

吸排水履歴を受ける不飽和砂内部のメニスカス水の分布における密度依存性

京都大学大学院 学生会員 ○木戸 隆之祐

京都大学大学院 (現 関西電力株式会社) 学生会員 高村 福志

京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

不飽和土の保水性は飽和度によって変化し、土の密度に強く依存する。この性質は水分特性曲線で表現され、一般に密な砂ほど保水性が高いことが知られている。間隙水の存在形態やメニスカスの分布なども土の密度によって異なると考えられ、微視構造の観察はこれを裏付ける上で重要である。そこで本研究では、密度が異なる不飽和砂の水分保持状態を X 線マイクロ CT スキャンで可視化し、土粒子の接触点数と間隙水の分布を調べる画像解析を行った。

2. 水分保持特性試験

豊浦砂を用いて水中落下法により密詰め、ゆる詰め供試体を作製した。供試体の初期飽和度はいずれも 100%と仮定し、水頭型吸引法によって排水過程(サクシオンを増加)、吸水過程(サクシオンを減少)の順に試験を行った。表 1 に供試体諸量を示す。

所定のサクシオンで平衡に至った際、μフォーカス X 線 CT (KYOTO-GEO μXCT (TOSCANER-32250 μhdk, 東芝 IT コントロールシステム社製))¹⁾を用いて供試体中央の局所領域を撮影した。Voxel size は $5.4 \times 7.0 \mu\text{m}^3$ 、撮影領域は直径 5.6 mm、高さ 5.4 mm である。

3. CT 画像解析手法

CT 画像の土粒子相・水相・空気相を三値化¹⁾した後、Morphology 解析²⁾と接触点解析²⁾を行う。前者は、三値化画像から間隙水相を抽出し、1 voxel の Erosion, Dilation を行った後にクラスターラベリングすることで、間隙水のクラスター数を調べる(図 1)。後者は、三値化画像から土粒子相を抽出し、Watershed による粒子分割とクラスターラベリングを行った後、異なる 2 つの粒子間に 1 voxel の空隙相がある箇所を接触点として検出する(図 2)。なお、接触点の検出は Fortran、それ以外の画像処理は三次元画像解析ソフト Avizo9.4.0 (FEI)を用いた。土粒子接触点に存在する間隙水クラスターの例を図 3 に示す。

表 1 供試体諸量

	ゆる詰め	密詰め
初期間隙比 e	0.822	0.637
初期飽和度 S_r [%]	100	100
相対密度 D_r [%]	42.40	93.40
供試体直径 [mm]	18.00	20.00
供試体高さ [mm]	17.74	20.07

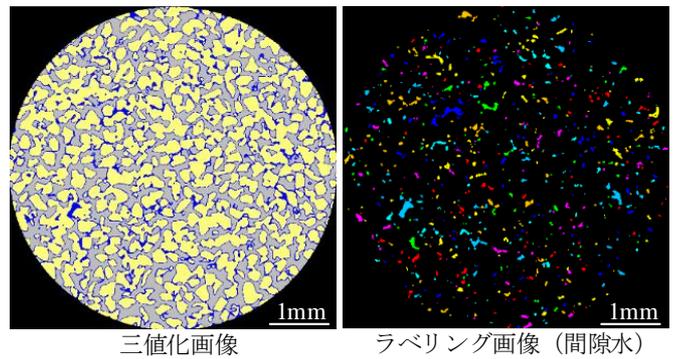


図 1 Morphology 解析の手順²⁾

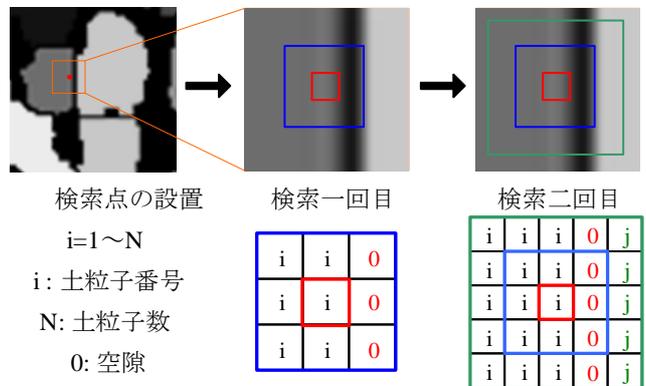


図 2 接触点解析の手順²⁾

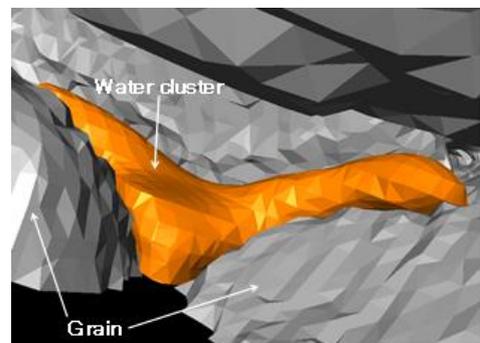


図 3 土粒子接触点における間隙水クラスター

4. 水分特性曲線および画像解析結果

図4に水分特性曲線を示す。排水曲線よりも吸水曲線が上に位置しており、ヒステリシスを示している。また、同じ飽和度において排水曲線、吸水曲線ともに密詰め砂の方が上に位置することから、密度依存性ははっきりと確認できる。

図5に、各サクション下における局所領域全体の土粒子の配位数(1つの土粒子に接触する土粒子の数)を示す。なお、凡例のアルファベットは図4に示す水分特性曲線上のものと対応する。配位数の最頻値は密詰め砂が4、ゆる詰め砂が3であり、密詰め砂の方がいずれの配位数においても高い頻度を示している。つまり、密詰め砂はゆる詰め砂に比べて、土粒子の接触点数がより多い状態なのである。また、双方の供試体における土粒子の配位数の頻度は、いずれのサクションにおいてもほぼ同じ分布である。このことから、本研究における水分保持特性試験では、供試体の密度によらず排水・吸水の履歴によって土骨格は変化していないと考えられる。

図6に、各サクション下における局所領域全体の間隙水のクラスター数を示す。図中のアルファベットは図4に示す水分特性曲線上のものと対応する。飽和度が30%付近まで低くなると、間隙水のクラスター数が多くなる傾向は密度によらず同じである。これは、メニスカスとして分布する間隙水が増えるためと考えられる。一方、間隙水のクラスター数はゆる詰め砂に比べて密詰め砂の方が多く、飽和度が低くなるほどその傾向が顕著に見られる。メニスカス水は土粒子の接触点に存在するため、ある飽和度において密な砂はゆるい砂に比べて、より多くのメニスカス水を保持しやすいのである。以上から、水分特性曲線で表される保水性の差だけでなく、微視的に見るとメニスカス水の分布も土の密度に大きく影響を受けることがわかった。

5. 結論

各サクションにおける保水状態を微視的に可視化し、土粒子の接触点数と間隙水のクラスター数の関係を調べた。その結果、密な砂ほど多くの接触頻度を示し、多くのメニスカス水を保持することを明らかにした。

参考文献

- 1) Kido, R. and Higo, Y.: Evaluation of distribution of void ratio and degree of saturation in partially saturated triaxial

sand specimen using micro x-ray tomography, Japanese Geotechnical Society Special Publication, pp.22-27, 2017.

- 2) 木戸隆之祐, 肥後陽介: 不飽和砂のせん断帯発達過程における土粒子接触頻度とメニスカス水の分布の変化, 第72回土木学会全国大会, III-005, 2017.

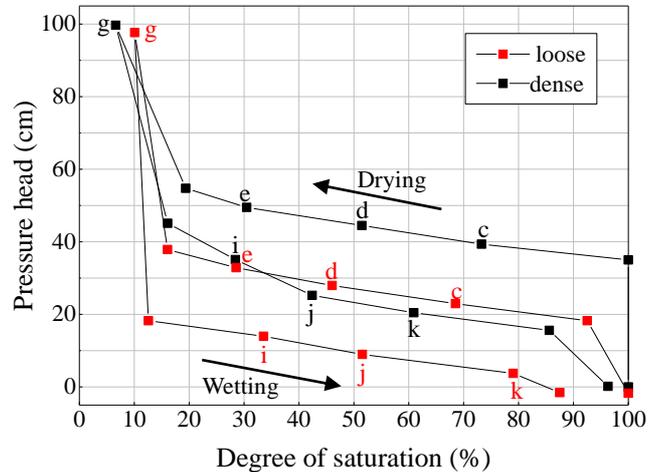


図4 水分特性曲線

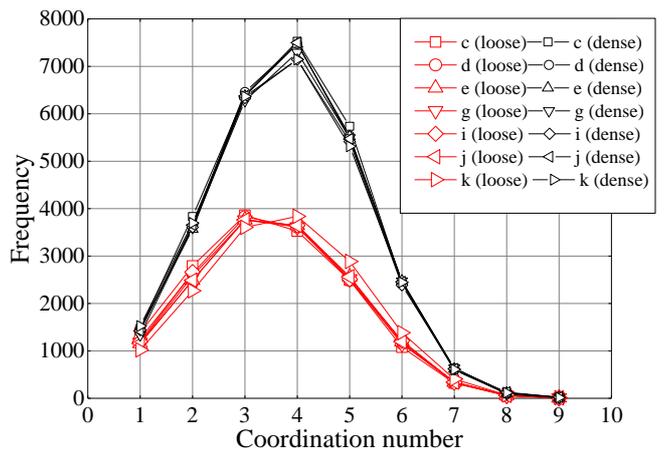


図5 土粒子の配位数の分布

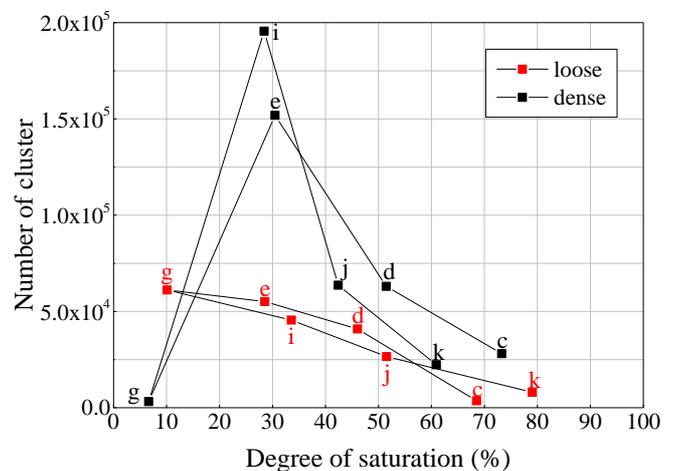


図6 間隙水のクラスター数