

豊浦砂空隙中の気液二相流シミュレーションの検証

大成建設（株） 正会員 ○増岡 健太郎

1. はじめに

著者は、室内実験を補完する技術として、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、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¹⁾。本稿では、豊浦砂を用いた室内実験との比較により、空隙中の気液二相流シミュレーションについて検証した結果を述べる。

2. 方法

2-1. X線CTを用いた気液二相流の可視化実験

シミュレーション検証用のデータ取得を目的に、水で飽和した豊浦砂に空気を流入させて排水させる室内実験を実施した。実験装置の概略と外観写真を図1に示す。脱気水で飽和した豊浦砂の供試体を内径4mmの亚克力カラム内に作成した。供試体の高さは10mmで、後述するCT画像の画像解析から求めた空隙率は約38%である。供試体の下端には背圧として1kPaを作用させた状態で上端側の圧力を1kPa以上に上昇させ、所定の圧力差で供試体上方より空気を流入させ、供試体下方から排水させた。排水が完全に止まったことを目視で確認後、供試体下方のバルブを閉じ、X線CT撮影（解像度約13 μ m）を行った。上記手順を繰り返して段階的に上端側の圧力を上げ、各圧力段階での飽和度をX線CT画像から求めた。飽和度および空隙率に関しては、CT画像に対して、non-local mean filter²⁾を用いてノイズを除去し、marker based watershed 法³⁾により、水、空気、土粒子でCT画像を三値化することで求めた。

本実験で得られた供試体上下端の差圧と飽和度のプロットを図2に示す。本実験では、差圧が1kPa～2kPa、5kPa～8kPaとなった際に飽和度は大きく低下した。一方、2kPa～5kPaでは排水がほとんど生じない結果となった。なお、差圧3kPaにおいて飽和度が増加したのは、CT画像より、供試体下端のナイロンメッシュ下に生じたメニスカス水が供試体に再浸潤したためと考えられる。差圧2kPaでの排水終了時のX線CT画像を図3に示す。空気によって水が押し出された部分が見られるとともに、多くの空隙に水が残留していることが分かる。

2-2. 気液二相流シミュレーション

室内実験との比較により豊浦砂空隙中の気液二相流シミュレーションを検証するために、解析モデルの空隙形状と実験供試体の空隙形状が可能な限り同じとなるように、前述した三値化画像を用いて三次元モデルを作成した。ただし、本計算では計算負荷量の制約から、モデル（空隙部）の最小格子幅を60 μ mとした。本計算で作成した解析モデルを図4に示す。解析モデルでは供試体の空隙部分と供試体上下の空間をモデル化し

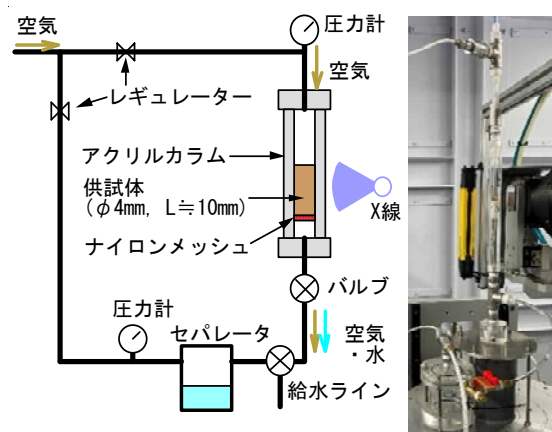


図1 実験装置の概略と外観写真

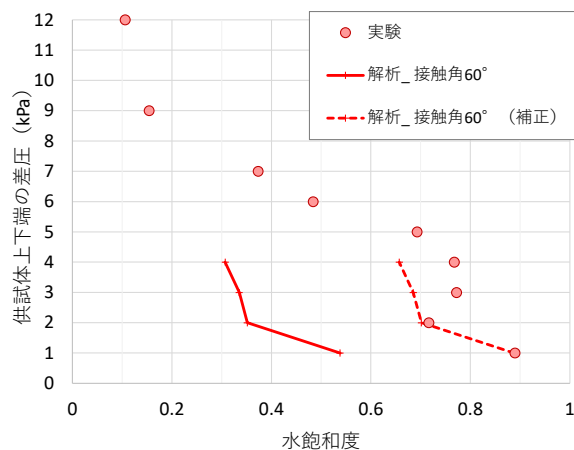


図2 飽和度と圧力の関係

キーワード 空隙スケールモデリング, 気液二相流, X線CT, 不飽和流, 地下水流動解析

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1

大成建設株式会社 技術センター TEL045-814-7221

た。図のようにモデルの上下端面には圧力固定境界を与えた。初期条件として送気前はすべての空隙が水で満たされている条件（水飽和度 100%）を与えた。その状態から、上下端面の境界条件を実験と同じ差圧となるように圧力固定条件とした。供試体部分の飽和度変化が小さくなった後に下端面の境界条件については不透水条件に変更し（実験のバルブ閉鎖に相当）、供試体部分の飽和度が一定となった時点そのステップでの排水終了とした。そして、その排水終了時の状態を初期条件とし、上下端面の境界条件を次ステップの値に設定して計算を行った。各差圧での排水終了時の飽和度を図 2 に示す。図に示すとおり、差圧が 1kPa の飽和度に関して、解析結果は実験結果よりも約 35% 小さい値となり、大きく異なる結果となった。しかし、差圧を 1kPa から 2kPa に増加させた際の飽和度の低下量は、解析結果と実験結果で同程度となった。図 5 に差圧 2kPa における空隙内の水と空気の分布を縦断面で示す。差圧を 3kPa, 4kPa に増加した場合、空隙内は主に空気が流れ、空隙に残留する水は実験と同様に排水されにくい結果となった。

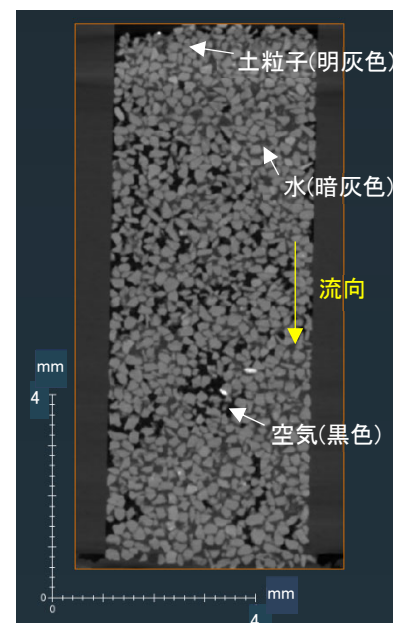


図 3 X 線 CT 画像(差圧 2kPa)

3. 考察

飽和度の絶対値に関して、解析結果は実験値よりも大幅に低い値を示した。この原因として、作成したモデルの解像度が影響していると考えられる。CT 画像の解像度は約 $13\mu\text{m}$ であるのに対して、モデルでの最小格子幅は $60\mu\text{m}$ であり、解析モデルが供試体空隙のスロート部を十分に反映できずに、実験で排水されない部分の水がシミュレーションでは排水された可能性が考えられる。流体を水のみとした単相流での計算を行い、計算結果から得られる圧力差と流量から供試体の透水係数を求めると $4.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ であり、河野・西垣 (1981)⁴⁾ の実験値（空隙率：43%，透水係数： $2.08 \times 10^{-4} \text{m/s}^4$ ）より高い結果となった。このことから、モデルの最小格子幅が本解析結果と実験結果の違いに影響を与えた可能性が考えられる。また、解析では土粒子表面に吸着する水が考慮されておらず、それらによる接触角などへの影響も原因の一つと考えられる。したがって、差圧を 1kPa から 2kPa にした際に排水された水は、モデルの最小格子幅の影響が小さい比較的大きな空隙に残留した水が排水した分と考えられ、実験結果と解析結果での飽和度の減少量は同程度になったと考えられる。参考として、解析結果飽和度を 1kPa での差異分（35%）シフトした結果を図 2 に示す。

4. まとめ

水で飽和した豊浦砂に対して段階的に圧力を変えて空気を流入させて排水させる室内実験を行い、同実験結果との比較により、豊浦砂空隙中の気液二相流シミュレーションについて検証した。その結果、供試体上下端の差圧を 1kPa から 2kPa に変化させた際の飽和度低下量は、実験と解析で同程度となった。また、差圧を 3kPa, 4kPa に増加させた場合についても、実験と解析で排水量が少なくなる同様の傾向を示した。一方で、飽和度の絶対値については、解析結果は実験値より低い結果となり、解析モデルの最小格子幅が影響したと考えられた。今後の課題として、実験結果の再現に必要な最小格子幅とモデル規模の検討や土粒子表面の水の取り扱いなどが挙げられる。

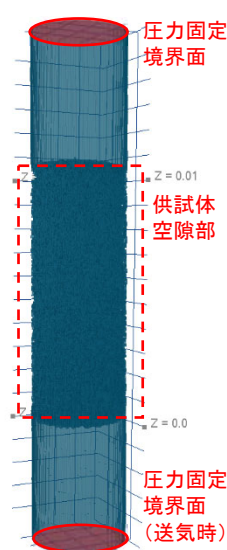


図 4 解析モデル

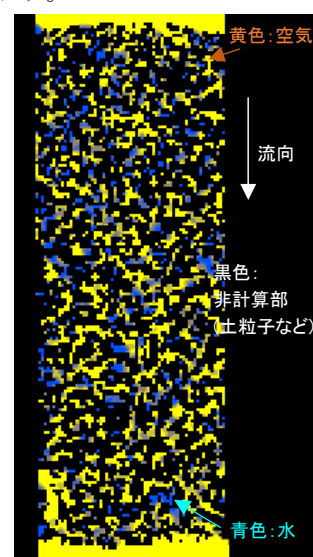


図 5 解析結果(差圧 2kPa)

参考文献 1) 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. 2) Buades, A., et al., Nonlocal Image and Movie Denoising, Int J Comput Vis 76, 123–139, 2008. 3) S. Beucher and F. Meyer :The morphological approach to segmentation, the watershed transformation, Mathematical morphology in image processing, chapter 12, pages 433-481, 1993. 4) 河野伊一郎ほか: 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 307, 1981.