

II-14 雨水の鉛直浸透機構について(2)

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. はじめに 実流域の表層付近における雨水の浸透現象においては、表層地形の起伏や表層内の動植物の活動などによって生じた大小の空洞が存在するために、土中の空気を圧縮するような形での雨水の浸透現象は希であり、圧縮がおこる場合でも、土中の空気圧は大気圧よりも多少高い値になり、その時間的場所的な変動は小さい場合が多いものと思われる。そこで、著者らは、このように、土中の空気圧の変動が無視できるような状態における雨水の鉛直浸透現象について考察したので、その結果について述べる。

2. 基礎的考察 地中への雨水の浸透現象は、厳密には不連続的な現象であるが、時間スケールを拡大して、現象場および流動を以下のように連続的な鉛直一次元の浸透現象としてモデル化すると、地表面が湿水状態になった時のように供給水が十分に存在する場合の浸透現象を解析的に取扱うことができる。

- ① 土層は均一である。
- ② 単位体積中の土中水および空気はそれぞれ連続状態を保って流動する。
- ③ 土中水の流動は、Darcy則に従う鉛直一次元流である。
- ④ 飽和度 $S = S_u$ における透水係数 k_{wu} は一定である。
- ⑤ 土中の空気圧 p_a は、常に大気圧 p_{a0} より高い一定値を保って流動し、時間的場所的な変動は無視することができる。
- ⑥ 土中の水圧 p_w と空気圧および毛管圧 p_c は常に釣合い状態を保っている。
- ⑦ 毛管圧は、飽和度の上限 S_u と下限 S_l の範囲内で飽和度 S に対して直線式で表される。
- ⑧ 土および水は非圧縮性である。
- ⑨ 土層表面には充分な供給水が存在する。

このようにモデル化した場合の浸透現象における連続方程式、運動方程式および状態方程式は(1)~(3)式のように表されるので、流動の基礎方程式は(4)式ようになる。

$$n \frac{\partial S}{\partial t} + n_w \frac{\partial S}{\partial z} + n(S - S_l) \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1) \quad w = \frac{k_{wu}}{\rho g n} \left(\frac{\partial p_w}{\partial z} + \rho g \right) \quad (2)$$

$$p_w = p_a - p_c \quad ; \quad p_c = -\alpha \rho g (S - S_l) + \beta \quad (3)$$

$$n \frac{\partial S}{\partial t} - k_{wu} \frac{\partial S}{\partial z} - \alpha k_{wu} \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 - \alpha k_{wu} (S - S_l) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 z は鉛直上方に取った距離、 n は空隙率、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 α 、 β は土に固有の値である。また、 k_{wu} と層厚 d で無次元化した無次元量 $T = k_{wu} t / nd$ 、 $Z = z / d$ 、 $A = d / \alpha$ で表すと、(4)式は(5)式のようになり、その解として(6)式のような解析解が得られる。

$$A \frac{\partial S}{\partial T} - A \frac{\partial S}{\partial Z} - \left(\frac{\partial S}{\partial Z} \right)^2 - (S - S_l) \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} = 0 \quad (5)$$

$$S = S_l + \frac{C_2}{(T + C_1)^{1/2}} - \frac{\{\sqrt{A}(Z + T) + C_3\}^2}{6(T + C_1)} \quad (6)$$

ここに、 C_1 、 C_2 、 C_3 は初期条件および境界条件で決まる定数である。

このように表した時の無次元浸透能 $I = -n_w (S - S_l) / k_{wu} = (S - S_l) (\partial S / \partial Z + A) / A$ となる。

具体的な解を求めるための初期条件および境界条件の中に適用付加条件として浸透能を考慮する必要があるが、この条件としては、初期浸透能 I_0 および最終浸透能 I_∞ を用いるのが好都合であり、各条件は以下

のように与えることにする。

初期条件: $T=0, Z=0$ で $S=S_u$

$$I_s = (S_u - S_1) \cdot [1 + \{ (2/3A) \times \{ C_2 / C_1 \}^{1/3} - (S_u - S_1) / C_1 \}]^{1/2}$$

境界条件: $T=T_e$ で $I_e = S_u - S_1$, また、

$$I_e = (S_u - S_1) \cdot [1 + \{ (2/3A) \times \{ C_2 / (T_e + C_1) \}^{1/3} - (S_u - S_1) \div (T_e + C_1) \}]^{1/2}$$

これらの条件のもとで、 C_1, C_2, C_3 を決定することになるが、一般に、地表面湛水状態における浸透現象においては、 $\partial S / \partial Z \geq 0$ になるので、この点を考慮すると、 C_1, C_2, C_3 は次のようになる。

$$C_1 = (2/3A) \cdot (S_u - S_1) \cdot \{ (T_e / C_1 + 1) - 1 \} / \{ I_s / (S_u - S_1) - 1 \}^2$$

$$C_2 = (S_u - S_1) \cdot (T_e + C_1)^{1/3}$$

$$C_3 = - (6C_1 \cdot \{ C_2 / C_1 \}^{1/3} - (S_u - S_1))^{1/2}$$

3. 試算結果 ごく一般の地層について考えると、 $S_1 \approx 30\%$, $S_u \approx 80\%$, $1 \leq A \leq 100$, $10 \leq I_s \leq 100$, $10 \leq T_e \leq 100$ 程度になる場合が多いと考えられるので、これらの範囲で試算した結果の一例を示したものが図1および図2である。

図1は、浸透能 I について比較したものである。当然のことながら、最終浸透能に到達する時間 T が大きいものほど同一時刻における浸透能 I は大きくなるが、図から分かるように、 A が大きくなる程、即ち、空隙の大きさが均一な土層ほど I は急激な減衰傾向を示すのに対して、 A が小さくなると、 T_e の違いによる I の減衰傾向の差は小さくなり、同一浸透能曲線を辿る傾向が強くなる。

また、 $A=1.0$ で、 $T_e=100$ の場合に見受けられる様に、ほとんどの浸透現象において、最終浸透能に達する前に浸潤前線が土層の底面に到達することになる。

図2は、飽和度分布の時間的変化を示したものであるが、図に見るように、各時刻の分布はほとんど直線分布になり、浸潤前線の進行に伴って、 $\partial S / \partial Z$ は小さくなる。

また、この場合にも、前述したように、浸潤前線が土層の底面に到達する時点では最終浸透能に至っていない。

以上の結果をもとに、一部の実験例¹⁾ について検討してみたところでは、仮定した条件における浸透現象についてはこの方法でほぼ解析できるようであるが、飽和度分布形状に多少差が生じる様である。

4. あとがき 地表面が湛水状態になった時のように供給水が十分に存在する場合の浸透現象を解析的に取扱う方法を導き、その解の一般的特性について考察したが、今後、詳細な実験を行って、この結果の適応性について詳しく検討していく予定である。

参考文献 1) 三島, 金丸: 鉛直不飽和浸透に関する一考察, 第37回中四年講

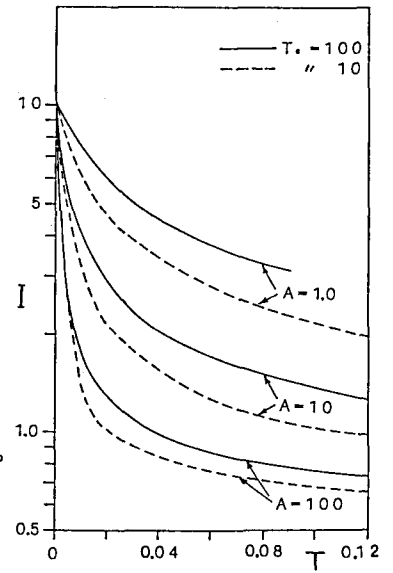


図1 浸透能 I の時間的変化 ($S=30\%$, $S_u=80\%$, $I_s=10$)

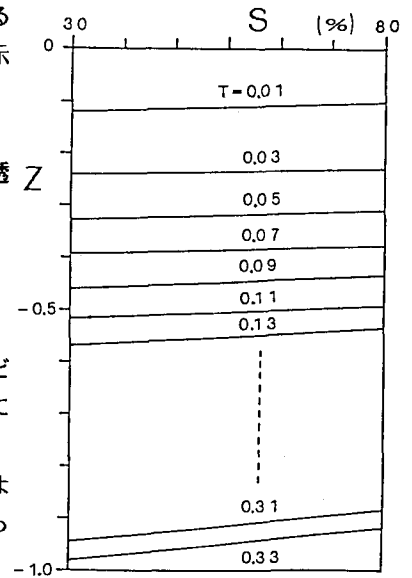


図2 飽和度分布の時間的変化 ($S_1=30\%$, $S_u=80\%$, $I_s=10$, $A=10$, $T_e=100$)