

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○淵崎 秀太
 京都大学大学院工学研究科 学生員 江城 静順
 京都大学大学院工学研究科 正会員 肥後 陽介

1 はじめに

不飽和土の力学特性や浸透特性は飽和度に依存するため、乾燥と湿潤によって土構造物の挙動は変化する。これまでX線CT撮影により間隙水や空気の体積や曲率などを評価する統計的な解析は主曲線上でも走査曲線上でも実施されているが^{1),2)}、間隙スケールにおける吸排水挙動に関する知見は数少ない³⁾。そこで本研究では、間隙水の連続性を算出する間隙水の Morphology 解析、吸排水箇所形状・間隙内配置を定量評価する吸排水箇所形状解析、距離値解析を行い、走査曲線を含めた水分特性曲線上の吸排水メカニズムを明らかにする。

2 保水性試験とX線CT撮影

本研究では保水性試験を行い、供試体中央部分のX線CT撮影を実施し、画像解析を行った。保水性試験に用いた豊浦砂試料の物性は表1の通りであり、これを水中落下法で充填し、表2のような供試体を作製し、水頭式吸引法で保水性試験を行った。これにより得られた水分特性曲線を図1に示す。

表1 豊浦砂試料の物性値

土粒子密度 [g/cm ³]	2.658
最大間隙比	0.894
最小間隙比	0.573
平均粒径 [μm]	170
均等係数	2.0
細粒分含有率 [%]	0.07

表2 供試体条件

初期間隙比	0.588
初期飽和度 [%]	100
相対密度 [%]	95.3
直径 [mm]	20.00
高さ [mm]	19.40

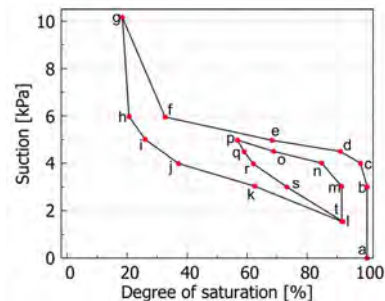


図1 水分特性曲線

3 画像処理

吸排水箇所を抽出するため、CT値をもとに土粒子・水・空気の3相を識別する三値化を行い、識別された3相の領域それぞれに整数値を与え、異なるサクシジョンの画像の差分をもとに3相の変化を識別した⁴⁾。この方法でサクシジョンの変化前後で水相から空気相になった排水箇所、空気相から水相になった吸水箇所を抽出した。

4 画像解析手法

まず、間隙水の形態の変化を調べるために、間隙水クラスターの体積を求め評価する間隙水の Morphology 解析を行い、連続性を求めた。連続性はクラスターの最大体積をクラスターの合計体積で除した値と定義した¹⁾。

次に吸排水箇所形状の複雑性を調べるため吸排水箇所のクラスターの体積と表面積の関係を調べる形状解析を行った。体積と表面積の関係は物体の形状の複雑性を表す。ここでは表面積の3乗と体積の2乗の関係から吸排水箇所形状を定量評価した。

最後に吸排水の間隙内配置を評価するため、吸排水箇所の距離値解析を行った。距離値は土粒子表面からの最短距離で、本研究では吸排水箇所の各クラスターの距離値の最大値を評価対象とした。

5 結果と考察

図2に間隙水の Morphology 解析結果を示す。この結果から、3種類の不飽和状態に分類できると言える。水の連続性が低い不飽和状態から順に、懸垂水不飽和状態、過渡的不飽和状態、封入不飽和状態と呼ばれ、それぞれ

の飽和度の境界値は順に 40 %, 65 %となっている。

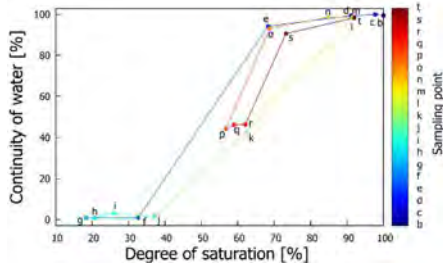


図2 間隙水の連続性

図3, 4に吸排水箇所形状・距離値解析結果を示す。図の縦軸は表面積の3乗、横軸は体積の2乗で、これらの比が大きければ複雑な形状であることを表す。具体的には、主排水曲線では複雑で距離値の小さいクラスターが多いが、主吸水曲線では単純な形状で距離値の大きいものが増えている。一方、走査曲線の排水過程では形状は単純で距離値が大きいクラスターが増え、吸水過程でも形状が単純で距離値の大きいものが増えている。

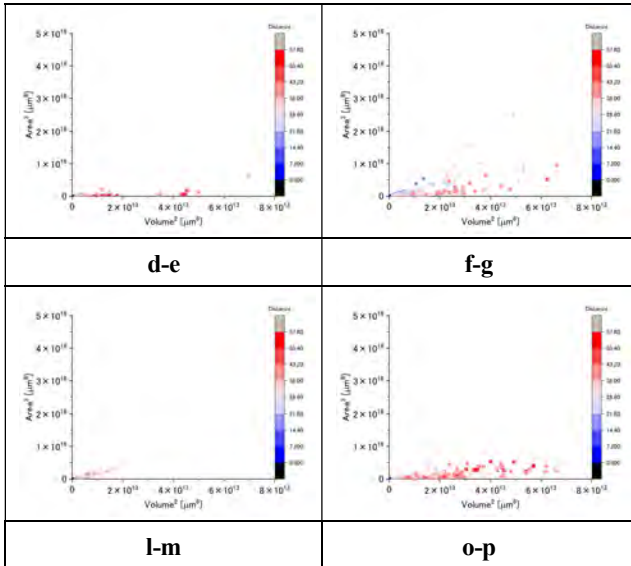


図3 排水過程の結果 (上段: 主曲線, 下段: 走査曲線)

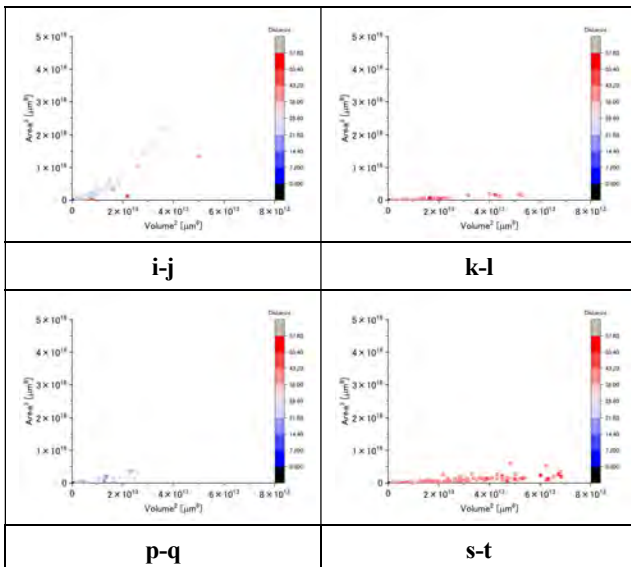


図4 吸水過程の結果 (上段: 主曲線, 下段: 走査曲線)

画像解析の結果から推察されることを述べる。まず主排水曲線上では完全飽和状態から排水を開始しているため土粒子表面から離れた間隙中央部分から単純な形状で排水し、それが進むと土粒子表面から複雑な形状で排水し、懸垂水不飽和状態に至っていると考えられる。主吸水曲線上では懸垂水不飽和状態から吸水するため、土粒子表面において複雑な形状で吸水し、その後は間隙中央部分から単純な形状で吸水し、封入不飽和状態に至っていると推察できる。

一方、走査曲線上の排水過程では、封入不飽和状態から排水しているため、間隙中央部分から水に覆われた空気が拡大するような形で排水した後、間隙中央部分から単純な形状で排水し、過渡的不飽和状態に至っていると推定される。走査曲線の吸水過程では過渡的不飽和状態から吸水するので土粒子表面付近で単純な形状で吸水した後、主吸水曲線の後半部分と同じように間隙中央部分において単純な形状で吸水し、封入不飽和状態に至っていると想定される。

以上から主曲線と走査曲線の排水吸水挙動が異なっている原因は、吸排水過程の始点と終点の不飽和状態の違いであると考えられる。

6 結論と今後の課題

走査曲線を含めた水分特性曲線上の吸排水箇所形状と間隙内配置、間隙水の連続性を画像解析により定量評価した。その結果、主曲線でも走査曲線でも吸排水過程の始点と終点の不飽和状態の違いが排水吸水挙動の違いの原因となっていることが示唆された。

今回、封入不飽和状態から排水過程を開始し、過渡的不飽和状態から吸水を開始することで走査曲線を描いた。今後は異なる飽和度を始点とする実験を実施する。特に、低飽和度状態で排水を開始し、封入不飽和状態の影響を排除するなど、広飽和度領域における知見を更に集積する。

7 参考文献

- 1) Kido, R., et al.: Acta Geotechnica, 15(7), 1745-1761, 2020.
- 2) Milatz, M., et al.: Open Geomechanics, 3, 2022.
- 3) 江城・肥後: 第 59 回地盤工学研究発表会, 25-5-4-06, 2024.
- 4) 江城・肥後: 第 58 回地盤工学研究発表会, 12-5-3-07, 2023.