

広島大学工学部 正員 三島隆明
 広島大学工学部 正員 金丸昭治

1. まえがき 雨水の流出現象に関連した主要な現象として、従来、各研究者によって雨水の鉛直浸透現象についての研究が続けられ、有用な成果が得られているが、研究の多くは Philip⁹ に代表されるように土中の空隙空間が浸透水と容易に置換される場合を対象としたもので、空隙空間の圧縮性を考慮しない場合の解析が主体になっているようである。

しかし、実際には、鉛直浸透の多くの実験で観察される土中空気の間隙的逸散現象からも推測されるように、土中の空気は何らかの圧縮作用を受けて流動しているものと考えられる。そこで、この研究においては、土中の空気の圧縮性をも考慮した時の雨水の一次元の飽和鉛直浸透機構について考察し、若干の数値計算を行なったので、その結果を述べる。

2. 基礎方程式 取り扱いを容易にするために単位面積当りの土柱の空隙中の水および空気は図1に示すような連続体と考え、その流動は Darcy 則に従うものとすれば、土中空気や圧縮性を考慮した場合の水および空気の各流体の運動方程式および連続方程式は (1) 式～(4) 式のように表わされる。

$$\begin{cases} q_w = -k_{rw} \rho_w S_w \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_w}{\rho_w g} \right) + 1 \right\} & \text{--- (1)} \\ q_a = -k_a \rho_a S_a \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_a}{\rho_a g} \right) + 1 \right\} & \text{--- (2)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} m \rho_w \frac{\partial S_w}{\partial t} = - \frac{\partial q_w}{\partial z} & \text{--- (3)} \\ m \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a S_a) = - \frac{\partial q_a}{\partial z} & \text{--- (4)} \end{cases}$$

ここに、 q ：単位面積当りの流量、 S ：飽和度、 P ：圧力、 ρ ：密度、 g ：重力加速度、 m ：空隙率、 z ：上方向に取った距離、 t ：時間、 k_w, k_a ：透水係数および透気係数、添字の w, a ：水および空気に関することを表わす。

また、空気の状態方程式、各流体相互の圧力および飽和度の関係式は (5)～(7) 式のように表わされる。

$$\rho_a / \rho_{a0} = (P_a / P_{a0})^{1/\beta} \quad \text{--- (5)}$$

$$P_a = P_w + P_c \quad \text{--- (6)}$$

$$S_w + S_a = 1 \quad \text{--- (7)}$$

ここに、 P_0 ：毛管圧、 d ：定数、添字の $a0$ ：空気の基準状態を表わす。

これらの関係要素のうち、 k および P_c は空隙の構造

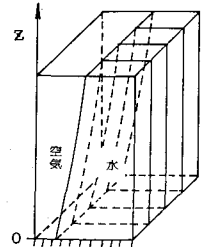


図1. 水と空気の流動の模式図

に支配されることになり、一般に飽和度の関数となるが、種々な資料を参考にすると、それぞれ概略 (8)～(9) 式のように近似できるようである。

$$k_w = k_{w0} S_w^\beta, \quad k_a = k_{a0} S_a^r \quad \text{--- (8)}$$

$$P_c = \frac{E}{S_w + \delta} \quad \text{--- (9)}$$

ここに、 β, r, δ, E ：定数である。

また、これらの式を代入整理し、層厚 d および k_{w0} で無次元化した、つぎのような無次元量を用いて表わすと、流動の基礎方程式は (10)～(13) 式ようになる。

$$Z = \frac{z}{d}, \quad T = \frac{k_{w0} t}{m d}, \quad Q_w = \frac{q_w}{k_{w0} \rho_w}$$

$$Q_a = \frac{q_a}{k_{w0} \rho_w}, \quad P_w = \frac{P_w}{\rho_w g d}, \quad P_a = \frac{P_a}{\rho_w g d}$$

$$C_1 = 1 + \beta, \quad C_2 = k_{a0} / k_{w0}, \quad C_3 = (\rho_{a0} / \rho_w) / (\rho_{a0} / \rho_w g d)^{1/\beta}$$

$$C_4 = E / \rho_w g d, \quad C_5 = \delta, \quad C_6 = 1 + r, \quad C_7 = \alpha$$

$$\begin{cases} Q_w = -S_w^{C_1} \left(\frac{\partial P_w}{\partial Z} + 1 \right) & \text{--- (10)} \\ Q_a = -C_2 \cdot C_3 \cdot (P_w + \frac{C_4}{S_w + C_5})^{1/C_7} (1 - S_w)^{C_6} & \end{cases}$$

$$\times \left\{ \frac{1}{C_7} \cdot \frac{\partial}{\partial Z} \left(P_w + \frac{C_4}{S_w + C_5} \right)^{1-1/C_7} + 1 \right\} \quad \text{--- (11)}$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial T} = - \frac{\partial Q_w}{\partial Z} \quad \text{--- (12)}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial P_w}{\partial T} = \left[C_3 \left(P_w + \frac{C_4}{S_w + C_5} \right)^{1/C_7} \times \left\{ \frac{1}{C_7} (1 - S_w) \times \left(P_w + \frac{C_4}{S_w + C_5} \right)^{-1} \right. \right. \\ \times \left. \left. \frac{C_4}{(S_w + C_5)^2} + 1 \right\} \times \left(- \frac{\partial Q_w}{\partial Z} \right) + \left(- \frac{\partial Q_a}{\partial Z} \right) \right] \\ \div \left[\frac{C_3}{C_7} (1 - S_w) \times \left(P_w + \frac{C_4}{S_w + C_5} \right)^{1/C_7 - 1} \right] \end{cases} \quad \text{--- (13)}$$

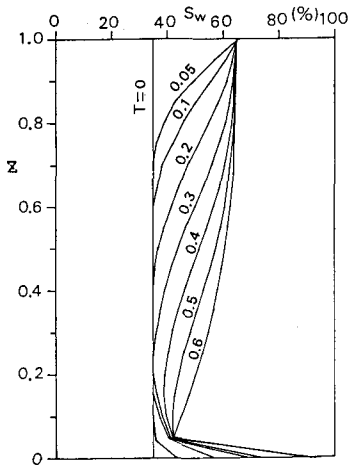


図2. 試算I ($C_1, C_6=1.0$) の飽和度の変化

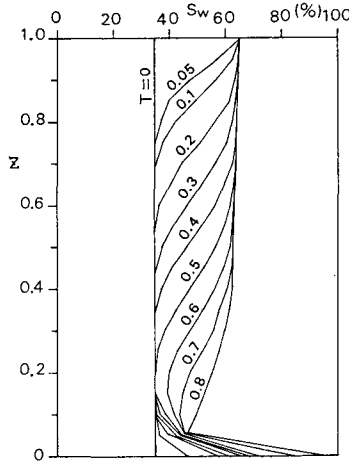


図3. 試算II ($C_1, C_6=2.0$) の飽和度の変化

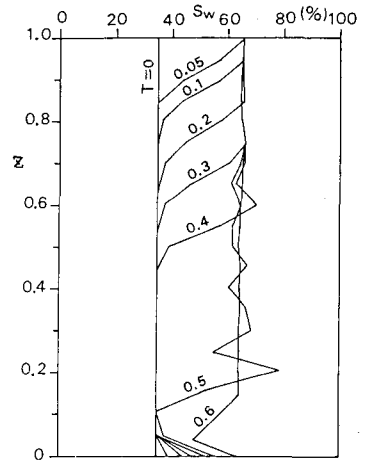


図4. 試算 ($C_1, C_6=3.0$) の飽和度の変化

3. 試算結果 前述の式の具体的な試算は差分計算によるを得ないが、この試算においては、各式を陽形の前進型差分式に書き替えて計算することにした。

初期条件、境界条件ならびに各パラメーター値は極く一般的と考えられる断熱的現象を想定し、 S_w の初期値は35%、 P_w の初期値は P_a が大気圧になるように取り、土層表面の境界条件としての S_w は65%、 P_w については越流水深が10cmに相当する時の値を、また、土層底面は不透層とした。さらに、パラメーター $C_2=1.0$ 、 $C_3=2 \times 10^{-4}$ 、 $C_4=0.05$ 、 $C_5=0.01$ 、 $C_7=1.4$ に取り、 C_1 および C_6 については、1.0、2.0、3.0 の3ケースについて試算した。これらの計算において、 $\Delta z=0.05$ に取り、 ΔT は各時間における P_w が発散しないよう十分小さな値が取れるようにして計算した。

図2～図7は各ケース(試算I～III)における飽和度 S_w および浸透量の変化を示したものである。これらの図からわかるように、 C_1, C_6 が小さくなるほど、すなわち、間隙が一様な土層ほど層内の飽和度分布は全層的な変化をする傾向が強くなるために、浸透量の時間的变化は浸透開始時より比較的長時間にわたって流量変動を伴いながら減衰していくのに対して、 C_1, C_6 が大きくなる、すなわち、間隙の構造あるいは構成が複雑になるほど比較的狭い範囲の飽和度分布の変化を伴って浸透が進行するために、流動は比較的安定したものになるが、図4および図7に示すように、ある程度時間が経過した所で突発的に空気が逸脱し、浸透量が急変する現象が表われる傾向が強くなる。

4. あとがき 土中隙の空気の圧縮性を考慮した不能浸透機構のモデル化について定性的ではあるが、有益な結果が得られた。今後、実験的な検討を加えていくとともに数値計算においても計算時間の短縮化を検討していく予定である。

参考文献

- 1) Philip, J.R.: The theory of infiltration, Soil Sci., 83, 1957, 2) 金丸・三島, 35回中研講など

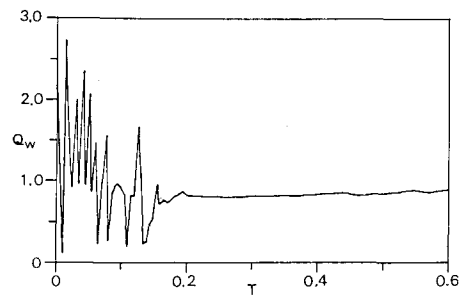


図5. 試算Iの浸透量の変化

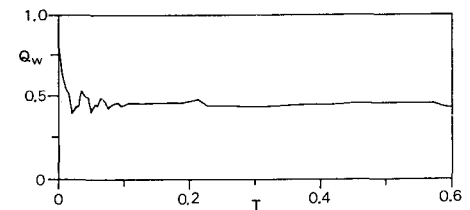


図6. 試算IIの浸透量の変化

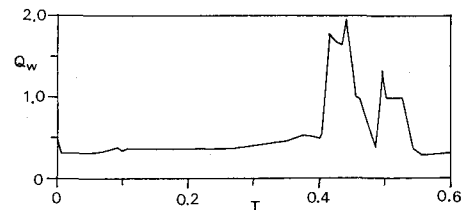


図7. 試算IIIの浸透量の変化