

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

Application of model experiments and data assimilation analysis
for seepage and failure behavior of unsaturated slope

齋藤健太¹⁾, S.H.S Jayakody²⁾, 上田恭平³⁾, 渦岡良介⁴⁾

Kenta Saito, S.H.S Jayakody, Kyohei Ueda and Ryosuke Uzuoka

1) 京都大学大学院工学研究科博士前期課程（現構造計画研究所）（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, E-mail:kenta-saito@kke.co.jp）

2) 京都大学大学院工学研究科博士後期課程（同上, E-mail: jayakody.sharendra.51a@st.kyoto-u.ac.jp）

3) 博(工) 京都大学 防災研究所 准教授（同上, E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp）

4) 博(工) 京都大学 防災研究所 教授（同上, E-mail: uzuoka.ryosuke.6z@kyoto-u.ac.jp）

Multiple unsaturated slopes were tested under the same seepage and rainfall infiltration to obtain measurement errors in centrifuge testing. Finite Element Modelling was carried out to validate and compare with the experimental results. The effect of the magnitude of observation noise on the accuracy of parameter estimation was discussed by employing the particle filter technique.

Key Words : Particle filter, Numerical validation, Unsaturated slope, Observation noise

1. はじめに

近年、地盤工学分野において地盤情報の不確かさを考慮するために現場観測データから地盤情報を確率的に推定するデータ同化が行われている[1]。データ同化による地盤情報の推定には解析と観測の差を表した観測ノイズと呼ばれる情報を事前に設定する必要があるが、適切な観測ノイズの設定には、解析結果と観測結果とともに不確かさの定量化が要求される。観測ノイズには、観測機器の特性に起因する測定誤差とシミュレーションモデルの不備分が寄与するモデル化誤差（表現誤差）がある[2]。一方で、実地盤において同外力条件下での観測データの複数回取得はほぼ不可能であるため、測定誤差およびモデル化誤差の定量的な評価は難しく、観測ノイズの設定は研究者の経験的判断に任せられている。そこで、本研究は不飽和斜面の浸透・破壊挙動を対象に遠心模型実験を行い、各挙動の測定誤差の定量化を行う。その後、実験と解析の多数対多数の比較による解析モデルの妥当性確認を行い、各挙動のモデル化誤差の定量化を行う。データ同化手法の一つである粒子フィルタを実施し、観測ノイズの大きさがパラメータ推定精度に与える影響を確認する。

2. 遠心模型実験による測定誤差の定量化

遠心模型実験には京都大学防災研究所の遠心力载荷装置を使用した。斜面の材料としてまさ土を使用した。表-1にまさ土の材料特性を示す。気乾状態のまさ土に含水比調整 ($w=10\%$) を行い、土内部の水分量を均質化するために24時間静置した。その後、斜面内の乾燥密度が 1.48 Mg/m^3 となるように1層ずつ締固めた（計11層）。各層の

厚みは20 mmである。斜面を所定の形状に成形することにより、完成とする。図-1に実験模型概要図を示す。間隙水圧計はP1からP8までの8点、変位測定用マーカーは30点設置した。遠心加速度が50 Gに到達後、水位調整タンクから斜面上部に水を供給し、浸透実験を開始する。浸透実験終了後、降雨用ノズルから25 mm/hの雨を緩傾斜部分に供給し、降雨実験を開始した。降雨実験中は、斜面上部に水を供給し続けている。降雨開始後、斜面崩壊が発生した時点で実験を終了した。以上の実験条件を統一し、5回の遠心模型実験を実施した。

各実験の降雨開始時点を0 sとし、-100 sから150 sまで間隙水圧および水平変位の値を比較した。図-2に浸透実験終了時の間隙水圧分布を示す。P6からP8の斜面上部では正の間隙水圧が発生していない一方で緩傾斜から急傾斜に変わるP3付近で水がたまることがわかる。不飽和斜面上部において、サクシンの影響が小さい間隙水圧計付近を通らない水みちが形成されたためと推測する。P3付近で水がたまる原因として、排水スリットからの排水が速やかに行われなかったからだと考えられる。浸透・破壊挙動における測定誤差検討の一例として、図-3にP3の間隙水圧の時刻歴、図-4にM13の水平変位の時刻歴を示す。図中の凡例の末尾の数字は実験ケース番号を示している。図-3、図-4に示す間隙水圧および水平変位の時刻歴より、水平変位のばらつきは間隙水圧と比較して、浸透実験から降雨実験にかけて増加していることがわかる。斜面の不均一性や浸透量のばらつきによって、各実験ですべり面の位置が異なったため、水平変位のばらつきは浸透実験から降雨実験にかけて増加したと考えられる。

表-1 まさ土の材料特性

パラメータ	記号	値
	D_{50}, D_{30}, D_{10} (mm)	0.83, 0.32, 0.15
土粒子密度	ρ_s (Mg/m^3)	2.65
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (Mg/m^3)	1.76
最適含水比	w_{opt} (%)	15.5
飽和透水係数	k (m/s)	4.0×10^{-5}
SWCCパラメータ	α, n, m	0.41, 2.2, 0.55
内部摩擦角	ϕ ($^\circ$)	40
粘着力	c (kPa)	0

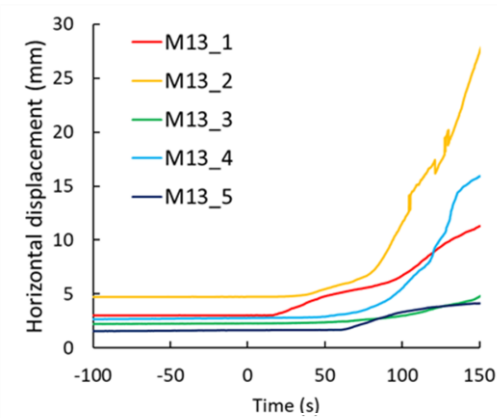


図-4 M13 の水平変位の時刻歴

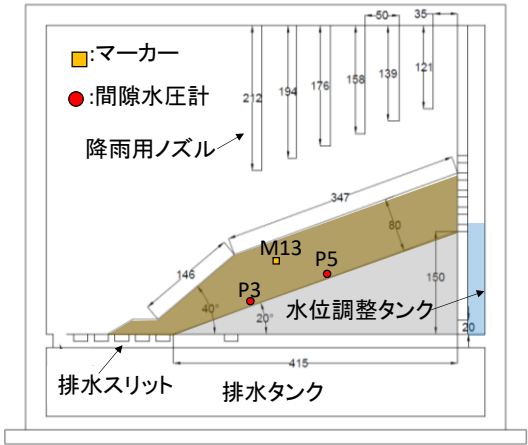


図-1 実験模型概要図 (単位 : mm)

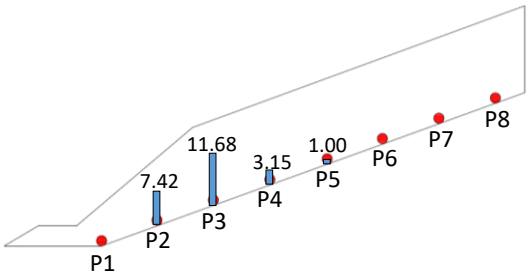


図-2 浸透実験終了時の間隙水圧分布 (単位 : kPa)

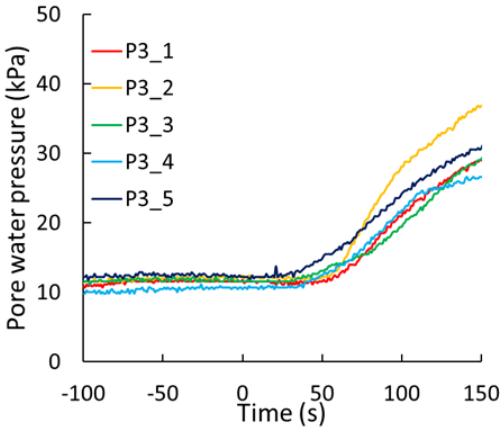


図-3 P3 の間隙水圧の時刻歴

3. 不飽和斜面の浸透・破壊挙動における解析モデルの妥当性確認

(1) 数値解析手法

数値解析には、多孔質体理論に基づく動的有限要素解析手法を適用する[3]。空間離散化には有限要素法を、時間離散化には後退差分法を用いている。土の構成式の応力計算は陰的応力積分に基づいており、非線形となる基礎式とともに Newton-Raphson 法を用いて、各計算時間ステップにおける解を求めている。

(2) 数値解析条件

解析に用いた有限要素モデルを図-5に示す。モデルは斜面と排水スリットをモデル化し、基盤は考慮していない。斜面の構成式には弾性関係に拘束圧依存性を考慮した修正Cam-Clay モデルを、排水スリットにはneo-Hookean モデルを適用した。サクションと飽和度の関係を与える水分特性曲線にはvan Genuchtenモデルを用いた。材料パラメータは遠心模型実験で用いた材料(まさ土)の土質試験で得られた値を参考に設定した。節点数は1475 で要素数は452 である。変位境界条件として、モデルの下端は全節点固定、右側面から4列は図-5に示す通り同一深度の節点の変位を等しく拘束している。水理境界条件として、排水スリット設置位置に水圧0 kPa を設定し、それ以外を非排水境界条件とした。空気境界条件として、斜面表面に間隙空気圧ゼロの条件を与えた。遠心模型実験に準じて1) 自重解析2) 浸透解析3) 降雨解析の3 段階に分けて再現解析を行った。浸透解析では、斜面の右下端にケース1で得られた水位調整タンクの時刻歴の水頭変化を与えた。降雨解析では、緩傾斜部に25 mm/hの雨を与えた。

計算時間増分は1.0 秒で1) 自重解析 (960ステップ) 2) 浸透解析 (2241ステップ) 3) 降雨解析 (60ステップ) の計3261ステップで解析を行った。後退差分法を用いたため、時間積分係数 $\gamma=1.0$, $\beta=0.0$ とした。全ての解析過程で準静的解析とした。収束判定誤差は、土骨格変位と間隙水圧に関する残差ノルムが 1.0×10^{-12} 未満を満たすこととした。

(3) 浸透挙動における解析モデルの妥当性確認

浸透解析では、斜面と排水スリットの透水係数のばら

つきを考慮した。透水係数のばらつきを考慮した解析を1000ケース行い、透水係数のばらつきによる解析上の間隙水圧のばらつきを取得した。

浸透解析終了時のP3およびP5の実験・解析の間隙水圧のヒストグラムを図-6、図-7に示す。実験・解析ともに間隙水圧のばらつきは小さいが、実験と解析の平均値の差が7.64 kPaと大きいことがわかる。間隙水圧の過小評価は、排水スリットの透水係数および排水境界の設定が要因として考えられる。解析上では、浸透流の排水が速やかに行われるのに対して、実験では排水に時間がかかるため、緩傾斜から急傾斜に変わるP3付近で水がたまつたと推測される。また、解析では水みちの影響を考慮できていないため、P5では過大評価している。

(4) 破壊挙動における解析モデルの妥当性確認

降雨解析では、不飽和降伏曲面のパラメータである R^* を求める際に必要な材料パラメータ a^c のばらつきを考慮した。材料パラメータ a^c は、未知であるため最小値 $a_{\min}^c = 0.004$ 、最大値 $a_{\max}^c = 0.015$ として一様分布を仮定し、パラメータ組を500組発生させた。

降雨開始後60sのM13の水平変位のヒストグラムを図-8に示す。水平変位は、浸透実験・解析終了時の変位量を0 mmとして比較している。数値解は実験値よりも過小評価する傾向にあり、平均値同士を比較すると0.52 mmの差があった。水平変位の過小評価は、材料パラメータセットおよび解析モデルが再現できない部分や解析で設定した降雨強度が原因として考えられる。材料パラメータセットが比較的表層部分で変形が発生するセットだった可能性がある。本研究では、降雨はすべて浸透すると仮定し、表面流を考慮しなかったため実際には浸透しない降雨まで供給した結果、斜面表面まで水位が上昇し緩傾斜表層部のみ変形が大きくなったと考えられる。

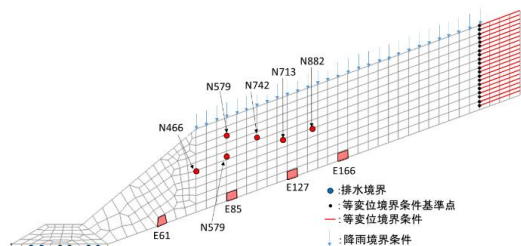


図-5 解析に用いた有限要素モデル

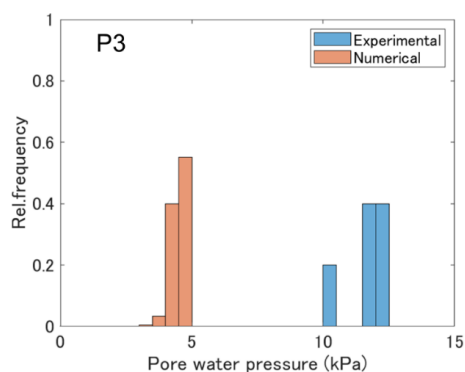


図-6 P3 での間隙水圧の実験と解析のヒストグラム

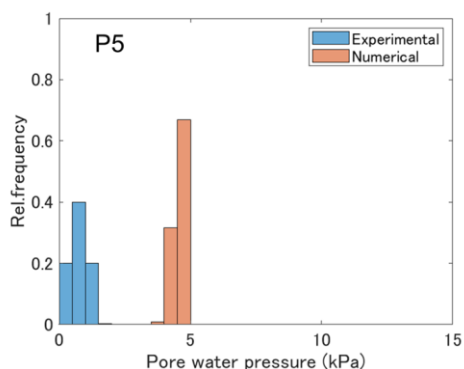


図-7 P5 での間隙水圧の実験と解析のヒストグラム

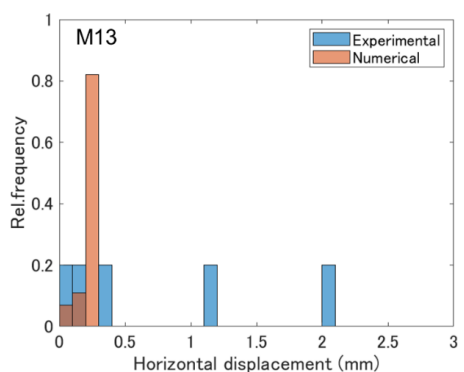


図-8 M13 での水平変位の実験と解析のヒストグラム

4. 粒子フィルタによる不飽和斜面の浸透挙動におけるデータ同化

(1) データ同化条件

同定するパラメータとして、解析モデルの妥当性確認でばらつきを考慮した斜面の透水係数と排水スリットの透水係数を選定した。データ同化に用いる粒子数は1000組とし、パラメータ組は浸透挙動における解析モデルの妥当性確認で使用した組を用いた。観測データとして、5回の同一条件下での遠心模型実験より得られた間隙水圧4点(P2~P5)の各平均値を用いた。各観測点から得られるデータのノイズは互いに独立と仮定し、尤度計算に必要な分散共分散行列には、遠心模型実験より得られた各測定点の各時刻における標準偏差を設定した。

(2) 浸透挙動における透水係数のパラメータ同定結果

斜面の透水係数の重み分布性状(-25s時点)を図-9に示す。斜面の透水係数は、間隙水圧に対して、感度が高いため重みが集中していることがわかる。

(3) 同定パラメータを用いた浸透解析結果

-25s時点の同定パラメータを用いた解析結果とP3の実験結果の間隙水圧の比較を図-10に示す。なお、本文における同定パラメータとは、各時刻における重み付き平均値を意味する。E85_aveが同定パラメータを用いた要素間隙水圧の時刻歴、E85は、事前分布の透水係数の平均値を用いた要素間隙水圧の時刻歴を示す。重み付き平均値を用いても実験と解析の間隙水圧は一致していないことがわかる。図-6および図-7の浸透実験終了時の間隙水圧の実

験と解析のヒストグラムより実験を再現できる解析ケース（粒子）が存在しないため、同定パラメータを用いた再解析において、実験を再現できなかったと考えられる。この結果から、透水係数のばらつきから解析モデルを用いて求められた解析上の間隙水圧のばらつきが実験のばらつきを表現できていない場合は、パラメータ同定が難しいことがわかった。

5. 粒子フィルタによる不飽和斜面の破壊挙動におけるデータ同化

(1) データ同化条件

同定するパラメータとして、破壊挙動の妥当性確認でばらつきを考慮した材料パラメータ a^c を選定した。データ同化に用いる粒子数は500組とし、パラメータ組は破壊挙動における解析モデルの妥当性確認で使用する組を用いた。観測データとして、5回の同一条件下での遠心模型実験より得られた水平変位6点の各平均値を用いた。各観測点から得られるデータのノイズは互いに独立と仮定し、尤度計算に必要となる分散共分散行列には、遠心模型実験より得られた各測定点の各時刻における標準偏差を設定した。データ同化は、降雨開始後60sで1回行った。

(2) 破壊挙動における a^c のパラメータ同定結果

測定誤差のみを考慮した材料パラメータ a^c の降雨開始後60sの重み分布性状を図-11に示す。材料パラメータ a^c は、すべての粒子がほぼ同じ重さをもっているため、適切なパラメータ推定ができていないといえる。これは、図-8より実験値のばらつきは大きい、解析値は実験値のばらつきの範囲内である。しかし、材料パラメータ a^c のばらつきによって求められる解析の水平変位のばらつきの幅が小さいため、水平変位で実験値と解析値による尤度計算を行った場合、各粒子の重みの違いが生じなかったと考えられる。また、浸透挙動同様、同定パラメータを用いた降雨解析は実験を再現できなかった。

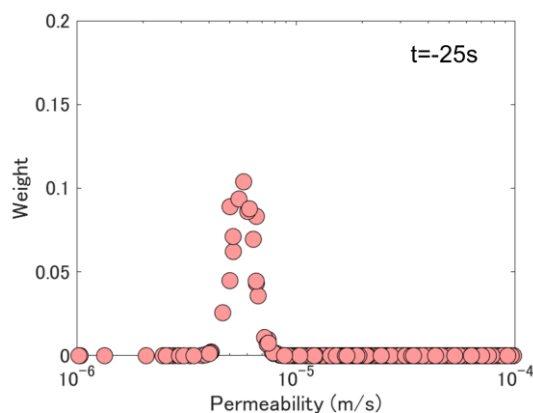


図-9 -25sにおける斜面の透水係数の重み分布性状

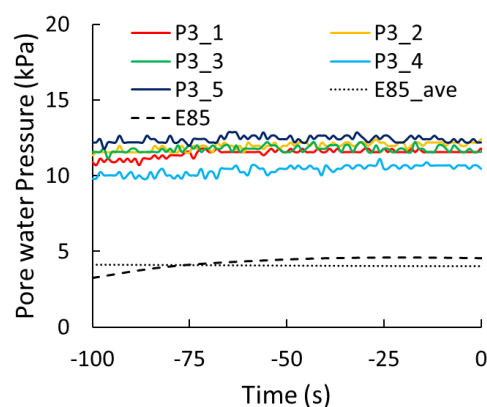


図-10 -25s 時点の同定パラメータを用いた解析結果と P3 の実験結果の間隙水圧の比較

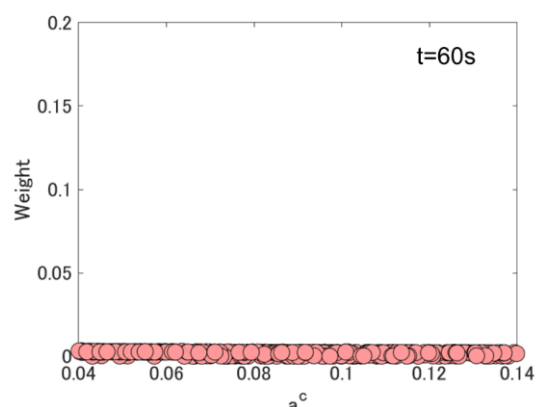


図-11 a^c の降雨開始後 60s の重み分布性状

6. まとめ

不飽和斜面の浸透・破壊挙動を対象に遠心模型実験、解析モデルの妥当性確認、粒子フィルタを実施し、各挙動の測定誤差およびモデル化誤差の定量化、観測ノイズの大きさがパラメータ推定精度に与える影響を確認した。同一条件下で5回実施した遠心模型実験では、浸透・破壊挙動にかけて間隙水圧のばらつきは小さい一方で、水平変位のばらつきは増加することがわかった。妥当性確認およびデータ同化よりモデル化誤差、すなわち実験と解析の差が大きい場合、実験を再現できる解析ケースが存在せず、パラメータ同定および同定パラメータを用いた再解析は実験を再現することができない。

参考文献

- [1] 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(応用力学), Vol.73, No.2(応用力学論文集 Vol.20), pp.L45-L54, 2017.
- [2] 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮: データ同化入門—一次世代のシミュレーション技術—, 朝倉書店, pp.1-115, 2013.
- [3] Uzuoka, R. and Borja, R. I.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 36, 1535-1573, 2012.