

不飽和土中の間隙水の浸透挙動のモデル化に関する一考察

鹿児島大学大学院 学生会員 酒匂一成, 小柳智彦
 鹿児島大学工学部 正会員 北村良介

1. はじめに

南九州一帯には、火砕流堆積物の非溶結部と定義されるシラスが広く分布している。梅雨期や台風来襲期の豪雨により、シラスからなる斜面の崩壊が多発している。降雨に伴うシラス斜面の崩壊の原因は、雨水の浸透によるすべり土塊自重の増加、飽和度の増加に伴う見掛けの粘着成分の減少や正の間隙水圧の増加であると定性的に言われている。そこで、北村らはこれらの現象に着目し、不飽和土中の間隙水の浸透挙動や飽和度の変化に対する見掛けの粘着成分の変化を表現するための数値力学モデルを提案し、降雨時の斜面崩壊を予知するためのシステムの開発に取り組んでいる¹⁾。本論文では、不飽和土中の間隙水の浸透挙動のモデル化に関して考察を行う。

2. 間隙モデル²⁾

北村らは、不飽和土中の間隙水の浸透挙動を表現するための数値力学モデル（以後、間隙モデルと称す。）を提案した。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 α 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(D₁₀)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 α を確率変数とみなし、それらの確率密度関数を導入する。間隙モデルにより間隙比 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。

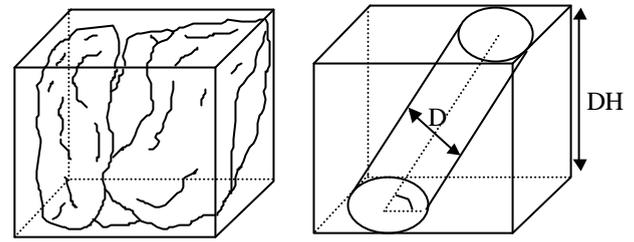


図-1(a) 土塊の微小要素

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

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(D₁₀)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 α を確率変数とみなし、それらの確率密度関数を導入する。間隙モデルにより間隙比 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。

$$e = \int_0^\infty \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(q) dq dD \quad (1) \quad W_v = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} \frac{V_p}{V - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(q) dq dD \quad (2)$$

$$s_u = g_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (3) \quad k = \int_0^d \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} \frac{p g_w D^3 \sin q}{128 m(D/\sin q + DH/\tan q)} P_d(D) \cdot P_c(q) dq dD \quad (4)$$

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、μ：水の粘性係数、α：毛細管と水の接触角、g_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、P_d(D)：管径 D の確率密度関数、P_c(α)：円管の傾き α の確率密度関数。

表-1、図-2 は、間隙モデルに用いる入力パラメータ及び粒径加積曲線を示している。図-3 は、水分特性曲線を示しており、実線は計算結果、プロットは実験結果である。図より、飽和度の高い部分において計算結果は実験結果をうまく表現できているが、飽和度の低い部分では計算結果が実測値より低いサクシオンを表していることがわかる。また、図-4 は飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を示している。実線が計算結果、プロットが実験結果である。図より、計算結果は実験結果に比べ 3~4 オーダー程度過大に評価していることがわかる。

表-1 入力パラメータ

試料	松元シラス
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.405
表面張力 (N/m)	73.48 × 10 ⁻³
粘性係数 (Pa·s)	1.138 × 10 ⁻³
間隙比	1.33

キーワード：不飽和土、水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数、数値力学モデル

連絡先：鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 099-285-8473, 099-258-1738

3. 間隙モデルの改良

間隙モデルの改良について述べる。図-5は、不飽和土中の間隙水と空気の概念図を示している。図のように間隙水は、吸着水と自由水とに分けられると考えられ、自由水の一部がサクシヨン及び透水係数に起因していると言える。間隙モデルが実験結果と合わないことの原因として、間隙モデルは全ての間隙水がサクシヨンや透水係数に起因していることが挙げられる。このような考え方は、式(3)と式(4)中の d を減少させることで表現することができる。図-6は、式(3)中の d を0.9倍したときの水分特性曲線を示している。図-7は、式(4)の積分範囲 ' $0 \sim d$ ' を ' $0 \sim 0.08d$ ' としたときの飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を示している。図-6、図-7から図-3、図-4に比べ、計算結果が実験結果により近づいたことがわかる。今後、多くの実験結果と計算結果の比較により、サクシヨン及び不飽和・飽和透水係数に起因する間隙水の割合をそれぞれ検討する必要がある。

4. おわりに

本論文では、不飽和土中の間隙水の浸透挙動のモデル化に関して考察を行った。間隙モデルの妥当性の検討を行い、不飽和土中の間隙水と空気の構成メカニズムを考慮して、間隙モデルを改良する手法を示した。今後、より多くの実験結果と計算結果の比較により、不飽和土中の間隙水と空気の構成メカニズムを解明し、不飽和土中の間隙水の浸透挙動に関するモデル化を行っていかうと考えている。本研究に対して科研費（地域連携推進研究費（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) K. Sako, K. Matsuo and R. Kitamura: A research strategy for prediction of slope failure due to rainfall, Proc. Int. Conf. on Physical Modeling in Geotechnics, pp.771-776, 2002.
- 2) R. Kitamura, S. Fukuhara, K. Uemura, J. Kisanuki, and M. Seyama: A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.4, pp.261-265, 1998.

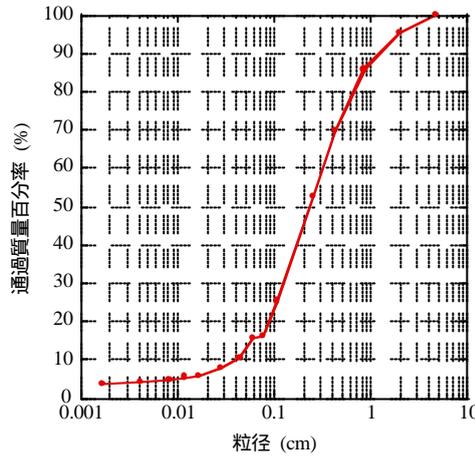


図-2 粒径加積曲線

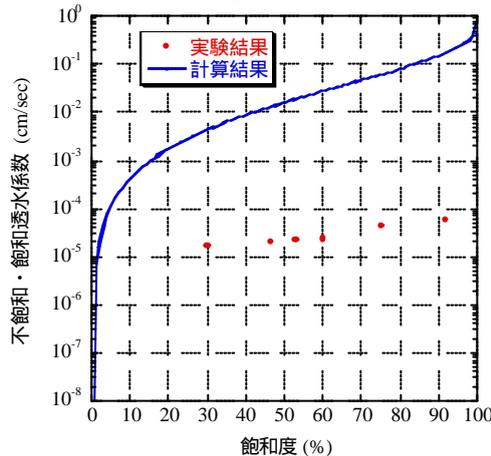


図-4 飽和度-不飽和・飽和透水係数関係

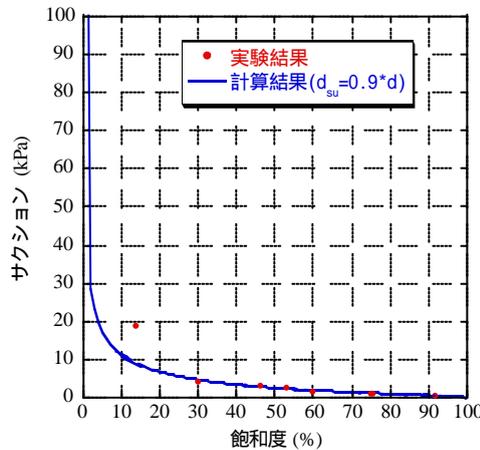


図-6 水分特性曲線

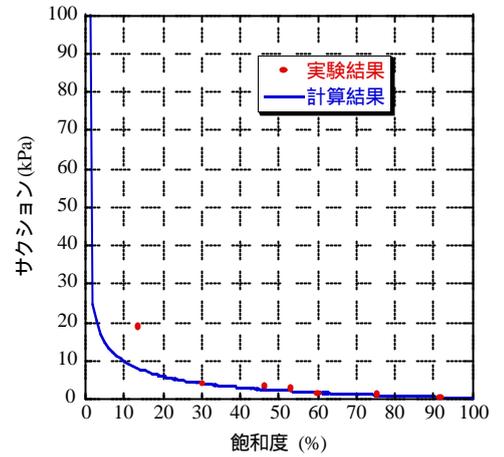


図-3 水分特性曲線

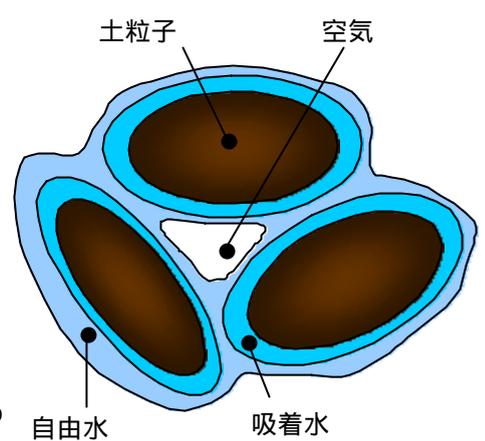


図-5 不飽和土中の間隙水と空気の概念図

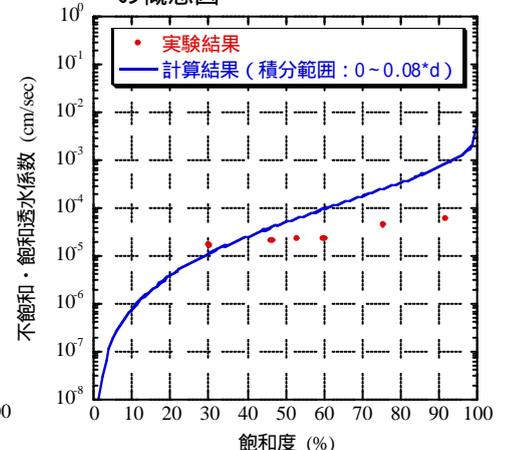


図-7 飽和度-不飽和・飽和透水係数関係