

既設ダム耐震補強工事の情報化施工 ―データ同化によるパラメータ推定―

鹿島建設(株) 正会員 ○奥田喬一 小林孝彰 大野進太郎 中島悠介 岩前伸幸 藤崎勝利

1. はじめに

情報化施工における堤体挙動予測解析では、施工中の動態観測結果に基づいて、逆解析により地盤材料の物性値を同定して予測精度の向上を図る。しかしながら、設計者の経験を頼りに試行錯誤的に行う従来の同定作業は、膨大な労力と時間を要するのに加え、属人的な作業であるために客観性の確保に課題がある。効率的・客観的な逆解析の実現には、粒子フィルタなどのデータ同化の活用が有効であると考えられる。先行研究としては、ロックフィルダムの築堤に関する FEM を対象に、粒子フィルタを用いて堤体剛性パラメータを同定した取り組みが挙げられる<sup>1)</sup>。本論文では、既設ダム耐震補強工事の情報化施工において、データ同化を活用して物性値同定を実施した事例について報告する。なお、本工事の情報化施工のフローおよび数値解析については前編で詳述している。

2. 粒子フィルタによるパラメータ推定

村山上貯水池堤体の耐震補強工事にて実施した土水連成弾塑性 FEM（前編にて詳述）を対象に、粒子フィルタによるパラメータ推定を実施した。図-1 は FEM 解析モデルの堤体部分の拡大図である。図中に併せて示す動態観測項目について、2021 年 6 月 1 日から 2022 年 10 月 29 日までの観測結果を同化に用いた。本検討では、盛立に伴う沈下を再現する上で影響が大きいと考えられる、既設堤体の下流さや土および新設堤体のローム材の圧密挙動関連のパラメータを推定対象とし（表-1）、土質試験結果や締固め品質管理結果を基に設定した推定範囲において、5000 組のパラメータセットを作成した。なお、動態観測項目に対応する変位や水圧の数値解析値を得るにあたり、計算負荷低減を目的として、FEM と代理モデルを併用した。1000 組のパラメータセットについては FEM で計算を行い、残りの 4000 組については岩前ら(2022)<sup>2)</sup>を参考に、多項式回帰による代理モデルを用いて近似的な計算結果を得た。

図-2 に粒子フィルタ（粒子数 5000）によって推定した各パラメータの分布を示す。図中の赤線は分布の期待値である。既設堤体（下流さや土）のパラメータに着目すると、膨潤指数については 0.015 付近に分布のピークが見られた一方で、圧縮指数や降伏応力の分布については明確なピークは見られなかった。これは既設堤体内の応力がほぼ弾性領域内にあり、膨潤指数の既設堤体挙動への寄与がその他のパラメータよりも大きいためである。また、新設堤体（ローム材）についても同様に、膨潤指数の分布は明確なピークが見られたのに対して、圧縮指数はほぼ感度がない結果となった。透水係数は  $10^{-6}$  cm/s 程度に分布のピークが見られた。

表-1 推定対象とするパラメータとその推定範囲

|      |       |                |      |                        |
|------|-------|----------------|------|------------------------|
| 既設堤体 | 下流さや土 | 圧縮指数 $\lambda$ | -    | 0.1302 ~ 0.2604        |
|      |       | 膨潤指数 $\kappa$  | -    | 0.00434 ~ 0.0868       |
|      |       | 降伏応力 $p_c$     | kPa  | 50 ~ 5000              |
| 新設堤体 | ローム材  | 圧縮指数 $\lambda$ | -    | 0.0434 ~ 0.304         |
|      |       | 膨潤指数 $\kappa$  | -    | 0.00434 ~ 0.0304       |
|      |       | 降伏応力 $p_c$     | kPa  | 10 ~ 3000              |
|      |       | 透水係数 $k$       | cm/s | $10^{-8} \sim 10^{-4}$ |

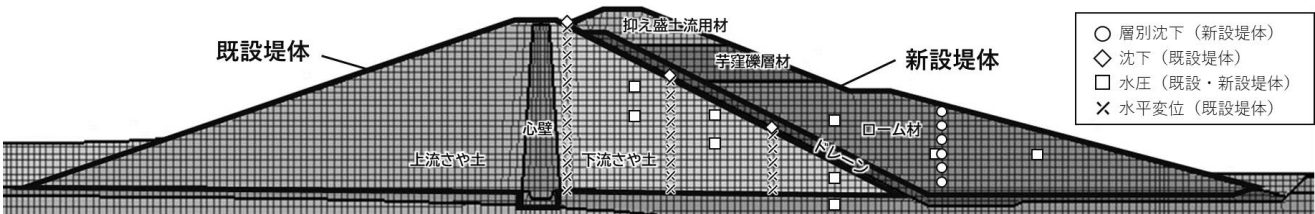


図-1 解析モデル(堤体拡大)および同化する動態観測項目

キーワード 逆解析, データ同化, 土水連成弾塑性 FEM, 弾塑性構成則, 既設ダム耐震補強, 盛立  
連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株)土木設計本部 TEL 03-5544-1111

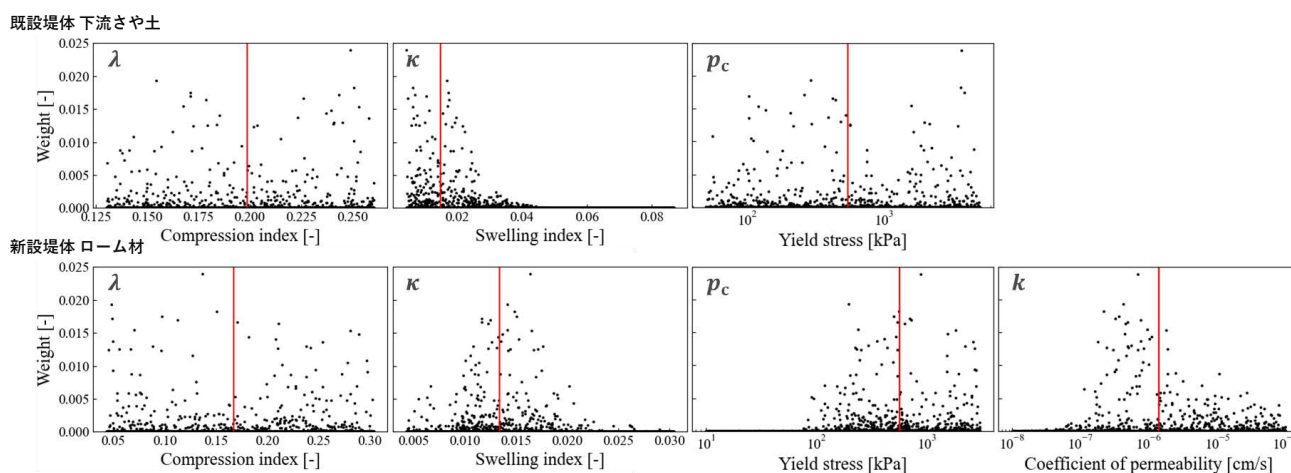


図-2 粒子フィルタによる各パラメータの分布の推定結果(赤線は分布の期待値)

### 3. 推定パラメータを用いた FEM 解析

粒子フィルタによって感度が確認された既設堤体の膨潤指数および新設堤体の膨潤指数と透水係数については分布の期待値(図-2での赤線)を, その他のパラメータについては事前の土質試験結果などから決定した値を用いて FEM 解析を実施した. その結果の例を図-3 にまとめる. 黒線が実測値(実線部分をデータ同化に利用), 赤線が推定パラメータによる FEM 解析結果, 緑線が事前予測でのパラメータによる FEM 解析結果である. 粒子フィルタによる推定パラメータを用いた FEM 解析では, 実測値をうまく再現できている. 特に, 事前の予測解析では過大評価していた既設堤体の沈下挙動の再現性が向上した. なお, 既設堤体の沈下や新設堤体の層別沈下の計算の一部では隆起挙動が見られ, やや再現性に欠けるが, これには盛立に伴う側圧上昇を過大に評価している可能性や, 2次元でのモデル化の影響が考えられる. 今後の課題としたい.

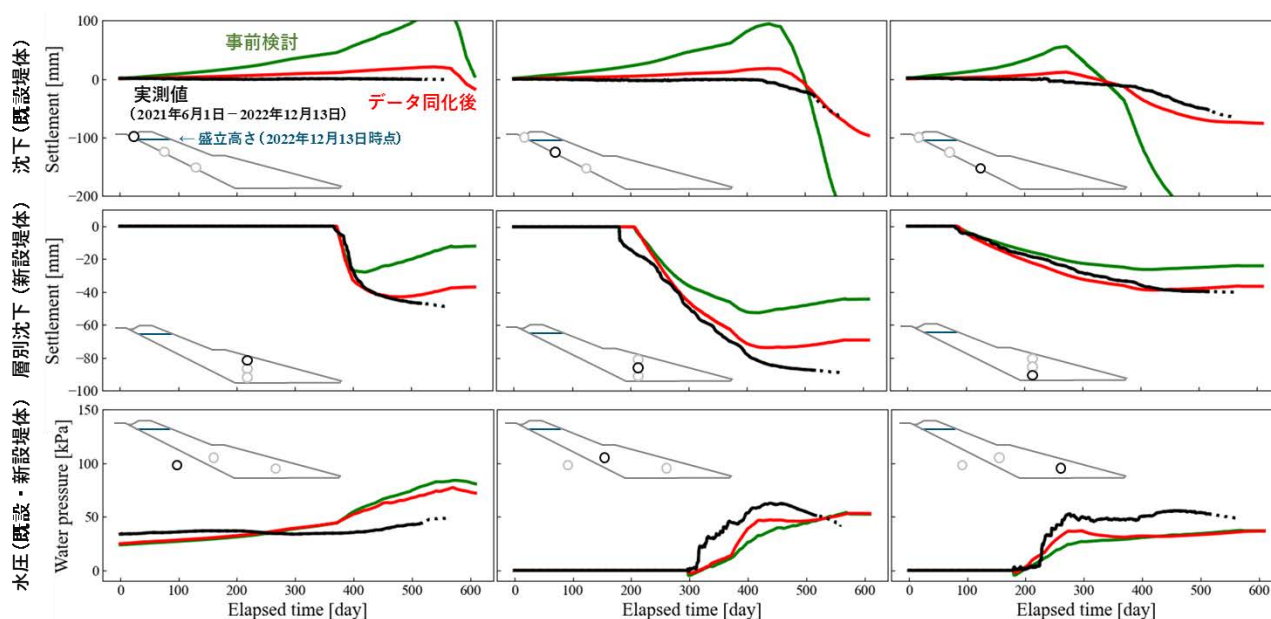


図-3 データ同化で推定したパラメータによる予測解析

### 4. まとめ

本論文では, 村山上貯水池堤体の耐震補強工事を対象に, データ同化による物性値同定を実施し, その有用性を確認した. 今後も実務への適用を進め, 知見・経験を蓄積していきたい.

#### 参考文献

- 1) Tanenaga, et al. (2021). Identification of material parameters by particle filter using observation data obtained during construction of rock-fill dam, *Int. J. Geoeng. Case Hist.*, 7(1), 76-94.
- 2) 岩前ら. (2022). 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, 第77回土木学会年次学術講演会, CS5-06.