

## 圧密沈下を対象とした Particle Filter を用いたデータ同化による沈下量予測

東京都市大学 学生会員 ○中村 朋佳  
 東京都市大学 正会員 吉田 郁政  
 岡山大学 正会員 珠玖 隆行

### 1. はじめに

様々な現象の予測を数値解析で行う際に境界条件、モデルパラメータなどが必要となるが、それらの値には不確定性が伴う。観測データに基づき不確定性を減少させる手法としてデータ同化<sup>1)</sup>がある。データ同化により数値解析の精度を向上させ、より信頼性の高い将来予測を行うことができる。データ同化の代表的手法として Particle Filter(以下 PF)<sup>1)</sup>がある。PFはベイズ更新を実装する方法の1つであり非線形・非ガウスの問題に適用することが可能である。本報告ではPFを用いてある盛土建設に伴う地盤の沈下量予測を行った例を報告する。

### 2. 対象地盤と観測データの概要

図-1に対象となる盛土基礎地盤の断面図を示す。1, 5層目が砂・礫質土, 2, 3, 4層目が粘性土の計5層から成る。盛土の中心直下の地表から+0.8m地点をM0, -1.5m地点をM1, -4.5m地点をM2, -7.5m地点をM3, 地表面より+0.6m地点の水平線をHPG1とする。M0-M3地点における盛土施工開始から約1年間の沈下量の時刻歴, HPG1地点における盛土施工終了時点を含め5つの時点における沈下量の分布が与えられ、これらのデータを基にM0-M3, HPG1地点での1年後と2年後の沈下量の推定を行った。図-2にM0-M3の観測データである沈下量の時刻歴, HPG1地点の沈下量の分布を示す。それぞれ縦軸が沈下量を示しており、時刻歴の横軸は盛土施工終了時点の328日目までの経過日数、沈下量分布の横軸は盛土中心からの距離を示している。

### 3. 解析手法及び更新対象のパラメータの概要

本研究では、沈下挙動に大きく影響を及ぼす粘性土層に着目し、各層の圧縮指数 $\lambda$ および透水係数 $k(\text{m/s})$ を推定対象のパラメータとした。また時間 $t$ に

おける盛土荷重 $f_t$ を以下の式でモデル化した。

$$f_t = \begin{cases} \alpha F_0 \{(\exp(\beta t) - 1) / (\exp(\beta T) - 1)\} & t \leq T \\ \alpha F_0 & t > T \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $T$ は盛土施工にかかる日数、 $F_0$ は盛土施工完了時の盛土高さに対応する荷重強度、 $f_t$ は盛土施工開始 $t$ 日における作用荷重である。 $\alpha$ 、 $\beta$ は荷重強度および載荷パターンを制御するパラメータである。表-1にデータ同化の対象とした8つのパラメータの上下限值を示す。数値解析として土/水連成有限要素法(以下 FEM)を使用し、解析に用いる FEM メッシュは1, 5層目に線形弾性モデル, 粘性土である2, 3, 4層目に Cam-clay モデルを用いた。盛土形状は対称であるため、対象となる地盤断面図右半分のみモデル化を行った。

### 4. PFによるデータ同化の手順の概略

PFでは多数の粒子(サンプル)を用意し、その粒子に重みをつけて更新を行うことで、パラメータの同定を行う手法である。以下にPFを用いた沈下量推定の手順を述べる。

- 1) 事前確率分布として表-1に示す範囲の一様分布から20,000個の粒子を生成
- 2) 各粒子を用いてFEMにより沈下量を算出
- 3) 観測データと算出された沈下量から尤度算出
- 4) 尤度の比よりパラメータの確率分布を推定
- 5) 沈下量の確率分布を推定

### 5. 地点 M0 の推定結果

本報告では盛土直下の4地点のうちM0での推定結果を示す。図-3は対象となるM0地点での観測値と推定結果である沈下量の時刻歴を示す。縦軸が沈下量、横軸が盛土施工を開始してからの経過日数を示している。図中の赤線が観測データを示し、縦に

キーワード データ同化, Particle Filter, 圧密沈下

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 都市工学科 TEL 03-5707-0104

引かれている灰色の直線はそれぞれ経過日数が小さい順から、与えられている観測データの最終日である 328 日目、観測データの最終日から約 1 年後の 668 日、約 2 年後の 1034 日目を示しており、これらの時点で推定された沈下量の推定結果であるヒストグラムを図-4 に示す。また、図-3、図-4 共に図中に引かれている 3 種類の線はそれぞれ PF で得られた推定結果である事後確率分布の 10, 50, 90 パーセンタイル値を示している。図-3、図-4(1)より 50 パーセンタイル値と観測データによる沈下曲線がほぼ一致していることが確認できる。他地点においてもほぼ再現ができていることを確認している。図-4(2)は 1034 日目の沈下量の事後分布を示しており、時間の経過とともに不確定性も大きくなっていることがわかる。このように沈下量だけでなくその不確定性も合わせて推定できる点に PF の利点があり、信頼性解析につなげることができる。

**おわりに**

本報告では圧密沈下問題をデータ同化対象とし、数値解析と観測データを用いてデータ同化手法の一つである PF を行うことで将来の沈下量予測を行った結果を報告した。今後の検討としては PF の反復手法として提案されている Iterative PF<sup>2)</sup> などの適用性検討や信頼性解析への応用を行う予定である。

**参考文献**

- 1) 樋口知之：予測にいかす統計モデリングの基礎—ベイズ統計入門から応用まで、講談社、2011。
- 2) Ikumasa Yoshida, Takayuki Shuku, Bayesian Updating of Model Parameters by Iterative Particle Filter with Importance Sampling, ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng., 2020.

表-1 FEM で用いるパラメータの範囲

	parameter	Initial distribution
Loading condition	$\log_{10}\beta$	-1.7 - 0.2
	$\log_{10}\alpha$	-0.1 - 0.1
Layer 2-4	$\log_{10}\lambda$	-0.4 - 0.17
	$\log_{10}k(m/s)$	-3.0 - 1.0

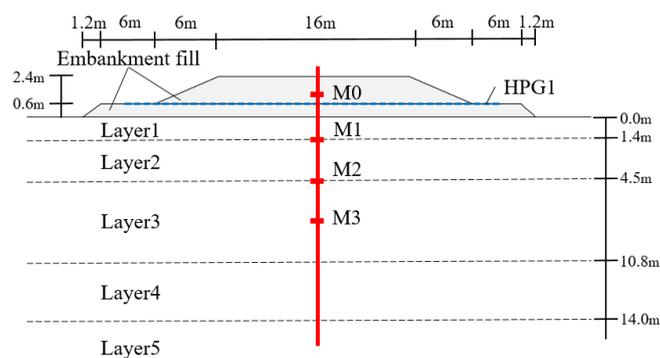
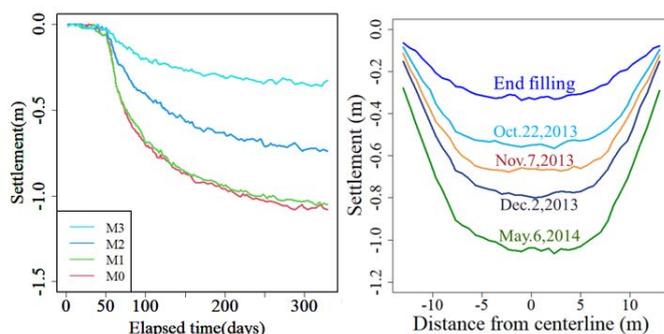


図-1 対象地盤の概要



(1) 沈下量の時刻歴 (M0-M3 地点) (2) 沈下量の分布 (HPG1 地点)

図-2 観測データとして用いた沈下量

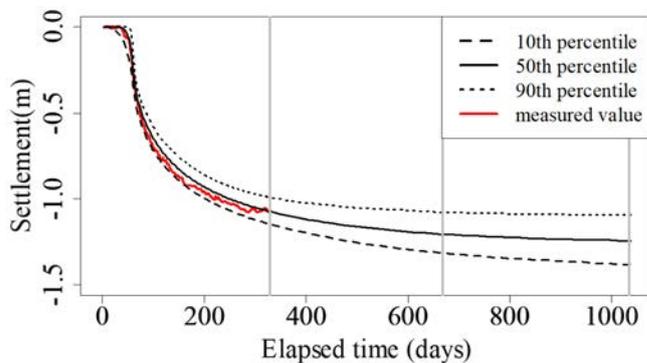
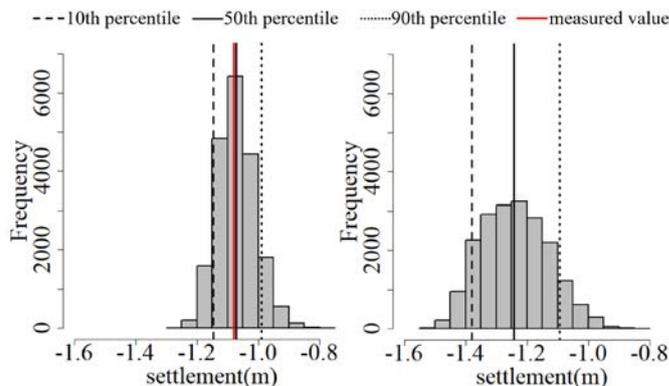


図-3 推定結果の沈下量時刻歴, 地点M0



(1) 328 日目 (2) 1034 日目

図-4 地点M0における沈下量推定結果