

不飽和砂質土への灯油の浸透機構に関する実験とシミュレーション

東海大学大学院 学生会員○森實 浩之
東海大学 正会員 本間 重雄

1. 研究背景

近年、国内各地で油による地盤汚染が多く発覚し、その対策が問題となっている。汚染の原因としては廃油等の不適切な処理処分や、ガソリンスタンド跡地などでの地下タンクからの漏洩による汚染などが考えられる。本研究では地盤中への油の浸透機構を明らかにするために、鉛直カラムを用いた不飽和砂中への灯油の浸透実験を実施し、浸透油量の変化を土のサクション圧との関連において検討した。サクション圧の測定では灯油を満たしたテンシオメータを用い、不飽和砂の油に関する特性曲線を求めた。その特性を VG モデルで近似することにより、実験状況及び実地盤に対する油の浸透再現シミュレーションを行ない、それらの結果について考察した。

2. 実験方法

実験装置は図-1 に示すような内径 8cm、高さ 30cm の試料土充填用アクリルカラムと給油用バケツを連結したものである。このカラム内に含水比を調整した試料（千葉産山砂[$D_{max}=2.0\text{mm}$, $U_c=2.8$]と豊浦砂）を一定密度で充填した後、試料表面から灯油を動水勾配 $I=0$ の状態で自然浸透させ、浸透油量の経時変化を測定した。試料の初期飽和度は 0,10,20,30,40% の五段階に変化させ、各飽和度に対し灯油を充填したテンシオメータ（シリカ 30%, アルミナ 70%）を用いて不飽和砂の灯油に関するサクション圧の変化を測定した。

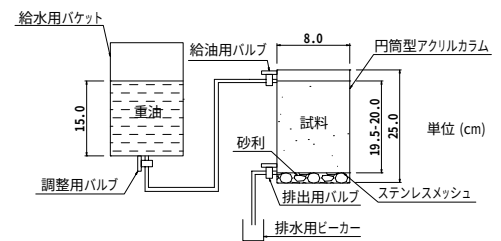


図-1 実験装置

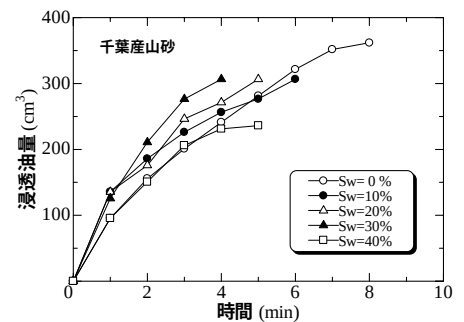


図-2 浸透油量の時間推移

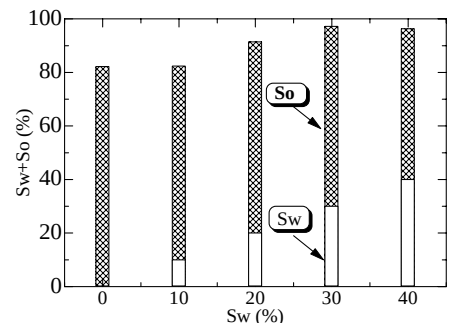


図-3 試料内の飽和度

3. 実験結果とシミュレーション

図-2 は初期飽和度 (S_w) ごとの不飽和試料（千葉産山砂）に対する浸透油量の時間推移を示したものである。 $S_w=0\%$ では浸透油量は最も多く S_w の増加につれ最大浸透油量に達する時間は短くなる。 $S_w>40\%$ では灯油の浸透は発生せず、 $S_w<40\%$ では不飽和砂の發揮するサクションにより油の浸透が引き起こされるものと考えられる。図-3 はカラム下端に灯油が排出された時点での試料中の間隙水+油の飽和度 (S_w+S_o) を初期飽和度ごとに示したものである。 $S_w=0,10\%$ では S_w+S_o は 80% 止まりであるが、 $S_w=30,40\%$ では $S_w+S_o=95\%$ に達し、残存空気は 5% 程に減少する。ただし、いずれのケースでもカラム下端からの既存間隙水の排出は認められず、灯油の浸透に伴う間隙水の移動は生じていないことが確かめられた。

図-4 は初期含水率を調整した試料について、灯油を充填したテンシオメータにより測定したサクション圧（負の圧力水頭）の変化を示したものであり、図-5 は通常の水を満たしたテンシオメータによるサクション圧変化を示したものである。不飽和砂の油に関するサクション圧は、發揮される負圧自体が水に比べて小さく、体積含水率 θ の増加につれ急激に減少することが分かる。図-4,5 中には各特性曲線を次式で表される VG

キーワード：浸透、地盤環境、油汚染、サクション、シミュレーション

連絡先：〒259-1292 平塚市北金目 1117 TEL 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

モデルで近似した場合のパラメーターを示してある。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad S_e = \left\{1 + |\alpha \psi|^n\right\}^{-m} \quad (1) \quad (2)$$

$$C(\theta) = \frac{d\theta}{d\psi} = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_0 \cdot S_e^{1/2} \left\{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 S_e は間隙水または間隙油に関する有効飽和度、 θ_s, θ_r は飽和・残余体積含水(含油)率、 $C(\theta)$ は比水分(油分)容量、 $K(\theta)$ は不飽和透水(透油)係数、 $m=1-1/n$ 、 $n>1$ である。油と水とではパラメーター α に大きな差が生じているが、 n は約2に近い値をとる。これらのパラメーターを用い、実験状況を再現する数値シミュレーションを次の飽和・不飽和浸透方程式を用いて実施した。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} = \{ C(\psi) + S_s(\psi) \} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (5)$$

図-6は初期飽和度10%の山砂に対する灯油の浸透シミュレーション結果(圧力水頭分布と体積含油率)の変化を示したものである。これによると、試料中の圧力水頭は時間経過につれなだらかに変化して行くが、体積含油率は急激なフロントを維持したまま下方へと移行していく。また、浸透油が試料下端に達した時点での試料全体の油に関する飽和度は85%となり、これは図-3に示した実験結果とよく符合している。ただしVGモデルによる不飽和灯油係数では、灯油の浸透速度にはシミュレーションと実験結果では差が生じ、この場合シミュレーションにおける飽和透油係数に約4%の透油性を付加するとよく整合する結果が得られた。したがって、単層流に基づく不飽和浸透方程式(5)を用いて油の浸透シミュレーションを行う場合、既存間隙水による浸透油の流動性(透油性)を若干見積もる必要があるものと考えられる。なお砂混じり関東ローム地盤に対する浸透シミュレーション結果は発表時に提示する。

4. まとめ

本研究では、飽和度の異なる砂質土試料に対し、灯油を充填したテンシオメータにより不飽和砂の油に関するサクション圧の変化を測定し、油の浸透機構を実験およびシミュレーションを通じて検討した。その結果、初期飽和度40%までの砂では、発揮するサクション圧によって油の浸透が誘発され、油に関する特性曲線をもとに不飽和砂中への油の浸透を再現し得ることを示した。ただし相対透油係数については、既存間隙水への油の混入による流動性を若干見積もる必要がある。

(参考文献)

河野伊一郎, 西垣 誠: 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, No.307 pp.59-69.

森實浩之: 不飽和砂質土への灯油の浸透機構および浄化効率に関する研究, 第30回関東支部技術研究発表会概要集

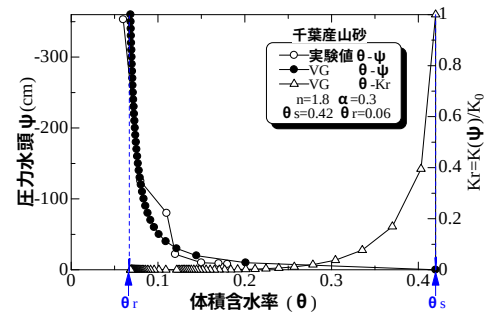


図-4 特性曲線(灯油)

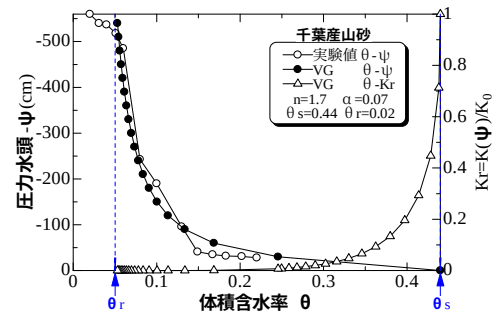


図-5 特性曲線(水)

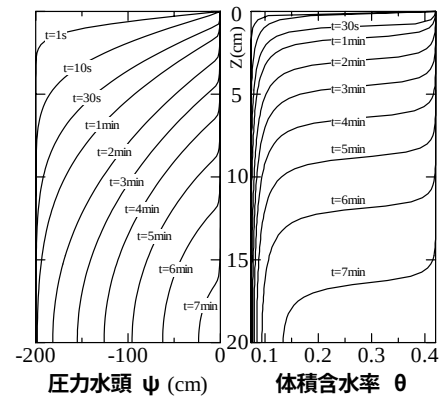


図-6 シミュレーション結果