue y A. Ugalde (1999). Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica. España. (Enviado en este volumen).
- Bendat J. S. y A. G. Piersol (1986). Random Data. Analysis and Measurements Procedures, Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Euroseismod (1998). Development and Experimental Validation of Advanced Modelling Techniques in Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Final Report, Project ENV4-CT96-0255.
- Ingeominas y Universidad de Los Andes. Eds. (1997). Microzonificación Sísmica de Santa Fé de Bogotá, Bogotá.
- Kanai K. and T. Tanaka. (1961). On Microtremors VIII, *Bulletin of the earthquake research Institute*. Vol 39 pp 97-114.
- Kinematics, (1995), Installation, Initial Startup and operating Instructions for Altus K2, High Dynamic Range Accelerograph, Rev B , Pasadena , California, USA.
- Konno, K. and T. Tanaka (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. of the Seism. Soc. Am.*, **88**, 228-241.
- Lachet, C. and P.Y. Bard. (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *J. Phys. Earth*, **42**, 377-397.
- Lermo J. y F. Chávez-García (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?,

Bull. of the Seism. Soc. Am., **84**, 1350-1364.

Nakamura, Y. (1989). A Method For Dynamic Characteristics Estimation Of Surface Using Microtremor On The Ground Surface, *Quarterly Report of Railway Tech Res. Inst.*, **30**, 25-33.

Navarro, M, F. Sánchez, A. Alfaro, Ll. Pujades, J. Canas, (1997), Primera campaña de densificación - Microzonificación Sísmica de Barcelona, Departamento de Física. Universidad de Almería.- Departamento de Ing. del Terreno y Cartográfica. ETSECCPB. Universidad Politécnica de Cataluña.

Agradecimientos

A. Alfaro cuenta con una beca de la Agencia Española de Cooperación Internacional y un crédito del ICETEX – Instituto Colombiano de Crédito Educativo y Estudios Técnicos en el Exterior. El Proyecto ha sido financiado parcialmente por el CICYT, proyecto AMB96-0996.