

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

粒状材料を対象とした残留 LNAPL の流動特性に関する研究

熊本大学大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻 広域環境保全工学講座  
( 主任指導 椋木 俊文 准教授 )

論文提出者 塩田 絵里加

主論文要旨

近年多発する気候変動の影響による大規模災害の二次災害として油の地盤内部の流出問題が取り上げられるようになった。特に軽比重難水溶性液体(Light Non-Aqueous Liquid: 以下 LNAPL)における地盤内部への浸透挙動では地下水の上下運動により間隙中に残留する現象が確認されている。この状態を“トラップ”と呼び、トラップされた LNAPL は帯水層にわずかながら溶解することで長期的な汚染源となるといった問題を孕んでいる。このトラップ現象はその起動力として対象地盤が有する毛管力が影響しており、それを誘引するのが間隙構造であることが知られている。そのため、水のような濡れ相(Wetting)と LNAPL のような非濡れ相(Non-wetting)間に作用する不飽和浸透特性を適切に評価することが求められる。

1990 年代以降における X 線 CT の登場・発展により地盤材料内部を非破壊で観察できるようになり特にマイクロ X 線 CT スキャナによる CT 画像を用いることで間隙内部における流体现象の挙動を究明するための様々な解析が行われている。さらに、コンピュータを用いた演算性能の向上や大容量化によって、数値解析による複雑な計算が可能となっている。特に格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Model: 以下 LBM)を用いた間隙内部の流体现象の評価では、CT 画像を境界領域として複雑な演算を行うことが可能となっている。そこで本研究では、LNAPL の浸透挙動に深く関わる不飽和浸透特性の評価と LNAPL のトラップ挙動に着目し、LNAPL として Paraffin を用いた保水性試験を行い、マイクロ X 線 CT 画像解析と LBM による数値解析手法を用いてトラップ LNAPL の流動特性の評価を行った。

第 1 章では、研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、日本における油汚染対策の工法を概説するとともに、地盤内部の NAPL 挙動における既往研究をまとめた。また X 線 CT 撮影装置を用いた NAPL の浸透挙動の可視化研究とそれに伴う画像・数値解析技術について詳述した。

第 3 章では、基本的な地盤内部の浸透挙動を表す浸透流方程式に焦点を当て、その理論

と定義について概説した。また対象とした水-LNAPL の流動挙動が、不飽和領域における水-空気における挙動と類似していることから、不飽和浸透流方程式について概説し、さらに現在最も一般的に用いられる不飽和透水係数推定法である Mualem の式について詳述した。この Mualem の式を用いるために必要なパラメータとして体積含水率が挙げられるが、この体積含水率は保水性試験から得ることができる。一方で、保水性試験は長期的な試験を行う必要があるため、今日では様々な水分特性曲線推定法が提案されている。よって、その代表例について詳述した。さらに、LNAPL の浸透問題を検討する上で重要な物理的パラメータである接触角や LNAPL のトラップ現象についての式を提示するとともに詳述した。

第 4 章では、本論文で使用した保水性試験装置について詳述し、本論文の対象試料である 3 つの粒状材料(豊浦砂, 珪砂 5 号, 粉碎したガラスビーズ(以下 CGB) )についての諸元をまとめた。また、本論文で使用したマイクロ X 線 CT スキャナ装置について、X 線 CT 撮影の原理や理論について詳述し、さらに撮影時に必要となる撮影条件や撮影時における留意点についてまとめた。この時、福島が提案した推奨画素寸法の式から、後述する VP 解析手法の精度を保つことができる推奨画素寸法を決定した。その結果豊浦砂では  $6\mu\text{m}$ 、珪砂 5 号と CGB では  $10\mu\text{m}$  の領域を満たす領域を撮影領域とすることを決定した。

第 5 章では、CT 画像に含まれるアーチファクトなどのノイズの問題に触れ、CT 画像解析を行うためのノイズ除去処理の手法や画像領域内におけるヨウ化カリウム(以下 KI)水溶液や Paraffin などの各相の分離を行うための多値化処理手法などの CT 画像解析手法について詳述した。また、ミクロ領域における解析を行うために定義した代表要素体積(REV)の決定手法を概説した。

第 6 章では、本論文で使用した LBM の理論についてその前身である格子気体法から概説した。また LBM がマクロ領域における流体挙動を担保している証明として Navier-Stokes 方程式を満たすことを詳述している。さらに、LBM 解析を行う際の境界条件の設定法や 2 相流 LBM のモデルである Shan-Chen モデル特有のパラメータである物体力の定義について概説した。

第 7 章では、対象としている粒状材料の不飽和浸透特性を検討するために、第 4 章で詳述した保水性試験を用いて、各粒状材料における水分特性曲線を求めた。また、保水性試験供試体に対してマイクロ X 線 CT スキャナ装置を用いて内部構造を可視化し、画像解析を実施することで、本研究で開発された Voxel Percolation 法(以下 VP 法)の排水過程についての解析における妥当性検証を行った。さらに、珪砂 5 号を用いた実験と VP 解析結果を用いた 1 相流 LBM 解析を行うことによって、Mualem の不飽和透水係数の推定法に依らない不飽和透水係数の算定を行った。

- (1) 解析領域を決定するための REV 解析では、すべての粒状材料に対して  $600 \times 600 \times 600$  voxel 以上の領域を設定すべきであることが明らかとなった。

- (2) 排水過程における VP 解析(Drain VP 以下 D-VP)で求められた各毛管圧力水頭の体積含水率の変化を示した画像と実験で得られた CT 画像と比較したところ、飽和度が増加するにつれて両画像の一致率が 80%に達するほど増加する傾向が得られていることが分かった。
- (3) CT 画像から求めた不飽和透水係数と D-VP 結果画像を用いた不飽和透水係数の曲線は、ともに Mualem から推定した不飽和透水係数の曲線と近い値をとる結果となった。この結果から、D-VP から得られた結果は排水現象を的確に再現できていることを裏付けることができる結果であるといえる。

第 8 章では、吸排油試験を用いて間隙内部に発生する Paraffin のトラップ挙動の再現をおこない、マイクロ X 線 CT スキャナ装置で内部構造を可視化した。また、得られた CT 画像に対して画像解析を適用することで、Paraffin の残留量の定量評価を行った。

- (1) 吸排油試験結果より、KI 水溶液-Paraffin における吸排水挙動は、KI 水溶液-Paraffin 間に働く接触角と界面張力の影響を受け、各粒状材料全体で水-空気における排水挙動よりも 10.5cm ほど低い毛管圧力水頭で挙動が進行している傾向が得られた。
- (2) 吸水終了点における間隙内部の Paraffin の残留量の割合を計算すると、豊浦砂では 12.26%、珪砂 5 号では 19.59%、CGB で 33.56%となった。排水終了点から最大で 3 割ほどの Paraffin が残留していることから、間隙内部の残留量とその割合は粒径に比例して残留量が増加することが言える。また、Paraffin における間隙径のトラッピング挙動は、全間隙径における最頻値の間隙径から 60 $\mu$ m~100 $\mu$ m 大きい間隙領域から増加することが分かった。
- (3) 吸水過程においてもトラップし続けた領域を不動 Paraffin 領域と設定し、その体積を算出すると、珪砂 5 号では約 12%が不動 Paraffin 領域となっていることがわかり、また不動 Paraffin 領域を形成している間隙径は 170 $\mu$ m に集中していることが分かった。
- (4) D-VP において豊浦砂と珪砂 5 号では実験値とは異なる毛管圧力水頭を取得していた。ことから接触角の検討を行ったところ、粒状材料中を浸透する Paraffin の接触角は、測定値よりも小さくなることが分かった。また平均粒径が大きくなるほど接触角は測定値の値に近づくことが分かった。
- (5) 吸水過程における VP 法(Imbibition VP 以下 I-VP)の改良を行い、その精度検証を行った。その結果、I-VP の解析では、I-VP で求められた吸水過程における水分特性曲線は対象とする粒状材料の間隙径分布に依存した吸水挙動となることが分かった。また、CT 画像と I-VP 画像を比較すると、I-VP 画像ではトラップする領域を 170 $\mu$ m 以上の間隙と設定して解析を行ったため、170 $\mu$ m 以下の領域ではトラッピング挙動を過小評価する解析結果が得られたが、実験における CT 画像との一致率は常に 40~50%を保つことができることから、Paraffin のトラップ領域を事前に検討できる非常に有効なツールであるといえる。

第 9 章では第 7 章で得られた KI 水溶液-Paraffin による水分特性曲線の結果を使用し、Paraffin の再流動化条件についての検討を行った。このとき、第 7 章で得られた水分特性

曲線を利用することによって、Paraffin の再流動化のための圧力条件を検討した。

- (1) 珪砂 5 号の場合、圧力差 $\Delta P > 0.031$  を定義することで、Paraffin の再流動化シミュレーションを実施することを決定した。
- (2)  $\Delta P > 0.031$  を満たさない条件では、不動 Paraffin は再流動化しないことが確認でき、一方、 $\Delta P > 0.031$  の条件下で二相流 LBM 解析を行うと、不動 Paraffin 領域が流動することが確認できた。
- (3) 得られた再流動化挙動は、流速分布が大きい領域に Paraffin が引っ張られる形で再流動化する傾向があり、流速分布に大きく依存する挙動となることが言える。
- (4) 再流動化した Paraffin の挙動は、地盤内部の LNAPL の挙動とは相反して、間隙径が小さな領域へと進行する挙動が確認された。キャピラリー数を確認すると、 $Ca = 8.0 \times 10^{-2}$  となっていたことから、圧力条件下における Paraffin の流動は Capillary Fingering の流れではなく、Viscos Fingering 現象によって高粘度の Paraffin を低粘度の KI 水溶液が押し流す挙動となっていることが分かった。

第 10 章では各章で得られた成果をまとめ、本論文の結論を述べた。

以上