

常時微動を用いた表層地盤特性推定の妥当性と問題点 - メキシコシティでの検討結果 -

中村豊¹・佐藤勉²・齋田淳³

^{1,2,3}株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)

¹E-mail: yutaka@sdr.co.jp

²E-mail: tsato@sdr.co.jp

³E-mail: jun@sdr.co.jp

さまざまな波動で構成される微動を利用してSH波の重複反射による表層地盤の増幅特性を把握するために開発されたH/V手法について検討した。メキシコシティにおける堆積地盤と基盤およびその中間地域における地震観測データや常時微動測定データを用いて、微動のH/V比が表面波に起因するものではなく、SH波の増幅特性を近似的に表現していることを改めて示した。すなわち、地震動の増幅特性と地震動のH/V比が概ね一致し、地震動のH/V比と常時微動のH/V比も概ね一致していた。つまり、地震時の表層地盤の増幅特性は概ね微動のH/V比から推定できると推測される。同時にH/V比のトラフ部分が大きく深い地点では、レイリー波の影響により増幅特性が適切に推定できず、一層の工夫が必要であることも指摘した。

Key Words : *Microtremor, Strong Motion, H/V spectral ratio, Amplification, Mexico City*

1. はじめに

近年、常時微動計測は、表層地盤の振動特性を簡便に見積もることができる有力なツールとして様々な地域で用いられている。その中で、常時微動や地震動を解析する際に頻繁に用いられるH/Vスペクトル比は、地盤や構造物の動的特性をより簡素にかつ的確に表現する解析方法として注目されている。H/Vスペクトル比は、様々な地盤上での地震データの分析を通して見出されたものである。

地震被害には主として実体波が寄与しているものと考えられ、地表面でのSH波の重複反射による地震動増幅現象が重要となる。地表面と基盤のスペクトル比(H_s/H_b)は、表面波の影響により乱されて一般に大きくなる。そこで、さまざまな波動が混在した微動から卓越するレイリー波の影響を取り除くための補正スペクトルとして V_b/V_s を考えた。これは、レイリー波がなければ対象とする水平動が卓越する振動数範囲ではほぼ1であり、レイリー波エネルギーが卓越する振動数範囲では1より小さくなると期待される。 V_b/V_s を H_s/H_b スペクトル比に乗じて、より確からしい増幅特性を推定することを提案したが、実際には H_b/V_b は広い振動数範囲でほぼ1となり、実用上、地表面の H_s/V_s 比のみで表層地盤の地震動特性が推定できることが示された(中村ほか, 1986)。これがH/Vスペクトル比である。

本研究では、改めて常時微動のH/Vスペクトル比で地震動増幅特性が推定できることを、地震動データを使って検証する。併せて、常時微動を用いて地震動特性を推定する際の留意点を指摘した。

なお、本研究は文部科学省の平成11年度～平成15年度科学技術振興調整費による「アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究」の一環として行っているものの一部である。

2. 地盤の振動特性を調査した地域

今回対象とした地域は、図-1に示すメキシコシティ市街地である。メキシコシティは、16世紀以降湖を埋め立てて街を拡大させた都市である。そのため、市街地のほとんどが湖を埋め立てて形成された軟弱な堆積地盤地帯に位置している。これまで発生した代表的な被害地震として、1985年ミチョアカン地震のほか、1957年、1979年に発生した地震が挙げられ、同地域の軟弱地盤を中心に被害が発生している。また最近では、大きな被害発生には至らなかったが、2003年1月22日にメキシコシティから西に400km離れたコリマ市近傍でMw7.8の地震が発生し、メキシコシティ市街地の軟弱地盤上の地震観測点で最大約50Galの加速度が記録されている。

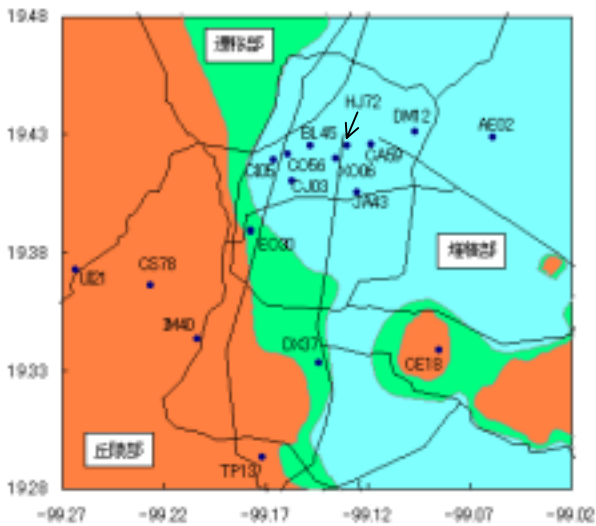


図-1 今回対象としたメキシコシティの地震観測点

表-1 Mexico-Colima 地震(2003/1/22, Mw7.8)の各地震観測点の最大加速度 (Gal)

地点	UD	NS	EW	地盤区分
UI21	2.9	4.8	4.5	丘陵部
CS78	2.8	5.8	2.7	丘陵部
IM40	2.7	4.7	3.6	丘陵部
TP13	2.1	5.4	3.6	丘陵部
CE18	2.1	3.7	2.3	丘陵部
EO30	2.4	4.9	5.3	遷移部
DX37	2.7	10.7	12.4	遷移部
CI05	4.6	14.8	24.9	堆積部
CO56	5.0	22.4	22.8	堆積部
BL45	3.9	14.4	17.1	堆積部
XO06	5.9	24.8	23.4	堆積部
HJ72	7.8	19.8	31.6	堆積部
CA59	7.5	19.7	35.7	堆積部
DM12	4.1	24.5	15.7	堆積部
AE02	7.1	28.3	17.6	堆積部
CJ03	3.5	11.7	18.9	堆積部
JA43	3.6	14.0	17.4	堆積部

3. 各地震観測点での検討内容

常時微動から表層地盤の動的特性を見積もることが可能かどうかを確認するため、メキシコシティにおける複数の地震観測点で常時微動測定を行った。これまでに観測された地震動データを収集し、測定された常時微動データと併せて以下のような手順で検討を進めた。

すなわち、まず、地震動の地震動増幅特性を地震動の H/V スペクトル比と比較する。次に地震動の H/V スペクトル比を常時微動の H/V スペクトル比と比較する。それぞれがほぼ一致していることをもって、常時微動の H/V スペクトル比により地震動増幅特性が推定できることを確認する。

図-1 は、今回常時微動測定を実施した各地震観測点の位置を示したものである。また表-1 には、2003 年 1 月 22 日に発生した Colima 地震時の各地震観測点の最大加速度を示した。図-1 に示すように、本研究ではメキシコシティを代表するそれぞれの地盤区分上（丘陵部、遷移部、堆積部）に設置された計 17 地点の地震観測点を対象にした。なお、これらの観測点は CIRES(Centro de Instrumentacion y Registro Sismico)が設置・運営を行っており、全 84 観測点がメキシコシティ内に設置されている。

常時微動の測定は、各地震観測点で約 41 秒間（4096 データ、100Hz サンプリング）の測定を 3 回実施した。センサは地震計が設置されている土台上に設置して、水平 2 方向（NS 方向、EW 方向）と上下方向の計 3 方向成分を同時に測定した。記録された常時微動波形について、各観測点ごとに水平成分と上下成分のスペクトル比（H/V スペクトル比）を算出し、同観測点で得られている地震記録の H/V スペクトル比と比較・検討した。また、地震記録については、各観測点での H/V スペクトル比のほか、丘陵部の CS78 地震観測点をリファレンスサイトとして地震動の増幅特性を推定している。

4. 各スペクトルの比較・検討結果

図-2 は、Colima 地震における各地震観測点の地震動増幅特性（CS78 をリファレンスサイトとした）を地震動の H/V スペクトル比と比較したものである。すべての観測点で地震動増幅特性と H/V スペクトル比は形状・振幅値とも概ね一致している。丘陵部の 4 観測点では平坦なスペクトルで小さな増幅特性を示し、遷移部から堆積部にかけては表層地盤厚が増すほど低周波数域に大きな増幅が現われている。これは表-1 に示した地震最大加速度の大きさともよく整合する。すなわち、図-2 は、リファレンスサイトがなくても、地震動の H/V スペクトル比によって表層地盤の地震動増幅特性が精度よく推定できることを示している。

図-3 は、H/V スペクトル比に関して、Colima 地震の地震動と常時微動を各地震観測点で比較したものである。図-3 によれば、丘陵部や遷移部では、地震動と常時微動の H/V スペクトル比は、形状・振幅ともほぼ一致する。しかし、堆積部では H/V スペクトル比のピーク値は遷移部よりも小さい。両対数グラフでみた H/V スペクトル比の形状は、相互に類似しているものの、大きさが異なっている。これは、上下動スペクトルが大きなものになっていることを示している。

各観測点での基礎地盤での微動記録や地震記録があれば、レイリー波の影響を見積もることができる。各観測点での基礎地盤の代わりに、リファレンスサイトの微動・地震動を使って、堆積地盤でのレイリー波挙動を推測する。

図-4 は、CS78 地震観測点をリファレンスサイトとした各地震観測点の上下動震幅比を求めたものである。図では常時微動と地震動のそれぞれに対して、丘陵部、遷移部および堆積部を区分して示している。

地震動についてみると、丘陵部・遷移部では多少の増減はあるものの、ほぼ全周波数域で上下動のレベルは CS78 と同じレベルであり、堆積地盤では、

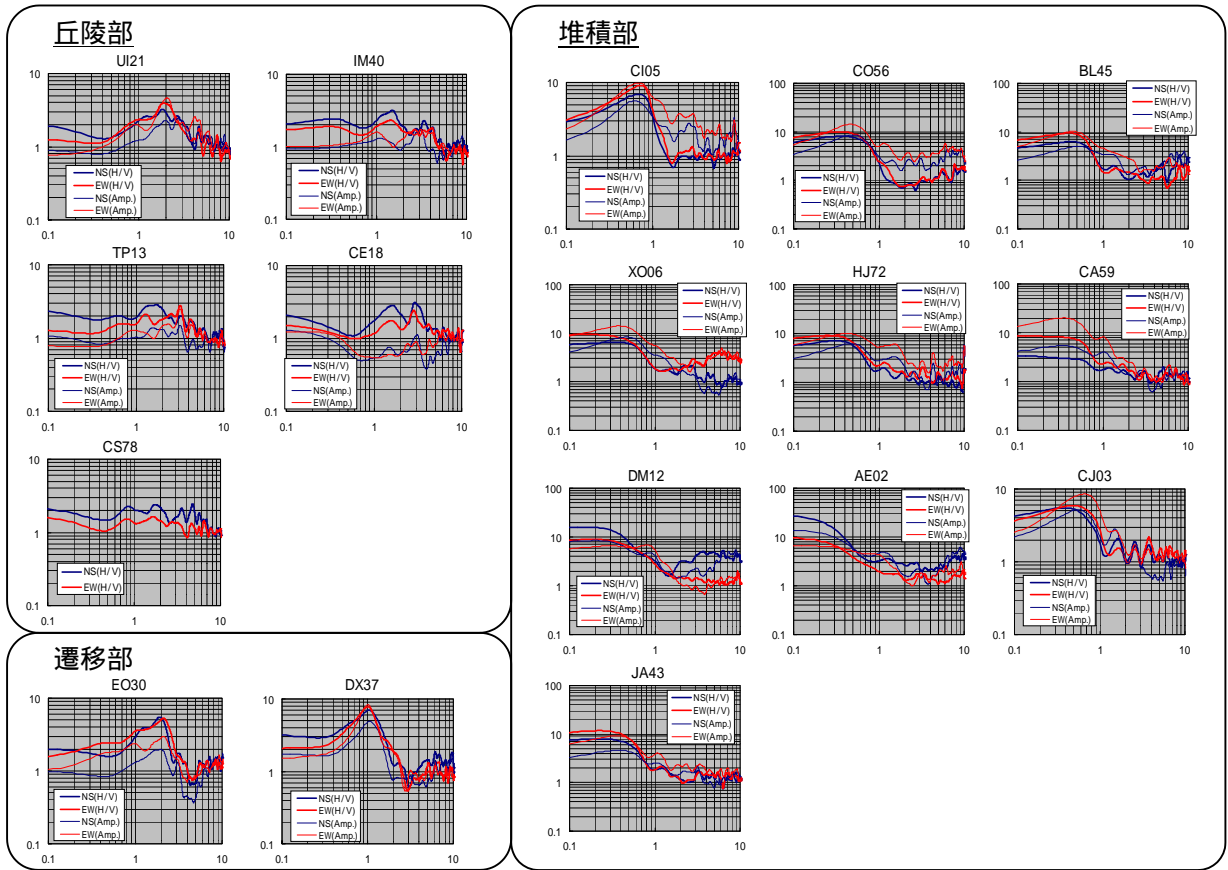


図-2 各地震観測点の地震動増幅特性とH/Vスペクトル比の比較

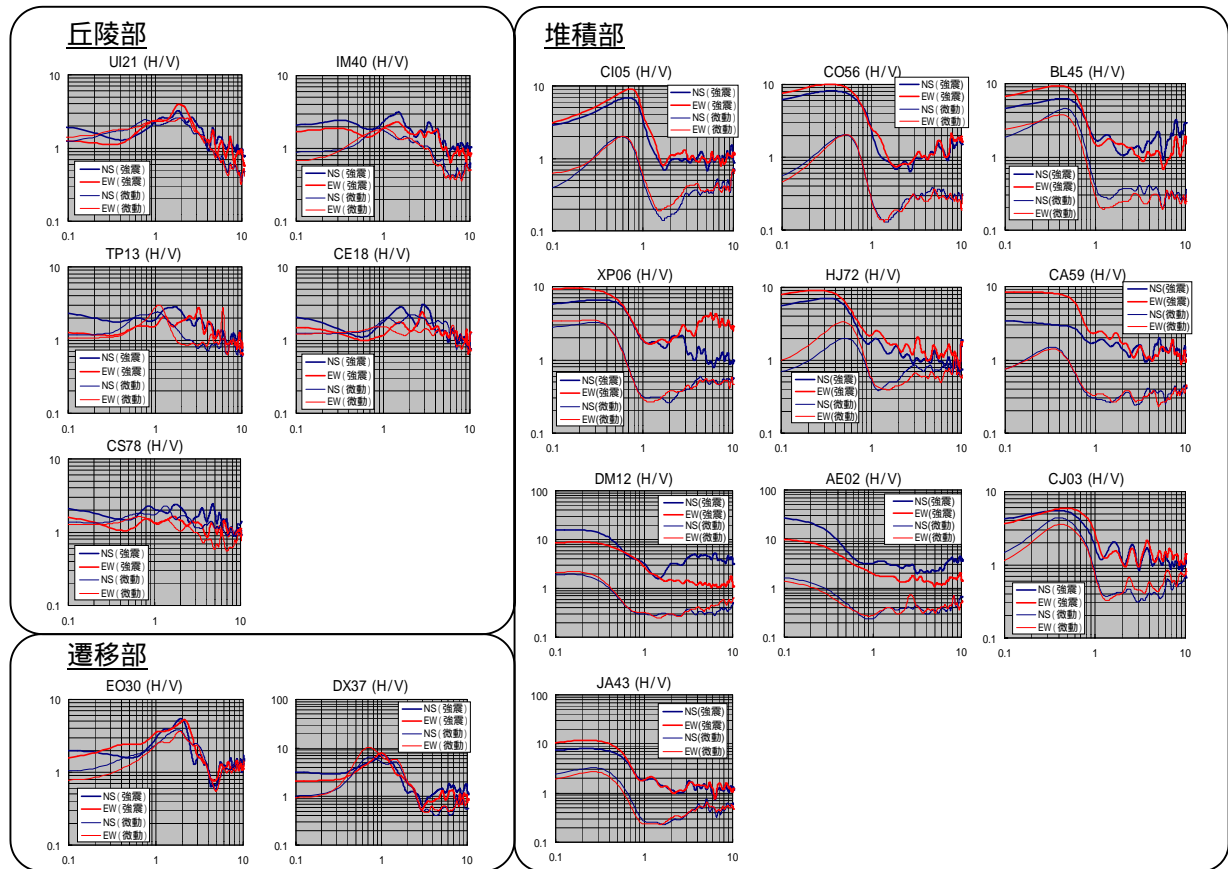


図-3 各地震観測点の地震動のH/Vスペクトル比と常時微動のH/Vスペクトル比の比較

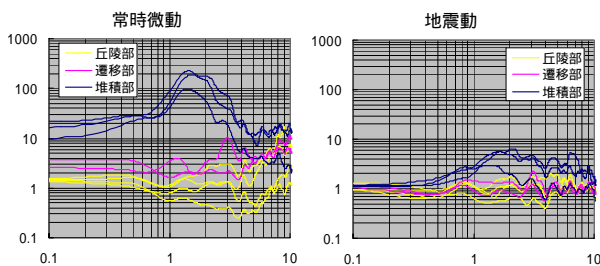


図-4 各地震観測点の鉛直動増幅特性

水平動の卓越振動数 F_0 (0.4Hz-0.8Hz) 付近では CS78 と同じ上下動レベルであり、 $2F_0$ 付近では 3-6 倍に大きくなっている。CS78 と各地点の基盤が同じ上下地震動の特性を有しているとすれば、丘陵部・遷移部の地震動にはレイリー波はほとんどなく、堆積地盤では概ね 0.8Hz-1.6Hz の帯域でレイリー波が存在すると考えられる。

常時微動については、遷移部でも数 Hz 以上のところで大きくなっておりレイリー波の影響を伺わせる。軟弱な堆積地盤では、図示した帯域のほぼ全域で CS78 の 10 倍以上の上下動レベルになっており、その振幅比は地震動に比べて極端に大きい。堆積地盤の常時微動については、道路交通などにより励起されたレイリー波がその主要部分を構成していると考えられる。H/V 法はこのレイリー波の影響を軽減するのが目的であるが、メキシコシティの厚く軟弱な堆積地盤では、水平動の卓越振動数域においても大きな上下動成分を有するため、通常の H/V 法では適切に増幅倍率を見積もることができない場合があることがわかった。こうした現象は、メキシコシティ以外でも存在しているものと思われる。

5. まとめ

ここでは、メキシコシティを対象に、地震時における表層地盤の地震動増幅特性と H/V スペクトル比、地震動と常時微動の H/V スペクトル比の関係を検討した。メキシコシティは湖を埋め立てて建設されて

おり、極軟弱な堆積地盤が広がっている。市内の丘陵地盤、遷移地盤および堆積地盤で観測された地震動と常時微動を比較した結果、以下のことが明らかになった。

地震動の H/V と堅固なレファレンスサイトを基準にした地震動増幅特性は、概ね一致する。地震動の H/V と常時微動の H/V は極端にレイリー波が卓越しない限り、概ね一致する。したがって、一次卓越振動数付近の地震動の増幅特性は常時微動の H/V で概ね評価できる。ただし、レイリー波が極端に卓越して、全般的に上下動が大きくなっている場合には、H/V 全体が下方にシフトして、適切に増幅倍率を見積もれないことがある。

今後、現象の分析を通じて のような場合にも、適切に増幅倍率が評価できる方法を見出したい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、現地での測定に便宜を図って頂いたメキシコCIRESEのEspinosa Aranda所長をはじめとする関係の方々には謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，1988年
- 2) 中村 豊，滝沢太郎：常時微動を用いた地盤の液化化予測，土木学会第45回年次学術講演会，1990年
- 3) Nakamura, Y.: Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, 12WCEE, 2000.
- 4) Nakamura, Y., T. Sato and Jun Saita: Development of vulnerability assessment models using microtremor, 5th EQTAP Workshop in Bangkok, Thailand, 2002.
- 5) Aranda, J. Manuel Espinosa: Earthquake early warning service in Mexico City, 2nd multilateral workshop on development of earthquake and tsunami disaster mitigation technologies and their integration for the asia-pacific region, 2000.
- 6) 土木学会メキシコ地震調査団：1985年メキシコ地震の被害とその復旧，土木学会誌，1986年

(2003. 10. ? 受付)

EVALUATION OF THE AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF SUBSURFACE USING MICROTREMOR AND STRONG MOTION - THE STUDIES AT MEXICO CITY -

Yutaka Nakamura, Tsutomu Sato and Jun Saita

This paper examined the relationship between the H/V spectral ratio of strong motion and the amplification characteristics or the H/V spectral ratio of microtremor. Both the data of strong motion and microtremor have been recorded at the lake, transition and hill zones in Mexico City. As a result, in case of strong motion, the amplification characteristic agreed with the H/V spectral ratio approximately. Moreover the H/V spectral ratio of strong motion agreed with that of microtremor at the same site. However, at some sites of soft ground on irregular basement, the shape of the H/V spectral ratio of microtremor and the strong motion are almost similar for each other but the H/V spectral ratio of microtremor is less than the other. At such a site, microtremor contains Rayleigh wave component and also strong motion contains relatively less Rayleigh wave component. It suggests that Rayleigh wave has influenced to this situation.