

X 線CT画像解析による砂の水分保持特性の評価

熊本大学大学院 学生会員 ○塩田 絵里加 熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文
熊本大学技術部 非会員 吉永 徹

1. はじめに

有機溶剤による地盤汚染においてその地盤内浸透現象のシミュレーションは、不飽和浸透流のメカニズムに基づかれている。そのキーパラメータとして間隙径とその3次元空間分布、そして比透水係数に着目している。一般に比透水係数は、van Genuchten モデルから得られるパラメータを Mualem モデルに導入して得られる¹⁾。著者らは、地盤汚染に関する間隙内の多相流動の現象を解明することを目的として、X 線 CT を用いた多相流の可視化の研究に着手している²⁾。本概要では、水分保持特性試験を実施し、各ステップにおける供試体をマイクロ X 線 CT スキャナ(以下、MXCT)撮影を行うことによって、得られた画像から間隙構造を定量的に抽出し、著者らが提案する擬似流動シミュレーションを実施した結果を報告する。

2. 保水性試験と X 線 CT 撮影条件

表 1 は、使用した試料の諸元である。今回の実験では、水分保持特性試験として水頭型吸引法を採用した³⁾。実験の供試体概要図を図 1 に示した。今回は、事前に水分保持特性試験を行い、得られた結果より空気侵入圧から毛管領域にかけて 5 点を選択し、MXCT 装置を用いて供試体の撮影を行った。最小画素寸法は $9 \times 9 \times 9 \mu\text{m}^3$ であり、画像解析の範囲は、供試体中央の $300 \times 300 \times 300 \text{ voxel}$ (一辺 2.7mm の立方体)とした。

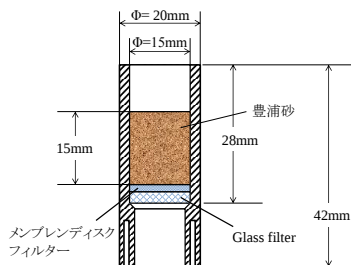


図 1 供試体概要図

試料	豊浦砂
土粒子密度(g/cm^3)	2.65
平均粒径 $D_{50}(\mu\text{m})$	200
乾燥密度(g/cm^3)	1.5
初期間隙率	0.43

表 1 試料諸元

3. 画像解析手法

(1) 3次元間隙径分布による解析手法

画像解析範囲内の間隙径空間分布を知るために、

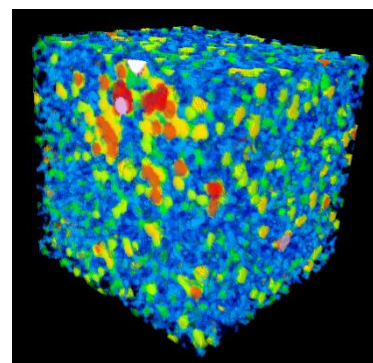
キーワード：保水性試験、 μ -X 線 CT、画像解析

連絡先：〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1 熊本大学工学部研究棟 I 9 階 903 室 TEL 096-342-3691

Mukunoki ら²⁾が提案したモルフォロジオープニング処理を元にした画像解析手法を適用する。この手法は、間隙径に直径 d の球を当てはめていき、球体が通過できなくなる領域を見つける。例えば、直径 $d_1, d_2, d_3 (d_1 < d_2 < d_3)$ を順に当てはめ、 d_3 が通過できない径であった場合、直径 d_2 がこの間隙の径となるように解析を設定している。この解析をあらかじめ 2 値化に処理した画像に適用し、3 次元間隙径分布を得ることができる。得られた間隙径分布を以下の毛管圧力式(1)に代入することによって、毛管圧力 h_c を求めることができる。

$$h_c = \frac{4\sigma_{nw}\cos\alpha}{\rho_w g d} \quad (1)$$

ここで、界面張力 $\sigma_{nw}(10^{-3}\text{N/m})$ 、接触角 $\alpha(\text{degree})$ 、液相密度 $\rho_w(\text{kg/m})$ 、重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$ は既知である。図 2 は実際に三次元間隙径分布解析を行った後に得られる画像である。



(コンターは赤～青が間隙径大から小に対応)

図 2 三次元間隙径分布

(2) 間隙内二相流擬似流動可視化手法

上記で得られた 3 次元間隙径分布を用いて、水が最小間隙径から流入するという条件を仮定して、間隙径の小さい順に着色することにより実際に水分保持特性試験の排水過程を模擬できる。排水過程のシミュレーションでは、飽和度 100%の状態において、間隙径が大きい部分から順に水(wetting 相)を空気(Non-wetting 相)に置換していく。この解析を行うことによって、排水過程での飽和

度の変化を可視化できる。以上の2つの画像解析を行うことによって、水分特性値を得るために必要な圧力水頭と体積含水率を求めた。

4. 実験と画像解析結果・考察

本原稿ではMXCT撮影点である圧力水頭35cmの解析結果と実験結果との比較のみを代表して示すこととする。図3は、今回使用した豊浦標準砂のMXCT画像である。このCT画像を用いて、三次元間隙径分布解析を行い得られた間隙径ヒストグラムを図4に示した。また、図4から各間隙径の大きさに対して毛管圧力水頭式(1)を適用することによって得られる水分特性値と擬似流動シミュレーションを行った比較結果を図5に示した。図5から擬似流動シミュレーションよりもかなり低い毛管圧力水頭で排水されていることが確認された。これは、間隙の接続性によるものであると考える。間隙の接続性とは、空気が間隙内に侵入する際、間隙の大きい部分を優先的に侵入する傾向がある。最初は、間隙径の大きい部分に空気が侵入するが、小さい間隙には空気が入りにくい。このため、毛管圧力水頭が低い状態の場合、連続部分の大きい間隙にしか空気が侵入せず、排水量が微量になる。しかし、毛管圧力水頭を大きくすると、小さい間隙にも空気が侵入するようになることによって、間隙同士が接続し、排水が促進されることが考えられる。各間隙径を用いてそれぞれ毛管圧力水頭の計算を行った場合、この間隙の接続性は考慮していなかったため、ヒストグラムの値によって水分特性値が変化したものと考えられる。一方で擬似流動シミュレーションでは、間隙の接続性を考慮した解析を行うことができるので、実験値に近い水分特性値が得られたのではないかと考える。この比較から、間隙径ヒストグラム値からでも水分特性値を求めることができるが、擬似流動シミュレーションの水分特性値の方が間隙の接続性を考慮できていることにより、実験値に近似した水分特性値を予測することが可能であると考える。

5. おわりに

今後の課題として、実験値と擬似流動シミュレーションでは、空気侵入圧に誤差が生まれることから、擬似流動シミュレーションの精度を高める必要があると考える。

謝辞

本研究は、平成26年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究C(研究課題番号:26420483 研究代表者:椋木俊文)により行われた。ここに謝意を表する。

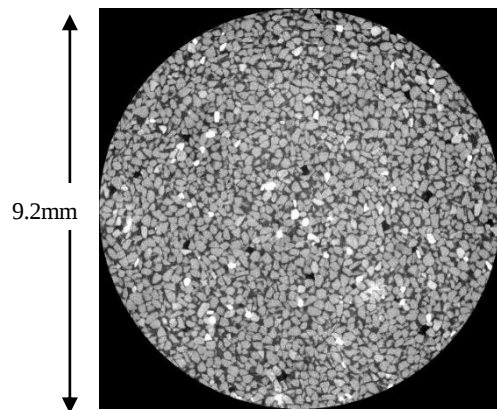


図3 豊浦砂のMXCT画像

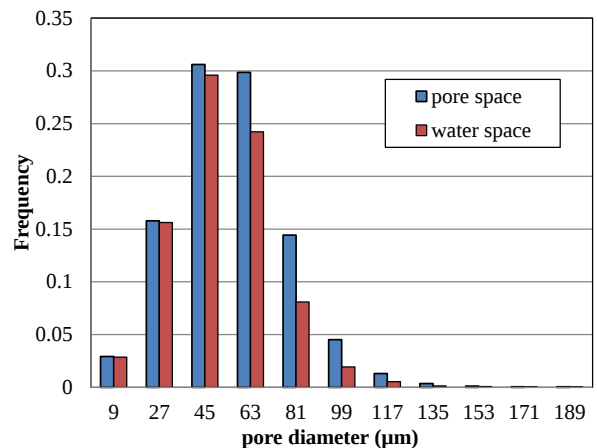


図4 三次元間隙径分布によって得られた間隙径ヒストグラム

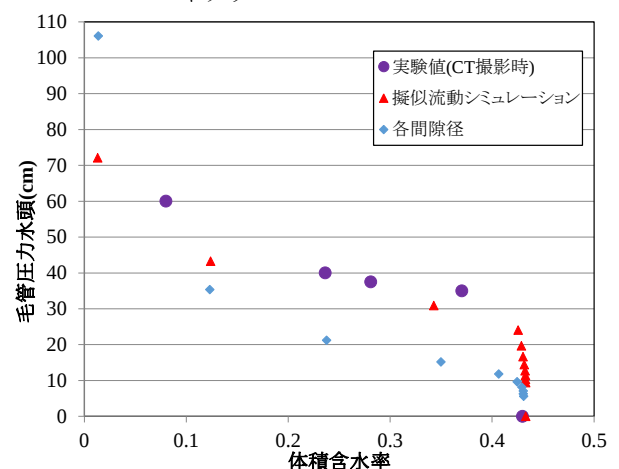


図5 擬似流動シミュレーションと各間隙径ヒストグラムから算出した水分特性値との比較

参考文献

- 1) 小林賢一郎: Y.Mualem 著「不飽和多孔質体の透水係数を推定する新たなモデルについて」ならびに M.Th.van Genuchten 著「不飽和土壌の透水係数を推定する閉形式解について」J.Jpn.Soc.Soil Phys, 土壌の物理性, No.106, p47-60, 2007.
- 2) Mukunoki, T. and Mikami, K: Study on mechanism of two-phase flow in porous media using X-ray CT Image Analysis, Proc. of the 18th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering TC106 selected paper, pp1163-1166, 2003.
- 3) 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-, 社団法人地盤工学会, pp162-170.