

# 不飽和斜面の降雨時の浸透・変形に対する水理・力学パラメータの同定

Identification of hydro-mechanical parameters for seepage and deformation of an unsaturated slope during rainfall

新良心<sup>1)</sup>, Sanchitha Jayakody<sup>2)</sup>, 上田恭平<sup>3)</sup>, 涼岡良介<sup>4)</sup>

Shin Niira, Sanchitha Jayakody, Kyohei Ueda and Ryosuke Uzuoka

1) 京都大学工学研究科 修士課程 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail: niira.shin.22a@st.kyoto-u.ac.jp)

2) 博(工) National Building Research Organisation (Sri Lanka, E-mail: shsharendra@gmail.com)

3) 博(工) 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp)

4) 博(工) 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail: uzuoka.ryosuke.6z@kyoto-u.ac.jp)

This study investigated the applicability of particle filters to identify hydraulic and mechanical parameters during seepage-induced deformation of an unsaturated slope. Finite element analysis based on porous media theory was used for the analysis, and data assimilation was applied to centrifugal model experiments on an unsaturated slope. Hydraulic and elastoplastic parameters were identified using pore water pressure and horizontal displacement as observed data in a centrifuge model experiment. As a result, by considering both parameters, we succeeded in identifying particles that accurately reproduce the experimental results.

**Key Words :** Data assimilation, Seepage, Deformation, Unsaturated slope

## 1. はじめに

地盤工学分野では、土・水・空気連成の有限要素解析手法[1]などを用いて、実際の地盤挙動のシミュレーションを行っている。しかし、地盤の材料パラメータや初期・境界条件などの地盤情報の不確かさにより、予測された結果が現場の挙動と必ずしも一致しないこともある。データ同化[2]は、現場の観測データをもとに、こうした不確実性を有するパラメータを推定する手法である。これまで圧密変形[3]や斜面浸透[4]を対象にデータ同化が実施されているが、浸透とそれに伴う変形現象を対象にデータ同化が実施された事例は少ない。そこで、本研究では、不飽和斜面における地下水や降雨による浸透とそれに伴う変形を再現した遠心模型実験[5]を対象とし、データ同化を実施する。逐次データ同化手法として粒子フィルタ(PF)を用い、降雨時の斜面の浸透・変形挙動のデータ同化に対するPFの適用性を検討する。既報[6, 7]では水理パラメータ・境界条件を対象としたが、ここでは力学パラメータもデータ同化対象として、浸透・変形挙動を再現する。

## 2. 遠心模型実験

実験は京大防災研の遠心力載荷装置を用いて、50Gの遠心場において実施された[5]。斜面模型を図-1示す。斜面材料には含水比10%，乾燥密度 $1.48\text{g/cm}^3$ の真砂土を使用した。はじめに土槽右側の水位調整タンクから斜面上部右側に給水し、地下水水流を再現する浸透実験を行った。次に土槽上部の降水用ノズルから $25\text{mm/h}$ の降雨を斜面の緩傾斜部に与え、降雨実験を行った。降雨実験の間も地下水流

は与え続けた。斜面崩壊が発生した時点で実験を終了した。実験中は斜面内部の間隙水圧や斜面側面の変位(ターゲットを用いた画像解析)を計測した。

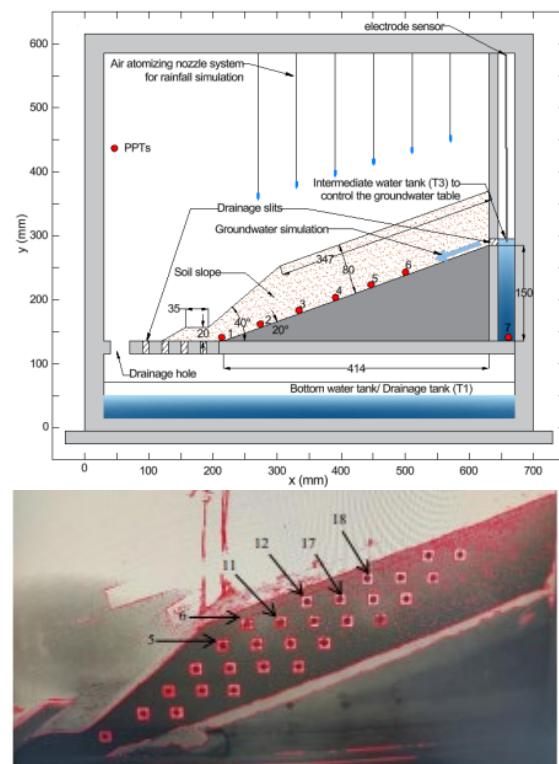


図-1 遠心模型実験の斜面模型[5]（上：模型断面と間隙水圧計測位置、下：変位計測位置）

### 3. データ同化手法および有限要素解析手法

本研究ではデータ同化手法として粒子フィルタ（PF）を用いる。PFの実行手順は以下のとおりである。はじめに、NケースのFEM解析ケース（粒子と呼ぶ）を用意する。同定対象のパラメータには仮定した事前分布に基づき乱数等でランダムに値を割り当てる。それ以外のパラメータは各粒子で同一とする。次に、特定の時間まで各粒子のFEM解析を進め、着目点での解析結果の時刻歴を得る。特定の期間において解析値と観測値を比較し、尤度および重みを計算する。誤差が小さいほどその粒子の重みが大きくなる。ここでは弾塑性構成モデルの履歴を考慮するため、粒子のリサンプリングを行わないSIS（Sequential Importance Sampling）法[2]を用いた。

FEM解析には土・水・空気連成の多孔質体理論に基づく有限要素解析手法を用いた[1]。構成モデルとして、水分特性曲線にVGモデル[8]、応力ひずみ関係にサクションを考慮した拡張修正Cam-Clayモデル[9]を用い、弾性関係には、拘束圧依存性を考慮した超弾性モデル[10]を用いた。遠心模型実験を対象とした二次元有限要素モデルを図-2示す。境界条件は図に示す通り遠心模型実験を再現した。降雨実験に先立って遠心加速度の載荷および斜面内の地下水浸透を再現している。解析で用いる構成モデルのパラメータの基準値は既往の解析[5]に基づいて設定した。要素P2, 3, 4および節点ux5, 6, 11, 12, 17, 18はそれぞれ実験において間隙水圧、水平変位を計測した位置に対応する。これらの観測データを用いてPFによるデータ同化を行う。また、水理境界条件の不確実性を考慮するため、斜面表面の三つのエリアに降雨浸透率（斜面への浸透流量の与えた降雨強度に対する割合）を設定した。

### 4. PFを用いたデータ同化

観測データとして間隙水圧と水平変位を用いてPFによるデータ同化を行った。はじめに間隙水圧計測データを用いて水理パラメータ（透水係数、降雨浸透率など）を同定した。次に変位計測データを用いて、同定された水理パラメータを固定して、力学パラメータ（弾性パラメータ、圧縮指數、膨潤指數）を同定した。

#### (1) 水理パラメータの同定

同定対象とした水理パラメータの事前分布を表-1に示す。飽和透水係数( $k$ )、斜面表面の降雨浸透率( $R_{lower}$ ,  $R_{middle}$ ,  $R_{upper}$ )、SWCCパラメータ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ )がここで同定対象とした水理パラメータである。粒子数は2000とした。これらの事前分布は既往の解析[5]および事前の試行解析により、解析が現実的な結果を示す範囲として設定した。ここでは、観測点として間隙水圧応答(P2, P3, P4)（図-1, 図-2）のみを使用してデータ同化を実施した。データ同化の対象区間は150秒～190秒とし、5秒ごとに重みを更新した。間隙水圧の観測ノイズの標準偏差は2 kPaとした。

190秒時点でのデータ同化した結果、重みが大きい粒子

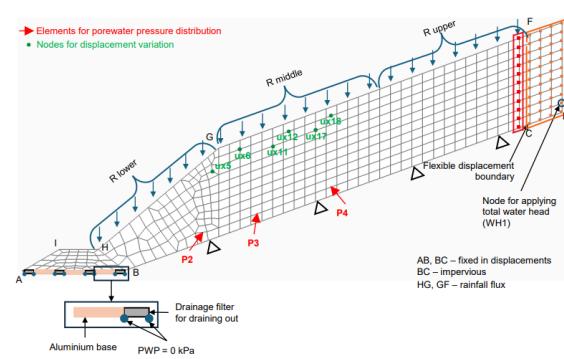


図-2 二次元有限要素モデル[5]

表-1 水理パラメータの事前分布

Parameter	Distribution	$\mu$	$\sigma$	min	max
Saturated water permeability coefficient ( $k$ ) $m s^{-1}$	Log-normal	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$		
$R_{lower}$	uniform			0.0	0.7
$R_{middle}$	uniform			0.3	0.7
$R_{upper}$	uniform			0.0	0.7
Minimum water saturation ( $\theta_r$ )	Log-normal	0.25	0.03		
Maximum water saturation ( $\theta_s$ )	Log-normal	0.91	0.03		
Parameters of VG model ( $\alpha$ )	Log-normal	0.41	0.15		
Parameters of VG model ( $n$ )	Log-normal	2.2	0.3		

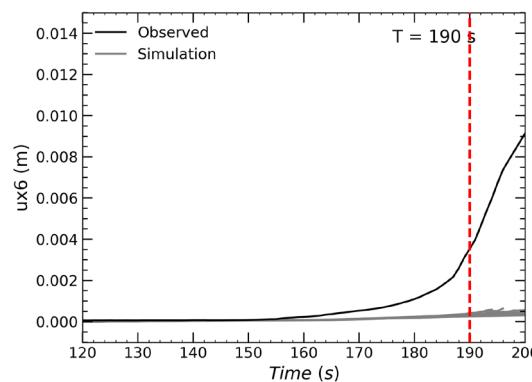
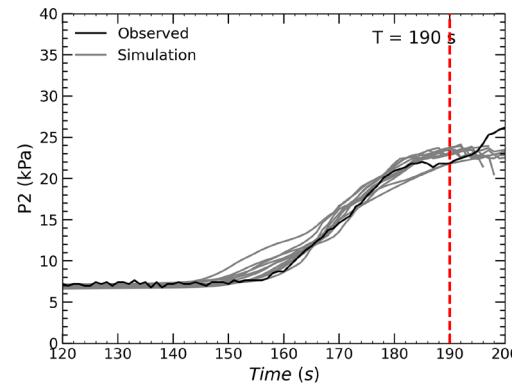


図-3 重みの大きい水理パラメータを用いた粒子の解析結果と実験結果（間隙水圧を用いた190秒でのデータ同化結果、上：P2における間隙水圧の時刻歴、下：ux6における水平変位の時刻歴）

（合計値が0.95）の解析結果（灰色線）と実験結果（黒線）の時刻歴を図-3に示す。P2とux6はそれぞれ間隙水圧と水平変位の代表的な結果である。赤い破線は最終のデータ同化時刻を示している。時刻120秒での降雨開始に伴って、150秒過ぎからP2での間隙水圧やux6での水平変位が増加している。重みの大きい粒子の解析は実験での間隙水圧

応答を比較的よく再現している。一方、水平変位については、観測データとして用いておらず、基準値として設定した力学パラメータが十分ではなかったことから、解析は水平変位を過小評価している。

175秒時点のデータ同化で得られた飽和透水係数 $k$ とSWCCパラメータ $\alpha$ の粒子の重み分布を図-4に示す。過度の絞り込みを避けるため、重み分布は175秒の同化時点の結果に基づいている。また、各パラメータの加重平均値をグラフ上に示している。飽和透水係数が非常に敏感であり、重みの高い粒子が狭い範囲に分布している。一方、SWCCパラメータの重み分布は比較的広く、飽和透水係数と比較して感度が低くなっている。なお、室内試験から得られたパラメータは重み高い粒子の範囲内にあり、室内試験結果も妥当といえる。

## (2) 力学パラメータの同定

前のセクションで同定した水理パラメータを固定して、力学パラメータの同定を実行した。同定対象とした力学パラメータの事前分布を表-2に示す。弾性パラメータ( $\mu_0$ ,  $\mu_1$ )、圧縮指数( $\lambda$ )および膨潤指数( $\kappa$ )を同定対象とした。せん断弾性係数は一定の弾性パラメータ $\mu_0$ と拘束圧依存性を表す弾性パラメータ $\mu_1$ で算定される。水理パラメータと境界条件は所定の値に固定した。解析では合計1500個の粒子を使用した。斜面表面付近の水平変位計測点6点(ux5, ux6, ux11, ux12, ux17, ux18)(図-1, 図-2)を観測点としてデータ同化を実施した。データ同化は170秒から開始し、2秒ごとに重みを更新した。ux5, ux6, ux11, ux12における水平変位の観測ノイズの標準偏差は0.001mに設定した。実験ではほとんど変形が発生しなかったux17とux18における水平変位の観測ノイズの標準偏差は比較的小さい0.0002mに設定した。

192秒時点でのデータ同化の結果、重みが大きい粒子(合計値が0.95)の解析結果(灰色線)と実験結果(黒線)の時刻歴を図-5に示す。ここでは変位計測データを観測データとして使用したことから、重みの大きい粒子が実験の間隙水圧応答だけでなく変位応答も比較的良好に再現している。図-3と比較すると、水理パラメータを固定したため、解析はP2で計測された実験値をやや過大評価している。このことは、水理パラメータと力学パラメータの両方を同時に推定するデータ同化の必要性を示している。

182秒時点のデータ同化で得られた弾性パラメータ $\mu_1$ と膨潤指数 $\kappa$ の重み分布を図-6に示す。弾性パラメータ $\mu_1$ の重み分布は比較的偏っているのに対し、膨潤指数の重み分布は比較的広く、弾性パラメータ $\mu_1$ に比べて感度が低くなっている。室内試験から決定された膨潤指数の値(0.025)は重みの高い粒子の範囲内にあり、室内試験結果も妥当といえる。

## 5. まとめ

不飽和斜面における地下水や降雨による浸透とそれに伴う変形を再現した遠心模型実験を対象とし、粒子フィ

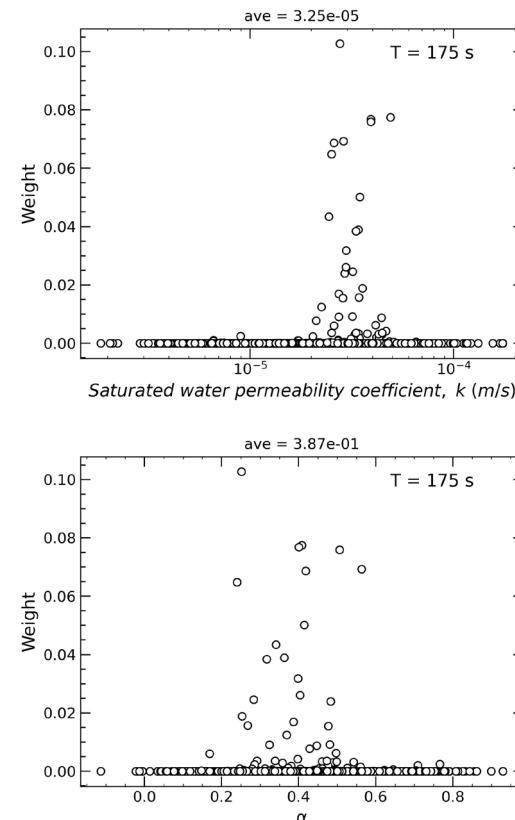


図-4 重み分布(間隙水圧を用いた175秒でのデータ同化結果、上：透水係数、下：SWCCパラメータ)

表-2 力学パラメータの事前分布

Parameter	Distribution	Min.	Max.
Elastic parameters ( $\mu_0$ )	uniform	5	50
Elastic parameters ( $\mu_1$ )	uniform	70	140
Compression index ( $\lambda$ )	uniform	0.025	0.20
Swelling index ( $\kappa$ )	uniform	0.010	0.050

ルタ(PF)を用いた逐次データ同化を実施した。SIS(Sequential Importance Sampling)法を用いて、水理パラメータ(飽和透水係数、斜面表面の降雨浸透率、SWCCパラメータ)と力学パラメータ(弾性パラメータ、圧縮指数、膨潤指数)を同定した。予測モデルには土・水・空気連成の多孔質体理論に基づく有限要素解析手法を用いた。構成モデルとして、水分特性曲線にVGモデル、応力ひずみ関係にサクションを考慮した拡張修正Cam-Clayモデルを用い、弾性関係には、拘束圧依存性を考慮した超弾性モデルを用いた。地下水流动下で降雨を与えた遠心模型実験で計測した間隙水圧と水平変位を観測データとしてデータ同化に用いた。間隙水圧のみを観測データに用いた場合、実験での間隙水圧を再現することはできたが、実験での変位を再現することはできなかった。水平変位を観測データに用いることで実験での変位を再現できる力学パラメータを同定できた。降雨浸透による斜面崩壊を予測するためには、斜面の水理パラメータだけでなく力学パラメータの不確実性も考慮する必要があることを示している。

謝辞：本研究は、JSPS科研費21H04575の助成を受けたものである。ここに記して御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] Doucet, A., Godsill, S., Andrieu, C.: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering. *Statistics and Computing*, Vol.10, pp.197-208, 2000.
- [2] Uzuoka, R., Borja, R.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 36, pp. 1535-1573, 2012.
- [3] Murakami, A., Shuku, T., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K.: Data assimilation using the particle filter for identifying the elastoplastic material properties of geomaterials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37, pp. 1642-1669, 2013.
- [4] 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 藤本彩乃, 越村謙正: 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, Vol. 73, No. 2, I\_45-I\_54, 2017.
- [5] S.H.S. Jayakody., Uzuoka R., Ueda, K.: Effect of groundwater dynamics in rain-induced landslides: centrifuge and numerical study, *Soils and Foundations*, Vol.64, 2024.
- [6] 斎藤健太, S.H.S Jayakody, 上田恭平, 渡岡良介: 不飽和斜面の浸透・破壊挙動を対象とした模型実験とデータ同化解析の適用, 計算工学講演会論文集, Vol.28, 2023.
- [7] 渡岡良介, 吉川遼祐, Sanchitha Jayakody, 上田恭平: 不飽和斜面の地下水浸透と降雨時の変形に対する粒子フィルタを用いた逐次データ同化, 計算工学講演会論文集, Vol.29, 2024.
- [8] van Genuchten MT.: A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- [9] Uzuoka, R., Kazama, M., Sento, N.: Soil-water-air coupled analysis on seepage and overtopping behavior of river levee, *14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011.
- [10] Borja, R.I., Tamagnini, C., Amorosi, A.: Coupling plasticity and energy-conserving elasticity models for clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, pp.948-957, 1997.

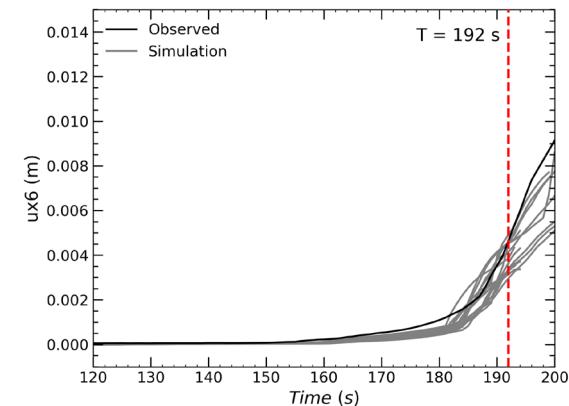
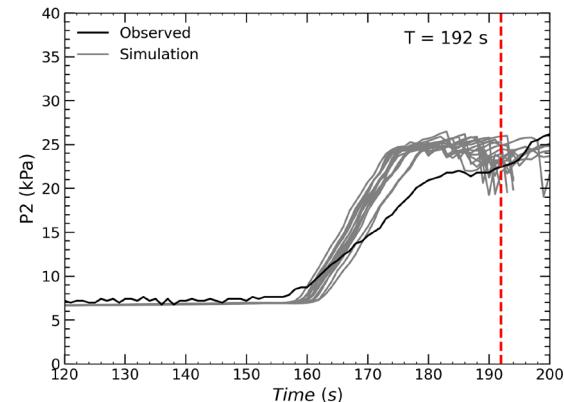


図-5 重みの大きい力学パラメータを用いた粒子の解析結果と実験結果（水平変位を用いた 192 秒でのデータ同化結果。上 :  $P_2$  における間隙水圧の時刻歴、下 :  $ux_6$  における水平変位の時刻歴）

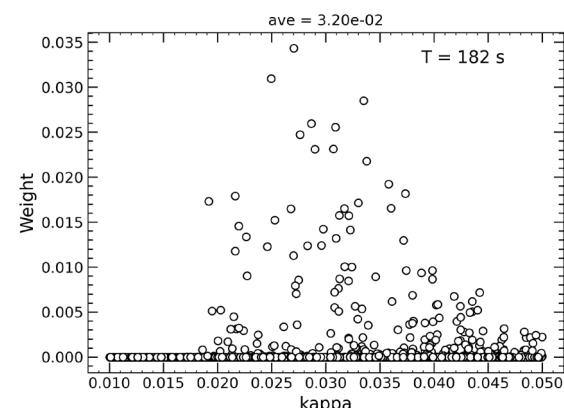
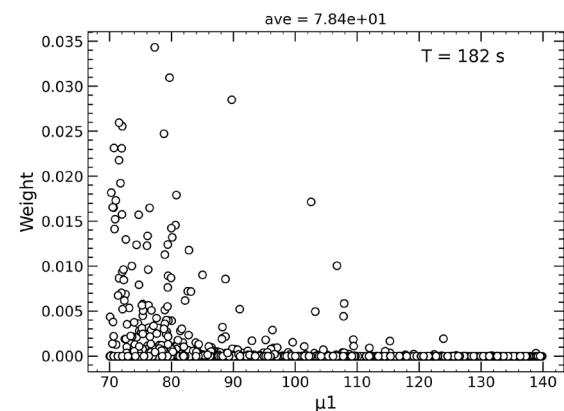


図-6 重み分布（水平変位を用いた 182 秒でのデータ同化結果、上 : 弹性パラメータ、下 : 膨潤指數）