

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14828

研究課題名（和文）データ同化を導入した新たな保水性試験方法の提案とその妥当性の検証

研究課題名（英文）Proposal of water retention test method introducing data assimilation and its validation

研究代表者

伊藤 真一（Ito, Shinichi）

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：20825690

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土柱法とデータ同化を組み合わせた不飽和浸透特性推定手法を提案するとともに、提案手法によって推定された水分特性曲線と他の保水性試験を行って得られた水分特性曲線を比較することで、提案手法の妥当性について議論した。その結果、粒径の異なる6種類の土試料において、計測データを再現可能な不飽和浸透特性を推定できること、提案手法を用いた場合、簡易かつ短時間で不飽和浸透特性を推定可能であることがわかった。以上のことから、提案手法は新たな不飽和浸透特性推定手法として有効であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義や社会的意義は、土柱法という簡易な試験にデータサイエンスの技術を導入することで現状では活用しきれないデータからも情報を引き出して、簡易かつ短時間で不飽和浸透特性の推定が可能なることを明らかにした点である。本研究では、防災分野における不飽和浸透特性の推定を対象としているが、本研究のアプローチ自体は土木分野におけるデータサイエンス技術の活用に対しても貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a new method to estimate unsaturated soil hydraulic properties combining soil column test and data assimilation, and discussed the validity of the proposed method by comparing soil water characteristic curve estimated by the proposed method with that estimated using other water retention tests. The proposed method could estimate unsaturated soil hydraulic properties in six types of soils with different grain sizes, which could reproduce the measurement data. Furthermore, the proposed method could estimate them in a short time. Therefore, the proposed method was available as a new method for estimating unsaturated soil hydraulic properties.

研究分野：地盤工学

キーワード：データ同化 不飽和浸透特性 不飽和土 水分特性曲線 融合粒子フィルタ

1. 研究開始当初の背景

毎年、全国各地で降雨による斜面崩壊が多発している。斜面崩壊は降雨そのものではなく、雨水の浸透による土中水分量の増加が主な要因であるため、降雨時における土中水分量の定量的な把握は斜面の安定性を考えるうえで重要である。土中への雨水の浸透挙動を解析的に再現するためには、不飽和浸透特性(土の保水性を表す水分特性曲線と土の透水性を表す不飽和透水係数の関数)の推定が必要である。筆者らはこれまでに、現地斜面において計測された土中水分量に関する時系列データを用いた不飽和浸透特性のデータ同化に関する研究を行ってきた。その結果、データ同化を行うことで、現地計測データに基づいて不飽和浸透特性を推定でき、その推定された不飽和浸透特性を用いてシミュレーションを行うことで、データ同化に用いていない未経験の集中豪雨時の浸透挙動も良好に再現できることを明らかにしている。しかし、現地斜面のモニタリングにはコストがかかるため、全ての斜面において現地計測データが得られているわけではない。このような現地計測データが得られていない現場の不飽和浸透特性を推定しておくためには、室内での保水性試験や透水試験が考えられるが、保水性試験は、水分特性曲線を得るまでに多大な時間がかかることや試験装置が複雑であることなどが課題としてあげられる。そのため、簡易かつ短時間で不飽和浸透特性を推定できる保水性試験方法の確立が望まれる。ここで、保水性試験を行う際に供試体内にセンサーを設置することで、土中水分量に関する時系列データが得られる。簡易な保水性試験を行って土中水分量に関する計測データを得ることができれば、データ同化によって不飽和浸透特性を簡易かつ短時間で推定できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、データ同化を導入した新たな保水性試験方法の提案とその妥当性の検証である。具体的には、土柱法による保水性試験を行い、その際に供試体内に土壌水分計を設置して体積含水率を計測する。そして、その計測データに基づいて不飽和浸透特性を推定する手法を確立する。本研究では、以下の2つのテーマに取り組む。

- (1) データ同化を導入した土柱法による保水性試験方法の提案
- (2) 提案する保水性試験方法の妥当性の検証

3. 研究の方法

(1) データ同化を導入した土柱法による保水性試験方法の提案

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、もう片方は供試体タンクとした。水タンクには常に水を供給し、所定の高さで水を流出させることで、土柱に与える自由水面の高さを制御した。表-1 は土粒子密度および供試体作製条件を示しており、供試体タンクには同表の条件となるよう高さ 30cm に供試体を締め固め、土柱を作製した。試験試料として、粒径の異なる 6 種類の土試料(豊浦砂、串良川堤防土(以下、堤体土)、熊本県産マサ土(以下、マサ土)、フェロニッケルスラグ(以下、FNS)、硅砂、鹿児島県東僕町採取土(以下、東僕シラス))を用いた。図-2 は 6 種類の土試料の粒径加積曲線を示しており、それぞれ粒度分布が異なっていることがわかる。また、細粒分の多い堤体土は他の土試料に比べて保水性が高く、粗粒分の多い FNS や硅砂は保水性が低いことが予想される。土壌水分計(Decagon Device 社製、EC-5)は、底面の自由水面からの高さ 9cm、19cm の位置に横向きに設置した。また、土壌水分計から得られる出力電圧を体積含水率に換算するために、各土試料に対してキャリブレーション試験を行い、その結果に基づいて体積含水率を算出した。本研究では、自由水面からの吸水試験を行い、計測条件として、水タンクの水位が、供試体タンク内の供試体の底面の高さと同じになった時刻を計測開始とした。なお、体積含水率の計測間隔は 1 分である。

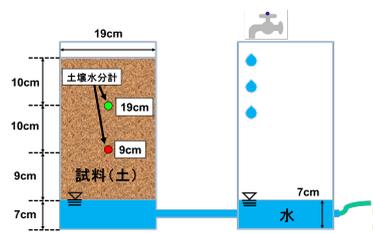


図-1 試験装置の概要

表-1 土粒子密度と供試体作製条件

試料	土粒子密度 (Mg/m ³)	間隙比 (-)	初期飽和度 (%)
豊浦砂	2.64	0.78	10.0
堤体土	2.58	1.08	30.0
マサ土	2.75	0.88	35.0
FNS	2.61	0.75	0.0
硅砂	2.96	0.78	5.0
東僕シラス	2.59	1.06	30.0

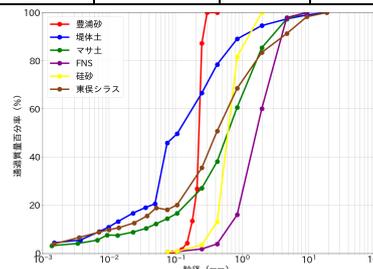


図-2 粒径加積曲線

データ同化には融合粒子フィルタ (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。この MPF を用い、土柱法における体積含水率の計測データに基づいて不飽和浸透特性を推定する。数値解析シミュレーションとして不飽和・飽和浸透流解析を用いた。支配方程式として Richards 式を用いて、水分特性曲線モデルとしては式(1)に示す van Genuchten モデルを、不飽和透水係数モデルとしては式(2)に示す Mualem モデルを用いた。

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = \{1 + (-\alpha \psi)^n\}^{-m} \quad (1)$$

$$k = k_s \times S_e^{1/2} \left\{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right\}^2 \quad (2)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度, θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, α, n : 水分特性曲線の形状を与えるパラメータ, $m: 1-1/n$, k_s : 飽和透水係数である。データ同化に関しては、合計 500 個の粒子を用いた。500 個の粒子は、不飽和浸透特性に関する未知パラメータ ($\theta_s, \theta_r, \alpha, n, k_s$) が全て異なる。本研究では、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。また、FNS は体積含水率の初期値が低かったことから残留体積含水率 θ_r は 0.0 に固定した。図-3 は本研究で使用した 1 次元解析モデルを示している。モデル要素の高さは 0.5cm であり、すべての高さで均一な一層モデルを仮定している。モデル側面と上面は非排水境界、モデル底面の自由水面に既知水頭境界を設定し、圧力水頭 $\psi = 0\text{cm}$ に固定して解析を行った。

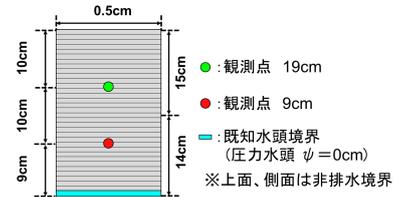


図-3 1次元解析モデル

(2) 提案する保水性試験方法の妥当性の検証

提案手法によって得られた不飽和浸透特性の妥当性を検証するために、他の保水性試験 (水頭法, 加圧板法) によって得られた水分特性曲線と提案手法によって推定された水分特性曲線との比較を行った。本研究では、堤体土以外の 5 種類の土試料を用いて、保水性の低い土試料 (豊浦砂, マサ土, FNS, 珪砂) に対しては水頭法による保水性試験を、保水性が高い土試料 (東俣シラス) に対しては加圧板法による保水性試験を行った。これらの供試体は、土柱法と同じ間隙比となるように締固めて作製した。また、土柱法による保水性試験が吸水過程であるため、水頭法, 加圧板法ともに排水過程の試験を行った後で吸水過程の試験を行い、吸水過程の試験データを比較に用いた。

4. 研究成果

(1) データ同化を導入した土柱法による保水性試験方法の提案

土柱法による保水性試験から得られた計測データに基づいて不飽和浸透特性のデータ同化をそれぞれ行った。図-4 は 6 種類の土試料を用いた場合のデータ同化結果をそれぞれ示している。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を示している。実線が土柱法によって得られた計測データであり、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 $\mu \pm \sigma$ の範囲を示している。事後分布の平均値はそれぞれの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の平均値をそれぞれ示している。同図より、堤体土や東俣シラスなどは保水性が高い土の水分特性曲線が推定されており、珪砂や FNS などは保水性の低い土のそれが推定されていることがわかる。以上の結果から、本研究の提案手法を用いることで、それぞれの土試料の特徴を示す不飽和浸透特性を推定可能であることがわかった。また、提案手法の利点として、試験の簡便さが挙

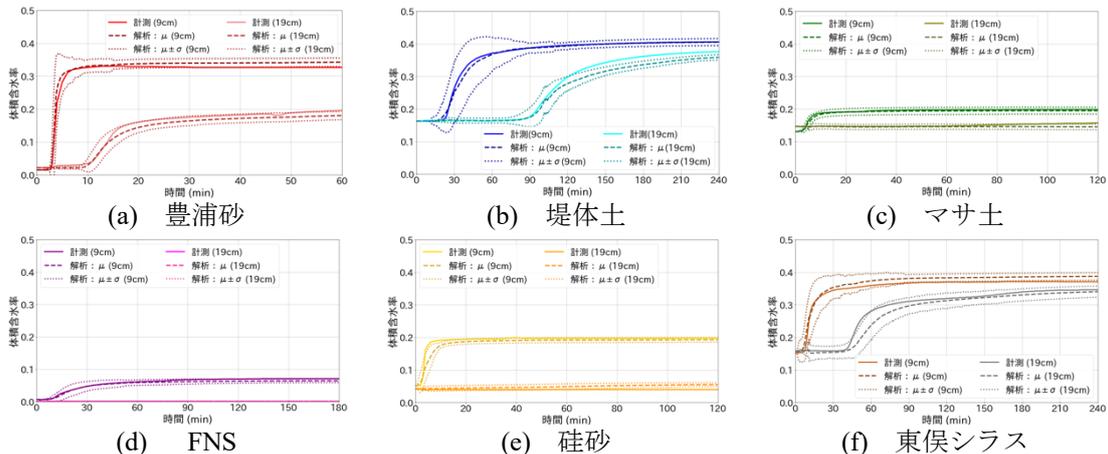


図-4 データ同化結果

げれる。試験装置自体もシンプルな構造であり、試験装置の作製に対する費用や時間もそれほど必要ない。さらに、試験準備から後片付けまでを含めても半日以内で試験を終えることができている。また、データ同化に要する計算時間に関しても、数時間で計算が完了する。以上より、簡易に実施可能な土柱法にデータ同化を導入する本研究の提案手法を用いることで、比較的短時間で不飽和浸透特性を推定可能であることが明らかになった。

(2) 提案する保水性試験方法の妥当性の検証

図-6 は提案手法によって推定された水分特性曲線と水頭法や加圧板法を行って得られた水分特性曲線のプロットの比較結果を示している。実線が提案手法によって推定された水分特性曲線の事後分布の平均値 μ 、点線が事後分布における平均値 $\mu \pm \sigma$ の範囲を、紺色のプロットが水頭法や加圧板法の試験結果をそれぞれ示している。同図より、全ての土試料に対して、水分特性曲線の傾きや値の傾向という観点では、提案手法は他の保水性試験結果と概ね類似した結果を得ることができている。しかし、マサ土や東俣シラスを用いた場合の比較結果に着目すると、提案手法の結果と他の保水性試験のプロットに誤差があるようにもみえる。そこで、マサ土と東俣シラスの水分特性曲線を用いて浸透流解析を行い、図-6 に示す水分特性曲線の誤差が浸透流解析結果にどの程度の影響を及ぼすかについて考察した。図-7 は試験方法の異なる二種類の水分特性曲線を用いて浸透流解析を行った際の圧力水頭の経時変化の比較結果を示している。実線は他の保水性試験によって得られた水分特性曲線を用いた場合の結果であり、点線が提案手法によって推定された水分特性曲線を用いた場合の結果を示している。これらの結果から、マサ土を用いた場合も東俣シラスを用いた場合も、二種類の水分特性曲線を用いた浸透流解析の結果は類似した浸透挙動を示していることがわかる。この結果は、図-6 に示す水分特性曲線による比較を行うと θ_r の違いによって誤差が大きいようにみえるが、これらの誤差は豪雨時における高飽和度領域における浸透流解析の結果には大きく影響しない程度の誤差であることを示唆している。これらの結果より、提案手法によって推定された水分特性曲線は、他の保水性試験によって得られるそれと実務上、十分に類似するものが得られていることがわかった。

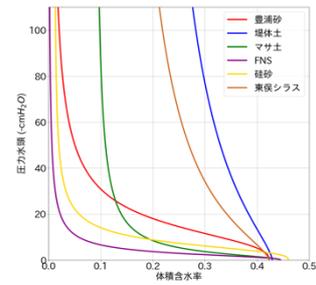


図-5 土試料ごとの水分特性曲線の事後分布の平均値

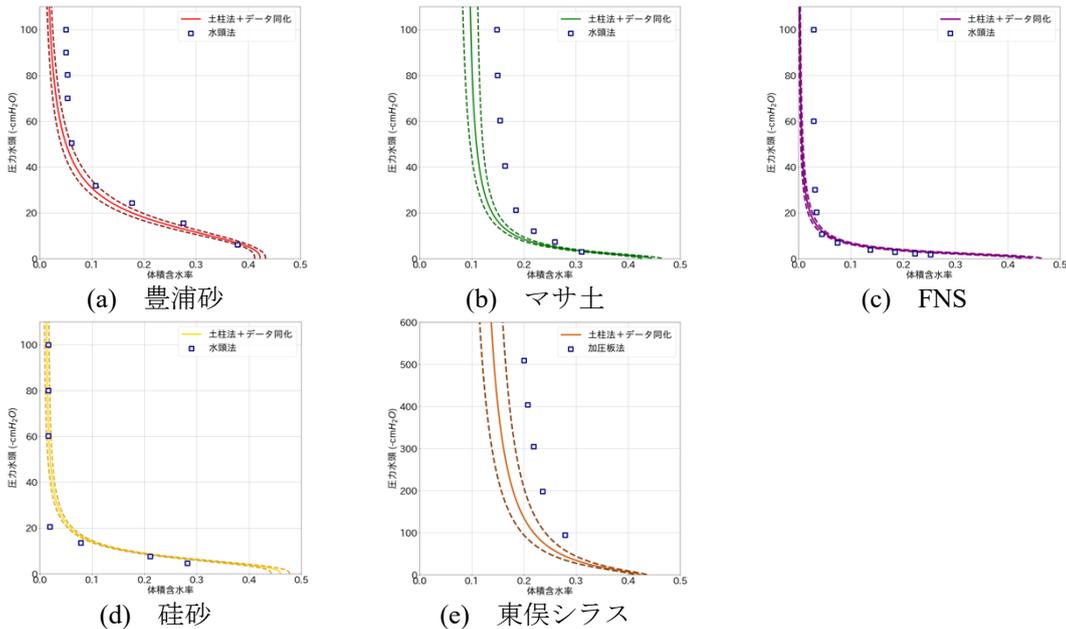


図-6 水分特性曲線の比較結果

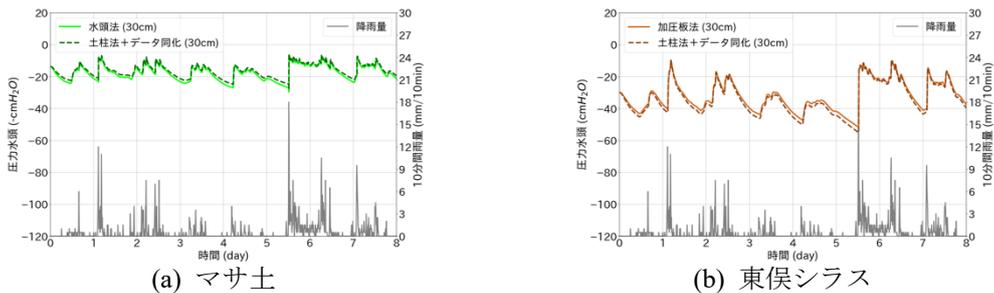


図-7 浸透流解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 伊藤真一, 酒匂一成, 北村良介, 金丸善輝, 金丸和生, 川島満成	4. 巻 76
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 350-362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.76.4_350	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 河野優樹, 伊藤真一, 酒匂一成	4. 巻 1
2. 論文標題 データ同化を導入した土柱法による不飽和浸透特性推定手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Kansai Geo-Symposium 2020 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム 論文集	6. 最初と最後の頁 43-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 西村美紀, 壇上徹, 酒匂一成	4. 巻 76
2. 論文標題 融合粒子フィルタを用いた境界条件を含む浸透解析モデルの推定手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 52-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.76.1_52	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 酒匂一成	4. 巻 1
2. 論文標題 体積含水率の現地計測データの予測に対するリカレントニューラルネットワークの適用性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AI・データサイエンスシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 445-452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.1.J1_445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河野優樹, 伊藤真一, 酒匂一成
2. 発表標題 土柱法とデータ同化を組み合わせた不飽和浸透特性推定方法の有効性の検証
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野優樹, 伊藤真一, 酒匂一成, 北村良介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野優樹, 中島亮輔, 高田雄大, 石大地, 伊藤真一, 酒匂一成
2. 発表標題 データ同化を導入した土柱法による不飽和浸透特性推定手法に関する一考察
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------