

鉛直不飽和浸透に関する一考察

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
 愛媛県 正員 葛原健二

1. まえがき 雨水の流出機構を解明していくうえで、雨水の浸透機構を正確に把握することは研究の重要な課題である。そこで、この研究においては、鉛直不飽和浸透の一般的な特性を把握することを目的とした実験を行なうとともに、土中空氣の圧縮性を考慮した時の鉛直不飽和浸透の基礎方程式に基づき数値計算を行ない、得られた結果と実験結果とを比較検討したので、その結果について述べる。

2. 不飽和浸透の基礎方程式¹⁾ 取り扱いを容易にするために、①単位面積当りの土柱の水および空氣がそれぞれ連続体を形成して詰っており、各流体がDarcy則にしたがって流動する。②土中の水と空氣の接触面に発生する毛管圧は飽和度に対して双曲線関数で近似される。③透水係数および透氣係数は飽和度に対してべき乗関数で近似される。このように仮定すると、土中空氣の圧縮性を考慮した時の一次元の鉛直方向の不飽和浸透に関する点次元の流動基礎方程式は、つぎのように整理される。

$$Q_w = -S_w C_1 \left(\frac{\partial P_w}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{---- (1)}$$

$$Q_a = -C_2 \cdot C_3 \cdot (P_w + P_c)^{1/C_7} (1 - S_w)^{C_5} \times \left\{ \frac{1}{C_3} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (P_w + P_c)^{1-1/C_7} + 1 \right\} \quad \text{---- (2)}$$

$$P_c = \frac{C_4}{S_w + C_5} \quad \text{---- (3)}$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial T} = - \frac{\partial Q_w}{\partial z} \quad \text{--- (4)}$$

$$\frac{\partial P_w}{\partial T} = \left[C_3 \cdot (P_w + P_c)^{1/C_7} \times \left\{ \frac{1}{C_7} (1 - S_w) \times (P_w + P_c)^{-1} \times \frac{P_c^2}{C_4} + 1 \right\} \times \left(- \frac{\partial Q_w}{\partial z} \right) + \left(- \frac{\partial Q_a}{\partial z} \right) \right] \div \left\{ \frac{C_3}{C_7} (1 - S_w) \times (P_w + P_c)^{1/C_7 - 1} \right\} \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 $z = \frac{z}{d}$, $T = \frac{K_w t}{m d}$, $Q_w = \frac{q_w}{K_w P_w}$, $Q_a = \frac{q_a}{K_w P_w}$, $P_w = \frac{P_w}{P_w g d}$, $P_c = \frac{P_c}{P_w g d}$, $P_a = \frac{P_a}{P_w g d}$, $C_1 = 1 + \beta$, $C_2 = K_a / K_w$, $C_3 = (P_a / P_w) / (P_a / P_w g d)^{1/4}$, $C_4 = \epsilon / P_w g d$, $C_5 = \delta$, $C_6 = 1 + \nu$, $C_7 = d$ であり、

q : 単位面積当りの質量流量, S : 飽和度, P : 圧力, ρ : 密度, g : 重力加速度, m : 間隙率, t : 時間,

z : 鉛直上方に取った距離, $K_w = K_w S_w^a$, $K_a = K_a S_a^b$, $d, \beta, \nu, \delta, \epsilon$: 定数

d : 層厚, 添字の w, a, c は水, 空氣, 毛管に関することを表わし, 添字の 0

は空氣の基準状態を表わす。

3. 実験装置および方法 実験装置は図1に示すような透明アクリルパイプ

($\phi 10$ cm) に飽和度測定用ステンレスボルト(10ヶ所)を取り付けた本体と給水装置である。実験に使用した真砂土の有効径は 7.5×10^{-2} mm, 均等係数は24, 透水係数は 10^{-2} cm/s であった。各実験では、この真砂土を間隙率が約33%になるようにセットして実験を行なった。

各実験は、まず、所定の飽和度に調整した真砂土をパイプ内にセット(層厚 $d=100$ cm)し、給水装置の流量を定常化させた後、砂層表面の湛水深が常時所定水深(この実験の場合10 cm)になるように出口高さを調節した本体の砂層表面に水を誘導し、浸透を開始させて、浸透量の変化を1分毎で計測すると同時に、ステンレスボルト間の交流電圧の変化を5分毎で計測して飽和度の変化を求めた。

4. 結果および考察 砂層の初期状態については種々の状態が想定されるがこの実験においては、平均飽和度を35%に調整した試料(実験A)と風乾状態(平均飽

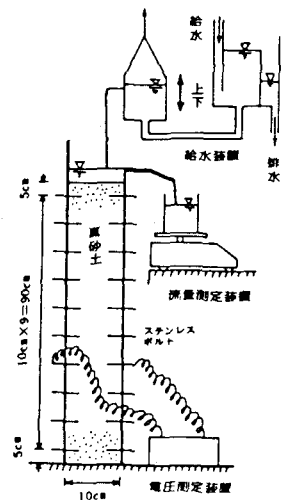


図1. 鉛直浸透実験装置

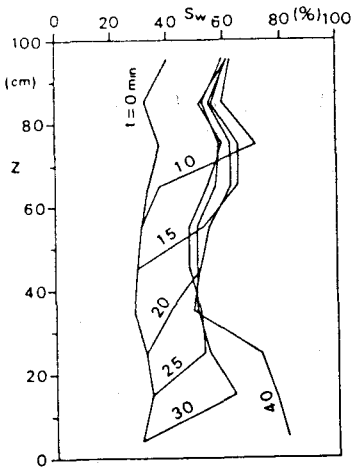


図2. 実験Aの飽和度の変化

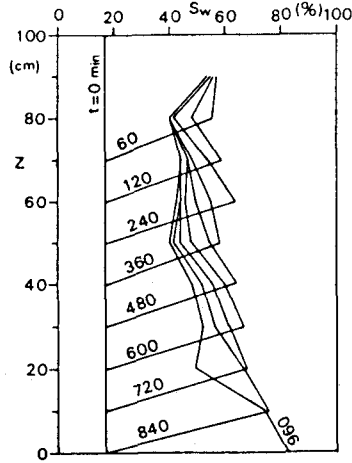


図3. 実験Bの飽和度の変化

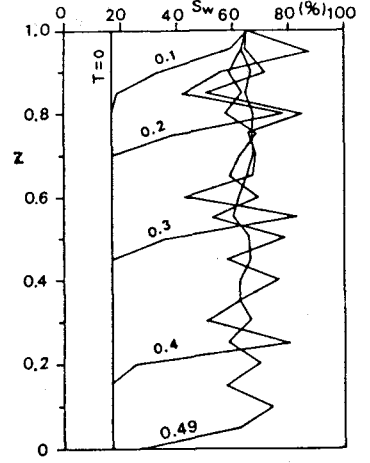


図4. 試算Bの飽和度の変化

和度が17%)にした試料(実験B)を用いて実験を行なった。各実験の飽和度の時間的变化を示したものが図2および図3である。図からわかるように、実験Bの方の飽和度 S_w の時間的变化は実験Aの変化に対して極めて遅く、しかも、実験Bの方の S_w の深さ方向の分布は浸透が進行するにつれて、深い方ほど S_w が増加した形になるのに対し、実験Aの方は流動が一様化した形になる傾向がある。また、いずれの場合でも、浸透の初期に増加していた S_w が時間の進行とともに減少する。すなわち、砂層上部に存在した水が、浸透前線部分に強く引きつけられた形で浸透が進行する傾向が強い。

図4は実験Bに対応した試算として、前述の各式を前進差分式に書き替え、実験値などを参考にして算出したパラメータ値 $C_1=3.0$, $C_2=1.0$, $C_3=2 \times 10^{-4}$, $C_4=0.05$, $C_5=0.01$, $C_6=3.0$, $C_7=1.4$ を採用し、 $\Delta x=0.05$, Δt については各時刻で P_m が発散しないような十分小さな値を取るようし、境界条件として砂層表面における $S_w=65\%$ 、底面は不透層として試算した結果である。

図5は実験および試算の S_w の分布の40%にあたる点の進行の時間的变化を比較したものであり、図6および図7は試算および実験の浸透量の時間的变化を示したものである。ただし、浸透量 $q_w = -q_m$, $Q_w = -Q_m$ である。

図5において、試算と実験のそれぞれの関係が線がほぼ平行であることから、両者の間に時間的ずれが生じていることがわかる。このことは図6と図7の初期の変化傾向の違いからも納得されることである。

図6および図7からわかるように、定性的に見て、約100分程度経過後からの浸透現象が試算で取り扱ったような浸透機構になり、適合期間における浸透量は振動しながら増加していくことがわかる。

また、それ以前の現象は表面下20cm程度における比較的急速な現象で、前述の仮定とは異った機構に従って浸透していくものと思われる。

これらの結果を基に、今後さらに詳細な検討を行なう予定である。

参考文献 1) 三島・金丸, 第40回年講で発表予定

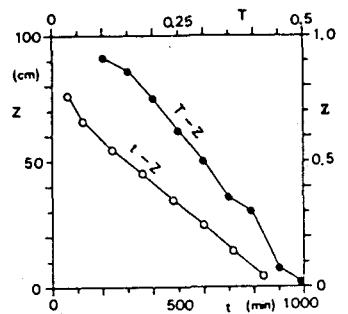


図5. 浸透深さの時間的变化の比較

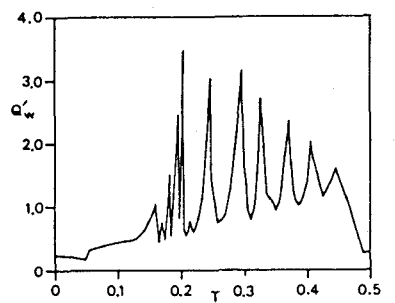


図6. 試算Bの浸透量の時間的变化

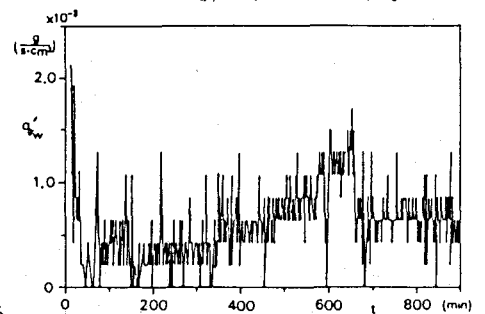


図7. 実験Bの浸透量の時間的变化