

封入空気を考慮した水分特性モデルによる不飽和シルトの吸排水時ヒステリシス性の表現

不飽和土 水分特性曲線 ヒステリシス

名古屋大学 国際会員 ○野田 利弘 吉川 高広
名古屋大学 学生会員 中澤 一眞

1. はじめに

不飽和土の水分特性曲線が吸排水時のヒステリシス性を持つ要因として、インク瓶効果、間隙水と土粒子の接触角の影響、空気の封入の影響が挙げられている。本研究では、空気の封入の影響により生じるヒステリシス性に注目して、別報¹⁾の不飽和シルトを用いた繰返し吸排水履歴に関する三軸試験の数値シミュレーションを実施した。用いた水分特性モデル^{2,3)}の特徴は、間隙空気を「封入空気」と「連続した相として存在する空気（連続空気）」に明確に分け、この考えに基づいて新たに定義した有効飽和度を用いる点と、封入空気と連続空気が吸排水に伴い遷移する点である。

2. 解析手法の概要

解析手法の詳細は別文献^{2,3)}を参照されたい。ここではその要点を述べる。図1は土の示相図および各種諸量の定義を示す。封入空気は自由水に封入されているため、自由水+封入空気が土粒子と吸着水を除く部分に占める体積割合を新たに有効飽和度 S_e^l と定義し、 S_e^l とサクシオン・間隙比等を水分特性式で関係付ける。また、自由水が自由水+封入空気に占める体積割合を自由水飽和度 S_1^w と定義し、未知変数として扱う。なお、連続空気に加えて封入空気の質量保存則も支配方程式として用いるため、未知数と方程式の数は一致する。

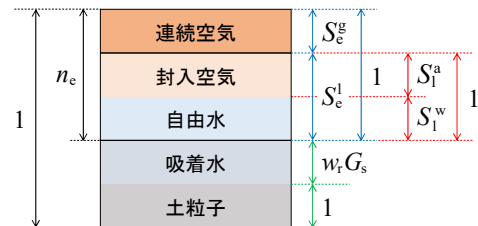


図1 土の示相図および各種諸量の定義
(全て体積に関する諸量)

また不飽和土は、例えば、吸水時には連続空気の一部が封入空気に、排水時には封入空気の一部が連続空気に遷移すると考えられる。そこで、封入空気と連続空気の質量交換を考慮するため、封入空気と連続空気がそれぞれ単位時間・単位体積当たりに湧き出す質量 m_{la} と m_{ga} に対して、次に示す簡単な遷移モデルを考える。なお、 $m_{la} + m_{ga} = 0$ である。

(i) 連続空気から封入空気への遷移 ($S_e^l \geq 0$ の場合)

有効飽和度 S_e^l の土骨格から見た物質時間微分 $\dot{S}_e^l \geq 0$ のときに遷移すると考える。 $S_e^g = 0$ で連続空気が存在しないとき、および、 $S_e^g = 1$ で自由水が存在しないときは封入空気への遷移は生じないため、次に示すようなモデルを用いた。

$$m_{la} = \rho^{la} n_c \alpha^* S_e^g (1 - S_e^g) \dot{S}_e^l \quad (1)$$

ここに α^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。 ρ^{la} は封入空気単体の密度を表す。

(ii) 封入空気から連続空気への遷移 ($S_e^l < 0$ の場合)

$S_e^l < 0$ のときに遷移すると考える。 $S_1^a = 0$ で封入空気が存在しないときは遷移しない。また、 $S_1^a = 1$ のときは自由水が存在せず、有効間隙が全て連続空気であることを意味するため、このような状態は定義できない。そのため、次に示すようなモデルを用いた。

$$m_{ga} = \rho^{ga} n_c \mu^* \ln(1 - S_1^a) \dot{S}_e^l \quad (2)$$

ここに μ^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。 ρ^{ga} は連続空気単体の密度を表す。

本稿では、 S_e^l にGallipoli et al.⁴⁾の水分特性式を用いる。 S_e^l に対してはヒステリシス性モデルを導入せず、式(1)と式(2)に示した封入空気と連続空気の遷移に起因する飽和度～サクシオン関係のヒステリシス性に注目して、数値シミュレーションを行った。本解析モデルでは α^* と μ^* が材料定数として新しく加わるが、「最大飽和度」と「ヒステリシス性を表現するために導入するパラメータ」が不要なため、一般的なヒステリシス性モデルと材料定数の数は同じである。また、土骨格の弾塑性構成式は、SYS Cam-clay model⁵⁾に対して、京川ら⁶⁾・Zhang & Ikariya⁷⁾を参考に、正規圧密線の切片Nと限界状態線の切片 Γ が S_e^l に応じて変化する手法を導入し、応力の式には骨格応力⁸⁾を用いた。なお、本稿では、一様変形場を仮定して三軸試験の数値シミュレーションを実施し、構成式と水分特性式の応答を出力した。

3. 解析条件

別報¹⁾の(A)同じサクシオンを繰返す吸排水試験と(B)排水時のサクシオンを段階的に上昇させつつ繰返す吸排水試験の数値シミュレーションを実施した。紙幅の都合上、実験の詳細は別報¹⁾を参照されたい。サクシオン0kPaのときは封入空気量(自由水飽和度 S_1^w の値)が明確であるため、(A)では1回目の排水過程開始時、(B)では0回目の吸水過程終了後の背圧上昇過程開始時を初期状態とした。また、(A)と(B)の実験において、吸水コラプスが生じた0回目の吸水過程終了後は、吸排水過程を繰返しても間隙比変化がほぼ生じなかったため、まずは水分特性モデルのみの妥当性を検証するために、変形が生じない条件下で、数値シミュレーションを行った。

材料定数は、(A)の1回目の吸排水過程と、別で実施した初期間隙比が異なる場合の1回目の排水過程を最もよく再現できる値に決定した。この材料定数を用いて、(A)の2回目の吸排水過程と(B)のシミュレーションを行った。

4. 解析結果

(A) 同じサクシオンを繰り返す吸排水試験について、図2と図3はそれぞれ実験結果と数値シミュレーション結果を示す。まず、有効飽和度 $S_r^!$ ~ サクシオン p^s 関係にヒステリシス性を導入せずとも、封入空気と連続空気の遷移を考慮するだけで、実験結果の飽和度 $S_r \sim p^s$ 関係のヒステリシス性を表現可能である。特に $p^s = 0\text{kPa}$ のときに注目すると、吸水過程終了時の飽和度が、1回目より2回目の方が排水過程開始時の飽和度に近づく様子も再現できている。これは式(2)より、自由水飽和度 S_r^w が低くなるほど、封入空気が連続空気に遷移する量が大きくなるためである。

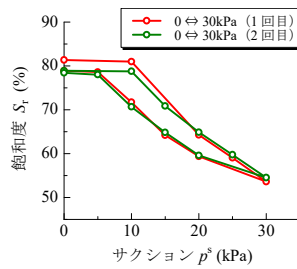


図2 (A)の実験結果

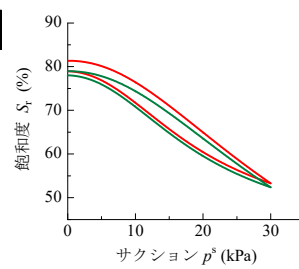


図3 (A)の解析結果
(ヒステリシス性の表現)

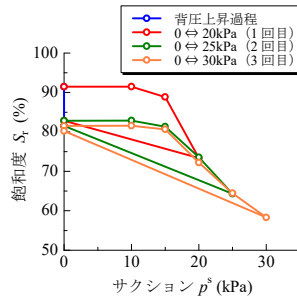


図4 (B)の実験結果

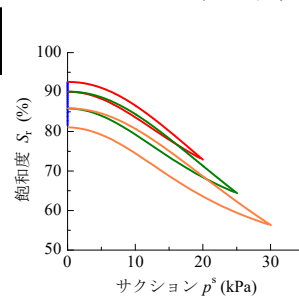


図5 (B)の解析結果

(吸排水の繰返しに伴い間隙水に空気が封入されていく様子の表現)

(B)排水時のサクシオンを段階的に上昇させつつ繰り返す吸排水試験について、図4と図5はそれぞれ実験結果と数値シミュレーション結果を示す。まず背圧上昇過程において、 $p^s = 0\text{kPa}$ での飽和度上昇を封入空気の圧縮 (S_r^w の上昇) により表現可能である。次に、排水時のサクシオンを段階的に上昇させて吸排水過程を繰り返すと、 $p^s = 0\text{kPa}$ での飽和度が徐々に低下し、空気の封入量が増加していく (S_r^w が低下する) 様子が再現できている。ただし、実験に比べて数値シミュレーションでは、1回目の吸排水過程における空気の封入量が小さい。今後は式(1)と式(2)の遷移モデルを中心に、解析手法の改良を行う必要がある。

最後に(B)について、図6と図7はそれぞれ、背圧上昇過程後および吸排水過程を3回繰り返した後に、 $p^s = 0\text{kPa}$ で非排気・非排水三軸圧縮試験を行ったときの実験結果と数値シミュレーション結果を示す。ここまでは変形が生じない条件を与えていたが、その制約を取り外して、両ケースとも同じ背圧上昇過程開始時を初期状態としてせん断までの一連の過程をシミュレートした。実験結果とシミュレーション結果を比較すると、吸排水履歴が異なる非排気・非排水三軸圧縮挙動の特徴をよく捉えられている。特に吸排水過程を繰り返さない場合の骨格応力経路では、SYS Cam-clay model⁹⁾の上負荷面が記述する構造の劣化により、限界状態線下側での軟化挙動を表現できている。

5. おわりに

本稿では、封入空気を考慮した水分特性モデルを用いて、不飽和シルトの繰返し吸排水三軸試験¹⁾の数値シミュレーションを行った。まず、封入空気と連続空気の吸排水に伴う遷移を考慮するだけで、有効飽和度~サクシオン関係にヒステリシス性を導入することなく、実験で得られた飽和度~サクシオン関係のヒステリシス性を表現できることを示した。また、サクシオンが同じゼロであっても、吸排水履歴の違いで飽和度が異なる挙動を表現でき、さらには、それら供試体に対して実施した非排気・非排水三軸圧縮試験において、吸排水履歴の違いにより、一方は軟化、他方は硬化を示す挙動も表現できることを示した。本稿では、サクシオンがゼロでの飽和度変化に注目したシミュレーション結果を示したが、最大飽和度を材料定数で与える既往の手法ではこのような挙動を表現できない点を強調しておく。

謝辞：JSPS 科研費 17H01289 および 17K14720 の助成を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献：1) 吉川ら (2018): 不飽和シルトを…, 第 54 回地盤工学研究発表会 (本誌). 2) 野田ら (2018): 新たに定義する…, 第 53 回地盤工学研究発表会, 725-726. 3) 吉川ら (2018): 新たに定義する…, 第 30 回中部地盤工学シンポジウム, 13-18. 4) Gallipoli et al. (2003): Modelling the variation…, Géotechnique, 53(1), 105-112. 5) Asaoka et al. (2002). An elasto-plastic description…, S&F, 42(5), 47-57. 6) 京川ら (2009): サクシオン・飽和度・密度を…, 応用力学論文集, 12, 331-342. 7) Zhang and Ikariya (2011): A new model…, S&F, 51(1), 67-81. 8) Jommi. (2000): Remarks on the constitutive modelling…, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Balkema, 139-153.

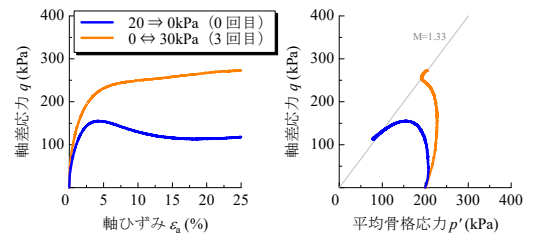


図6 (B)の非排気・非排水せん断の実験結果

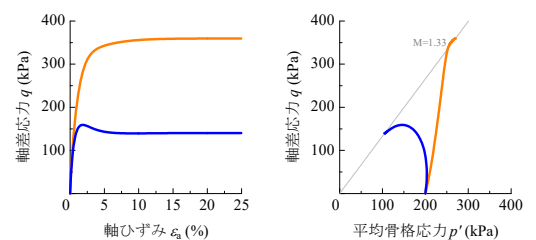


図7 (B)の非排気・非排水せん断の解析結果
(限界状態線下側での軟化と硬化の違いを表現)