フィンガー流のシミュレーション：1. 連続体水理特性としての動的水侵入圧の表現

Numerical simulation of fingered flow: 1. Representation of dynamic water entry pressure as a continuum scale hydraulic property

○塩沢 昌* 西田和弘* 藤巻晴行**

Sho Shiozawa, Kazuhiro Nishida, Haruyuki Fujimaki

フィンガー流は、乾燥粒状媒体における浸潤前線が拡散せず無条件に飽和または飽和に近い水分状態になる特異性のために、フラックスの制約された鉛直降下浸潤において必然的に生じる、と著者らは主張している。乾燥粒状媒体のこの特異な特性は、大気圧に近い動的水侵入圧が存在すること（＝浸潤前線が移動圧力境界条件を与えること）と等価であり、浸潤前線に移動圧力境界条件を与えれば、Richards 方程式と排水過程のθ(h)と K(θ)によって、前線が飽和し上部が排水過程となる一次元浸潤実験における水分分布が計算できることが示されている（Shiozawa and Fujimaki, 2004）。しかし、この計算法は前線の位置の追跡が容易な一次元問題に限られ、二次元や三次元の流れへの適用は困難である。そこで、二次元や三次元でのフィンガー流の数値シミュレーションを可能にするために、移動圧力境界と等価な、新たな計算方法を考えた。

動的水侵入圧の*K*(*h*)における表現

動的水侵入圧（h_{we}）が存在すること（サクションh（>0）がh_{we}に低下するまで乾燥媒体に水が全く侵入できないという現象）は、媒体が初期乾燥（K_flag=0 と表す）では不飽和透水係数$K(h)$が、hがh_{we}に低下するまで 0 であることと等価である：

$$\text{K\_flag=0：}\begin{cases} K(h)=0 \quad , \quad h>h_{we} \\ K(h)=K(\theta) \quad , \quad h\le h_{we} \end{cases} \qquad (1)$$

この特性（Fig. 1）は、乾燥媒体のみの特性で、一旦媒体が濡れれば（K_flag=1）なくなり、$K(h)$は h の全変域で通常の関数形 K(θ)（θ：体積含水率）となる。

$$\text{K\_flag=1：} K(h)=K(\theta) \qquad (2)$$

なお、水分特性曲線θ(h)は、ヒステリシスがあるものの、（動的水侵入圧現象とは直接には関係せず）普通に定義されるものである。

一次元浸潤の数値計算法

支配方程式（ダルシー式と連続式）は鉛直一次元では、

$$q=K(h)\frac{\partial h}{\partial x}+K(h) \qquad (3)$$

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t}=-\frac{\partial q}{\partial x} \qquad (4)$$

x：鉛直下向き座標、t:時間、q:フラックス、$C(h)\equiv -d\theta/dh$

(3)式の節点 i と i+1 の間の離散化式

$$q_i=\overline{K_i}\,\frac{h_{i+1}-h_i}{\Delta x}+\overline{K_i} \qquad (5)$$

の透水係数$\overline{K}_i$は、節点値の算術平均

$$\overline{K}_i=\left(K(h_i)+K(h_{i+1})\right)/2 \qquad (6)$$

として、前の時間ステップにおける節点の乾湿を示すフラグ(K_flag）の値により(1)式か(2)式を用いて計算する。節点の h が一度 $h\le h_{we}$ になると、K_flag を１にセットする（Fig.2)。θ(h)と $K(h)$は Fig.3 のように与えた。

水分分布の計算結果

鉛直降下一次元浸潤における水分分布を上から q_0=0.2Ks のフラックスを与え、h_{we}=-3cm の元で(1)(2)式を使い計算した（Fig.4)。浸潤前線に移動圧力境界（h=h_{we}）を与える計算方法と比較したところ、空間刻みが有限であるために生じる振動誤差の範囲内で、両者は本質的に同じ数値解を与えることが確かめられた。また、境界条件（x=0

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agric. and Life Sciences, The Univ. of Tokyo
**筑波大学農林工学系 Institute of Agric. and Forest Engi., Univ. of Tsukuba
フィンガー流, 浸潤, 水侵入圧

でh=-*0.1cm*）における水平浸潤においても（Fig.5)、(1)(2)式を使う計算では浸潤前線が拡散しないこと、および、Richards式による普通の計算（(2)式のみを使う）に比べ浸潤前線の進行が遅れることがわかる。

引用文献：Shiozawa and Fujimaki, 2004, *Water Resour. Res*. 40, W07404, P1-12

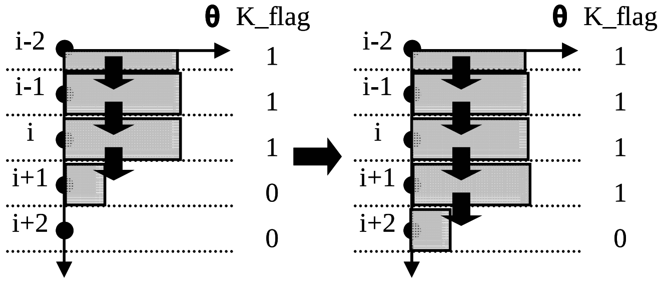

Fig.2 Diagram explaining water entry into discretized element. Arrows indicate water flux. Grey zone means water content.

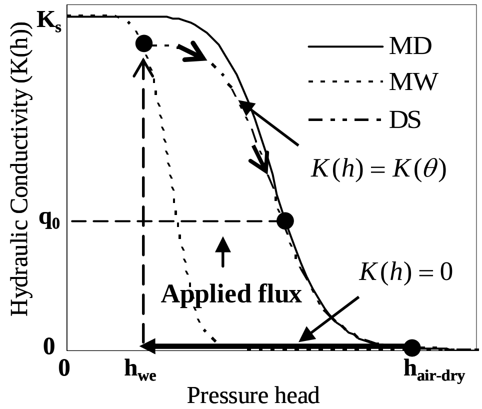

Fig.1 Schematic diagram of $K(h)$ representing dynamic water entry pressure (h_{we}). h_{air_dry}:initial water head. MD is main-drainage $K(h)$, MW is main-wetting $K(h)$, DS is drainage-scanning $K(h)$.

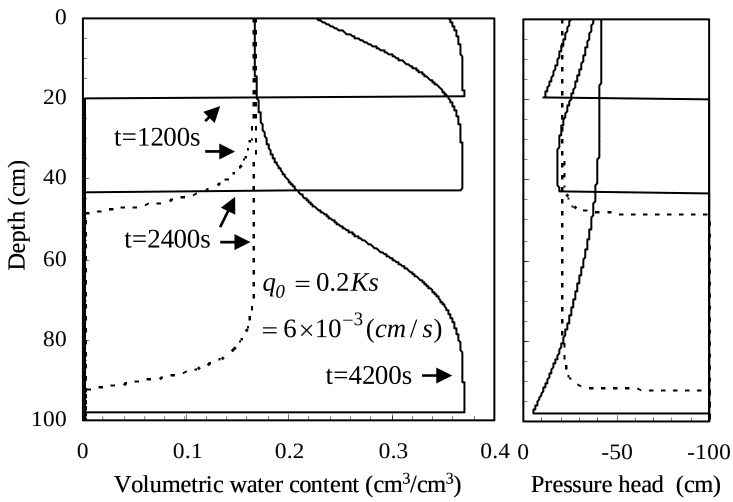

Fig.4 Water content and pressure profiles during <u>downward infiltration</u>. Solid curves are calculated with dynamic water entry pressure (equations (1) and (2)) and the curves are coincide with those calculated by applying pressure boundary condition of h=h_{we}(-3cm) at the moving wetting front. Dashed curves are calculated by Richards' equation without dynamic water entry pressure. Δx=0.2cm, Δt=1s, h(t=0s)=-100(cm).

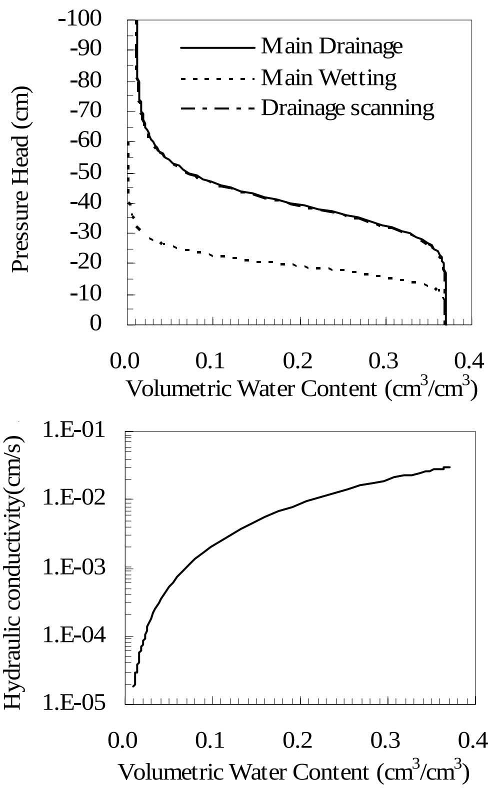

Fig.3 $\theta(h)$ and $K(\theta)$ of the example typical sand.

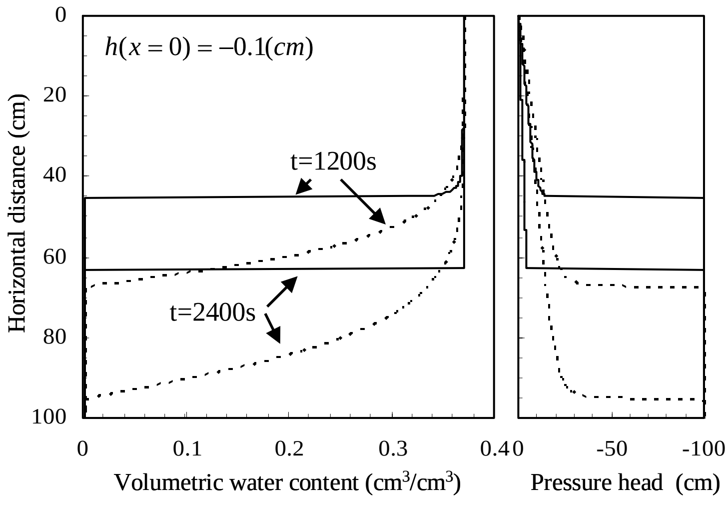

Fig.5 Water content and pressure profiles during <u>horizontal infiltration</u>. Solid curves are calculated with dynamic water entry pressure (equations (1) and (2)) and the curves are coincide with those calculated by applying pressure boundary condition of h=h_{we} (-3cm) at the moving wetting front. Dashed curves are calculated by Richards' equation without dynamic water entry pressure. Δx=0.2cm, Δt=1s, h(t=0s)=-100(cm).