

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

大成建設（株） 正会員 ○増岡 健太郎，正会員 熊本 創，正会員 山本 肇

1. はじめに

土壌地下水汚染，LPG 地下貯留，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，流体の飽和度とサクションの関係を示す毛管圧曲線が必要となる。毛管圧曲線を求める方法は，水—空気であれば各種試験方法が基準化されているが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。本稿では，物体内部を非破壊かつ三次元で可視化できる 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毛管圧曲線を推定する検討を行った。

2. 方法

2-1. 解析モデルの作成

大成建設(株)技術センターが所有する高出力マイクロフォーカス X 線 CT 装置「ScanXmate-RD300WSSS900」²⁾を用いて測定した土粒子の分布形状に基づき，流体解析に用いる数値モデルを作成した。X 線 CT では，物体内部の X 線減衰量と関連する CT 値が，断層画像として所定の解像度で区分される領域（ボクセル）毎に出力される。一般的には，X 線の減衰が少ない部分（空気など）では黒色，減衰が大きい部分（土粒子など）は灰～白色で表示される。本研究では，内径 4mm，長さ約 20mm のアクリルカラムに 3 号珪砂を充填し，X

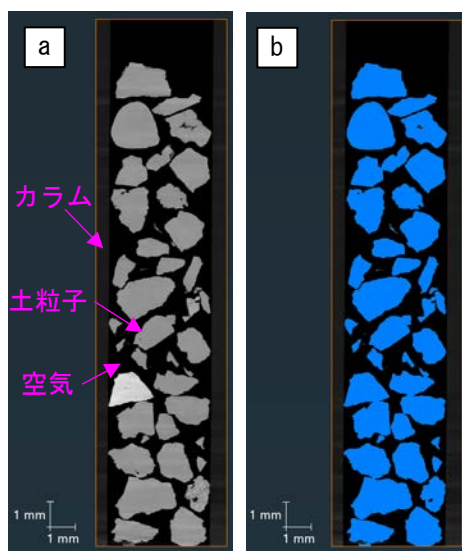


図 1 X 線 CT 画像(a)と土粒子範囲(b)

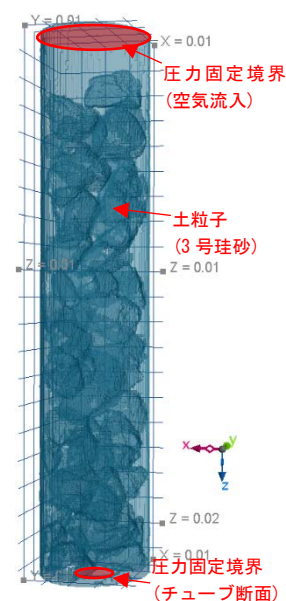


図 2 解析モデル概略

線 CT 撮影を行った。撮影で得られた X 線 CT 画像から，土粒子，空隙（空気），試験カラムの三値化画像を作成し，空隙部分のみを抽出した解析モデルを作成した。X 線 CT 画像を図 1-a に，同 X 線 CT 画像に土粒子の抽出領域を青色で示した画像を図 1-b に，作成した解析モデル（境界面を描画）を図 2 に示す。

2-2. 解析条件の設定

気液相界面と固相部分との間に生じる接触角は毛管力に影響する。毛管力を考慮した気液相界面を再現する解析を行う場合，接触角を適切に設定する必要がある。本稿では，前述のモデル作成時のカラム下方から水を一定量供給させた後の状態を X 線 CT で撮影し，X 線 CT 画像での気液相界面の観察から，アクリルカラム面に対する水の接触角を 60° ，土粒子面に対する水の接触角を 25° とした（図 3）。解析では，排水過程の毛管圧曲線を求めることを目的として，初期条件は全ての解析格子で水 100%の飽和条件とした。境界条件に関して，カラムの上下端を圧力固定境界とした（図 2）。なお，上端の圧力固定境界では，空気のみが流入する条件を与えた。その他の主な解析条件は，壁面はノンスリップ条件，流体物性には温度 20°C の値を用いた。計算は，下端圧力を初期圧力，上端圧力を初期圧力からの差圧として+50，100，200，300，400，500，1000，

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，毛管圧曲線，接触角

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

5000, 10000Pa としたケースで行った。

3. 解析結果

図4にケース毎の上端差圧と定常時の水飽和度をプロットした結果(毛管圧曲線)を示す。比較のため、土粒子接触角を 15° とした結果も合わせて示す。なお、図中の水飽和度は、

カラム下端から18.5mmの範囲に対する飽和度である(土粒子が充填されていないカラム上側部分を除くため)。各接触角ケースとも、カラム上端に与える差圧が100Pa程度以下の場合には毛管力によって空気が侵入できない状態となり、水飽和度はほとんど低下しない。しかし、差圧の増加とともに水飽和度は低下し(空気が侵入し)、水飽和度が0.04程度まで低下した後は、差圧をさらに増加させても水飽和度の低下量は小さくなり、最終的に一般的な砂質土に見られるS字状の毛管圧曲線が得られた。

図4の接触角 25° のケースの一部プロットにおけるモデル内の水の分布を図5に示す。差圧が100Paの場合、圧力が空気侵入圧に達しておらず、ほぼ飽和状態を示した。200Paの場合にはカラム途中まで空気が侵入し、300Paになると空気が上端から下端まで侵入した。1000Paではほとんどの水が排水されるが、一部は毛管力で残留した。

4. 考察

図4では、モデル上端で与える差圧が大きいケースで水飽和度が非常に小さくなった。その原因の一つとして、本検討では土粒子表面による吸水量を考慮していない(自由水のみを考慮している)ことが考えられる。また、接触角による毛管圧曲線の違いを考察するために、各接触角での水飽和度0.274での水分分布を鳥瞰図と断面図で図6に示す。大局的には、いずれも同様の水塊の分布を示すが、接触角が 25° のケースのほうが大きな水塊が形成されやすい傾向が見られた。理由として、接触角が大きいため、空隙幅が大きい位置でもメニスカスが形成されやすくなったためと思われる。

5. まとめ

X線CTを用いて珪砂カラム中の空隙をモデル化し、空隙スケールの水-空気混相流解析を行うことで、粒子形状が複雑な実地盤材料の毛管圧曲線を数値解析により推定できる可能性を示した。さらに、接触角が大きいほど排水過程での残留水量が多くなる傾向があることを数値解析により示した。今後の課題として、本手法による推定値と試験結果との比較や、接触角の違いによる水塊の形成メカニズムの詳細検討、土粒子径に対するモデルの大きさや解像度が解析結果に与える影響の検討などが挙げられる。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17H01360)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: マイクロフォーカス X 線 CT 試験装置の導入と活用例, 大成建設技術センター報 No. 53, 12, 2020. 3) Buades, A., et al., Nonlocal Image and Movie Denoising. Int J Comput Vis 76, 123-139, 2008.



(a) カラム壁面

(b) 土粒子壁面

図3 X線CT画像による接触角の測定例

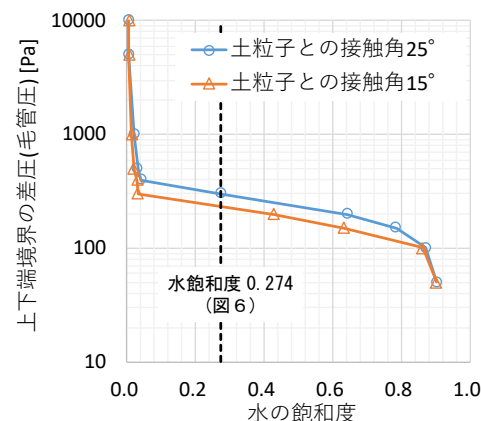
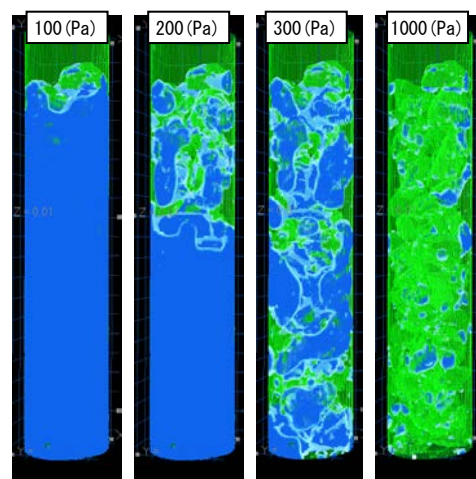


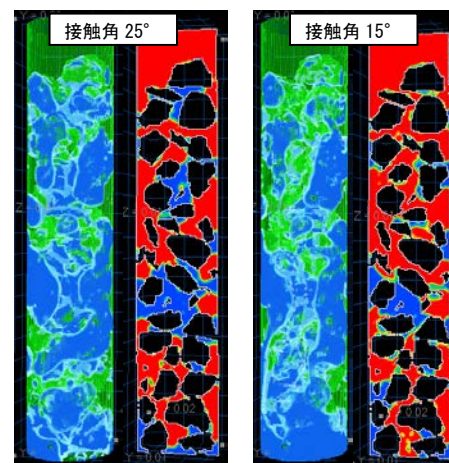
図4 数値解析で求めた毛管圧曲線



※モデル壁面を緑で描画

(接触角 25, 定常時, 青色部分: 水)

図5 差圧条件による残留水の違い



(差圧 300Pa, 飽和度 0.274, それぞれ右側は軸中心付近での断面図, 青色部分: 水)

図6 接触角による残留水の違い