

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14720

研究課題名(和文) 有効飽和度で記述する三相連成有限変形解析手法の開発と不飽和三軸試験によるその検証

研究課題名(英文) Development of a three-phase coupled finite deformation analysis method based on effective saturation degree and validation by unsaturated triaxial test

研究代表者

吉川 高広 (Yoshikawa, Takahiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20771075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：土粒子と水だけでなく空気も含む「不飽和土」の力学挙動を把握する上で、土の保水性を表す「水分特性」を精緻に把握する必要がある。本研究では、土中の空気を「封入空気」と連続した相として存在する「連続空気」に、土中の水を「吸着水」と「自由水」に明確に分けて扱うことで、より実態に即した水分特性モデルを提案し、それに基づいた不飽和土の新たな変形解析手法を開発した。また、本解析手法の妥当性を確認するために、力学試験とその数値シミュレーションを行い、既往の解析手法では表現不可能な「封入空気の圧縮性」と「封入空気存在に起因した水分特性の吸排水時のヒステリシス性」の表現に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「封入空気の圧縮性」を表現可能になったことで、動的にも対応した本解析コードを用いれば、近年注目を集める不飽和化による地盤改良がもたらす耐震効果の評価も可能となる。また、「封入空気存在に起因した水分特性の吸排水時のヒステリシス性」を表現可能になったことで、降雨と乾燥の繰返し履歴を受ける不飽和土の力学挙動をより精緻に把握でき、豪雨による地盤・土構造物の性能評価をより精度良く行うことが可能となる。

研究成果の概要(英文)：In order to comprehend the mechanical behavior of unsaturated soil, which consists of not only soil particle and water but also air, it is necessary to comprehend the soil water characteristic. In this study, a new soil water characteristic model based on actual condition of pore water and air was proposed: pore air was divided into trapped air and continuous air, and pore water was divided into adsorbed water and free water. Incorporating the soil water characteristic model, a new deformation analysis method of unsaturated soil was developed. Next, in order to validate the analysis method, mechanical tests and their numerical simulations were conducted. As a result, the analysis method succeeded in expressing the compressibility of trapped air and hysteresis during water absorption and drainage caused by the existence of trapped air which cannot be expressed by the past analysis method.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 水分特性 封入空気 変形解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨や地震による地盤・土構造物の被害が相次ぎ、このことを受けて、飽和・不飽和両状態にある土に対し、浸透時のみ・破壊時のみのように対象を限定することなく、静的・動的の外力形態を問わず、変形から破壊までを扱う地盤力学体系およびその数値解析手法の構築が強く期待されている。

このような背景から、これまでに飽和・不飽和/静的・動的/有限変形解析手法の開発が行われている。しかし、既往の空気～水～土骨格三相系連成解析に用いられる連続式は、飽和度100%の完全飽和状態から飽和度0%の絶対乾燥状態までの範囲で記述されている一方で、水分特性式は、気泡状態の空気は含む見かけ上の飽和状態から、吸着水は残留する乾燥状態までの土壤水分量を記述するため、両者に不整合が生じる。

### 2. 研究の目的

本研究は、飽和と乾燥の両状態における不整合性を解消するために、「気泡」と「吸着水」の存在を考慮した「新たな有効飽和度」の考えに基づき、空気～水～土骨格三相系連成有限変形初期値境界値問題の支配方程式を再定式化し、その数値解析コードを開発することを目的とする。これは、土の実際の保水状態に整合した合理的な手法であるため、既往の解析手法では表現不可能な現象(気泡の圧縮性等)の評価も可能となる。また、不飽和三軸試験結果との比較を通じて、本解析手法の妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 新たな有効飽和度で記述する不飽和土の有限変形解析手法の開発と検証

これまでに研究代表者らが開発に携わった「飽和・不飽和/静的・動的/有限変形解析コード」(Noda and Yoshikawa, 2015)を基に、支配方程式の再定式化と数値解析手法の適用およびFortranによるコード化を行う。また、不飽和土三軸試験の数値シミュレーションを通じて、本解析コードの妥当性を確認する。

#### (2) 不飽和土三軸試験の実施

- 本解析手法は、気泡として水中に取り込まれる間隙空気(封入空気)に注目している。間隙空気を水への溶解度が高い二酸化炭素に置換した実験を行い、空気の場合と比較することで、土供試体中の封入空気量の把握を試みる。
- 繰返し吸排水履歴を与える三軸試験を行い、サクシオンがゼロで間隙空気が封入空気のみ状態(封入不飽和状態)における土供試体の飽和度を把握する。また、繰返し吸排水履歴を与えた土供試体の圧縮・せん断挙動を把握する。

### 4. 研究成果

#### (1) 新たな有効飽和度で記述する不飽和土の有限変形解析手法の開発

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と共に、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開発した。また、吸排水に伴い封入空気と連続空気が互いに遷移するモデルを提案して、このモデルも本解析手法に搭載した。

本解析手法は、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である。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。また、高サクシオン時には吸着水量を含水比で定義するため、連続空気の体積が増加/減少しても飽和度が自動的に変化可能である。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り、複雑なモデルを要する。

#### (2) 封入飽和状態における非排気・非排水せん断試験の数値シミュレーション

小高ら(2006)の非塑性シルト(DLクレイ)を用いて実施されたサクシオンがゼロ(封入飽和状態)における非排気・非排水せん断試験を参照して、その数値シミュレーションを行った。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、サクシオンがゼロにおける非排気・非排水せん断試験をシミュレ

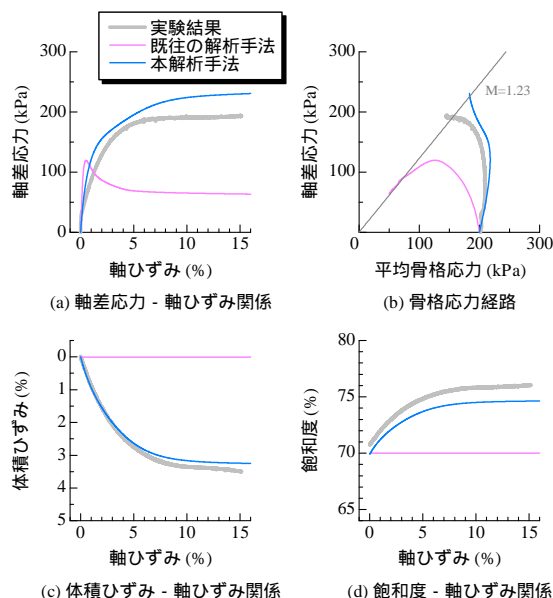


図1 非排気・非排水せん断試験の実験結果と計算結果の比較(封入不飽和状態における飽和度上昇の表現)

トした。図 1 は実験結果と計算結果の比較を示す。まず既往の三相系解析手法を用いた場合、サクシオンがゼロ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、封入空気が圧縮するため、飽和度上昇を表現できる。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。

### (3) 二酸化炭素を用いた三軸試験による不飽和土中の封入空気量の把握

連続空気と封入空気存在量を把握することを目的として、間隙空気を水への高い溶解性を持つ二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) に置き換えた実験を行った。間隙水に封入された間隙 CO<sub>2</sub> が完全溶解すると仮定し、空気の場合と比較することで、封入空気量を把握できると考えた。まず、CO<sub>2</sub> を用いる場合のサクシオン変化時の排気条件について検討を行った。その結果、非排気条件下でサクシオンを作用させることにより、供試体に元から存在していた CO<sub>2</sub> のみを間隙水に溶解させ、飽和度が高くなることを示した。次に、検討した実験条件に基づいて保水性試験を行った結果、CO<sub>2</sub> を用いた場合には、封入空気として存在するはずの CO<sub>2</sub> が間隙水に溶解し、供試体の飽和度がより高くなることを示した。

しかし、CO<sub>2</sub> の溶解速度の遅さやゴムスリーブ透過の可能性なども考慮して、より詳細に試験時間を決める必要があり、課題も残った。

### (4) 繰返し吸排水履歴に関する三軸試験とその数値シミュレーション

封入不飽和状態における土供試体の飽和度の把握を目的として、繰返し吸排水履歴に関する三軸試験とその数値シミュレーションを行った。

実験に用いた土試料は非塑性シルト (DL クレイ) である。繰返し吸排水履歴に関する実験を 2 種類実施した。(A) 同じサクシオンで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である。(A) では、サクシオンを 0 と 30kPa の間で吸排水を 2 回繰返す試験を実施した。(B) では、背圧上昇させて、実験 (A) の場合より飽和度を高めた後で、サクシオンを 0→20→0→25→0→30→0kPa と排水時のサクシオンを段階的に上昇させて吸排水を 3 回繰返す試験を実施した。

(A) 同じサクシオンを繰返す吸排水試験について、図 2 は実験結果と計算結果の比較を示す。有効飽和度～サクシオン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～サクシオン関係のヒステリシス性を表現可能であることがわかった。

(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について、図 3 は実験結果と計算結果の比較を示す。まず背圧上昇過程において、サクシオン 0kPa での飽和度上昇を封入空気の圧縮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返すと、サクシオン 0kPa 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様子が再現できている。

最後に (B) について、図 4 は背圧上昇過程後および吸排水過程を 3 回繰返した後に行ったサクシオン 0kPa で非排気・非排水せん断試験の実験結果と計算結果の比較を示す。吸排水履歴が異なる非排気・非排水せん断挙動の特徴を捉えられている。特に背圧上昇過程後に吸排水過程を繰返さない場合の骨格応力経路では、限界状態線 ( $q = Mp'$ ) 下側での軟化挙動をよく表現できている。

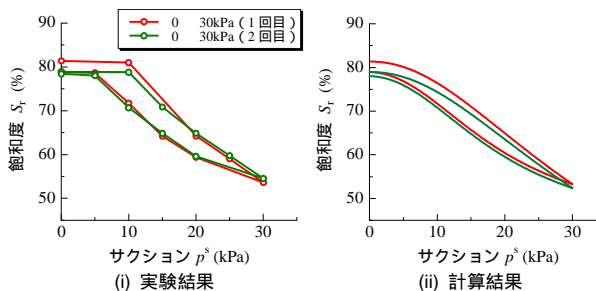


図 2 (A) 同じサクシオンで繰返す吸排水試験 (飽和度～サクシオン関係のヒステリシス性の表現)

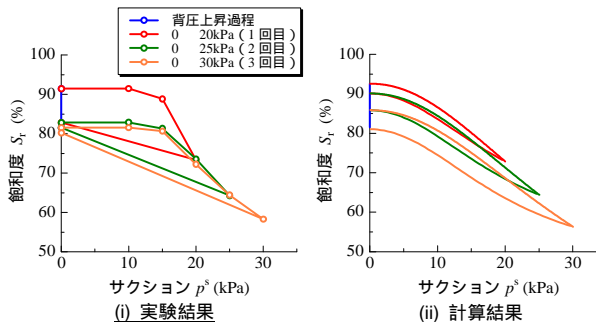


図 3 (B) 段階的にサクシオンを上昇させて繰返す吸排水試験 (繰返し吸排水に伴い間隙水に空気が封入されていく様子の表現)

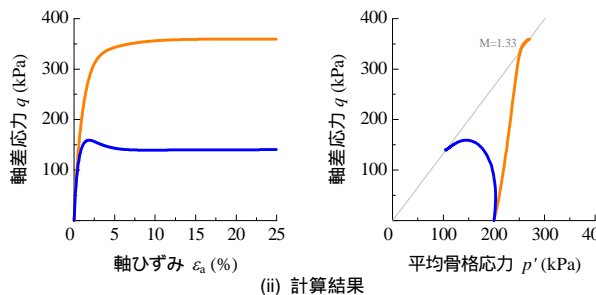
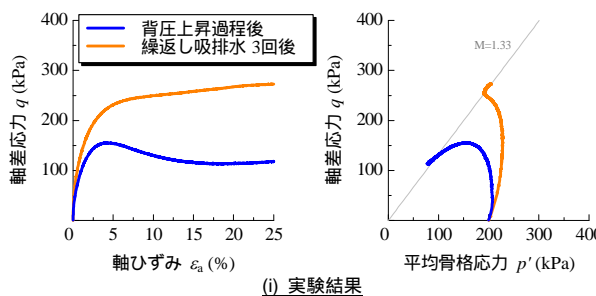


図 4 (B) の非排気・非排水せん断試験 (限界状態線下側での軟化と硬化の違いを表現)

## <引用文献>

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, Vol. 55, No. 1, pp. 45-62, 2015.

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.

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計9件)

吉川高広, 野田利弘, 中澤一真: 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, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.

野田利弘, 吉川高広, 中澤一真: 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, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.

Yoshikawa, T. and Noda, T.: Numerical simulation of unsaturated soil triaxial test based on a soil-water-air coupled analysis incorporating a void ratio-dependent SWC model, COUPLED PROBLEMS 2019.

吉川高広, 野田利弘, 中澤一真: 封入空気を考慮可能な水分特性モデルによる繰返し吸排水三軸試験の数値シミュレーション, 第 24 回計算工学講演会, 2019.

吉川高広, 野田利弘, 西垣隆士: 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, 第 30 回中部地盤工学シンポジウム, pp. 13-18, 2018.

<<http://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/2018/07/s3013.pdf>>

中澤一真, 吉川高広, 野田利弘, 中井健太郎, 西垣隆士, 岡田知也: 二酸化炭素を用いた三軸試験による不飽和土中の封入空気量の把握, 第 30 回中部地盤工学シンポジウム, pp. 19-22, 2018. <<http://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/2018/07/s3014.pdf>>

吉川高広, 野田利弘, 西垣隆士: 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, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp. 727-728, 2018.

野田利弘, 吉川高広, 西垣隆士: 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提案, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp. 725-726, 2018.

中澤一真, 吉川高広, 野田利弘, 中井健太郎, 西垣隆士, 岡田知也: 土中の間隙水に封入された間隙空気量計測のための不飽和三軸試験, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp. 709-710, 2018.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。