

不安定化した浸潤前線に対する Hanging water model の提案

Hanging water model for the flow with unstable wetting front

長 裕幸* ・ 井上 光弘**
Hiroyuki Cho* ・ Mitsuhiro Inoue**

I. はじめに

初期乾燥した均質な粗粒土壌に少量の灌水あるいは降水が継続的に与えられた場合、浸潤前線が不安定化することは、過去多くの実験、観察により明らかにされている。最近の研究によると、浸潤前線が不安定化するためには、かなり強い初期乾燥条件（砂でいえば、0.5%以下の含水率）が必要とされている。このような現象を測定する場合、必ず遭遇する問題として、土中のある点を浸潤前線が通過する前後で圧力の時間的な勾配が逆転することが上げられる。つまり、土中内において浸潤前線が近づくまでは圧力が増加し、通過し下方に移動するにつれて圧力が減少するという現象である。このような圧力変化は、過去、発生したフィンガー流の中において観測されており、J. Selker et al(1992,WRR,9)や、安中(1997,農土論集,190)等によって解析が行われてきた。しかし、D.A.Stonestrom et al.(1994, WRR,1)やS.L.Geiger et al.(2000,SSSAJ,64)等によって、この現象がフィンガーの中に限らず、浸潤前線全般にわたる普遍的な問題であることが明らかにされた。本研究では、一般的な Richards 式では表現できないとされるこの問題について、Hanging water を仮定したモデルを提案し、ガラスビーズで行った実験結果に対し適用してみた。

II. Hanging water model

初期非常に乾燥した土壌表面に土壌の飽和透水係数 K , よりも小さな強度 q_0 で散水を行った場合、浸潤前線の降下が、微視的にはインクボトル効果の形で進むことは、多くの研究で指摘されている。また、粒径が均質になるにつれ、浸潤前線が明瞭になり水平方向では一様に降下していくことも示されている。浸潤過程を理想球体モデルで考えてみると、Fig.1に示すように、浸潤がインクボトル的におこなわれると仮定すれば、前線より上の粒子間隙中の水はほぼ飽和に近い水分量で貯まっている状態、つまり hanging water の状態になっていると仮定できる。しかし、灌水が生じていない限り、浸潤が進んでいる間、湿潤域どの点のフラックスも q_0 である必要がある。そこで、土壌表面から $z=l$ の深さにおける圧力を考え、その点から土壌表面までと、浸潤前線までの2つの層について各々G-A式をもとめてみる。

$$q_0 = K_s \left(\frac{\varphi_0(t) - \varphi_l(t)}{l} + 1 \right) \quad (0 < z \leq l) \quad \text{-----}(1)$$

$$q_0 = K_s \left(\frac{\varphi_l(t) - \varphi_c}{L(t)} + 1 \right) \quad (l \leq z \leq L(t)) \quad \text{-----}(2)$$

$$\text{また、層全体については、} v\theta_s = q_0 \text{ より、} L = \frac{q_0}{\theta_s} T \quad \text{-----}(3)$$

ここで、 K_s は飽和透水係数(cm/s)、 ϕ_0 は表層の圧力水頭(cm)、 ϕ_l は $z=l$ の深さにおける圧力水頭(cm)、 ϕ_s は浸潤前線の先端で間隙に水分が満たされた瞬間の圧力水頭(cm)、 v は湿潤層の降下速度(cm/s)、 θ_s は飽和含水率、 T は浸潤前線が $z=l$ から L まで降下する時間(s)。

以上の関係から、時間 T における ϕ_l は次式で与えられる。

$$\phi_l = \phi_s + \frac{q_0}{\theta_s} \left(\frac{q_0}{K_s} - 1 \right) T \quad \text{---(4)}$$

また、(1)式より、

$$\phi_0 - \phi_l = l \left(\frac{q_0}{K_s} - 1 \right) \quad \text{---(5)}$$

で与えられ、湿潤層内2点間の圧力差は変化しない。

III. 実験及び方法

実験はアクリル製2次元チャンバーを用いて行い、材料は平均粒径0.15mmのガラスビーズを使用した。散水は降雨シミュレータを使用して、 $q_0 = 6.7 \times 10^{-4}$ cm/sのフラックスを土壌表面に与えた。ガラスビーズの飽和透水係数 K_s は0.01cm/sであった。圧力は、表面から1cmの深さに設置したマイクロテンショメータによって測定した。初期の含水量はほぼ0であった。実験を続けていくうちに、浸潤前線は不安定化し、フィンガー流が発生し、遷移領域内では水平方向のフラックスが卓越してくるので、解析としては、フィンガーが発生する前までのデータを用いた。

IV. 結果及び考察

Fig.2に実験結果との比較を示す。また、Fig.3にGeiger等が砂について行った実験結果に対する比較を示している。モデルとの整合性は非常によく、実際の流れは本研究で示した様な仮定のもとで生じていることを裏付けるものではないかと考えられる。

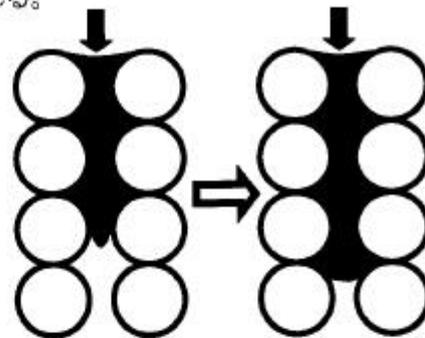


Fig.1 Schematic figure of ink-bottle like wetting front

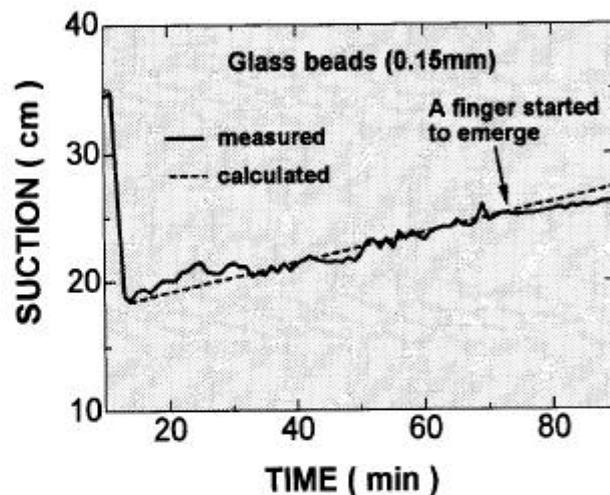


Fig.2 Comparison between measured values and calculated.

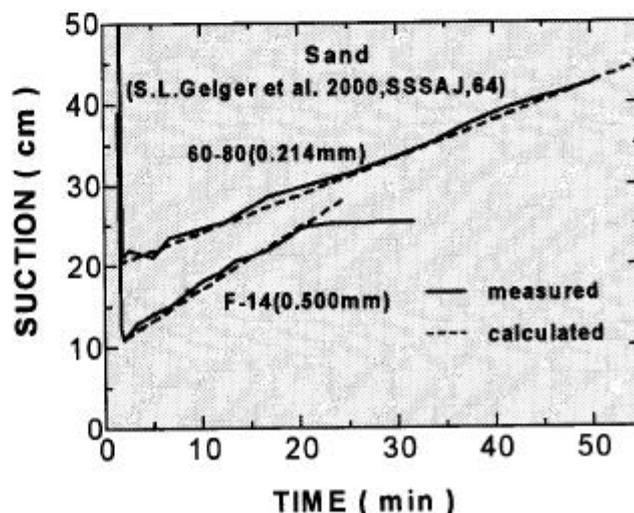


Fig.3 Comparison between measured values and calculated.