

異なる温度条件下における多孔質体内の LNAPL 浄化挙動の評価

熊本大学工学部 学生会員 ○竹中 亮 熊本大学大学院 学生会員 塩田 絵里加
熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文 熊本大学技術部 非会員 吉永 徹

1. はじめに

砂質系地盤における軽比重難水溶性液体（以下：LNAPL）による汚染浄化対策には、空気や水を注入し滞留した LNAPL を回収する方法がある。砂質系地盤内に滞留した LNAPL を効率的に回収するためには、砂の間隙構造と、流体の流動特性および注入する流体と LNAPL との力学的な相互作用を把握することが重要である。著者らは有効な浄化対策のために LNAPL の地盤内の挙動を解明することを目的として、注入実験とマイクロ X 線 CT 撮影を用いて多孔質体における温度による LNAPL の挙動の変化に関する研究に着手している。本概要では、20 度と 60 度の環境下において LNAPL 飽和砂供試体中へ水注入実験を実施し、マイクロ X 線 CT を用いて供試体内部の LNAPL の回収量を定量評価したので報告する。

2. 注入実験

図 1 は、実験装置の外観である。供試体には LNAPL で飽和した豊浦標準砂を用い、LNAPL として揮発性が小さいイソパラフィンを用いた。注入する流体は CT 画像の輪郭を強調するために重量パーセント濃度が 30%に調整したヨウ化カリウム水溶液（以下：KI）を用いた。供試体内の流体は、図 1 に示す供試体圧力容器上部から押し出され、精密天秤により回収量を計測した。作成した供試体の寸法は高さ 18.6cm、直径 0.1cm、体積 14.61cm^3 で乾燥密度 $\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$ 、相対密度 $D_r = 71.9\%$ 、間隙率 42.8%とした。20℃のときの試料の物性値を表 1 に示す。温度の設定は 20℃、60℃の 2 ケースとした。KI の注入流量は 25ml/h、注入時間は 5000sec とした。質量は精密天秤により 2sec 毎に記録し、実験中の水温、制御層内の気温は温度計により観測した。

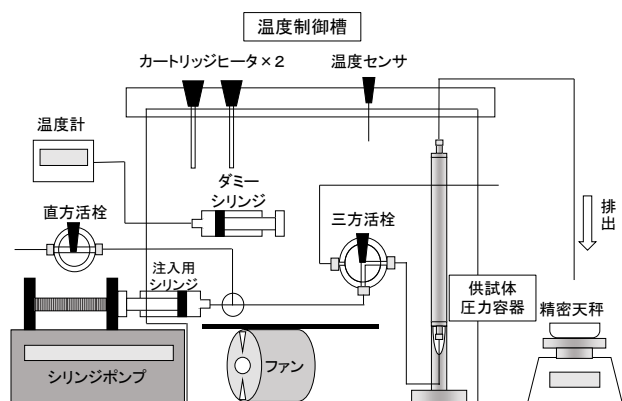


図 1 実験装置概観図

3. CT 撮影と画像解析

CT の撮影は供試体中央部付近を、供試体作成直後の初期状態と、注入実験終了後の計 2 回行った。撮影した画像から砂鉄、土粒子、KI、LNAPL の CT 値の閾値を設定し、それぞれ 4、3、2、1 として 4 値の画像とする。4 値化した画像に対して Mukunoki²⁾らが提案したモルフォロジオープニング処理を元にした画像解析手法を適用し、3 次元間隙径分布を求める。注入前の画像に解析処理を行うと供試体の間隙分布が分かり、注入後の画像の解析を行い LNAPL のみを抽出することで、LNAPL が残留している間隙の大きさが分かる。これにより残留する LNAPL の間隙径に対しての温度変化の影響を評価することができる。

4. 結果

4.1 注入実験結果

注入実験の結果を図 2 に示す。注入開始直後は回収される流体は LNAPL のみであり、KI の回収が始まると回収質量の直線の傾きは大きくなる。図 2 中の傾きの変化点は KI の回収開始時間を意味している。20℃の場合では KI 回収までの経過時間が 811sec で、回収質量が 4.126g であった。また 60℃の場合では経過時間が 592sec で回収質量が 3.012g であった。飽和条件より、供試体全体に含まれる LNAPL は 4.676g である。KI の回収が始まるまでに 20℃では 88.2%の LNAPL が、60℃では 64.4%の LNAPL が回収されたことになる。また、LNAPL の回収が終わると KI のみが回収されるようになり、最終的な回収質量が小さいほど、密度の小さい LNAPL の回収量が多いことになる。注入開始から 5000sec 経過し実験を終了したとき、20℃では回収質量は 40.807g であり、60℃では 41.872g であった。

試料	豊浦砂	LNAPL	水	KI
密度(g/cm ³)	2.64	0.746	0.998	1.25

表 1 試料の物性値

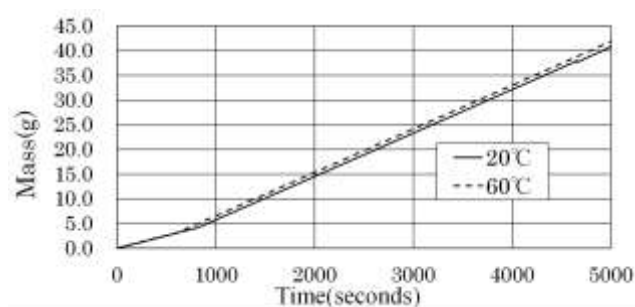


図 2 注入実験結果

4. 2 画像解析による評価

図3、図4は、撮影したCT画像と、4値化した画像である。画像解析の結果、20℃の条件下ではKIの注入により94.7%のLNAPLが回収されており、KIの回収が始まる前にすでに回収量全体の93.2%が回収されていたということがわかった。同様に60℃の条件下ではKIの注入により74.7%のLNAPLが回収されており、KIの回収が始まる前にすでに回収量全体の86.6%が回収されていたということがわかった。

図5は、画像解析により評価されたLNAPLが存在する間隙の間隙径とその体積を求め、供試体全間隙体積に対しての比を各粒径ごとに示したものである。20℃、60℃ともに注入前のヒストグラムから、42~78μmの間隙径にLNAPLが多く分布していることがわかった。また、図6は各温度条件下における間隙径ごとの残留LNAPLの割合を表したヒストグラムである。注入後の残留量を比較すると、20℃ではLNAPLはどの間隙径でも全般的に残留が少ないが、最大の間隙径である174μmでは17.1%で、最も残留している。60℃では最大の間隙径である150μmでは51.9%残留している。これは温度の上昇により粘性と界面張力が低下することによって毛管力が低下し、注入口の条件に流動特性が支配されやすくなったと推測される。この結果、流動初期において局所的な流動領域が形成され、それがいわゆる「水ミチ」を形成し、60℃の条件下の方がLNAPLの回収率が悪い結果を生じたと考えられる。

5. 今後の課題

今後は、20℃と60℃の中間の温度でも同様の研究を行い粘度や界面張力の数値上の変化とその挙動への影響を定量的に検証していく。

謝辞

本研究は、平成27年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究C(研究課題番号:26420483 研究代表者: 椋木俊文)により行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1)Mukunoki,T. Tsukamoto,N. Sugimura,K. and Obara,Y.(2013) : Visualization of LNAPL in sandy soil due to air injection using micro X-ray CT, Proc.of the 7th International Joint symposium on Problematic Soils and geoenvironment in Asia program,pp67-70
- 2) Mukunoki,T. and Mikami,K.(2013) : Study on mechanism of two-phase flow in porous media using X-ray CT ImageAnalysis, Proc.of the 18th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering TC106 selected paper, pp1163-1166.

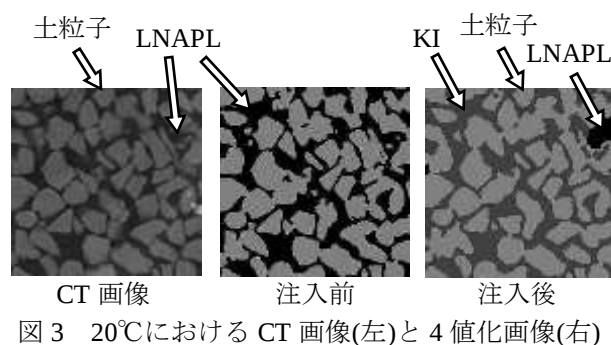


図3 20℃におけるCT画像(左)と4値化画像(右)

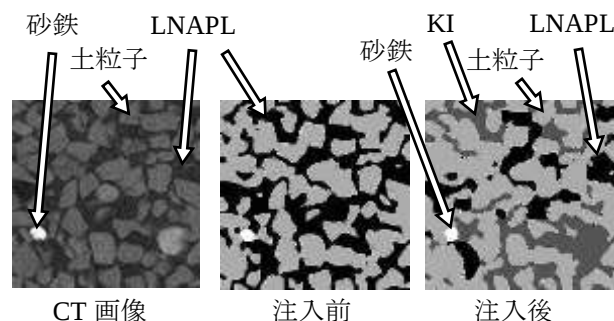
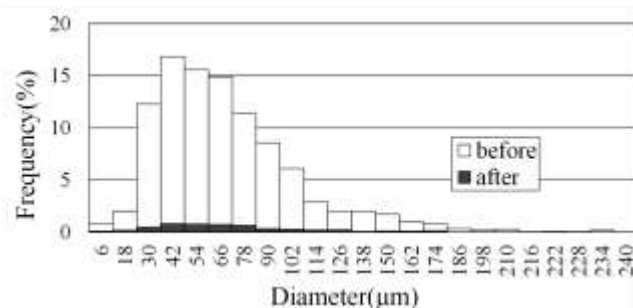
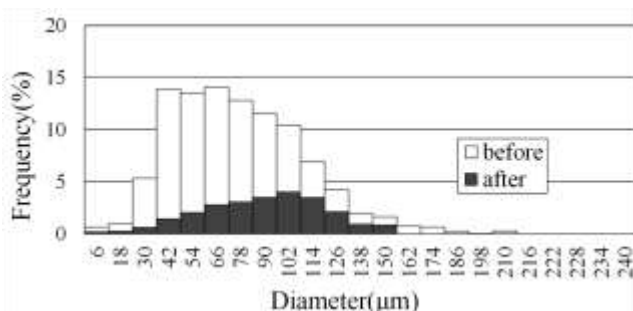


図4 60℃におけるCT画像(左)と4値化画像(右)



(a)20℃における残留LNAPLを有する間隙径分布



(b)60℃における残留LNAPLを有する間隙径分布

図5 LNAPLの3次元間隙径分布の変化

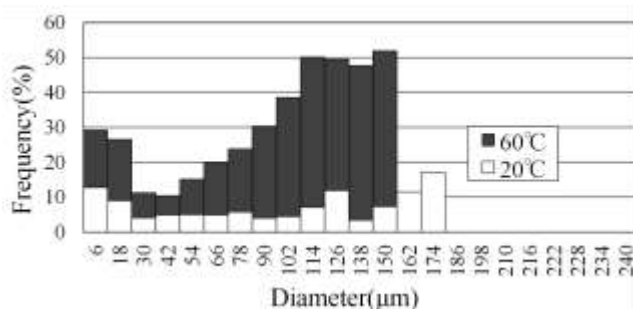


図6 残留LNAPLの割合