

京都大学防災研究所 正員 下島栄一, 石原安雄
岡山県 正員 時松昌則

(1)はじめに: 下端が閉じた浸透場に湛水浸透が生起する場合, 場の間隙空気は浸透水と自由に交換できず一時的に閉塞状態となり, ある程度時間が経たず, 閉塞されていた空気の一部は浸透面を通して交換が可能となり, 外界に放出されるといった間歇的あるいは連続的現象を呈する。この空気の放出過程は, 場が一様な場合, 浸透面直下で形成される水分の非常に大きな領域(これを擬似飽和域とよぶ)で決定されると考えられる。そこで, 本文では擬似飽和域内での水・空気の運動機構を考察することにより, 空気閉塞を伴う浸透現象の解明を試みたものである。

(2)実験方法: 内径18.5cm, 長さ100~150cm程度の底部を閉じた円筒に気乾状態の砂を入れて単一砂柱を作り, この上部より給水して終極一定の湛水深(p_w)で実験を行った。実験砂はそれぞれ平均粒径0.15, 0.23mmのほぼ同一粒径のK7砂およびK6砂を用いた。なお, 空気圧(p_a)の計測は円筒下端で行った。

(3)擬似飽和域での運動機構の仮定: 間歇的・連続的な空気の放出を伴う一連の浸透現象と連続現象とみなす立場にとり, 擬似飽和域内の空気の移動に対して, 間歇的な空気放出の限界状態で成立する力の釣合式のanalogy的表現として, $p_{a1} = (1-\alpha)x_1 + (p_{w0} - \psi_1 - \beta) \dots \textcircled{1}$ が仮定できる。ここに, x_1 , p_{w0} , p_{a1} , ψ_1 ; それぞれ擬似飽和域の長さ, その上端の水圧, 下端の空気圧および毛管水ポテンシャル, α, β ; 定数。つぎに, 浸透水の移動がDarcy則的に表現できるなら, $-M = R \cdot (1 - \frac{p_{a1} - p_{w0}}{x_1}) \dots \textcircled{2}$ とする。ここに, $-M$; 浸透強度, R ; この領域の不飽和透水係数に対応する定数, p_{w1} ; この領域の下端の水圧。なお, $p_{w1} = p_{a1} + \psi_1 \dots \textcircled{3}$ と分解できる。そこで, 式②に式①を代入すると $-M = \alpha R \cdot (1 + \frac{\beta \psi_1}{x_1}) \dots \textcircled{4}$ となり, 仮定式①④が擬似飽和域での基本式となる。とすることで, この基本式の妥当性と直接に実験結果を用いて検討するとは計測の精度のからして困難であったので, 昨号報告した擬似飽和域の下部に連なる不飽和域を対象にして誘導した近似解とこの仮定式とを組合せて計算を行い, その結果と実験結果との比較より間接的に妥当性と検討することとする。

(4)計算における基礎式: 不飽和域では水・空気に対してそれぞれ一般化されたDarcy則と連続の式が成立するので, この運動式と連続式および空気は等温変化する理想気体と仮定した状態方程式よりなる基本式系も, 初期条件: $t=0$ で $\theta(x)=0$, $p_a(x)=0$, 境界条件: $x=x_1(t)$ で $\theta=\theta_1=const.$, $[D \frac{\partial \theta}{\partial x} - K(\theta) \frac{\partial p_a}{\partial x}] = M(t)$, また $x=L$ で $[D \frac{\partial \theta}{\partial x} - K(\theta) \frac{\partial p_a}{\partial x}] = 0$, $[K_a(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t})] = 0$ のもとで考え, 近似解と既報と与えた。ここに, θ ; 体積含水比, D ; 水の拡散係数, K ; 不飽和透水係数, K_a ; 透気係数, p_a ; 大気圧からの増加空気圧, ρ_a, ρ_w ; 空気・水の密度, L ; 砂層厚, t ; 時間, x ; 砂層の表面を $x=0$ とし重力方向を正とする座標。この結果を再記すると,

$$\text{水分の分布形状: } X(\theta, t) = x_1 - \int_0^{\theta} \frac{D \cdot (1-A)}{K \cdot (1-A) - \theta \frac{dA}{d\theta} + (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) B_2(\theta)} d\theta \dots \textcircled{5}$$

$$\text{浸透強度: } -\frac{dM}{dt} = [M + \theta \frac{dM}{d\theta} + \frac{d}{d\theta} \int_0^{\theta} \frac{D \cdot (1-A)}{K \cdot (1-A) - \theta \frac{dA}{d\theta} + (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) B_2(\theta)} d\theta] / [\int_0^{\theta} \frac{D \cdot (1-A)}{K \cdot (1-A) - \theta \frac{dA}{d\theta} + (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) B_2(\theta)} d\theta + Z \cdot (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) \frac{B_2(\theta)}{B_2(\theta_1)} (\frac{B_2(\theta)}{B_2(\theta_1)} - \frac{B_2(\theta)}{B_2(\theta_1)})] \dots \textcircled{6}$$

$$\text{空気圧の分布形状: } p_a(\theta, t) = p_a(\theta_1, t) - \int_0^{\theta} \frac{A \cdot D}{K \cdot (1-A) - \theta \frac{dA}{d\theta} + (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) B_2(\theta)} d\theta \dots \textcircled{7}$$

$=$ なる, $A = K/(K + K_a)$, $B_2(\theta) = \int_0^{\theta} \int_0^{\theta} D \cdot (1-A) / (M + K \cdot (1-A))^2 d\theta d\theta$, $B_3(\theta) = \int_0^{\theta} \int_0^{\theta} D \cdot (1-A) / (M + K \cdot (1-A))^2 d\theta d\theta$, $Y = \{K \cdot (1-A) - \theta \frac{dA}{d\theta} + (M + \theta \frac{dM}{d\theta}) B_2(\theta)\}^2$ となる。そこで, 式④の dM/dt を式④に代入すると $-M(t)$ についての常微分方程式がえられるので, これを解くと $-M(t)$ が求まり, また, この $-M(t)$ を式④に代入すると $x_1(t)$ が決まる。さらに, この $-M(t)$, $x_1(t)$ を式⑤および式①を考慮した式⑦に用いると, それぞれ $x(\theta, t)$, $p_a(\theta, t)$ が決定されることとなる。

(5)擬似飽和域での諸定数: 計算を行うに当り $\alpha, \beta, R, \psi_1, p_{w0}$ の諸定数も決定する必要がある。擬似飽和域 θ_1 の発達を正確に追跡できなかったため, θ_1 より若干小さなほぼ一定の水分量 θ_1' に注目し, その移動の様子もK7砂の場合について調べたものが図1である。この図より, θ_1' は時間とともにほぼ一定の値に漸近する様子が判るが,

$\theta < \theta_1$ であるので、 θ_1 は θ と同様な変化で発達するといふことが予想できる。とこで、浸透強度は後述の図3,5より判るように大略時間とともに減少していきが、この場合、浸透

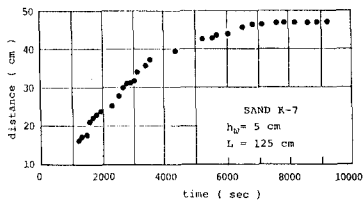


図-1. θ_1 の移動の様子

がある程度進んだ際には、近似的に $-M \div (\theta_1 - \theta_c) \frac{d\theta}{dt} + \frac{\beta}{\alpha} K_s (1 - A_s) \dots$ ⑧ が成立する。こゝに、 $\theta_c: K(A)$ が最大値をとる θ の値、 $\beta: \frac{d\theta}{dt} \div 0$ となる θ の値、 $K_s(1 - A_s): \theta = \theta_s$ の $K(1 - A)$ の値。そこで、式⑧を式④と等しくおくと、 $\frac{d\theta}{dt} \div \left\{ -\frac{\beta}{\alpha} K_s (1 - A_s) + R \left(\alpha + \frac{\beta}{\alpha} \right) \right\} / (\theta_1 - \theta_c) \dots$ ⑨ となる。それゆゑ、式④に対し $d(G-M)/dt \leq 0$, $\alpha < 1$ の関係を用ゐると、

$\beta > 0$ となり、また、 $t \rightarrow \infty$ で $\frac{d\theta}{dt} \rightarrow 0$ であるので、 α の値は式④より $\alpha < \frac{\beta}{\alpha} \frac{K_s(1 - A_s)}{R} \dots$ ⑩ と少くとも満すこととなる。さう、 $\beta \div \theta_c$ と考へてよいので、 $\beta/\theta_c \div 1$ とし式⑩の右辺を概略計算すると、

K-7砂、K-6砂ではそれぞれ0.45, 0.40程度となる。実際に x_1 の発達の様子も数値計算した例が図2である。この図はK-7砂の場合であり、 θ_1 の値も90%飽和程度の0.41、 R は飽和透水係数の $65 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、また、 $t=0$ で $-M = 1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ とし、 α, β の値を変えたものである。こゝで採用した α の範囲での x_1 の発達、 β の値によつて類似したものがあり、図1との比較検討からは前者で α の値も決定できたので、才1次近似的な意味で K-7砂、K-6砂とも $\alpha = 0.3, \beta > 0$ を用ゐる。つぎに、 $p_{w,0}$ はほぼ基本深が対応するので $p_{w,0} = p_{w,\infty}$ とする。また、 ψ_1 の値は実験所の air entry value (ψ_e) が大略対応するので、 $\psi_1 = \psi_e$ とする。

(6)実験値と計算値との比較：以上の諸定数を用ゐて計算したものが図3,6である。図3,図4はK-7砂の場合で、それぞれ浸透強度と空気圧の時間変化および $\theta_1/2 = 0.205$ で代表させた wetting front の移動の様子を示し、一寺、図5、図6はK-6砂の場合でそれぞれ図3,図4に対応する。なお、計算では実験での浸透強度がK-7砂、K-6砂に対しそれぞれ $1 \times 10^{-2}, 4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ となる時間を時間原点にとつた。これらの諸図において計算値は実験値とほぼ一致しており、このことより、擬似飽和域での水の運動は式④で表現でき、空気

については、式①で与えられ、この式は運動の式と代替ができることが明らかになった。

<参考文献>

- 1) 石原・下島・佐谷; 井澤, 1978
- 2) 石原・下島; 京大防砂物年報, 1978

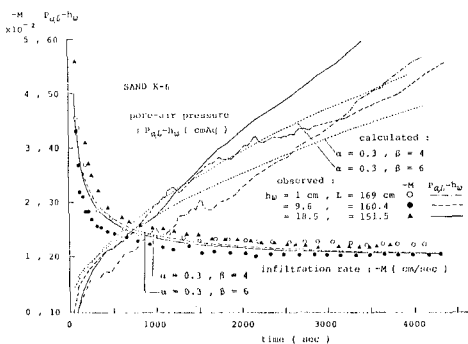


図-5. 浸透強度と空気圧の時間変化

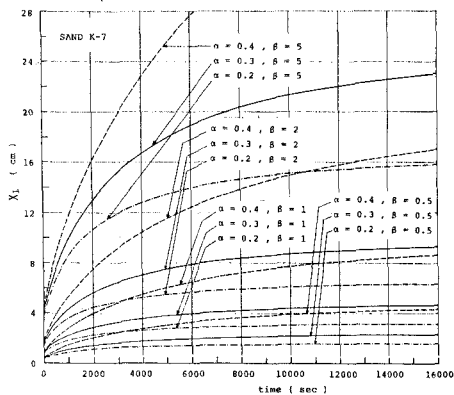


図-2. 擬似飽和域の発達の様子

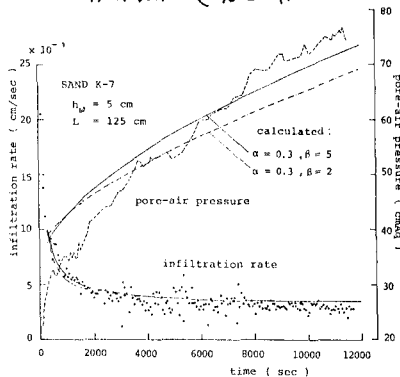


図-3. 浸透強度と空気圧の時間変化

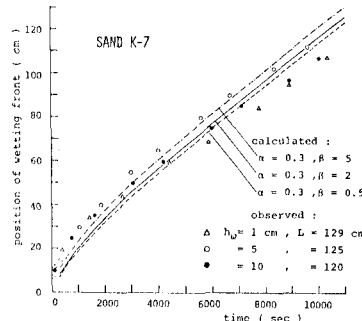


図-4. wetting front の移動

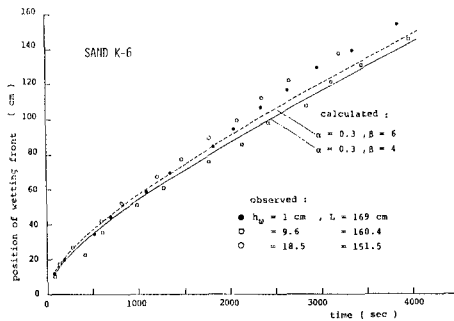


図-6. wetting front の移動