

## 代替モデルと粒子フィルタを用いたフィルダム盛立解析のパラメータ推定

鹿島建設(株) 正会員 ○岩前伸幸 宇津野衛 西澤勇祐 鈴木一輝 大野進太郎

### 1. 背景

フィルダム工事における「FEM 情報化施工」<sup>1),2)</sup>では、盛立時の堤体の力学挙動を FEM 解析にて再現し、その結果を施工管理に活用している。ここで、堤体の力学挙動を精度よく再現するには盛立材料の解析物性値を適切に設定することが不可欠である。しかしながら、材料試験の結果のみから適切な解析物性値を定めるのは困難であり、盛立中に得られた動態観測結果と解析結果を比較し、適宜、解析技術者が解析物性値を修正する必要がある。解析物性値の推定には、粒子フィルタなどデータ同化の活用が有効と考えられ、実際にその適用性を検証した先行研究<sup>3)</sup>もあるが、同手法は計算負荷が高いことが実用上の課題となる。

本研究では、解析物性値をキャリブレーションする際の計算負荷低減を目的として、実際の FEM 情報化施工事例を題材に FEM モデルの入出力関係を近似する代替モデル(図表中では SM と略記)を作成した。また、FEM モデルと代替モデルそれぞれを用いて粒子フィルタによる解析物性値の推定を行い、双子実験の枠組みでその精度を比較した。

### 2. 数値解析

(独)水資源機構の小石原川ダム(福岡県朝倉市)における FEM 情報化施工<sup>1),2)</sup>を題材に、フィルタ材およびロック材の圧縮指数  $C_c$ 、膨潤指数  $C_s$ 、および鉛直降伏応力  $\sigma'_{v0}$  の合計 6 つの解析物性値(以下、パラメータと呼ぶ)を推定する問題を考える。はじめに、各パラメータをランダムに設定した 4000 ケースの土水連成弾塑性 FEM 解析を実施し、図-1 に示す動態観測項目に対応する量について盛立開始から完了までの日別値を出力した。ここで、各ケースのパラメータの値は表-1 に示す範囲の一様乱数で与え、その他の解析条件については、文献<sup>2)</sup>に倣って設定した。

### 3. 代替モデルの構築

実施した 4000 ケースの FEM 解析結果のうち 100 ケースの結果を用い、2 次多項式による代替モデルを作成した。100 ケースの選定においては、表-1 の範囲からラテン超方格サンプリングにより 100 組のパラメータをサンプルし、それぞれと最も近いパラメータを用いた解析ケースを選定した。

図-2 に 4000 組のパラメータに対する FEM 解析と代替モデルによる計算値(450 日目の VA1-1(コア下部の層別沈下計)および EA-17(フィルタ上部の土圧計))の比較例を示す。両者はよく一致しており、100 ケースの解析結果から元のモデルを精度よく近似する代替モデルが得られていることが分かる。

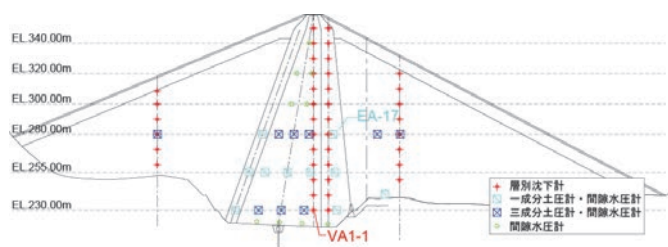
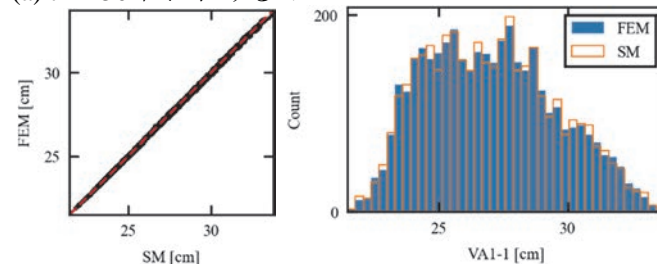


図-1 出力変数(動態観測項目に対応)の配置

表-1 パラメータの設定範囲

	フィルタ材	ロック材
圧縮指数 $C_c$	0.030 - 0.070	0.043 - 0.100
膨潤指数 $C_s$	0.005 - 0.015	0.013 - 0.032
鉛直降伏応力 $\sigma'_{v0}$	300 - 700	400 - 800

(a) t = 450 日における VA1-1



(b) t = 450 日における EA-17

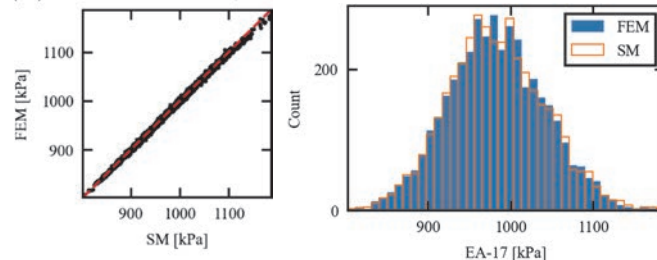


図-2 FEM 解析と代替モデルの出力の比較

キーワード 代替モデル, 粒子フィルタ, 土水連成弾塑性 FEM, 盛立解析

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

#### 4. 粒子フィルタによるパラメータ推定

文献<sup>3)</sup>では、フィルダム施工時の動態観測結果を土水連成弾塑性 FEM 解析に同化することにより解析物性値を推定している。本研究では、文献<sup>3)</sup>を参考に FEM モデルと代替モデルそれぞれを用いて粒子フィルタ（粒子数 4000）による解析物性値の推定を行った。同化するデータは表-2 に示すパラメータに対する FEM 解析の結果とし、推定されたパラメータを真値と比較することで、その推定精度を評価する（双子実験）。

粒子フィルタは状態変数の分布を推定する手法であり、分布から状態変数の推定値を求めるにはいくつかの方法が考えられる。ここでは、フィルタリング後の分布から計算した期待値を推定値とした。図-3 に各出力ステップにおけるパラメータの推定値を示す。代替モデルを用いた場合の結果（赤線）は、FEM 解析のみを用いた場合（黒線）と比べると精度が落ちるものの、おおむね真値に近い値を推定できている。最終的なパラメータの推定値を表-3 に示す。

表-2 双子実験におけるパラメータの真値

	フィルタ材	ロック材
圧縮指数 $C_c$	0.0574	0.0550
膨潤指数 $C_s$	0.0099	0.0170
鉛直降伏応力 $\sigma'_{v0}$	450	500

表-3 パラメータ推定値の比較

パラメータ		真値	FEM	SM
フィルタ材	圧縮指数 $C_c$	0.0574	0.0578	0.0580
	膨潤指数 $C_s$	0.0099	0.0101	0.0105
	鉛直降伏応力 $\sigma'_{v0}$	450	455.0	488.6
ロック材	圧縮指数 $C_c$	0.0550	0.0523	0.0576
	膨潤指数 $C_s$	0.0170	0.0170	0.0166
	鉛直降伏応力 $\sigma'_{v0}$	500	496.1	527.6

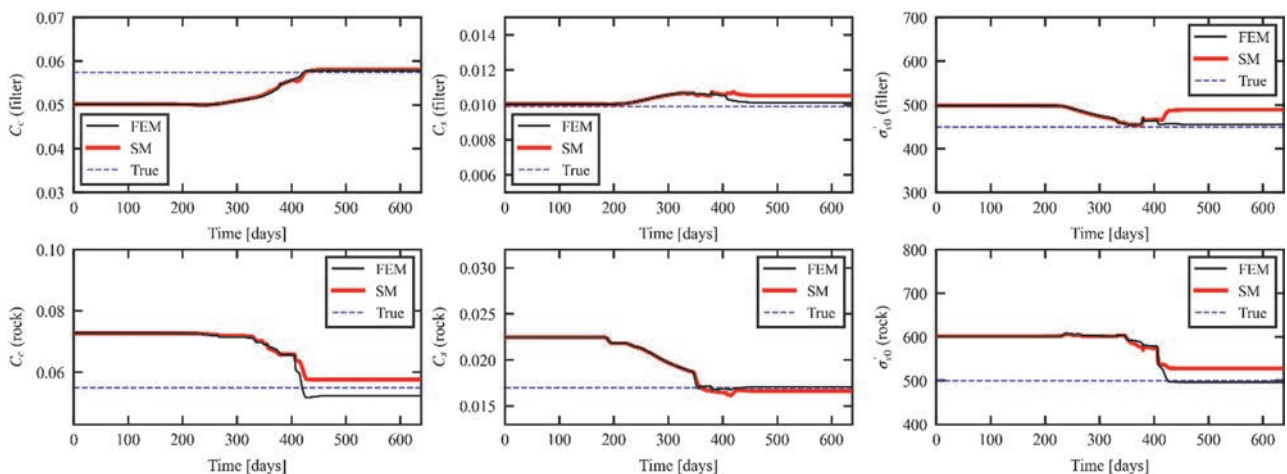


図-3 各計算ステップにおけるパラメータの推定値

#### 5. まとめ

実際の FEM 情報化施工事例を題材に、土水連成弾塑性 FEM 解析の結果から代替モデルを作成し、これを用いて粒子フィルタによるパラメータ推定を行った。その結果、今回の例に対しては、2次多項式という単純な関数と 100 ケースの解析結果から、設計空間内で FEM 解析を精度よく近似する代替モデルを得ることができた。FEM 解析を用いた粒子フィルタによる推定の有効性については文献<sup>3)</sup>の示すとおりであるが、代替モデルを用いた場合においても真値に近い推定値が得られることが新たに確認された。この方法は、FEM 解析のみを用いた場合と比べてパラメータの推定精度がやや落ちるものの、必要な FEM 解析のケース数を大幅に削減できる点で実務上有用であると考えられる。設計変数がより多い場合の代替モデルの精度や代替モデルの誤差がパラメータの推定精度に与える影響については今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 宇津野ら：小石原川ダムを対象とした土水連成弾塑性 FEM 解析（その 1）－情報化施工への適用－，第 74 回土木学会年次学術講演会，III-459，2019。
- 2) 大野ら：小石原川ダムを対象とした土水連成弾塑性 FEM 解析（その 2）－動態観測結果に基づく精度向上－，第 74 回土木学会年次学術講演会，III-460，2019。
- 3) Tanenaga, et al.: Identification of material parameters by particle filter using observation data obtained during construction of rock-fill dam, *Int. J. Geoen. Case Hist.*, **7** (1), 2021.