

加圧板法の計測データに基づく不飽和浸透特性のデータ同化

工学部先進工学科海洋土木工学プログラム 伊藤 真一

1. はじめに

不飽和地盤の浸透挙動を定量的に評価するためには水分特性曲線の推定が重要である。水分特性曲線は保水性試験によって得られるが、地盤工学会基準には平衡に達するまでの時間が長い試験が多いことや平衡状態の確認が難しい場合があるなどの留意点が記載されている。そこで筆者らは、保水性試験実施時における経時的な計測データを有効活用することで、短時間で水分特性曲線を推定できる方法についての研究を行っている。既往の研究¹⁾では、保水性試験の一つである土柱法とデータ同化を組み合わせる手法を提案し、簡易かつ短時間で水分特性曲線の推定が可能であることを示している。しかし、土柱法は高サクション域の計測が困難であるため保水性の高い土には不向きである。そこで本研究では、より高サクション域の計測も可能な加圧板法とデータ同化を組み合わせ水分特性曲線推定手法の提案を目的として、加圧板法の計測データに基づく水分特性曲線の推定に対するデータ同化の適用性について検証する。

2. 保水性試験(加圧板法)の概要

供試体に任意の空気圧 u_a を与え、土中水の排水・吸水による供試体の含水比を逐次計測する。その時の空気圧 u_a と供試体下部で計測した間隙水圧との差をサクション S として、空気圧 u_a を段階的に変化させることで水分特性曲線を得る。図-1 は加圧板法試験機の概要図を示している²⁾。圧力セル内に供試体を設置し、圧力チャンバー内に電子天秤を設置する。本研究では、背圧 $u_{w,BP}$ は常に 50kPa で加圧し、 u_a を 50kPa から 75kPa まで段階的に変化させた。試験試料としては豊浦砂($\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$)を用いて、直径 60mm、高さ 20mm のモールドに初期間隙比 $e=0.78$ 、初期含水比 $w=25\%$ で豊浦砂を締固めて供試体を作成した。

図-2 は加圧板法による試験結果を示している。同図は、圧力水頭 ψ と体積含水率 θ の経時変化を示している。土中水からの排水量が 0.01g/h になった時点を目安として平衡状態とみなし、平衡状態到達後に空気圧 u_a を変化させた。この手順を繰り返して合計 5774 分で試験は終了した。本研究では、より短時間で水分特性曲線を求めるために、試験開始から約 1700 分後の 300 分間を用いてデータ同化を行うこととした。

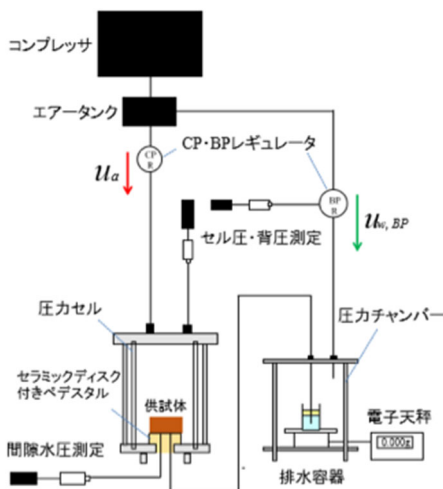


図-1 加圧板法試験機の概要図

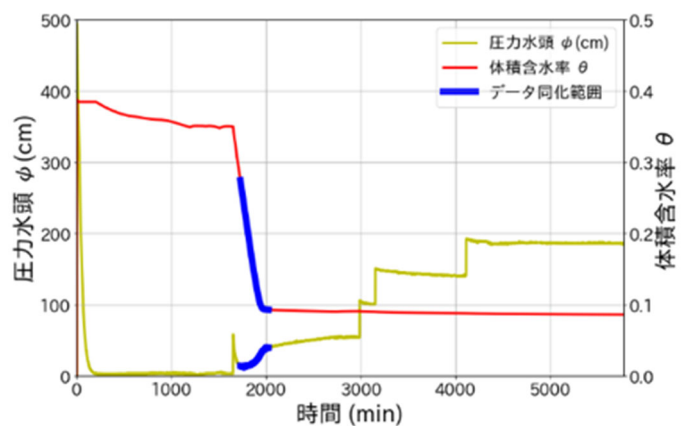


図-2 加圧板法による試験結果

3. 解析手法

(1) 不飽和・飽和浸透流解析

不飽和・飽和浸透流解析で用いた支配方程式は次式である³⁾。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \rho_w k(\psi) \bar{\nabla}(\psi + x_3) \\ = \left(n S_r \frac{d\rho_w}{d\psi} + \rho_w S_r \frac{dn}{d\psi} + \rho_w n \frac{dS_r}{d\psi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 $k(\psi)$ は不飽和透水係数、 ψ は圧力水頭、 x_3 は位置水頭、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 t は時間である。ここで、水の密度 ρ_w と間隙率 n が圧力水頭 ψ によって変化しないと仮定し、体積含水率 θ が $\theta = n S_r$ で表されること、間隙水の流れが一次元的であることを考慮すると、式(1)は式(2)に変形できる。

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} + 1 \right) \right\} \quad (2)$$

水分特性曲線モデルとしては式(3)に示す van Genuchten モデル⁴⁾を、不飽和透水係数モデルとしては式(4)に示す Mualem モデル⁵⁾を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$k(\psi) = k_s \cdot S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率である。また、 α と n は水分特性曲線の形状を与えるパラメータであり、 k_s は飽和透水係数を表している。本研究において推定すべき未知パラメータは θ_s 、 θ_r 、 α 、 n の4種類であり、これらをMPFによって推定することにした。

(2) 融合粒子フィルタ (MPF)

データ同化手法として融合粒子フィルタ⁶⁾ (Merging Particle Filter, 以下MPF)を用いた。MPFはシステムの状態に関する確率分布を粒子と呼ばれる多数の実現値集合で近似的に表現し、ベイズの定理を応用して各粒子の時間推移を数値的に表現するデータ同化手法である。それぞれの粒子は、数値解析モデル(初期条件、境界条件、パラメータなど)に関する情報と各モデルにおいて数値解析を行って算出される各時刻の物理量(本研究であれば体積含水率)を情報として有している。図-3はMPFの概念図を示している。MPFでは、(a)Prediction, (b)Filtering, (c)Resampling, (d)Mergingという4つの手順を逐次繰り返す。粒子数を N 個とすると、(a)Predictionでは、時刻 $t-1$ から t までのシミュレーションを N 通り行う。つまり、本研究では、未知パラメータの情報が異なる多数の不飽和・飽和浸透流解析を並列に行う。(b)Filteringでは、観測データに対する各粒子の解析結果の適合度に基づいて各粒子に対する尤度を計算する。(c)Resamplingでは、各粒子の尤度に基づいて復元抽出を行い、粒子を複製・消滅させる。この際にMPFでは、 kN 個(k は3以上の整数)のサンプルを復元抽出する。最後に、(d)Mergingを行い、 kN 個のサンプルを、 k 個ずつの組にして、それぞれの組ごとに重み付き和をとることで、 N 個の粒子を再度生成する。この手順を逐次繰り返すことで、事後分布が更新され、計測データとの適合度が高い数値解析モデルへと修正されていく。

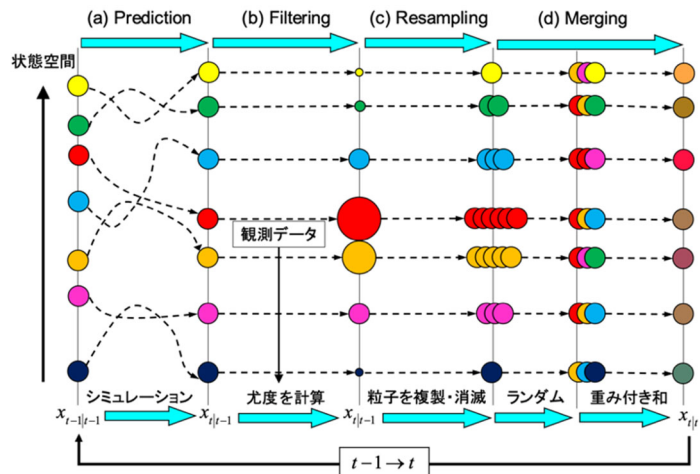


図-3 MPF の概念図

4. 解析結果

データ同化の条件として、粒子数は500個とし、一様乱数により初期粒子を作成した。解析モデルは一次元解析モデルを用いて、モデル底面に流量境界を設定し、電子天秤で計測された流量を境界条件から排水させた。

図-4は排水過程における圧力水頭の経時変化に対するデータ同化結果を示している。実線が計測データ、破線は事後分布の平均値 μ 、点線は平均値から $\pm\sigma$ の範囲を示している。若干の誤差はあるもののデータ同化結果は圧力水頭の計測データの変化傾向を概ね再現できている。図-5はデータ同化開始前の事前分布を示している。

(a)は各未知パラメータのヒストグラムを示しており、(b)はそこから算出される500通りの水分特性曲線を示している。一様乱数で初期粒子を与えているため、事前分布の水分特性曲線は非常にばらついているのがわかる。図-6はデータ同化後の事後分布を示している。事前分布と比較すると、計測データに合致するように未知パラメータのヒストグラムが更新されることで、水分特性曲線のばらつきが小さくなっている。

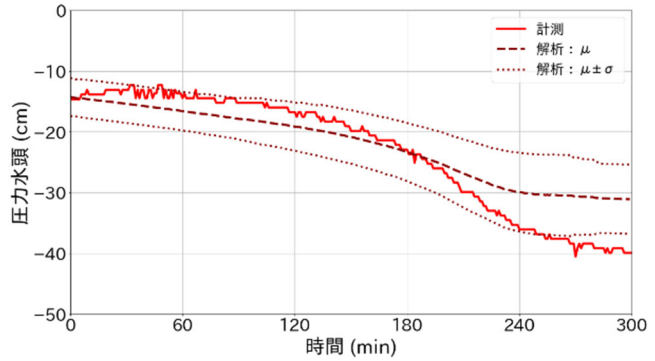
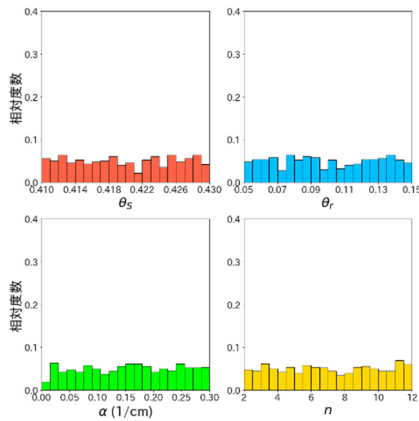
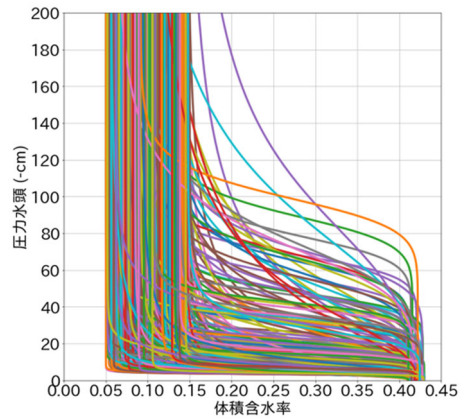


図-4 データ同化結果

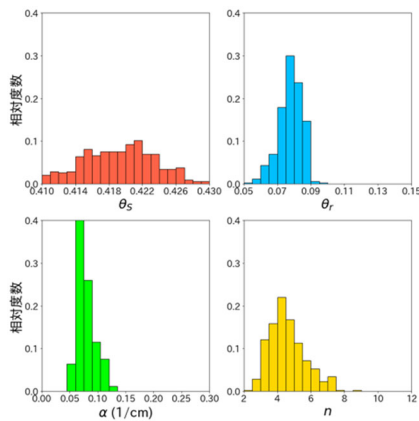


(a) ヒストグラム

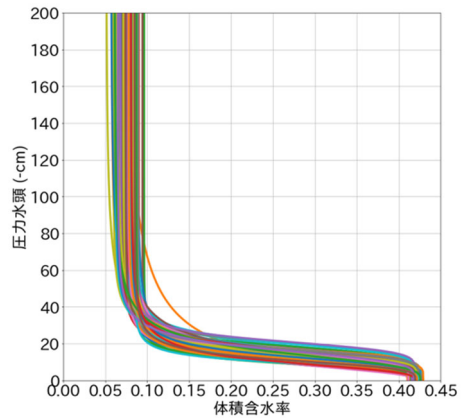


(b) 水分特性曲線

図-5 データ同化後の事後分布



(a) ヒストグラム



(b) 水分特性曲線

図-6 データ同化後の事後分布

図-7 は水分特性曲線の事後分布の平均値 μ と $\pm\sigma$ の範囲を示している。同図には、データ同化に用いた計測データから算出した水分特性曲線の範囲と平衡状態に達した際のプロットも併せて示している。これらの結果から、300 分の計測データに基づいて水分特性曲線のデータ同化を行うことで、データ同化に用いた範囲だけでなく平衡状態における水分特性曲線のプロットも概ね表現できているといえる。以上の結果より、加圧板法とデータ同化を組み合わせることで保水性試験に要する時間を短縮できる可能性が示唆された。今後は、水分特性曲線を推定できるデータ同化範囲の検討や保水性の高い土に対するデータ同化の適用性も議論する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、加圧板法とデータ同化を組み合わせた水分特性曲線推定手法の提案を目的とし、豊浦砂を用いて水分特性曲線の推定を試みた。その結果、任意に抽出した 300 分の計測データに基づいてデータ同化を行うことで、データ同化に用いた範囲の水分特性曲線だけでなく平衡状態における水分特性曲線のプロットも概ね表現できた。このことから、加圧板法とデータ同化を組み合わせた提案手法を用いることで、保水性試験を短時間化できる可能性を示した。今後の展開としては、データ同化が可能なデータ同化範囲の検討や保水性の高い土に対するデータ同化の適用性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 伊藤真一, 酒匂一成: 土柱法の試験結果に基づくデータ同化による不飽和浸透特性の推定, 鹿児島大学地震火山地域防災センター令和元年度報告書, pp.125-130, 2020.
- 2) 山本孝憲ほか: 保水性試験におけるサクション制御後の間隙水圧の変動の観測, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.465-466, 2015.
- 3) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.87-95, 1977.
- 4) van Genuchten, M: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, *Research report*, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 5) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water resources research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 6) Nakano, S., Ueno, G., Higuchi, T.: Merging particle filter for sequential data assimilation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol.14, pp.395-408, 2007.

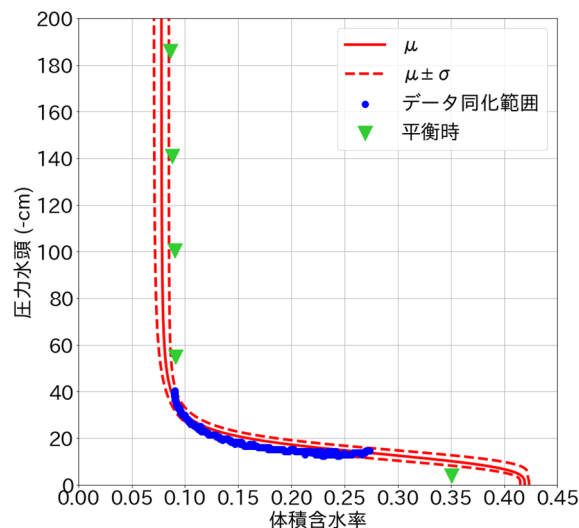


図-7 水分特性曲線の事後分布