CT画像解析を用いた砂の不飽和浸透特性の評価

熊本大学工学部 学生会員 〇塩田 絵里加 熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文 熊本大学大学院 学生会員 藤木 祐作 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が、比透水係数であ る。一般に比透水係数は、van Genechten 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⁾。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 9×9×9µm³であり、画像解析の範囲は、供試体中央の 300×300×300voxel(一辺 2.7mm の立方体)とした。



図-1 実験装置

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、

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 d₁,d₂,d₃(d₁<d₂<d₃)を順 に当てはめ、d₃が通過できない径であった場合、直径 d₂ 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 hc を求めることができる。

$$h_{c} = \frac{4\sigma_{nw} cos\alpha}{\rho_{w} gd}$$
(1)

ここで、界面張力 $\sigma_{nw}(10^{-3}N/m)$ 、接触角 α (degree)、液相密度 $\rho_w(kg/m)$ 、重力加速度 $g(m/s^2)$ は、既知である。

(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た。この条件に よっ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する擬似流動シミュレ ーションを行った。排水過程のシミュレーションでは、 間隙率が100%の飽和状態において、間隙経の値が大きい 部分から順に水(wetting 相)を空気(Non-wetting 相)に置換 していくようにプログラムを作成している。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具体的 に得ることができる。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の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

(1)画像解析結果

CT 撮影によって得られた画像を図-2 に示す。ここで は、排水状況が確認しやすかった圧力水頭 35cm と 37cm において供試体下部から 3.6mm の部分を示している。ま た、図-3 は図-2 の原画像に対し、Mukunoki ら²⁰が適用し た Marker-Controlled Watershed 法を用いて領域分割した 三値化画像である。この三値化画像から、圧力水頭が大 きくなると空気が増加しているのが確認された。三値化 画像情報から、各ステップの飽和度を計算し実験値と同 じ圧力水頭を用いて水分特性曲線を描いた。また、三値 化画像を用いて三次元間隙径分布解析によって得られ た空隙径分布が図-4 である。間隙径は 27µm から 99µm にかけて多く分布している。図-5 は、図-4 を間隙と水、 土粒子として二値化した画像を用いて擬似流動シミュ レーションを行った画像である。図-4 の結果と各空隙径 の空間座標を把握しているので擬似流動シミュレーシ ョンにより対象間隙を着色することで画像解析おいて 空気が上部から侵入する排水過程を再現している。

(2) 水分特性値の比較

図-6 は実験結果と撮影した CT 画像を三値化した画像 から得た結果と擬似流動シミュレーションにより得ら れた結果を示した圧力水頭と体積含水率の比較関係図 である。図-6 中の点 e がある圧力水頭差 31cm 付近で排 水が始まった後、圧力水頭が 34cm である点 f から圧力 水頭 43cm の点 i にかけて体積含水率が 0.275 減少して いる。また、体積含水率が 0.1 を下回ったあたりで排水 が終了した。図-6 を見ると、擬似流動シミュレーション の結果は、サクション値が実験値よりも低く値を示す傾 向にあるが、定性的には、概ね実験で得られた水分特性 値を評価できていると言える。この差が、本画像解析に おける最小画素値が 9µm であることが影響しているか について今後議論する必要があると考えている。

5. おわりに

今後の課題として、間隙内二相流擬似流動可視化手法 についての精度を上げることによって、実験値により近 い水分特性値を画像解析で求められるように検証してい く。また、画像解析より比透水係数を得て、Mualem モデ ルで得られる水分特性値との比較検討を行なっていく。

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。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.



(a−1) 圧力水頭 35cm (a−2) 圧力水頭 37cm 図−2 MXCT 画像



(U-1) 注力水頭 350m (D-2) 注力水頭 370m (黒色が土粒子、灰色が水、白色が空気) 図-3 三値化画像







(c-1)圧力水頭 20cm

(c-2)圧力水頭 24cm (白色が空気、黒色が土粒子と水)

図-5 画像解析から求めた排水過程



図-6 実験値と画像解析値との比較(水分特性曲線)