

Mediante el método geofísico del Registro Continuo de Ondas Superficiales (CSW)

Determinación de la rigidez y cálculo de los asentamientos de los suelos

La aplicación de los métodos sísmicos como herramientas auxiliares en los estudios geotécnicos es habitual y está suficientemente divulgada en variantes tales como la Sísmica de Refracción o las medidas sísmicas en sondeos, basadas todas ellas en el estudio de las ondas de compresión (*P*) o de cizalla (*S*). Sin embargo el empleo de los métodos basados en el estudio de las ondas superficiales –en concreto las del tipo *Rayleigh*– es muy limitado, pese a que sus fundamentos y características son perfectamente conocidos y a que en las últimas décadas se han desarrollado sistemas para su registro y análisis. De entre los métodos geofísicos en uso para el estudio de este tipo de ondas nos limitaremos en esta publicación al denominado *Registro Continuo de Ondas Superficiales (CSW)*. Nuestro objetivo es contribuir a su divulgación por el indudable interés de este método para la caracterización de cualquier tipo de suelos o de macizos rocosos en función de su rigidez, para evaluar la efectividad de los tratamientos de mejora en ellos y para el cálculo de asentamientos.

A l inicio de la década de 1.940 *Karl Terzaghi*, reconocido pionero de la mecánica de suelos, inició la utilización de los métodos sísmicos como herramienta auxiliar para la caracterización de los suelos partiendo de la base de que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas por el subsuelo depende del *módulo de Young* y del *Coefficiente de Poisson* *Therefore if is theoretically possible to obtain information on the elastic properties and on the thickness of the strata located beneath the surface of the earth by recording the vibrations produced by an impulse on the surface at different distances*

Basada en esta realidad, la aplicación de los métodos sísmicos en sus diversas variantes tales como la *Sísmica de Refracción* o las medidas sísmicas en sondeos (*Down-hole* o *Cross-hole*) se ha convertido progresivamente en una técnica auxiliar de empleo habitual en los estudios geotécnicos, con objetivos concretos que inicialmente se limitaban a la localización de los contactos entre unidades geológicas de diferente naturaleza o de accidentes puntuales como por ejemplo zonas de falla. El siguiente paso en la utilización de estos métodos se ha centrado en **la caracterización** propiamente dicha, resolviendo algunos problemas tales como evaluar la excavabilidad del terreno, determinar el espesor y las características de los recubrimientos y de la zona meteorizada o determinar los módulos dinámicos.

En estas aplicaciones clásicas se ha utilizado preferentemente la familia de ondas sísmicas definidas genéricamente como volumétricas porque se transmiten en todas las direcciones a través del terreno y que son de dos tipos: *Ondas de compresión (P)* y *Ondas de cizalla (S)*. Los diversos métodos utilizados para su estudio, en superficie o en sondeos, están

Palabra clave: ASENTAMIENTO, DEFORMACIÓN, DIAGRAMA DE DISPERSIÓN, ESFUERZO, MÓDULOS DINÁMICOS, ONDAS SUPERFICIALES, RIGIDEZ, TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.



Ángel GRANDA SANZ (*), Ing. de Minas.
Teresa GRANDA PARÍS.(*), Ing. de Minas.

(*) INTERN. GEOPHYSICAL TECHNOLOGY, S.L. (IGT)

suficientemente divulgados y pese a su importancia no son de interés para esta publicación.

Así pues, nos centraremos exclusivamente en otro tipo de ondas sísmicas, las *ondas superficiales*, en su estudio mediante el método *Continuous Surface Waves (CSW)* y en su interés principalmente para la caracterización de suelos (aunque también son aplicables al estudio de medios rocosos). Aclaremos en este punto que no nos estamos refiriendo a métodos de reciente desarrollo, ya que los métodos geofísicos para el estudio de las ondas superficiales son conocidos desde hace décadas (*Hertwing* 1931 y *Jones*, 1958, etc) y se han venido utilizando en alguna de sus variantes para los estudios geotécnicos desde la década de 1.970 - 1.980 (*Ballard et al* 1975 y *Nazarian et al* 1984).

En cuanto al método *CSW* –objeto de esta comunicación–, también existen referencias relativamente antiguas (*Abbiss* 1981) pero su mayor desarrollo y puesta a punto de forma plenamente operativa se produjo a partir de 1.997. De todos modos (*Matthews et al*, 1996) su divulgación y utilización no ha corrido en paralelo a su capacidad a pesar de su fiabilidad y bajo coste, debido en parte a la falta de métodos reconocidos para demostrar la representatividad de sus resultados.

Pese al completo conocimiento de los fundamentos teóricos y de las leyes que controlan el comportamiento de las ondas superficiales y sus relaciones con los módulos dinámicos y con el *Coefficiente de Poisson*, la aplicación de los métodos geofísicos basados en estos tipos de ondas a los estudios geotécnicos se vio limitada en las décadas de 1.960 - 1.970 por las carencias instrumentales para su registro y su procesado, situación que se ha mantenido hasta los años 1.990's. El avance sustancial experimentado al respecto en estos años ha sido básicamente el empleo de computadores portátiles que permiten la aplicación de la *Transformada Rápida de Fourier* junto con el análisis espectral de los registros sísmicos.

Al mismo tiempo el interés por parte de los expertos en Geotecnia ha pasado de los estudios de la resistencia y la estabilidad del terreno hacia la **evaluación de su deformación**. En esta línea de predicción de asentamientos o del comportamiento de los suelos al ser sometidos a esfuerzos o cargas, la determinación de la rigidez del terreno se ha convertido en un dato fundamental para poder realizar estimaciones cuantitativas y en este punto es donde el método *CSW* juega un papel de indudable interés para los estudios geotécnicos.

El creciente empleo de los métodos sísmicos y en concreto del método *CSW* para la medida *in situ* de la consistencia o la rigidez del terreno está justificado no sólo por la fiabilidad y la representatividad de sus resultados, sino también por sus ventajas indiscutibles respecto a algunos ensayos de laboratorio. Estos ensayos se realizan sobre muestras de material obtenidas mediante sondeos con la inevitable modificación de sus características. Asimismo presenta ventajas respecto a otros ensayos de campo tales como el de las pla-

cas de carga, el penetrómetro o el C.P.T. (Menziés, B. 1.996).

Las medidas sísmicas involucran el efecto de un considerable volumen del terreno en sus condiciones reales in situ y ello elimina las posibles distorsiones comunes en algunos ensayos. Entre las más habituales están las producidas por heterogeneidades puntuales tales como bollos o bloques de material consolidado en los ensayos STP realizados en suelos heterogéneos. Asimismo estas medidas evitan todos los problemas y los costes derivados de la perforación de sondeos y de la consiguiente toma de muestras, que difícilmente mantienen las condiciones geomecánicas del terreno *in situ*.

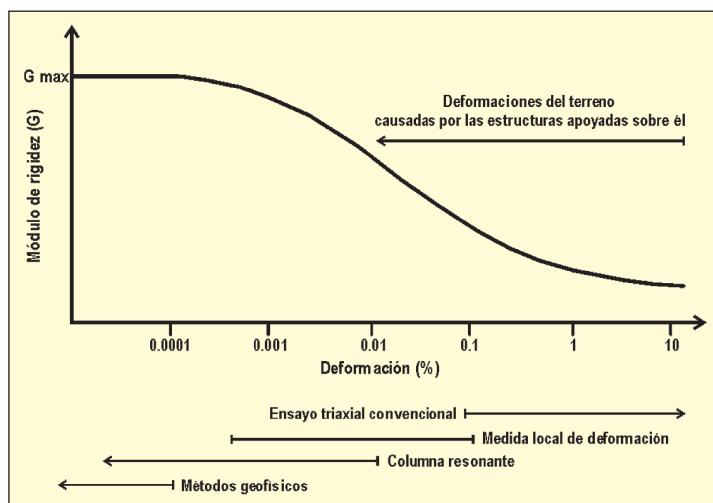
La mayoría de los métodos de estimación de asentamientos que utilizan el valor del módulo de Young (E) medido en compresión mediante ensayos triaxiales tienden a producir valores sobreestimados. El análisis comparativo de los módulos E y G obtenidos por diversos métodos, (Jardine et al 1978), demuestra que los valores de la rigidez del suelo determinados mediante diversos tipos de ensayos son dependientes del nivel de deformación aplicado durante el ensayo. Esta idea se ilustra en la Fig. 1 que incluimos con autorización de GDS Instruments Ltd.

En la figura anterior se pone de manifiesto que la deformación producida por la propagación de las ondas sísmicas se sitúa en el rango menor de 0'001% en el que los suelos tienen un comportamiento elástico; por ello las determinaciones realizadas mediante métodos sísmicos proporcionan los valores máximos de la rigidez del terreno G_{max} ; valores representativos de deformaciones próximas a 0.

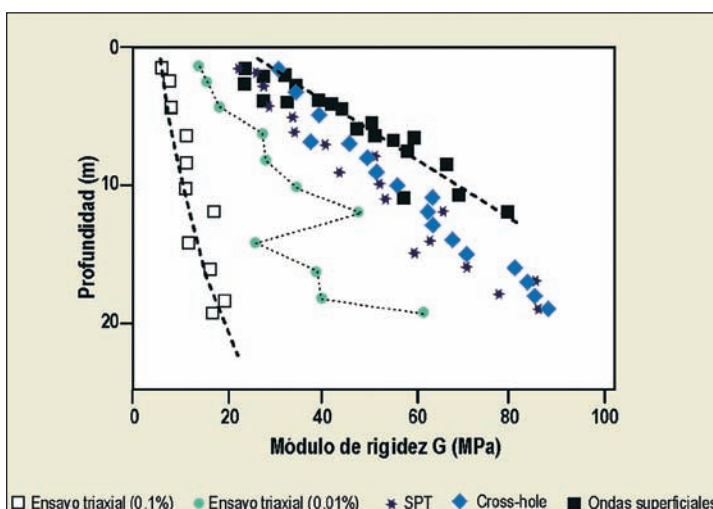
Por otra parte (Jardine et al 1986) la deformación asociada a la interacción suelo-estructura en la mayoría de los casos es menor del 0'1% y en consecuencia las predicciones de deformación pueden hacerse para valores de rigidez correspondientes a pequeñas deformaciones, exactamente la información que pueden proporcionar el método geofísico CSW.

Es de interés e inevitable en el contexto de este artículo, hacer algún tipo de comparación entre los valores de la rigidez del terreno determinados a partir de medidas geofísicas y los obtenidos por otros métodos convencionales. Matthews et al (1993) demostraron en un estudio muy detallado sobre suelos cohesivos heterogéneos que los resultados de los ensayos de compresión triaxial definen el límite inferior mientras que las medidas geofísicas determinan la envolvente de los valores máximos del módulo de rigidez (G). Ver Fig. 2.

Resumiendo lo anterior en palabras de Menziés (2003), los métodos geofísicos y el método CSW en particular, determinan el valor máximo del módulo de rigidez (G_0) del terreno es decir, una propiedad del mismo que permite caracte-



[Figura 1] .- Relación entre rigidez y deformación para suelos. Los valores de la rigidez dependen del nivel de deformación alcanzado durante el ensayo.



[Figura 2] .- Distribución de los valores del módulo de rigidez en función de la profundidad, medidos por diversos métodos (Matthews et al. 1993).

rizarlo, a diferencia de un parámetro. Un parámetro es lo que se obtiene por otros procedimientos de campo o de laboratorio y sus resultados dependen del método de medida.

Hasta fechas recientes se mantenía entre los geotécnicos la falsa idea de que la determinación de la rigidez del terreno para bajos niveles de deformación era muy diferente de los valores requeridos para el cálculo de la interacción suelo-estructura. Esta idea se ha demostrado errónea y multitud de resultados y estudios la han rebatido (Matthews et al 1993). Se ha contribuido así en establecer que las medidas geofísicas y en concreto los métodos basados en el estudio de las ondas superficiales, constituyen el mejor procedimiento para determinar la rigidez del terreno, además de ofrecer otras ventajas no menos importantes relativas a la representatividad de los resultados, a su rapidez de ejecución y a su bajo coste al no requerir la perforación de sondeos.

Algunas ideas respecto a los métodos sísmicos basados en el estudio de las ondas superficiales

La aplicación de un esfuerzo puntual mediante la liberación instantánea de energía en un punto del terreno produce una deformación pro-

porcional a tal esfuerzo, gobernada por la Ley de Hooke para esfuerzos relativamente pequeños que no sobrepasen el límite elástico del terreno. A partir del instante en que se rompe el equilibrio entre esfuerzo y deformación, por ejemplo cuando cesa el esfuerzo aplicado, la deformación se propaga a través del terreno como una onda elástica. Son varios los tipos de ondas que se generan y propagan a partir de este momento. A efectos teóricos por su diferente comportamiento y propiedades y por sus aplicaciones a los estudios geotécnicos, cabe clasificarlas en dos grupos bien diferenciados:

Ondas volumétricas que se transmiten en todas direcciones a través del material pudiendo sufrir en su tránsito procesos de refracción y reflexión. Son las ondas de compresión (P) y las de cizalla (S) que no son objeto de esta publicación. Nos limitaremos a algún comentario en lo que se refiere a la relación entre los valores de V_S y los correspondientes valores de V_R de las ondas superficiales del tipo Rayleigh.

Ondas superficiales. En medios uniformes de extensión infinita únicamente se desarrollan ondas P y S pero en terrenos heterogéneos, no uniformes en sus propiedades geotécnicas, aparecen otros tipos de ondas de las que las

más importantes son las ondas superficiales. Estas señales sísmicas se propagan cerca de la superficie, hasta una profundidad que depende de su longitud de onda y a una velocidad que depende de su frecuencia, lo que se define como un comportamiento **dispersivo**.

Existen dos tipos de ondas superficiales: *Rayleigh* y *Love*. En este caso nos referiremos exclusivamente a las primeras descritas por *Rayleigh* en 1.885, señalando brevemente sus principales características. Estas ondas producen un movimiento de partícula de tipo elipsoidal en planos verticales, se propagan de forma unidireccional y su amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad.

La propagación de las ondas *Rayleigh* se produce paralela a la superficie del terreno a una profundidad igual a su longitud de onda y a una velocidad que es función de las propiedades elásticas del terreno y de su densidad.

En un medio elástico e isótropo la relación entre la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (V_S) y los módulos elásticos, viene definida por la expresión $V_S = (G / d)$, en la que d es la densidad. Por otra parte, entre el módulo de rigidez G y el módulo de Young (E) existe la conocida relación $G = E / (2(1+\nu))$, donde ν es el *Coefficiente de Poisson*.

Volviendo a las ondas *Rayleigh*, su velocidad de propagación (V_R) en un medio elástico está relacionada con V_S por la fórmula $V_R = C \cdot V_S$; donde la constante C es función del *Coefficiente de Poisson* y varía entre 0'911 y 0'955. En consecuencia, es factible determinar el módulo de rigidez del terreno (G) o mejor dicho, la distribución de sus valores en función de la profundidad, a partir de la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas *Rayleigh* (V_R).

Puesto que estas ondas se transmiten por el terreno a una velocidad que depende de la consistencia del mismo en función de la profundidad, pueden ser utilizadas para determinar el **perfil de la rigidez in situ del terreno**, tanto si está constituido por suelos cohesivos o granulares como si se trata de rocas.

Existen tres métodos o variantes geofísicas habitualmente utilizadas para el estudio de las ondas superficiales tipo *Rayleigh* con el fin de determinar la distribución de sus valores de V_R en función de la profundidad:

- Sísmica Pasiva (*ReMi* en la literatura anglosajona).
- Análisis Espectral de las Ondas Superficiales (*SASW*).
- Registro Continuo de Ondas Superficiales (*CSW*).

El primero de ellos se basa en el análisis espectral del ruido sísmico ambiental (*Granda et al 2005*) y tiene su campo de aplicación especialmente en ámbitos con elevado nivel del rui-

do ambiental, como por ejemplo las zonas urbanas o industriales, lo que por otra parte representa una limitación para la aplicación de otros métodos sísmicos convencionales.

El método **SASW** utiliza como fuente de energía para la generación de las ondas sísmicas el impacto de un martillo sobre el terreno (*Tokimatsu et al 1991*), y su efectividad y capacidad resolutive depende del espectro de frecuencia de la señal, es decir que es función de la masa del martillo empleado para producirla, es decir de la energía del impacto. Por ello en su aplicación es necesario el empleo de diferentes martillos para cubrir el rango de frecuencia entre 3 y 200 Hz aproximadamente de forma continua, sin zonas ciegas, lo cual es difícil de conseguir a veces, y ello constituye su principal punto débil.

El método del Registro Continuo de Ondas Superficiales (CSW)

El aspecto específico de este método es que las señales sísmicas se producen mediante un vibrador que opera controlado por un PC portátil. Se producen así impactos verticales a frecuencia constante y seleccionable a voluntad por el operador en el rango desde 5 hasta más de 200 Hz y con incrementos de 5 Hz, que pueden llegar hasta 0'1 Hz cuando se trata de obtener un perfil continuo de la rigidez del terreno operando a frecuencias menores de 10 Hz.

Las señales sísmicas generadas por el vibrador son recogidas por geófonos verticales de baja frecuencia (2 Hz) distribuidos a intervalos regulares, alineados con el vibrador según se indica en la **Fig. 3**. Posteriormente son registradas de forma digital en el dominio de tiempos para su posterior análisis en el dominio de frecuencias.

El esquema descriptivo de las etapas seguidas para el procesado y el análisis de los registros sísmicos queda detallado en la **Fig. 4** y brevemente se describe a continuación.

El primer paso del procesado de los datos se efectúa mediante la **Transformada Rápida de Fourier (FFT)** pasando los registros sísmicos

del dominio de tiempos al dominio de frecuencias. A continuación y operando en este dominio, se determina la fase de la señal recibida por cada geófono con respecto a las señales producidas en el vibrador. A partir de estos datos resulta inmediato el cálculo de la longitud de onda (λ) de las ondas *Rayleigh* y su velocidad V_R de transmisión por el terreno para una frecuencia determinada.

$$\lambda = 2\pi \cdot \delta d / \delta \Phi$$

donde:

λ = longitud de onda.

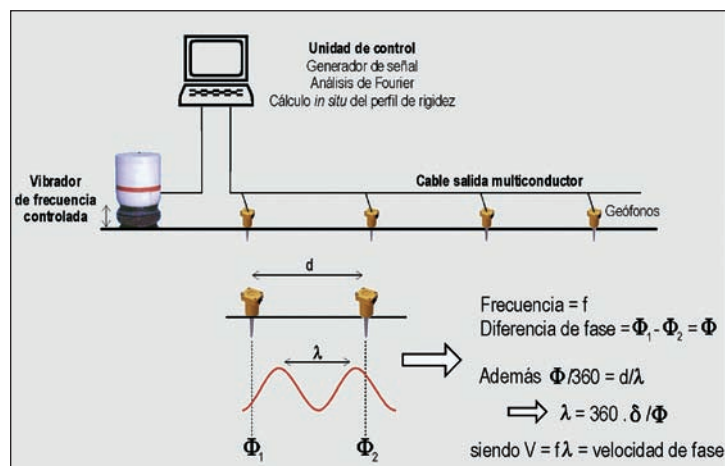
$\delta d / \delta \Phi$ = gradiente de fase versus distancia entre los sensores.

Por su parte la velocidad de fase V_R para una frecuencia determinada viene definida por la expresión $V_R = f \lambda$. Los resultados de estos cálculos realizados individualmente para los registros obtenidos con cada una de las frecuencias (f) de operación del vibrador en cada punto de estudio configuran la curva de dispersión (Velocidad de fase versus longitud de onda).

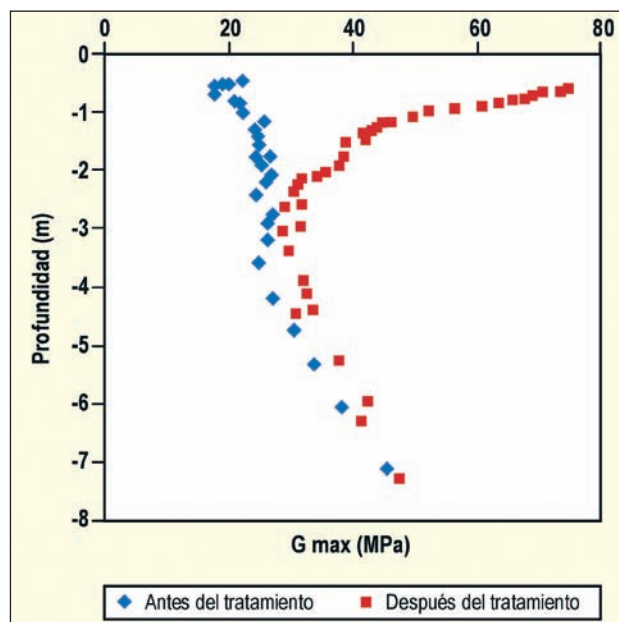
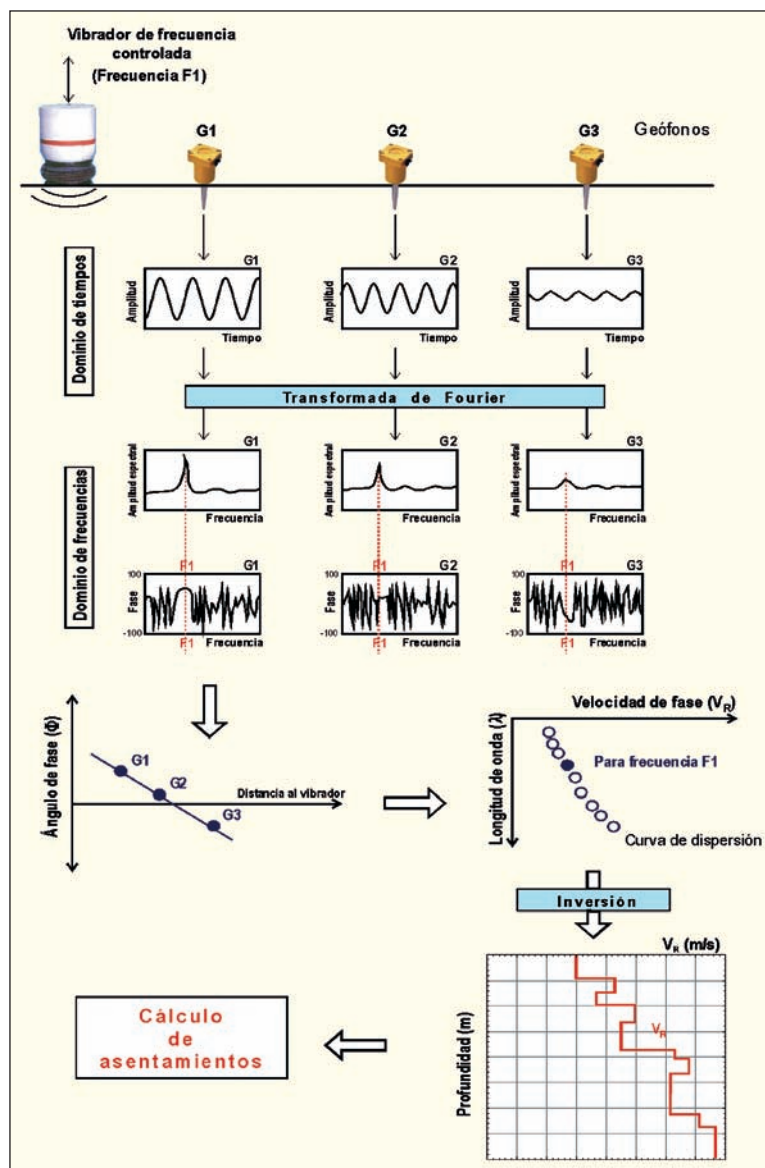
La última etapa del proceso consiste en la inversión de la curva de dispersión para obtener un diagrama *1D* con la distribución de los valores de la velocidad V_R del terreno en función de la profundidad, o dicho en otros términos, un perfil de la rigidez del terreno en función de la profundidad.

Es innecesario extenderse aquí en explicaciones relativas a los diversos métodos de inversión de la curva de dispersión (*Clayton et al 1995* y *Lai et al 1998*) por ser un tema muy específico de carácter matemático y por ello ajeno al objetivo general de este artículo.

Algunos de estos métodos de inversión como el de aproximación por elementos finitos o el de los modelos lineales son complejos después de la toma de datos. Sin embargo el denominado *factored wavelength* es más sencillo y rápido aunque menos preciso. Este método puede aplicarse directamente durante la ejecución de las medidas en campo y propor-



[Figura 3] .- Esquema del dispositivo empleado para las medidas con el sistema CSWS y posterior cálculo de las velocidades de fase en función de la frecuencia.



[Figura 5] .- Resultados típicos de un estudio mediante el método CSW para evaluar la eficacia de un tratamiento de mejora del terreno en una zona constituida por suelos blandos (Moxhay et al. 2000).

[Figura 4] .- Explicación del procesamiento de los registros sísmicos y la obtención de la curva de dispersión y el perfil de rigidez del terreno.

ciona una información preliminar en forma de diagrama rigidez-profundidad que se va actualizando automáticamente al progresar las medidas, de modo que el técnico que lleva a cabo los ensayos puede conocer hasta qué punto los resultados van cubriendo los objetivos del estudio y decidir las acciones que procedan para mejorarlos.

Aplicaciones del método CSW

Como ocurre con la mayor parte de los métodos sísmicos, se pueden enumerar varias aplicaciones en las que se ha contrastado la efectividad del método CSW y que han sido publicadas. La lista puede hacerse extensa para que resulte más atractiva pero en esencia todas estas aplicaciones se reducen a las siguientes:

- Determinación del perfil de rigidez del terreno y localización de posibles variaciones laterales o zonas anómalas.
- Evaluación de la eficacia de los tratamientos de mejora del terreno.

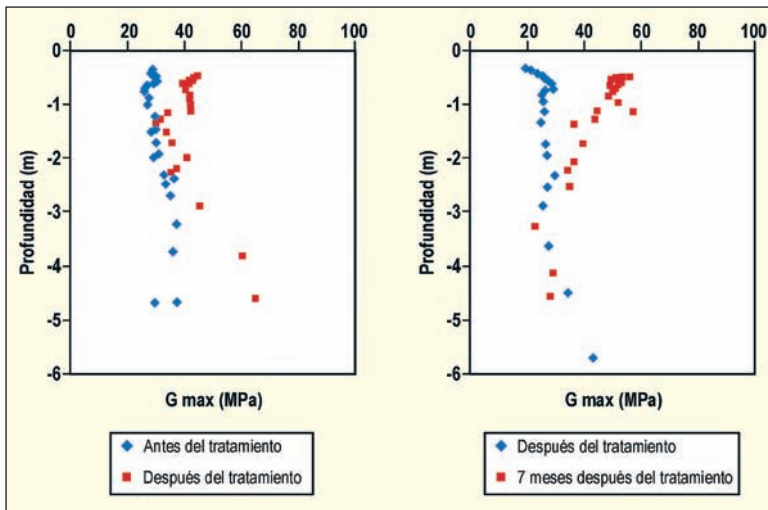
- Estimación del potencial de liquefacción del terreno.
- Cálculo de la deformación del suelo al someterlo al efecto de las estructuras apoyadas en él.

Pese a que la utilización de este método es habitual en multitud de estudios geotécnicos en algunos países, son muy escasas (Cuéllar et al 1995) o inexistentes las referencias de su utilización en España donde tradicionalmente ha existido hasta fechas recientes un retraso considerable en lo que respecta al empleo de los métodos geofísicos en el ámbito de la Geotecnia. En consecuencia, la presentación de ejemplos representativos de su aplicación ha de hacerse a partir de las referencias tomadas de autores como Moxhay A.L., et al 2000 ó Menzies et al 2002, que han venido publicando en los últimos años los resultados de diversos estudios de aplicación del método CSW para comprobar de forma no destructiva la eficacia de diversos tratamientos estándar para la mejora del terreno.

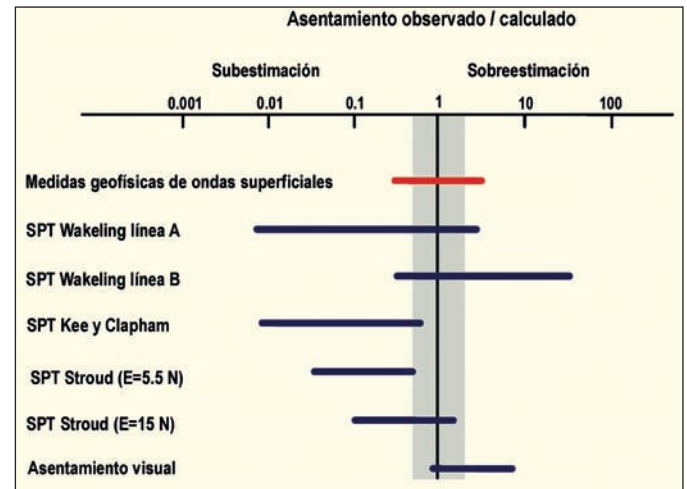
Por ser muy representativa de uno de los campos de aplicación de este método, nos referimos seguidamente a una publicación de Moxhay et al 2008. En ella se analizan los resultados de las campañas de medidas con el método CSW llevados a cabo en al menos cuatro emplazamientos diferentes constituidos por suelos cohesivos heterogéneos, suelos granulares o incluso sobre rellenos, antes y después de realizar en ellos tratamientos de mejora mediante columnas de grava o compactación dinámica.

Con las variaciones puntuales derivadas de las particularidades geotécnicas de cada emplazamiento y de los tratamientos realizados, el modelo de respuesta o el estilo general de los resultados de los estudios realizados con el método CSW es del tipo indicado en la Fig. 5. En todos los casos los resultados ponen de manifiesto un incremento más o menos importante en los valores de la rigidez del terreno en la zona mejorada, e incluso por debajo de la profundidad alcanzada por las columnas de grava, que en caso al que se refiere esta figura fue de 1'75 metros.

Es interesante la observación de Moxhay et al 2000 respecto a la variación de la rigidez del terreno en función del tiempo transcurrido desde las operaciones de mejora. En un estudio realizado en Swanscombe (Kent) se comprobó cómo los valores de G_{max} determinados mediante el método CSW algunos meses después del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava eran sensiblemente más altos que los obtenidos inmediatamente después del tratamiento (Fig. 6). Es decir que las medidas geofísicas demuestran en



[Fig. 6].- Resultados de un estudio mediante el método CSW que demuestran un incremento de la rigidez del terreno con el paso del tiempo en una zona en la cual se había llevado a cabo un tratamiento de mejora del terreno (Moxhay et al. 2000).



[Figura 7] .- Comparación de los asentamientos observados y los calculados, según diferentes ensayos (Matthews et al. 1993).

este caso cómo la rigidez del terreno se incrementa a lo largo del tiempo debido muy probablemente a un proceso de autocompactación.

La estimación de los **asentamientos del terreno** por efecto de las estructuras apoyadas en él constituye uno de los aspectos de mayor interés del método **CSW** porque de sus medidas se puede obtener **el perfil de rigidez del terreno en función de la profundidad**, y esta información es necesaria **para los referidos cálculos de asentamientos**.

El método **CSW** proporciona los valores de G_{max} que son los correspondientes a muy pequeñas deformaciones del terreno, notablemente menores que las correspondientes a las situaciones reales de ingeniería civil. Moxhay et al 2008 describen un procedimiento de cálculo que utiliza estos valores de G_{max} para calcular el módulo de Young (E) para los niveles de deformación reales que se producen en las condiciones de apoyo de cimentaciones de estructuras para, desde esta premisa, poder predecir de forma precisa y fiable los asentamientos del terreno. Los datos de partida para estos cálculos son:

- Valores de G_{max} en MPa (MN/m^2) en función de la profundidad medidos por el método **CSW**.
- Características de la cimentación, tamaño, forma, profundidad.
- Carga aplicada, g , en kPa (KN/m^2).

Puesto que este método se basa en medidas de las propiedades elásticas del terreno, sus estimaciones se limitan al **asentamiento inmediato**, y por ello puede argumentarse que tales predicciones puedan tener muy pequeño margen de seguridad al no tener en cuenta el **asentamiento secundario** o a largo plazo.

Sin embargo, las medidas del método **CSW** caracterizan el terreno hasta un rango de profundidad considerable, y ello induce la tendencia a sobreestimar el asentamiento proporcionando resultados que se desvían hacia el

lado de la seguridad. Moxhay et al 2008 explican claramente tal sobreestimación en función del procedimiento seguido en los cálculos y por el hecho de que la rigidez del terreno tiende a incrementarse de forma natural a lo largo del tiempo.

La principal conclusión de los trabajos de Moxhay et al 2008 es que el método **CSW** ha demostrado ser una **herramienta fiable** y precisa para la evaluación de las condiciones geotécnicas del terreno, pero su empleo sistemático se ha visto limitado debido a que sus medidas se obtienen para muy bajos niveles de deformación en vez de para niveles de deformación operacionales o correspondientes a las interacciones reales de las estructuras con el terreno. El método de cálculo de asentamientos descrito por estos autores, basado en las medidas **CSW**, produce resultados precisos **porque convierte estos datos a un nivel superior de deformación** más próximo a las condiciones reales del terreno al ser sometido al efecto de las estructuras apoyadas en él (Fig. 7).

Bibliografía

- ABBISS, S.P. (1981). *Shear wave measurements of the elasticity of the ground*. *Geotechnique*, 31 (1), 91-104.
- BALLARD, R.F. AND McLEAN, F.G. (1975). *Seismic field methods for in-situ moduli*. *Proc. Conf. on In situ Measurement of Soil Properties. Speciality Conference of the Geotechnical Engineering Division A.S.C.E., Raleigh, North Carolina*, 1, 121-150.
- CLAYTON, D.R.I., MATTHEWS, M.C., GUNN, M.L., FOGED, N. AND GORDON, M.A. (1995). *Reinterpretation of surface wave test for the resund crossing*. *Proc. 11th European Conf. on Soil Mech. and Found. Engng. Copenhagen, Danish Geotechnical Society, Copenhagen*, 1, 141-147.
- CUELLAR, V., MONTE, J.L. AND VALERIO, J. (1995). *Characterization of waste landfills using geophysical methods*. *Proc. 11th European Conf. on Soil Mech. and Found. Engng. Copenhagen, Danish Geotechnical Society, Copenhagen*, 2, 33-38.
- GRANDA ET AL 2005. *El método de la Sísmica Pasiva. Una herramienta fiable para la caracteri-*

zación geotécnica del terreno en zonas urbanas. INGEOPRES 137, 78-84.

- HERTING, A. (1931). *Die Dynamische Bodenuntersuchung' Der Bauingenieur*, No. 25, pp. 457-461 and No. 26, pp. 476-480.

- JONES, R.B. (1958). *In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods*. *Geotechnique*, 8 (1), 1-21.

- LAI, C.G. AND RIX, G.J. (1988). *Simultaneous inversion of Rayleigh Phase velocity and attenuation for near-surface site characterization*. *Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA*.

- MATTHEWS, M.C. (1993). *Mass compressibility of fractured chalk*. *PhD Thesis, University of Surrey*.

- MATTHEWS, M.C., CLAYTON, C.R.I. AND OWEN, Y. (2000). *The use of field geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters*. *Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng. January*.

- MATTHEWS, M.C., HOPE, V.S. AND CLAYTON, C.R.I. (1996). *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*. *Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng 119, April, 84-95*.

- MENZIES, B. ET AL (2002). *Near-surface site characterization by ground stiffness profiling using surface wave Geophysics*. *GDS Instrument Ltd*.

- MOXHAY, A.L. ET AL (2008). *The prediction of ground settlement from continuous surface wave data*. *Ground Engineering, 34-38*.

- NAZARIAN, S. AND STOKOE, K.H. (1984). *In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves*. *Proc. 8th World Conf. on Earthquake Engineering*, 3, 31-38.

- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. *J. Wiley and Sons, New York, 1943*.

- TOKIMATSU, K., KUWAYAMA, S., TAMURA, S. AND MIYADERA, Y. (1991). *VS determination from steady state Rayleigh wave method*. *Soils and Foundations, 31 (2), 153-163*.

IGT-INTERN. GEOPHYSICAL TECHN.

Fuerteventura, 4 - 1º 4
28703 S.S. de los Reyes (Madrid)

Tel.: 91 519 99 15

Fax: 91 519 51 50

E-mail: info@igt-geofisica.com

E-mail: www.igt-geofisica.com