

不飽和砂質土の透水異方性に関する一考察

鹿児島大学 工学部 学生会員 ○小柳 智彦  
鹿児島大学大学院 学生会員 酒匂 一成  
鹿児島大学 工学部 正会員 北村 良介

1. はじめに

不飽和・飽和浸透解析を行う際に、不飽和土の浸透特性を把握する必要がある。そこで、北村らは不飽和砂質土中の間隙水の浸透挙動に関する数値力学モデル（以降、間隙モデルと称す。）を提案し、水分特性曲線及び飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を誘導している<sup>1)</sup>。本報告では、不飽和砂質土における透水係数の異方性を定量的に表現できることを示し、若干の考察を加えた。

2. 間隙モデル

図-1(a)は、2, 3 個の土粒子からなる土塊の一要素を示したものであり、これを図-1(b)のように間隙部分を管径  $D$ 、傾き  $\theta$  の円管に、土粒子実質部分を円管以外の不透水性の個体に分けてモデル化した。モデル化されたものを間隙モデルと称し、図-1(b)のモデル化された一要素を素体積と呼ぶ。素体積高さ  $DH$  は 10% 通過粒径 ( $D_{10}$ ) と等しいと仮定する。間隙部分の複雑な構造を表現するため、円管の管径  $D$  及び傾き  $\theta$  を確率変数とみなし、それらの確率密度関数を導入する。

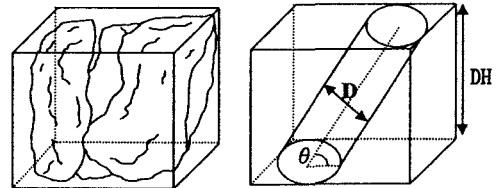


図-1(a) 土塊の微小要素 図-1(b) モデル化された一要素（素体積）

図-1 間隙のモデル化

粒度分布は対数正規分布で近似されることが知られており、管径分布も対数正規分布に従うものと仮定した。粒度分布を表す対数正規分布の平均  $\lambda$ 、と標準偏差  $\zeta$ 、から管径分布を表す対数正規分布の平均  $\lambda_p$ 、と標準偏差  $\zeta_p$ 、が求められる。得られた  $\lambda_p$ 、と  $\zeta_p$ 、を対数正規分布の式に代入することで、管径  $D$  の確率密度関数  $P_d(D)$  が次式のように得られる。

$$P_d(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_p \cdot D} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln D - \lambda_p)^2}{2 \cdot \zeta_p^2} \right] \quad (1)$$

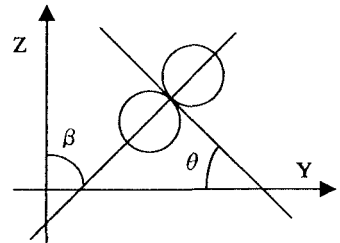


図-2 土粒子接点角と水の流れの方向

図-2 は土粒子接点角  $\beta$  と円管の傾き  $\theta$  との関係を示している。土粒子同士を中心と接点を結ぶ線と鉛直方向の  $Z$  軸とのなす角を土粒子接点角  $\beta$  とし、円管の傾き  $\theta$  は直交していると仮定している。北村は、重力の影響を考慮し、土粒子接点角分布の確率密度関数  $P(\beta)$  は図-3 に示すような五角形であると仮定した<sup>2)</sup>。円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数  $P_c(\theta)$  は、接点角  $\beta$  と相関を持つことより図-4 のように示され、次式で与えられる。

$$P_c(\theta) = \begin{cases} \frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c \cdot \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c}{\pi/2} & (-\pi/2 \leq \theta \leq 0) \\ -\frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c \cdot \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c}{\pi/2} & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases}$$

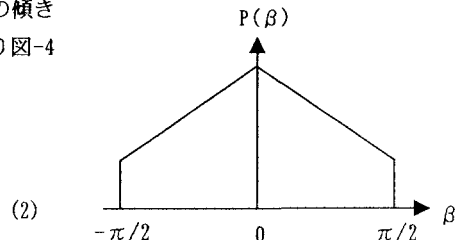


図-3 接点角  $\beta$  の確率密度関数  
(鉛直方向の地盤内の場合)

ここに、 $\zeta_c$ ：円管の傾き $\theta$ の確率密度関数の最低値。

上述した確率論の成果を間隙モデルに援用することによって、間隙比 $e$ 、体積含水率 $W_v$ 、サクシオン $s_u$ 、不飽和・飽和透水係数 $k$ が次式のように得られる。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_c - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (3)$$

$$W_v = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (4)$$

$$s_u = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (5)$$

$$k = \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (6)$$

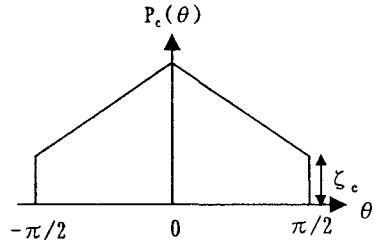


図-4 傾き $\theta$ の確率密度関数  
(鉛直方向の地盤内の場合)

ここで、 $V_p$ ：円管の体積、 $DH$ ：素体積高さ、 $V$ ：素体積全体の体積、 $T_s$ ：水の表面張力、 $\mu$ ：水の粘性係数、

$\alpha$ ：毛細管と水の接触角、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、 $d$ ：間隙水を保持する円管の最大管径。

### 3. 透水係数の異方性

間隙モデルにおいて透水係数の異方性は、円管の傾き $\theta$ の確率密度関数によって評価される。図-4の円管の傾き $\theta$ の確率密度関数は、鉛直方向の地盤内において考えられる状態である。水平方向について検討すると円管の傾き $\theta$ の確率密度関数 $P_c(\theta)$ は、図-5のように示され、次式で与えられる。

$$P_c(\theta) = \begin{cases} -\frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \theta + \zeta_c & (-\pi/2 \leq \theta \leq 0) \\ \frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \theta + \zeta_c & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (7)$$

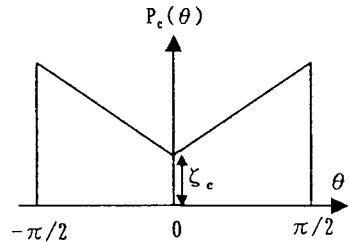


図-5 傾き $\theta$ の確率密度関数  
(水平方向の地盤内の場合)

図-6は、間隙モデルから得られた鉛直方向及び水平方向の不飽和・飽和透水係数の関係を示している。間隙モデルの入力パラメータは、薄木シラスを想定した値を用いている。図-6より間隙モデルが不飽和・飽和透水係数の異方性を定量的に評価することができることがわかる。

### 4. おわりに

本報告では、間隙モデルを用いて不飽和砂質土における不飽和・飽和透水係数の異方性について考察を加えた。今後、不飽和透水試験を行い、モデルの妥当性の検討を行う必要がある。

謝辞：本研究に対して科研費(地域連携：No. 12792009、基盤(B)：No. 13450196)の援助を受けた。ここに謝意を表します。

### 参考文献

1) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, G., and Seyama, M.: A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 261-265, 1998.

2) 北村良介：マルコフ過程を用いた粒状体の力学モデル, 昭和 61 年度科学研究費補助金(一般研究(c)) 研究成果報告書(課題番号: 60550355), pp. 32-35, 1987.

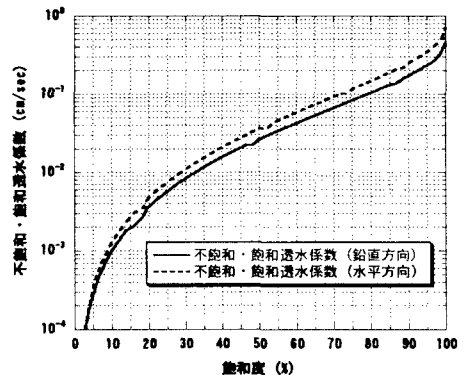


図-6 不飽和・飽和透水係数の異方性