九州大学大学院 学 〇新開 敦 正 安福規之 正 荒木功平 九州大学大学院 正 大嶺 聖 非 丸居 篤

<u>1. はじめに</u>

現在,陸地の全面積の3分の1が砂漠地であると言われており,さらに毎年6万km²の速度で砂漠化が進行している.砂漠化は地球環境保全上の深刻な問題であり,砂漠化への対策は急務となっている¹⁾.安福ら²⁾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 行っている.

乾燥地での浸透現象は不飽和浸透となるため、これを評価するためには土の保水性(水分特性曲線)や透水性 (不飽和透水係数)の測定が必要である.しかし、これらの浸透特性を評価する試験は非常に時間がかかるとい った問題点がある.そこで本報では、*Kozeny*³⁾、北村ら⁴⁾の手法に着目し、間隙比、粒度分布、飽和透水係数と いう、基礎的な土質試験から、細管理論に基づいた飽和度-サクション関係および飽和度-飽和・不飽和透水係 数関係の簡易的な導出方法について提案する.

2. 細管理論に基づく乾燥地地盤内水分評価手法の提案

細管理論 (細管説, hydraulic radius theory)³⁾ とは、多孔質体がある種の細管の集まりと等価であるという考え 方である. 地盤内の通水間隙を円管と仮定し、これを間隙径 D_v とおき、土粒子径を D_s とおく. 粒子間隙比を e_p とおき、径深 R_H (= 円管の断面積: A_v / 潤辺: S_v)を用いて e_p を D_v と D_s で表すと、

$$R_{H} = \frac{A_{v}}{S_{v}} \left(= \frac{A_{v} \cdot L}{S_{v} \cdot L} = \frac{V_{v}}{\widetilde{A_{v}}} = \frac{V_{v} \cdot V_{s}}{\widetilde{A_{s}} \cdot V_{s}} = \frac{e_{p}V_{s}}{\widetilde{A_{s}}} \right) = e_{p}\frac{D_{s}}{6} = \frac{D_{v}}{4} \qquad \qquad \therefore e_{p} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{v}}{D_{s}} \tag{1}$$

となる. ここに, *L*: 管長, $\widetilde{A_v}$: 間隙部分の表面積, V_v : 間隙体積, V_s : 土粒子実質部分の容積, $\widetilde{A_s}$: 土粒子実質部分の表面積である. 巨視的な間隙比 *e* は式 (1) において間隙径の確率密度関数 $P_v(D_v)$ と土粒子径の確率密度 関数 $P_s(D_s)$ を導入しこれを積分することで求めることができる.

$$e = \iint e_p(D_v, D_s) P_v(D_v) P_s(D_s) dD_v dD_s = \frac{3}{2} \iint \frac{D_v}{D_s} P_v(D_v) P_s(D_s) dD_v dD_s = \frac{3}{2} \int_0^\infty \frac{P_s(D_s)}{D_s} dD_s \int_0^\infty D_v P_v(D_v) dD_v$$
(2)

ここで, *e* の値と, *D*_s に関する確率密度関数をそれぞれ,室内試験と粒度分布によって求めることができる既知量とすると,間隙径の確率密度関数を式(2)により算出することができる.

水分特性曲線は、有効飽和度を S_e 、サクションを s_u 、任意のサクションにおいて毛細管が水分を保持できる管 径を $d(s_u)$ 、表面張力を T_s 、水の接触角を α 、間隙径 D_v が $d(s_u)$ より小さい領域における間隙比を $e(s_u)$ として次 式で表される.

$$S_{e} = \frac{e(s_{u})}{e} = \frac{1}{e} \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{d(s_{u})} \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{v}}{D_{s}} P_{v}(D_{v}) P_{s}(D_{s}) dD_{v} dD_{s} = \frac{3}{2e} \int_{0}^{\infty} \frac{P_{s}(D_{s})}{D_{s}} dD_{s} \int_{0}^{d(s_{u})} D_{v} P_{v}(D_{v}) dD_{v}$$
(3)
$$d(s_{u}) = \frac{4T_{s} \cos \alpha}{s_{u}}$$
(4)

円管内の層流は Hagen – Poiseuille 則によって表現される. したがって,毛細管飽和透水係数を k_c とおくと, k_c は Hagen – Poiseuille 則と Darcy 則により,次式で表される³⁾.

$$Q = \frac{\rho_w g}{8\mu} R^2 ia = \frac{\rho_w g}{2\mu} R_H^2 ia = \frac{\rho_w g}{32\mu} D_v^2 inA = \left(C \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{e}{1+e} D_v^2 \right) iA = k_c iA \qquad \therefore k_c = C \frac{\rho_w g}{\mu} \cdot \frac{e}{1+e} D_v^2 \tag{5}$$

ここに, *ρ_w*: 水の密度, *g*: 重力加速度, *μ*: 水の粘性係数, *R*: 円管の半径 (=*D_v*/2), *a*: 有効断面積 (=*nA*), *n*: 間 隙率, *A*: 全断面積, *C*: 定数である. 水分特性曲線同様, 上式に確率密度関数を導入することで不飽和透水係数を 以下のように表した.

$$k(s_{u}) = \int k_{c}(D_{v})P_{v}(D_{v})dD_{v} = C\frac{\rho_{w}g}{\mu} \cdot \frac{e}{1+e} \int_{0}^{d(s_{u})} D_{v}^{2}P_{v}(D_{v})dD_{v}$$

100

80

by waight (09

ing 40

Der 20

0 0.01

-5 (cm)

10 (cm

30 (cm

40 (cm

-80 (cm)

0.1

10

Grain size (μ m)

図 1. 粒度分布

100

cm

定数 C は室内試験において測定した飽和透水係数 を式 (6) に代入し求める.その際,積分範囲は $d(s_u)$ $\rightarrow \infty$ となる.

3. 実験結果とシミュレーション結果の比較

比較の一例として,モンゴル北東部調査(2010年 9月実施)⁵⁾において採取した試料から求めた水分 特性曲線と不飽和透水係数の結果と式(3)および 式(6)の数値計算結果の比較を示す.ただし,両 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. なお試験は遠心法 (排水過程)により水分特性曲線を, One Step 法 により不飽和透水係数を求めている. 数値 計算における各種パラメータを表 1, 調査 地での粒度分布を図 1, 水分特性曲線を図 2, 不飽和透水係数を図 3 に示す.

計算結果と実験結果を比較すると,図2 の水分特性曲線においては,浅い深度の試 料においては概ね良好な関係が得られた

が、40 cm、80 cm の試料における計算結果は 1 オーダー程度、過大にサクシ ョンが評価された.また図 3 においては、10 cm の試料においては良好な関 係が得られたが、浅い深度の試料における計算結果は不飽和透水係数を過大評 価し、深い深度の試料においては過小評価する傾向が見られた.したがって、 今後、土粒子径の確率密度関数 $P_s(D_s)$ の計算に用いる D_{50} および均等係数、 積分範囲の $d(s_u)$ における水の接触角 α などの計算パラメータについて検討 するとともに、推定式の適用範囲について明らかにしていく必要がある.



表 1. 計算パラメータ

(6)





100

4. まとめ

細管理論に着目し,間隙比・粒度分布・飽和透水係数から水分特性曲線およ 図 3. 不飽和透水係数 び不飽和透水係数を推定する方法を提案した.水分特性曲線の計算結果は全体的にサクションを過大評価する傾 向があり,不飽和透水係数は地表面から 30 cm までの深度の試料においては過大評価,40 cm,80 cm の試料では 過小評価する傾向にあった。そのため,計算パラメータの決定や,推定式の適用範囲を明らかにしていくことが 今後の課題となる.

【参考文献】1)遠藤 勲:沙漠工学,森北出版,1998,2)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)最上武雄:土質力学,技報堂出版,pp.98-104,pp.933-940,1969,4)Ryousuke Kitamura, Kazunari Sako, Kouhei Araki, Yuji Miyamoto, Mitsuhide Yamada: Introduction to unsaturated soil mechanics aided by probability theory and statistics, JW – Fukuoka 2011, The 2nd Japan – Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils and Ground, pp. 17-30, 2011, 5)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, III-386, pp.771-772, 2011

謝辞:本研究の一部は九州大学・玄海町薬草プロジェクト研究,科研・基盤研究A(No. 22246064,研究代表者:安福規之)の 支援を得て行われたものである.