

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14825

研究課題名（和文）不飽和土内の液架橋分布が強度・変形特性に与える影響の解明と構成モデルの構築

研究課題名（英文）Clarification of influence of liquid bridge distribution in unsaturated soil on strength/deformation characteristics and establish of a constitutive model

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：不飽和三軸供試体（初期状態の直径35mm、高さ70mm）全体を、土粒子・水・空気の三相が識別可能な高解像度で観察した。その結果、せん断帯の発達に伴い、供試体中央から上部で顕著な体積膨張と飽和度の低下が生じるが、供試体下部では幾何学変化が極めて小さいことがわかった。また、液架橋やバルク水の分類と、土粒子の変位に伴う間隙水の存在形態変化を特定する画像解析アルゴリズムを構築し、初期飽和度が低い不飽和三軸試験で得たCT画像に適用した。その結果、間隙水の存在形態変化の割合は1)液架橋が消失、2)液架橋のまま、3)液架橋がバルク水へ遷移の順に高く、液架橋の減少が軸差応力の低下と対応することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の背景には、道路盛土など部分的に水で飽和した不飽和土構造物がなぜ、どのように変形し破壊に至るかを厳密に解釈し、土構造物の強度を適切に評価する方法の確立、ひいては力学的により安定な土構造物の設計・施工を実現するという社会的意義がある。不飽和土の力学的安定性を支配する重要な因子は、小さな土粒子間に表面張力によって架橋構造を成す、さらに小さな体積の間隙水（液架橋）の数や分布の変化であるが、このようなミクロスケール挙動の変化が土のマクロな応答に与える影響は検証された事例は世界的に見ても本研究以外になく、学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The entire unsaturated triaxial specimen (35 mm in diameter and 70 mm in height in its initial state) was observed at high resolution, allowing the three phases of soil particles, water, and air to be distinguished. The results show that there is significant volume expansion and saturation reduction from the center to the top of the specimen, while the geometrical changes in the lower part of the specimen are very small. An image analysis algorithm was developed to classify liquid bridges and bulk water and to identify changes in morphological transition of pore water with soil particle displacement, and was applied to CT images obtained in unsaturated triaxial tests with low initial saturation. The results show that the percentage of change in porewater morphology is higher in the order of 1) liquid bridge disappears, 2) liquid bridge remains, and 3) liquid bridges transition to bulk water, and that a decrease in liquid bridges corresponds to a decrease in deviator stress.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 液架橋 バルク水 排気条件 排水条件 X線マイクロCT 画像解析

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た盛土であり、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。盛土は雨水の浸潤や乾湿履歴によって劣化するため、長期的な供用には盛土の安定性を高精度で予測する手法が必要である。そのためにはまず、不飽和土の基本的な強度・変形特性を把握すること、そして不飽和土の力学挙動を適切に表現する構成モデルの構築が重要である。

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(図1)、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、不飽和土は高い強度・剛性を示す。一方、不飽和土は水の浸透により浸水コラプスと呼ばれる変形挙動を示すこと、飽和土よりも顕著なひずみの局所化を示すこと等が知られている。その主な原因は、密度や飽和度の変化に伴うサクシオンの消失だと考えられており、サクシオンは強度・剛性に与える重要なパラメータとして不飽和土の構成モデルに組み込まれている。一方、同じ土粒子構造において異なる数の液架橋が存在する場合(図1)、サクシオンが同じでも液架橋が少ないほど土骨格は不安定になる。つまり、不飽和土のマクロな強度・変形特性は、密度や飽和度の変化に伴うサクシオンの消失だけでなく、液架橋の分布変化にも依存すると考えられる。しかし、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-ひずみ関係とサクシオンの関係を観察した事例が殆どである。そのため、不飽和土内部の液架橋の分布がせん断変形中にどのように変化し、マクロな強度・変形特性にどのような影響を与えるのかを解明し、液架橋の分布変化を考慮した構成モデルを確立すれば、不飽和土の変形や強度変化をより厳密に予測し、土構造物の強度評価や設計に役立てることが可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、液架橋の分布とマクロな力学特性との関係の解明、およびそれを記述する新たな不飽和土の構成モデルの構築である。新型コロナウイルスの感染拡大により実験環境の整備が滞ったため、構成モデル構築は困難な状況となったため、不飽和砂のせん断変形に伴う液架橋の分布変化や水分保持状態の変化を過去の検討より厳密に評価し、応力ひずみ関係に与える影響を明らかにすることに焦点を置いた。

3. 研究の方法

液架橋の分布変化を明らかにするためには、不飽和砂中に存在する間隙水の存在形態を分類する必要がある。一般に、不飽和砂の間隙水は液架橋かバルク水に分類することができ、前者は2つの土粒子間に架橋する水、後者は3つ以上の土粒子に接触する間隙水と定義することができる。本研究ではこの定義に基づき、画像解析によってその特定を行う。間隙水が接触している土粒子の数を配位数と定義する。例えば図2の二次元断面において、間隙水クラスターW1は土粒子S5、S6と接触しているため配位数2、間隙水クラスターW4は土粒子S1、S3、S7と接触しているため配位数3となる。三次元的に検索した結果、間隙水クラスターW1の配位数が2であれば、間隙水クラスターW1は液架橋と判断できる。つぎに、変形前後の土粒子の移動を特定した後、特定された土粒子に接触する間隙水の配位数変化を調べることで、せん断変形による間隙水の存在形態変化の特定を行った。

4. 研究成果

排気-排水条件の不飽和砂三軸圧縮試験(以下、Case DW)および排気-非排水条件の不飽和砂三軸圧縮試験(以下、Case UW)の2種類で得られたLocal tomographyの三値化画像を使用した。解析領域における初期飽和度はCase DWが35.3%、Case UWが43.1%であり、双方のケースとも間隙水の連続性が低く液架橋が多く存在する状態である。図2に間隙水のクラスター割合と配位数の関係を示す。いずれの軸ひずみでも配位数2、3、1の順にクラスター数の割合が多く、液架橋として存在している間隙水が最も多いことが分かる。また、配位数2のクラスター数の変化についてCase DW(図2a)では増加、Case UW(図2b)では減少が見られる。一方、配位数3のクラスター数の変化についてCase DWでは減少、Case UWでは増加が見られる。図3に軸ひずみ変化に伴うクラスター割合の変化を各配位数の間隙水で求めた結果を示す。図3bに着目すると、軸ひずみが0~2%のときには減少、2~12%のときには増加、12%以降ではほとんど変化がみられない。同じ軸ひずみでその他の配位数(図3c~f)での割合の変化に着目すると、上述した傾向とは概ね逆の傾向を示していることがわかる。つまり、液架橋が増減するとき他の配位数の水も連動して数が減増することを意味する。液架橋の増加時は他の水からの分離からの生成、減少時は他の水との結合による消失を意味し、生成と消失を繰り返しながらせん断が行

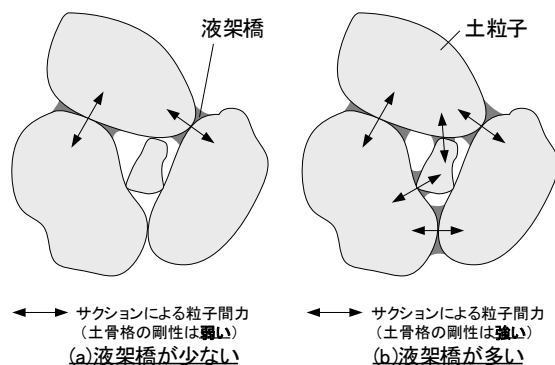


図1 土骨格の剛性に対する液架橋の数の影響

われていることを裏付けている。

つぎに、せん断変形に伴う間隙水の存在形態変化を画像解析によって調べた。図4には、画像解析により特定した2粒子とそれらに接触する液架橋が液架橋のまま変位する例を表している。このような特定を行い、a)配位数2から0(液架橋が消失)、b)配位数2から1(液架橋が吸着水や粒子のくぼみに残ると考えられる水への遷移)、c)配位数2から2(液架橋のまま)、d)配位数2から3(液架橋がバルク水へ遷移)の4パターンの変化割合を明らかにした。図5にその結果を示す。配位数が0から2, 2から0において、軸ひずみ6%以降を見ると、Case DWよりもCase UWの方が比較的变化幅が大きい。配位数が2から2となる図5cでは、その傾向がより顕著に見られ、Case UWでは急激に間隙水クラスターの割合が減少し、Case DWより明確に少なくなっていることが分かる。このことから、非排水条件の方がせん断変形による水の存在形態の変化が顕著であるといえる。

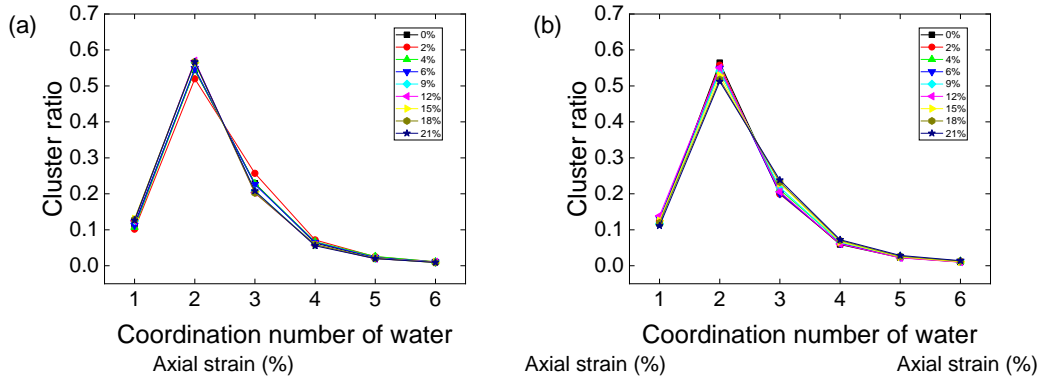


図2 間隙水のクラスター割合-軸ひずみ関係：(a) 配位数1, (b) 配位数2, (c) 配位数3, (d) 配位数4, (e) 配位数5, (f) 配位数6

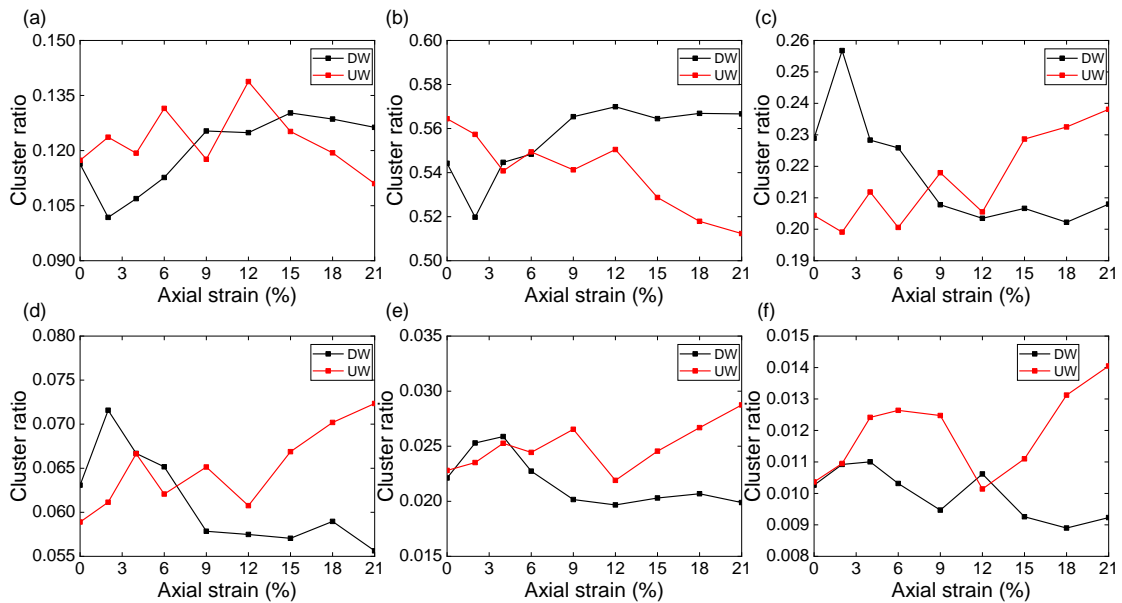


図3 間隙水のクラスター割合-軸ひずみ関係：a-fはそれぞれ配位数1-6に対応

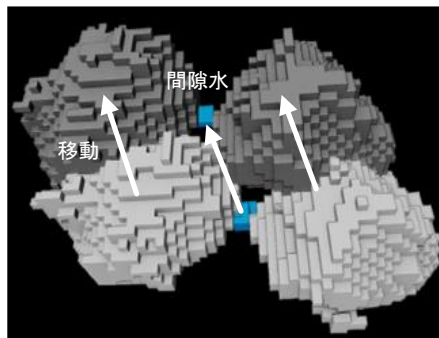


図4 変形前後の特定された土粒子と液架橋の例

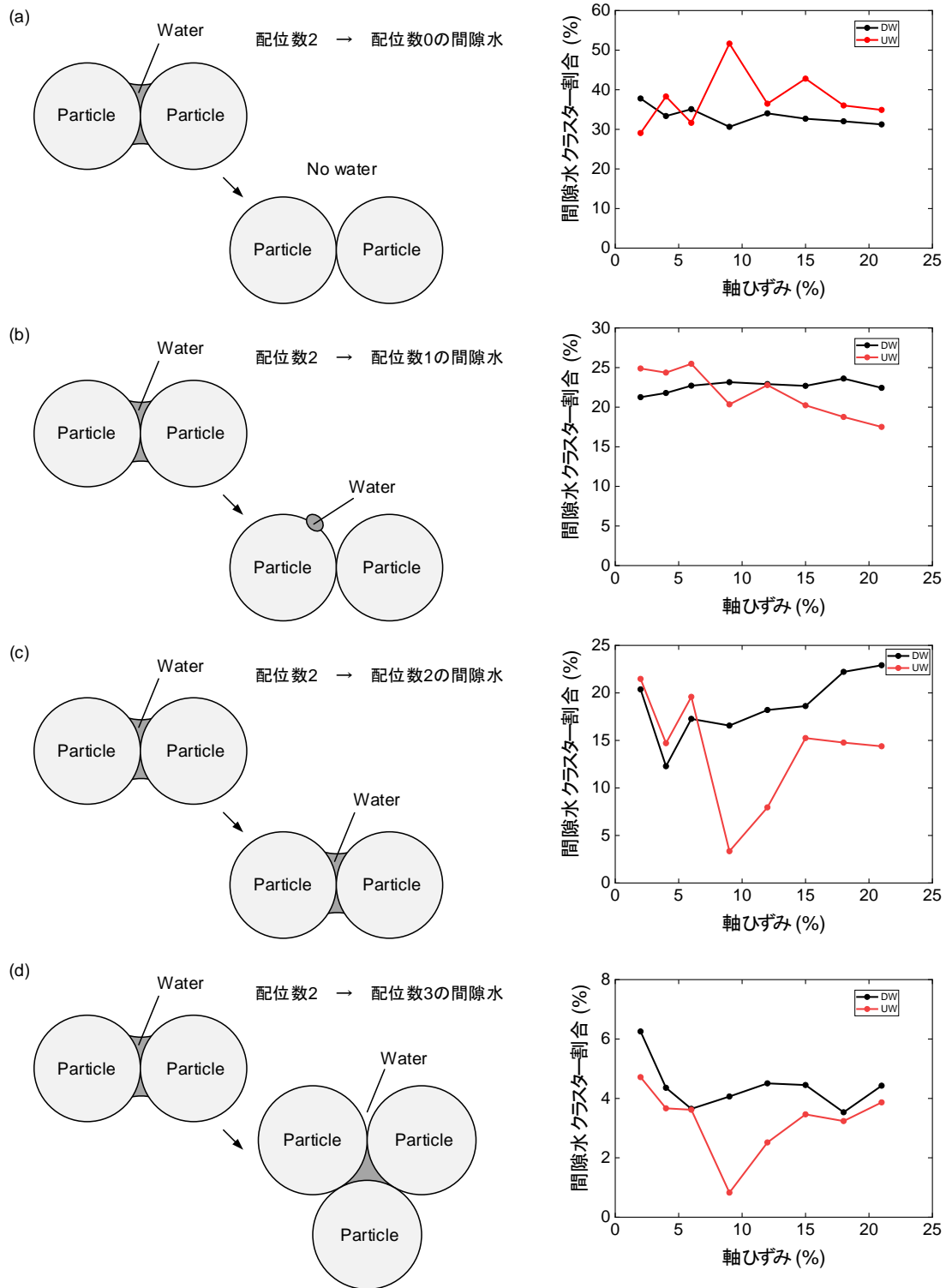


図5 せん断変形に伴う液架橋の存在形態変化

特定した土粒子の変位分布を調べた結果、軸ひずみの増加により Case DW と Case UW とともにピーク値となる変位が大きくなる傾向があるが、概ね Case UW のほうがより大きい変位を示す傾向にあり、液架橋の変位分布はこれと対応した。

以上の検討から、液架橋の分布変化については以下の傾向があるといえる。まず、配位数 2 から 0、0 から 2、および 2 から 2、すなわち液架橋が消失、生成、液架橋のまま、という 3 パターンが主要な間隙水の存在形態変化であること、そしてその傾向は排水条件と非排水条件で同様の傾向であることが明らかとなった。特定された土粒子と間隙水の変位傾向が類似していることから、間隙水の移動はせん断変形に伴う土粒子構造の再配列に起因するものであるといえる。土粒子、間隙水ともに非排水条件において大きく変位し、液架橋の割合もより多く減少する傾向が見られることから、非排水条件では排水条件に比べて大きな土粒子構造変化が生じることによって液架橋が消失していると考えられ、これがマクロな軸差応力に寄与すると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kido, R. and Higo, Y.
2. 発表標題 Change in curvature of pore water in partially saturated sand and its influence on deviator stress under triaxial compression
3. 学会等名 Proc. of 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kido, R. and Higo, Y.
2. 発表標題 Characterization of water retention states in partially saturated sand based on morphology of pore water and pore air using X-ray micro computed tomography
3. 学会等名 Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 大谷悠哉, 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 X線マイクロCTを用いた非排水三軸圧縮下における超緩詰め飽和砂の変形特性の可視化
3. 学会等名 第56回地盤工学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷悠哉, 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 X線マイクロCTを用いた超緩詰め飽和砂の非排水せん断時の変形特性に関する研究
3. 学会等名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上平健登, 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 せん断変形による不飽和砂中の間隙水の配位数分布の変化
3. 学会等名 第 57 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷悠哉, 木戸隆之祐, 肥後陽介
2. 発表標題 超緩詰め飽和砂の非排水三軸圧縮下における粒子接触方向の可視化
3. 学会等名 第 57 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohtani Yuya, Kido Ryunosuke, Higo Yosuke
2. 発表標題 Visualization of fabric tensor of very loose saturated sand under undrained triaxial compression
3. 学会等名 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Uehira, Kento, Kido Ryunosuke, Higo Yosuke
2. 発表標題 Change in coordination number of pore water in unsaturated sand under triaxial compression
3. 学会等名 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Singapore (国際学会)
4. 発表年 2022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