

異なる粒状材料の間隙構造を対象とした水分特性評価についての考察

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

不飽和地盤内部の VOC 流体による地盤汚染問題を考える上で重要なパラメータとなるのが不飽和透水係数である。この不飽和透水係数は、地盤内部の連続した間隙内を流体が流れることを想定しているため、水分分布などの影響を受け、土の保水性に依存する¹⁾。従って、地盤内部の VOC 汚染状況を把握するためには、対象土の保水性についての情報が必要不可欠となる。Mukunoki²⁾らはマイクロ X 線 CT スキャナ装置 (以下, MXCT) によって得られた画像に対し 3DGranumetric 法と呼ばれる画像解析技術を用いることによって、間隙の空間分布情報(間隙の大きさ・間隙の接続性)を得ることができる。その空間分布情報を用いて VPM(Voxel-percolation 法: 以下 VP 法)²⁾を適用することにより、排水過程における水分特性曲線を得ることを可能とした。本報告では、Mukunoki らが開発した MXCT 解析による VPM に対し、異なる粒状材料(ここでは、豊浦砂・硅砂 5 号・粉碎されたガラスビーズ(以下 GBC))についての保水性試験を行い、CT 撮影を行ったのちに VP 法を適用した結果について粒状材料それぞれの間隙構造の観点から比較・評価について報告する。

2. 保水性試験概要と MXCT 撮影

表 1 は使用した 3 つの試料の諸元である。今回の実験では、水分保持特性試験として水頭吸引法を採用した³⁾。実験は、まず MXCT 撮影装置を用いて飽和状態の供試体を撮影し、その後、水分保持特性試験を実施した。最小画素寸法は $10 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$ である。画像解析領域は代表領域解析⁴⁾を行った結果に基づき、 $500 \times 500 \times 500 \text{ voxel}$ (一辺 5.0mm の立方体)としている。

表 1 各供試体諸元

Sample name	Toyoura sand	Keisa 5	GBC
Mean diameter $D_{50}(\mu\text{m})$	200	400	350
Dry density (g/cm^3)	1.50	1.50	1.50
Initial porosity	0.43	0.43	0.39
Soil particle density (g/cm^3)	2.25	2.64	2.45

3. 画像解析手法を用いた排水過程における水分特性曲線予測手法の適用

地盤内部における土の保水性を考える上で重要な役割を果たすのが毛管圧力である。この毛管圧力に関する式として、Young-Laplace の式を考える。

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

ここで、 $h_c(\text{m})$ は毛管圧力水頭、 d は間隙の大きさを示す。また界面張力 $\sigma_{nw}(10^{-3}\text{N/m})$ 、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。よって、 h_c を求めるためには、 d を求める必要があるが、この d については、Mukunoki らが開発した 3D Granumetric 法²⁾によって MXCT 画像から推定可能である。従って、式(1)に基づき開発された排水過程における VP 法を適用すると、水は最小間隙から流入し、連続した次の大きさの間隙に流れていくと仮定している。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画像でも、数値でも得ることが可能となる。

4. 実験と画像解析結果・考察

(1) 各供試体における水分特性曲線の比較

図 1 は、各粒状材料に対し、水分保持特性試験を行った結果を示している。毛管侵入値はそれぞれ、豊浦砂(▲)が 30cm、硅砂 5 号(■)が 16cm、GBC(●)が 10cm となった。毛管領域の幅は、豊浦砂で 6cm、硅砂 5 号で 4cm、GBC で 2cm であった。また GBC の結果では、吸着領域が他の材料に比べ狭いといった結果も得られた。毛管侵入圧の違いは、それぞれの粒状材料が構成する間隙径の大きさと接続性に依存すると考えられる。図 2 と図 3 に示すのは、画像解析²⁾から得られた各粒状材料の二値化画像と間隙径分布である。それぞれの間隙径の最頻値は、豊浦砂が 0.07mm、硅砂 5 号が 0.11mm、GBC が 0.17mm となっている。また、豊浦砂は最頻値がはっきりと表れているのに対し、硅砂 5 号と GBC は全体的になだらかな分布になっていることがわかる。特に GBC は間隙径が 0.07mm から

0.27mm までは各間隙径ごとに 5%以上の頻度を持っている。これは、GBC の間隙構造が、比較的同じような大きさの間隙が集合しているような間隙構造であるといえる。よって、GBC の水分特性曲線は、2cm という幅で一気に排水挙動が進行してしまったものと考えられる。一方で、それぞれの間隙径の頻度に違いが出ている豊浦砂は、毛管圧力が働きやすく、毛管侵入領域も広がったと考えられる。

(2) 画像解析による VP 法の適用

図 4 は、MXCT 画像解析に対し VP 法を適用した結果である。豊浦砂については、VP 法の結果、毛管圧力水頭が若干低い値となっているが、定性的に見れば、実験値と同じ挙動を示すことができていると考えられる。硅砂 5 号については、毛管侵入領域では、VP 法を適用すると同じような挙動が得られることが確認された。また、GBC については、毛管圧力水頭 12cm 以降の吸着領域について差異が認められるものの、毛管侵入領域では実験値で得られた排水挙動と同じような挙動が得られることがわかった。この結果から図 2 のように間隙構造を適切に抽出することができれば、VP 法による水分特性曲線予測は有効であると考えられる。

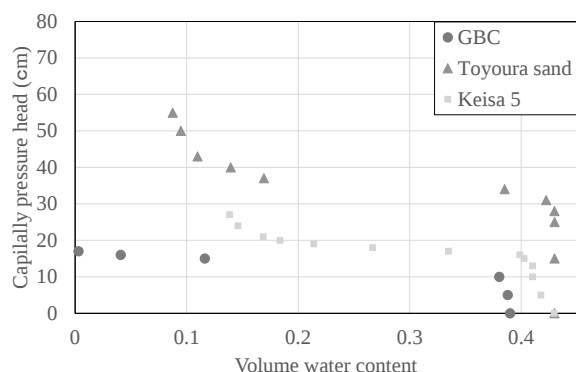


図 1 各粒状材料における水分特性曲線

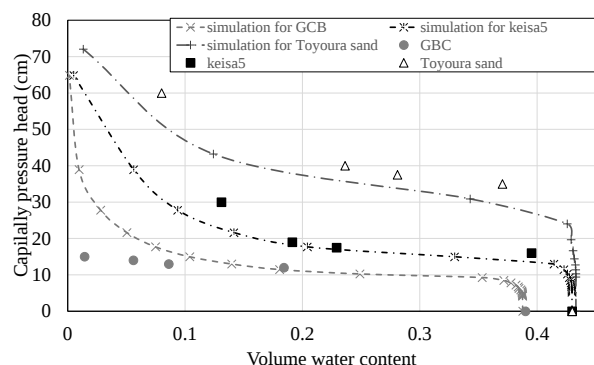


図 4. 水分特性シミュレーションと実験値との比較

5. おわりに

不飽和地盤における土の保水性を間隙構造の観点から挙動評価を行なった。また間隙構造を用いて VP 法を適用することによって、VP 法の有効性の検証を行った。今後は、様々な粒状材料の間隙構造を統計的に評価することによって、間隙構造と水分特性の関係をさらに明確にしていきたいと考える。

謝辞

本研究は、学術研究助成基金助成金(基盤研究 C(一般): 課題番号 26420483)により行われている。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会, 不飽和地盤の挙動と評価, p11-56, 丸善出版株式会社, 2004.
- 2) Mukunoki, T., Yoshihisa, M., Kazuaki, M. and Erika, S., X-ray CT analysis of pore structure in sand, Soiled Earth, 7, pp929-942, 2016.
- 3) 社団法人地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説 -二分冊の 1, pp162-170, 丸善出版株式会社, 2009.
- 4) 藤木祐作, μ X 線 CT 画像と LBM を用いた多孔体の不飽和浸透特性の定量評価, 熊本大学自然科学研究科平成 27 年度修士論文

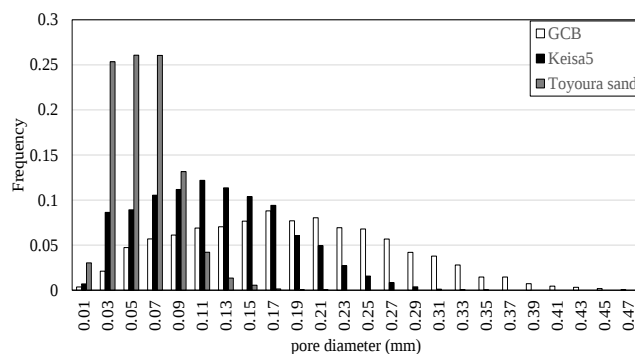


図 3. 各粒状材料の間隙径分布

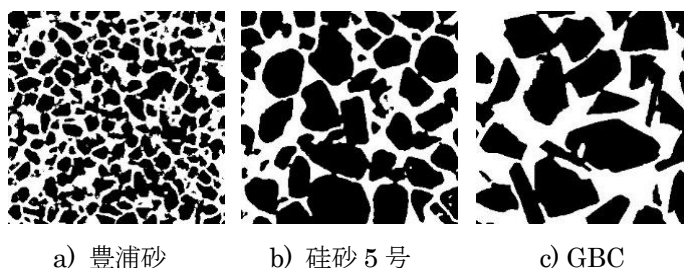


図 2. 各粒状材料の二値化画像 (画像の大きさはすべて 3mm の正方形で黒い部分が各粒状材料の粒子)