



Análisis y pronóstico del hundimiento de la superficie del suelo motivado por sismo

L. Zeevaert-Wiechers

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM

(recibido: julio de 1988; aceptado: marzo de 2001)

Resumen

Con motivo del sismo del 19 de septiembre de 1985, se observaron hundimientos en múltiples lugares de la superficie del suelo en la ciudad de México, éstos fueron detectados en el piso circundante a edificios con pilotes apoyados firmemente de punta en el estrato resistente Tarango 1, a una profundidad aproximada de 30 a 35 m de profundidad (Zeevaert, 1982).

En la fotografía que se muestra en este trabajo, se observa dicho fenómeno alrededor de un edificio con cimentación de pilotes apoyados de punta en el primer estrato resistente del subsuelo en México DF.

El hundimiento medido fue de un orden de magnitud medio de 8 cm con respecto a la cimentación del edificio. El fenómeno sísmico que se observó, se interpreta como un desplazamiento vertical súbito por la compresión residual que sufrió la masa de arcilla limosa típica del subsuelo de la ciudad de México durante el paso de las ondas sísmicas (Zeevaert, 1988).

Descriptores: análisis, suelo, magnitud, hundimiento, sísmico.

Abstract

The observations made in Mexico City after the earthquake of September 19, 1985, evidenced settlements in many places of the ground surface, most of them detected close to buildings firmly supported on point-bearing piles resting on the hard stratum known as "Tarango 1" at depths ranging from 30 to 35 meters.

The photograph attached depicts a case where we can observe such phenomenon close to a building with firmly supported point-bearing piles resting on a hard stratum in Mexico City subsoil.

The measured subsidence had a magnitude on the order of 8 cm with respect to the building foundation.

The interpretation of the seismic phenomenon observed relates to an instantaneous vertical displacement induced by the residual expansion and compression taking place when seismic waves travel through the soil mass of the typical silty clay of Mexico City subsoil.

Keywords: analysis, soil, magnitude, subsidence, settlement, earthquakes.

Introducción

El interés del autor en el hundimiento sísmico de la superficie del suelo, que a la vez es importante en ingeniería civil, se presenta con una interpretación cuantitativa de dicho fenómeno.

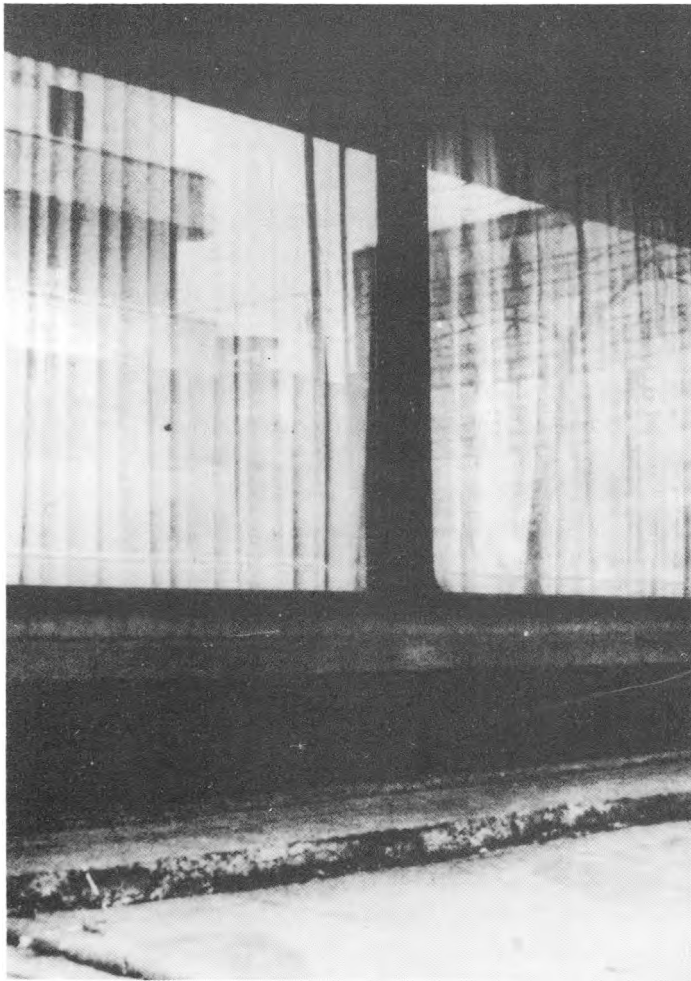
La utilidad práctica de este análisis, es poder pronosticar desde un punto de vista sencillo en la práctica profesional, el orden de magnitud probable del hundimiento de la superficie del suelo durante sismos destructivos, lo que permite obtener una herramienta para prevenir daños, principalmente en las instalaciones municipales que

entran a los edificios. Así también, se analizan los desplazamientos verticales con propiedades geotecnias estáticas y dinámicas distintas que afectan los drenajes en las diferentes zonas de la ciudad de México (Zeevaert, 1997).

Análisis sismo-geotécnico

El hundimiento sísmico de la superficie del suelo está íntimamente relacionado con la deformación residual que provoca el fenómeno de "Histeresis", debido a la compresión y dilatación de las ondas sísmicas en el subsuelo, en donde es básicamente importante la componente horizontal

de las ondas de superficie. En este análisis, se considera que no se ocasiona falla de suelo; en caso de que esto ocurra, consultar Zeevaert (1988), (1997), (1996), (1987).



Hundimiento de la superficie del suelo durante el sismo de septiembre de 1985, junto a un edificio de 15 niveles apoyado firmemente sobre pilotes de concreto armado de punta en el primer estrato resistente a 32 m de profundidad. Fotografía: Ing. Alberto Villasana L.

Llamemos (ϵ_{cz}) a la deformación unitaria máxima en sentido vertical, producida por la compresión horizontal de la onda sísmica en un elemento unitario del suelo y a una profundidad (Z); y (ϵ_{cz}) a la deformación unitaria vertical que produce la misma onda por dilatación o respuesta del suelo en sentido horizontal.

Conocemos que el suelo no es un material isotropo, por tanto, estas dos deformaciones unitarias son diferentes. Esta desigualdad representa la deformación residual permanente por ciclo de onda, esto es ($\Delta\epsilon_{zR}$). Dicho valor deberá calcularse para cada estrato de espesor (d) de arcilla limosa altamente compresible del subsuelo (Zeevaert, 1988).

De acuerdo con lo anterior, el desplazamiento de la superficie del suelo por ciclo de ondas, es la suma de los

desplazamientos de todos los estratos (n) que forman el subsuelo hasta suelo firme.

$$\Delta\delta_{zR} = \sum (\Delta\epsilon_{zR} * d)_i \quad (1)$$

La solución consiste en valorizar desde un punto de vista práctico las deformaciones unitarias verticales por compresión y dilatación horizontal de una onda sísmica con aceleración superficial base de 100 gal.

Al estudiar la historia de aceleración del sismo ocurrido en la ciudad de México en 1985, se encuentra un número (m) de aceleraciones significativas en el tren de ondas, para $a > 50$ gal. (50 cm/seg^2), que son las que originan el fenómeno antes descrito por su intensidad.

Para el caso de la componente horizontal de la onda de superficie, se encuentra que el desplazamiento vertical es función de la aceleración orbital superficial.

Por consiguiente, para un tren de ondas sísmicas con aceleraciones (a_i) se tiene según Zeevaert (1988):

$$\delta_{zr} = \Delta\delta_{zr} \sum (a_i/100), \text{ aquí } \sum (a_i/100) = f$$

De la historia de aceleraciones superficiales máximas significativas (a_i) se obtiene el valor de (f). Aquí se analizan las deformaciones unitarias máximas verticales que son ocasionadas en un elemento del suelo, como resultado de la acción de la componente horizontal de la onda plana de superficie. Además se considera desde un punto de vista práctico que los módulos de deformación unitaria según Zeevaert (1988) son:

$$\begin{aligned} \text{Dilatación dinámica } M_{ex} &= M_{cz} \\ \text{Compresión dinámica } M_{cx} &= M_{cz} \end{aligned} \quad (3)$$

Después de efectuar operaciones algebraicas con las ecuaciones básicas de esfuerzo-deformación unitaria (Zeevaert, 1988), se llega a los siguientes valores de las deformaciones unitarias en sentido vertical.

Por compresión horizontal de la onda

$$\epsilon_{cz} = -(1-v^2)M_{cz} - v(1+v)M_{cx}(p_x - u) \quad (4)$$

Por dilatación horizontal de la onda

$$\epsilon_{cz} = (1-v^2)M_{cz} + v(1+v)M_{cx}(p_x - u) \quad (5)$$

Aquí (u) es la presión sísmica en el agua de poro, y cuando el suelo se encuentra saturado, su valor se estima por medio de la siguiente fórmula (Zeevaert, 1988)

$$u = p_x / (1 + \beta_{ec})$$

La deformación unitaria residual ($\Delta\varepsilon_{zR}$) es la diferencia de las ecuaciones 4 y 5, esto es:

$$\Delta\varepsilon_{zR} = (M_{cx} - M_{cx}) ((1 + \nu)u - \nu(1 + \nu)p_x) \quad (7)$$

o bien

$$\Delta\varepsilon_{zR} = ((1 + \nu)u - \nu(1 + \nu)p_x) (1 - \beta_{ec}) (M_{cx}) \quad (7)$$

sustituyendo en valor de (u) se llega finalmente a la siguiente ecuación

$$\Delta\varepsilon_{zR} = (1 + \nu) \left\{ 1 - \nu (1 + \beta_{ec}) \right\} (1 + \beta_{ec}) \frac{M_{cx} p_x}{(1 + \beta_{ec})} \quad (8)$$

en donde:

ν es la relación de poisson.

P_x la presión o tracción que ejerce la onda. Zeevaert (1996), (1987), (1995).

β_{ec} Factor de respuesta (M_{cx}/M_{cx}).

M_{cx} Módulo de deformación unitaria de la respuesta o dilatación.

M_{cx} Módulo de deformación unitaria de la compresión.

El desplazamiento residual vertical por ciclo de onda para todo el depósito de arcilla típica, se calcula por medio de la ecuación 1; y con la ecuación 2 el desplazamiento vertical total de la superficie del suelo:

$$\delta_{zr} = f (\Delta\delta_{zR}) \quad (2)$$

Para ilustrar el análisis de este fenómeno, se ha efectuado el cálculo con parámetros reales del lugar que representa la fotografía, que es un edificio situado al poniente del centro de la ciudad de México.

Cerca de dicho lugar se llevó a cabo un estudio sismo-geodinámico del subsuelo, los resultados se reportan en la tabla 1, donde la figura 1 muestra la configuración con la profundidad de las tensiones ejercidas por la componente horizontal de la onda de superficie que induce compresión y dilatación en el subsuelo; así también, se muestran las aceleraciones y los desplazamientos horizontales con la profundidad.

El método de cálculo se encuentra en Zeevaert (1996), (1987), (1995).

Con la información de la tabla 1 se elaboró la tabla 2 de cálculo, que es explicativa por sí sola, de ahí se llega a la conclusión de que un desplazamiento vertical residual de la superficie del suelo del orden de $\Delta\delta_{zR} = 0.805$ cm por ciclo de onda con aceleración base de 100 gal.

Analizando la historia de aceleración del sismo de septiembre de 1985, se obtiene para la parte del tren de ondas con las aceleraciones más significativas según la ecuación (2) que $f = 9.38$ (Zeevaert, 1988).

Aplicando la ecuación (2) se obtiene un hundimiento súbito de la superficie del suelo de $\delta_{zr} = 9.38 (0.805) = 7.55$ cm. Este valor es del mismo orden de magnitud que el valor medio observado en el campo.

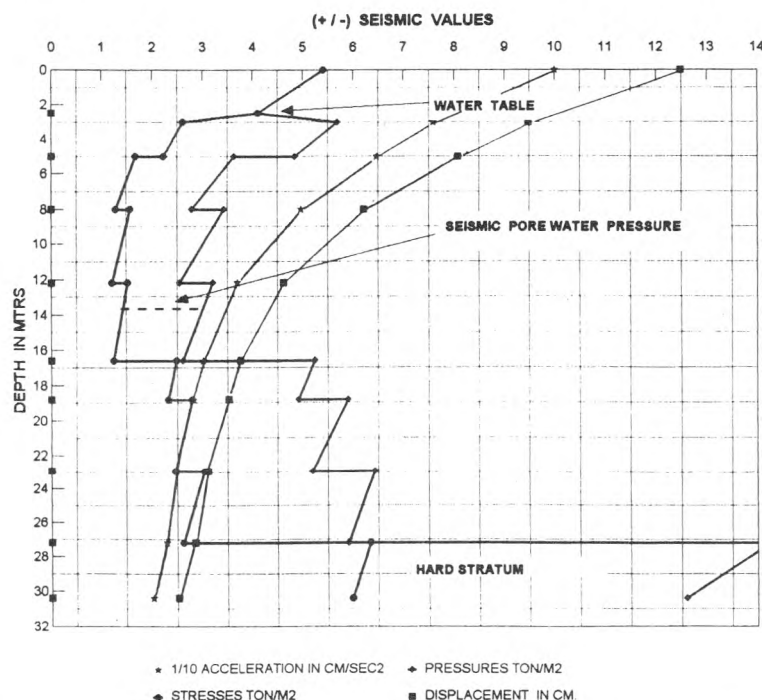


Figura 1. Onda superficial en subsuelo estratificado. Zeevaert, (1996), (1987), (1995)

Tabla 1

SURFACE WAVE IN LAYERED SUBSOIL													NAME: SWLSCP1.WK4					
LIST OF SYMBOLS:																		
(d) Stratum thickness	(M) Strain Modulus	SUM, Summation of (rd)																
(Mu) _z Soil, Dyn.Rigidity	(M) _e For Traction	(STR) _z , Strain at (z)																
rho. Unit mass	(M) _c For Compression	(P) _z , Aver. Pressure																
(v) Poissons ratio	Beta, Response factor	(S) _z , Aver. Stress																
(C) _z Celerity at depth z	Beta, (M) _e /(M) _c	(Ac), Acceleration																
a(v) Parameter at depth z	(r) _z Attenuation factor	Displ. Soil Displacement													PERIOD 2.22 sec.			
Acc.m/s ² 1.00	Circular frequency	2.83		Orb. Vel		0.35 m/sec		Surface Strain 0.01351										
SURFACE WAVE CELERITY		26.16 m/sec																
SOIL	Es t.	d m	(mu) _z Ton/m ²	(rho) _z Unit. m	v nu	(C) _z m/sec	a(v)	(Beta) c	1/M Ton/m ²	(r) _z 1/m	rd	SUM	Depth m	Strain	Pz Ton/m	Stress Ton/m	Ac x 10	Displ cm
													0.00	0.01351	5.40	5.40	10.00	12.49
													2.50		4.10	4.10		
Silty clay	1	3.00	130.00	0.190	0.35	26.16	0.85	0.85	400.00	0.0919	0.2758	0.2758	3.00	0.01025	5.68	2.61	7.59	9.48
Silty clay					0.35			0.85					5.00		4.84	2.22		
Silty clay	2	2.00	180.00	0.200	0.35	30.00	0.85	0.85	553.85	0.0802	0.1603	0.4362	5.00	0.00874	3.63	1.67	6.47	8.08
Silty clay					0.35			0.85					8.00		2.79	1.28		
Silty clay	3	3.00	135.00	0.180	0.35	27.39	0.85	0.85	415.38	0.0878	0.2635	0.6996	8.00	0.00671	3.42	1.57	4.97	6.20
Silty clay					0.35			0.85					12.20		2.54	1.21		
Silty clay	4	4.20	165.70	0.130	0.35	35.70	0.89	0.90	509.85	0.0705	0.2963	0.9959	12.20	0.00499	3.20	1.52	3.69	4.61
Silty clay					0.35			0.90					16.60		2.61	1.24		
Silty clay	5	3.40	208.70	0.120	0.35	41.70	0.89	0.90	642.15	0.0604	0.2053	1.2012	16.60	0.00406	5.23	2.48	3.01	3.76
Silty clay					0.35			0.90					18.80		4.91	2.33		
Silty clay	6	1.50	418.40	0.120	0.35	59.05	0.89	0.90	1287.38	0.0426	0.0640	1.2652	18.80	0.00381	5.89	2.79	2.82	3.52
Silty clay					0.35			0.90					22.90		5.19	2.46		
Silty clay	7	3.40	501.70	0.120	0.35	64.66	0.85	0.90	1543.69	0.0372	0.1265	1.3916	22.90	0.00336	6.42	3.04	2.49	3.11
Silty clay					0.35			0.90					27.20		5.90	2.62		
Silty clay	8	2.40	620.60	0.120	0.35	71.91	0.89	0.80	1909.54	0.0350	0.0840	1.4757	27.20	0.00309	14.26	6.34	2.29	2.86
Silty clay					0.35			0.80					30.40		12.60	5.97		
HARD STF	9	4.00	1500.00	0.220	0.35	82.57	0.90	0.90	4615.38	0.0308	0.1234	1.5990	30.40	0.00273	12.60	5.98	2.02	2.52

Tabla 2. Hundimiento de la superficie del suelo por la componente horizontal de la onda sísmica de superficie
Símbolos

z	Profundidad media del estrato correspondiente en metros
d	Espesor del estrato en metros
ρ	Masa unitaria en ton*sec ² /m ⁴
v	Relación de Poisson
C _{sz}	Celeridad de la honda en sentido horizontal en m/seg
pax	Presión sísmica media en un estrato en kg/cm ² . Zeevaert (1996), (1987), (1995)
Mc _x	Módulo de deformación unitaria a la compresión horizontal en m ² /ton
Me _x	Módulo de deformación unitaria por dilatación o respuesta horizontal en m ² /ton
β	Factor de respuesta M _{ex} /M _{cx}
u	Presión sísmica en el agua de poro para suelo saturado 1/(1+β)pax
Δδ	Desplazamiento vertical de la superficie del suelo en cm/ciclo de onda

Tabla 2 (continuación)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Estrato		z	d	ρ	v	Csz	pax	Mcx	β	δ	
-----		M	M	tsec ² /m ⁴	-----	m/seg	t/m ²	m ² t		cm	
1	Arc. Lim	3.00	3.00	0.19	0.35	26.16	4.75	2.500 E-03	0.85	0.2229	
2	Arc. Lim	5.00	2.00	0.20	0.35	30.00	5.26	1.806 E-03	0.85	0.1164	
3	Arc. Lim	8.00	3.00	0.18	0.35	27.39	2.71	2.407 E-03	0.85	0.1249	
4	Arc. Lim	12.20	4.20	0.13	0.35	35.70	2.98	1.962 E-03	0.90	0.1099	
5	Arc. Lim	16.60	3.40	0.12	0.35	41.70	2.91	1.558 E-03	0.90	0.0701	
6	Arc. Lim	18.80	1.50	0.12	0.35	59.05	5.40	7.767 E-04	0.90	0.0286	
7	Arc. Lim	22.90	3.40	0.12	0.35	64.66	5.54	6.478 E-04	0.90	0.0555	
8	Arc. Lim	27.20	2.40	0.12	0.35	71.91	6.26	5.237 E-04	0.80	0.0768	
									$\Delta\delta$	suma	0.8052
									Desplazamiento vertical		0.805 cm/ciclo

Para este cálculo se utilizó la información con aceleración orbital superficial de 100 gl (100 cm/seg) de la tabla 1 Equivalentes con el sistema (si)

Peso unitario	1 ton/m ³	=	9.81 kN/m ³
Fuerza	1 ton = 1000kg	=	9.81 kN
Masa unitaria	1 ton sec ² /m ⁴	=	9.81 kNsec ² /m ⁴
Esfuerzo	1 ton/m ² = 0.1kg/cm ²	=	9.81 kN/m ²

Conclusiones

Se puede apreciar que el análisis presentado y efectuado desde un punto de vista de ingeniería práctica, indica con precisión aceptable la acción sismo-geodinámica del subsuelo, así también proporciona el orden de magnitud del desplazamiento vertical de la superficie de suelo en el lugar investigado para el fuerte sismo que sacudió a la ciudad de México en 1985.

Como el suelo no es isotropo, es necesario conocer sus propiedades mecánicas estáticas y dinámicas cuantitativas en dos direcciones normales entre sí, que es el caso de las ondas sísmicas de deformación plana, tratadas en este trabajo.

Se concluye marcando la importancia que tiene el conocimiento de los módulos dinámicos de deformación unitaria, tanto en compresión como en respuesta o dilatación para los sentidos vertical y horizontal, respectivamente, (Zeevaert, 1988).

Con la historia de las características típicas de las aceleraciones significativas de la superficie del suelo, así como las propiedades físicas del subsuelo y los módulos dinámicos antes mencionados, se pueden analizar sismos con diferente intensidad para conocer el hundimiento probable de la superficie del suelo en sitios de la ciudad de México con diferentes características sismo-geodinámicas.

Referencias

- Zeevaert-Wiechers L. (1982). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. Van-Nostrand-Reinhold. Nueva York.
- Zeevaert-Wiechers L. (1988). *Seismo-Geodynamics of the Ground Surface and Building*. Special edition.
- Zeevaert-Wiechers L. (1997). *Riesgo de mal comportamiento de la superficie del suelo y cimentaciones, debido a las ondas sísmicas*. SMMS, México.
- Zeevaert-Wiechers L. (1996). The Seismic-Geodynamics in the Design of Foundations in Difficult Subsoil Conditions. 3rd. International Symposium on Environmental Geotechnology. San Diego, California, octubre.
- Zeevaert-Wiechers L. (1987). Seismo Soil Dynamics Response of the Ground Surface and Building Foundations in Mexico City, Earthquake, September 19, 1985. American Society of Civil Engineers Convension, Anaheim, California, octubre.
- Zeevaert-Wiechers L. (1995). Estabilidad sismo-geodinámica de las cimentaciones. Simposio Internacional de Ingeniería Civil a 10 años del sismo de septiembre 19 y 20 de 1985, México, DF.

Semblanza del autor

Leonardo Zeevaert-Wiechers. Obtuvo el título como ingeniero civil en 1939 en la Escuela Nacional de Ingenieros de la UNAM. Estudió el posgrado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts donde recibió el grado de maestro en ingeniería en 1940. En 1943 inició una estrecha colaboración con el Dr. Karl Terzaghi en una investigación acerca de la estabilidad de las cortinas de corazón hidráulico construidas en México a principios del siglo XX; esto lo llevó en 1947 a trabajar en problemas especiales de mecánica de suelos en la Universidad de Illinois, donde obtuvo el grado de doctor (Ph. D) en 1949. Ha recibido numerosos reconocimientos, entre ellos: la medalla de oro profesional otorgada por el Instituto Americano de Arquitectos, diploma a la innovación tecnológica, designación de profesor emérito en la UNAM y miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EUA, entre otros. El buen comportamiento, la cimentación y estructura de obras de ingeniería que ha diseñado, entre ellas la Torre Latinoamericana, en donde introdujo el concepto de flexibilidad controlada en edificios altos, le han valido para su reconocimiento a nivel internacional. Ha escrito 160 artículos, una gran cantidad de libros y ha presentado ponencias relacionadas con mecánica de suelos, ingeniería de cimentaciones y sísmica de cimentaciones.