

土壌の分野における不飽和透水係数のモデル化に関する研究

渡辺 晋生

三重大学 大学院生物資源学研究科

kunio@bio.mie-u.ac.jp

要旨

土のような不飽和多孔質体中の水分移動を予測するためには、その水分特性曲線（水分量と圧力水頭の関係）と不飽和透水係数を精度良く表現することが重要である。不飽和土の透水係数のモデル化においては、土はしばしば管径の異なる多数の円筒毛管の束と見なされる。この際、毛管群の径と各本数は水分特性曲線と毛管圧から求められる。毛管内の水の流れはポワズイユ則で与えられ、このとき毛管壁面と流れの間に抵抗が生じる。すなわち、各径の毛管内の抵抗の総和が不飽和透水係数となる。従って、土中では水分量が低下するにつれ管径の大きな毛管から順に排水が進み、透水係数が指数関数的に減少する。

毛管モデルは、単純化の過ぎる概念モデルであり、測定不能な変数を含むなど、そのままでは数値計算に適したモデルとは言い難い。そこで、数値計算に適したいくつかのモデルが提案されているが、その多くは毛管モデルの概念を踏襲している。これらの不飽和土の透水係数モデルでは、土中の間隙径分布は水分特性曲線から導かれる。この際、低圧の残余水分量を一定値で与える水分特性関数を用いると、低水分領域の透水係数を過小評価するため注意を要する。

ところで、土が 0 度以下に冷やされると、土中間隙に氷が発生・成長する。毛管モデルにおいては、こうした氷は毛管中央に生じ、毛管内の流れは円環流れに変化する。0 度付近においては、氷を含まない径の毛管が多数存在するため、凍土と未凍土の不飽和透水係数の差異はほとんど認められない。しかしながら、温度が低下するにつれ、円環流れの寄与が無視できなくなるため、凍土の透水係数は同じ圧力水頭の未凍土の透水係数より大きくなる。また、凍結を伴う土中の水分移動の数値計算においては、凍土への水分移動を抑制するため、しばしば抵抗係数を未凍土の透水係数に乗じて凍土の不飽和透水係数を表現する。しかしながら、この抵抗係数の物理的意味や与え方は未だよくわかっていない。そこでここでは、凍土、未凍土の不飽和透水係数のモデルと理論をまとめ、実験、数値計算によりこれらの関数とパラメータについて検討する。

キーワード：不飽和土；凍土；水分特性曲線；不飽和透水係数

Modeling hydraulic conductivity for frozen unsaturated soil

Kunio Watanabe

Graduate School of Bioresources, Mie University, Japan.

kunio@bio.mie-u.ac.jp

Abstract

Obtaining accurate functions for soil hydraulic properties is necessary to calculate water flow in variously saturated soils. Unsaturated hydraulic conductivity of unfrozen soil is sometimes conceptualized using the capillary bundle model, in which soil pores are treated as a bundle of capillary tubes of varying sizes. The size and number of tubes are given from the retention curve. Water flow in a capillary tube can be considered to follow Poiseuille's law and produces hydraulic resistance between the flow and the tube wall, leading to unsaturated hydraulic conductivity. Although this model contains many of the same properties found in a real soils, it differs in several ways from real soil water flow and is not very suitable for numerical simulation. Thus, closed-form models are proposed for soil retention models. Some of these models have also been developed based on a concept similar to the capillary bundle model. However, we must be careful when expressing low soil water content, as models, which have constant residual water content, underestimate hydraulic conductivity.

At subzero temperatures, ice may form in soil pores and grow with lowering temperature. In the capillary bundle model, the freezing point in the capillaries is depressed according to the Gibbs-Thomson effect and when stable ice forms in a capillary, it forms in the center of the capillaries, leaving a circular annulus open for liquid water flow. As the temperature decreases, more and more ice forms, and the water flux consequently decreases. In frozen soil near 0°C, water predominantly flows through ice-free capillaries, so the hydraulic conductivity of frozen soil is similar to that of unfrozen soil with a water content equal to the unfrozen water content of the frozen soil. However, at low temperatures, ice forms in almost all capillaries, and the hydraulic conductivity of frozen soil is greater than that of unfrozen soil with the same water potential. Additionally, an impedance factor is often used in numerical codes with the purpose of reducing hydraulic conductivity in frozen soil. However, the physical meaning of the factor is still unclear. Thus, we review models on the hydraulic properties of frozen and non-frozen soils and discuss them from viewpoints of column experiments and numerical calculations.

Key words: variously saturated soil; frozen ground; soil water retention curve; unsaturated hydraulic conductivity