

令和 2 年 5 月 21 日現在

機関番号：17701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05920・19K21089

研究課題名（和文）土中水分量の計測データに基づくオンラインデータ同化システムの開発とその高度化

研究課題名（英文）Establishment and sophistication of online data assimilation system of seepage analysis model based on field measurement data

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） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土中水分量に関する現地計測データを用いてリアルタイムに浸透解析モデルを推定するオンラインデータ同化システムの構築とその高度化を試みた。その結果、現地計測システムのサーバー上で浸透解析モデルを推定できるオンラインデータ同化システムの構築が可能であることを明らかにした。また、不飽和状態の浸透挙動から飽和状態の地下水の上昇や下降までも表現できる浸透解析モデルを推定する新たなデータ同化方法を提案し、その有効性について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨時の斜面崩壊の発生には、土中水分量が大きく影響する。斜面崩壊による被害を軽減するためには、降雨に伴って変化する土中水分量を適切に再現・予測できる浸透解析モデルの推定が不可欠である。本研究では、土中水分量を現地斜面で計測しながら浸透解析モデルをリアルタイムに修正・更新するシステムを構築することができたため、これらの研究成果は、斜面崩壊の発生予測に寄与できる可能性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This project tried to establish and sophisticate an online data assimilation system of seepage analysis model based on field measurement data. The established system could estimate the seepage analysis model in real-time while measuring soil moisture conditions. In the project, a new method estimating the seepage analysis model was proposed, and the proposed method could reproduce not only unsaturated infiltration behaviors but also rising or falling groundwater level.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面崩壊 データ同化 浸透解析モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

毎年、全国各地で豪雨による斜面崩壊が多発している。豪雨時の斜面崩壊は、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によって引き起こされる。そのため、図-1に示すように、現場の斜面における土中水分量をリアルタイムに計測するシステムが盛んに開発され、計測データは着実に蓄積されている。しかし、このような現地計測によって得られる情報は過去から現在までに限られており、未経験の豪雨が対象斜面に降ると予測された場合に土中水分量がどの程度増加するのかを現地計測だけで予測することは困難である。土中水分量の予測を行う

ためには、数値解析シミュレーションの導入が必要である。研究代表者らはこれまでに、現地計測データを用いて浸透解析モデルを推定するための方法論として、データ同化手法に着目した研究開発を行ってきた。図-2はその概念図を示している。過去から現在までに膨大に蓄積された計測データを用いて浸透解析モデルをデータ同化によって適切に推定することができれば、未経験の豪雨時における雨水の浸透挙動を予測することができる。しかし、既往の研究の成果は、過去に計測されたデータを用いたオフラインでのデータ同化であった。より精度の高い将来予測を行うためには、リアルタイムに計測されるデータを用いたオンラインでのデータ同化システムの開発が必要である。これが可能となれば、現時点までの計測データを適切に再現できる浸透解析モデルを逐次推定し、降雨予報と連動した雨水浸透解析を行うことができ、それによって、適切な避難指示や通行規制の発令が可能になると考えられる。



図-1 現地計測システム



図-2 データ同化を用いた研究の概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は、リアルタイムに計測される土中水分量に関する現地計測データを用いたオンラインデータ同化システムの開発とその高度化である。具体的な検討課題として、まず、(1) 計測を行いながらサーバー上で適切なモデルを推定できるオンラインデータ同化システムの開発を行う。次に、土の種類が異なれば、計測されるデータの傾向も異なることが予想される。そのような場合であっても、それぞれの斜面に対して適切なモデルを推定できなければならない。二つ目の検討課題として、(2) データ同化事例の拡充を行う。また、研究期間内の2018年7月に西日本豪雨災害があり、対象斜面でこれまでに計測されたことのない挙動の土中水分量に関する計測データ(斜面内が飽和して地下水位が上昇した)が得られた。そのため、三つ目の検討課題として、(3) 土中の状態が不飽和状態から飽和状態に至り地下水位が上昇し、その後、地下水位が下降していく過程をシミュレートできるモデルへと改良を試みた。

3. 研究の方法

各検討項目に対する具体的な研究の方法は以下の通りである。

(1) オンラインデータ同化システムの開発

リアルタイムに土中水分量を計測するシステム自体は、研究代表者らのグループで既に開発されている。本研究では、リアルタイムにデータを計測しながら、そのサーバー上で浸透解析モデルを逐次修正するプログラムを作成し、オンラインデータ同化システムを開発する。

(2) データ同化事例の拡充

本研究では、土質の異なる様々な斜面で計測された土中水分量に関する現地計測データに基づくデータ同化を行って事例を拡充するとともに、傾向の異なる計測データに対するデータ同化の有用性について明らかにする。

(3) 地下水位も表現できるシステムへの改良

本研究では、不飽和浸透から地下水位の上昇・下降までの土中水分状態を再現するために、シミュレーションモデルにおける底面の境界条件に関するパラメータとして浸透係数 β を導入したデータ同化方法を提案し、数値実験と現地計測データを用いたデータ同化を通じて、提案手法の有用性について検証する。

4. 研究成果

(1) オンラインデータ同化システムの開発

飽和不飽和浸透流解析における水分特性曲線モデルとしては van Genuchten モデル (以下 VG モデル)、不飽和透水係数モデルとしては Mualem モデルを用いて、データ同化のアルゴリズム

としては融合粒子フィルタ（以下 MPF）を用いた。本研究で構築したシステムは、MPF によるデータ同化期間は任意に設定できるように手動で設定することとし、それ以降の解析は全て自動化するシステムを構築した。図-3 はその計算手順を示している。まず、任意に指定した期間における土壌水分計と雨量計の計測値を選択する。次に、MPF によるデータ同化を行うことで浸透解析モデルに関するパラメータが自動的に修正され各パラメータの確率分布が得られる。これにより、現在の計測データを適切に再現できるパラメータを把握できるだけでなく、そのパラメータを用いた将来予測も可能である。最後に、これらの確率分布と雨量データを VG-Mualem のモデルに代入することで計測深度ごとの降雨強度と初期擬似飽和体積含水率（IQS）の関係が算出される。これにより、リアルタイムに計測されるデータを用いたオンラインでのデータ同化と斜面の現在の危険度を数値化できるシステムの構築を可能とした。

(2) データ同化事例の拡充

土質の異なる 6 つの現場で計測された土中水分量に関する計測データに基づいてそれぞれ浸透解析モデルのデータ同化を試みた。計測データとしては、土壌水分計により計測された体積含水率の計測データだけでなくテンシオメータにより計測された土壌水分吸引水頭の計測データも用いた。図-4 は対象斜面ごとの解析結果を示している。同図より、土質の異なる計測データに対しても MPF を用いた浸透解析モデルのデータ同化が有用であることがわかった。

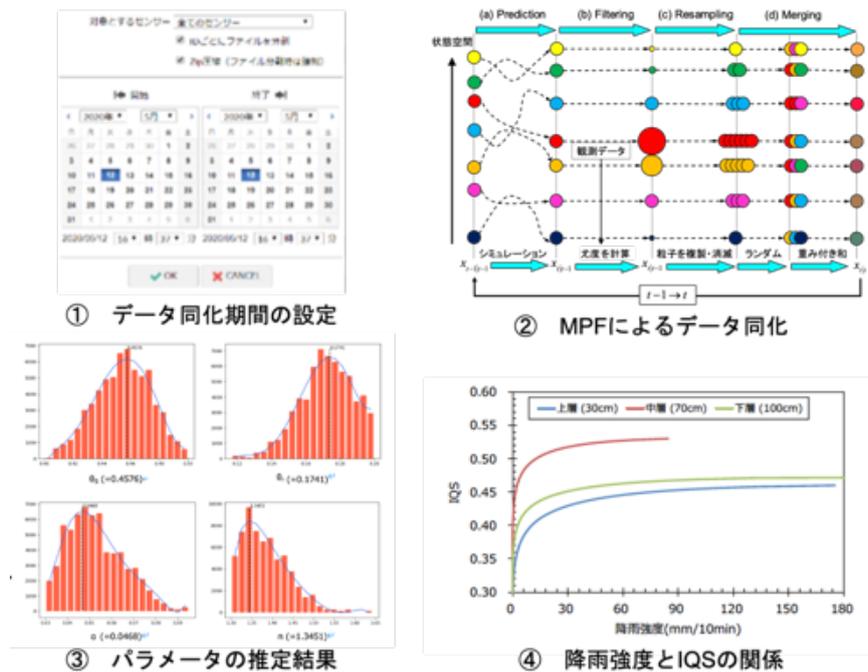


図-3 オンラインデータ同化の計算手順

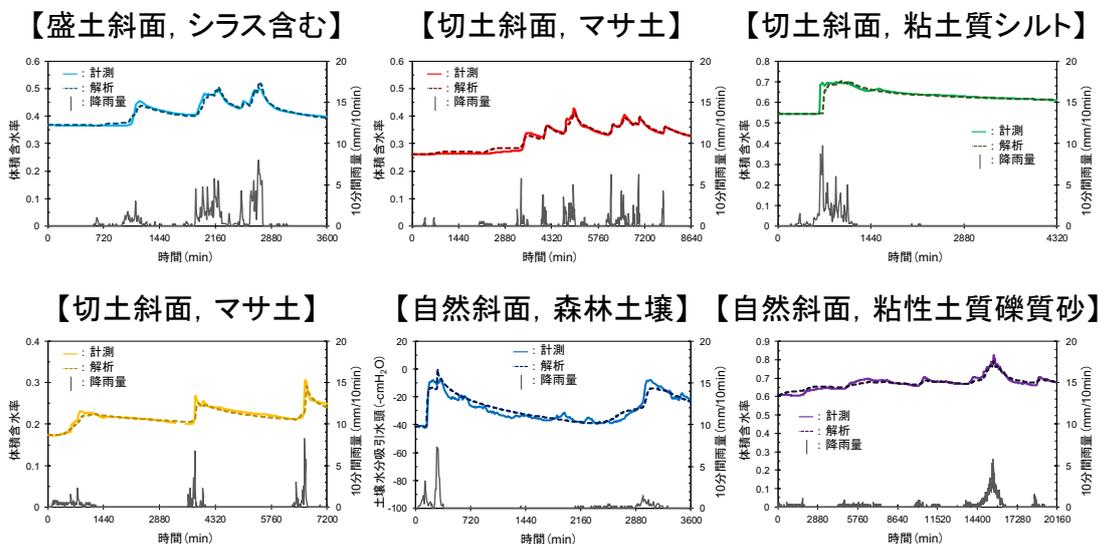


図-4 対象斜面ごとの解析結果

(3) 地下水位も表現できるシステムへの改良

既往の研究では、シミュレーションモデルとして1次元解析モデルを仮定してモデル底面の境界条件を自由排水境界とすることで不飽和状態における浸透挙動の再現を試みてきたが、2018年の西日本豪雨災害時には現地斜面においても地下水が発生し、土中水分量を適切に再現できない場合があることがわかった。そこで、本研究では、1次元解析モデルにおける底面の境界条件に関するパラメータとして浸透係数 β を導入したデータ同化方法を提案した。そして、数値実験と現地計測データを用いたデータ同化を行い、不飽和浸透から地下水位の上昇・下降までの土中の水分状態を再現することで、提案手法の有用性について検証した。

自由排水境界は、境界上の節点と境界の下に位置する仮想節点の圧力勾配が0であり、位置水頭の差によって排水を行う境界条件である。このことから、境界から流出する流束 v_{out} は式(1)のようになる。本研究で提案する境界条件は、式(2)に示すように、式(1)の右辺に浸透係数 β を乗じた境界条件である。

$$v_{out} = k(\psi) \quad (1) \quad v_{out} = \beta \times k(\psi) \quad (2)$$

ここに、 $k(\psi)$ は不飽和透水係数、浸透係数 β は $0 \leq \beta \leq 1$ である。 $\beta=1$ の場合、底面の境界条件は自由排水境界と一致する。 $\beta=0$ の場合、底面の境界条件は非排水境界と一致する。

まず、パラメータが既知な条件での数値実験を行った。仮想の2次元解析モデルに対して実際の降雨データを与えて、深度20cm、50cm、90cmにおける擬似的な計測データを算出した。降雨データは、鹿児島県鹿屋市(2016年)と福岡県朝倉市(2017年)の2パターンを用いた。鹿屋市で降った雨では2次元解析モデルの底面において地下水位は発生しなかったが、朝倉市の降雨では地下水位が発生した。図-5は鹿屋市の降雨を与えた際に得られた擬似的な計測データを用いてデータ同化を行った場合の体積含水率の事後分布を示している。解析結果は計測データを良好に再現できている。次に、推定された浸透解析モデルを用いて朝倉市で降った豪雨に対するシミュレーションを行った。図-6はその再現解析結果を示している。より強い降雨時においても、解析結果は計測データを良好に再現できている。以上の結果から、本研究で提案したデータ同化方法を用いると、パラメータと境界条件が既知である数値実験において、不飽和状態における浸透挙動だけでなく地下水位の上昇・下降までを高精度に再現できることが分かった。

次に、パラメータも境界条件も未知である現地斜面において計測されたデータを用いて、データ同化を行った。2018年の西日本豪雨によって体積含水率が大きく上昇し、計測地点の付近では地下水位も発生した。その際に計測されたデータを用いて、本研究で提案する方法によるデータ同化(粒子数:500個)を行った。図-7はデータ同化時における体積含水率の事後分布を示している。数値実験の結果と比較すると若干の誤差はあるものの、解析結果は計測データを概ね良好に再現できているといえる。図-8はモデル底面における地下水位の発生確率の時系列変化を示している。同図より、降雨のピーク直後の体積含水率が大きく上昇した時点で地下水位発生確率が高まることを表現できている。以上の結果から、本研究で提案したデータ同化方法は、パラメータと境界条件が未知である現地斜面においても、体積含水率の計測データを良好に再現でき、地下水位の上昇・下降も表現できることが分かった。

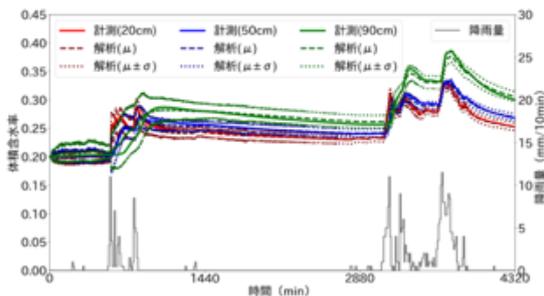


図-5 データ同化結果

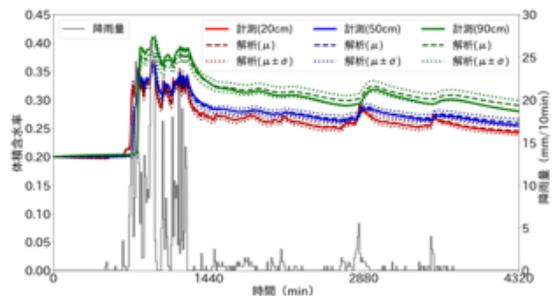


図-6 より強い降雨に対する再現解析結果

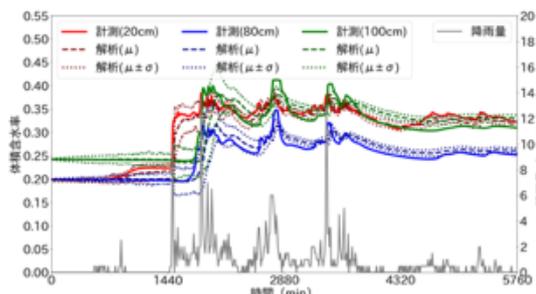


図-7 体積含水率の事後分布

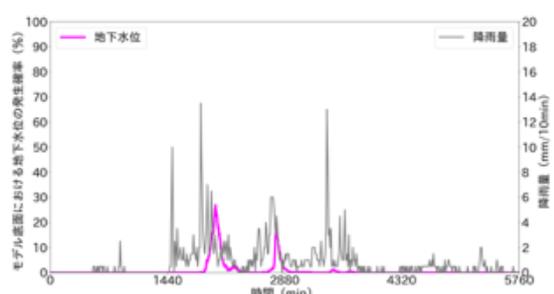


図-8 地下水位の発生確率の時系列変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 酒匂一成	4. 巻 1
2. 論文標題 融合粒子フィルタによって推定された浸透解析モデルの有用性の確率論的検証	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 49-54
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, 酒匂一成	4. 巻 1
2. 論文標題 安国寺裏斜面におけるデータ同化結果を活用した斜面崩壊に対する危険基準の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Kansai Geo-Symposium 2018	6. 最初と最後の頁 206-211
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 櫻谷慶治, 小泉圭吾, 小田和広, 伊藤真一, 小松満	4. 巻 13
2. 論文標題 模型斜面を用いた擬似飽和体積含水率と斜面変形に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 183-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3208/jgs.13.183	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 Keigo Koizumi, Keiji Sakuradani, Kazuhiro Oda, Mitsuru Komatsu, Shinichi Ito	4. 巻 13
2. 論文標題 Relationship between initial quasi-saturated volumetric water content and rainfall-induced slope deformation based on a model slope experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geo Engineering	6. 最初と最後の頁 179-186
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 Shinichi Ito, Kazuhiro Oda, and Keigo Koizumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Availability of the particle filter methods on identification of soil hydraulic parameters based on field measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ARC)	6. 最初と最後の頁 JGS-013
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 Shinichi Ito, Toru Danjo, Tomohiro Ishizawa, Sayako Baba, and Kazunari Sako	4. 巻 1
2. 論文標題 Data assimilation of parallel tanks model based on measurement data of groundwater level on full-scale test	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Technical Forum on Mitigation of Geo-disasters in Asia	6. 最初と最後の頁 148-151
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) https://doi.org/10.2208/jscejge.76.1_52	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾
2. 発表標題 多様な土壌水分特性の推定に対する粒子フィルタの有用性
3. 学会等名 平成30年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 横川京香, 鏡原聖史
2. 発表標題 京都府綾部市安国寺裏斜面における現地計測結果を用いたデータ同化
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾
2. 発表標題 融合粒子フィルタによる土壌水分特性と体積含水率の事後分布推定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018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