

京都大学防災研究所 正員 下島 栄一
同上 正員 石原 安雄

1.はじめに: 本文は、雨水が地面さらに地中へと浸透していく過程における地中の間隙空気の影響を明らかにし、浸透現象を理解するため、底部と閉じた円筒に気乾状態の単一砂柱を作り、その上面に常に一定の基水深を作り、実験を行うという単純化された初期条件、境界条件での浸透を対象として検討を加えたものである。

2.基礎式: 二のような条件下で実験を行うと、間隙空気は浸透面を通して間歇的に外界へ放出される=とが観察され、また浸透が進むにつれて水分分布は浸透面直下には発達する水分量が非常に大きな領域(擬似飽和域)とその下の遷移的領域に連なる比較的水分量の小さな領域(不飽和域)とで構成される=とが明確となる。以下では空気の放出に伴う不連続な閉塞浸透も平均的に二連続現象として扱う=とにする。そこで、各領域での水と空気の運動を表す基礎式とつぎのように考える。まず擬似飽和域において、水と空気の運動がDarcy則的な表現に従うと仮定すると、それぞれ次の式となる。

$$f = \hat{v} = \hat{k} \left\{ 1 - \frac{p_{a1} - p_{a0}}{x_1} \right\} = \hat{k} \left\{ 1 - \frac{\psi_1 + p_{a1} - p_{a0}}{x_1} \right\} \dots \textcircled{1}, \quad \hat{v}_a = -\hat{k}_a \frac{p_{a1} - p_{a0}}{x_1} \dots \textcircled{2}$$

= = =、 f : 浸透強度、 $\hat{v}$, $\hat{v}_a$: 本空気の流量流速、 $\hat{k}$, $\hat{k}_a$: 透水係数、透気係数に対応するものであり、位置座標(x)を浸透面を原点に重力方向を正符号とすると、 x_1 : 擬似飽和域下端の座標、 p_{a1} , p_{a0} : $x=x_1$, $x=0$ の水の圧力水頭、 p_{a1} , p_{a0} : $x=x_1$, $x=0$ の空気圧、 $\psi_1 = p_{a1} - p_{a0}$ である。なお、上式は擬似飽和域の体積含水比が一定値(θ_1)にあるとしている。いま、 $\hat{v}_a$ と $\hat{v}$ との関係は $\hat{v}_a = -\gamma \hat{v}$... $\textcircled{3}$ とおくと、上式より次の式をうる。

$$p_{a1} = (1 - \alpha r) x_1 - \psi_1 + p_{a0} - \beta r \dots \textcircled{4}, \quad = = =, \quad \alpha r = \frac{\hat{k}_a}{\hat{k}_a + \beta r} \dots \textcircled{5}, \quad \beta r = \alpha r (-\psi_1 + p_{a0} - p_{a1}) \dots \textcircled{6}$$

= = =、式 $\textcircled{1}$ に式 $\textcircled{4}$ を代入すると次の式がえられる。 $f = \hat{v} = \alpha r \hat{k} \left\{ 1 + \frac{\beta r}{x_1} \right\} \dots \textcircled{7}$

本来、式 $\textcircled{1}$ 、式 $\textcircled{2}$ が擬似飽和域での基礎式となるが、以下ではその代替として式 $\textcircled{1}$ 、式 $\textcircled{4}$ を考慮=とにする。つぎに不飽和域における水と空気の運動の式は一般化されたDarcy則を考慮せよとの、これらの式と各相に対する連続の式及び空気の状態方程式(等温変化する理想気体と仮定)が、= = = の基礎式となる。

3.近似解の誘導: 上述の初期・境界条件、 $x=x_1$ で両相の流量流速が連続する=と、さらに $x=x_1$ (不飽和域の上端)での体積含水比が一定の θ_1 にある=と仮定を考慮し、2.での基礎式系に対しPoulangeの手法を修正拡張し、用いる二オ二次近似は次の式となるが、誘導過程で近似的に $\gamma=1$ とおき、この際の αr , βr を α , β と記した。

$$\text{水分分布: } x(\theta, t) = x_1(t) - \int_0^t F d\theta \dots \textcircled{8}, \quad \text{空気圧分布: } p_a(\theta, t) = p_{a1} + \int_0^t A d\theta - \int_0^t A F d\theta \dots \textcircled{9}$$

$$\text{浸透強度: } \int_0^t f(\theta) d\theta = \int_0^t x d\theta = \alpha x_1 - \int_0^t \theta F d\theta \dots \textcircled{10}, \quad = = =, \quad F = D(\theta, A) / \{ K(\theta, A) - \int_0^t \frac{\partial x}{\partial \theta} d\theta \},$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) = \frac{\int_0^t \frac{\partial D(\theta, A)}{\partial t} d\theta + \frac{\partial F}{\partial t} \int_0^t \theta d\theta}{\int_0^t \frac{\partial K(\theta, A)}{\partial t} d\theta + \frac{\partial F}{\partial t} \int_0^t \theta d\theta} \cdot \left[f - \frac{\partial F}{\partial t} \int_0^t \theta d\theta \right] + \frac{\partial F}{\partial t} \left[\int_0^t \theta d\theta + \beta r \frac{\partial x}{\partial t} \right], \quad A = \frac{K}{K + k_a}$$

記号の意味は、 θ : 体積含水比、 $k(\theta)$: 不飽和透水係数、 $D(\theta)$: 水の拡散係数、 p_a : 大気圧からの増加空気圧、 $k_a(\theta)$: 透気係数、である。上式で $\alpha(t)$, $\beta(t)$, p_{a0} , p_{a1} , θ_1 , $\hat{k}$ が与えられると、式 $\textcircled{10}$ より浸透強度の時間変化が決るので、これを式 $\textcircled{7}$ に用いると擬似飽和域の深さが分り、またこれを式 $\textcircled{8}$ に用いると水分分布が、式 $\textcircled{9}$ を考慮して式 $\textcircled{9}$ に用いると空気圧分布が時間の関数として決る=とになる。

4.諸定数・諸変数の決定: 大気圧下にあるU字形をした毛細管の上面に一定の深さのグリセリンを浸透媒体として与えるという実験の結果を砂層での基水浸透の場合に適用した結果、 $p_{a0} \div$ 基水深(h_w) ... $\textcircled{11}$ となり、またある程度浸透が進んだ状況(擬似飽和域の発達段階)では $(1 - \alpha r) \psi_1 \div$ air entry value (ψ_a) ... $\textcircled{12}$ となる=とが分っている。そこで、 $p_{a0} \div h_w$... $\textcircled{13}$ と考え、式 $\textcircled{7}$ 、式 $\textcircled{4}$ 、式 $\textcircled{6}$ はそれぞれつぎのようになる。

$$f = \alpha r \hat{k} \left(1 - \frac{\psi_1}{x_1} \right) \dots \textcircled{14}, \quad p_{a1} - h_w = (1 - \alpha r) (x_1 - \psi_1) \dots \textcircled{15}, \quad \beta r = -\alpha r \psi_1 \dots \textcircled{16}$$

と=3で、比較的浸透初期の段階にある浸透強度、砂底部での空気圧(4)
および水分の移動はヤヤヤれ次式にほぼ従うことが認められている。

$$f = \frac{S}{2} \sqrt{t} \quad \cdots (17), \quad p_{al} = C_1 \ln t + C_2 + h_w \quad \cdots (18), \quad x(t) = q(t) \sqrt{t} \quad \cdots (19)$$

==f, S, C₁, C₂; 実験定数。また p_{al} は p_{al} とほぼ同形式の変化をしますので、つぎの関係が成立する。 p_{al} - h_w = C₁ ln t + C₂' $\cdots (20)$ C₂' : 定数 と=3で、式(4)と式(17) および式(5)と式(20)を等置する=とにより、次式の関係をうる。

$$\alpha_r = \frac{S}{2} q_1 / \left\{ \frac{S}{2} q_1 + \hat{k} (C_1 \ln t + C_2') \right\} \quad \cdots (21) \quad ==f, q_1 = q(t)$$

$$\beta_r = \frac{S}{2} q_1 / \hat{k} - \frac{S}{2} q_1 \sqrt{t} / \left\{ \frac{S}{2} + \hat{k} (C_1 \ln t + C_2') \right\} \quad \cdots (22)$$

α_r, β_r の時間変化の様子を調べるため、平均粒径がほぼ 0.12 mm で比較的均一な砂(K-7砂と記す)を用いた厚(L)が 169 cm, 透水深がほぼ 1 cm の場合の実験例を検討すると図1のようになる。この場合 $S=0.419 \text{ cm/sec}^2$, $C_1=4.73 \text{ cm/sec}$, $C_2=-9.7 \text{ cm/sec}$ であったが、 C_2' と q_1 の値が不明であるので、とりあえず $C_2'=C_2$, $q_1=0.2 \text{ cm/sec}^2$ とした(Kは後述)。この図より、 α_r は浸透開始直後で急減するが、その後は非常に緩慢な減少変化をする=と、および β_r は余り変化しない=とが分る。と=3で、

浸透強度、砂底部での空気圧の変化割合及び wetting front の移動速度が浸透が進むに従ってほぼ一定となるという実験事実(図-3, 4参照)を考慮して α_r, β_r の定義式を調べると、両者は時間とともに一定の値 α_c, β_c とはなる=とが考えられる。 $\alpha_r \rightarrow \alpha_c, \beta_r \rightarrow \beta_c \quad \cdots (23)$ 这其中、とくに α_r が急な変化をしている時間帯は少なくとも類似飽和域の形成段階に并立する=と=なる。なお、式(23)より $\beta_r \rightarrow \beta_c \rightarrow \alpha_c \rightarrow \alpha_c$ $\cdots (24)$ と=なるので、式(16)より $\beta_c = -\frac{\alpha_c}{1-\alpha_c} \psi_c \quad \cdots (25)$ と=なる。さて、3.の結果を計算するに当り、 $\alpha(t), \beta(t)$ の関係を決める必要がある。と=3で $t=0$ かつ $\alpha_r \rightarrow \alpha_c$ とし、 $\alpha_x = \frac{\alpha_r - \alpha_c}{\alpha_0 - \alpha_c}$ の変化は図1の場合に并し $\alpha_0=1$ $\alpha_c=0.28$ (後述)として調べたものが図2であるが、 $\alpha_x = e^{-\lambda \sqrt{t}}$ ($\lambda=0.19 \text{ sec}^{-1/2}$) と=なるので、これより決る α_r も α とする。一、 β_r はほぼ一定となるので $\beta_r = \beta_c$ とおく。また β_r はほぼ 90% 飽和の値と、K は K(t) の値を用いる。

5.計算値と実験値との比較: 図3(a)(b)はK-7砂による浸透強度と砂底部の空気圧の計算値と実験値の比較であり、ヤヤヤれ $h_w=1 \text{ cm}$, $L=169 \text{ cm}$ の場合と $h_w=5 \text{ cm}$, $L=165 \text{ cm}$ の場合である。計算値は破線。また図4は前図の場合及び他の実験条件の場合での wetting front の深さの比較である。これらの計算では $\lambda=0.19$, $\alpha_c=0.28$ としたが、 α_c の値はつきのようにして決定した。すなわち、 α_c を固定して λ を 0.19~0.10 範囲で変化させると、上記の浸透荷性量への影響は浸透初期のみとなり、それ以降の変化はほぼ一致する。また α_c の変化はとくに空気圧の変化に明確な影響を及ぼす=とが分ったので、 α_c の値は計算空気圧が実験値とほぼ合致するものを選んだ。これらの図より計算値はほぼ実験値と合致している=とが分るので、若干浸透初期では問題が残るがほぼ上記の理論的考察の妥当性が保証された=と=なる。また計算で $K_{al}/K_0 \approx 3.5$ となったが、この結果は類似飽和域での空気抵抗が不飽和域に比べかなり大きく=なる=とを意味する。

5.計算値と実験値との比較: 図3(a)(b)はK-7砂による浸透強度と砂底部の空気圧の計算値と実験値の比較であり、ヤヤヤれ $h_w=1 \text{ cm}$, $L=169 \text{ cm}$ の場合と $h_w=5 \text{ cm}$, $L=165 \text{ cm}$ の場合である。計算値は破線。また図4は前図の場合及び他の実験条件の場合での wetting front の深さの比較である。これらの計算では $\lambda=0.19$, $\alpha_c=0.28$ としたが、 α_c の値はつきのようにして決定した。すなわち、 α_c を固定して λ を 0.19~0.10 範囲で変化させると、上記の浸透荷性量への影響は浸透初期のみとなり、それ以降の変化はほぼ一致する。また α_c の変化はとくに空気圧の変化に明確な影響を及ぼす=とが分ったので、 α_c の値は計算空気圧が実験値とほぼ合致するものを選んだ。これらの図より計算値はほぼ実験値と合致している=とが分るので、若干浸透初期では問題が残るがほぼ上記の理論的考察の妥当性が保証された=と=なる。また計算で $K_{al}/K_0 \approx 3.5$ となったが、この結果は類似飽和域での空気抵抗が不飽和域に比べかなり大きく=なる=とを意味する。

《参考文献》1)石原・下島: 軟弱地質年報, 昭54, 2)石原・下島: 軟弱地質年報, 昭55, 3)石原・下島: 軟弱地質年報, 昭56, 4)石原・下島: 軟弱地質年報, 昭57

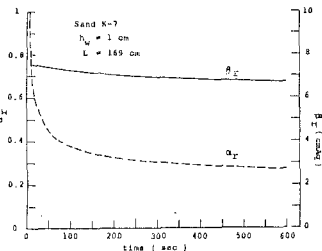


図1 α_r, β_r の変化

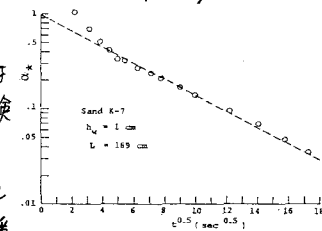


図2 α^* の変化

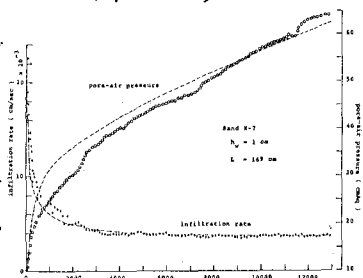


図3(a) 浸透強度と砂底部の空気圧

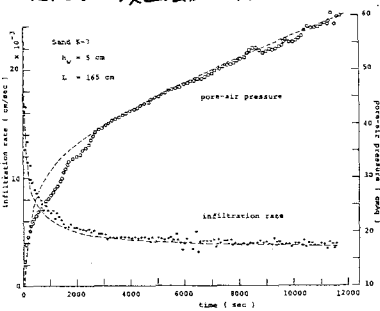


図3(b) 浸透強度と砂底部の空気圧

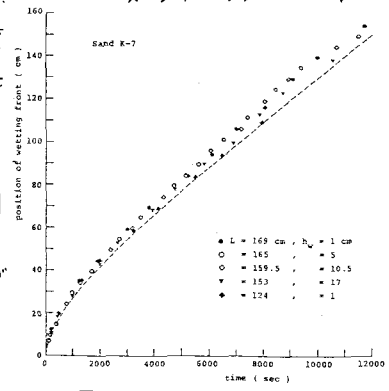


図4 wetting front の深さ