

地盤構造物の健全度評価のためのデータ同化に関する研究

○ 東北大学工学部 学生員 阿部 功介
東北大学大学院 正 員 京谷 孝史
東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎
東北大学大学院 正 員 加藤 準治

1. はじめに

トンネルなどの地中構造物は主に目視点検や打音検査、コア抜きを行い健全度を評価をしている。しかし、これらの局所的な検査方法では構造物全体の挙動や健全度を評価することは出来ない。また、構造全体の健全度評価に必要な観測データが一部の内空変位などに限られており、これが地中構造物全体の健全度評価を難しくしている。これらの背景から、少ない観測データからでもトンネルの健全度を推定評価できる数的手法の開発が望まれている。本研究では、その一例としてデータ同化手法の1つである粒子フィルタ (Particle Filter, 以下 PF) を用い、トンネル全体を対象とした健全評価手法の開発を行うものである。

2. PF によるデータ同化の概要

「データ同化」は数値シミュレーション内の変数の確率分布に観測値を取り込み、更新しながら、確率分布を求めていく手法である。これは確率密度関数の最大値を求めるといっていわゆる逆解析とほぼ同義である。データ同化は以下の、システムモデルと観測モデルと呼ばれる非線形方程式で構成される。

$$x_{t+1} = f_t(x_t) + w_t \quad (1)$$

$$y_t = h_t(x_t) + v_t \quad (2)$$

式 (1) はシステムモデルであり、時間発展の不確定性を表す。 x_t と w_t はそれぞれ、時刻 t での状態ベクトルとシステムノイズと呼ばれるもので、 x_t は例えばヤング率などパラメータである。また w_t はシミュレーションモデルの不確定性を表している。式 (2) は観測モデルであり、観測データと状態ベクトルを結び付けている。 y_t と v_t はそれぞれ、時刻 t での観測データと観測ノイズと呼ばれるもので、 y_t は例えばトンネル内空変位など観測データ、 v_t は観測誤差などである。式 (1)、(2) からなるモデルを一般状態空間モデルと呼び、データ同化を行う際に基本となる。

PF は図-1 のように各粒子の状態量を x_t の確率分布を粒子と呼ばれる多数の離散サンプルで近似し、システムモデルで更新を行う。さらに観測値を用いて尤度計算を行い、各粒子に重み付けをすることで状態量の確率分布を同定する手法である。具体的には、フィルタ分布 $p(x_{t-1}|y_{1:t-1})$ という確率密度関数を N 個のサンプル $\{x_{t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N = x_{t-1}^{(1)}, x_{t-1}^{(2)}, \dots, x_{t-1}^{(N)}$ を用いて、式 (3) のよう

に近似表現する。

$$p(x_{t-1}|y_{1:t-1}) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) \quad (3)$$

ここで、フィルタ分布 $p(x_{t-1}|y_{1:t-1})$ は、時刻 $t-1$ までのデータに基づく時刻 $t-1$ の状態を表し、下付きの $1:t$ は 1 から t までのデータであることを意味する。また、 δ はディラックのデルタ関数である。 $p(B|A)$ は、 A が起こった条件のもとで B が起こる確率を表す。PF は尤度計算後のリサンプリングの有無により、Sampling Importance Re-sampling (SIR) と Sequential Importance Sampling (SIS) に分類することができる。前者は、各粒子の尤度に応じて粒子が複製・棄却されるアルゴリズムであり、後者は尤度計算のみを行い、初期に作成した粒子を継続的に使い続けるアルゴリズムである。本研究ではその SIS を用いて推定評価を行う。

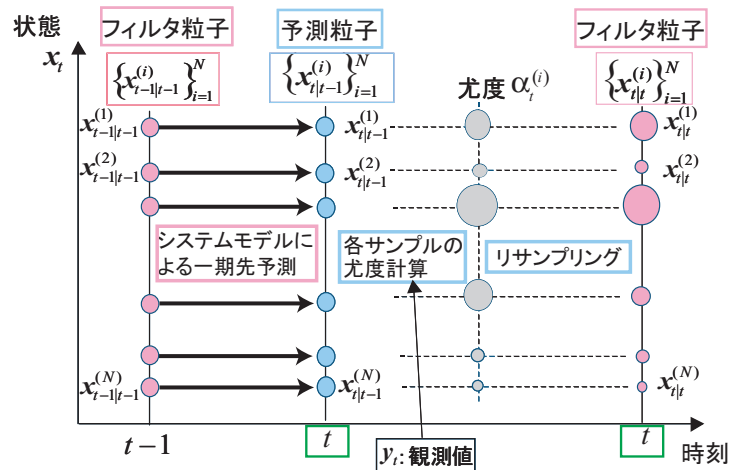


図-1 PF のイメージ

3. 数値計算例

3.1 解析条件

本研究で想定する問題を図-2に示す。トンネルは海底面から深度-100mの地点にあり、海面の水位は100~140mの範囲で周期的に変化しているものと仮定する。また、トンネルに作用する地山の初期応力の主応力 σ_1 は土の湿潤密度 γ_t と海底面からの深度 h を用いて $\sigma_1 = \gamma_t h$ 、 σ_3 は σ_1 の α 倍として $\sigma_3 = \alpha \sigma_1$ とする。また、 σ_3 が水平軸となす角度を θ とする。本研究では、図-3に示すように、トンネルライニング部をいくつか分割し、各部分の材料パ

ラメータであるヤング率 E , また , 初期応力に関するパラメータ α , θ を観測値である内空変位から同定する . 境界条件は図-4 に示すように , 側面は水平変位固定 , 最下面は鉛直変位固定とした . 材料モデルは線形弾性モデルとし , 地盤の材料定数については岩の力学的性質¹⁾ に基づき , ヤング率は $E = 1.0 \times 10^3$ MPa , ポアソン比は $\nu = 0.1$, コンクリートのヤング率は健全な部分で $E = 2.0 \times 10^5$ MPa , 劣化部分で $E = 1.4 \times 10^5$ MPa , $\nu = 0.2$ としてモデル化した .

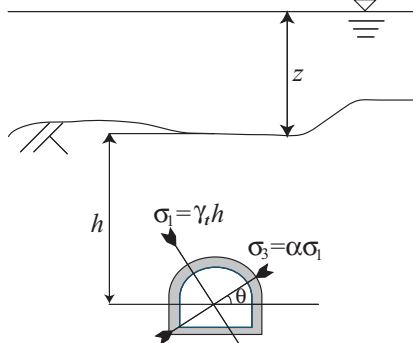


図- 2 初期応力の設定

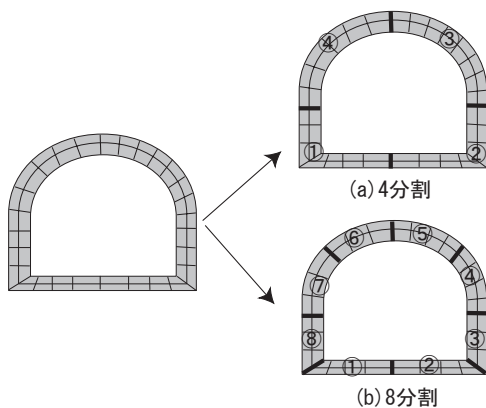


図- 3 トンネルライニングの分割;(a)4 分割,(b)8 分割

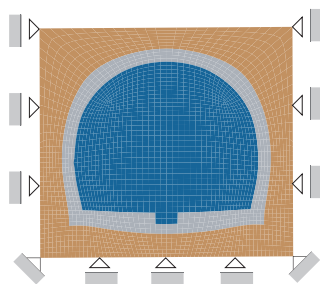


図- 4 境界条件

3.2 計算結果

図-5 は , 一例としてトンネルライニングを 4 分割とした場合の結果を示している . ここでは図-3(a) の部分③のみが劣化し , 残りの① , ② , ④が健全なコンクリートであると設定している . 図-5 を見ると , 観測回数を重ねるこ

とに同定したヤング率が確実に真値に近づいていることが分かる . また , 観測回数 20 回での③のヤング率の確率分布を図-6 に示す . 図-6 を見ると , 真値付近の確率分布が尖ってきており , その点近傍の尤度が大きいことが分かる .

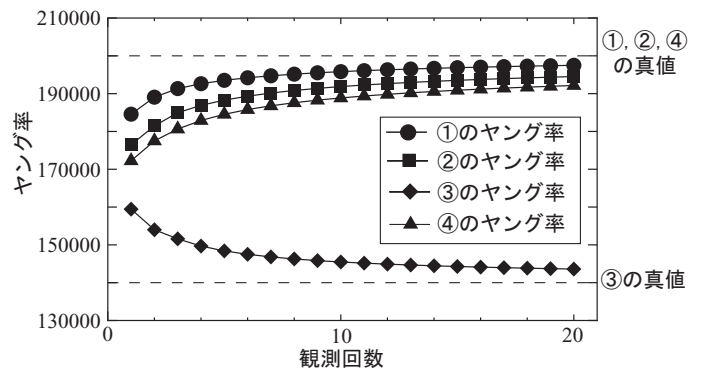


図- 5 パラメーター同定結果 (重みつき平均値)

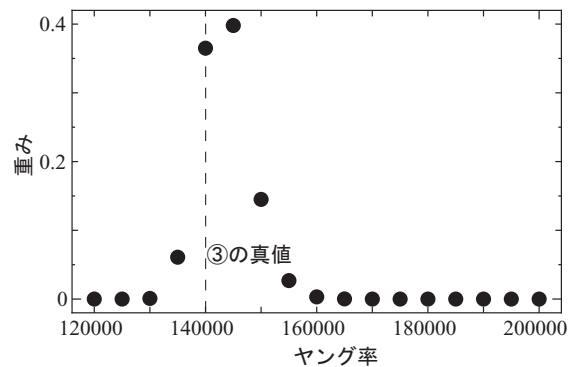


図- 6 確率分布

4. 結論

本研究ではデータ同化手法の 1 つである PF を用い , トンネル全体の健全性を評価する手法の開発を行うものである . 図-5,6 さらに図には示していないが , 初期応力に関するパラメータ α , θ の同定結果からヤング率 , α , θ の同定については PF がトンネルの健全度評価において適用可能であると思われる . PF をヤング率等を同定するために用いるのであれば , 確率分布の形状にはそれほど着目する必要はないと思われる . 最も尤度が大きいところを定めるだけであるので , 確率分布の尖った点を見つければ良い . よってパラメータの重みつき平均値を見るだけでなく , 確率分布が尖っている点も見ることでより有効に使用できる .

しかし , PF による , 確率分布やパラメーター同定結果は発生させる粒子の数や重み付けのパラメータに強く依存するのでそれらを適正に設定することが重要である .

参考文献

- 1) R.D.LAMA , V.S.VUTUKURI : 岩の力学的性質 -試験に関する技術と結果- , 古今書院,1992.