REVISTA DE INVESTIGACIÓN - VOL. 4: 173- 180 DICIEMBRE 2004

Caracterización dinámica de arcillas sobre la formación Bogotá*

ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO[1]
LUCÍA DEL PILAR MONROY PEDROZA[2]

1.International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Tatehara, Tsukuba, Ibaraki 305-0802, Japan.
2 . Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D. C., Colombia.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la caracterización dinámica de arcillas sobre arcillolitas de la Formación Bogotá en el piedemonte oriental de la ciudad de Bogotá. Se utilizaron los siguientes métodos: estimación simplificada con los datos de espesores, velocidades de corte Vs y densidades; modelación numérica unidimensional y modelación numérica bidimensional. Para realizar una modelación numérica realista es necesario conocer las características geológicas, geotécnicas y geofísicas del subsuelo. Se utilizó información de ensayos triaxiales cíclicos, y velocidades de ondas sísmicas Vs y Vp de ensayos geofísicos tipo *Down Hole* y perfiles sísmicos. Los resultados muestran que los métodos simplificados dan valores similares cuando hay altos contrastes de impedancia, estratos definidos y aproximadamente horizontales. Sin embargo con superficies inclinadas se presentaron diferencias significativas. Estos resultados indican la conveniencia de la adecuada caracterización de los materiales y la importancia de una modelación 2D para obtener una aproximación realista al fenómeno de la evaluación de efectos sísmicos locales.

Palabras claves: formación Bogotá, arcillolita, modelación numérica, períodos dominantes, amplificación, sismo.

* Correspondencia: alfaroc@kenken.go.jp, aalfaroc@cable.net.co
Recibido: agosto 2 de 2004.
Aceptado: agosto 15 de 2004

Dynamic characterization of clays in the formation Bogotá

ABSTRACT

The objective of this work was the dynamic characterization of clay over claystones of the Bogotá Formation in Bogotá city. The following methods were used: the simplified estimation with layer thickness, shear velocity Vs and material densities; one-dimensional and bi-dimensional numeric modeling. In order to make a realistic numerical modeling it is necessary to know geologic, geotechnical and geophysical characteristics of soil materials. Data was used from cyclic triaxial tests; seismic wave velocities Vs and Vp from geophysics survey. Results show that simplified methods present similar values when there are significant impedances, well formed and horizontal layers. However, there were huge differences on sloped surfaces. Results show the convenience of the suitable characterization of materials and the importance of a modeling 2D for a more realistic approach to the site effect problem in some specific cases.

Key words: Bogotá formation, clay stone, numerical modeling, predominant period, amplification, earthquake.

Introducción

La Formación Bogotá es una de las estructuras geológicas mas importantes que subyacen y afloran en el oriente de la Sabana de Bogotá (Lobo-Guerrero 2002), ha dado origen a toda una serie de suelos arcillosos, muchos de ellos ubicados en el piedemonte de los cerros orientales de la capital de Colombia. La importancia de su caracterización dinámica radica en que un número apreciable de edificios y casa se encuentran construidas en suelos provenientes de esta Formación con espesores reducidos, lo que hace pensar que debido al contraste entre las impedancias del suelo residual y el basamento rocoso se puedan presentar amplificaciones significativas y adicionalmente los períodos de vibración del suelo sean similares a los periodos de vibración de las estructuras y se pueda ocurrir resonancia.

La caracterización dinámica de suelos en Ingeniería Sísmica busca determinar los períodos dominantes de los materiales del subsuelo y las amplificaciones asociadas con el fin de evitar problemas de resonancia en las edificaciones. Las edificaciones diseñadas y construidas en los últimos años son cada vez más rígidas, lo cual sugiere que sus períodos dominantes serán bajos. De otra parte, las zonas de piedemonte, como en este caso, tienen bajos espesores de suelo, coincidiendo en algunos casos con los de las estructuras, generando el fenómeno de resonancia, lo cual hace que se amplifiquen los desplazamientos y con ello se amplifican las fuerzas sísmicas actuantes. Hasta hace poco tiempo los ingenieros estructurales y geotecnistas centraban su atención en las características estáticas del suelo, principalmente capacidad de soporte y asentamientos esperados, dejando al margen lo correspondiente a la componente dinámica, es así como en la ciudad de Bogotá suelos con buenas capacidades de soporte y bajos asentamientos, pueden generar problemas de resonancia y viceversa.

El propósito de este trabajo fue la caracterización dinámica de arcillas sobre arcillolitas de la Formación Bogotá en el piedemonte oriental de la ciudad de Bogotá. Para la modelación numérica se utilizaron métodos unidimensionales (1D) cuya finalidad es determinar la respuesta del terreno ante un evento sísmico y métodos bidimensionales (2D) que involucran los efectos geométricos del sitio (Alfaro *et al.* 2004).

Materiales y métodos

Se seleccionaron columnas estratigráficas o perfiles geofísicos que presentaran la mayor cantidad de información geológica, geofísica y geotécnica disponible (la cual incluyó Velocidad de Ondas de Compresión (*Vp)* y resultados de ensayos triaxiales. Se obtuvieron datos de humedad natural, límites de Atterberg, peso unitario, gravedad específica, granulometría, hidrometría, compresión inconfinada, corte directo y triaxial cíclico. Se realizaron nueve ensayos de triaxial cíclico, basados en la norma ASTM D 3999 (1991) con el fin de establecer las propiedades dinámicas de los materiales, la degradación del módulo de corte y el amortiguamiento con la deformación angular. Dichos ensayos tenían deformaciones angulares del orden de 0,04% hasta 6,5%, con características de deformación controlada. En cuanto a Prospección Geofísica se utilizaron resultados de líneas de refracción sísmica y de ensayos *Down Hole* (Ulloa 2002).

Método de evaluación

La primera estimación del período predominante y de la amplificación se realizó utilizando las expresiones de las ecuaciones 1 y 2 (AFPS 1995).

$$To=4H/(Vs_1) \quad \text{Ecuación 1}$$
$$Ao=(\rho_2 Vs_2)/(\rho_1 Vs_1) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde H es el espesor del suelo, ρ_1 es la densidad del suelo, Vs_1 es la velocidad de ondas de corte del suelo, ρ_2 es la densidad del basamento rocoso, Vs_2 es la velocidad de ondas de corte en el basamento rocoso, To es el período dominante del suelo y Ao la amplificación asociada.

En los casos de varias capas se utilizaron las expresiones desarrolladas por Dobry *et al.* (1976) que se presentan en las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$To = 4H\sqrt{\frac{\psi_*}{G_*}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

$$G_* H = \sum G_i H_i \quad \text{Ecuación 4}$$
$$\psi_* H = \sum \psi_i H_i \quad \text{Ecuación 5}$$

G representa la rigidez de cada capa, la cual fue estimada con los parámetros de densidad y de Velocidad de ondas de corte. Para la modelación numérica se em-

plearon el método unidimensional lineal equivalente Shake91 (Schnable *et al.* 1972, Idriss y Sun 1992) y el modelo bi-dimensional Quad4M (Hudson *et al.* 1994).

Registros sísmicos utilizados

Uno de los aspectos mas importantes en al modelación numérica de efectos sísmicos locales, radica en la cantidad y calidad de los registros sísmicos utilizados. Sin embargo, en Colombia la cantidad de registros sísmicos en roca es bastante limitada. Aún así se utilizaron 36 registros horizontales y 14 verticales correspondientes a nueve sismos, registrados en 18 estaciones diferentes. Dichos registros cumplen con las siguientes características: contenidos frecuenciales coherentes con las fuentes sismogénicas colombianas, principalmente del sistema de Guaicaramo (Arévalo *et al.* 2003); distancias epicentrales de acuerdo con el Estudio Geológico Regional y Local (Lobo-Guerrero 2002); las magnitudes y las aceleraciones de acuerdo con el estudio realizado por Caneva *et al.* (2003).

Resultados

La Tabla 1 muestra la evaluación obtenida de las características dinámicas de los suelos del piedemonte oriental de la Ciudad de Bogotá, en la mayoría de los casos mediante una modelación numérica unidimensional (perforaciones 2, 3, 4 y 5). La modelación bidimensional se realizó entre las perforaciones 10 a 12, en cercanías de la 13 y entre las perforaciones 14 y 16. La modelación bidimensional mostró una reducción de las amplificaciones, positivo para las construcciones, pero un ligero aumento de los períodos lo que se traduce en ordenadas mayores de aceleración en el espectro sísmico de diseño estructural.

Los datos de campo disponibles, correspondientes a curvas de degradación del modulo de corte, velocidad de ondas de corte *Vs*, velocidad de ondas de compresión *Vp* (Ulloa 2002) y espesores del suelo (Geotecnia y Cimentaciones 2002), permitieron estimar los períodos dominantes del suelo y sus amplificaciones asociadas.

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos aplicando los tres métodos, el aproximado, el unidimensional y el bidimensional.

Perforación	Profundidad	[gr/cm3]	(m/s)	T (seg) Método Simpli	T(seg) Método 1D	T(seg) Método 2D	Método Simpf.	Método 1D	Método 2D	Profundidad	Vp (m/s)
	1,3 - 2,0	1,93	230							0,0-2,0	250
2	2,0 - 8,0	1,93	630							2,0-8,5	1250
	9,0	2,48	1200	0,06	0,05		2,4	2,4		>8,5	4220
3	0,6 - 5,0	2,34	480							0,0-12,0	850
	5,0	2,45	1060	0,04	0,04		2,3	2,3		>12,0	2850
	0,0 - 1,2	2,15	500							0,0-2,0	340
4	1,2 - 3,0	2,15	500							2,0-7,0	850
	3,0	2,4	980	0,02	0,04		2,2	1,1		>7,0	2850
	0,0 - 1,3	2,04	230								
5	1,3 - 3,5	2,04	580							0,0-5,0	1090
	3,5	2,26	1100	0,03	0,04		2,1	1,5		>5,0	3190
	0,0- 3,5	1,91	160							0,0-6,5	710
10	3,5 - 6,0	2,31	430	0,08	0,05-0,09	0,4	3,3	1,5	3,5	>6,5	2990
	6,0				0,15-0,25			2,8-3,3			
	0,0 - 3,5	2,31	210								
12	3,5 - 6,0	2,31	520							0,0-5,0	630
	6,0	2,38	1150	0,06	0,06-0,08	0,4	2,3	3,3-4,0	2,7	>5,0	2050
	0,0- 4,0	2,36	140								
	4,0 - 10,0	2,36	360								
13	10,0 - 12,0	2,36	180								
	12,0 - 15,0	2,36	490							0,0-12,0	690
	15,0	2,32	1050	0,18	0,4-0,85	0,1-0,36	2,1	2,5-3,3	2,0-2,2	>12,0	3340
	0,0 - 1,8	2,26	110								
14	1,8 - 3,0	2,26	460							0,0-4,0	300
	3,0	2,37	1000	0,04	0,08-0,13		2,3	3,1-4,3		>4,0	840
	0,0 - 2,0	2,09	540							0,0-2,0	300
16	2,0 - 11,0	2,09	540	0,08	0,05	0,09-0,12	2,2	2,2 y	3,0-4,0	>2,0	840
	11,0	2,26	1090		0,11			1,4-2,2			

Discusión

Los resultados muestran que el método simplificado y el método Unidimensional (Schnable *et al.* 1972, Idriss y Sun 1992) para la evaluación de las características dinámicas (período predominante y amplificación) ofrecen valores adecuados cuando la estructura del subsuelo es simple, con capas planas y haya un contraste claro entre las características del suelo y de la roca subyacente. Sin embargo, en ocasiones esto no ocurre así, como por ejemplo en suelos residuales en el piedemonte de la Formación Bogotá, constituidos por arcillas sobre arcillositas, en las cuales las capas de los materiales distan de ser planas y el contraste es menor, porque los suelos residuales son producto de la roca subyacente. Esto se presentó en la perforación 10, en la cual de la modelación manual simplificada (AFPS 1995) se obtuvo un resultado de 0,08 segundos, en tanto que la unidimensional presenta dos picos, uno entre 0,05-0,09 segundos y el segundo entre 0,15 y 0,25 segundos. Sin embargo de la modelación bidimensional (Hudson *et al.* 1994) se obtuvo un resultado de 0,40 segundos: una caracterización dinámica no adecuada podría incidir en decisiones erróneas, bien sea en procesos constructivos o en reforzamientos estructurales. Un caso análogo se presentó en las perforaciones 12, 14 y 16. En cuanto a las amplificaciones resultaron ser mayores en el análisis bidimensional.

Las evaluaciones estimadas con datos dinámicos del suelo permitieron sugerir que edificaciones en el piedemonte pueden presentar problemas de resonancia, ya que los períodos estimados pueden ser del orden de 0,20 segundos. Para proyectos de cierta envergadura se recomienda la realización de estudios completos que incluyan evaluación sismológica realista actualizada y caracterización geofísica; ya que uno de los parámetros más importantes para la descripción de un material es la *Vs*; la realización de estos estudios implica costos adicionales; también sería deseable la realización de ensayos triaxiales para conocer mejor las arcillas de Bogotá y finalmente utilizar modelación bidimensional cuando la estructura del subsuelo y de la superficie lo ameriten. Los resultados de este estudio sugieren la importancia de una adecuada caracterización mediante una cuidadosa campaña de campo que incluya los componentes geológico, geofísico y geotécnico; y también de análisis de laboratorio que busquen caracterizar el material lo más cercanamente posible a las condiciones *in situ*, además resaltan la importancia de una adecuada modelación numérica, en caso que sea necesario.

Bibliografía

AFPS - Association Francaise du Genie Parasismique (1995). *Guidelines for Seismic Microzonation Studies. Delegation of Major Risks of the French Ministry of the Environment*. París. 44 pp.

Alfaro A, Ramos A, García-Borrero D 2004. Modelación 1d y 2d de Efectos Locales en Arcillolitas de la Formación Bogotá. Submitted to *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Bogotá.

Arévalo N, Caycedo T, Van Hissenhoven R, Alfaro A 2003. Contenidos Frecuenciales de sismos colombianos registrados en BOCO (Bogotá) y SDV (Santo Domingo, Venezuela) (1994-1996). *Ingeniería y Universidad*. 7(1):19-31.

ASTM 1991. *ASTM D 3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils using the Cyclic Triaxial Apparatus*. Annual Book of ASTM Standards.

Caneva A, Salcedo E, Van Hissenhoven R, Alfaro A 2003. Análisis de la Amenaza Sísmica y de la Magnitud Representativa para Bogotá. *Ingeniería y Universidad*. 7(2):133-150.

Dobry R, Oweis I, Urzua A 1976. Simplified Procedures for estimating the Fundamental Period of a soil profile. *Bull Seism Soc Am* (66):1293-1321.

Geotecnia y Cimentaciones 2002. *Registros de Perforaciones. Microzonificación Sísmica del Campus de la Universidad Javeriana Sede Bogotá. Bogotá*. 68pp.

Hudson M, Idriss IM, Beikae M 1994. *Quad4M. A computer Program to evaluate the Seismic Response of soil Structures using Infinite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base*. University of California, Berkeley. 48 pp.

Idriss IM, Sun JI 1992. *Shake91: A Computer program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil deposits. User's Guide*. University of California. 45 pp.

Lobo-Guerrero A 2002. *Informe de Geología para la Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javerian –Sede Bogotá*. Bogotá. 67 pp.

Schnabel B, Lysmer J, Seed HB 1972. *Shake. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. College of Engineering*. University of California, Berkeley. 34 pp.

Ulloa A 2002. *Estudio Geosísmico para la Microzonificación Sísmica del Campus de la Universidad Javeriana–Sede Bogotá*. Bogotá. 184 pp.