第 III 部門

砂質土における飽和度の繰返し変化が水と LNAPL の保持特性に及ぼす影響

京都大学大学院	学生員	○笠井	遥
京都大学大学院	FLOR	ES, Gianca	arlo
京都大学大学院	正会員	高井郭	女史
京都大学大学院	正会員	勝見	武

使用材料の物性

供試体条件

水

0.70

72

<u>低粘度パラフィ</u> 0.82

4.6

31.07

LNAPL LNAPL

3

0.83

38

4

0.70

72

蒸留水

1.00

1.0

72.75

表 1.

表 2

水

0.82

41

密度 $\rho$ (g/cm<sup>3</sup>)

動粘度ν(mm<sup>2</sup>/s)

表面張力 $\sigma$ (mN/m)

実験ケー

液相

間隙比 e

相対密度 Dr(%)

## 1. 背景と目的

石油系炭化水素に代表される水よりも密度の小さい非水溶性流体(Light Non-Aqueous Phase Liquid; LNAPL) は、不飽和層に流出した際に深刻な被害を巻き起こす汚染物質であり、地下水面に滞留し降雨浸透等による 地下水位変動によって拡散される。降水量の多い我が国で近年石油類の流出事故は多く発生していることか ら<sup>[1]</sup>、繰返し給排水条件下での拡散挙動の解明は重要である。飽和度一間隙圧(*S-p*)関係を用いた地盤内間隙 流体の動態評価では空気-水の二相系は多く研究されてきているが<sup>[2]</sup>、空気-LNAPL系での検討は十分でな い。本研究では水と LNAPL の二種類の液相の飽和度を繰返し変化させ、*S-p* 関係の変遷の様子を考察する。

## 2. 実験方法

**2.1. 使用材料** 固相には単一粒径(平均粒径 0.092 mm、土粒子密度 2.63 g/cm<sup>3</sup>)の豊浦砂を、液相には表 1 示す蒸留水と、LNAPL として低粘度パラフィンを使用した。内径 54 mm、高さ 30 mm のテンペセルを用い、

空気-水、空気-LNAPL の二種類の流体に対しそれぞれ緩詰 砂、密詰砂で計4ケースの供試体を表2のように作製し、デシ ケーター内で脱気し完全飽和させた。緩詰砂は水中落下法、密 詰砂はさらに5mm充填するごとに突き固めることで作製した。

ョン 10 kPa を超えると飽和度がほとんど変化せず一定の残留飽和度 *S<sub>ra</sub> を*とる<sup>[3]</sup>ことからこの時点で排水終 了とした。給水過程では間隙空気圧を大気圧に下げ、液圧の水頭差のみで供試体下部から浸潤させ、定常状 態の *p*=0時の最大飽和度 *S<sub>rf</sub>*を得た。排水、給水過程を合わせて1サイクルとし、*S<sub>rf</sub>*が変化しなくなるまで 給排水のサイクルを実施した。スケーリングには以下に示す van Genuchten<sup>[4]</sup>の式を用い、最小二乗法で近似 することで各サイクルの *S-p* 曲線を得た。

$$S_r(s) = S_{ra} + \frac{S_{rf} - S_{ra}}{\{1 + (\alpha | s|)^n\}^{1 - \frac{1}{n}}}$$

ここで、*S<sub>r</sub>*: 流体の飽和度、*s*: サクション、*S<sub>rf</sub>*: 最大飽和度、 *S<sub>ra</sub>*: 残留飽和度、*α*, *n*: スケーリング係数である。



## 3. 結果と考察

3.1. S-p関係 各ケースでの排水過程における S-p 曲線を図 2 に示す。LNAPL-緩詰のケースは 5 サイクル 目以降、それ以外のケースは 3 サイクル目以降、排水過程において段階的に間隙圧を変化させるのではなく 10 kPa の空気圧を一度に加え飽和度を変化させた。そのため排水前(前サイクルの給水後)の飽和度の値 S<sub>rf</sub> と排水後の飽和度の値 S<sub>ra</sub>を使い、スケーリング係数αとn繰返しサイクルの下で大きく変化しないという仮 定の下、曲線のみを描いた。まず、不飽和化が大きく進むサクションの値である空気侵入圧 P<sub>e</sub>は緩詰、密詰 どちらも液相が水で約 4 kPa、LNAPL で約 2 kPa となり、空気-LNAPL 系の方が S-p 曲線が下方にシフトし た。これはサクションに対し表面張力で侵入を妨げていた液膜が破れ空気の侵入が生じるため、表面張力の

Haruka KASAI, Giancarlo FLORES, Atsushi TAKAI and Takeshi KATSUMI kasai.haruka.74s@st.kyoto-u.ac.jp

小さい LNAPL の方がより小さい空気侵入圧を持つと 考えられる。また界面張力に依存して変化するスケー リング係数 $\beta$ は値が大きいほど *S-p* 曲線を下方に変化さ せるが<sup>[5]</sup>、*i-j* の二相系において $\beta_{ij} = \sigma^{*} / \sigma_{ij}$  ( $\sigma^{*}$ は空気-水間の表面張力、 $\sigma_{ij}$ は *i-j* 間の界面張力)と定義される ことから、 $\beta$ の値は空気-水系で 1、空気-LNAPL 系で 2.34 と大きくなり、得られた結果と一致した。

次にサクションの値が大きくなっても飽和度が変化 しない残留飽和度  $S_{ra}$ は緩詰、密詰どちらも液相が水で 約 0.11 であるのに対し LNAPL で約 0.14 と大きくなっ た。これは密度と粘性で定義される動粘度vが LNAPL のほうが大きく、間隙中の流体の透過性を表す、k = g/v・  $k^*$  ( $k^*$ は透水係数) で定義される固有透過率kの値が小 さいため流動性が低く間隙中にトラップされやすいこ とに起因すると考えられる。

3.2.  $S_{rf}$ のサイクル変化 各サイクルの給水後の最大飽 和度  $S_{rf}$ の変化を図3に示した。全てのケースで段階的 な変化を見せ、定常値に達したため、 $S_{rf}(N) = (1 - S_{rf}^{*})e^{-\lambda N} + S_{rf}^{*}$ 、(N はサイクル数、 $S_{rf}^{*}$ は  $S_{rf}$ の収束値、 $\lambda$ はスケーリング定数)で表され る指数減衰の式でフィッティングした。まず液相の種類で比較する と、 $S_{rf}^{*}$ の値は LNAPL の方が大きくなり飽和度が繰返し給排水下で 戻りやすい結果になった。ヒステリシスの原因として排水、給水過 程で接触角が異なることが挙げられ<sup>[6]</sup>、空気-水系よりも空気-LNAPL 系の方が前進接触角と後進接触角の差が小さいということ が考えられる。次に充填密度の影響を考える。 $\theta_{v} = e \cdot S_{r}$ で表される 体積含水率 $\theta_{v}$ とサクションの関係を異なる初期間隙比で調べた実



験<sup>[7]</sup>では排水後と給水後のθ,の値の差は緩詰の方が大であった。しかし本結果では緩詰、密詰の S<sub>rf</sub>\*の値の比 と初期間隙比の逆比がおおよそ一致し、給排水過程でのθ,の収束値の差はわずかに密詰の方が大きかった。 この原因は本実験では体積変化を考慮できていないためと考えられるが、サイクル変化に応じて緩詰の方が 大きく体積変化し間隙比の減少が大きいとすれば整合性が取れる。よって供試体の体積変化を考慮した場合 には、使用流体が同じであれば緩詰、密詰間の S<sub>rf</sub>\*の値の差は相対的に小さくなると考えられる。

## 4. 結論

豊浦砂を用いた空気-水、空気-LNAPL の二相系の異なる間隙比での給排水試験の結果、LNAPL は表面張力が 小さいことから空気侵入圧が低く*S-p*曲線が下にシフトし、動粘度が高いことから土粒子間隙での流動性が低くトラップ されやすいことが明らかになった。また飽和度を繰返し変化させると段階的に最大飽和度は低下し定常に達し、完全 飽和の状態との差は LNAPL の方が小さく、給排水過程で接触角の違いが影響したと考えられた。加えて本実験では 考慮されなかった体積変化を見れば、充填密度に関わらず液相に応じて決まった飽和度に収束すると推察された。今 後、初期供試体条件に応じたサイクル変化に伴う最大飽和度の定式化を目指す必要がある。

# 参考文献

[1] 総務省,平成29年中の危険物に係る事故の概要, 2018. [2] Brooks and Corey, *Trans. ASAE*, vol. 7, no. 1, pp. 26–28, 1964.
[3] Fredlund and Xing, *Can. Geotech. J.*, vol. 31, no. 4, pp. 521–532, 1994. [4] van Genuchten, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 44, no. 5, pp. 892–898, 1980. [5] Lenhard and Parker, *J. Contam. Hydrol.*, vol. 1, no. 4, pp. 407–424, 1987. [6] Dullien *et al.*, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 127, no. 2, pp. 362–372, 1989. [7] Hong *et al.*, *Materials (Basel).*, vol. 9, p. 1019, 2016.