

I-639

常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化の提案

芝浦工業大学 正員 紺野克昭

東京工業大学 正員 大町達夫

1. はじめに

常時微動の水平動と上下動のスペクトル比(以下、水平上下スペクトル比と呼ぶ)を用いる地盤振動推定法が提案されている¹⁾。この方法は、常時微動の水平上下スペクトル比において最大ピークを与える周期を地盤の卓越周期、その周期における水平上下スペクトル比の値を増幅倍率と見なすものである¹⁾。このうち卓越周期に関しては、レイリー波の水平上下スペクトル比のピーク周期やラブ波のエアリー相の周期がSH波の卓越周期とほぼ一致することから、この方法によって精度良く推定できることが説明されている^{2),3)}。しかし、増幅倍率については、理論的に検討した研究は少なく、未だ合理的な説明が行われていないのが現状である^{4),5),6)}。本報告では常時微動にレイリー波が優勢に含まれていることを前提とし、表面波であるレイリー波の理論水平上下スペクトル比と実体波であるSH波の増幅特性の関連性を検討し、増幅倍率の推定に適した数値フィルターを新たに提案する。

2. 二層地盤における基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比

2.1 解析モデル

水平二層弾性地盤を用いて基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比のピーク値と地盤の増幅倍率との関係を調べる。表層と基盤の密度は $1.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と同一とし、基盤のS波速度 V_{S2} は500m/sに固定し、表層のS波速度 V_{S1} のみ67~400m/sと変化させる。表層と基盤のポアソン比は、東京都内、神奈川県内のP S検層データ(85地点)を基に作成したS波速度とポアソン比の経験式を用いて設定している。表層厚 $H(\text{m})$ は、SH波の卓越周期 T_{SH} が0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2秒になるように、次式を用いて決める。

$$H = T_{SH} V_{S1} / 4 \quad (1)$$

2.2 解析方法

地表面での鉛直点加振によって励起される基本モードレイリー波について考える。加振点が比較的遠方にある場合、加振点から距離 r の地表における基本モードレイリー波の速度スペクトルのラジアル成分 $\dot{q}_{00}(T, r)$ 、上下成分 $\dot{w}_{00}(T, r)$ は、次式で求められる⁷⁾。

$$\dot{q}_{00}(T, r) \sim (L/2) [\dot{u}_0^* / \dot{w}_{00}]_0 A_{R0} / (T \sqrt{k_0 r}) \quad (2a)$$

$$\dot{w}_{00}(T, r) \sim (L/2) A_{R0} / (T \sqrt{k_0 r}) \quad (2b)$$

ここで、 T は周期、 L は加振力スペクトル、 A_{R0} と k_0 は基本モードレイリー波のミディアムレスポンスと波数であり、 $[\dot{u}_0^* / \dot{w}_{00}]_0$ は基本モードレイリー波の地表面でのラジアル成分と上下成分の振幅比で、 $\cdot$ は虚数から実数への変換を意味する。なお、加振力スペクトル L は文献3)の14のP S検層地点での常時微動の上下動成分と基本モードレイリー波の上下成分 $\dot{w}_{00}$ との対応から、 $L(T) \propto T^2$ と設定している。以下、数値解析は周波数刻み0.0244(=1/40.96s)Hzとし周波数範囲0~25Hzで行う。これは解析区間40.96秒、サンプリング周波数50Hzの時刻歴データに対応する。

2.3 解析および考察

材料減衰が無視できる二層地盤においてSH波の増幅倍率は、インピーダンス比の逆数の2倍となるので、インピーダンス比を $\alpha (=V_{S1}/V_{S2})$ とおくと、増幅倍率 A_{SH} は $2\alpha^{-1}$ で表せる。そのため、以下では解析結果と α^{-1} との関連性に注目する。

式(2)より、基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比は、地下構造のみに依存する振幅比の絶対値 $|\dot{u}_0^* / \dot{w}_{00}|$ で表せる。 $|\dot{u}_0^* / \dot{w}_{00}|$ のピーク値を R_0 とすると、 α^{-1} が2.5程度以上になると、ピーク値 R_0 は無限大となる。そこで、基本モードレイリー波の理論速度スペクトルに対して微動データ処理時と同様に平滑化を行い、それから水平上下スペクトル比を求めることにする。

はじめに、文献3)と同様にバンド幅 $B=0.5\text{Hz}$ のParzenウィンドウを用いて基本モードレイリー波のラジアル成分と上下成分の速度スペクトルを別々に平滑化し、それから水平上下スペクトル比を求める。以上から求まる水平上下スペクトル比のピーク値を $\hat{R}_{0A}$ とし、図-1に卓越周期 T_{SH} 毎の $\hat{R}_{0A}$ と α^{-1} の関係を示す。なお、記号 $\hat{}$ は平滑化を意味し、この平滑化を平滑化Aと呼ぶことにする。同図より卓越周期 T_{SH} が長いほど $\hat{R}_{0A}$ と α^{-1} とは線形関係に近づくことが分かる。

一般に、地盤の材料減衰を無視すると、物性値が等しい二層地盤モデルでは、増幅倍率は表層厚あるいは卓越周期に依存しない。そこで、卓越周期に依存しない基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比のピーク値を算出するため、次式で表される対数型の平滑化ウィンドウを提案する。

$$W_B(f, f_c) = a \left\{ \frac{\sin(\log_{10}(f/f_c))}{\log_{10}(f/f_c)} \right\}^4 \quad (3)$$

ここに、 f_c はウィンドウの中心周波数である。また、 a 、 b は係数である。 a は水平上下スペクトル比を求める際に消去される。 b は適切な値を設定する必要がある、本研究では $b=20$ とした。このウィンドウを用いる平滑化を平滑化Bと呼ぶことにする。図-2に平滑化Bのウィンドウを実線で、平滑化Aのウィンドウを破線で示す。各平滑化ウィンドウは中心周期がそれぞれ0.2, 0.5, 1.0, 2.0秒で、縦軸は各々のピーク値で正規化してある。平滑化Bのウィンドウは、中心周期に依らずウィンドウ形状が同一であることが特徴である。

平滑化Bを用いた基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比のピーク値を $\hat{R}_{0B}$ とし、図-3に $\hat{R}_{0B}$ と α^{-1} の関係を示す。この場合、 $\hat{R}_{0B}$ と α^{-1} の関係は一本の曲線となり、卓越周期 T_{SH} に依らない。

3. まとめ

1) 二層地盤の数値解析において、通常平滑化Aを用いた場合、その水平上下スペクトル比のピーク値とSH波の増幅倍率との関係は、ピーク周期毎に異なり、両者に相関が見られない周期帯域もある。2) 一方、平滑化Bを用いる場合、基本モードレイリー波の水平上下スペクトル比のピーク値とSH波の増幅倍率には、ピーク周期に依らず、よい相関が見られる。

【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，鉄道研究報告，4，1988。2)時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集 第439号，1992。3)大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄 巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用，土木学会論文集，No.489/I-27，1994。4)堀家正則，微動の研究について，地震2，46，1993。5)若松邦夫，安井謙：常時微動の利用—短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性について—，第22回地盤震動シンポジウム，1994。6)Lachet, C. and P. Y. Bard: Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique, Journal of Physics of the Earth, Vol.84, 1994。7)Harkrider, D.G.: Surface Waves in Multilayered Elastic Media, Bulletin of Seismology Society of America, Vol.54, No.2, 1964。

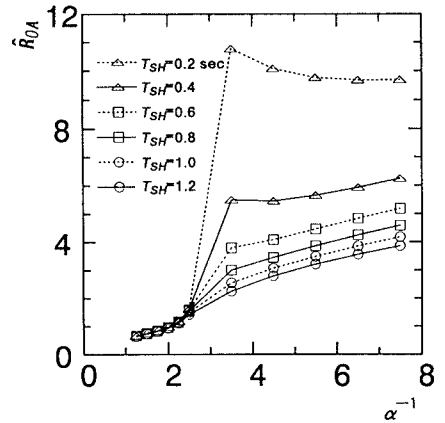


図-1 卓越周期 T_{SH} 毎のピーク値 $\hat{R}_{0A}$ と α^{-1} の関係

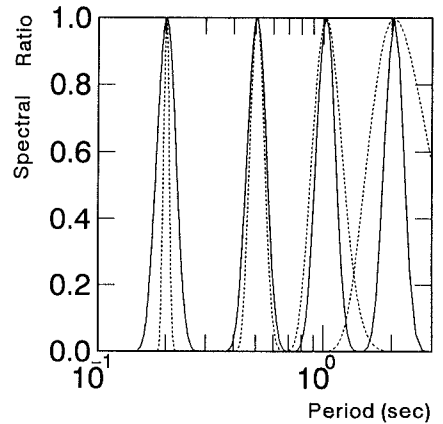


図-2 平滑化A(破線)と平滑化B(実線)のウィンドウ形状

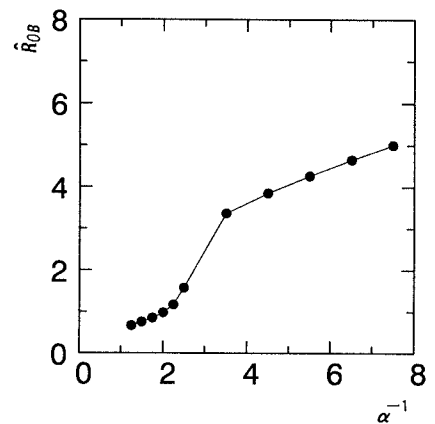


図-3 ピーク値 $\hat{R}_{0B}$ と α^{-1} の関係