

効率的なサンプリングフィルタを用いた地盤構造の同定

香川大学工学部 フェロー ○野田 茂
 応用地質関西支社 岡崎真友子
 香川大学工学部 正 山中 稔

1. はじめに

地盤や構造物の各種振動系のパラメータ同定問題は、観測記録より得られる物理量とモデル量の残差平方和を最小化する非線形最適化問題である。最適化手法としては、初期には偏微分係数計算を用いた古典的な伝統的解法が用いられたが、局所解に至る、収斂性が悪いなどの欠点があった¹⁾。

本研究では、野田らが提案した重点的サンプリングフィルタを用いた同定アルゴリズム²⁾を地盤のS波速度構造解明に初めて適用するものである。解法の有効性については数値シミュレーションによって検証する。同定に当たっては重複反射理論を用いるが、偏微分係数算定の必要がなく、アルゴリズムが簡単で手軽に使える利点がある。

2. 重点的サンプリングフィルタ

モンテカルロフィルタは、モンテカルロ計算による多数回の試行により、条件付確率密度関数を頻度分布として近似することを基本とするが、収斂性などに問題があった。そこで、野田らはフィルタ粒子の生成に重点的密度関数を採用して解検出の効率性を高めた²⁾。

重点的サンプリングフィルタ・アルゴリズムのフローを図1に示す。tは計算ステップを、(j)はj番目の粒子を意味する。

本研究では、フィルタ粒子の生成において重み関数を導入することにより、比較的少ない回数でのサンプル実現値でフィルタ分布を得ることとした。その際、重み関数 $\omega^{(j)}$ は次式を用いて算出する。

$$\omega^{(j)} = \frac{p(b_t^{(j)})}{p_I(b_t^{(j)})} \quad (1)$$

ここに、 $p(b_t^{(j)})$ は予測粒子の頻度分布である。

サンプリングの効率化を図るために導入した重点的密度関数 $p_I(x_t)$ は次式で定義する。

$$p_I(x_t) = \frac{1}{2} N(\alpha_{t|t-1}^*, c \sum_{r=1}^* \alpha_{t-r|t-1}^*) + \frac{1}{2} N(\alpha_{t-1|t-1}^*, c \sum_{r=1}^* \alpha_{t-1|t-1}^*) \quad (2)$$

ここに、 α は尤度、 $N(A, B)$ は平均値A、分散Bの正規分布(あるいは対数正規分布)を表す。cはグローバルな繰り返し回数に伴う初期値分散の拡大係数である。

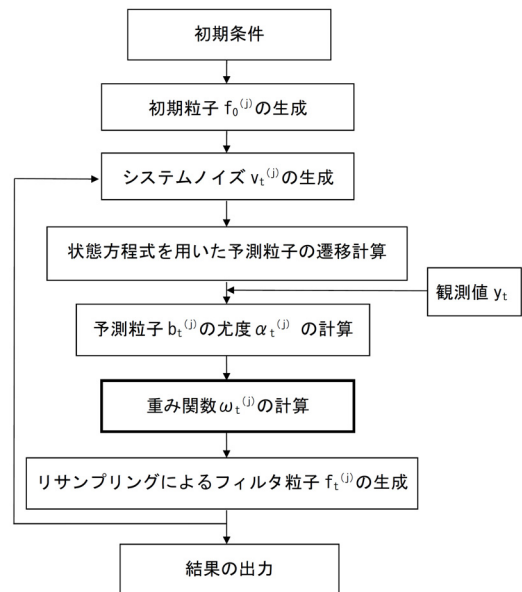


図1 重点的サンプリングフィルタの計算フロー

上式における $\alpha_{t|t-1}^*$ 、 $\alpha_{t-1|t-1}^*$ ならびに $\Sigma_{t|t-1}^*$ 、 $\Sigma_{t-1|t-1}^*$ はそれぞれ、予測粒子 $b_t^{(j)}$ 、フィルタ粒子 $f_{t-1}^{(j)}$ の頻度分布を用いて求められる。パラメータcを適切に定めることにより、収斂性の向上が期待される。

3. 状態方程式と観測方程式

本研究では、重複反射理論を物理モデルとして、地盤の伝達関数からその動特性を同定する。このため、地盤は水平成層構造(密度 ρ 、S波速度V、減衰定数 β 、層厚H)にモデル化する。

同定計算に当たり、観測記録から得られる伝達関数とSH波の重複反射を仮定して得た計算値の残差平方和を最小にする評価関数に基づき、地盤のS波速度を求めることにした。

基盤N層と地表1層間の伝達関数はそれらの地震観測データから得られるフーリエスペクトル比から求められる。i層内の上昇波Aと下降波Bの振幅を用いると、伝達関数 ϕ_{1N} は周波数の関数であり、次式で定義される。

$$\phi_{1N} = \left| \frac{2A_1}{A_N + B_N} \right| \quad (3)$$

この計算はk層とk+1層の伝達行列(複素波数や波動インピーダンスなどで構成)を用いると効率化される。

計算ステップkに周波数 ω_k を当てはめると、密度、減衰定数、層厚が周波数によって変化することはな

キーワード 重点的サンプリングフィルタ, 同定理論, S波速度構造, 重複反射理論
 連絡先 〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20, Tel & Fax : 087-864-2153

い. これらパラメータは他の方法によって精度よく求められる. そこで, 未知パラメータを S 波速度のみに限定して状態量 $x_1 \sim x_N$ を定義すれば, それらは周波数において一定となるので, システムノイズ v を介すると, 次の線形状態方程式として表現できる.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}_{\omega_{k+1}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}_{\omega_k} + v_{\omega_{k+1}} \quad (4)$$

観測伝達関数は地表ならびに N 層の地震観測記録から得られる. 観測量を伝達関数の実部と虚部で表現するのではなく, 絶対値で評価するならば, 観測方程式は状態変数からなる次の非線形式で定義される.

$$y_{\omega_k} = \left| \frac{2A_1}{A_N + B_N} \right|_{\omega_k} + z_{\omega_k} \quad (5)$$

ここに, y_{ω_k} は観測量, z_{ω_k} は観測ノイズである.

4. 解析結果

本研究では, 提案手法の妥当性・有効性を確認するため, 実地震記録を用いずにモデル地盤を用いた数値シミュレーションを採用する.

モデル地盤は 5 層とする¹⁾. 密度 ρ , 減衰定数 β , 層厚 H は一定とし, $1.8t/m^3$, 0.05 , $10m$ に設定した. S 波速度の真値は $V_{s1}=150m/s$, $V_{s2}=200m/s$, $V_{s3}=250m/s$, $V_{s4}=300m/s$, $V_{s5}=350m/s$ である. 同定計算の初期値は真値の 0.8 倍に設定し, $V_{s1}=120m/s$, $V_{s2}=160m/s$, $V_{s3}=200m/s$, $V_{s4}=240m/s$, $V_{s5}=280m/s$ とした.

図 2 にはモデル地盤の伝達関数の観測量とともに, S 波速度の初期値に基づく伝達関数を示す. 観測量には観測ノイズが見られ, 初期伝達関数は観測伝達関数からほど遠いことが理解できる.

パラメータの同定計算は 2 回のグローバルな繰り返しで収斂した. 偏微分係数を用いた従来手法¹⁾に比べて繰り返し回数が極端に少なく, 本手法の利点であると言える. 図 3 には収斂したパラメータに基づいて得られた伝達関数の同定値と真値の比較を示す. かなり精度よく同定できていることがわかる.

図 4 には 1 層, 2 層地盤における S 波速度の周波数ステップごとの収束状況を示す. この場合には 2 回のグローバルな繰り返しで収斂したが, 同定値としては真値に近い値が得られている.

5. おわりに

本研究では重点的サンプリングフィルタを用いた S 波速度構造の同定手法を新たに提案し, その妥当性を数値シミュレーションによって検証した. 提案手法である重点的サンプリングフィルタは偏微分係数を用いる古典的手法に比べて精度よく S 波速度を効

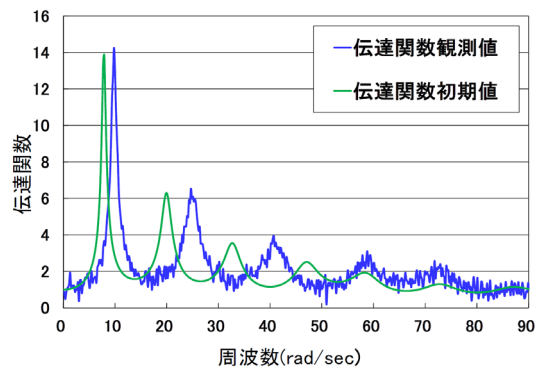


図 2 伝達関数の観測値と初期 S 波速度に基づく伝達関数の比較

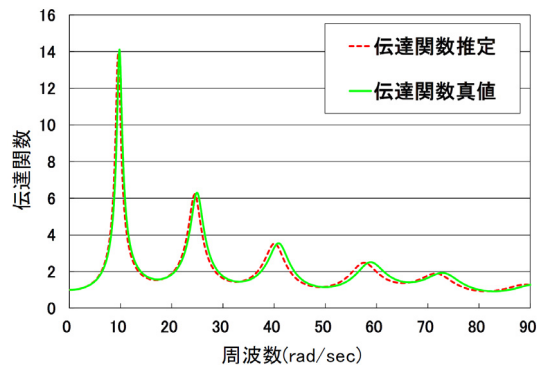


図 3 伝達関数の同定値と真値の比較

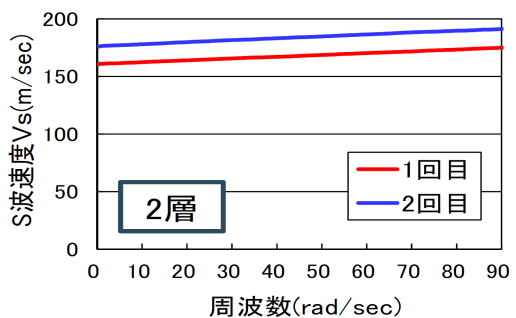
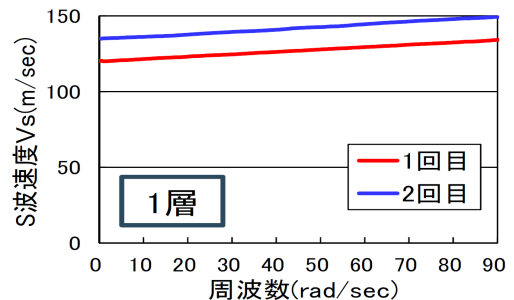


図 4 同定パラメータの変化 (1, 2 層地盤の例)

率的に同定できることが判明した. 再現性も高いことから, その有用性は明らかである.

参考文献:

- 1) 沢田勉・辻原治・平尾潔・山本英史: 地盤の S 波速度と Q 値の同定問題における SLP 法の改良とその適用, 土木学会論文集, No. 446/I-19, 1992 年 4 月.
- 2) 野田茂・濱田隆志: 効率的なサンプリングフィルタを用いた劣化履歴非線形振動系の構造同定, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, 1-252, 2004 年 9 月.