

新たに定義する有効飽和度に基づく不飽和土の有限変形解析手法の開発と検証  
 (Development and validation of a finite deformation analysis method for unsaturated soil based on newly defined effective degree of saturation)

吉川高広<sup>1</sup>, 野田利弘<sup>2</sup>, 西垣隆士<sup>3</sup>

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻・yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp  
 2 名古屋大学・減災連携研究センター  
 3 東海旅客鉄道株式会社

## 概要

不飽和土の保水性を表す水分特性式は、最大の水分量と最小の水分量の間で定義される有効飽和度とサクシジョンの関係性を記述する。水分量として飽和度を用いる場合を考えると、低サクシジョンにおいては間隙水に封入された空気が存在するため、最大の飽和度は100%より低く、高サクシジョンにおいては土粒子表面に吸着水が残留するため、最小の飽和度は0%より高い。本研究では、間隙空気を「封入空気」と連続した相として存在する「連続空気」に、間隙水を「吸着水」と「自由水」に明確に分けて扱い、新たに有効飽和度を定義し直す。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開発した。また、本解析手法が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した。具体的には、保水性試験のシミュレーションを通じて、連続空気と封入空気が遷移できる点を、サクシジョン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点を示し、本解析手法の妥当性確認を行った。

キーワード：不飽和土，水分特性曲線，有効飽和度，封入不飽和

## 1. はじめに

不飽和土の保水性を表す水分特性式は、最大の水分量と最小の水分量の間で定義される有効飽和度とサクシジョンの関係性を記述する。水分量として飽和度を用いる場合を考えると、低サクシジョンにおいては間隙水に封入された空気が存在するため、最大の飽和度は100%より低く、高サクシジョンにおいては土粒子表面に吸着水が残留するため、最小の飽和度は0%より高い。本研究では、間隙空気を「封入空気」と連続した相として存在する空気（以後「連続空気」）に、間隙水を「吸着水」と「自由水」に明確に分けて扱い、新たに有効飽和度を定義し直す。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する。また、特に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. 新たな有効飽和度および各種諸量の定義

図1は土の示相図を示す。「土粒子」「吸着水」「自由水」「封入空気」「連続空気」に明確に分けて扱う。土粒子と吸着水が一体となって「土骨格」を形成し、土粒子と吸着

水を除く部分を土骨格の体積変化に有効な間隙（以後「有効間隙」）と考える。有効間隙が土全体に占める体積割合を有効間隙率 $n_e$ とする。封入空気は自由水に封入されているため、自由水+封入空気が有効間隙に占める体積割合を有効飽和度 $S_e^l$ と定義する。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 $S_l^w$ と定義する。吸着水は、高サクシジョン時に土粒子表面に吸着した水であるため、含水比 $w_r$ で定義し、本論文では材料定数と考える（吸着水は非圧縮と仮定）。なお、図中の $G_s$ は土粒子の比重であり、土粒子の体積を1としたとき、吸着水の体積は $w_r G_s$ になる。

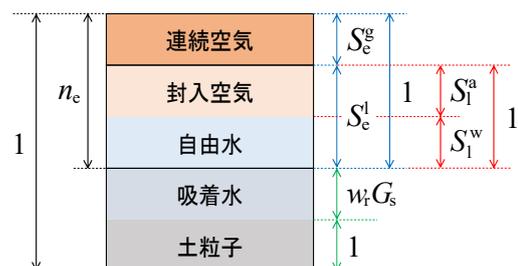


図1 土の示相図

### 3. 土骨格～自由水～封入空気～連続空気連成有限変形解析手法の提案

前章で述べた通り、不飽和土が土骨格、自由水、封入空気、連続空気の4相で構成されると考えるため、既往の3相系解析と異なり、4相に対して運動方程式や質量保存式を記述する。 $\mathbf{u}$ - $p$  formulation に基づき、de Boer<sup>1)</sup>、西村<sup>2)</sup>、Noda et al.<sup>3)</sup>、Noda and Yoshikawa<sup>4)</sup>に倣って定式化する。その結果、最終的には次に示す運動方程式、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～土骨格連成式を得る。

$$\rho \dot{\mathbf{v}}_s = \text{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \quad (1)$$

$$S_c^l S_1^w \text{div} \mathbf{v}_s + \frac{1}{\rho^{lw}} \text{div} \{ \rho^{lw} (\mathbf{v}_{lw} - \mathbf{v}_s) \} + n_c S_1^w \dot{S}_c^l + n_c S_c^l \dot{S}_1^w + \frac{n_c S_c^l S_1^w}{K_w} \dot{p}^l = 0 \quad (2)$$

$$S_c^l S_1^a \text{div} \mathbf{v}_s + \frac{1}{\rho^{la}} \text{div} \{ \rho^{la} (\mathbf{v}_{la} - \mathbf{v}_s) \} + n_c S_1^a \dot{S}_c^l + n_c S_c^l \dot{S}_1^a + \frac{n_c S_c^l S_1^a}{K_a} \dot{p}^l = \frac{m_{la}}{\rho^{la}} \quad (3)$$

$$S_c^g \text{div} \mathbf{v}_s + \frac{1}{\rho^{ga}} \text{div} \{ \rho^{ga} (\mathbf{v}_{ga} - \mathbf{v}_s) \} + n_c \dot{S}_c^g + \frac{n_c S_c^g}{K_a} \dot{p}^g = \frac{m_{ga}}{\rho^{ga}} \quad (4)$$

ここで、上付き”・”は土骨格から見た物質時間微分を表す。 $\mathbf{v}_s$ は土骨格の速度ベクトル、 $\dot{\mathbf{v}}_s$ は土骨格の加速度ベクトル、 $\mathbf{T}$ は全 Cauchy 応力テンソル（引張が正）、 $\mathbf{b}$ は単位質量あたりの物体力ベクトルである。 $p^l$ は自由水の圧力、 $p^g$ は連続空気の圧力であり、封入空気の圧力は自由水の圧力  $p^l$  に等しいと仮定する（ $p^l$  と  $p^g$  は圧縮が正）。 $\rho$  は土全体の密度、 $\rho^{lw}$ 、 $\rho^{la}$  および  $\rho^{ga}$  はそれぞれ、自由水、封入空気および連続空気の単体としての真の密度、 $\rho_{lw}$ 、 $\rho_{la}$  および  $\rho_{ga}$  はそれぞれ、自由水、封入空気および連続空気の混合体の構成要素としての密度である。 $\mathbf{v}_{lw}$ 、 $\mathbf{v}_{la}$  および  $\mathbf{v}_{ga}$  はそれぞれ、自由水、封入空気および連続空気の速度ベクトルである。 $K_w$  と  $K_a$  はそれぞれ水と空気の体積弾性係数である。また、 $S_c^g = 1 - S_c^l$ 、 $S_1^a = 1 - S_1^w$  である。

$m_{la}$  と  $m_{ga}$  はそれぞれ、封入空気と連続空気が単位時間・単位体積あたりに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、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、本論文では次の(i)と(ii)に示す  $m_{la}$  と  $m_{ga}$  の構成モデルを考える。なお、本論文では、封入空気と連続空気の質量交換のみを考えるため、 $m_{la} + m_{ga} = 0$  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、 $S_c^g = 1$  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考えたい。

$$\frac{m_{la}}{\rho^{la}} = n_c \alpha^* S_c^g (1 - S_c^g) \dot{S}_c^l \quad (5)$$

ここに  $\alpha^*$  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。このため、次に示すようなモデルを考えたい。

$$\frac{m_{ga}}{\rho^{ga}} = n_c \mu^* \ln(1 - S_1^a) \dot{S}_c^l \quad (6)$$

ここに  $\mu^*$  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慣性力も考慮したダルシー則を満たすような相互作用力を仮定する。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、本論文では土骨格に対して運動しないものと仮定する。

応力の式は骨格応力の概念<sup>5)</sup>に基づき、新たに定義した有効飽和度  $S_c^l$  を用いて次式のように記述する。

$$-\mathbf{T}' = -\mathbf{T} - (S_c^l p^l + S_c^g p^g) \mathbf{I} \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{T}'$  は骨格応力テンソル（引張が正）、 $\mathbf{I}$  は単位テンソルである。

初期値・境界値問題に対する解は、式(1)の3式に式(2)、式(3)、式(4)を加えた合計6式に対して、 $\mathbf{v}_s$  の3成分と  $p^l$ 、 $p^g$ 、 $S_1^w$  の計6個を未知数として求める。なお、有効飽和度  $S_c^l$  は水分特性モデルから計算する。また、運動方程式は Noda et al.<sup>3)</sup>に倣い、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮するために、土骨格から見た物質時間微分を施した速度型で表す。

## 4. 解析手法の特徴

本解析手法は、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。この有効性を、(i) 低サクションで連続空気が存在しない場合と(ii) 高サクションで自由水が存在しない場合に分けて説明する。

まず、2章で述べたように、有効飽和度  $S_c^l$  を自由水+封入空気が有効間隙に占める体積割合と定義した。ここで、有効飽和度  $S_c^l$  および飽和度  $S_r$  を各相の体積を用いて表すと次式になる。

$$S_c^l = \frac{V_{自由水} + V_{封入空気}}{V_{自由水} + V_{封入空気} + V_{連続空気}} \quad (8)$$

$$S_r = \frac{V_{吸着水} + V_{自由水}}{V_{吸着水} + V_{自由水} + V_{封入空気} + V_{連続空気}} \quad (9)$$

なお、 $V$  は体積、下付き文字は相を意味する。

#### (i) 低サクションで連続空気が存在しない場合

$V_{連続空気}$  に0を代入すると、 $S_c^l$  および  $S_r$  は次式で表される。

$$S_c^I = \frac{V_{自由水} + V_{封入空気}}{V_{自由水} + V_{封入空気}} = 1 \quad (10)$$

$$S_r = \frac{V_{吸着水} + V_{自由水}}{V_{吸着水} + V_{自由水} + V_{封入空気}} \quad (11)$$

式(10)より  $S_c^I$  は 1 であるが、式(11)より封入空気が圧縮／膨張して、 $V_{封入空気}$  が変化すれば、 $S_r$  は変化可能である。このとき、自由水飽和度  $S_w^I$  (自由水が自由水+封入空気に占める体積割合) が変化する。一方で、既往の水分特性モデルにおいて、例えば最大の飽和度を定義してしまうと、それ以上の飽和度上昇を表現できないため、間隙空気の圧縮性を評価できない。なお、Noda and Yoshikawa<sup>4)</sup>の飽和度を解くべき連立一次方程式の未知数とする手法は、サクシオンゼロにおける間隙空気の圧縮性を表現するための手法であったが、本提案手法では、間隙空気を封入空気と連続空気に明確に分け、その「封入空気」の圧縮性として表現している点異なる。

### (ii) 高サクシオンで自由水が存在しない場合

自由水が存在しないため、自由水中の封入空気も存在しない。そのため、 $V_{自由水}$  と  $V_{封入空気}$  に 0 を代入すると、 $S_c^I$  および  $S_r$  は次式で表される。

$$S_c^I = \frac{0}{V_{連続空気}} = 0 \quad (12)$$

$$S_r = \frac{V_{吸着水}}{V_{吸着水} + V_{連続空気}} \quad (13)$$

式(12)より  $S_c^I$  は 0 である。間隙水は吸着水のみ土粒子表面に存在し、含水比  $w_r$  で定義するため、 $V_{吸着水}$  は定数となる。そのため、式(13)より連続空気が圧縮／膨張して、 $V_{連続空気}$  が変化すれば、 $S_r$  は自然と変化する。一方で、既往の水分特性モデルにおいて、例えば最小の飽和度を定義してしまうと、吸着水の含水比が一定であることを表現するためには、最小飽和度を間隙比に依存して変化させる必要がある。

## 5. 解析手法の妥当性確認 (Validation)

本章では 2 つの解析事例を通じて、特に封入空気を考慮可能であることの有効性を示す。5.1 節では保水性試験のシミュレーションを通じて、3 章で述べた連続空気が封入空気へ遷移するモデルの有効性を示す。5.2 節ではサクシオン 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、4 章で述べた封入空気の圧縮性を表現できることの有効性を示す。

### 5.1 保水性試験の数値シミュレーション

高津ら<sup>6)</sup>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 2 は実験結果<sup>6)</sup>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。

表 1 保水性試験の実験結果<sup>6)</sup>

	サクシオン 4.2 kPa	サクシオン 6 kPa
初期飽和度 (%)	100.0	100.0
排水終了時の飽和度 (%)	50.5	14.4
吸水終了時の飽和度 (%)	98.2	81.1

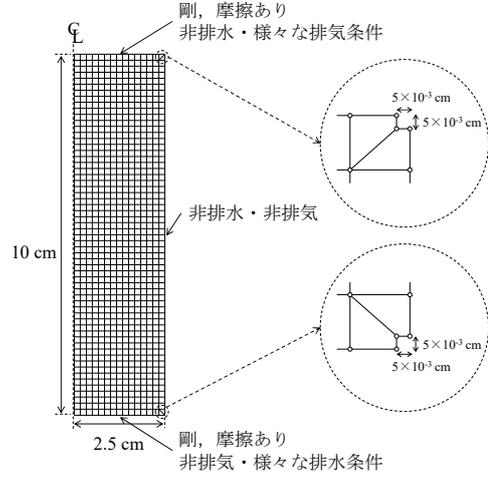


図 2 有限要素メッシュ図と境界条件

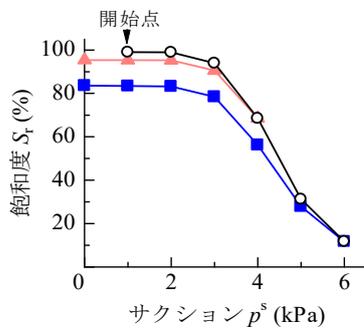
表 2 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値 (保水性試験のシミュレーションの場合)

弾塑性パラメータ		
NCL の切片	N	1.98
限界状態定数	M	1.2
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.045
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.002
ポアソン比	$\nu$	0.15
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	$m$	0.08
構造劣化指数	$a$	2.2
構造劣化指数	$b$	1.0
構造劣化指数	$c$	1.0
構造劣化指数	$c_s$	1.0
回転硬化指数	$b_r$	3.5
回転硬化限界定数	$m_b$	0.9
初期値		
初期構造の程度	$1/R_0^*$	1.0
初期間隙比	$e_0$	0.7
初期応力比	$\eta_0$	0.0
初期異方性の程度	$\zeta_0$	0.0

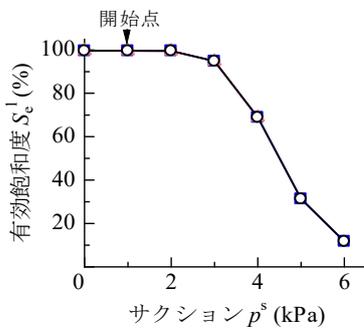
表 3 水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値 (保水性試験のシミュレーションの場合)

水分特性		
van Genuchten パラメータ $\text{kPa}^{-1}$	$\alpha$	0.23
van Genuchten パラメータ ( $m' = 1 - 1/n'$ )	$n'$	7.433
吸着水含水比 %	$w_r$	0.0
封入空気への遷移パラメータ	$\alpha^*$	1.0
連続空気への遷移パラメータ	$\mu^*$	1.0
飽和透水係数 m/s	$k_s^w$	$8.25 \times 10^{-5}$
乾燥透気係数 m/s	$k_d^a$	$4.55 \times 10^{-3}$
初期サクシオン kPa	$p_0^*$	1.0
初期自由水飽和度 %	$S_{w0}^*$	99.0
その他の物性値		
土粒子密度 $\text{g/cm}^3$	$\rho^s$	2.636
水の体積弾性係数 kPa	$K_w$	$2.19 \times 10^6$
空気の気体定数 $\text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$	$\bar{R}$	287.04
絶対温度 K	$\Theta$	293.15

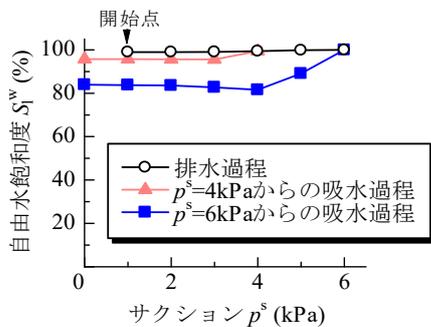
図 2 は解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。ここでは三軸円柱供試体を想定し、簡単のため軸対称性を仮定した。上下端は剛・摩擦のペDESTALの条件を表現するために節点間に束縛条件（長さ不変，角度不変）を課し<sup>7)</sup>，隅角部に変形の自由度を上げるための処理<sup>8)</sup>を施した。土骨格の構成式は弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>9)</sup>を用いた。水分特性式は，有効飽和度  $S_e^l$  に対して van Genuchten 式<sup>10)</sup>を適用し，吸排水時のヒステリシス性や間隙比依存性を考慮しない最単純のモデルを用いた。また，透水係数・透気係数には Mualem のモデル<sup>11)</sup>を用いた。表 2 は土骨格の構成式に関する材料定数と初期値を，表 3 は水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。材料定数は三河珪砂 7 号の値<sup>12)13)</sup>で代用した。なお，初期の自由水飽和度は 99%とし，自由水は初期にほぼ飽和状態であると仮定した。また，重力は考慮しないで解析を行った。



(a) 飽和度－サクション関係



(b) 有効飽和度－サクション関係



(c) 自由水飽和度－サクション関係

図 3 各種飽和度とサクション関係の解析結果 (封入空気起因した飽和度のヒステリシス性の表現)

図 3 は各種飽和度とサクション関係の解析結果を示す。ここで，初期サクションとして 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，初期サクションを 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－サクション関係より，サクション 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－サクション関係は，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－サクション関係を見ると，まず排水過程では，初期の自由水飽和度  $S_r^w$  は 99% ( $S_e^l$  は 1%) で非常に高いため，式 (6) で示した遷移モデルより， $S_r^w$  の変化はほぼ生じない。一方で吸水過程では，サクション 4kPa の場合は有効飽和度  $S_e^l$  が約 70%であるが，サクション 6kPa の場合は  $S_e^l$  が約 10%と低いため，式(5)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へ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－サクショ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。なお，サクションは供試体上端の空気圧と下端の水圧の差を意味し，解析を終了したサクション 0kPa 時には，供試体内のサクションが完全に 0 になっているわけではない。

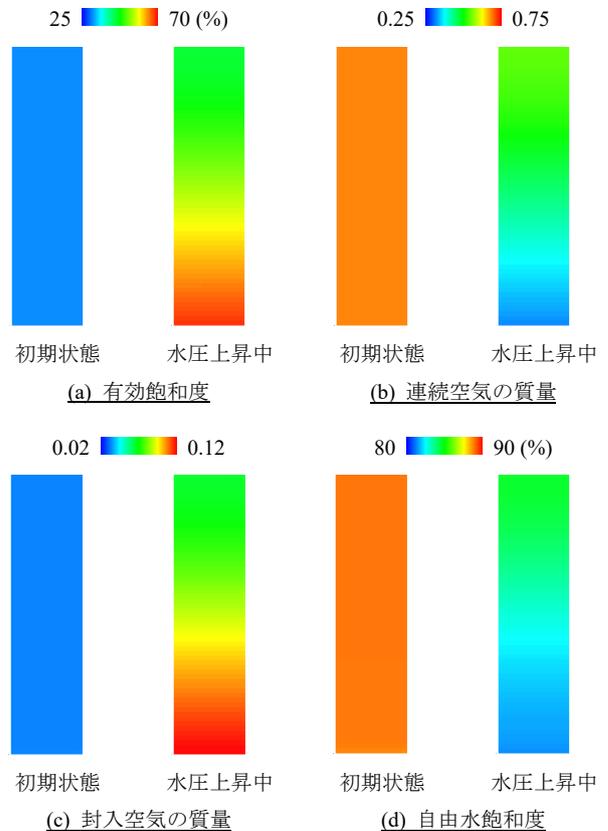


図 4 サクションを 5kPa から 4kPa へ低下させる吸水過程のカウンター図 (吸水に伴い連続空気が封入空気へ遷移する様子)

図4はサクシオンを5kPaから4kPaへ低下させる吸水過程のコンター図を示す。供試体下端の水圧を上昇（サクシオンを減少）させると、供試体下端から有効飽和度が上昇し、連続空気が封入空気に遷移している。また、連続空気が自由水に封入されたため、自由水飽和度が低下していることもわかる。なお、連続空気および封入空気の質量は、大気圧下にある空気が初期有効間隙を満たしていると考えたときの質量に対する無次元量で示した。

5.2 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<sup>14)</sup>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、サクシオン20kPaの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論文ではシミュレートした。表4は土骨格の構成式に関する材料定数と初期値を、表5は水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。材料定数は既往研究<sup>15)</sup>で同定したDLクレイの値を参考に決定した。

図5は実験結果と解析結果の比較を示す。5.1節と同様に、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。まず既往の三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。

表4 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値 (非排気非排水せん断試験のシミュレーションの場合)

弾塑性パラメータ		
NCLの切片	N	2.04
限界状態定数	M	1.23
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.05
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.01
ポアソン比	$\nu$	0.3
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	1.3
構造劣化指数	a	1.0
構造劣化指数	b	1.0
構造劣化指数	c	1.0
構造劣化指数	$c_s$	0.8
回転硬化指数	$b_r$	0.0
初期値		
初期構造の程度	$1/R^*_0$	5.0
初期過圧密比	$1/R_0$	2.5
初期応力比	$\eta_0$	0.0
初期異方性の程度	$\zeta_0$	0.0

表5 水分特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値 (非排気非排水せん断試験のシミュレーションの場合)

水分特性			
van Genuchten パラメータ	$kPa^{-1}$	$\alpha$	0.15
van Genuchten パラメータ		$n'$	1.8
( $m' = 1 - 1/n'$ )		$w_i$	5.0
吸着含水比 %		$\alpha^*$	2.9
封入空気への遷移パラメータ		$\mu^*$	1.0
連続空気への遷移パラメータ		$k_s^w$	$6.68 \times 10^{-7}$
飽和透水係数 m/s		$k_d^a$	$3.68 \times 10^{-5}$
乾燥透気係数 m/s		$p_0^*$	-20.0
初期サクシオン kPa		$S_{w0}^*$	99.0
初期自由水飽和度 %			
その他の物性値			
土粒子密度 $g/cm^3$		$\rho^s$	2.65
水の体積弾性係数 kPa		$K_w$	$2.19 \times 10^6$
空気の気体定数 $m^2/s^2/K$		$\bar{R}$	287.04
絶対温度 K		$\Theta$	293.15

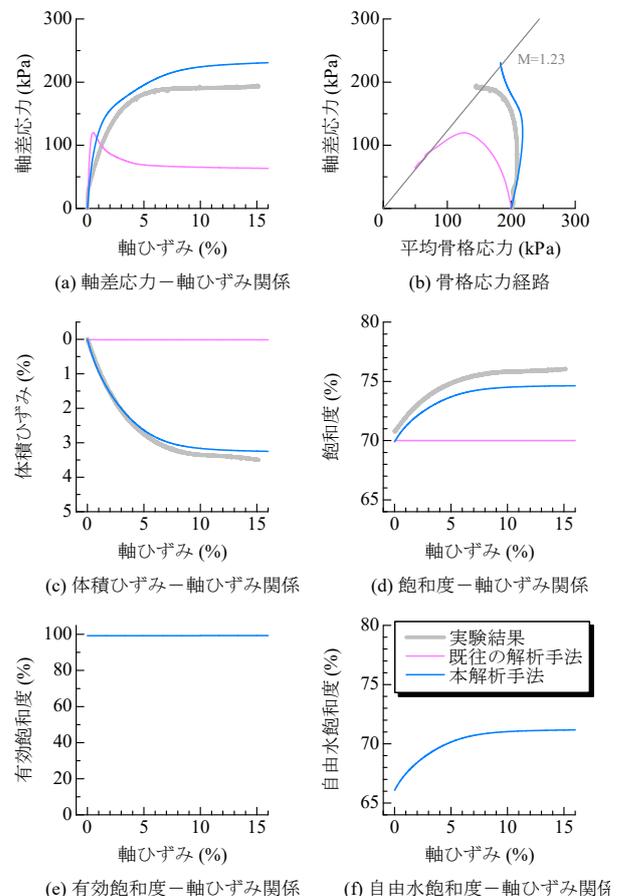


図5 非排気非排水せん断試験の実験結果(5)と解析結果の比較 (サクシオン0kPaにおける飽和度上昇の表現)

6. おわりに

本研究では新たな有効飽和度を定義し、その有効飽和度に基づいた土骨格～自由水～封入空気～連続空気連成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た点が大きな特徴であり、低サクシオン時には封入空気の圧縮/膨張により飽和度変化が表現可能なこと、高サクシオン時には吸着水量を含水比で定義できるため、複雑なモデルを要しないことを強調した。また、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。

封入空気は土粒子間の拘束を強める表面張力 (サクシオン) としては働かないため、間隙空気を封入空気と連続空気に分けて扱うことは、より精緻な構成モデルを構築する上でも重要であると考えられる。また、近年、不飽和化による地盤改良がもたらす耐震効果に注目が集まっているが、封入空気の圧縮性を表現可能であり、動的にも対応した本解析コードを用いれば、詳細な耐震性評価が可能となる。ただし、本論文では封入空気の圧力は自由水の圧力に等しいと仮定しているため、特にマイクロバブル・ナノバブルのように気泡径が小さい封入空気を扱う場合は注意が必要である。

## 謝辞

JSPS 科研費 17H01289 と 17K14720 の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) de Boer, R.: Theory of porous media -past and present-, *Z. Angew. Math. Mech.*, 78, 441-446, 1998.
- 2) 西村直志: (社)地盤工学会 地盤工学ハンドブック, 第3章土質力学, 55-64, 1999.
- 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790, 2008.
- 4) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62, 2015.
- 5) Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (eds. by Tarantino, A. and Mancuso, C.), Balkema, 139-153, 2000.
- 6) 高津裕斗, 肥後陽介, 澤田茉伊, 木戸隆之祐, 南野佑貴, 田中麻穂: マイクロ X 線 CT を用いた排水・吸水履歴による砂の不飽和化実験, 第50回地盤工学研究発表会, 703-704, 2015.
- 7) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K.: Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, *Soils and Foundations*, 38(4), 173-181, 1998.
- 8) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, 34(1), 91-106, 1994.
- 9) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57, 2002.
- 10) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898, 1980.
- 11) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.
- 12) 谷和夫, 松下克也, 橋本隆雄, 山本彰, 竹内秀克, 野田利弘, 規矩大義, 大林淳, 清田隆: 浅層盤状改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価, *地盤工学ジャーナル*, 9(4), 533-553, 2014.
- 13) 杉井俊夫, 山田公夫, 奥村恭: 高飽和時における砂の不飽和透水係数に関する考察, 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.
- 14) 小高猛司, 鈴木宏尚, 岡二三生: 排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験, 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.
- 15) Yoshikawa, T., Noda, T. and Kodaka, T.: Effects of air coupling on triaxial shearing behavior of unsaturated silty specimens under constant confining pressure and various drained and exhausted conditions, *Soils and Foundations*, 55(6), 1372-1387, 2015.