

臨界レイノルズ数を考慮した不飽和透水係数の算出に関する一考察

九州大学大学院 正会員○荒木 功平, 安福 規之, 大嶺 聖

九州大学大学院 学生会員 新開 敦

福井大学工学部 正会員 小林 泰三

鹿児島大学大学院 正会員 北村 良介

1. はじめに

地球温暖化が地球環境, ひいては土壤環境に大きな影響を与えることが予測されている¹⁾. 具体的には干ばつや高温害の増加・優良農地の減少・穀倉地帯の移動・地力の減少・病害虫の増加・塩害の増加などが生ずると考えられている. 安福ら²⁾, 新開ら³⁾は, 乾燥地に強い薬用植物を用いた付加価値の高い砂漠緑化に向け, モンゴルにおいて薬用植物自生地の現地調査を行い, 原位置飽和透水係数, 採取した土から粒度分布, 水分特性曲線, 室内飽和透水係数を求めている. 薬用植物が自生する環境条件を明確にするためには, 原位置の透水性を明らかにする必要があるが, 原位置と室内で飽和透水係数が異なることが指摘されており, 原位置における飽和(擬似飽和)状態を評価する必要がある.

本概要では, 粒度分布と間隙比から不飽和透水係数, 水分特性曲線を求めることができる KITA-SAKO モデル⁴⁾に臨界レイノルズ数を導入することで, 擬似飽和状態の透水係数の算出を試み, 原位置飽和透水係数との関係について考察するとともに, 不飽和透水係数について言及する.

2. 臨界レイノルズ数を導入した KITA-SAKO モデル

毛細管が水分を保持できる管径 $d(s_u)$ はサクシオン s_u と表面張力 T_s , 水の接触角 α を用いて式(1)で与えられる. KITA-SAKO モデルでは図-1 に示す高さが D_h (砂質土では平均間隙径) からなる要素において, 透水, 不透水部分を円管(管径 D_v , 傾き θ)とそれ以外の部分に分け, それらの確率密度関数を導入している. 傾きの確率密度関数 $P_c(\theta)$ に小田⁵⁾の実験結果を用いると, 管径(間隙径)の確率密度関数 $P_v(D_v)$ は, 間隙比と粒度分布から式(2)により求まる. モンゴル北東部で採取深さが異なる 6 試料(試料 1~6)の粒度分布及びその対数正規分布関数による非線形重回帰分析結果を図-2 に示す. 水分特性曲線(有効飽和度 S_e ~サクシオン s_u 関係), 不飽和透水係数 k_w は図-1 の要素における間隙比 e_e , 透水係数 k_{we} を積分することで, 式(3), 式(4)により算出される.

$$d(s_u) = \frac{4T_s \cos \alpha}{s_u} \quad (1), \quad e = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty e_e(D_v, \theta) P_v(D_v) P_c(\theta) dD_v d\theta \quad (2),$$

図-1 モデル化された一要素

$$S_e(s_u) = \frac{1}{e} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{d(s_u)} e_e(D_v, \theta) P_v(D_v) P_c(\theta) dD_v d\theta \quad (3), \quad k_w(s_u) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{d(s_u)} k_{we}(D_v, \theta) P_v(D_v) P_c(\theta) dD_v d\theta \quad (4)$$

ここで, 層流を維持できる限界管径 D_{vc} は臨界レイノルズ数 Re_c と平均流速 v_m の関係により式(5)で与えられる. 図-1 の要素において, 一般に滑らかな円管を粘性流体が定常的に流れるとき(Hagen-Poiseuille 流れ), i_p を管に沿っての動水勾配とすると, D_{vc} における v_m は式(6)で与えられる. また, 動水勾配 i_p とサクシオン s_u には式(7)なる関係が導かれる. 数値積分の際に式(3), (4)の積分範囲の判定($d(s_u) > D_{vc}(s_u, \theta)$ が積分対象外)を行うことで, 層流条件を考慮できる. なお, 臨界レイノルズ数は円管の場合, 2100 程度といわれている⁶⁾.

$$D_{vc} = \frac{\mu R_{ec}}{\rho_w v_m} \quad (5), \quad v_m = \frac{\rho_w g D_{vc}^2}{32\mu} i_p \quad (6), \quad i_p = \frac{s_u \sin \beta}{\rho_w g D_h} \quad (7),$$

μ : 粘性係数, ρ_w : 水の密度, g : 重力加速度

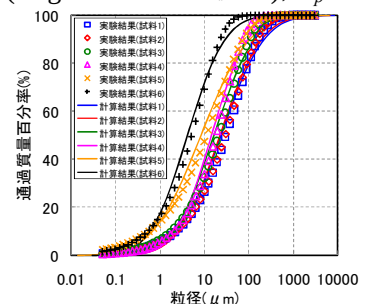


図-2 粒度分布

キーワード 地球温暖化, 砂漠化, 粒度分布, 水分特性曲線, 透水係数, レイノルズ数

連絡先 〒819-0385 福岡市西区元岡 744 番地 国立大学法人九州大学 大学院 工学研究院 TEL 092-802-3378

3. 実験結果とシミュレーション結果の比較

図-3 には、図-2 の試料 1~6 を用いて新開らが行った保水性試験の結果と式(3)の数値計算結果を示している。ただし、保水性試験結果における体積含水率の最小値を残留体積含水率、最大値を飽和体積含水率として有効飽和度を導いている。また、数値計算の際、 D_h には 10%通過粒径 D_{10} 、間隙比には 1.4、水の接触角には 0 度を用いている。図-3 をみると、実験結果に比べ計算結果は試料 4~6 は、1 オーダー程度、過大にサクションが評価された。したがって、今後、 D_h を 10%通過粒径 D_{10} とすることの適用限界範囲等を明らかにしていきたい。

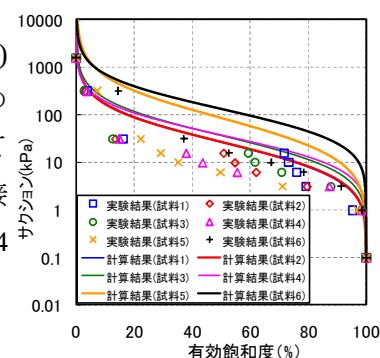


図-3 水分特性曲線

図-4 には、不飽和透水係数～有効飽和度関係、図-5 には臨界レイノルズ数を考慮した不飽和透水係数～有効飽和度関係の計算結果を示している。図-4 では、有効飽和度が 100%付近になると不飽和透水係数は急増し、有効飽和度が 80%のときの値に比べ、1~2 オーダー増加しているが、図-5 では約 80%以上になると透水係数は一定（以下、擬似飽和透水係数）になることがわかる。このことは、飽和状態と擬似飽和状態の違いを示す一指標と考えられる。

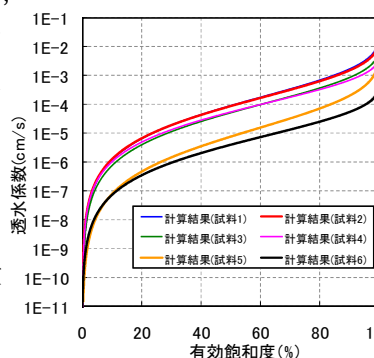


図-4 計算結果

(臨界レイノルズ数考慮無)

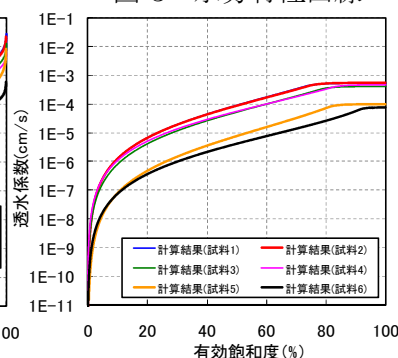


図-5 計算結果

(臨界レイノルズ数考慮有)

図-6 の縦軸は原位置飽和透水係数および図-5 の擬似飽和透水係数、横軸は室内飽和透水係数および図-4 の最大透水係数を示している。この図より、試料 2 における試験結果と数値計算結果は良好な関係にある。今後、擬似飽和透水係数が定量的に導かれるようになれば、原位置飽和透水係数から室内飽和透水係数を推測するための有用な指標となる。

一般に、飽和度が 100%付近になると透水係数は急増するが、原位置が不飽和であることを考えれば、原位置飽和透水係数と室内飽和透水係数は大きく相違するため、不飽和特性を考慮した透水性評価が必要である。

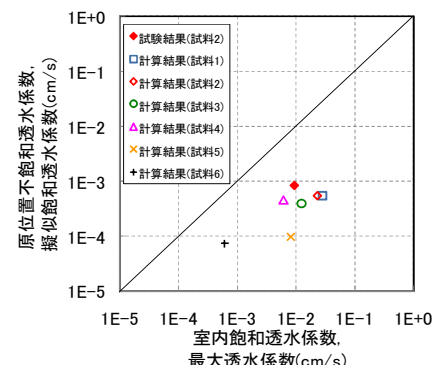


図-6 試験結果と計算結果

4. まとめ

本概要では、モンゴル北東部で採取された試料について、粒度試験結果の回帰分析を行った。また、粒度分布からサクション～有効飽和度～不飽和透水係数関係の数値シミュレーションを行い、モンゴル砂漠砂の保水性・透水性を評価した。また、臨界レイノルズ数を導入することで、原位置と室内飽和透水試験の差異について、表現できる可能性があることを示した。

謝辞：本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費(S8-2(2))および科研・基盤研究 A (No. 22246064) の支援を得て実施された。

参考文献

- 1) 有田正光, 江種伸之, 小尻利治, 中井正則, 中村由行, 平田健正, 吉羽洋周: 地圏の環境, 東京電機大学出版局, p.157, 2001.
- 2) 安福規之: 砂漠化防止と薬草と地盤工学, 地盤工学会誌, Vol. 58, No. 1, Ser. No. 624, pp 46-47, 2010.
- 3) 新開敦, 安福規之, 大嶺聖, 小林泰三, 荒木功平, 丸居篤, 永渕智章: モンゴル北東部における薬用植物「甘草」自生地の土中水分特性について, 土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会, 2011.(投稿中)
- 4) Kazunari Sako, Ryosuke Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 5) Masanobu ODA: Initial fabric and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 6) 大西外明: 最新水理学 I, 森北出版株式会社, p.112, 2004.