

封入空気を考慮可能な不飽和土の有限変形解析手法の妥当性確認

不飽和土 水分特性曲線 封入不飽和

名古屋大学 国際会員 ○吉川 高広 野田 利弘
名古屋大学 学生会員 西垣 隆士

1. はじめに

別報¹⁾において、新たな有効飽和度を定義し、その有効飽和度に基づいた不飽和土の有限変形解析手法を提案した。間隙空気を封入空気と連続空気に、間隙水を吸着水と自由水に明確に分けて扱う点が大きな特徴である。本稿では、封入空気を考慮可能であることの有効性を、2つの解析事例を通じて示す。

2. 解析手法の概要および封入空気と連続空気の遷移モデルの提案

図1は土の示相図および各種諸量の定義を示す。これら諸量を用いて記述した最終的に解くべき連立一次方程式は、運動方程式、自由水～土骨格連成式、封入空気～土骨格連成式および連続空気～土骨格連成式である。その詳細は別報¹⁾を参照されたい。ここでは、本稿で注目する封入空気～土骨格連成式と連続空気～土骨格連成式を次に示す。

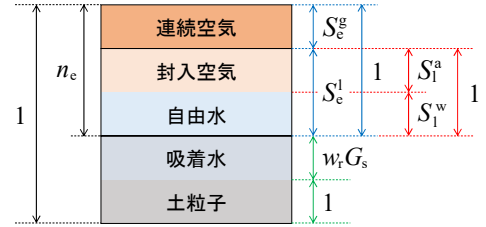


図1 土の示相図および各種諸量の定義

$$S_c^l S_1^a \text{div} \mathbf{v}_s + \frac{1}{\rho^{la}} \text{div} \{ \rho^{la} (\mathbf{v}_{la} - \mathbf{v}_s) \} + n_c S_c^l \dot{S}_c^l + n_c S_c^l \dot{S}_1^a + \frac{n_c S_c^l S_1^a}{K_a} \dot{p}^l = \frac{\dot{m}_{la}}{\rho^{la}} \quad (1)$$

$$S_c^g \text{div} \mathbf{v}_s + \frac{1}{\rho^{ga}} \text{div} \{ \rho^{ga} (\mathbf{v}_{ga} - \mathbf{v}_s) \} + n_c S_c^g \dot{S}_c^g + \frac{n_c S_c^g}{K_a} \dot{p}^g = \frac{\dot{m}_{ga}}{\rho^{ga}} \quad (2)$$

ここで、 \dot{m}_{la} と \dot{m}_{ga} はそれぞれ、封入空気と連続空気が単位時間・単位体積当たり湧き出す質量である。不飽和状態にある土は、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、本稿では次に示すような \dot{m}_{la} と \dot{m}_{ga} の構成モデルを考える。なお、封入空気と連続空気の質量交換のみを考えるため、 $\dot{m}_{la} + \dot{m}_{ga} = 0$ とする。

(i) 連続空気から封入空気への遷移 ($\dot{S}_c^l \geq 0$ の場合)

有効飽和度 S_c^l の土骨格から見た物質時間微分 $\dot{S}_c^l \geq 0$ のときに遷移すると考える。 $S_c^g = 0$ で連続空気が存在しないとき、および、 $S_1^w = 1$ 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考えた。

$$\left(\int_V \frac{\dot{m}_{la}}{\rho^{la}} dv \right) / \left(\int_V n_c dv \right) = \alpha^* S_c^g (1 - S_c^g) \dot{S}_c^l \quad (3)$$

ここに α^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。

(ii) 封入空気から連続空気への遷移 ($\dot{S}_c^l < 0$ の場合)

$\dot{S}_c^l < 0$ 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考えた。

$$\left(\int_V \frac{\dot{m}_{ga}}{\rho^{ga}} dv \right) / \left(\int_V n_c dv \right) = \mu^* \ln(1 - S_1^a) \dot{S}_c^l \quad (4)$$

ここに μ^* は材料定数で、値が大きいほど遷移量が多い。

また、自由水と連続空気の運動に関しては、運動方程式においてダルシー則を満たすような相互作用力（ただし慣性力も考慮）を仮定する。封入空気の運動に関しては、例えば自由水と一緒に運動することも考えられるが、本稿では土骨格に対して運動しないものと仮定する。

3. 保水性試験の数値シミュレーション

高津ら²⁾の保水性試験を参照した。初期に飽和状態にある豊浦砂の供試体に対して、排水・吸水の順に履歴を与え、排水から吸水に切り替えるときのサクシオン値の違いが、吸水時の封入空気量に与える影響を調べた実験である。表1は実験結果を示す。サクシオン 4.2kPa より 6kPa まで与えた方が、吸水終了時（サクシオン 0kPa 時）の飽和度が低く、封入空気量が多い。図2は解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。ここでは三軸円柱供試体を想定し、簡単のため軸対称性を仮定した。上下端は剛・摩擦のペダスタルの条件を表現するために束縛条件を課した。土骨格の構成式は SYS Cam-clay model を用いた。水分特性式は、有効飽和度 S_c^l に対して van Genuchten 式を適用し、吸排水時のヒステリシス性や間隙比依存性を考慮しない最単純のモデルを用いた。材料定数は三河珪砂7号の値^{3),4)}で代用し、新たに用いる材料定数は $\alpha^* = 1.0$ 、 $\mu^* = 1.0$ とした。また、初期の自由水飽和度 S_1^w は 99% とした。

図3は解析結果を示す。ここで、初期サクシオンとして 0kPa を与えると、連続空気～土骨格連成式の両辺が 0 となり、計算を進められない。そのため、初期サクシオンを 1kPa とし、上端排気条件のもと、下端の水圧のみを 1kPa ずつ変化させて排水・吸水履歴をシミュレートした。また、解析結果は供試体を 1 要素として見た場合の見かけの挙動として示

した。まず、(a) 飽和度-サクシオン関係より、サクシオン 4kPa より 6kPa まで与えた方が、吸水終了時の飽和度が低いことを表現できている。次に、(b) 有効飽和度-サクシオン関係は、水分特性モデルにヒステリシス性や間隙比依存性を考慮していないことを反映している。最後に、(c) 自由水飽和度-サクシオン関係を見ると、まず排水過程では、初期の自由水飽和度 S_w^f は 99% (S_w^i は 1%) で非常に高いため、式(4)で示した遷移モデルより、 S_w^f の変化はほぼ生じない。一方で吸水過程では、サクシオン 4kPa の場合は有効飽和度 S_e^f が約 70%であるが、サクシオン 6kPa の場合は S_e^f が約 10%と低いため、式(3)で示した遷移モデルから、より多くの連続空気が封入空気に遷移することがわかる。このように、水分特性モデルにヒステリシス性や間隙比依存性を考慮せずとも、(a) 飽和度-サクシオン関係に示すような封入空気量の違いを表現可能である。

4. 非排気非排水せん断試験の数値シミュレーション

小高ら⁵⁾の不飽和三軸圧縮試験を参照した。非塑性シルト (DL クレイ) を用いて、初期に間隙比 1.14, 含水比 20%, 飽和度 46.5% (このときのサクシオンは約 20kPa) の三軸円柱供試体を作製し、サクシオンおよび基底応力を与えた後、側圧一定のせん断試験を行う。用いた解析断面は図 2 と同じであり、参照実験と同様に、初期状態からサクシオンと基底応力を与える過程を経て、サクシオン 0kPa の非排気非排水せん断試験を本稿ではシミュレートした。材料定数は既往研究⁶⁾で同定した DL クレイの値を用い、 $\alpha^* = 2.9$, $\mu^* = 1.0$ とした。図 4 は実験結果と計算結果の比較を示す。まず既往の三

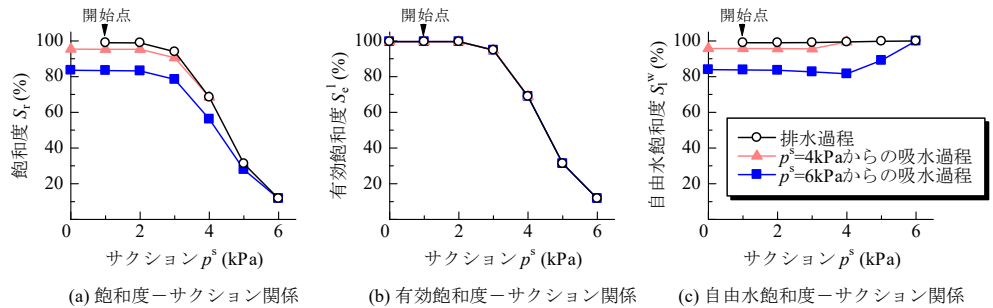


図 3 保水性試験の解析結果 (封入空気に起因した飽和度のヒステリシス性の表現)

相系解析手法を用いた場合、サクシオン 0kPa では水分特性曲線の最大飽和度 (ここでは 70%) になるため、これ以上の飽和度上昇を表現できない。そのため、非排気非排水条件では体積圧縮が生じず、まるで定体積せん断のような試験結果になってしまう。一方で、本解析手法を用いた場合は、実験結果と同様に飽和度上昇と体積圧縮挙動を表現できている。このとき、サクシオン 0kPa であるため有効飽和度は 1 から変化が生じないが、自由水中の封入空気が圧縮するため、飽和度上昇を表現できたことがわかる。また、軸差応力-軸ひずみ関係と骨格応力経路もよく再現できている。

5. おわりに

保水性試験のシミュレーションを通じて、連続空気が封入空気へ遷移するモデルの有効性を、サクシオン 0kPa の非排気非排水せん断試験のシミュレーションを通じて、封入空気の圧縮性を表現できることの有効性を示し、本解析手法の妥当性確認 (Validation) を行った。

参考文献

- 野田ら (2018) : 新たに定義する..., 第 53 回地盤工学研究発表会 (本誌).
- 高津ら (2015) : マイクロ X 線 CT..., 第 50 回地盤工学研究発表会, 703-704.
- 谷ら (2014) : 浅層盤状..., 地盤工学ジャーナル, 9(4), 533-553.
- 杉井ら (2002) : 高飽和時に..., 平成 13 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 267-268, 2002.
- 小高ら: 排気・排水条件を..., 第 18 回中部地盤工学シンポジウム, 地盤工学会中部支部, 6, 2006.
- Yoshikawa et al. (2015): Effects of air coupling..., S&F, 55(6), 1372-1387.

表 1 保水性試験の実験結果²⁾

	サクシオン 4.2kPa	サクシオン 6kPa
初期	100.0%	100.0%
排水終了時	50.5%	14.4%
吸水終了時	98.2%	81.1%

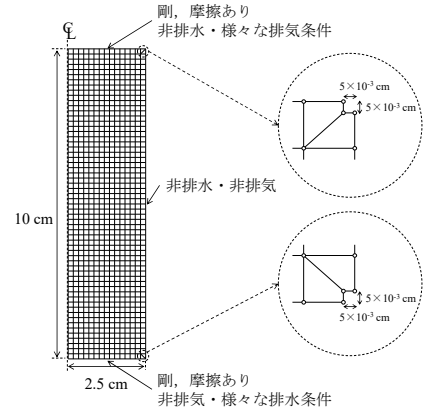


図 2 有限要素メッシュ図と境界条件

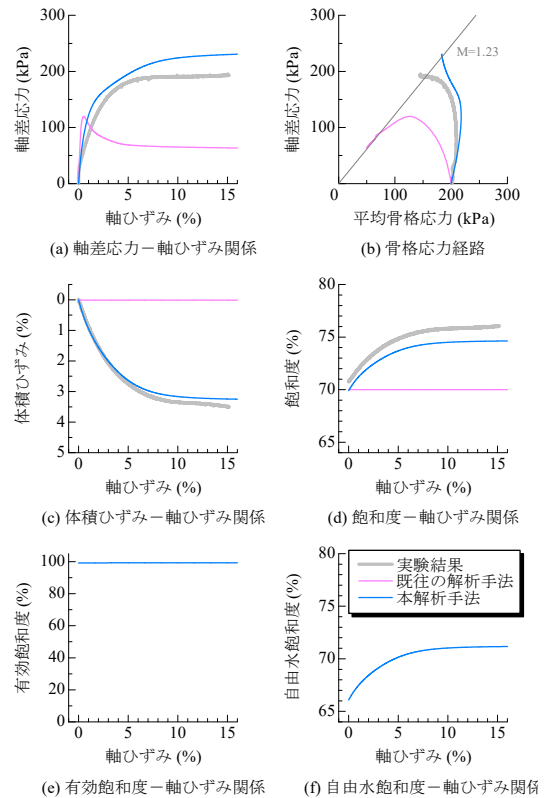


図 4 非排気非排水せん断試験の実験結果⁵⁾と解析結果の比較 (サクシオン 0kPa における飽和度上昇の表現)