

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

鹿児島大学工学部 学生会員

○河野優樹

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

鹿児島大学名誉教授 正会員

北村良介

1. はじめに

不飽和地盤における浸透挙動を定量的に把握するためには、不飽和浸透特性(水分特性曲線と不飽和透水係数の関数)の推定が必要である。不飽和浸透特性を求めるための方法として保水性試験や透水試験が用いられるが、これらは試験装置が複雑で試験時間も長いものが多いという問題点がある。したがって、簡易な試験によって得られた時系列データから短時間で不飽和浸透特性を推定することができれば、保水性試験の方法として有用であると考えられる。筆者らはこれまでに、体積含水率の現地計測データに基づく不飽和浸透特性のデータ同化を行ってきた¹⁾。本研究では、このデータ同化を簡易的な試験の計測データに適用することで、新たな保水性試験方法を開発する。具体的には、土柱法による保水性試験を行い、得られた体積含水率の計測データと融合粒子フィルタ(Merging Particle Filter, 以下 MPF)²⁾によるデータ同化を組み合わせることで、計測データを良好に再現できる不飽和浸透特性の推定を試みる。

2. 土柱法による保水性試験

図-1 は本研究で用いた試験装置の概要を示している。内径 19cm, 厚さ 0.5cm, 高さ 45cm のアクリル円筒を 2 本用いて片方を水タンクとして、もう片方には高さの 30cm の供試体を所定の間隙比($e = 1.0$)になるように締めて土柱を作製した。図-1 に示すように、水タンクには常に水を供給し、水タンク内の所定の高さでオーバーフローさせることで、土柱に与える水位を制御した。土試料として豊浦砂($\rho_s = 2.64$)を用いて、供試体の初期飽和度は $S_r = 5\%$ とした。土壌水分計(Decagon Device 社製, EC-5)は、底面の自由水面から 10cm, 20cm の高さに横向きに設置し、出力電圧と体積含水率の関係は事前に行ったキャリブレーション試験の結果に基づいて算出した。

図-2 は土柱法による体積含水率の計測データを示している。同図には 300 分後までのデータを示している。試験開始直後に高さ 10cm の体積含水率が上昇し、その後、高さ 20cm の体積含水率も上昇している。その後は 10cm の体積含水率の方が高さ 20cm におけるそれよりも常に高い状態を保ちながら平衡していることがわかる。

3. 解析手法

融合粒子フィルタ(MPF)²⁾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。既往研究¹⁾により、現地斜面における雨水の浸透問題に対しては、MPF の有用性を確認している。本研究では、土柱法によって得られた計測データに対して、MPF を適用する。水分特性曲線モデルとしては van Genuchten モデルを、不飽和透水係数モデルとしては Mualem モデルを用いた。

4. 解析結果

図-3 は解析に用いた 1 次元解析モデルを示している。このモデルでは全ての高さで均一な 1 層モデルを仮定している。モデル底面の自由水面に既知水頭境界を設定して、圧力水頭 $\psi = 0\text{cm}$ に固定した。モデル側面と上面は非排水境界とした。データ同化には合計 500 個の粒子を用いた。500 個の粒子は、浸透解析モデルにおける未知パラメータ(θ_s, α, n, k_s)が全て異なる。一様乱数により 500 通りのランダムなパラメータの組み合わせを作成した。

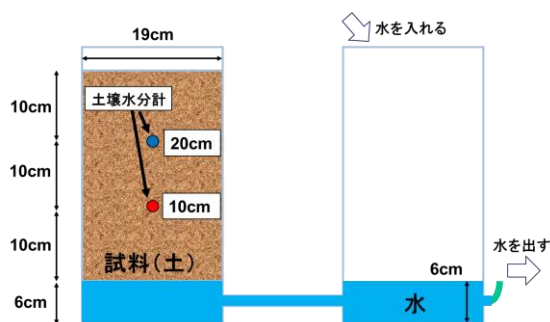


図-1 試験装置の概要

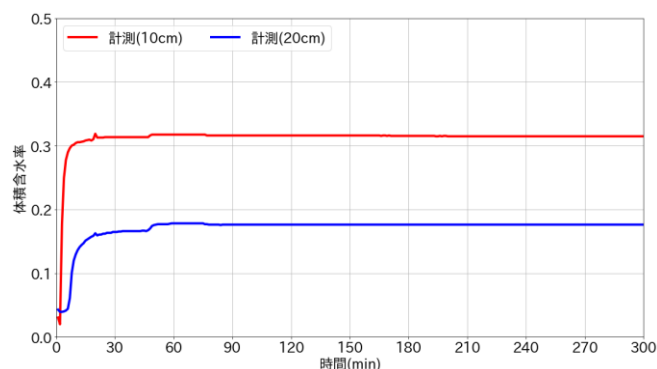


図-2 土柱法による体積含水率の計測データ

図-4 はデータ同化結果を示している。同図は、データ同化によって算出された体積含水率の事後分布の経時変化を表している。実線が計測データであり、破線が事後分布の平均値 μ 、点線は事後分布における平均値 μ から $\pm \sigma$ の範囲を示している。事後分布の平均値は計測データと概ね合致しており、そのばらつきも小さい。このことから、データ同化を行うことで計測データを良好に再現可能なシミュレーションができていているといえる。図-5 はデータ同化によって推定された水分特性曲線の事後分布を示しており、図-6 は不飽和透水係数の関数におけるそれを示している。このように不飽和浸透特性が確率的な幅を持って算出されるため、平均値を用いた不飽和・飽和浸透流解析が可能だけでなく、モンテカルロシミュレーションを行うことでパラメータの不確実性も考慮した土中水分状態の評価も可能となる。

以上の結果から、MPF によるデータ同化を行うことで、土柱法の計測データを良好に再現できる不飽和浸透特性の推定が可能であることが明らかになった。さらに、本研究の提案手法は、特別な装置が必要ない簡易な試験方法であること、豊浦砂であれば試験の準備から片付けも含めて 1 日以内での試験実施が可能であることなどを考慮すると、新たな保水性試験の方法として有効であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、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を目的として、不飽和浸透特性の推定を試みた。その結果、MPF によるデータ同化を行うことで、土柱法の計測データを良好に再現できる不飽和浸透特性の推定が可能であることが明らかになった。今後は、粒径の異なる土試料を用いた場合の適用性を確認するとともに、得られた不飽和浸透特性の妥当性を検証(他の保水性試験によって得られた不飽和浸透特性との比較)する予定である。

参考文献

- 1) 伊藤真一ほか: 現地計測に基づく浸透解析モデルのデータ同化に対する融合粒子フィルタの有用性の検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2, pp.I_45-I_54, 2017.
- 2) Nakano, S., Ueno, G., Higuchi, T.: Merging particle filter for sequential data assimilation, Nonlinear Processes in Geophysics, Vol.14, pp.395-408, 2007.

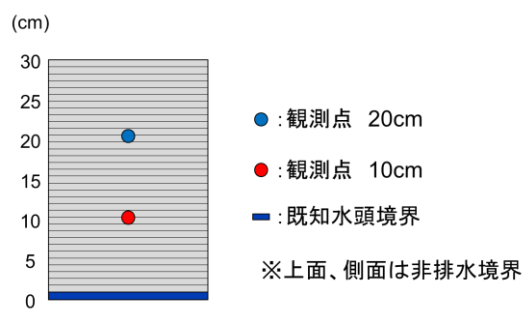


図-3 1次元解析モデル

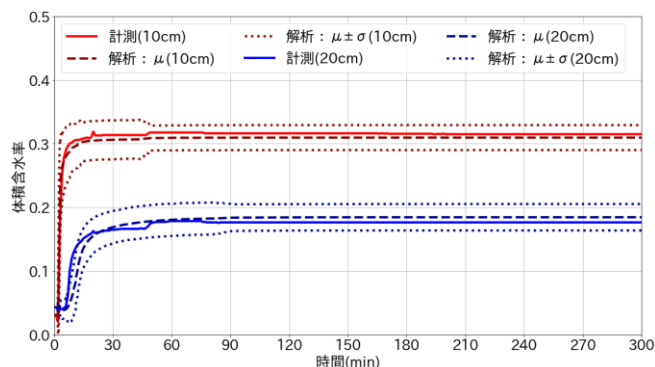


図-4 データ同化結果

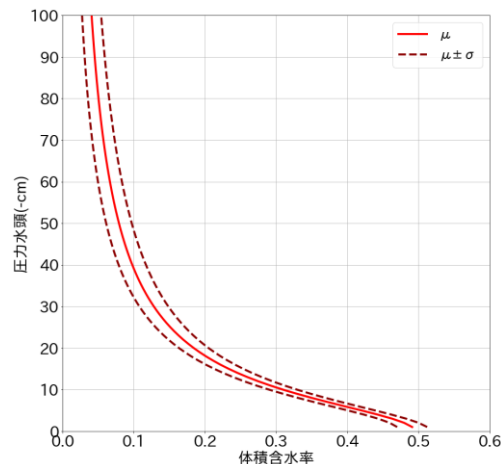


図-5 水分特性曲線の事後分布

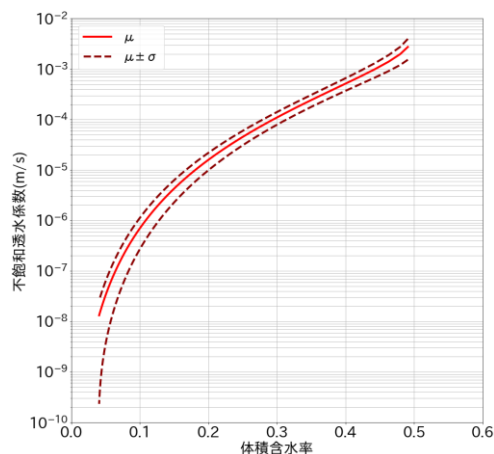


図-6 不飽和透水係数の事後分布