

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

鹿児島大学工学部 学生会員 ○高田雄大, 中島亮輔, 石 大地
 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 伊藤真一, 酒匂一成

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。既往の研究として、河野ら¹⁾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た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。

3. 解析手法

数値解析シミュレーションとして不飽和・飽和浸透流解析モデルを用いた。支配方程式として Richards 式を用いて有限要素法により離散化し、水分特性曲線モデルには次式に示す van Genuchten モデルを用いた。

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

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、 α 、 n はモデルの形状を決定するパラメータである。本研究では、van Genuchten モデル内の 4 つの未知パラメータである θ_s 、 θ_r 、 α 、 n を融合粒子フィルタ (MPF) により推定する。MPF の詳細については既往の論文を参照されたい³⁾。データ同化に関しては、

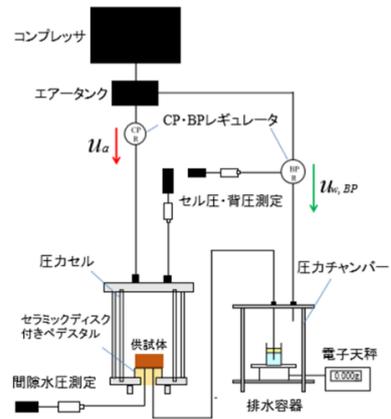


図-1 加圧板法試験機の概要図

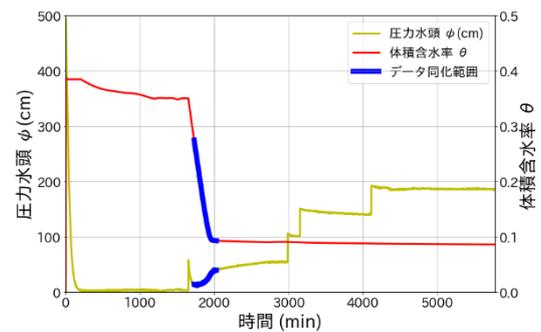


図-2 加圧板法による試験結果

粒子数は 500 個であり、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モデルを用いて、モデルの底面に流量境界を設定した。

4. 解析結果 (豊浦砂) と考察

図-3 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変動傾向を概ね再現できている。図-4 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-5 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-6 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) 河野優樹ほか：土柱法とデータ同化を組み合わせた保水性試験方法の開発，令和元年度土木学会西部支部研究発表会，pp.287-288，2020. 2) 山本孝憲ほか：保水性試験におけるサクシオ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) 伊藤真一ほか：土柱法の計測データに基づくデータ同化により推定された浸透解析モデルの予測性能，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.76，No.4，pp.350-362，2020.

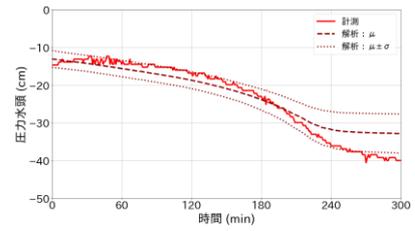
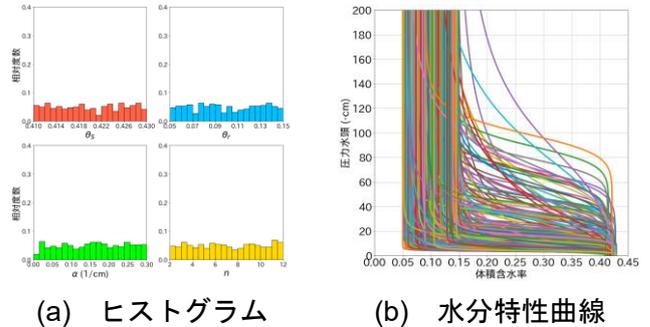
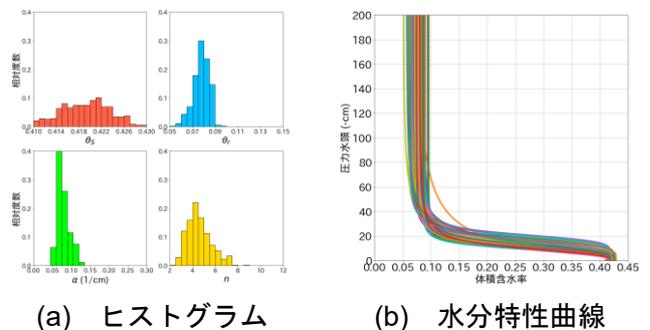


図-3 データ同化結果



(a) ヒストグラム (b) 水分特性曲線

図-4 データ同化前の事前分布



(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

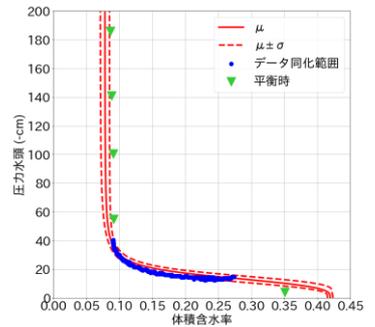


図-6 水分特性曲線の事後分布