

メキシコ盆地における微動観測とその水平上下スペクトル比による 地下構造モデルの検証

松島信一・廣川貴則*・長嶋史明**・新田祐平***・
Francisco J. SÁNCHEZ-SESMA****・川瀬博

* 株式会社山下設計

** 京都大学大学院工学研究科

*** 株式会社大林組

**** メキシコ国立自治大学工学研究院

要 旨

拡散波動場を仮定した場合に微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル比（H/Vスペクトル比）を理論的に計算する方法を著者らは新たに提案しており、地盤増幅特性を大きく左右する地盤の速度構造を精度良く推定する手法として期待されている。本研究では、まずメキシコ盆地内の5つの強震観測点において微動観測を行い、観測点毎のH/Vスペクトル比を比較した。次に、地盤調査により得られている地下構造モデルを用いて新しい考え方に基づいて計算した理論H/Vスペクトル比を観測したH/Vスペクトル比と比較してその確からしさの検証を行った。その結果、理論H/Vスペクトル比は概ね観測H/Vスペクトル比の卓越振動数とその振幅を再現できることがわかり、地下構造モデルには改善の余地のあるものの、新しい手法および地下構造モデルの確からしさを確認することができた。

キーワード：メキシコ盆地、微動、H/Vスペクトル比、拡散波動場、地下構造

1. はじめに

地震による揺れに対して都市空間の安全性を確保するためには、地下構造に関する情報を把握し地盤増幅特性を的確に評価した上で強震動予測をすることが必要不可欠である。地盤増幅特性を大きく左右する地盤の速度構造を推定する手法として、微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル比（H/Vスペクトル比）を拡散波動場を仮定して理論的に計算する方法を著者らは新たに提案している（Sánchez-Sesma et al., 2011bなど）。廣川ら(2011)では、京都大学宇治キャンパスにおける微動観測記録と岩田ら(2001)の地下構造の調査結果から、一次元構造とみなせる震動方向については新しい計算手法の妥当性を検証している。本稿では、メキシコ盆地を対象に、既往の調査による地下構造モデルをもとにこの新しい考え方に基づいて計算される理論H/Vスペクトル比と観測した微動記録から得られる観測H/Vスペクトル比との比較を行い、手法および地下構造モデルの確か

らしさを検証する。

2. 検討の方法

メキシコ盆地では1985年メキシコ地震の際に、メキシコ西岸沖の震源域から数百キロ離れているにもかかわらず、大きな揺れにより中層建物が多く破壊された。そのため、地震後に強震観測網が整備され、現在も地震観測が行われている。強震観測網にはボアホール観測点もあり、整備の際に地下構造の調査が行われている。これらの地点において微動観測を行い、微動観測記録から得られる観測H/Vスペクトル比を求め観測点ごとに比較を行った。次に、既往の調査により得られている地下構造モデルに基づき、新しい手法により理論H/Vスペクトル比を計算した。最後に、観測H/Vスペクトル比と理論H/Vスペクトル比と比較することにより、手法と地下構造モデルの確からしさについて検証を行った。

3. メキシコ盆地内での微動観測

本章では、著者らが平成22年12月初旬にメキシコ盆地内の5つの地点において行った微動観測について述べる。

3.1 観測方法

メキシコ市内において強震観測が行われている地点のうち、1985年メキシコ地震で被害が甚大だったメキシコ市のローマ地区の東西1kmの間に3点（Plaza Ciberes, Plaza Rio de Janeiro, Jardin Pushkin）、メキシコ市南部に位置し溶岩が露頭するメキシコ自治大学キャンパスに隣接するメキシコ国立防災センター（CENAPRED）本部構内に1点およびその中間地点のCoyoacánにて行った。微動観測を行った5地点をFig. 1に赤三角で示す。図はメキシコシティの北西部分を示し、図中の白色部分は湖の埋め立て部、濃い灰色は丘陵部、淡い灰色はその遷移部を示す。赤線で囲まれた部分が1985年メキシコ地震の際に甚大な被害が生じた地域である。この領域の中央部に東西に3つ並んでいる観測点が西から順にPlaza Ciberes, Plaza Rio de Janeiro, Jardin Pushkinである。地図の南端の丘陵部に位置するのがCENAPRED本部、その約5km北の遷移部に位置するのがCoyoacánである。

観測はAKASHI（現ミットヨ）製のSMAR-6A3Pを用い、サンプリング周波数を100Hz、アナログアンプによる振幅の増幅を500倍、GPSによる時刻校正と15分の観測を1セットとし、観測点において2セットずつ行った。Photo 1に観測の様子の一例を示す。

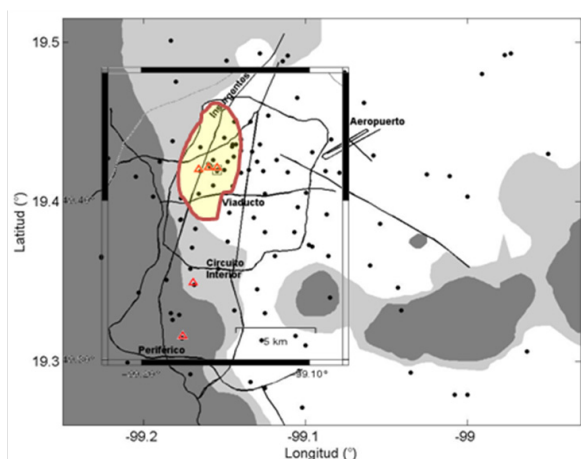


Fig. 1 Map of microtremor measurement sites (red triangle) at stations strong motion observation network (black circles) in the north-western part of Mexico City (after Roullé, 1996). Region surrounded by red line is the area of severe damage during the 1985 Michoacán (Mexico) Earthquake.



Photo 1 An example of microtremor measurement at one of the strong motion stations of CENAPRED, Jardin Pushkin.

3.2 観測記録の解析結果

観測した微動データは1観測セット（15分間）ごとに40.96秒の時間区間を継続時間の半分を重複させながら42区間を切り出す。Fig. 2にPlaza Ciberesでの観測記録の上下成分のうち6切り出し区間の時刻歴波形の例を示す。

このように得られた時間区間ごとに水平2成分

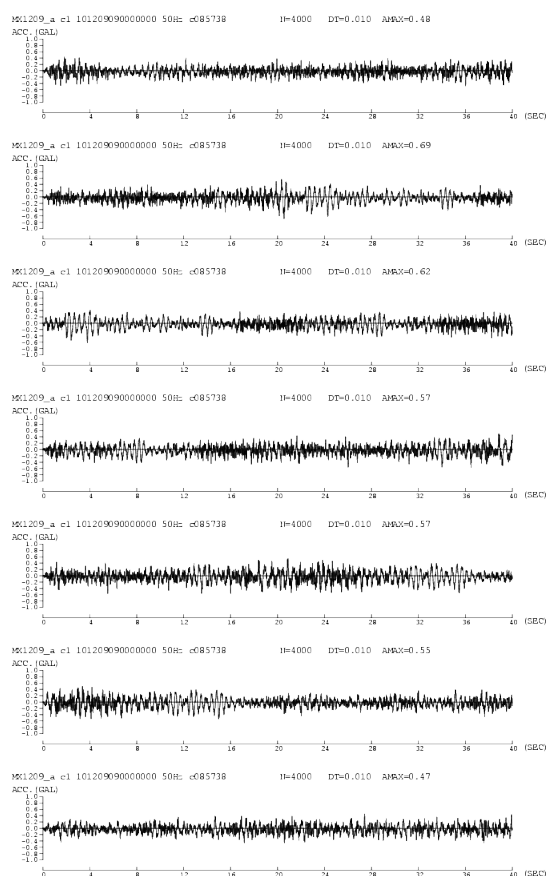


Fig. 2 An example of microtremor time series of UD component observed at Plaza Ciberes. 6 out of 42 time sections are shown.

(NSとEW)と上下成分(UD)の計3成分のフーリエスペクトルを計算し、水平動と上下動のフーリエスペクトル比(H/Vスペクトル比)を求めた。ここでは既往の研究で多く行われているように水平2成分の自乗和平均求めず、成分ごとの違いがないかを確認するため別々に求めた。得られたH/Vスペクトル比を42時間区間で平均したものを1観測セットの観測H/Vスペクトル比とした。

Fig. 3に微動観測した5地点でのH/Vスペクトル比を示す。赤線がNS成分、青線がEW成分である。実線と点線は2つの観測セットの違いを示す。Fig. 3(a)～(c)はローマ地区の3地点のH/Vスペクトル比で、形状はやや異なるものの0.5Hz付近のピークと1.5Hz付近の谷は共通している。ただし、Fig. 3(a)のPlaza Ciberesでは他の2地点と比べピーク値が高く谷が深い。一方、高振動数域では地点ごとに異なる性状を示している。NS成分とEW成分では大きな違いは見られないため、これらの地点の地盤は概ね水平成層であるとみなすことができること考えられる。Fig. 3(d)のCoyoacanでは、1.5Hz付近にピークがありローマ地区の3地点と比べ卓越振動数が高く、遷移部に位

置するこの地域では地盤が硬くなっていることがわかる。NS成分とEW成分ではピーク値にやや違いが見られる。Fig. 3(e)のCENAPRED本部では1Hz以下では長周期ノイズが顕著であるが、1Hz以上の振動数域では顕著なピークは見られず、地盤による増幅があまりないことがわかる。

4. 理論H/Vスペクトル比

本章では、著者らが提案している拡散波動場を仮定した場合の微動のH/Vスペクトル比を理論的に計算する方法(Sánchez-Sesma et al., 2011b)およびそれを微動観測点で得られている地盤構造に適用して得られる理論H/Vスペクトル比と観測スペクトル比との比較を示す。

4.1 拡散波動場を仮定したH/Vスペクトル比

3次元弾性体において拡散変位波動場を仮定すると、ある地表面上の2地点における相互相関関数の方位平均から2地点のうち1点を加振点、他点を受信点とするグリーン関数が得られることが示されており

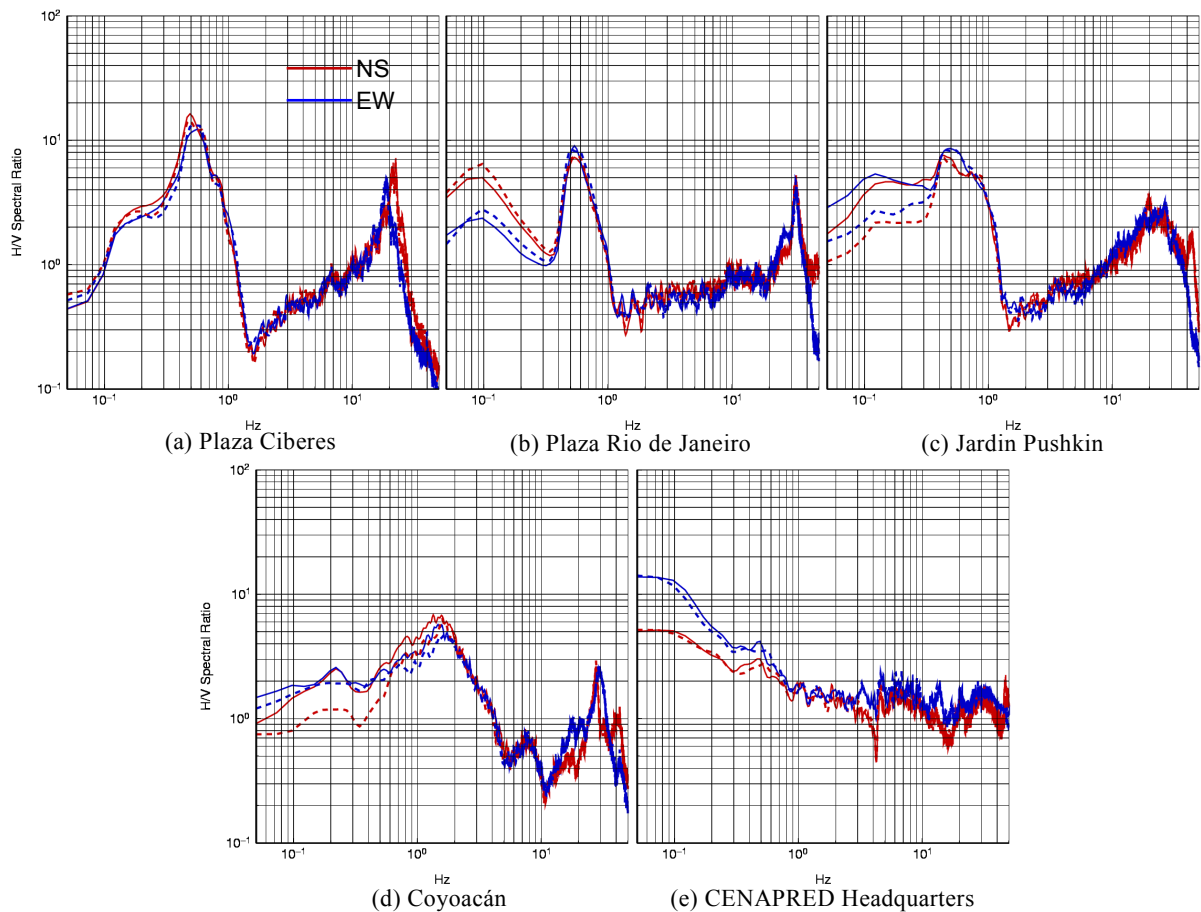


Fig. 3 H/V spectral ratios at 5 microtremor measurement sites; (a) Plaza Ciberes, (b) Plaza Rio de Janeiro, (c) Jardin Pushkin, (d) Coyoacan, (e) CENAPRED Headquarters. Red and blue lines are NS and EW components respectively. Solid and dotted lines show the difference between two 15 minute measurement sets.

(Sánchez-Sesma et al., 2011a), その関係は次式のよ
うに表される。

$$\langle u_i(\mathbf{x}_A, \omega) u_j^*(\mathbf{x}_B, \omega) \rangle = -2\pi E_S k^{-3} \text{Im}[G_{ij}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, \omega)] \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B$ は2地点の位置ベクトル, ω は円振
動数, u_i は*i*方向変位であり, *は複素共役, $\langle \rangle$ は方
位平均を表わす。また, E_S はS波の平均エネルギー密
度, k はS波の波数であり, グリーン関数 $G_{ij}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_B, \omega)$
は, $\mathbf{x}_A$ 点に*i*方向に単位インパルス力作用させた時の
 $\mathbf{x}_B$ 点における*j*方向変位応答に相当する。

式(1)において $\mathbf{x}_A$ と $\mathbf{x}_B$ が同一であるとする, 地点
 $\mathbf{x}_A$ におけるエネルギー密度 $E(\mathbf{x}_A)$ を次式のように導
くことができる。

$$E(\mathbf{x}_A) = \rho \omega^2 \langle u_m(\mathbf{x}_A) u_m^*(\mathbf{x}_A) \rangle = -2\pi \mu E_S k^{-1} \text{Im}[G_{mm}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}_A)] \quad (2)$$

ここで, μ はせん断弾性係数である。式(2)は, ある
1地点におけるエネルギー密度はその地点を加振
点及び受振点とするグリーン関数の虚数部に比例す
るという関係を示している。なお, 式(2)は総和規約
を用いた総エネルギー密度に関する式であるが,
 $E(\mathbf{x}_A)$ を $E_m(\mathbf{x}_A)$ と読み替えても, 等式が成り立つ。

また, H/Vスペクトル比はパワースペクトル密度
の比であり, エネルギー密度は変位のパワースペク
トル密度と比例関係にあることからH/Vスペクトル
比は次式のように表わされる。

$$\frac{H^2}{V^2}(\omega) = \frac{E_1(\mathbf{x}, \omega) + E_2(\mathbf{x}, \omega)}{E_3(\mathbf{x}, \omega)} \quad (3)$$

従って, 式(2)と式(3)から次式が導かれる。

$$\frac{H}{V}(\omega) = \sqrt{\frac{\text{Im}[G_{11}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)] + \text{Im}[G_{22}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)]}{\text{Im}[G_{33}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)]}} \quad (4)$$

式(4)により, ある地点における微動の水平上下ス
ペクトル比が, その地点を加振点及び受振点とする
グリーン関数の虚数部の比の形で表わされる。ただ
し, これは拡散場, すなわち観測点に全方位から等
しい密度でエネルギーが入射するという仮定の上に
成り立つ関係であるということに注意が必要である。

4.2 微動観測点における理論H/Vスペクトル比

メキシコ市内において微動を観測した地点のうち,
CENAPREDがボアホール強震観測点を設置した際

に行った地盤調査結果 (Yamashita Architects &
Engineers Inc. and Oyo Corporation, 1996) の情報を用
いて理論H/Vスペクトル比を計算した。Table 1と
Table 2にそれぞれJardin PushkinとCoyoacánの地下構
造モデルを示す。

Jardin PushkinとCoyoacánにおいてTable 1とTable 2
に示した地下構造モデルに基づき, 水平成層構造を
仮定して4.1に示した方法で理論H/Vスペクトル比を
計算した。Fig. 4に, それぞれの地点においてFig. 3
に示した微動観測記録から求めた観測H/Vスペクト
ル比と比較して示す。理論H/Vスペクトル比を黒線で
示す。赤線と青線はFig. 3と同様である。Fig 4(a)の
Jardin Pushkinでは, 理論H/Vスペクトル比は観測H/V
スペクトル比とピーク振動数は概ねあっているが,
ピーク形状がシャープなため少し広がった形状をし
ている観測H/Vスペクトル比とはやや形状が異なる。
また, 谷の振動数が観測H/Vスペクトル比では約

Table 1 Subsurface structure at Jardin Pushkin (Yamashita
Architects & Engineers Inc. and Oyo Corporation, 1996)

Thickness (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Density (g/cm ³)
5	1,430	90	1.2
7	1,430	30	1.1
13	1,430	55	1.1
8	1,430	80	1.2
3	1,430	200	1.4
8	1,430	130	1.4
11	1,780	400	1.5
10	1,580	250	1.7
37	1,750	430	1.7
20	1,940	660	1.7
8	1,750	430	1.7
8	2,250	920	1.9
22	1,760	500	1.8
17	2,070	670	1.8
-	2,500	1,120	2.0

Table 2 Subsurface structure at Coyoacán (Yamashita
Architects & Engineers Inc. and Oyo Corporation, 1996)

Thickness (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Density (g/cm ³)
4	1,500	90	1.8
10	900	400	1.5
9	1,250	500	1.9
10	1,500	710	1.9
10	1,400	430	1.9
-	1,630	780	2.0

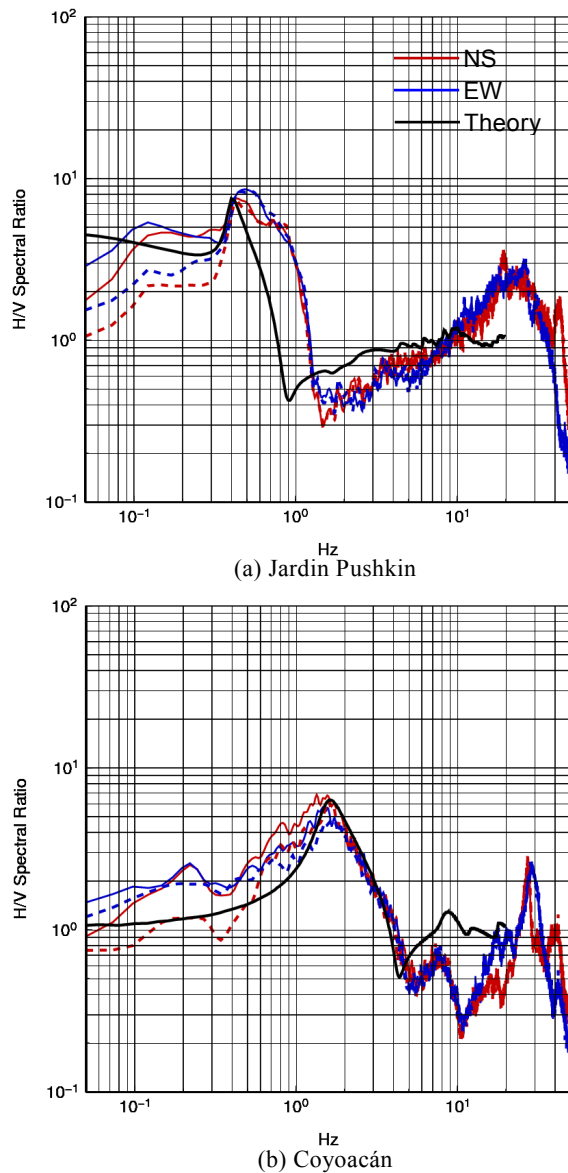


Fig. 4 Comparison between theoretical and observed H/V spectral ratio at (a) Jardin Pushkin and (b) Coyoacán. Black line is the theory. Red and blue lines are same as Fig. 3. Theoretical H/V spectral ratios are calculated according to the subsurface structure of Table 1 and 2.

1.5Hzなのに対し理論H/Vスペクトル比では0.9Hzとなっており、やや差がある。しかしながら、ピークと谷の絶対値については概ね対応している。一方、Fig 4(b)のCoyoacánでは、ピーク振動数とピーク振幅とも理論H/Vスペクトル比と観測H/Vスペクトル比はよく対応している。ただし、谷の振動数は理論H/Vスペクトル比の方がやや低い。

ここで得られた結果から、既往の地盤調査結果を用いて著者らが提案している計算方法により得られた理論H/Vスペクトル比は観測H/Vスペクトル比と概ね対応し妥当であることが確認出来た。

5. おわりに

著者らが提案している拡散波動場を仮定してH/Vスペクトル比を理論的に計算する手法について、メキシコ盆地で観測した微動観測記録から得られた観測H/Vスペクトル比と既往の地盤調査結果に基づく地下構造モデルから得られた理論H/Vスペクトル比を比較することにより手法と地下構造モデルの検証を試みた。その結果、著者らが提案している計算方法により得られた理論H/Vスペクトル比は観測H/Vスペクトル比と概ね対応し妥当であることが確認出来た。ただし、理論H/Vスペクトル比には改善の余地がある。

今後は、理論H/Vスペクトル比が観測H/Vスペクトル比をよりよく説明できるように地下構造モデルをチューニングする方法について検討する。また、まだ入手できていないローマ地区での2地点の地盤調査結果を入手し、ローマ地区の3地点の観測H/Vスペクトル比の違いが何に起因しているかについても検討を行いたい。

謝 辞

著者らのうちメキシコでの微動観測に従事した松島信一、新田祐平、廣川貴則、長嶋史明は、京都大学防災研究所の若手研究者海外派遣プログラム（大航海プロジェクト）により派遣されました。メキシコでの微動観測では、メキシコ国立自治大学（UNAM）のJorge Aguirre博士をはじめとして多くのUNAMの方々に多大なご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 廣川貴則・松島信一・川瀬博（2011）：微動H/Vスペクトル比の方位依存性と基盤の不整形性，日本建築学会学術講演梗概集，B-2.
- Matsushima, S., Hirokawa, T., Kawase, H. and Sánchez-Sesma, F. J. (2011): H/V Spectral Ratio of Microtremors at Sites with Lateral Heterogeneity, Seismological Society of America 2011 Annual Meeting.
- Roullé, A. (2004): El Movimiento Sísmico en el Valle de México: Análisis de Datos de un Arreglo 3D de Pequeña Apertura en la Colonia Roma, Doctor Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México
- Sánchez-Sesma, F.J., Weaver, R.L., Kawase, H., Matsushima, S., Luzón, F. and Campillo, M. (2011a): Energy partitions among elastic waves for dynamic

surface loads in a semi-infinite solid, Bulletin of the Seismological Society of America, DOI: 10.1785/012010096.

Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M.A. and Rodríguez-Castellanos, A. (2011b): A theory for microtremor H/V

spectral ratio: application for a layered medium, Geophysical Journal International Express Letter, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x.

Yamashita Architects & Engineers Inc. and Oyo Corporation (1996): Estudios del Subsuelo en Valle de México, Cuadernos de Investigación Numero 34, México Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Microtremor Measurements in Mexico Basin and Verification of the Velocity Structure Using H/V Spectral Ratio

Shinichi MATSUSHIMA, Takanori HIROKAWA*, Fumiaki NAGASHIMA**, Yuhei NITTA***, Francisco J. SÁNCHEZ-SESMA**** and Hiroshi KAWASE

* Yamashita Sekkei Inc., Japan

** Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

*** Obayashi Corporation, Japan

**** Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Synopsis

We have proposed a new theory to calculate the H/V spectral ratio of microtremors assuming that the wave field is completely diffuse and it is anticipated to be applied to detect the subsurface velocity structure beneath urban area, which is essential to mitigate seismic disaster. In order to estimate the velocity structure we measured microtremors in the Mexico basin, where there were severe damage during the 1985 Michoacán Earthquake several hundreds of kilometers away from the source region, to obtain data so that we can compare the H/V spectral ratio to gauge the goodness of our theory. First we compared the observed H/V spectral ratios for five stations. Then we compared the observed H/V spectral ratios to the theoretical H/V spectral ratios to confirm our theory. As a result, we were able to fit the peak frequency and amplitude of the observed H/V spectral ratio by the theoretical H/V spectral ratio calculated by our new method.

Keywords: Mexico basin, microtremor, H/V spectral ratio, diffuse field, subsurface structure