

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

Sequential Data Assimilation using Particle Filter for Seepage and Deformation
of Unsaturated Slope during Rainfall

*渦岡良介¹⁾, 吉川遼祐²⁾, Sanchitha Jayakody³⁾, 上田恭平⁴⁾

Ryosuke Uzuoka, Ryosuke Yoshikawa, Sanchitha Jayakody and Kyohei Ueda

- 1) 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)
- 2) 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: yoshikawa.ryosuke.22c@st.kyoto-u.ac.jp)
- 3) 博(工) 京都大学防災研究所 研究員 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail: jayakody.sanchitha.8d@kyoto-u.ac.jp)
- 4) 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)

This study investigated the applicability of sequential data assimilation using particle filter to groundwater seepage and rainfall infiltration-induced deformation on unsaturated slopes. Finite element analysis based on porous media theory was used for the analysis, and data assimilation was applied to centrifugal model experiments on unsaturated slopes. In experiments to reproduce the deformation caused by rainfall infiltration after seepage of the groundwater, data assimilation was performed using pore water pressure and horizontal displacement data as observation data, and the rate of rain infiltration into the slope surface (rainfall infiltration rate) was estimated.

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]などが開発され、その計算を通して実際の地盤挙動のシミュレーションが行われる。しかし、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実の事象と必ずしも一致しないことが多い。「データ同化」とは、実際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[2]や斜面浸透[3]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と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[4]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、PFによる斜面の浸透変形挙動に対する適用性を検討する。

2. 遠心模型実験の概要

遠心模型実験は京大防災研の遠心力载荷装置で、50Gの遠心場において実施された[4]。斜面模型を図-1に示す。斜面材料には含水比10%、乾燥密度1.48g/cm³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25mm/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 (図中の赤丸) 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。

3. PFを用いたデータ同化手法の概要

PFは逐次型のデータ同化手法である。逐次型とは現象の時間発展を数値解析モデルで計算しながら、時々刻々と観測データを取り込んでいくことを意味する。PFは確率分布を粒子の集合で表現し、各粒子に対して有限要素法による予測計算と尤度計算を繰り返す。それにより、未知パラメータの推定結果を向上することができる。ここでは粒子のリサンプリングを行わないSIS (Sequential Importance Sampling) 法を用いた。

予測計算には土・水・空気連成の多孔質体理論に基づく有限要素解析手法[1]を用いた。構成モデルには、水分特性曲線にVGモデル、応力ひずみ関係に修正Cam-Clayモデル

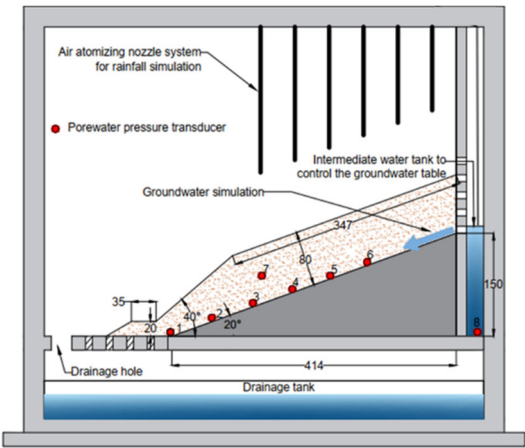


図-1 遠心模型実験の斜面模型 [4]

ルを用いた。解析で用いる有限要素モデルを図-2に示す。境界条件は図に示す通りである。降雨実験に先立って遠心加速度の载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は[4]に基づいて設定した。要素P2, P3および節点M5, M6, M11, M12は実験において間隙水圧および水平変位を計測した位置にそれぞれ対応する。

4. データ同化の解析条件

与えた降雨が斜面内部に実際に浸透する割合（降雨浸透率）は降雨強度や斜面角度などに影響されることから、降雨浸透率を未知パラメータとして推定した。ここでは降雨実験で計測された水平変位量を観測データとしてPFを用いたデータ同化を行った。

降雨浸透率の空間的分布を考慮し、図-2に示すような領域ごとに3つの降雨浸透率を設定した。これらのパラメータは $0.1 \leq R_{lower} \leq 0.3$, $0.4 \leq R_{middle} \leq 0.6$, $0.3 \leq R_{upper} \leq 0.5$ の範囲を持つ一様分布と仮定した。これに従う1000個の粒子をランダムに発生させ、事前分布を作成した。尤度計算に関する分散共分散行列は対角行列とし、その対角成分の分散は、各時刻の水平変位量の30%を標準偏差[5]とした。尤度計算は2秒毎に行った。

5. データ同化の解析結果

データ同化を行った各時刻のパラメータの推定値と最も近い値を持つ粒子の水平変位および間隙水圧をプロットし、観測データと比較したグラフを図-3および図-4にそれぞれ示す。観測データの変動が大きい観測点M6およびP3の結果をそれぞれ示している。図中の□は推定結果の更新時点に対応している。

図-3より、観測点M6における水平変位は、観測データでは50秒以後に斜面変形が生じている。一方、解析では遅れて変形量が増加し始め、観測データよりも値が小さい傾向があるものの、おおむね観測を再現できている。

図-4より、観測点P3における間隙水圧は、30～50秒の観測データの増加を再現できていないが、50秒以降で解析値と観測データが概ね一致している。水平変位データだけを用いて降雨浸透率を推定した場合でも、水平変位だけでなく間隙水圧の観測データも再現できている。

6. 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、PFを用いた逐次データ同化を実施した。斜面の降雨浸透率を未知パラメータとして推定した。降雨実験で得られた水平変位を観測データとするデータ同化により、実験中の間隙水圧や変位を概ね再現できる降雨浸透率を推定できた。

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。

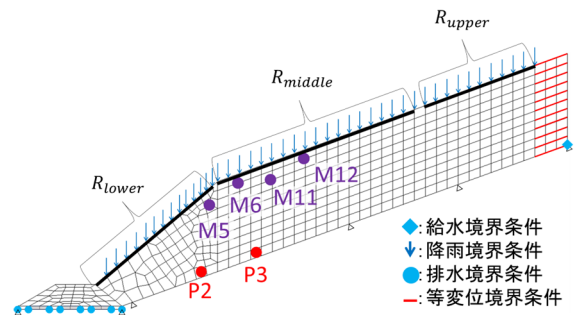


図-2 有限要素解析モデル

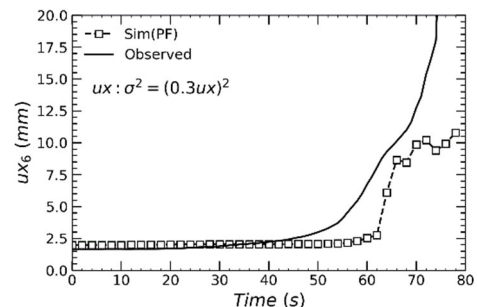


図-3 M6における水平変位の実験データと解析値

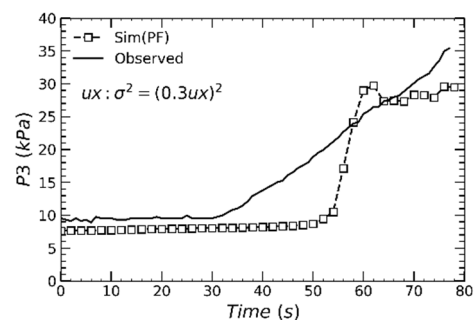


図-4 P3における間隙水圧の実験データと解析値

参考文献

- [1] Uzuoka, R., Borja, R.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 36, pp. 1535-1573, 2012.
- [2] 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, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 37, pp. 1642-1669, 2013.
- [3] 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.
- [4] Sanchitha Jayakody: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Slopes Subjected to Rainfall and Groundwater Flow, 京都大学大学院博士論文, 2023.
- [5] 齋藤健太, S.H.S Jayakody, 上田恭平, 渦岡良介: 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.