

令和 3 年 5 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23534

研究課題名(和文) 間隙流体のミクロな特性解明による不飽和土のマクロな応答の解釈

研究課題名(英文) interpretation of macroscopic response of partially saturated soil by clarifying microscopic characteristics of pore fluids

研究代表者

木戸 隆之祐 (Kido, Ryunosuke)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：40847365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：土粒子・水・空気の三相からなる不飽和土のマクロな応答に対する、三相ミクロ構造の影響について、X線CTと画像解析を用いて検討した。その結果、不飽和土のせん断変形時には土粒子間に存在する液架橋の数が減少することがわかった。この時、変形する際にサクションが減少する非排水条件では、サクションが一定である排水条件よりも液架橋の数がより多く減ることがわかり、結果として軸差応力が低下することが明らかとなった。また、空気圧が大気圧に保たれる場合に比べ、空気圧が変化する非排気条件の場合には、より脆的な挙動になることを示唆する結果を得た。非排気条件での挙動の妥当性に関しては検討の余地がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで不飽和土の変形・破壊メカニズムを、軸差応力の大小や供試体の変形モードといったマクロな視点から検討する研究はあったものの、そのようなマクロな応答を司るミクロな挙動の解明に着目し、異なるスケールの挙動のリンクさせる研究は世界的に見ても例がなく、学術的な意義は大きい。道路や斜面などの不飽和土構造物の設計、施工においては、不飽和土の強度や剛性を事前に評価することが重要である。本研究の研究成果は、不飽和土の強度・変形特性が土の含水状態や変形条件によって異なるメカニズムを解釈し、実際にどういった実験条件を設定し強度評価すればよいかの参考となる点で、社会的意義は大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：The effect of the three-phase microstructure on the macroscopic response of an unsaturated soil consisting of soil particles, water and air was investigated using X-ray CT and image analysis.

The results showed that the number of liquid bridges between soil particles decreased during shear deformation of partially saturated soil. In the undrained condition for water where the suction decreases during deformation, the number of liquid bridges decreases more than in the drained condition for water, where the suction remains constant, resulting in a decrease in the axial differential stress.

The results also suggest that the behavior is more brittle in the undrained condition for air compared to the case where the air pressure is kept at atmospheric pressure. On the other hand, the validity of the behavior under undrained condition for air remains to be examined.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 間隙水 間隙空気 X線CT 画像解析 排水条件 排気条件 軸差応力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

道路や鉄道の土構造物は、土を締め固めて築造され、その多くは土粒子の隙間（間隙）に水と空気が混在する「不飽和土」として存在する。土構造物は降雨等の自然災害に対して力学的に安定である必要があり、そのためには不飽和土の強度・変形特性の把握が重要である。不飽和土は、水の表面張力により土粒子間に「液架橋」を形成し、粒子間結合力として「サクシオン（空気圧と水圧の差）」が作用するため強度・剛性が高まるが、明瞭なせん断帯を伴い脆性破壊する。このような不飽和土のマクロな力学挙動は、構成要素である土粒子・水・空気のミクロな相互作用に依存するが、従来研究では三軸圧縮試験といった要素試験でマクロな応力-ひずみ関係を観察する事例が殆どで、ミクロスケールの挙動とマクロな力学挙動との関係性の解明は不十分である。不飽和土中の間隙流体（水・空気）の存在形態は両相の体積割合によって異なり、サクシオンがマクロな強度・剛性へ与える効果は各形態で異なると考えられている。一方、不飽和土の変形中に「間隙流体の体積や存在形態、空間的な分布がどのように変化するか」は、従来の手法では解明が難しく、上記のサクシオンの効果を説明できる十分な科学的根拠は得られていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は「間隙流体のミクロな特性の解明による不飽和土のマクロな強度特性の解釈」である。これを実現すべく、X線CTと画像解析を不飽和土の要素試験に適用する。

3. 研究の方法

不飽和土が変形しせん断面が生じると、主としてその内部での土粒子構造や間隙流体の体積、存在形態等の変化がマクロな応答を支配する。そこで、マクロな応力-ひずみ関係を観察する「三軸圧縮試験」に「X線CT」を適用し、せん断面の発達に伴う三相ミクロ構造変化を可視化する。この時、不飽和土のマクロな応答が供試体の初期飽和度、初期サクシオン、排気条件、排水条件によって異なると考えられる。そこで本研究では、「排気-排水条件」、「排気-非排水条件」、「非排気-非排水条件」の3条件において初期飽和度を変化させた試験を行う。せん断中の間隙流体の体積や存在形態はMorphology解析(図1)、水-空気接触面の曲率を曲率解析(図2)でそれぞれ明らかにし、試験条件ごとにそれらの特徴を整理する。

この試験では、間隙流体のミクロな特性を調べる画像解析が核となる。それに耐え得る高解像度のCT画像を得るため、粒径が大きく均一な珪砂を用いて試験を実施する。加えて、淀川砂を使用し、珪砂の結果と併せて考察することで、ミクロな特性とマクロな応答の妥当性を検証する。

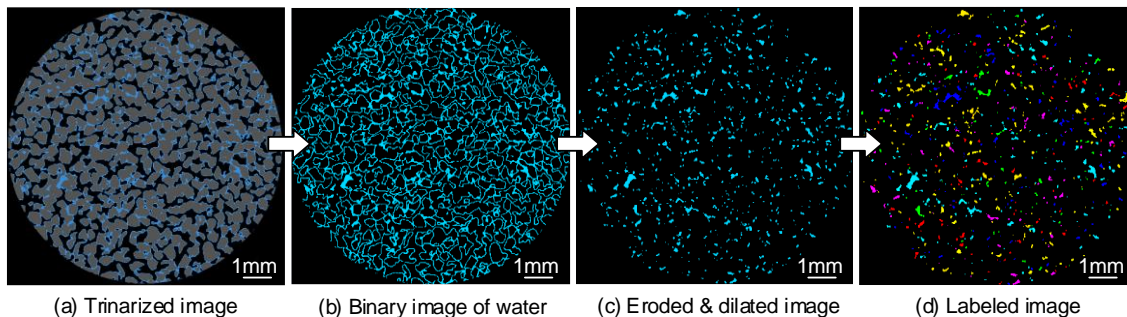


図1 Morphology解析の流れ

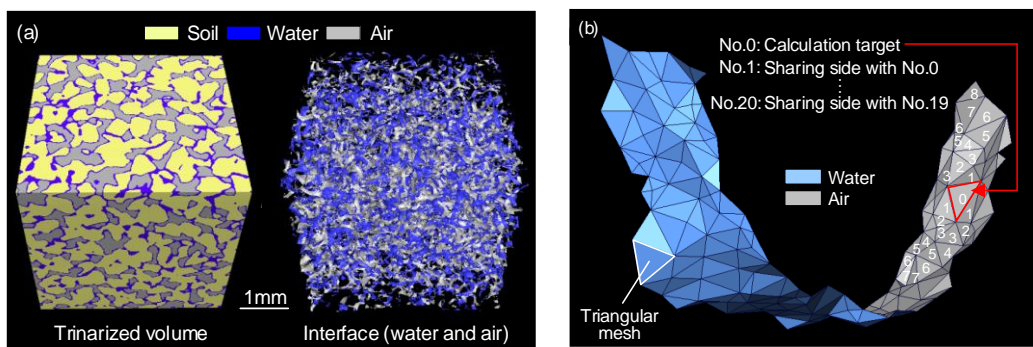


図2 曲率解析の概要：(a)三値化画像から水-空気接触面を抽出，(b)接触面の要素分割

4. 研究成果

図3に軸差応力の変化を示す。図には、排水条件（CS条件）、非排水条件（CW条件）の結果を記載している。初期飽和度が高い場合、珪砂と淀川砂ともにピーク応力は排水条件・非排水条件で同等となり、残留応力は排水条件の方が高くなる。一方、初期飽和度が低い場合、ピーク応力も残留応力も排水条件の方が高くなる。この原因について、以下に述べるミクロな特性に着目して考察する。

図4に液架橋の数の変化を示す。この図は、画像解析領域における間隙水の全体積に対する液架橋の数の割合であり、単位体積当たりの液架橋の割合を意味する。非排水条件の方が、排水条件よりも液架橋の数がより減少しやすい傾向があり、この傾向は初期飽和度によらないことがわかった。また図5に水-空気接触面の曲率の変化を示す。排水条件では曲率一定でせん断が進むが、非排水条件では曲率が減少することが明らかとなった。

不飽和土のミクロな特性とマクロな応答との関係について、図6に初期飽和度が高い場合の関係を、図7に初期飽和度が低い場合の関係をそれぞれ示す。初期飽和度が高い場合、せん断初期には液架橋の割合が少なく、サクシオンが有効応力として働くバルク水が存在するため、排水条件・非排水条件でピーク応力は同等となる。一方、せん断が進行すると液架橋の割合が増え、粒子間結合力の上昇に寄与する効果が大きくなるが、非排水条件では排水条件よりも曲率と液架橋の数がより大きく減少するため、粒子間結合力の寄与が小さくなり、結果として非排水条件における残留応力の低下につながるということがわかった。一方、初期飽和度が低い場合、せん断初期からバルク水がなく液架橋のみが存在するため、粒子間結合力として強度・剛性を高めるサクシオンの効果が高い。非排水条件では、前述の通り曲率も液架橋の数もより多く減少するために、非排水条件においてピーク応力・残留応力がともに低くなるということがわかった。

今回得たデータにおいて間隙空気は連続性が高い状態であり、せん断中にこの状態からあまり変化しないことを確認している。よって、今回のデータでは間隙空気よりも間隙水の存在形態の変化が力学特性に与える影響が大きいと考えられる。間隙空気が気泡として存在するような封入不飽和状態で供試体を作製し、同様の実験を行うことで、間隙空気の連続性の変化が不飽和土のマクロな応答に与える影響を検討することが今後の検討項目の1つである。

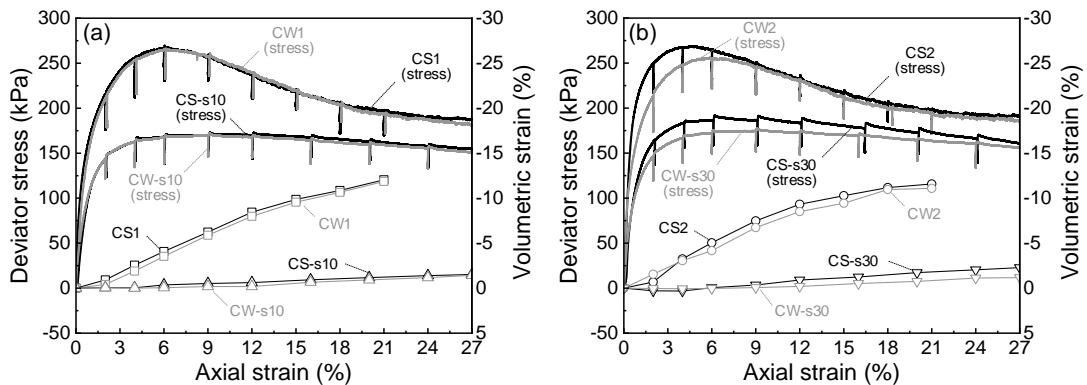


図3 軸差応力-軸ひずみ関係：(a) 初期飽和度が高い場合、(b) 初期飽和度が低い場合

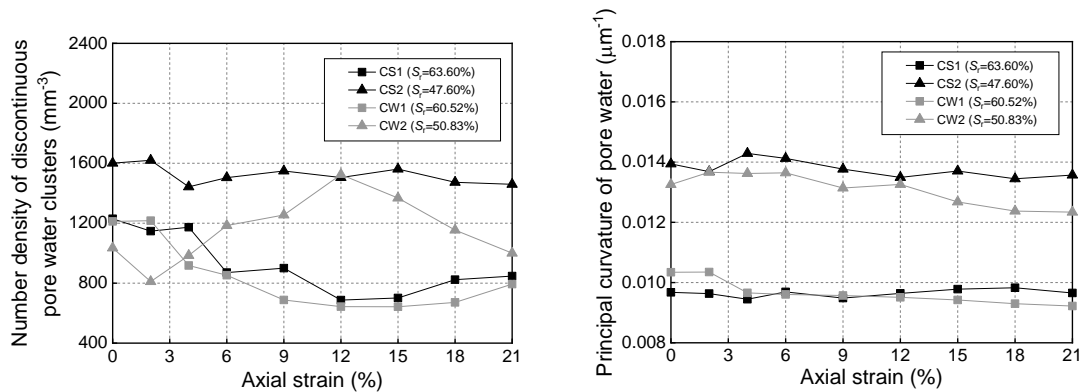


図4 液架橋の数の変化

図5 水-空気接触面の曲率の変化

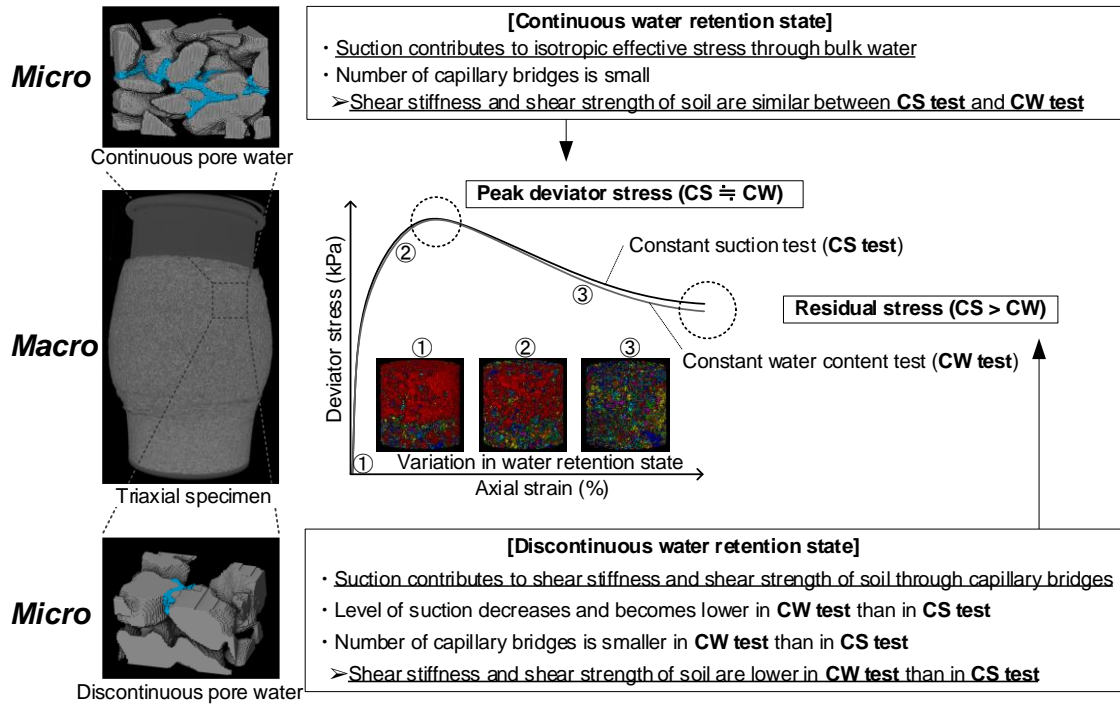


図6 間隙水の微視的特性とマクロな応答との関係（初期飽和度が高い場合）

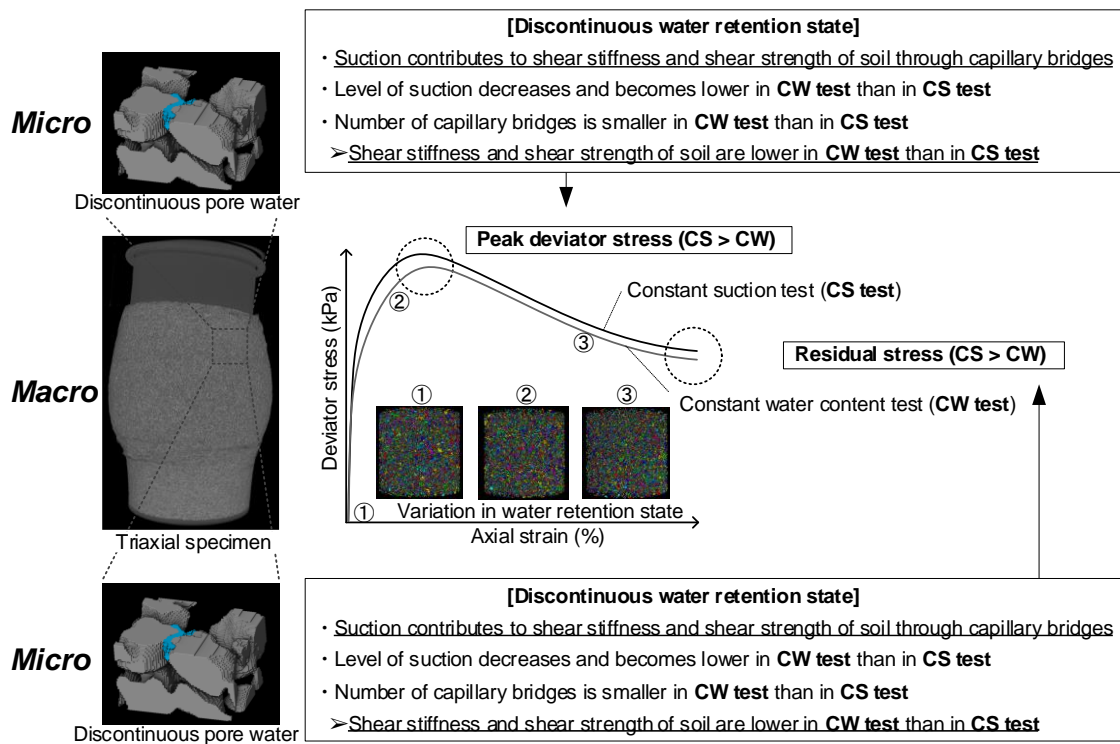


図7 間隙水の微視的特性とマクロな応答との関係（初期飽和度が低い場合）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kido, R., Higo, Y., Takamura, F., Morishita, R., Khaddour, G. and Salager, S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Morphological transitions for pore water and pore air during drying and wetting processes in partially saturated sand	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11440-020-00939-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kido Ryunosuke, Higo Yosuke	4. 巻 7
2. 論文標題 Distribution changes of grain contacts and menisci in shear band during triaxial compression test for unsaturated sand	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 627 ~ 635
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgssp.v07.096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kido Ryunosuke, Higo Yosuke	4. 巻 15
2. 論文標題 Microscopic characteristics of partially saturated dense sand and their link to macroscopic responses under triaxial compression conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 3055 ~ 3073
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11440-020-01049-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kido, R, Higo, Y, Fukushima, Y
2. 発表標題 Microscopic observation of variation in pore volume and local degree of saturation in partially saturated sand under triaxial compression using voronoi tessellation
3. 学会等名 9th Asian Young Geotechnical Engineers Conference (9AYGEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kido, R, Higo, Y, Takamura, F
2. 発表標題 Investigation of volume distribution for pore water and pore air in partially saturated sand subjected to drying and wetting through morphological image processing
3. 学会等名 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kido, R. and Higo, Y.
2. 発表標題 X-ray image processing to investigate variation in water retention state of partially saturated sand during triaxial compression tests
3. 学会等名 International Conference on Tomography of Materials and Structures2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 微視的特性と巨視的応答の関係に基づく不飽和砂の三軸圧縮試験条件の分類
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木戸隆之祐, 肥後陽介, 福島 陽
2. 発表標題 三軸圧縮下における不飽和砂の軸差応力へ及ぼす微視的特性の影響の解釈
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 三軸圧縮条件における低飽和砂のミクロ構造変化とマクロな応答との関係
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関