粘土質シルトで構成される切土斜面における土壌水分特性のデータ同化

大阪大学 大学院工学研究科　学生会員　○大段 恵司，伊藤 真一，藤本 彩乃
大阪大学 大学院工学研究科　正会員　小田 和広，小泉 圭吾
西日本高速道路株式会社　正会員　櫻谷 慶治

１．はじめに

豪雨時の斜面崩壊の発生には，斜面内の水分状況が大きく影響する．このため，現地斜面における土壌水分特性の把握は重要である．筆者らはこれまでに，体積含水率の現地計測結果に基づく土壌水分特性の逆解析を行ってきた．そして，逆解析手法として，逐次型データ同化手法の一種である粒子フィルタが有効であることを明らかにした[1)]．ところで，斜面崩壊発生に関する危険性の観点から，マサ土斜面が現地計測の対象になっていることが多い．このため，筆者らはマサ土斜面を対象にデータ同化を行ってきた．本研究では，粘土質シルト斜面において現地計測された体積含水率の時系列データを用いた土壌水分特性パラメータのデータ同化を通じて，マサ土以外の土性における粒子フィルタの有用性を明らかにする．

２．解析手法

粒子フィルタ[1)]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(パラメータ，初期条件，境界条件)の情報と，各モデルにおいてシミュレーションを行って算出される各時刻の物理量を情報として有している．粒子フィルタでは，3 つの計算ステップ(1 期先予測，フィルタリング，リサンプリング)を逐次繰り返して，計測結果との適合度が高い数値解析モデルを推定する．1 期先予測では，時刻 t-1 から t までの粒子数分のシミュレーションを行う．フィルタリングでは，ベイズの定理を用いて，各粒子の重みを算出する．リサンプリングでは，各粒子の重みに基づいて粒子の複製・消滅を行う．

本研究では，数値解析シミュレーションとして飽和不飽和浸透流解析を用いる．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．このため，5 種類の土壌水分特性パラメータ(θ_s，θ_r，α，n，k_s)をそれぞれ推定する．

３．現地計測結果

本研究の対象斜面は，粘土質シルトで構成された道路沿いの切土斜面である[2)]．**図-1** は対象斜面におけるセンサの設置状況を示している．この斜面では複数地点に土壌水分計が設置され，体積含水率が 10 分間隔で計測されている．本研究では，とある地点の深度 45cm の深さで計測された体積含水率の時系列データを現地計測結果として用いる．**図-2** は現地計測結果を示している．最大時間雨量 39(mm/h)の激しい降雨に伴って体積含水率が急激に上昇しているが，その後の無降雨期間では体積含水率は緩やかに下降している．

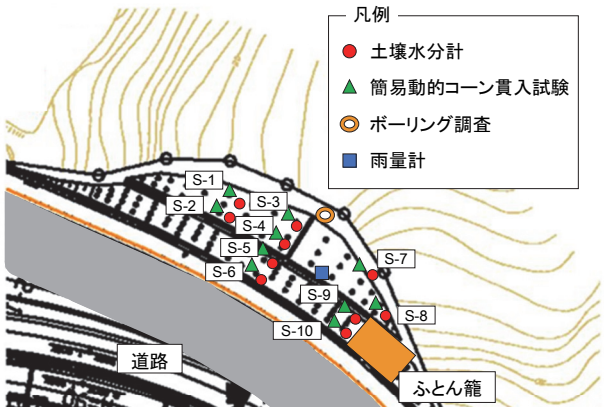

図-1　対象斜面におけるセンサの設置状況

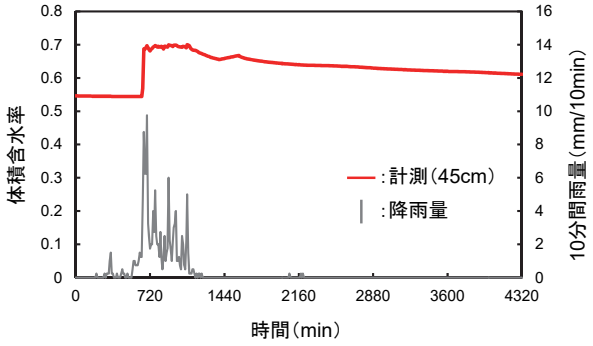

図-2　現地計測結果

キーワード　データ同化，粒子フィルタ，粘土質シルト，水分特性曲線，現地計測
連絡先　〒565-0871　大阪府吹田市山田丘 2-1　大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻　TEL: 06-6879-7626

4．解析結果

不飽和状態における雨水の浸透は重力方向の流れが卓越すると考えられるため，本研究では 1 次元解析モデルを仮定した．**図-3** は本研究で用いた解析モデルを示している．モデル上面には降雨境界を，モデル下面には自由排水境界を設定した．データ同化に用いた粒子数は 5000 個である．ところで，粒子フィルタは計測結果と解析結果の誤差に基づいて粒子を逐次更新していくデータ同化手法であるため，それぞれの土壌水分特性パラメータは確率分布として算出される．本研究では，各パラメータに対して，以下に示す重み付き平均をそれぞれ算出し，その値を同定されたパラメータとして扱うこととした．

$$\tilde{x}_{t|t} = \sum_{i=1}^{N} w_t^{(i)} \cdot x_{t|t}^{(i)} \quad (1)$$

ここで，$w_t^{(i)}$は各粒子の重みを，$x_{t|t}^{(i)}$は各粒子に対応するパラメータの値を示している．

表-1 は同定された各パラメータの値を，**図-4** はそれによって求められた水分特性曲線を示している．θ_s と θ_r が比較的大きい．また，水分特性曲線の形状は典型的な粘土系材料の特徴を示している．次に，同定されたパラメータを用いて，現地計測結果に対する再現解析を行った．**図-5** はその再現解析結果を示している．図中実線は計測結果を表しており，点線は解析結果を表している．体積含水率が上昇するタイミングやそのピーク値は，解析結果と計測結果が良く合致している．また，降雨終了後の体積含水率が下降していく段階(排水過程)も適合度が高い．以上の結果から，粘土質シルトで構成された斜面において計測されたデータに対しても，粒子フィルタを用いたデータ同化は有効であることが分かる．

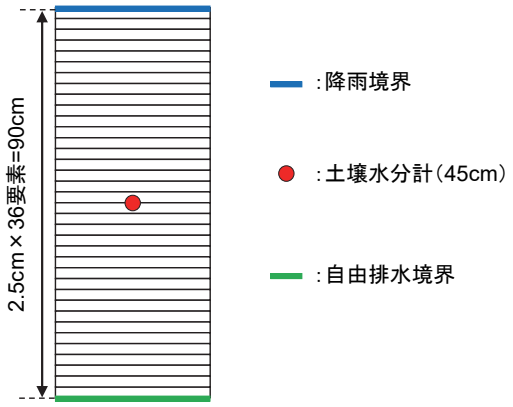

図-3　解析モデル

表-1　同定された土壌水分特性パラメータ

θ_s	θ_r	α (1/cm)	n	k_s (cm/min)
0.782	0.431	0.036	1.343	1.688

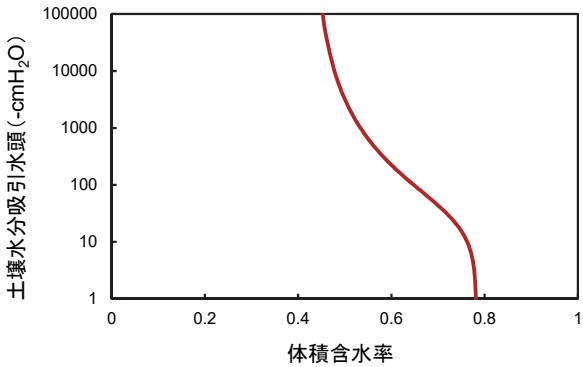

図-4　水分特性曲線

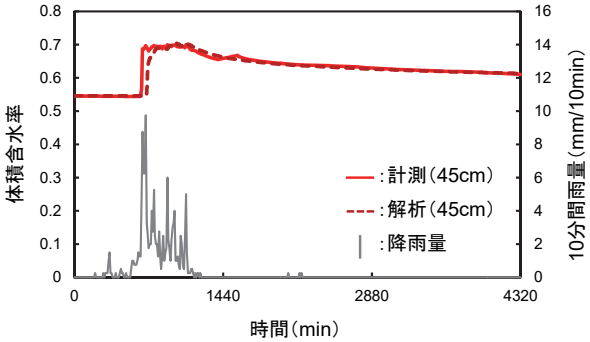

図-5　再現解析結果

5．まとめ

本研究では，逐次型データ同化手法の一種である粒子フィルタを用いて，粘土質シルトで構成された斜面における現地計測結果に基づく土壌水分特性のデータ同化を行った．得られた主な知見を以下に示す．

1) 粒子フィルタを適用することで，現地計測結果に基づいて土壌水分特性パラメータを同定することができる．

2) 粒子フィルタにより同定されたパラメータを用いると，現地計測結果を精度良く再現することができる．

3) 粒子フィルタによるデータ同化は粘性土シルト斜面においても有効である．

参考文献

1) 伊藤真一ほか：現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータ同定に対する粒子フィルタの適用，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.72，No.4，pp.354-367，2016.

2) 臼木陽平ほか：集中豪雨を受ける風化砂岩と風化泥岩の互層斜面における雨水浸透特性，Kansai Geo-Symposium 2014，pp.207-212，2014.