

粒子フィルタによる実地盤挙動のデータ同化

Data assimilation for actual ground performance using the particle filter

○村上 章*, 片岡資晴*, 珠玖隆行**, 西村伸一***, 藤澤和謙***, 中村和幸****

A. Murakami, M. Kataoka, T. Shuku, S. Nishimura, K. Fujisawa, K. Nakamura

1. はじめに

「データ同化」¹⁾とは、観測値を数値シミュレーションモデルに取り入れることで、一時刻先の精度を向上させたり、観測とシミュレーションの差を生む原因と思われるモデル中のパラメータを観測中に修正する手法を言う。後者はいわゆる逆解析である。この手段にはカルマンフィルタやそれを発展させた各種フィルタがある。著者らは、これらのうち粒子フィルタ (PF) が地盤挙動に対する弾塑性パラメータの同定に有効であることを示した²⁾。本文では、神戸空港島護岸建設工事に伴う基礎地盤の変形挙動観測データ^{3),4)}、特に沈下挙動観測結果に基づいて PF と水～土連成有限要素解析によるデータ同化を行った。

2. PF と地盤/シミュレーションモデル

PF において、変位、間隙水位、同定するパラメータを含む状態変数 x_k の確率密度関数は多数の離散サンプル (粒子) から成る実現値集合 (アンサンブル) により近似される。ここでは、PF のうちでも尤度計算のみを行い、初期に作成した粒子を継続的に使うアルゴリズム (Sequential Importance Sampling: SIS)⁵⁾による (図 1)。

図 2 に地盤構成を示す。海底面から厚さ約 33m にわたり分布する軟弱粘性土層に打

設されたサンドドレーン (SD) による改良域を一つの層とみなし、荷重条件、排水条件、応力状態など、SD の打設により複雑となった地盤条件をすべて包括した地盤定数 (マスパラメータ) の同定を試みた。

数値シミュレーションモデルとして、Cam clay モデルを用いた水～土連成有限要素解析を採用した。使用するデータ同化手法 (PF と有限要素モデルの連成) では、弾塑性構成モデルや有限要素モデル (プログラム) に制約がなく、それぞれが独立するという利点を有している。

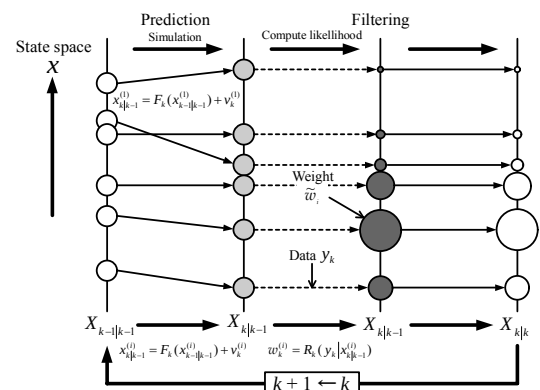


図 1 SIS⁵⁾のフロー

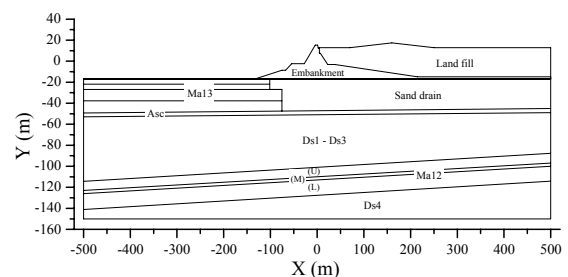


図 2 神戸港沖海底地盤の地盤構成^{3),4)}

3. PF の適用

同定するパラメータとして、圧縮指数 λ と透水係数 k を選定した。粒子数は200組とし、表1に示す範囲で一様乱数により作成した。比較のため、限界状態応力比 M と透水係数 k を同定対象とした解析も実施した。観測データとして、海底面の沈下量（観測点3BC-1, 3BC-2, 3BC-4, KC-5の計4点）を用い、観測点数の違いがパラメータ同定結果に及ぼす影響を検討した。実測値の最大沈下量に対して10%, 20%, 30%の偏差 σ を考え、分散 σ^2 を設定し、分散の違いがデータ同化結果に及ぼす影響についても検討した（表2）。

λ と k のパラメータ同定において、OP-2（3BC-2, 4）、OP-4（全観測点）の同定パラメータ経時変化は λ , k のいずれも同様の傾向を示し、最終的な同定パラメータもほぼ同じ値を示した。分散の違いにより同定パラメータの経時変化に大きな違いが認められるが、最終的な同定パラメータはほぼ同じ値を示す。

同定パラメータとして λ と k を用いた解析では、データ同化に用いる観測点数の増加に伴い、沈下挙動の予測能力が向上した。とくに、3BC-2, 4では実測値と解析結果がよく一致し、PFにより同定されたパラメータを用いることにより、実地盤の沈下挙動を精度良くシミュレートできることがわかる（図3：456日観測時点でのパラメータによる）。一方、同定パラメータとして M と k を用いた解析では、用いる観測点の違いによらず、ほぼ同様の予測結果を示した。 M について、ここで対象とした沈下挙動に及ぼす影響は比較的小さく、沈下挙動予測には λ の同定が有効である。各時刻における同定パラメータを用いた解析では、時間経過によらず同定パラメータの実地盤挙動の予測能力は同程度であった。101日経過時点で同定されたパラメータを用いたとしても、比較的高い精度で長期の沈下挙動が予測できるものと期待される。

■参考文献 1) 中村和幸ら：データ同化：その概念と計算アルゴリズム，統計数理，53(2): 211-229, 2005. 2) 村上 章ら：粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化，応用力学論文集，12: 99-105, 2009. 3) 神戸空港変形解析検討会：神戸空港変形解析報告書：1-60, 2003. 4) 長谷川憲孝ら：神戸空港海底地盤における沖積層の圧密特性，土木学会論文集 C，63(4): 923-935, 2007. 5) Doucet, A., Godsill, S. and Andrieu, C.: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, *Statistics and Computing*, 10: 197-208, 2000.

表1 サンプルの発生範囲

Parameter	Range of value for particle generation
λ	$0.30 \leq \lambda \leq 0.60$
M	$0.80 \leq M \leq 1.40$
k (m/day)	$1 \times 10^{-6} \leq k \leq 1 \times 10^{-3}$

表2 データ同化の実施ケース

Case	Target parameters	Observation data	Variance σ^2
1	λ, k	OP-1	$(0.2S)^2$
2	λ, k	OP-2	$(0.2S)^2$
3	λ, k	OP-4	$(0.2S)^2$
4	λ, k	OP-4	$(0.1S)^2$
5	λ, k	OP-4	$(0.3S)^2$
6	M, k	OP-1	$(0.2S)^2$
7	M, k	OP-2	$(0.2S)^2$
8	M, k	OP-4	$(0.2S)^2$
9	M, k	OP-4	$(0.1S)^2$
10	M, k	OP-4	$(0.3S)^2$

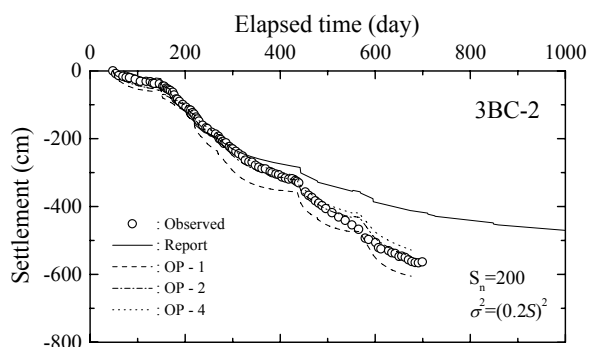


図3 同定パラメータを用いた解析結果