

X線CTを用いた豊浦砂空隙中の水-空気二相流動挙動の可視化

大成建設（株） 正会員 ○増岡 健太郎

1. はじめに

土壌地下水汚染や二酸化炭素地中貯留など、地盤中における二相流体の流動を数値シミュレーションする場合、毛管圧曲線や相対浸透率などの二相流パラメータが必要となる。水-空気など、一部で試験方法が標準化されているが¹⁾、透水性が低い場合には試験に長時間を要し、扱う流体や考慮する温度圧力条件によっては試験装置の改良を要するなど、試験が困難な場合も考えられる。著者は、上記の課題を解決する方法として、X線CT（Computed tomography）を用いて試料の空隙を抽出・モデル化し、流体解析を行うことで、室内試験ではなく数値シミュレーションによって二相流パラメータを推定する技術の開発を進めている²⁾。本稿では、数値シミュレーションによる二相流パラメータの推定結果の検証に用いることを前提に、豊浦砂空隙中の水-空気二相流動挙動をX線CTで可視化した結果について述べる。

2. 方法

2-1. 小径コアを用いた通気試験

試験装置の概略を図1に示す。試験装置は、外径24mm-内径14mmの亚克力カラムの内側に、外径6mm-内径4mmの亚克力カラムを設けた二重管構造となっている。内側カラムの上側はナイロンチューブ（外径6mm-内径4mm）とレギュレーターを介してコンプレッサーに接続されており、所定圧力（精度±0.1kPa）でカラムへ送気できる。内側カラムの下側にはポーラスストーンを配し、ナイロンチューブ（外径6mm-内径4mm）とバルブを介して注水/排水が行える。

供試体は、脱気水で飽和した豊浦砂（ $D_{50}=0.191$ mm）を内側カラム中に作成した（高さ：約11.5mm、空隙率：約0.42 [後述の画像解析より]）。バルブを閉じた状態を初期条件とし、以下の手順を繰り返すことで、送気圧力を1.0、2.0、3.0、4.0、5.4、7.2 kPaと段階的に上げ、各圧力状態でX線CT撮影を行った。

- 1) 送気（空気圧印加）
- 2) 排水側のバルブを開ける（約2分）
- 3) 排水側のバルブを閉じる
- 4) X線CT撮影（解像度約13 μ m）

2-2. 画像解析による飽和度測定

X線CT撮影で得られた画像（以下、CT画像と呼ぶ）に対して、non-local mean filter³⁾を用いてノイズを除去し、marker based watershed法⁴⁾により、水、空気、土粒子でCT画像を三値化した。実際の内径より僅かに小さい直径3.84mm、高さ11.58mmの円柱領域を画像上の供試体評価部分に設定し、各圧力段階での飽和度を、（水部分のボクセル数）÷（水部分のボクセル数+空気部分のボクセル数）によって計算した。

3. 結果

3-1. 飽和度変化

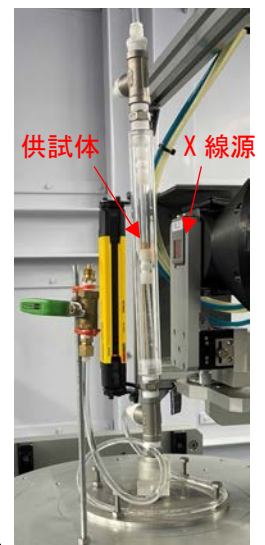
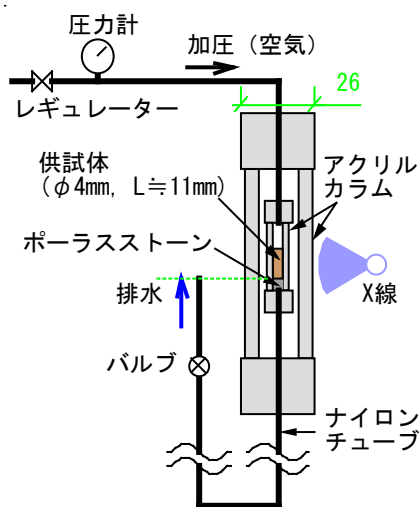


図1 試験装置の概略と写真

キーワード 地下水、不飽和、X線CT、毛管圧曲線、独立気泡

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株) 技術センター TEL:045-814-7221

画像解析で測定した飽和度と撮影時の圧力の関係を図2に示す。圧力が1.0kPaの段階ではほとんど排水が生じず、2.0kPaとなった際に排水が生じ飽和度が低下した。その後、圧力が3.0、4.0kPaの段階では、飽和度がわずかに増加し、5.4~7.2kPaで飽和度は大きく低下する結果となった。

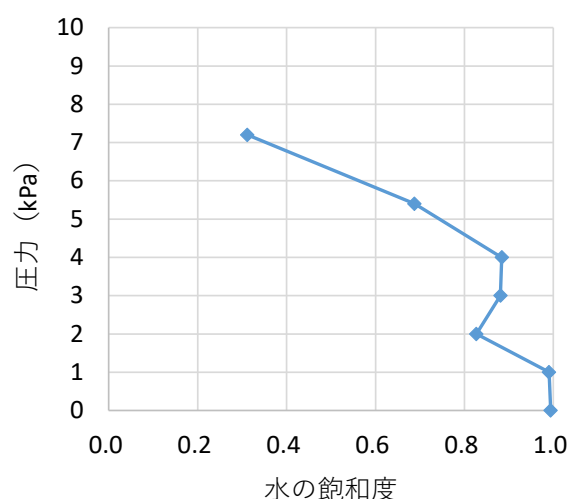


図2 圧力と飽和度の関係

3-2. 空気の流動経路

図3に送気圧力が2.0、4.0、5.4、7.2kPaでの空気部分ボクセル（空気のプルームに相当）を示す。なお、図では互いに連結した空気部分ボクセル毎に色付けし、かつ体積が0.001mm³未満のものは表示から除外している。

4. 考察

圧力が2.0kPaで排水が生じた際の空気部分ボクセルを見ると、上端から下端まで貫通する同色部分が見られることから、“気みち”が形成されたことが分かる(図3-a)。飽和度がわずかに増加した4.0kPaと比較すると、4.0kPaでは気みちの消失が見られたり(図中赤丸)、気みちの分断が生じていることが分かる(図中白丸)。これらの理由として、送気圧力

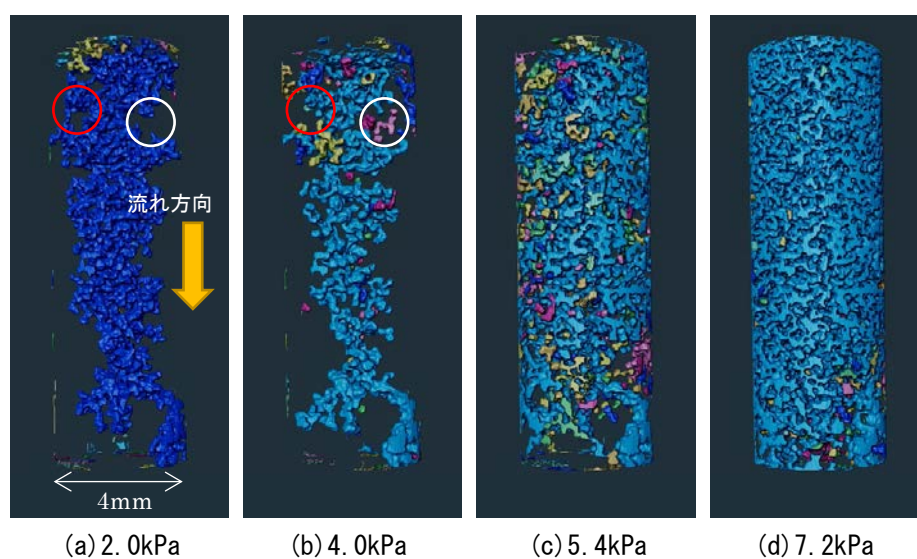


図3 画像解析による圧力毎の空気部分ボクセル

を大きくする過程で気みちが変化し、空隙内で圧力低下する部分が生じることで再水浸(メニスカスの再形成)して飽和度がわずかに上昇したと思われる。

飽和度が大きく低下した5.4kPaでの空気部分ボクセルを見ると(図3-c)、場所により色が異なることから独立気泡が多く存在する。一方で、7.2kPaではほぼ同色となっており、プルーム全体はほぼ連結している。この違いの理由として、5.4kPaでは前述と同様に圧力増加の過程で気みちが変化することで再水浸する部分が生じたと思われるが、7.2kPaでは空隙内の圧力は全体的に増大するため再水浸が生じにくくなり、空気部分ボクセルの多くが連続する結果になったと思われる。

5. まとめ

飽和させた豊浦標準砂に対して、段階的に圧力を上げて送気した際の空隙中の様子をX線CTで可視化し、流動挙動を考察した。その結果、送気圧が2.0kPaでの気みちの形成や、7.2kPaまで圧力を増加させる過程で気みちの再水浸が生じて独立気泡が形成されるなど、水-空気の二相流における詳細な流動挙動を把握できた。今後の課題として、本実験の空隙部分を直接的にモデル化したポアスケールでの二相流解析を行い、試験結果の数値解析による再現性を検討することが挙げられる。本研究の一部は(独)日本学術振興会の科学研究費助成事業(課題番号17H01291)による助成を受けたものである。

参考文献 1) 地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説(第一回改訂版), 2020. 2) 増岡健太郎ほか: 空隙スケールの水-空気混相流解析による砂質土の毛管圧曲線の推定, 令和3年度土木学会全国大会, III-125, 2021. 3) Buades, A., et al., Nonlocal Image and Movie Denoising. Int J Comput Vis 76, 123-139, 2008. 4) S. Beucher and F. Meyer: The morphological approach to segmentation, the watershed transformation, Mathematical morphology in image processing, chapter 12, pages 433-481, 1993.