

京都大学防災研究所 正員 石原安雄
同上 正員 ○ 下島栄一

§1. まえがき 従来より, soil physics 等の分野では空気閉塞を伴わない不飽和浸透現象を Darcy 則と analogy 的に拡張した nonlinear Fokker-Planck type の拡散理論により記述し, 一応の成功を得ている。一応, 空気閉塞を伴う場合の研究は多少行われてきたが, 現象の複雑さゆえ定性的現象記述に停り, 理論体系は今の存在しない。本文では, 実験的手法を媒介として円筒下端を開放した場合及び円筒下端を閉塞した場合と比較しつつ鉛直不飽和浸透における空隙空気の影響を考察したものである。

§2. 実験方法

2-1. 実験装置 実験に使用した円筒は, 透明なアクリル樹脂製で, 直径 18.5 cm, 長さ 25 cm, 10 cm と数個用意し, フランジをつけて接合し円筒長と変えることが出来るようにした。円筒に充填した土壌の水分量 θ , 円筒周囲に設置した電極板間の誘電率の変化と市販の静電容量変換方式の微小変位計を用いて計測した。水の供給方法としては円筒上面に一定強度の給水を行なったが, 円筒の上縁より越流する水量を圧力変換器と取付けた圧とを用いて, 測定し間接的に浸透強度を求める方法をとった。さらに, 閉塞の場合には円筒下部に圧力変換器を設置し, 空隙空気圧の変化を測定した。

2-2. 使用土壌 本研究では2種類(K-5, K-7)の砂を用いたが粒度分布は, K-5 の場合, $d_{10}=0.15$, $d_{50}=0.40$, $d_{90}=0.53$, K-7 の場合, $d_{10}=0.07$, $d_{50}=0.11$, $d_{90}=0.12$ (単位 mm) である。

2-3. 実験方法 実験砂は自然乾燥状態のものを用い, このときの土壌水分量を初期条件とした。充填砂の締め固め状態(みかけの密度)は K-5 の場合, $1.44 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$, K-7 の場合, $1.39 \sim 1.41 \text{ g/cm}^3$ である。浸透面における境界条件は 1 cm の湛水深として与えた。なお, 空気閉塞を生じさせる場合は, 円筒下部を密閉した。

§3. 長時間継続後の浸透現象

3-1. 実験結果 図-1, 2 は砂層厚 129 cm の実験結果を mass wetness と parameter として位置～時間の関係を示した一例であり, また図-3, 4 は, 空気閉塞の場合の wetting front の進行状況を示したものである。浸透実験の後半の時間に注目すれば,

① 空気閉塞の有無に関係なく, wetting front は一定形状に, またその相速度は一定値に漸近する。

② 開放の場合(=ここでは図示していないが), 閉塞の場合に関係なく一定形状の wetting front は最大の含水量を有し, その値は前者のものが大きい。なお, 前者の値はほぼ飽和含水量に対応する。なることが判る。なお, $L=35 \text{ cm}, 59 \text{ cm}$ のように短い円筒長さでの実験では wetting front が一定形状になる前に円筒底部に達し, 上の結果のようにはならなかった。

図-5 は, K-7, $L=129 \text{ cm}$ の閉塞の場合の累積浸透量及び円筒下部(wetting front 前)の空隙空気圧の時間変化を示したものであり, 同時に開放の場合とも示している。この図より次のことが判る。

③ wetting front の相速度がほぼ一定値となる時と同じくして, 累積

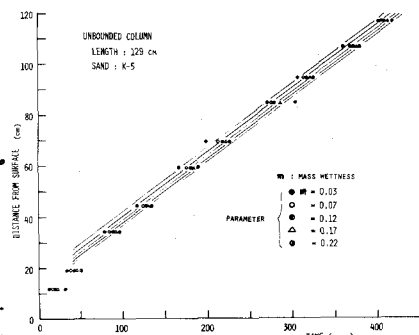


図-1(a). mass wetness の進行状況, $x(t; m)$

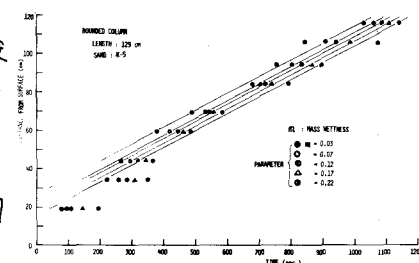


図-1(b). mass wetness の進行状況, $x(t; m)$

浸透量が平均的意味で直線，すなわち浸透係数が一定になる。(なお、K-5 の場合も同様の結果を得た。)

しかし、閉塞実験の場合、小さな時間スケールで調べると、空気の圧縮・膨張に基因する変動が生じており、その変動中は K-5 に比べ K-7 の方が、すなわち粒径の小さな方が大きな値となるが判った。

⑭ 空隙空気圧の変化を巨視的にみると、時間的に増加するが、増加の割合は実験開始直後が著しく、その後は次第に緩和となり無制限に大きな値にはならない。(K-5 の場合も同様) また、粒径の小さな場合(K-7) の方が全体的に大きな空気圧を示す。

3-2. 結果の考察

土壌水の運動を支配する方程式は、

$$\text{連続式: } \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots ①$$

$$\text{拡張した Darcy 則: } V = -K(\theta) \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad \dots\dots ②$$

ここに、 x : 下向き正符号, θ : volumetric moisture content, V : filter velocity, $K(\theta)$: hydraulic conductivity, Φ : total potential head ($= \psi + p_a + \phi$), ψ : capillary potential head, ϕ : gravity potential head, であり、また、一応空隙空気圧が V に対して potential であると仮定して、 p_a : air potential head とおく。

式①②より

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(-1 + \frac{\partial \theta}{\partial x}) \right\} \quad \dots\dots ③$$

==F, $D(\theta) = K(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \theta}$: moisture diffusivity

§3-1 ①の結果より θ は一定の相速度 ω とも座標系よりみれば定まった分布形をもち、§3-1 ⑭より p_a は時間とともに変化する。そこで、

$$z = x - \omega(t - t_0), \quad \tau = t - t_0 \quad \dots\dots ④$$

による座標変換を行うと、式③は次のようである。ただし、 ω は一定の相速度となる時刻とすると、 θ は z のみ、 p_a は z と τ の関数と考えられる。

$$-\omega \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{d\theta}{dz} \right) - \frac{dK}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dz} + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(K \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad \dots\dots ⑤$$

$$\text{境界条件: } z = \infty \quad \tau \frac{d\theta}{d\tau} = 0, \quad \text{but } \theta = \theta_0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots ⑥$$

として、 τ を固定して式⑤を $z = z$ から ∞ まで積分すると、

$$\omega(\theta - \theta_0) = -D \frac{d\theta}{dz} + \{K(\theta) - K(\theta_0)\} - K \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad \dots\dots ⑦$$

§3-1 ①の結果から、 $z = z_*$ で $\theta = \theta_*$ とすると、 $(d\theta/dz)_{z \rightarrow z_*} = 0$ と考えてよいから、式⑦より、

$$\omega = \frac{K(\theta_*) - K(\theta_0)}{\theta_* - \theta_0} - \frac{K(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}}{\theta_* - \theta_0} \bigg|_{z=z_*} \quad \dots\dots ⑧$$

ω が一定値に保たれるので、 $K(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \big|_{z=z_*} = \text{const.}$ という結果となるが、 $K(\theta) \sim \theta$ との関係から式⑧の才1項を計算すると、例えば、K-5, $L=129\text{cm}$ で $\omega=0.082\text{cm/sec.}$, K-7, $L=129\text{cm}$ で $\omega=0.0093\text{cm/sec.}$ とな

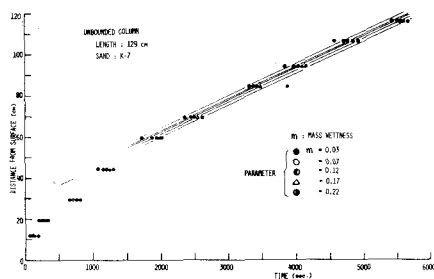


図-2(a). mass wetness の進行状況, $x(t; m)$

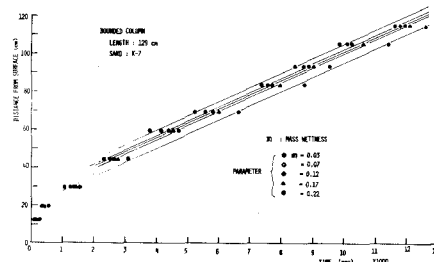


図-2(b). mass wetness の進行状況, $x(t; m)$

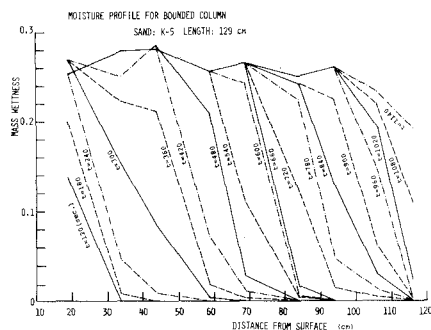


図-3. wetting front の進行状況, $m(x; t)$

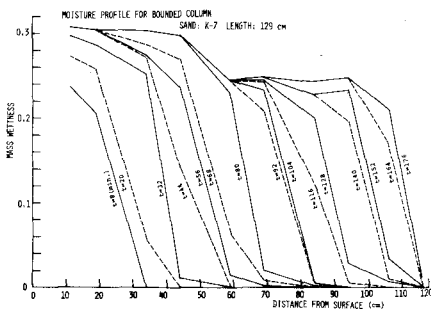


図-4. wetting front の進行状況, $m(x; t)$

り、それぞれに対応した ω の実測値は、 0.088 cm/sec. , 0.0080 cm/sec. で式⑧中の右辺第2項はほぼ零と考えてよい。

一方、すべての ω について $\partial p_a / \partial z$ が常に零であると仮定して、式⑦⑧より、移動座標系からみた wetting front の θ の分布形状は、

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{D(\theta) / (\theta_* - \theta_0)}{[(\theta_* - \theta_0) \{K(\theta) - K(\theta_0)\} - (\theta - \theta_0) \{K(\theta_0) - K(\theta_*)\}]} d\theta \quad \text{--- ⑨}$$

$$\therefore \theta_* = \theta_* - \Delta\theta, \Delta\theta \ll 1$$

図-6は、K-7の場合の図-2の ω へも関係より求めた最終の wetting front の形状と式⑨よりの計算値との比較を示したものである。式⑨中の計算で、 $K(\theta)$ は sorption 過程の $\psi \sim \theta$ 関係と $D(\theta)$ より間接的に求めたものを使、た。図よりすれば、実験値と計算値とのほぼ一致をみていることが判る。一方、最終の定常浸透強度 f_{∞} と wetting front の相速度 ω との関係は、閉塞、開放の場合、

$$f_{\infty} = \omega \cdot (\theta_* - \theta_0) \quad , \quad f_{\infty} = \omega (\theta_* - \theta_0) \quad \text{--- ⑩}$$

となるが、K-7の場合を含めて、ほぼ満足されることが判、た。

以上の考察に基づけば、水分移動に対して、式⑦⑧中の空隙空気の間隙圧微分を近似的に

$$\partial p_a / \partial z = 0 \quad \text{--- ⑪}$$

と仮定した妥当性が立証されたことになる。よ、閉塞、開放に関係なく wetting front に沿う空隙空気圧は空間的に一様であり、単に時間の関数 $p_a = p_a(t)$ と考えてよく、閉塞の場合、円筒下部で計測した空気圧がそれに対応するわけである。結局、下端と閉塞した場合の鉛直浸透に於ける空隙空気の影響は θ_0 なる値に集約され、境界値問題に変換されることになる。なお、wetting front の形状は一般に $d^2 K(\theta) / d\theta^2 > 0$ なる特性を示すから、式⑦より開放の場合の ω が閉塞の場合に比べ急激に変化することが判る。

次に、閉塞の場合の wetting front より上方の領域については、推定の域を出ないが、§3-1. ⑬⑭の事実に基づけば、内部空気圧、水圧及びメナスカスとの力学平衡関係のもとに、内部空気は圧縮、開放の繰返しを繰り返すと思われる。

§4. 結び

本文は、研究の第一歩として Dancy スケールでの時空間平均的スケールで現象把握を試みているので、その考察に対して閉塞の場合に生ずる空隙空気の圧縮、開放のメカニズムが導入されていない。すなわち、もう少し厳密に現象をみるなら、例えば Youngs & Peck¹⁾ が議論した圧縮、開放に伴う hysteresis の問題も当然考慮されねばならぬ問題であるが、ここではそれらをも平均的に扱っているということである。

さて、閉塞の場合の空隙空気は、圧縮に伴って上方向の浸透面を通して間歇的に大気中に放出される。さらに、上述の θ_0 の値は今回の実験範囲では柱径によってほぼ一定となっている。= ら両者の関係、すなわち空気放出のメカニズムと θ_0 の関係について、今後研究して行くつもりである。

参考文献

- 1) E.G. Youngs & A.J. Peck : moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies : 1. theoretical introduction, Soil Science, vol. 98, 1965

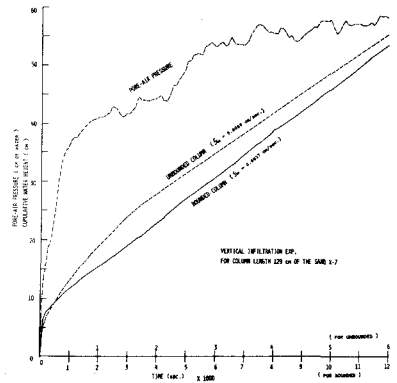


図-5. 累積浸透量と空隙圧の時間変化

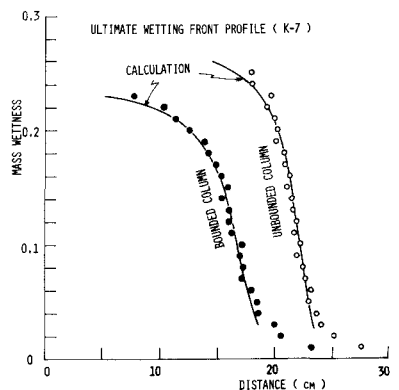


図-6. 最終の wetting front 形状