

H/V スペクトル比について

中村 豊

(株)システムアンドデータリサーチ
<東京工業大学大学院総理工連携教授>

1. はじめに

H/V スペクトル比について、その生い立ちと成因、防災実務への応用、などを概説する。

2. H/V スペクトル比の生い立ち

もともと、H/V スペクトル比は、様々な地点での種々の強震記録(SMAC など)を眺めていて、思いついたもの。すなわち、軟弱な地盤では水平動が上下動に較べて大きく、堅固な地盤では水平動と上下動が同程度の振幅で波形特性も類似していることに気づいた。

そこで、まず最大値について水平と上下の比をとり、地盤の硬軟や増幅倍率と比較するなどした。この結果、これらの間には強い相関があることを見出した。

さらに、いつでもどこでも計測できる微動に対して H/V スペクトル比を算定することで、卓越振動数が誰が分析しても同じ結果が安定して推定できること、また増幅度がだまかに推定できることや計測時間や計測時期に関わらない安定性などを確認した。

もともとの経緯から考えると、常時微動のみならず地震動に対しても、このような性質をもっていることは当然で、最初の論文でも地震動の増幅倍率と H/V スペクトル比が概ね一致することを指摘している。さらに、その後、地震動記録や微動測定記録を用いて、これらの H/V スペクトル比が相互に類似し、増幅特性とも概ね一致していることが確認されている。

3. H/V スペクトル比の成因

堅固な均質地盤では、特定の周波数成分振幅や特定の方向成分振幅が大きくなるような偏りが発生する理由がない。あらゆる周波数帯域であらゆる方向に同じような振幅で振動していると考えるのが素直である。地震動や常時微動の観測結果もこれを支持している。

軟弱な表層地盤が堅固な地盤上に堆積している状況下では、水平動の増幅現象が重要となる。水平動が大きく増幅される帯域では上下動の増幅はほとんどないと考えられる。

一方、こうした地盤では、表面を伝わる Rayleigh 波の存在が問題になる。地震災害は主として実体波で生じ、Rayleigh 波による被害はあったとしても二次的なもの以下の影響しかない。つまり、実体波のエネルギーが軟弱表層に捕捉されて振幅が増大する現象、いわゆる重複反射現象による地震動の増幅現象が極めて重要となる。この観点からすると、Rayleigh 波の存在はノイズであり、この影響を除去する手だてを考慮する必要がある。

表層地盤内を伝搬する Rayleigh 波に対して、表層地盤はハイパスフィルターの作用をすると考えることができる。つまり、表層地盤の 1 次固有振動数 (F_0) 以下では Rayleigh 波は概ね伝わらない。そして群速度が最小となる周波数 (概ね $2F_0$) で最大のエネルギーを伝達することができる。したがって、 F_0 付近については、SH 波の重複反射の影響が主体的と考えられる。

Rayleigh 波の存在を見極めるには基盤と地表の上下動を比較すればよい。対象とする周波数帯域は、水平動の増幅域 F_0 周辺である。上下動が重複反射作用で増幅される周波数は、 $V_p/V_s \times F_0$ と考えられる。注目される軟弱な表層地盤では、 V_s が $50\text{m/s} \sim 200\text{m/s}$ 程度であるのに対して、 V_p は水の水速度 (1500m/s) に近い 1000m/s 前後となる。つまり、上下動が増幅される周波数は、 F_0 の 5 倍から 20 倍となる。これに対して、Rayleigh 波の最大エネルギー伝達周波数は概ね $2F_0$ であるから、 F_0 の 3 倍程度までの帯域では、地表の上下動が基盤に較べて相対的に大きければ Rayleigh 波の影響が大きいと判断できる。

実際に微動を計測して、スペクトルを計算すると、多くのピークが現れる。以前は、分析者の“勘と経験”に頼って、表層地盤に対応する周波数を読み取っていた。これでは、恣意性が強くせいぜい参考値にしかならない。これらのピークの中から目的のものを的確に抽出するには、余分な Rayleigh 波の影響を除去する必要がある。そこで、地表面と基盤の水平動の比 $R (=A_{hs}/A_{hb} : \text{増幅特性})$ に及ぼす Rayleigh 波の影響を、地表面と基盤の上下動の比 $E (=A_{vs}/A_{vb})$ で見積もり、以下のように補正して増幅特性 A_m を推定した。

$$A_m = R / E = (A_{hs}/A_{hb}) / (A_{vs}/A_{vb}) = (A_{hs}/A_{vs}) / (A_{hb}/A_{vb}) \approx A_{hs}/A_{vs}$$

これがH/V スペクトル比である。H/V スペクトル比は、少なくとも Fo 周辺では SH 波の重複反射による増幅特性を現し、2Fo 付近では Rayleigh 波によって乱された特性を現している。Rayleigh 波の影響が少ない場合には、H/V スペクトル比によって、重複反射による増幅特性が 1 次のみならず 2 次についても的確に推測できる。

4. 防災実務への応用

H/V スペクトル比によって、微動でも地震動でも、その地点の少なくとも 1 次の固有振動数とそれに対応する増幅特性を推定できることがわかった。そこで、この情報を基に地盤や構造物の壊れやすさ指数 (K 値) を定義する。

地震被害は、変形に伴う歪が限界を超えて部材が損傷した場合に発生し、構造体としての安定を欠けば崩落に到る。そこで、歪に着目した耐震性指標を作成する。壊れやすさに関係する値と言うことで、K 値と名付けた。

工学基盤における地震動最大加速度と K 値を掛けると、構造物毎に着目する部位の歪が 10^{-6} (マイクロストレイン、 μstrain) を単位に大まかに推測できるような K 値 ($\mu\text{strain}/\text{Gal}$) を定義する。こうした K 値は、さまざまな種別の構造物や地盤に対して定義することができる。これまでに、地盤に対する K_g 値、盛土に対する K_j 値、ラーメン高架橋に対する K_s 値、建築物に対する K_b 値などがあり、脱線に対する危険度 K_d 値も定義している。

例えば、地盤に対する K_g 値は次のように定義される。

$$K_g = A^2 / F$$

ここに、F と A は H/V スペクトル比から推測される固有振動数とその増幅倍率である。例えば、基盤における最大地震動加速度が 100Gal で K_g 値が 20 ($\mu\text{strain}/\text{Gal}$) であったとき、当該表層地盤には 2000 μstrain のせん断歪が生じると推測され、何らかの地盤被害が発生している可能性がある判断される。K 値と被害の関連については、われわれをはじめ多くの国・地域の研究者により、実際の地震被害との対比において確認されている。

5. おわりに

講演では、地震動記録をみていて思いついた H/V スペクトル比について概説するとともに、 K_g 値をはじめ、K 値群の実例をいくつか紹介する予定である。地震被害と K 値群の対比をみると、両者の相関は高いものがあり、K 値で事前に危険箇所を抽出することは可能であると思われる。構造物の健全度を K 値でデータベース化しようとしているところもあると聞いている。H/V スペクトル比については既に多くのところで利用されている。今後は、K 値群を用いて耐震性を調査する方法が普及し、都市の耐震性向上に少しでも寄与することができれば幸いである。

参考文献:

- 1) 中村 豊、斉藤明夫：強震記録に基づいた表層地盤の加速度増幅特性と最大加速度の推定、第 17 回地震工学研究発表会講演概要集、pp.25-28、1983.7.
- 2) 中村 豊、上野 眞：地表面での常時微動測定による表層地盤の振動特性の推定、土木学会第 41 回年次学術講演会講演概要集、I-417、pp.833-834、1986.11.
- 3) 中村 豊、佐溝昌彦：強震観測データを用いた表層地盤の地震動特性の推定、第 20 回地震工学研究発表会講演概要集、pp.133-136、1989.9.
- 4) NAKAMURA, Yutaka: A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.1, pp.25-33, 1989.1.
- 5) NAKAMURA, Yutaka: Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC, QR of RTRI, Vol.37, No.3, pp.112-127.1996.11.
- 6) NAKAMURA, Yutaka: SEISMIC VULNERABILITY INDICES FOR GROUND AND STRUCTURES USING MICROTREMOR, World Congress on Railway Research in Florence, Italy, 1997.11.
- 7) NAKAMURA, Yutaka: CLEAR IDENTIFICATION OF FUNDAMENTAL IDEA OF NAKAMURA'S TECHNIQUE AND ITS APPLICATIONS, 12WCEE, 2656, Auckland, New Zealand, 2000.7.
- 8) SATO, Tsutomu, SAITA, Jun, NAKAMURA, Yutaka: EVALUATION OF THE AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF SUBSURFACE USING MICROTREMOR AND STRONG MOTION - THE STUDIES AT MEXICO CITY, 13th WCEE, Vancouver, Canada, 2004.8.

< 上記の参考文献の一部は、SDR のホームページ www.sdr.co.jp の論文集からダウンロードできます >