

京都大学大学院 学生員 美濃部 雄人
京都大学防災研究所 正員 石原安雄, 下島栄一

1. はじめに : 本文は, 雨水浸透場の不均質性の1つとして割れ目の存在をとり上げ, この割れ目が地中への雨水浸透に及ぼす効果を解明するために, 簡単なモデル実験を行い, それについて検討を加えたものである。

2. 実験方法 : 底部を閉じた長さ170cm, 内径18.5cmの円筒に, 図-1に示した気乾状態のK-7砂の単一柱(長さ168cm)を作ったが, その中央部には同様なK-5砂, K-6砂を用いて, 直径(Di)1cmまたは2.7cmの小さな円砂柱を設けて割れ目を模擬した。なお, 砂層の上端面は浸透面に一致する。この割れ目の上端は浸透面に一致するが, その下端は円筒の底面と一致するものと, そうでないものがある。実験は, 砂層表面上に常に2cmの湛水深がある条件下で, 浸透強度, 全浸透断面平均的な水分量, 砂層底部での空気圧を計測しつつ行った。また, 浸透水の流況を観察するために, 別に高さ60cm, 巾60cm, 奥行き2cmの透明アクリルケースを用意し, これに上記と同様に巾方向の中央部に2cm角のK-5砂の割れ目をもつK-7砂の単一柱を作り, 砂層内には染料を散布することにより, その流線を追跡記録するという補助実験も行った。

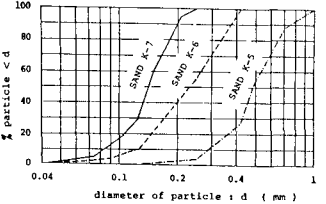
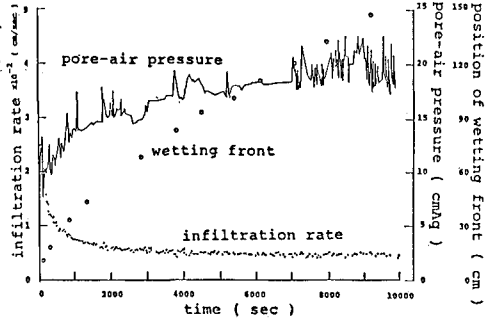


図-1 粒度分布

3. 実験結果とその考察

(1) 割れ目が下方に続く場合 : 図-2は割れ目がK-5砂よりなる $D_i=2.7\text{cm}$ の場合の実験における浸透強度(f), 増加空気圧(P_{a2}), およびwetting frontの深さ(X_f)の時間変化を示す。

図-2 f, P_{a2}, X_f の時間変化

また図-3は前図に対応する水分量分布を示す。これらの図及び実験中の観察から次のことがわかった。① $f, dP_{a2}/dt, dX_f/dt$ は時間とともにそれぞれある一定値 f_0, P_{a2}, X_f に近づく。②水分量分布の形状は時間とともに2段的構造が明確となるが, これは砂層表面から発達した擬飽和域とその下方の不飽和域からなる。この不飽和域はwetting front, その上方のほぼ一定水分量 θ_* のtransmission zoneと, さらに擬飽和域に連なるtransition zoneとで構成される。③空気放出状況は, 最初のうちは割れ目外より起るが, 途中(図-2の場合 $t=110\text{sec}$)から割れ目内より間欠的な放出が生じるようになる。これらの様子を割れ目のない同様な単層への, 湛水浸透の場合と比べると, ①と②は同じ傾向となるが, f_0, X_f は大きく, P_{a2} は小さく, θ_* は同程度となる。(表-1参照)

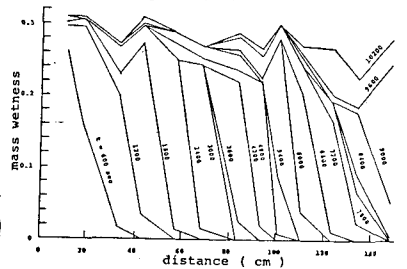


図-3 水分量分布

表-1 実験定数値

fissure sand	D_i cm	θ^* $\times 10^{-2}$	f_0 cm/sec $\times 10^{-3}$	ω_* cm/sec $\times 10^{-2}$	P_{a2} cmHg/sec $\times 10^{-3}$	θ_*	ω_{a2}/P_{a2} cm/sec $\times 10^{-2}$	$\langle \omega \rangle_c$ cm/sec $\times 10^{-2}$
K-5	1	0.29	4.0	1.2	1.0	0.34	4.7	3.5
K-6	1	0.29	3.9	0.97	2.8	0.39	1.3	2.0
K-5	2.7	2.1	4.7	1.2	0.35	0.37	14.3	15.7
K-6	2.7	2.1	4.1	1.1	1.1	0.38	4.2	4.5
homogeneous layer			3.5	0.95	2.0	0.37	1.7	

写真1は補助実験での浸透水の流況を示すが, 黒くなっている部分は水の流れているところである。空気放出状況は図-2の場合と同様であって, 撮影時には少なくとも割れ目からの放出が生起している。これより④割れ目外のwetting front付近では, 割れ目内には水が存在しないこと, ⑤また, 浸透面より比較的浅い部分を除外すると, 割れ目外の流線は重力方向に向いていることがわかる。

以下では, 補助実験の結果を考慮して, 十分時間がたった段階での上記の浸透状況を検討する。

不飽和域での水と空気の流量流速, v , v_a , および水の連続式は, それぞれ次式で与えられる。

$$v = -D \partial \theta / \partial x + K(1 - \partial R_a / \partial x) \dots \textcircled{1}, \quad v_a = -K_a \partial R_a / \partial x \dots \textcircled{2}, \quad \partial \theta / \partial t + \partial v / \partial x = 0 \dots \textcircled{3}$$

ここに, D ; 水分拡散係数, K ; 不飽和透水係数, K_a ; 透気係数, θ ; 体積含水比, R_a ; 増加空気圧, x ; 浸透面よりの深さである。ここで添字 0 で, 割れ目内, および外を表すものとし, wetting front (割れ目外) 近傍に着目する。実験事実⑦を考慮すると, $\partial R_a / \partial x = \partial R_{a0} / \partial x \dots \textcircled{4}$ が設定できるので, 式①-式③にこれらの条件を用いると次式をうる。

$$\partial \theta / \partial t = \partial \{ K_0(1 - \langle A \rangle) - D_0(1 - \langle A \rangle) \partial \theta_0 / \partial x \} / \partial x \dots \textcircled{5} \quad \text{ここに,}$$

$$\langle A \rangle = K_0 / (K_0 + K_a) \dots \textcircled{6}, \quad \langle K_a \rangle = \sigma K_{a1} + (1 - \sigma) K_{a0} \dots \textcircled{7}$$

σ = (割れ目面積) / (全浸透断面面積) である。なお, 式⑤では $\sigma \ll 1$ と実験事実④を参照して $v_0 = -\{ \sigma K_{a1} + (1 - \sigma) K_{a0} \} / (1 - \sigma)$ を用いた。

transmission zone 上方の領域での水分状態に著しい時間変化がなく, また wetting front が一定の形状と速度で移動 (実験事実①, ⑩) する場合, 式⑤から, $\omega_* = \{ K_0(1 - \langle A \rangle) \}' / \theta_{0c} \dots \textcircled{8}, \quad \dot{R}_{a0} = \langle A \rangle' \omega_* \dots \textcircled{9}$ なる関係が得られているので, これより $\langle K_a \rangle' = \omega_* \theta_* / \dot{R}_{a0} \dots \textcircled{10}$ をうる。ここに添字 c は $K_0(1 - \langle A \rangle) / \theta_0$ が最大となる水分量 θ_{0c} での値を意味する。そこで, 式⑩の右边に実験値を用い, また式⑨の右边で $\theta_c = 0$, $\theta_0 = \theta_c$ として計算すると表-1 のようになる。後者は表では $\langle K_a \rangle'$ と記している。両者はよく合致しているのて, 以上の解析は妥当であったといえる。

なお, 浸透強度 f_0 を解析するためには少なくとも transmission zone より上方の割れ目内での水分状況の情報が必要であることは言及するまでもないが, これについては不明である。ただ, f_0 の値は式④で $\theta_c = 0$ とした $\langle A \rangle$ を用いると, $f < \{ K_0(1 - \langle A \rangle) \}_{\max}$ なる関係にあり, transmission zone より上方が浸透能を制約しているようである。

(2) 割れ目が途中で切れる場合 : 図-4 は $D_i = 2.7 \text{ cm}$, 長さ 75 cm の

K-5 砂の割れ目をもつ場合の実験結果であって, 浸透強度, 空気圧, wetting front の深さの時間変化を示す。これらの図や実験中の観察から次のことがわかった。① wetting front が割れ目の深さにはほぼ達すると同時に, 空気圧と浸透強度はそれぞれ急増, 急減し, また内部空気の放出がほとんどなくなる。② その後, 空気は必ず割れ目外からのみ放出されるようになり, また時間とともに浸透強度, 空気圧の増加割合, 及び wetting front の

移動速度はほぼ一定となる。図-5 は種々の実験での最終的な浸透強度 f_0 と, 割れ目の長さの関係を調べたものである。図中の横軸と縦軸に平行な破線は割れ目がない場合 (単一砂層) での f_0 の値 (表-1 参照) 及び擬似飽和域の厚さ x_1 の上限値を意味する。この図から次のことが分る。③ 割れ目が途中で切れるということは f_0 を単一砂層でのものより小さくする。④ 割れ目が長いほどこの f_0 の値は小さく

なり, また短くなるにつれて単一砂層でのものに近づく。実験事実⑪のような状態は, 単一砂層の場合と同様であり, そこでは浸透強度と擬似飽和域の厚さの関係として, 次式が利用できる。 $x_1 = -v_{0c} \dot{R} / (1 - \alpha_c)(1 - \alpha_c \dot{R})$ 。ここに $\alpha_c = \dot{R}_a / (\dot{R}_a + \dot{R})$, $\dot{R}$, $\dot{R}_a$ は擬似飽和域の透水, 透気係数に対応するもの, $v_{0c} (< 0)$ は water entry value である。これより, 割れ目の長さが長いほど f_0 が小さく, x_1 は従って大きかったことがわかる。なお, 実験事実⑪の特性は, 割れ目近傍がほぼ飽和しており, 割れ目内への空気の侵入が阻止されるために起こるものである。参考文献 ⑪ Ishihara and Shimojima: Bull. D.P.R.I. Kyoto Univ.; 1983。

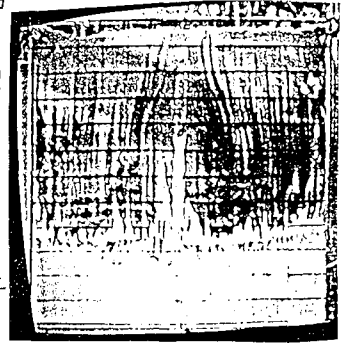


写真-1 浸透水の流れ

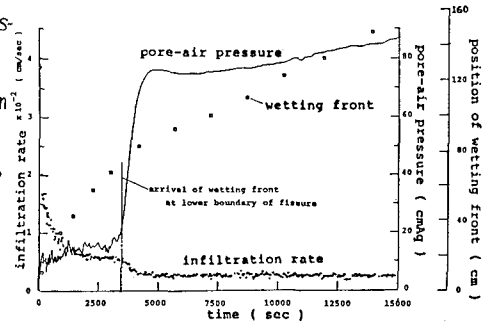


図-4 f , R_a , x_f の時間変化

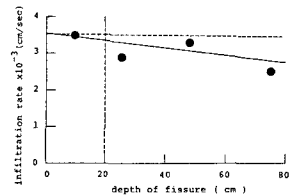


図-5 f_0 と割れ目深さとの関係