

粒子フィルタによる地盤の弾塑性パラメータ同定

Identification of elastoplastic parameters for soil using the particle filter

○ 亀谷 聡*・村上 章*・西村伸一*・藤澤和謙*・珠玖隆行**・尾崎曹斗***

S. Kametani, A. Murakami, S. Nishimura, K. Fujisawa, T. Shuku and S. Osaki

1. はじめに

土の弾塑性パラメータを地盤挙動から同定するためには、載荷履歴に沿って観測値を数値解析に取り込むことが必要となり、従前の逆解析法では対応が困難である。地球科学という「データ同化」¹⁾のうち、逐次型データ同化の手段としてカルマンフィルタに代わるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) や粒子フィルタ (PF) があり、この問題には特に後者が有効と考えられる。そこで、PF と水～土連成弾塑性有限要素解析とを連立させて、既知の載荷履歴のもとで沈下を観測することにより、観測過程で地盤の弾塑性パラメータを同定することを試みる。ここでいう‘粒子’ (サンプル) とは、「未知数 (例えば、弾塑性パラメータ) について乱数を用いて発生させた値を用いた弾塑性シミュレーション」のそれぞれを指す。検討にあたっては、1) あらかじめ設定したパラメータのもとで実施した弾塑性数値シミュレーションから求めた変位、2) 局所載荷模型実験で生じた変位、をそれぞれ観測値とし、複数の弾塑性パラメータを同定した。その結果、いずれの場合でも、観測値からパラメータを推定することができた。

2. 粒子フィルタ

本文では、PFのうちでも特に Sequential Importance Sampling (SIS)²⁾を用いたデータ同化を行う。いずれの検討にあたって、同定すべき弾塑性パラメータについて取りうる範囲で一様乱数によりサンプルを発生させ、それに基づく弾塑性解析のシナリオ (シミュレーション値) と観測値からパラメータの重みを計算する。基本的には、サンプルが多ければ多いほど、観測点・観測数が多いほどデータ同化の精度は向上するが、ここでは数百個とする。表1にある SIS の

手順では、観測の都度未知数に対する重み (尤度) が計算され、その取りうる分布を評価しながら次の観測へ進む。また、得られた重み分布から、同定すべきパラメータはその重み付き平均として求まる。

例題1として、飽和基礎地盤に盛土載荷がなされる場合を考える。想定する問題設定を図1に、盛土の載

<p>x_t: タイムステップ t における、弾性係数も含む全シミュレーション変数 y_t: タイムステップ t における観測値 (沈下計測結果)</p> <p>(i) $i=1, \dots, N$ について k 次元の乱数 $x_0^{(i)} \sim p_0(x)$ を生成する。 (ii) 各 $i(=1, \dots, N)$ について、$x_t^{(i)}$ をシミュレーションにより計算する (iii) $t=1, \dots, T$ について (a), (b), (c) のステップを実行する。 (a) $i=1, \dots, N$ について式(1)で $w_t^{(i)}$ を計算する。</p> $w_t^{(i)} = (2\pi)^{-1/2} \cdot \Sigma ^{-1/2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot (y_t - h_t(x_t^{(i)}))^T \Sigma^{-1} (y_t - h_t(x_t^{(i)}))\right] \quad (1)$ <p>(b) $W_t = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)}$ を求める。 (c) $w_t^{(i)}$ を 0~1 の範囲にするために $\tilde{w}_t^{(i)} = w_t^{(i)} / W_t$ の計算をする。</p> <p>(iv) $w^{(i)} = w_1^{(i)} \cdot w_2^{(i)} \cdot \dots \cdot w_T^{(i)}$ を計算する。 (v) $W = \sum_{i=1}^N w^{(i)}$ を求め、$\tilde{w}^{(i)} = w^{(i)} / W$ を計算する。 (vi) x_t は $x_t = x_t^{(1)} \cdot \tilde{w}^{(1)} + x_t^{(2)} \cdot \tilde{w}^{(2)} + \dots + x_t^{(N)} \cdot \tilde{w}^{(N)}$ で求める。 i: サンプルナンバー, t: 時間ステップ, $p_0(x)$: x の時刻 $t=0$ における分布, w: 重み, Σ: 分散共分散行列</p>

* 岡山大学環境学研究科 Graduate School of Environmental Science, Okayama University, ** 大本組 Ohmotogumi, Co. Ltd., *** 矢作建設工業 Yahagi Const., Co. Ltd. キーワード: データ同化, 粒子フィルタ, 逆解析

荷過程を図 2 に示す。均質な基礎地盤の順解析は SYS カムクレイモデル³⁾による弾塑性解析とし、盛土部分は弾性材料とする。

同定するパラメータについて、一様な初期応力と圧縮指数の場合を考える。観測点は図 1 の●に示す 3 点の鉛直変位とし、観測値はこれらパラメータを除く既知のものについて設定した材料定数の下で発生させたサンプルによる弾塑性解析の変位とする。各観測は相互に独立であると仮定し、分散共分散行列 Σ は対角項 σ^2 のみで表す。サンプル数 (S_n) は 800 個とし、観測には正規乱数を誤差として加えた場合も検討した。2 パラメータのデータ同化結果を図 3 に示し、200 日後の尤度分布を図 4 に示す。

例題 2 として、局所载荷模型実験の計測値に対するデータ同化も行った⁴⁾。実験値に対する解析では、圧縮指数と透水係数を未知数とした場合、推定値は収束に至るものの、同定には時間を要することが分かった。いずれ

にせよ、本文で示した手段は弾塑性挙動を示す地盤観測値を、水～土連成有限要素シミュレーションに取り込むのにきわめて有効である。

■ 参考文献 1) 中村和幸・上野玄太・樋口知之：データ同化：その概念と計算アルゴリズム、統計数理、第 53 巻、第 2 号、pp.211-229、2005。2) Doucet, A., Godsill, S. and Andrieu, C.: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, *Statistics and Computing*, **10**: 197-208, 2000。3) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, **40**(2): 99-110, 2000。4) 村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸・亀谷 聡・珠玖隆行：局所载荷模型実験における変形計測値のデータ同化、第 44 回地盤工学研究発表会、2009。

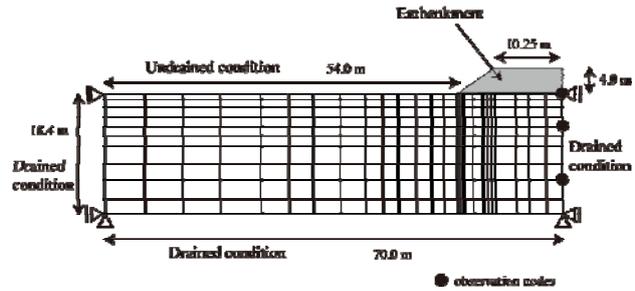


図 1 問題設定と境界条件

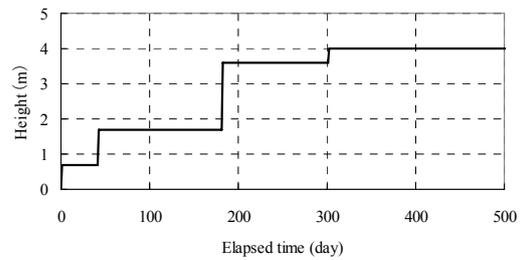
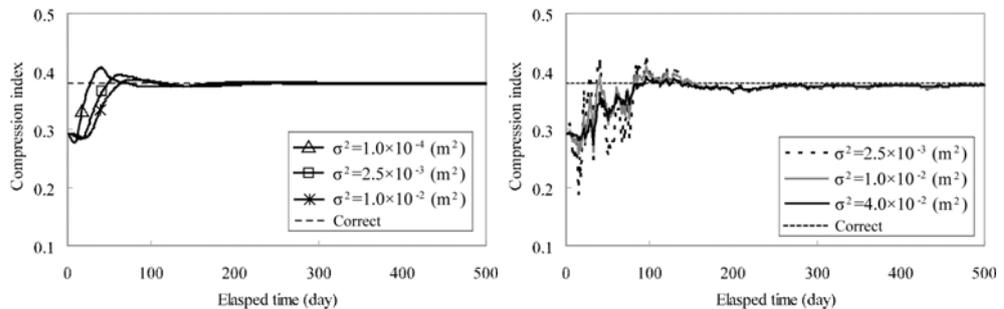


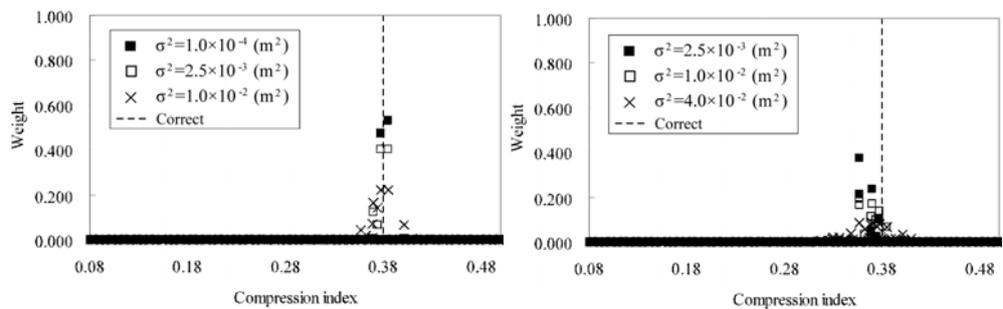
図 2 载荷過程



(a) 観測誤差なし

(b) 観測誤差あり

図 3 圧縮指数の同定結果 (2 パラメータ)



(a) 観測誤差なし

(b) 観測誤差あり

図 4 圧縮指数の尤度分布 (2 パラメータ)