

多孔質体中の水—空気界面挙動に関する室内試験と再現解析

大成建設（株） 正会員 ○増岡 健太郎，正会員 山本 肇
海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 正会員 松村 聡， 水谷 崇亮

1. はじめに

近年，X線CTを地盤・岩盤工学の研究に利用する事例が増加している。X線CTを利用すると，土や岩石の内部を三次元かつ非破壊で観察することが可能である。地下水に関係する研究事例としては，X線CTで土や岩石内部の空隙構造を抽出し，その構造形態を直接的にモデル化して流体解析を行う事例がある¹⁾（空隙スケール解析）。空隙スケール解析を行うと，実際の試験の実施や測定が困難な事象に対して，コンピュータ上で検討することが可能になる。本稿では，空隙スケール解析が実際の現象をどの程度まで再現可能であるかの検証を目的とし，ガラスビーズ（以降GB）を充填したカラムに対して給排水させた際の水—空気界面の挙動をX線CTで撮影し，解析結果と比較した事例を報告する。

2. 多孔質体中の水—空気界面の可視化試験

2-1. 試験方法

試験装置の概要を図1に示す。内径4mm，長さ20mmのアクリルカラムに直径約1mmのガラスビーズを充填した。カラム下端には内径約1mmのテフロンチューブを接続し，ペリスタルティックポンプを経由してカラム下方から水（蒸留水）の供給と排出を行えるものとした。

試験手順として，はじめにカラム内に水が無い状態からガラスビーズをほぼ満たす程度まで淡水を供給し，その後排水した（流量約0.07mL/min）。試験はX線CT装置内でを行い，注水および排水中のカラム内部の様子をX線CTで撮影した。撮影のタイミングは，注水前，注水中（注水開始約32秒），注水完了（〃約57秒），排水中（排水開始約16秒），排水完了（〃約54秒）の5回とし，撮影中はポンプを一時停止させた。

X線CTの撮影条件を表1に示す。本研究で使用したX線CTの仕様については，松村(2015)²⁾を参照されたい。

2-2. 試験結果

CT画像の一例として，注水中と排水中の画像を図2に示す。それぞれ

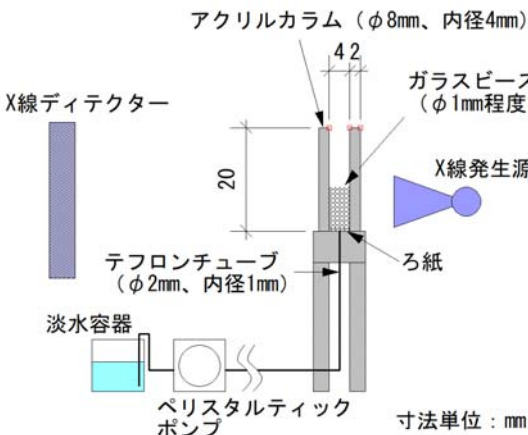
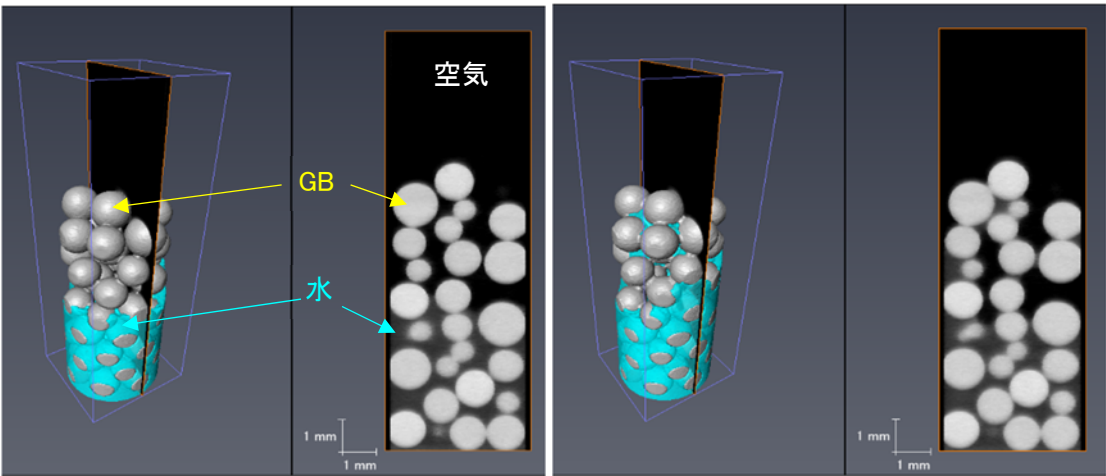


図1 試験装置概略

表1 主なX線CT撮影条件

X線管電圧	80 kV
X線管電流	90 μA
画像マトリックス	1504×1504
解像度	13.614 μm



(A) 注水中[注水開始約32秒後] (B) 排水中[排水開始約16秒後]
図2 CT画像(左)と三値化(水，空気，GB)による三次元画像(右)

キーワード 地下水，空隙スケールモデリング，混相流解析，X線CT，不飽和土

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 045-814-7217

右図はフィルター処理後の CT 画像, 左図は水・空気・GB で分離した三次元画像である (CT 画像断面を重ねている)。各図とも, 水と空気の界面位置は水平にならず, 空隙形状と毛管力によって複雑な界面形状になることが確認できる。また, 排水過程においてはヒステリシスを確認できる (図 2-B)。

3. 空隙スケールモデリングによる可視化試験の再現解析

3-1. 解析方法

解析コードには構造格子系の熱流体シミュレーションコード (STREAM [株]ソフトウェアクレイドル) を用いた。図 3 に注水前の CT 画像から空隙構造を抽出して作成したモデルを示す。カラム下面位置 (図中 Z 軸方向プラス側) には, チューブの内空断面積に合わせた $0.89\text{mm} \times 0.89\text{mm}$ の正方形の流量境界面を設けている。カラム上面側には便宜的に直方体空間を介して圧力固定境界面を設けた。なお圧力固定境界面は, 空気のみが流入出できる条件とした。解析で与えるガラスビーズおよびアクリル面での水の接触角は, 試験 CT 画像より約 60° とした。

3-2. 解析結果と考察

注水中と排水中における水と空気の分布を図 4 に示す。青色は解析格子が水で満たされた部分, 赤色は空気で満たされた部分, 赤と青の境界が水と空気の界面になる。各図とも, 図 2 と等しい断面位置での出力画像である。注水中の界面の様子 (図 4-A) は, 図 2 の試験結果とおおむね合致しており, 毛管力による界面形状が数値解析で再現できている。また図 4-B (排水中解析結果) の四角で囲った部分は, 試験において毛管力によって水が残留した (ヒステリシス) 部分である。排水中の解析結果は, 試験における界面形状を完全に再現するまでではないが, 試験と同様に水が残留する結果が得られた。以上より, 本研究のように比較的単純な材料であれば, 空隙スケールでの多相流解析によって多孔質体中の水-空気界面挙動をおおむね再現できる可能性を確認できた。

4. まとめ

空隙スケールでの多相流解析の検証を目的として, ガラスビーズを充填したカラムに給排水した際の水-空気の界面形状を X 線 CT で可視化し, 再現解析を行った。その結果, 比較的単純な材料であれば, 数値解析によってヒステリシスまで考慮して試験結果の再現がある程度可能であることを確認できた。今後の課題として, 粒子形状や粒子表面がより複雑な実地盤材料における同様の検証が考えられる。なお, 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) Blunt, J. M., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A. and Pentland, C.: Pore-scale imaging and modelling, *Advances in Water Resources*, Vol.51, pp.197-216, 2013. 2) 松村聡, 水谷崇亮, 篠永龍毅: マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いた地盤工学への新たなアプローチ, 港湾空港技術研究所資料, No.1313, 2015.

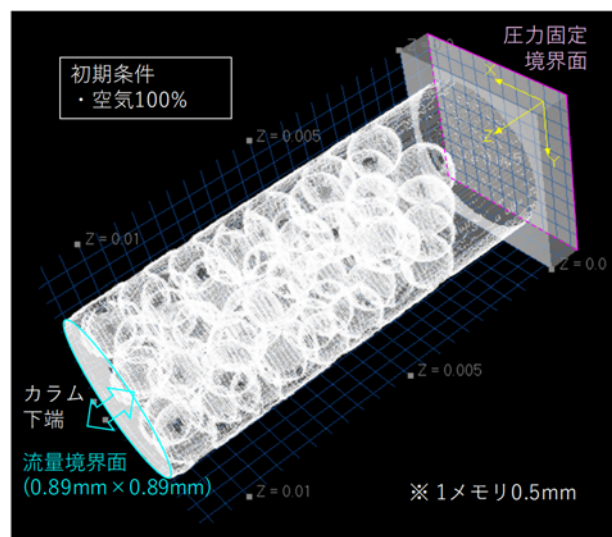
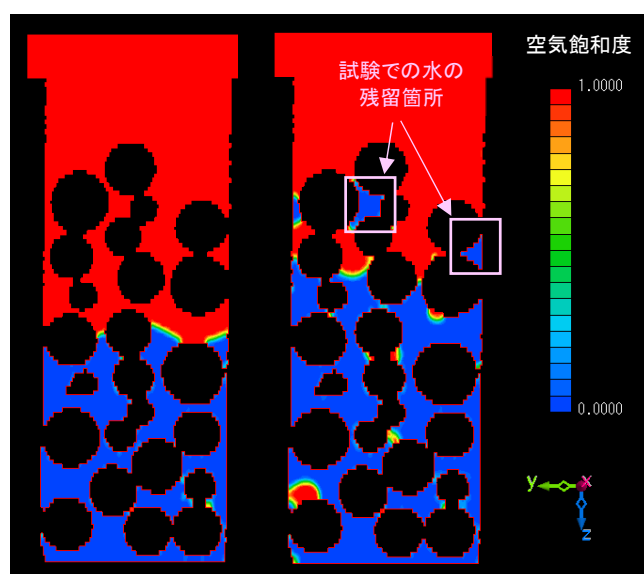


図 3 解析モデル



注水開始約 32 秒後 排水開始約 16 秒後
(A) 注水中 (B) 排水中

図 4 解析結果 (水[青]と空気[赤]の分布)