

割れ目状不均質場への雨水浸透に関する実験

石原 安雄・下島 栄一・美濃部雄人

EXPERIMENT ON INFILTRATION OF RAINFALL INTO SAND LAYER WITH A COARSER SAND PILE

By Yasuo ISHIHARA, Eiichi SHIMOJIMA and Yujin MINOBE

Synopsis

Recognizing that the infiltration phenomenon of rain water into the ground occurs in the finite domain between the ground surface and the bedrock or groundwater surface, we have investigated the effect of the movement of pore-air on the infiltration process. In this paper, as an example of the heterogeneous domain, the infiltration into a homogeneous sand layer with a sand-pile made of a coarser sand is experimentally examined under the conditions of ponded infiltration and rainfall infiltration. Especially, the formation of the quasi-saturated zone, the pressure of pore-air and the infiltration rate are discussed in comparison with those in the homogeneous domain.

1. はじめに

陸地圏における水循環過程において、雨水の地中への浸透現象の解明は、地下水帯への水の供給、地中水の保留量の消長、無降雨時の蒸発、さらには植生の生育にも関連して、極めて重要であるにもかかわらず、未だ十分に研究されたとはいえない。著者らは、すでに、雨水の浸透機構を間隙空気の放出過程に着目して、一様な砂層の場合について研究し、砂層表面近傍に形成される飽和度の高い擬似飽和域の生成が浸透現象に大きく影響することを明らかにした^{1,2)}。

しかし、現実の土地は、植生が生育しており、地質も複雑であって、決して均質な場ではなく、水平断面内においても不均質な場であると考えられる。不均質な場における雨水浸透に関する従来の研究の多くは、間隙空気が閉塞圧縮されずに自由に開放されるという条件の下で行われていたようであるが³⁾、もしこのような条件が満足されるとしても間隙空気がどこを通過して自由に開放されるか、またこのような条件が満足されない場合には間隙空気の放出がどこを通過して行われ、浸透現象にどんな影響を及ぼすか、等多くの疑問がある。

本文はこのような疑問を解決する糸口を見出すために、一様な砂層の中に粗な砂のパイルを設置した一種の不均質場、すなわち割れ目の不均質場を対象として、雨水浸透の実験を行い検討を加えたものである。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

底部を閉じたアクリル製の高さ 170 cm、内径 18.5 cm の円筒に、Fig. 1 に示した気乾状態の K-7 砂を底面から 168 cm の高さまでつめ、その中心部に K-5 砂または K-6 砂の直径 $D_i=1.0$ cm または 2.7 cm、深さ l cm の円柱状サンドパイルを作って不均質な実験砂層とした。中心部に粗い砂のサンドパイル（以下これを割れ目という）を作ったのは、層状の不均質砂層についてすでに研究を行っており⁴⁾、本文では、水平断面内の不均質性割れ目が浸透現象に及ぼす効果に主眼をおいたためである。

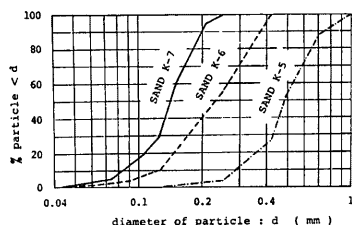


Fig. 1 Distribution of grain size.

にした。サンドパイルは、予め薄板で作った円筒を埋め込んでおき、その中に粗い砂を少量ずつ詰めながら薄板円筒を抜くという方法で作った。

湛水浸透の実験に際しては、できるだけ早く湛水深 2 cm が保たれるように、一度に多量の水を供給するようにし、浸透強度は供給水量（一定量に保持されている）から円筒縁から越流する水量を差引くことによって求めた。

降雨浸透に際しては、あらかじめ降雨強度を一定に保ち、その後円筒上部をカバーしてあった覆いを急速に取除くという方法で水供給を行った。

上記 2 者の実験において、浸透水が円筒底部に達すると、そこでの間隙空気圧の測定が不可能になるので、測定はその時点までとした。

3. 実験結果とその考察（サンドパイルが底面まで達している場合）

本項で述べる実験結果はいずれもサンドパイルが円筒底部まで達している場合、すなわち、 $l=168$ cm の場合についてである。

3.1 湛水浸透の場合

i) 実験結果の概要

Fig. 2 は経過時間と累積浸透量との関係を示したものであり、実線が K-7 砂の均質砂の場合、破線が K-5 砂からなる割れ目 ($D_i = 2.7$ cm) が円筒下端まである場合である。（×印と○印はそれぞれ割れ目の深さが $l=48$ cm, 75 cm の場合のものであるが、これについては後で考察する。）円筒下端まで続く割れ目がある場合には、均質砂の場合に比して、常に多くの浸透があることがわかる。

Fig. 3 は上と同じ実験ケースにおける浸透強度 f , 増加空気圧 p_{aL} , および割れ目外の wetting front の深さ x_f の時間変化を示し、Fig. 4 は水分量分布の時間経過を示す。これらの図および実験中の観察から、次のことがわかった。

- ① f , dp_{aL}/dt , dx_f/dt は時間 t の増加とともにそれぞれ一定値 f_{∞} , $\dot{p}_{a\infty}$, ω_* に近づく。

この場合、サンドパイルの上面ははじめにつくった砂層の表面と一致させてある。実験は、砂層表面上に常に 2 cm の湛水深がある場合（湛水浸透）と、注射針を多数とりつけた散水装置によって一定強度に制御された降雨状の水供給を行った場合（降雨浸透）とについて行い、詳細な観測を行いながら、浸透強度、全浸透横断面の平均的な水分量、砂層底部での間隙空気圧を測定した。

2.2 実験方法

実験に使用した砂はいずれも気乾状態であり、円筒にはできるだけ一様になるよう注意を払って詰め込むよう

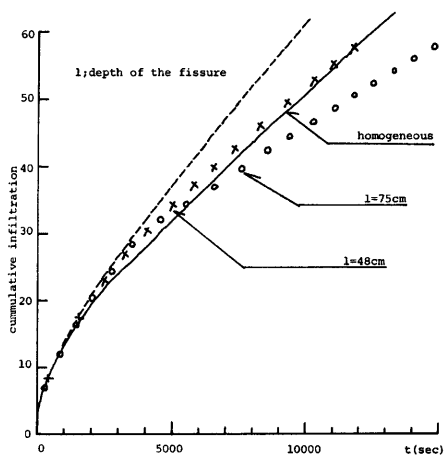


Fig. 2 Change of cumulative quantity of infiltration with time (ponded infiltration).

- ② 水分量分布の形状は時間の経過とともに2段階的構造が明確になり、砂層表面から発達する疑似飽和域とその下方に連なる不飽和域の形成を示唆している。

これらの性状は均質層への湛水浸透の場合と同様であるが、間隙空間の開放状況はかなり異なりつぎのようである。

- ③ 浸透のごく初期においては、割れ目外の砂面から空氣の放出が起こっているが、ある時間が経つと (Fig. 3 の場合には $t=110$ sec), 割れ目の中心部に集中し、かつ間欠的な放出が生じるようになる。

ii) 補助実験による空氣放出状況の観察

上記③の空氣放出の状況を詳しく調べるために、高さ 60 cm, 巾 60 cm, 奥行き 2 cm の底のある透明アクリルケースを用意し、これに巾方向の中央部に 2 cm 角の K-5 砂からなる割れ目をもつ K-7 砂の砂層を作り、砂層内に染料を散布したうえで湛水浸透の実験を行い、ビデオカメラで流れを追跡記録するという補助実験を行った。Photo. 1 はそのときの浸透水の流れを示す一コマであるが、黒くなっている部分が染料が融けて流れた線である。この場合、間隙空氣の放出状況は前述とほぼ同じであって、Photo. 1 の瞬間には割れ目の中央部から間欠的な放出が起こっていた。この補助実験によって、つぎのことが明らかになった。

- ④ 割れ目に浸入した水はその比較的浅い部分の側面を通してより細かい砂からなる割れ目外へ浸入しており、割れ目外の wetting front 付近の水平面内では割れ目内には水が存在しない。

- ⑤ 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。

iii) 考察

一樣砂層の場合との差異をみるために、十分時間が経った段階での浸透状態について検討しよう。

不飽和域での水と空氣の流量流速, v , v_a , および水の連続式は、一般に、それぞれ次式で与えられる。

$$v = -D \frac{\partial \theta}{\partial x} + K \left(1 - \frac{\partial p_a}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_a = -K_a \frac{\partial p_a}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

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, p_a : 増加空気圧, x : 浸透面よりの深さ。

いま, 割れ目外の wetting front の近傍に着目し, 添字 i と o で割れ目内外の諸量を表わすと, 前記の実

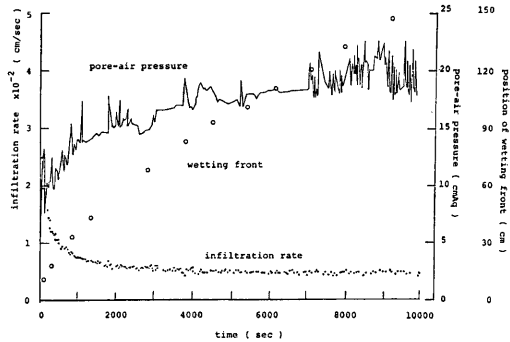


Fig. 3 Change of f , p_{aL} and x_f with time (ponded infiltration).

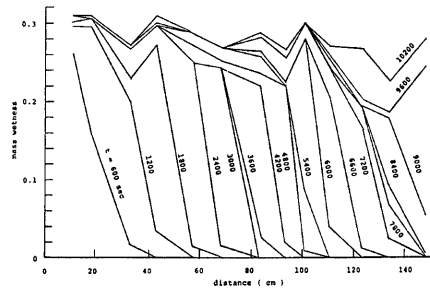


Fig. 4 Change of distribution of water content with time (ponded infiltration).

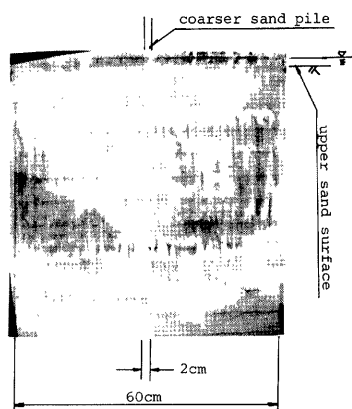


Photo. 1 Stream of penetrating water (ponded infiltration).

がほぼ一定速度で下降するような状態を呈する。(6)式からこのような状況での wetting front の移動速度 ω_* は,

$$\omega_* = \{K_0(1-\langle A \rangle)\}'_c / \theta_{oc}' \quad (9)$$

また, wetting front の下方での空気圧の上昇の時間的割合 $\dot{p}_{a\infty}$ は,

$$\dot{p}_{a\infty} = \langle A \rangle'_c \cdot \omega_* \quad (10)$$

で与えられ¹⁾, これら両式より次式がえられる。

$$\langle K_a \rangle'_c = \omega_*^2 \theta_* / \dot{p}_{a\infty} \quad (11)$$

ここに, θ_* は wetting front 上方のいわゆる transmission zone の一定水分量で, 添字 c' は, $K_0(1-\langle A \rangle)/\theta_0$ が最大となる水分量 θ_{oc}' に対するそれぞれの量の値である。

Table 1 の右方の欄は, (11)式の右辺に, 実験値を代入したもの(左側)と, (8)式を $\theta_i=0, \theta_0=\theta_*$ として(7)式, (9)式および(10)式を用いて計算したもの(右側)との比較を行ったものであって, 両者は極めてよい一致を示しており, 十分時間が経った段階での浸透機構が上で示した解析のようになっていることを証明するものと考えてよいだろう。

つぎに, **Table 1** には, $f_{\infty}, \omega_*, \dot{p}_{a\infty}, \theta_*$ の実験値が同時に示されている。割れ目のない単一砂層(最下欄)の場合と比較して, θ_* は同程度であるが, $\dot{p}_{a\infty}$ が小さく, f_{∞} と ω_* が大きくなっている。すなわち, 割れ目の存在のために, それが無い場合に比し, 間隙空気が放出され易く, そのため θ_* が一定である wetting front の進行速度が早くなって, 浸透強度 f_{∞} が大きくなるのである。

Table 1 Comparison of numerical constants obtained (ponded infiltration).

fissure sand	D_i cm	σ $\times 10^{-2}$	f_{∞} cm/sec $\times 10^{-3}$	ω_* cm/sec $\times 10^{-2}$	$\dot{p}_{a\infty}$ cm Aq/sec $\times 10^{-3}$	θ_*	$\omega_*^2 \theta_* / \dot{p}_{a\infty}$ cm/sec $\times 10^{-2}$	$\langle K_a \rangle'_c$ 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	1.0	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	

験事実⑤より, 次式を仮定することができる。

$$-\frac{\partial p_{ai}}{\partial x} = \frac{\partial p_{ao}}{\partial x} \quad (4)$$

また, 実験事実④より割れ目内には浸透水が存在しないので, 次式も仮定できる。

$$\sigma v_{ai} + (1-\sigma)v_{ao} = -(1-\sigma)v_0 \quad (5)$$

ここに, σ は全断面積に占める割れ目の面積の比率である。(4)および(5)の条件式を(1), (2), (3)式に用い, さらに, $\sigma \ll 1$ とすると結局次式を得る。

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_0(1-\langle A \rangle) - D_0(1-\langle A \rangle) \frac{\partial \theta_0}{\partial x} \right\} \quad (6)$$

ここに,

$$\langle A \rangle = K_0/(K_0 + \langle K_a \rangle) \quad (7)$$

$$\langle K_a \rangle = \sigma K_{ai} + (1-\sigma)K_{ao} \quad (8)$$

さて, **Fig. 4** からわかるように, 十分時間が経った段階では, 水分量の分布形状は wetting front のみ

3.2 降雨浸透の場合

Fig. 1 に示した K-7 砂の層に、割れ目として 50% 粒径が 0.46 mm の K-5 砂からなる $D_i=2.7$ cm, $l=168$ cm (円筒底部まで) のサンドパイルを円筒中央部に設置し、種々の強度で散水して、浸透実験を行った。この場合には、散水の強度（以下では降雨強度という）の強弱によって、砂層表面に湛水を生じるときと生じないときとがあって、前述の湛水浸透の場合とは大分趣きを異にしている。

i) 実験結果の概要

Fig. 5 は一定強度 r の降雨を与えたときの砂層下端で測定した空気圧 p_{aL} の時間的変化を示したものである。最初はほぼ一定割合で（降雨強度が大きいほど上昇割合が大きい）、空気圧が上昇するが、ある時点から急激な上昇を示すようになる。丁度この時に砂層表面には湛水が生起していることが観測された。

この湛水前後の砂層表面の様子は次のようであった。まず、割れ目外の部分が飽和状態になったと思われるときから内部空気圧の急激な上昇が始まる。そしてこの内部空気圧の上昇期間中は、小さな気泡がはじけるような音を出しながら割れ目内外の砂層表面から放出されているが、やがて割れ目内の表面砂層が盛り上がり、そこに流れ込む水のために、内部空気の放出が妨げられている様子が観測されるようになる。その後、比較的大きな気泡が放出されて内部空気圧が急下降し、砂の盛り上がりも元に戻るが、それ以降は空気は割れ目を通してのみ、かつ間欠的に放出されるようになり、空気圧は上昇、下降を激しく繰り返す。**Fig. 5** 中、

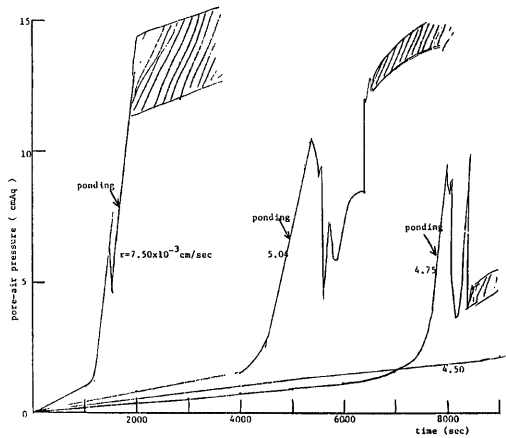


Fig. 5 Change of p_{aL} with time (rainfall infiltration).

ハッチングで示した領域はこの空気圧の変動の巾を示したものである。

Fig. 6 は、**Fig. 5** 中の $r=7.5 \times 10^{-3}$ cm/s の場合とこれと降雨強度がほぼ同じ $r=6.95 \times 10^{-3}$ cm/s で K-7 砂からだけからなる均質砂の場合とを比較したものである。両者とも湛水開始とともに空気圧は急上昇するが、割れ目がある場合の方が遅く上昇を始め（湛水が遅く始まり）、そのうえ急上昇の増加分が小さくなっている。これは、表層で形成される擬似飽和域の生成過程とその大きさに関係があるように思われる。

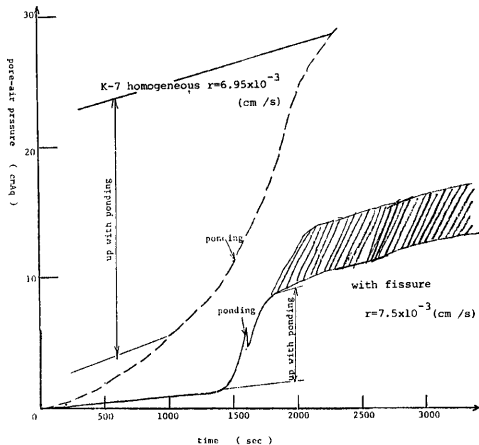


Fig. 6 Comparison of change of p_{aL} with time.

Fig. 7 は十分時間が経った後の浸透能を降雨強度ごとに示したものである。割れ目のない砂層の場合は、このような最終浸透能は湛水浸透のときも降雨浸透

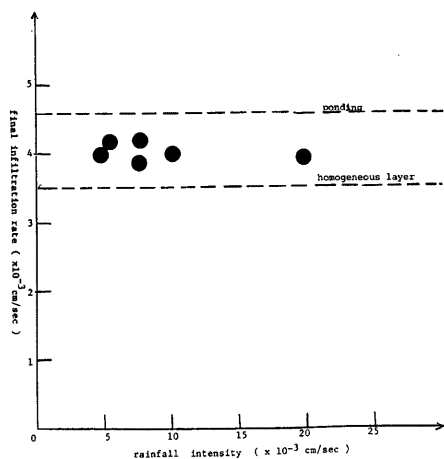


Fig. 7 Final infiltration rate (rainfall infiltration).

によるものであって、割れ目のある場合には、その中の砂の water entry value である 5 cmAq 程度の圧力上昇で湛水が起こったものとして説明することができる。

しかし Fig. 5 でみられるように、湛水時の急激な圧力上昇の増加分は、降雨強度によって若干異なるようであるが、それは割れ目内に形成される擬似飽和域の下方に連なる不飽和域の状態によるものと考えられる。

これと同様のことは、Fig. 7 において、降雨浸透の場合の最終浸透能が湛水浸透の場合よりやや小さい値となっていることにも現われている。すなわち、湛水浸透のときには、常に湛水状態であるために割れ目内に相対的に多くの水が浸透して、早い時期から擬似飽和域が形成されているはずである。一方、降雨浸透のときは、湛水前は割れ目内外でほぼ一様な浸透量が存在して不飽和域が形成されており、この不飽和域がある程度発達した段階で湛水状態が現われる。したがって、擬似飽和域の下端に連なる不飽和域が湛水浸透に比して降雨浸透の場合がより発達しているの、十分時間が経った後には両者とも割れ目内から空気は放出されるが、放出抵抗は降雨浸透の場合が大となると考えられる。よって、降雨浸透の場合の最終浸透能が湛水浸透の場合より小さくなるわけである。

4. 実験結果とその考察 (浅いサンドパイルの場合)

不均質を与えるサンドパイルの深さが浸透領域の底部まで達している場合の浸透過程について論じてきたのであるが、サンドパイルの深さが浸透場の底部まで達しないときにどうなるかという問題がある。こうした問題を検討するために、サンドパイルの深さを変えて、湛水浸透の実験を行った。

i) 実験結果の概要

Fig. 8 は K-7 砂の砂層の中央部に K-5 砂で作った $D_f=2.7$ cm, $l=75$ cm のサンドパイル (割れ目) を設置したときの浸透強度 f , 増加空気圧 p_{aL} , および wetting front の位置 x_f の時間的変化を示したものである。この種の図と実験中の注意深い観察から、浸透過程が 2 段階に分かれることが明らかになった。

まず、wetting front が割れ目の底部に達する以前は、前節で記した割れ目が底部まで達している場合とほぼ同じで、水は割れ目外の砂表面から浸透するとともに、割れ目内に浸透した水はその側面を通して割れ目

のときも図中の下方の破線で示した値となったが、割れ目のある場合には、図中の上方の破線で示した湛水浸透時の最終浸透能に比して降雨浸透時のそれが (黒丸) やや小さい値となっている。

ii) 考察

Fig. 6 において、均質砂の場合も、割れ目のある場合も、砂層表面が湛水状態になると同時に内部空気圧の急激な上昇がみられる。この上昇時の増加分は、図示のように、前者ではほぼ 20 cm Aq, 後者ではほぼ 5 cmAq となっている。一方、K-7 砂の water entry value が約 20 cm Aq, K-5 砂のそれが約 5 cm Aq であり、また、均質砂で湛水浸透の場合、砂層表面付近で形成される擬似飽和域下端の空気圧はほぼ water entry value である¹⁾。これらのことから考えると、Fig. 6 で示されている空気圧の急激な上昇は擬似飽和域の形成

外のより細かい砂の層（割れ目外）へ浸入し、間隙空気は割れ目の中心部からのみ間欠的に放出される。

つぎに、wetting front が割れ目の底部に達した後は、円筒底部の増加空気圧 p_{aL} が急上昇するとともに、浸透強度 f が急減し、wetting front の進行速度が ω_* が遅くなる。また間隙空気は主に割れ目外から放出されるようになる。この場合、浸透強度の急変前のそれを f_i 、時間が十分経ったときのそれを f_∞ として、割れ目の長さとの関係を示したものが Fig. 9（前者を白丸、後者を黒丸で示す）である。 $l=9.5$ cm および 23 cm の場合は f そのものが時間的にかなり急激に減少中のために f_i の判定が困難であったので図中には示していない。均質砂の場合の最終浸透能（図中の破線）と比較して、 f_∞ は割れ目の深さが大きいほど小さくなる。

累加浸透量の時間的変化は前に Fig. 2 で示したが、割れ目の深さが大きいと、時間の経過とともに累加浸透量が小さくなっており、このことは Fig. 9 から説明することができる。すなわち、降雨浸透が始まって wetting front が割れ目の底部に達するまでは、間隙空气が割れ目中央より盛んに放出されて浸透水が入り易いために、均質砂の場合に比して累加浸透量が多くなる。しかし、wetting front が割れ目の底部を通過し、厚い擬飽和域が形成されると、間隙空气の放出が割れ目外の領域に移り、空气圧が急増して最終浸透能は割れ目の深さが大きいほど小さくなるために、累加浸透量が均質砂の場合より次第に少なくなるのである。

wetting front が割れ目の底部を通過し、間隙空气が割れ目外からのみ放出され、また時間経過とともに、 f 、 p_{aL} 、 ω_* がほぼ一定となった状態は、均質砂の場合と本質的な違いはないものと考えられる。均質砂の場合、十分に時間が経ったときの擬飽和域の深さ x_1 と最終浸透能 f_∞ との間には次式が成立する¹⁾。

$$x_1 = -\psi_e \alpha_c \hat{K} / \{ (1 - \alpha_c)(f_\infty - \alpha_c \hat{K}) \} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $\alpha_c = \hat{K}_a / (\hat{K}_a + K)$

また、 $\hat{K}$ および $\hat{K}_a$ は擬飽和域内での間欠的な流れに対する等価透水係数および等価透気係数であり、 $\psi_e (< 0)$ は water entry value である。

(12)式からわかるように、 x_1 が大きくなると f_∞ が小さくなる。すなわち、現象論的には、より長い割れ目はより深いところまで擬飽和域が形成され、そのために均質砂の場合と比較して、浸透能が小さくなり、wetting front の進行速度が遅くなるのである。

以上は、割れ目が砂層の底部まで達していない領域で湛水浸透についての特性であるが、降雨浸透についても砂層表面に湛水状態が現われたとき以降は同様な特性を示すことは容易に類推できる。

しかし、割れ目が全砂層の底部まで達しているときと底部まで達せず途中までしかないときの浸透状況、

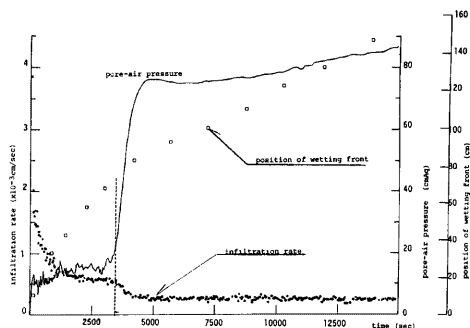


Fig. 8 Change of f , p_{aL} and x_f with time (limited sand-pile, ponded infiltration).

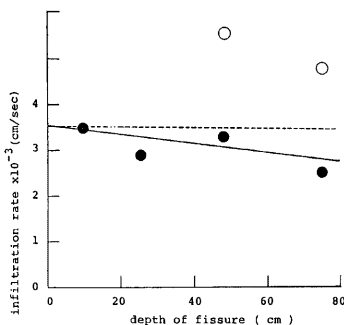


Fig. 9 Relation between infiltration rate and depth of fissure (ponded infiltration).

とくに浸透開始後十分に時間が経ってからの内部空気の放出形態、擬似飽和域の形成過程、そして浸透能の大きさと累加浸透量の時間的経過に著しい差異がみられることは注目すべきである。

5. お わ り に

底部の境界を閉じた均質砂層の中により粗い砂で作ったサンドパイルをもつ、いわば割れ目がある閉塞砂層への浸透現象についての実験結果と若干の考察を加えてきたが、得られた成果を要約するとつぎのようである。

1) 割れ目が砂層の底部まで達している場合には、間隙空気の放出は wetting front が砂層の底部に到達するまで、常に割れ目中央部から行われる。その間、割れ目内ではその上部を除いてほぼ気乾状態に保たれており、周囲の砂層内の浸透状況は均質砂の場合のそれとほぼ同じである。

2) 上の場合、湛水浸透と降雨浸透とは浸透初期の水の浸透状態に著しい差があるために、最終浸透能は前者の場合がやや大きくなる。しかし、いずれの場合にも均質砂の場合の最終浸透能より大きくなり、累加浸透量も多くなる。

3) 割れ目が途中までのときには、割れ目が底部まで達しているときの浸透状況とは異なり、wetting front が割れ目の底部に達するまでは空気が割れ目内より放出されているが、wetting front が割れ目の底部を過ぎると割れ目内の空気放出経路が急に閉塞されて、空気は割れ目外の砂面のみから行われる。そして、浸透強度は、この割れ目内空気放出経路の閉塞前は均質砂のときより大きい、閉塞後は急減して最終的には均質砂のときより小さくなり、最終浸透能は割れ目の深さが大いほど小さい。その結果、累加浸透量は均質砂のそれと比較して、wetting front が割れ目底部に達するまでは大となるが、その後は次第に減少して累加浸透量そのものも小さくなる。

以上の実験研究を通じて、割れ目が砂層の底部境界まで達している場合とそうでない場合とで浸透状況に著しい差異があることが判明した。これは割れ目内での浸透状況、外側砂層からの空気の侵入および割れ目内での空気の放出経路、そして有限の割れ目内の空気の閉塞等から説明できるがより詳細な検討が必要である。

本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究（C）60550364）の補助を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- 1) Ishihara, Y. and E. Shimojima : A Role of Pore Air in Infiltration Process, Bull. of the DPRI, Kyoto Univ., Vol. 33, 1983, pp. 163-222.
- 2) Shimojima, E. and Y. Ishihara : Infiltration Process of Rainfall with Constant Intensity, Bull. of the DPRI, Kyoto Univ., Vol. 34, 1984, pp. 58-104.
- 3) 例えば、岡 太郎：自然丘陵地における土壌水流動——観測とその解析——，京大・防災研・年報，第26号B-2，昭58. 4，pp. 213-224.
- 4) 石原安雄・下島栄一：閉塞湛水浸透における砂層境界の効果について，京大・防災研・年報，第26号B-2，昭58. 4，pp. 197-212.