

X線CTデータを用いた間隙構造解析による孔隙中の残留LNAPL分布の評価

熊本大学工学部 学生会員 ○宮原 ひとみ 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 永井 千彩希 熊本大学技術部 非会員 佐藤 宇紘

1. はじめに

著者らは、油のような低比重難水溶性液体(LNAPL)による地盤汚染メカニズムを解明することを目的として、X線CT法を用いた可視化実験に着手している¹⁾。近年実用化されたマイクロフォーカスX線CT装置(MXCT)はミクロン単位の分解能を有しており、砂地盤材料程度であれば、適切な画像処理を施すことによって、地盤材料内部の孔隙構造や粒子構造、流体の残留分布を高精度に3次元的な評価が可能となる。本概要では、MXCT画像から多値化処理を行い、間隙を水・LNAPLに分割するとともに3次元孔径分布の評価手法を新たに開発し、その手法を用いて孔隙中における残留LNAPL分布を評価した。

2. LNAPL注入実験²⁾とX線CT撮影条件

表1は使用した試料の諸元と供試体の間隙率である。孔隙構造による残留LNAPL分布の違いを評価するため、粒子形状が球体のガラスビーズと形状にばらつきのある豊浦砂を使用した。絶乾状態の供試体を完全に純水で飽和させた後、密度差を大きくするため、KI水溶液で置換した。次にLNAPLとKI水溶液を順に一定流量で注入し、各溶液を注入後、MXCT撮影を行った。最小ボクセルの寸法は $5 \times 5 \times 5 \mu\text{m}^3$ とし、供試体中央の $512 \times 512 \times 512$ voxels (一辺2.56mmの立方体)を画像解析の範囲とした。

3. 画像解析方法

(1) 多値化処理²⁾

土粒子、孔隙中のLNAPLとKI水溶液から構成されるような多相系の画像の任意の成分を抽出するためにはそれぞれに相分離する必要があり、この領域分割処理は多値化処理と呼ばれる。多値化処理法は画素値に基づく分割法や画素値の空間分布情報に基づく分割法などがあり、本解析では後者のWatershed法の考えを取り入れたMarker-Controlled Watershed法(MCW法)を適用した。なお、詳しい手順は参考文献2を参照された

い。

(2) 3次元孔径分布の評価手法²⁾

本解析ではマセマティカルモルフォロジーの基本演算であるオープニング(opening)を利用した。集合(画像) X の構造要素 B によるオープニング $B(X)$ は次式で定義される。

$$\gamma_B(X) = \cup_X \{B_X | B_X \subseteq X\} \quad (1)$$

この演算は、構造要素 B を集合 X からはみ出さないように動かしたときの B の軌跡を意味する。本解析では、構造要素 B に対しては直径 d の3次元の球を設定し、集合 X に対してはMCW法によって得られた多値化画像を土粒子と孔隙に2値化したものを設定している。孔隙の領域に直径 d ボクセルの球体を移動させ、(1)の条件式からこの球体を通過できない領域を見つける。今回、直径 d の球が通過できない孔隙は、直径 d よりも小さい孔径をもつと仮定した。この処理を球の直径 d を変化させて繰り返すことで3次元孔径分布が得られる。

4 解析結果・考察

図1(a.1)(a.2)、図2(b.1)(b.2)にMXCT画像と多値化処理後の画像を示す。多値化処理の精度を検証するために、供試体作成時の設定間隙率と多値化画像から計算した間隙率を比較した。多値化画像の間隙率はガラスビーズが34.5%、豊浦砂が40.8%であり、それぞれの誤差は1.1%と1.4%であった。供試体内部の間隙率の空間的なばらつきを考慮すると十分な精度で間隙を抽出できたといえる。

図1(a.3)、図2(b.3)は孔隙径分布であり、図1(a.4)(a.5)、図2(b.4)(b.5)はそれぞれ孔隙径分布中のLNAPL、KIが存在するところのみを抽出した孔径分布である。これらの画像からLNAPLは塊として存在し、かつ孔径が大きいところにLNAPLが存在することが分かる。

次に図3(a)(b)は、それぞれガラスビーズと豊浦砂の解析対象全体(512枚の画像)に対し、3次元孔径分布解析を実施、得られた孔隙径分布のヒスト

グラムである。この図は、LNAPL、KI 水溶液がそれぞれどのような孔隙径を持つ領域に存在しているかを示している。これを見ると、ガラスビーズと豊浦砂では、孔隙径分布の形状が異なる。両試料ともに LNAPL が存在する孔隙径は、KI 水溶液の最頻値と比較して大きい値を示しており、例えばガラスビーズの孔隙径が 115 μm においては、LNAPL で構成されている割合がおおよそ 40% であり、また豊浦砂では、孔隙径が 85 μm においては約 30% であった。以上のことから、LNAPL の残留メカニズムは、少なくとも孔隙構造の空間分布に影響を受けることが明らかとなった。

5. おわりに

残留 LNAPL 分布から、LNAPL の残留メカニズムは、少なくとも孔隙構造の空間分布に影響を受けることが明らかとなった。

今後は孔隙の接続性や形状と残留 LNAPL の関係に注目し、LNAPL の残留メカニズムの解明を目指していく予定である。

参考文献

- 1) 椋木俊文, 三上和昭, 佐藤宇紘: X 線 CT データによる孔隙構造の定量化と地盤内多相流汚染問題への適用性, 第 9 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.47-52, 2011.
- 2) 三上和昭: 孔隙スケールにおける多孔体中の多相流動現象の解明, 熊本大学大学院自然科学研究科社会環境工学専攻平成 23 年度修士論文, 2012.

表 1. 試料の諸元と供試体の孔隙率

	ガラスビーズ	豊浦砂
粒径 (μm)	250~350	450
土粒子密度 (kg/m^3)	2.45	2.65
乾燥密度 (kg/m^3)	1.58	1.57
孔隙率 (%)	35.6	40.8

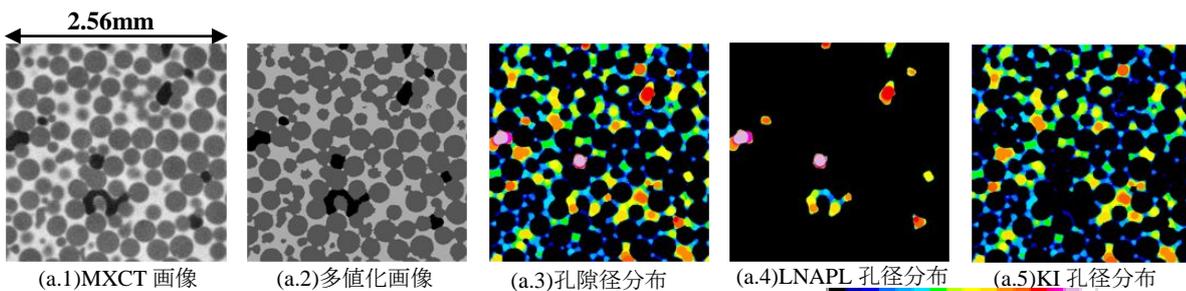


図 1. ガラスビーズ

(コンターは青~赤が孔径、小~大に対応)

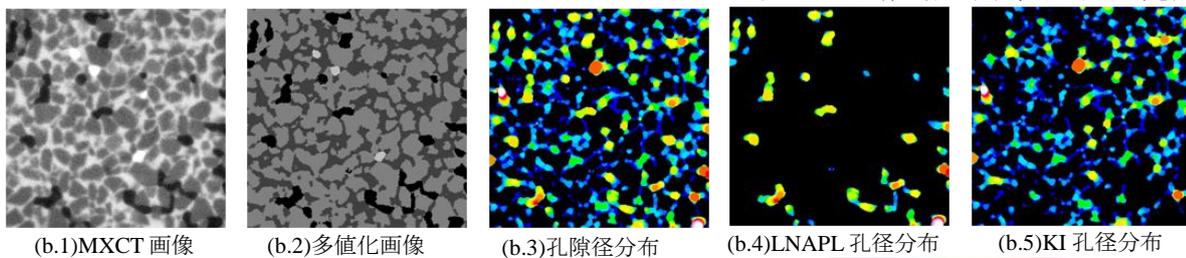


図 2. 豊浦砂

(コンターは青~赤が孔径、小~大に対応)

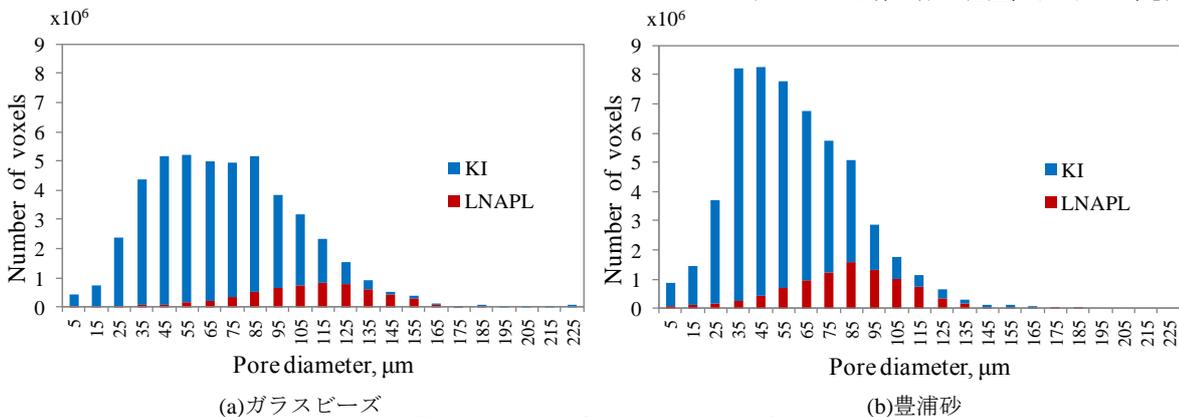


図 3. 3次元孔隙径分布のヒストグラム