

閉塞 2 層砂への雨水浸透に関する実験的研究

石原安雄・下島栄一

INFILTRATION OF WATER INTO CONFINED COMPOSITE SAND COLUMN

By *Yasuo* ISHIHARA and *Eiichi* SHIMOJIMA

Synopsis

In order to examine the effect of pore-air on the infiltration phenomena of water into confined composite sand column, the experiments of pounded infiltration were carried out by the use of sand column in the lucite cylinder with bottom. The sand column was made by putting the fine sand on the coarse one or vice versa. For the comparison with the results of experiments, the unconfined sand columns also were tested.

After considering and analysing the results obtained by experiments, the following was disclosed for the confined sand column.

(1) The case of the fine sand layer on the coarse one.

When the wetting front reaches the boundary of two sand layers, the infiltration rate decreases rapidly, and the moisture content in the upper sand layer and the pore-air pressure increase rapidly. In the case of a large difference between particle-sizes of two sand layers, the water flow in the lower coarse sand layer concentrates locally in the cross section for the unconfined column but seems not necessarily to concentrate for the confined column.

(2) The case of the coarse sand layer on the fine one.

In the case of a small difference between two particle-sizes, when the wetting front reaches the boundary, the infiltration rate remains constant for some time that is exaggerated comparing with that in the unconfined column and the rate of change of the pore-air pressure decreases initially. After the time, the former begins to decrease slowly and the latter increases rapidly. In the case of a large difference between two particle-sizes, when the wetting front reaches the boundary, the infiltration rate rather increases initially but decreases rapidly after the time. The pore-air pressure continues to increase rapidly from the initial instant to a certain time. After such a time elapsing, the effect of the upper layer on the penetration of water into the lower one becomes to be similar to that of the stored water having the same depth as the thickness of the layer.

1. はじめに

地表面に雨が降ると、雨水は浸透水となって土壌中の空気と交換しながら地中へ染込んでいく。その際、

地中には地下水面や岩盤または透水性の悪い地層が存在するので、地表面付近がある程度の湿潤状態になると気・液相の自由な交換がむずかしくなり、そのために間隙空気の閉塞を生じて浸透現象が非常に複雑になる。一方、雨水の浸透場は一般的には一様なものではなく、多層の状態になっている場合が普通である。よって、現地での雨水浸透を採取する場合に、多層の浸透場で、間隙空気が閉塞される場合の浸透機構の解明が重要となってくる。

土壌物理学の分野においては、従来は間隙空気が浸透水と自由に交換するにして、多層（主に2層）での浸透現象の解明に努力がなされ多くの成果をあげている。しかし、土壌水の運動を支配する基礎式が non-linear Fokker Planck 型の偏微分方程式であるため、たとえば wetting front が2層の境界に到達したときの浸透強度の変化の様子とか、層境界の存在に基因する wetting front の形状の安定問題など、残された問題も多い。

さて、以上の事情を考慮して、本文では2層の浸透場を対象とし、間隙空気を強制的に閉塞させて実験を行い、その際の間隙空気や層境界の存在が浸透現象にいかなる影響を及ぼすかを、間隙空気が閉塞しない場合の実験結果と比較しつつ考察を加えたものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置及び測定装置

実験に使用した円筒は内径 18.5cm の透明なアクリル樹脂製で、長さ 10, 20, 25cm のものを用意し、円筒に取付けたフランジによって互に接合して、多くの場合 170cm の長さとして使用した。この円筒に自然乾燥状態の砂をつめて、浸透強度、筒内各点での水分量及び間隙空気圧を詳細に測定した。

給水方法としては、越流方式によって常に一定水位を保つようにした大きな水槽に水道水を入れ、その側壁底部に取付けたコックを介して円筒上面に一定強度の給水を行った。その際、円筒上縁から越流する水は円筒上部周辺に設けた受水部を経て、圧力変換器を取付けた計量堰に導いて流量を測定し、間接的に浸透強度を求めた。

土壌水分は、円筒外周に設置した電極板間の誘電率の変化を、静電容量方式の測定器を用いて間接的に測定し、測定点数は13でほぼ 10 cm 間隔である。また、間隙空気圧は円筒下部側面に設置した圧力変換器を介して測定した。

なお、本文において、空気が閉塞されない場合の実験とは円筒の下端を単に金網で蓋ったときの実験をいい、また空気が閉塞される実験とは円筒の下端をアクリル樹脂板で閉塞したときの実験をさす。

(2) 使用砂

実験では3種類の砂を用いたが、その粒度分布を Fig. 1 に示す。この図に示すように、本文においては、粗い砂から細い砂へと順次 K-5 砂、K-6 砂、K-7 砂と呼ぶこととする。自然乾燥状態の砂を円筒に

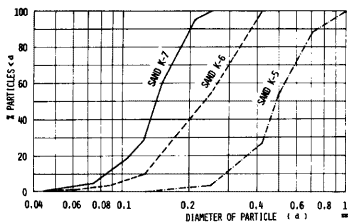


Fig. 1. Distribution of particle-size of sands.

充填したのであるが、その締固め状態は、K-5、K-6、K-7 砂に対して、見かけの密度でそれぞれ 1.44~1.46, 1.41~1.43, 1.40~1.42gr/cm³ の範囲であり、そのときの空隙比は 0.45, 0.46, 0.46 程度であった。この締固め状態における毛管ポテンシャルと土壌水分と関係を求めた結果が Fig. 2 及び Fig. 3 である。

(3) 初期条件及び境界条件

前項で述べた3種類の砂を組合わせて、上層が細砂で下層が粗砂の場合及びその逆の場合の2種類の系を作り、さらに上下層の層厚を種々変化させて実験を行った。すなわち、上層が細砂で下層が粗砂の場合としては K-7・K-5 系及び

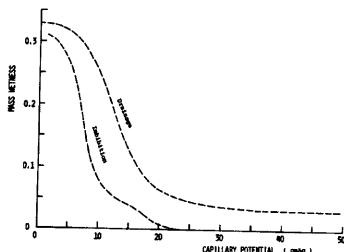


Fig. 2. Capillary potential for sand K-5.

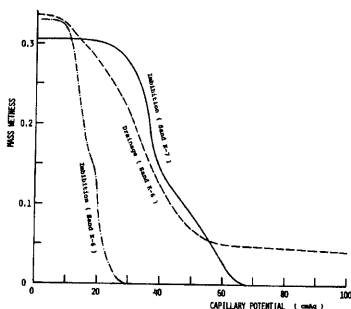


Fig. 3. Capillary potential for sand K-6 and sand K-7.

K-7・K-6系, またその逆の場合としてはK-5・K-7系及びK-6・K-7系としたが, その際2層の境界は水平になるようにした。

前述したように, 水分量の初期条件はすべての場合自然乾燥状態としたが, 砂層表面での境界条件は実験開始とともにできるだけ早く湛水深がほぼ1cmとなるように特別の給水を行って設定した。

3. 上層が細砂で下層が粗砂の場合の浸透

3.1 間隙空気が閉塞されない場合

間隙の空気が閉塞する場合の浸透機構を調べる前提として, 円筒下端が大気に接して浸透が進んでも間隙空気が閉塞しない場合の実験結果について述べる。

(1) 実験結果

Fig. 4及び5はK-7・K-6系及びK-7・K-5系について, 浸透強度の時間的変化を示したもので, これらからつぎのような実験の事実がわかる。

① K-7・K-5系では wetting front が2層の境界に達すると, 浸透強度は一旦急激に減少するが, その後回復してほぼ一定の値を持続する。この場合上層の厚さが小さいものほど, 減少の程度が著しく, かつその後一定値が大きくなる。

② K-7・K-6系でも K-7・K-5系の場合と同様に浸透強度の急激な減少を示すが, その後の回復がなくて減少後そのまま一定値を保持するようになる。

Fig. 6はK-7・K-5系において, 上層砂層内での水分量の時間的変化を示したものである。この図において, たとえば上層厚 $L_u=24.5\text{cm}$ の場合, wetting front が層境界に到達する $t=470\text{sec}$ 近傍において, $L_u=33, 88\text{cm}$ の場合の同一側点と比較して水分量の急激な増大が認められ, また, $L_u=38\text{cm}$ と $L_u=88\text{cm}$ とを比較しても $t=930\text{sec}$ 近傍において同様の傾向を示している。しかし, K-7・K-6系の

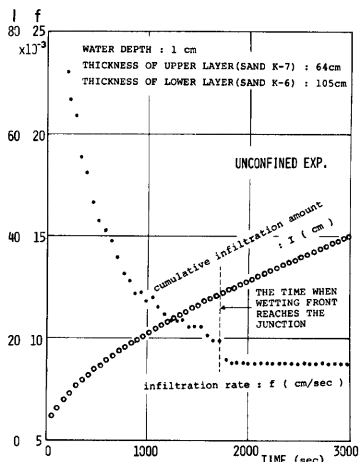


Fig. 4. Infiltration rate of water in unconfined K-7・K-6 system.

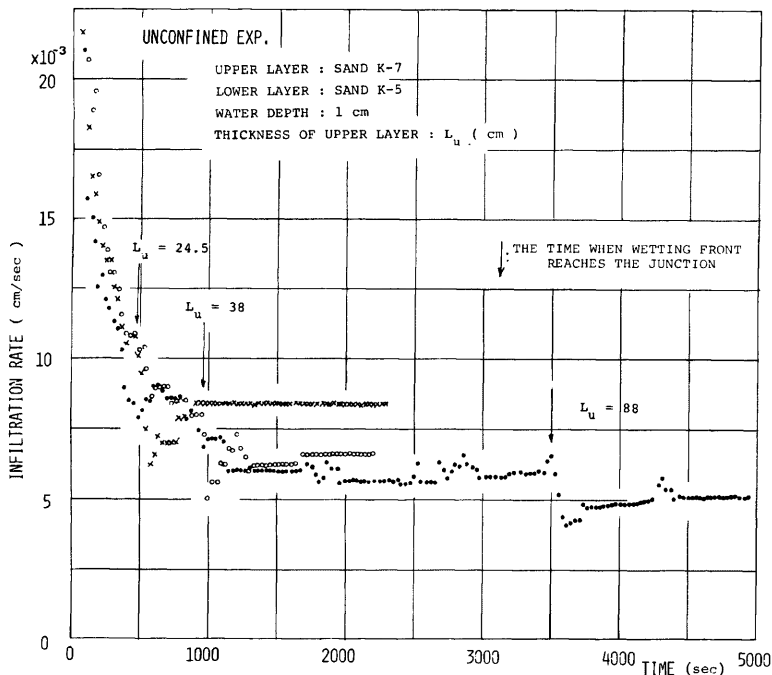


Fig. 5. Infiltration rate of water in unconfined K-7 · K-5 system.

実験ではこのような傾向を明確に認めることができなかつたので、つぎのことがいえる。

③ 上下層の粒径差が著しい場合には、wetting front が層境界に達すると、上層砂層の下部の水分量が急増し、飽和状態に近い値を示すようになる。

Fig. 7 及び Fig. 8 は水分量をパラメーターとして wetting front の伝播の様子を示したものである。なお、Fig. 8 では、下層での水分量は非常に小さい値しか示さなかつたので、測定精度を考慮して各測定での最大水分量の半分ということのパラメーターとして示されている。つぎに、Fig. 9 は Fig. 7 に対応した水分量分布の時間的変化を示したものである。これらの図からつぎの特性が見出される。

④ wetting front が層境界を通過する際には一時的な遅滞が生じ、遅滞の程度は上下層の粒径差が大きいほど著しい。

⑤ 層境界を過した wetting front は、ある時間後、一定の水分量をもって一定の速度で伝播する。とくに、K-7 · K-6 系ではその際の front の形状も固定される。

⑥ K-7 · K-5 系の場合には、wetting front が層境界を通過して一定の伝播速度になるまでの時間は上層厚が小さいほど大きい。

⑦ その際、層境界直下の水分量はそれより下部での最大水分量より常に大きな値を示す。

(2) 実験結果の考察

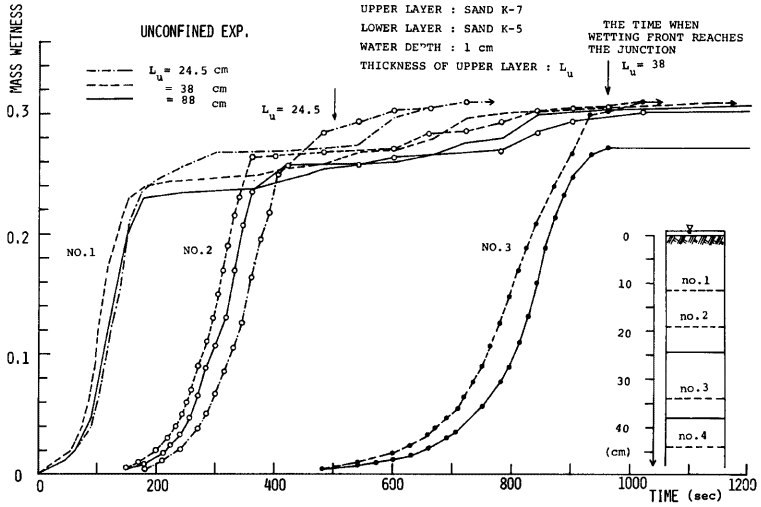


Fig. 6. Moisture content in upper layer in unconfined K-7 · K-5 system.

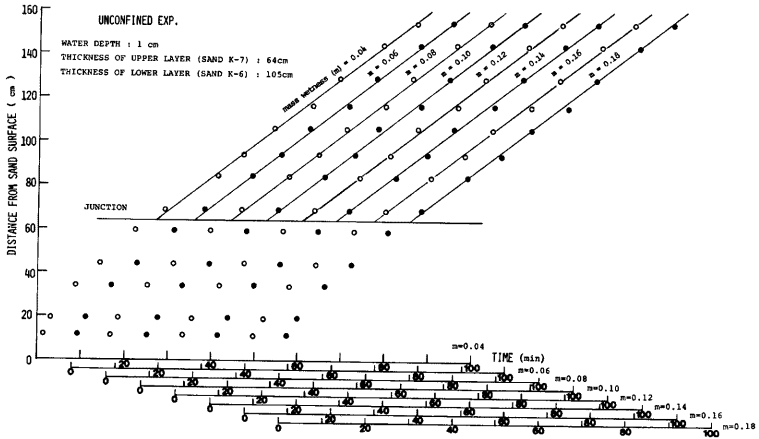


Fig. 7. Movement of moisture in unconfined K-7 · K-6 system.

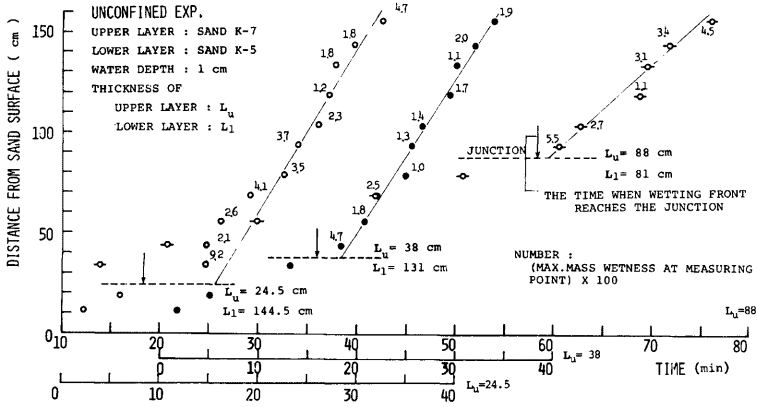


Fig. 8. Movement of moisture in unconfined K-7 · K-5 system.

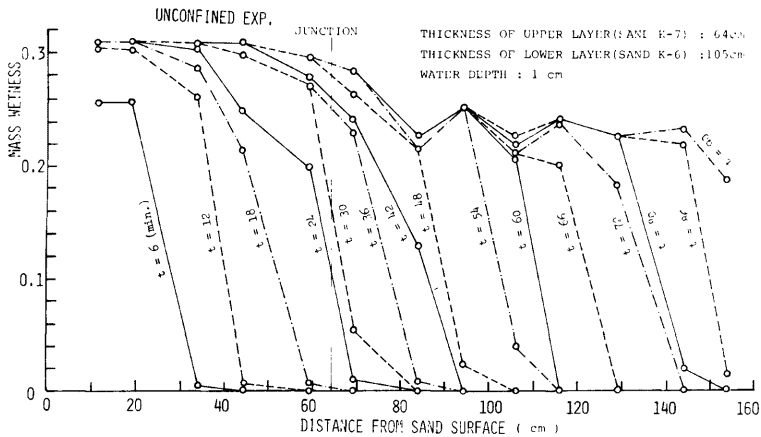


Fig. 9. Moisture profile in unconfined K-7 · K-6 system.

a. 下層での流れの形態と浸透強度

Table 1 は下層に十分に浸入した後の伝播速度 ω_* , 最大水分量 θ_* 及び浸透速度 f_* の値を示したものである。この表において、一定形状の wetting front が一定速度で伝播するのであるから、浸透水の連続条件より、 $\theta_* = f_*/\omega_*$ の関係が成立するので、実験結果から求められた θ_* と f_*/ω_* の値の比較は実験精度を示す指標と考えてよい。こうした場合に、さらに流れが浸透場全面に広がった不飽和浸透流のときは、

Table 1 Characteristic values in final state in unconfined sand-layered system.

Layered System		L_u	ω_*	θ_*	f_*	f_*/ω_* ($=\bar{\theta}_*$)	$K(\theta_s) \frac{\theta_*$ θ_s	$K(\theta_s) \frac{\bar{\theta}_*$ θ_s	$K(\theta_*)/\theta_*$	θ_*'
upper layer	lower layer	cm	cm/sec		cm/sec		cm/sec	cm/sec	cm/sec	
Sand K-7	Sand K-5	24.5	1.34×10^{-1}	4.1×10^{-2}	8.4×10^{-3}	6.2×10^{-2}	8.9×10^{-3}	1.4×10^{-2}		
		38	1.30×10^{-1}	2.3×10^{-2}	6.5×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-3}	1.1×10^{-2}		
	88	6.50×10^{-2}	4.9×10^{-2}	5.0×10^{-3}	7.7×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.7×10^{-2}			
	Sand K-6	64	2.53×10^{-2}	34.3×10^{-2}	8.8×10^{-3}	34.8×10^{-2}			2.1×10^{-2}	37.6×10^{-2}

L_u : thickness of upper layer, ω_* : phase velocity of wetting front,
 θ_* : max. moisture content of wetting front f_* : const. infiltration rate,
 $K(\theta)$: hydraulic conductivity, θ_s : saturated water content,
 $\theta_*' : K(\theta_*')/\theta_*' = \omega_*$

$K(\theta_*)/\theta_* = \omega_*$ (ここに K は不飽和透水係数) の関係も成立する¹⁾。K-7・K-6系の実験結果によると、 $f_*/\omega_* \div \theta_*$ 、 $\theta_* \div \theta_*'$ となっているので、下層 (K-6 砂) では全面に広がった不飽和流が生起していたとしてよい。なお、このような流れの形態を以下では全面的な不飽和流と呼ぶ。

一方、K-7・K-5系の実験の場合は、 $f_*/\omega_* = \theta_*$ の関係はほぼ成立しているが、 $K(\theta_*)/\theta_* = \omega_*$ の関係は、 $K(\theta_*) \sim 10^{-4}$ cm/sec のオーダーであるので、明らかに満足していない。このことは下層 (K-5 砂) 内の流れが全面的な不飽和流ではないことを示唆している。事実、実験終了時に円筒を分解してみると、下層の一部のみが湿潤状態であったことが観察された。そこで、下層内の流れを全面的な不飽和流ではなく、断面の一部に集中して流れるものと考えてみる。

このような場合には、連続条件より、

$$a \cdot \theta_* \cdot \delta x = f_* \cdot A \cdot \delta t, \text{ または } dx/dt = \omega_* = (A/a) \cdot (f_*/\theta_*) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 A : みかけの全断面積、 a : 実際に集中して流れているみかけの断面積、 θ_* : a に対する含水比、 f_* : A に対する浸透強度 (実測値) であり、またこの場合の水分量の測定値 θ_* は次式で与えられる。

$$\theta_* = a \cdot \theta_s / A \quad \dots\dots\dots(2)$$

いま、断面 a を飽和状態で水が流れると仮定すると、そのときの wetting front の伝播速度は一定となるが、K-5 砂の場合には、飽和透水係数 $K_s = 1 \times 10^{-1}$ cm/sec、空隙率 $\theta_s = 0.465$ であるので、伝播速度 $\omega_s = K_s/\theta_s = 2.15 \times 10^{-1}$ cm/sec となる。Table 1 に示した実験結果では、 $L_u = 24.5$ cm 及び 38cm の場合はこの値の約 1/2、 $L_u = 88$ cm の場合は約 1/4 となっており、さらに $dK(\theta)^2/d\theta^2 > 0$ であることを考慮すると、いずれの場合もかなり飽和に近い状態であると判断される。このような流れを以下では部分的な不飽和流と呼ぶことにする。しかし本実験では $a\theta_*$ の値しかわからず、一方形式的には θ_* の値を ω_* より計算することができるがその実測値との比較の手段はない。

さて、以下の全面的及び部分的な不飽和流の発生によって、wetting front が層境界に到達した際の浸透強度の変化の相違 (実験結果①及び②) となって現われることを説明することができる。Fig. 10 は、全面的な不飽和流の場合、wetting front が層境界に達した直後の水分量分布の変化と浸透強度との対応を模式的に示したものである。一般に、wetting front が層境界を通過する際の水分量と毛管ポテンシャルの関係には毛管ポテンシャルの連続性を仮定すると、上下層の粒径の相違による水分量と毛管ポテンシャルの関係より、一時的な遅滞が起ること (実験結果④) は容易に理解できるが、この現象が浸透強度の急減をもたらすと考えられる。この浸透強度の減少は砂層表面近傍の水分量の増加に帰結することが次のように示される。

浸透強度 f は、表面の湛水深がほとんどなく飽和領域が形成されていない場合には、 D を水分の拡散係

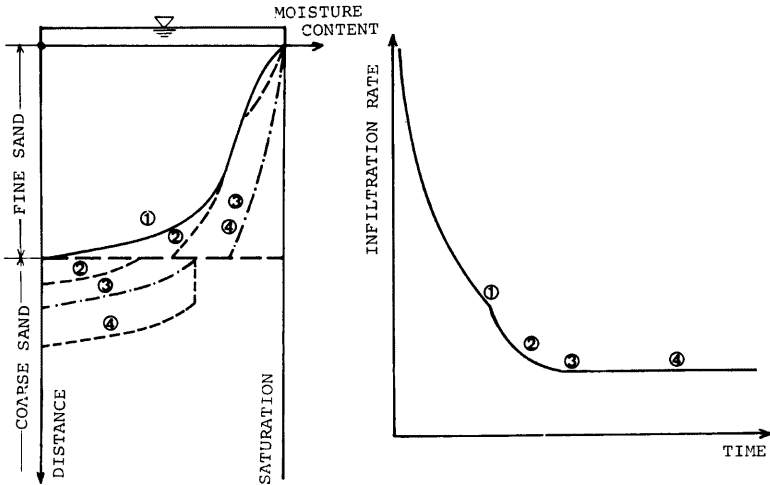


Fig. 10. Schematic figure showing relation between moisture profile and infiltration rate.

数として次式で表わされる。

$$f = \left[-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} + K(\theta) \right]_{x=0} \dots\dots\dots (3)$$

また、飽和域が形成されている場合には、 x_s を飽和領域の深さ、 ψ_e を air entry potential、 h_w を湛水深とすると、次式で与えられる。

$$f = K(\theta_s) \cdot \left(1 + \frac{h_w - \psi_e}{x_s} \right) \dots\dots\dots (4)$$

いずれの場合に対しても f が減少するには、 $x=0$ の境界を固定して考えているので、(3) 式の場合は $\partial\theta/\partial x$ の増大、(4) 式の場合は x_s の増大が必要となるので、結局砂層表面付近の水分量の増大を来すこととなるわけである。

しかし、K-7・K-5系における浸透強度の回復(実験結果①)は上記のことからは説明できない。一般に、wetting front が層境界に達した際には下層での小さな毛管力のため一時的な遅滞が生じて浸透強度の減少となり、上述のように砂層表面付近の水分量が増大する。しかし、層境界の上面付近ではその間でもある程度の水分の下方移動が続くので、この付近の水分量も増大する。この場合、上層厚が大きいほど空隙部分が多く、また浸透強度が小さくっているので、浸透強度の低下は小さいはず(実験結果①)と考えられる。ところで時間経過とともに層境界の上部の飽和度が大きくなり、そのための下方への水分移動の効果が付加されて、全体としての浸透強度が若干回復し、その後定常状態に落ち着くと考えられるのである。

つぎに、K-7・K-5系の実験における層境界直下の水分量の分布(実験結果⑦)について考察する。実験時の観察によって、層境界直下近傍ではそれより下部に比して湿潤の程度が大きい領域(Hillらはこれを induction zone と呼んでいる²⁾)の存在が明らかに認められた。本実験の場合、下層で層境界にもっとも遠い水分測定点は、 $L_w=24.5\text{cm}$ の場合で、他の場合の2倍以上の15cmである。それにも拘らず最大水

分量は Fig. 8 からわかるように2倍程度の値を示し, induction zone がもっとも発達していたことになる。このことは wetting front が層境界に到達した後, ほぼ定常状態の部分的不飽和流が生起するまでの時間, すなわち wetting front が一定速度で伝播し始めるまでの時間がもっとも長くなっているという事実と対応している。

ところで, K-7・K-5系の下層で認められた部分的不飽和流の発生は, wetting front の形状に関するいわゆる安定, 不安定の問題と同じであるので, ここで若干触れておく。この問題に対して, 近年 Philip は³⁾単純な Green & Ampt のモデルに流体力学の分野で用いられる微小変動による安定理論の手法を適用して, 浸透場の異質性, 間隙空気圧が wetting front 形状に及ぼす影響を考察している。しかし, Philip 自身も述べているように, 上層が細砂で下層が粗砂の本実験のような場合はこのモデルの適用が困難である。本来は, 対象としている front 形状の安定問題を論ずる場合, 水分の運動を支配する基礎式, すなわち, 一般的な Richards の式⁴⁾より出発すべきものと考えられるが, この方面からの研究は今後の課題であらう。

b. 一定の浸透強度下の水分量の分布

以下では下層での流れが全面的不飽和流である場合を対象として考察する。Fig. 11 のように, 上層に飽和領域 (I) と不飽和領域 (II) が, 下層に不飽和領域 (III) が存在する場合である。前項でも述べたように, 浸透強度が一定となっているときには, 層境界より下層への流量も一定と考えられ, さらに, wetting front が一定の形状と速度で伝播するので領域 (III) の水分量 θ_* は一定となる。ところで, もし領域 (I) が層境界まで発達しているとする, その点の毛管ポテンシャルは air entry potential $\psi_{u,e}$ である。そのため領域 (III) では $d\psi_1(\theta)/dx < 0$, すなわち $\theta_1 > \theta_*$, $\psi_1 < \psi_e$ なる領域が存在しなければならなくなり, 上記の水分量一定の条件に矛盾することになる。したがって, 上層では不飽和領域が Fig. 10 に示すように共存することになるが, このときの飽和領域の深さ x_s は Darcy 則より次式で与えられる。

$$x_s = K_{u,s}(h_w - \psi_{u,e}) / (f_* - K_{u,s}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

つぎに, 不飽和領域 (II) については, その上端での毛管ポテンシャルは air entry potential $\psi_{u,e}$ の状態にあり, 水分量の分布は次式で与えられる。

$$-\int_{x_s}^x \frac{f_*}{K_u(\psi_u)} dx = \psi_u(x) - x - \psi_{u,e} + x_s, \quad \dots\dots(6)$$

上式は層境界での毛管ポテンシャルの連続性と飽和領域の存在による $d\psi_u(x)/dx < 0$ という条件を導入することによって数値計算が可能である。

本実験の K-7・K-6 系の場合は, $f_* = 8.8 \times 10^{-3}$ cm/sec, $K_{u,s} = 6 \times 10^{-3}$ cm/sec, $\psi_{u,e} = 25 \sim 30$ cmAq, $h_w = 1$ cm であるから, 飽和領域 (I) の厚さは 53~63 cm となり, 層境界のごく近いところまで領域 (I) が発達していたこととなり, これは Fig. 9 と一致している。なお, 同図で層境界直下の水分量が下方の水分量 (θ_*) より大きい値を示しているが (実験結果⑦), これは前述の induction zone と同種のものか, あるいは実験誤差か, 現在のところ不明である。

3.2 間隙空气が閉塞される場合

(1) 実験結果

Fig. 12, 13, 14 は K-7・K-6 系の実験結果で, それぞれ $L_u = 24, 5, 64, 88$ cm の場合, Fig. 15, 16 は K-7・K-5 系の実験結果で, $L_u = 38, 88$ cm の場合の浸透強度, 間隙空

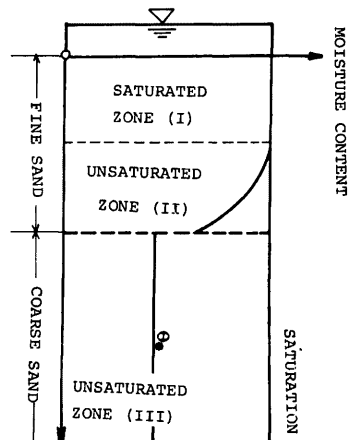


Fig. 11. Schematic moisture profile for uniformly unsaturated flow.

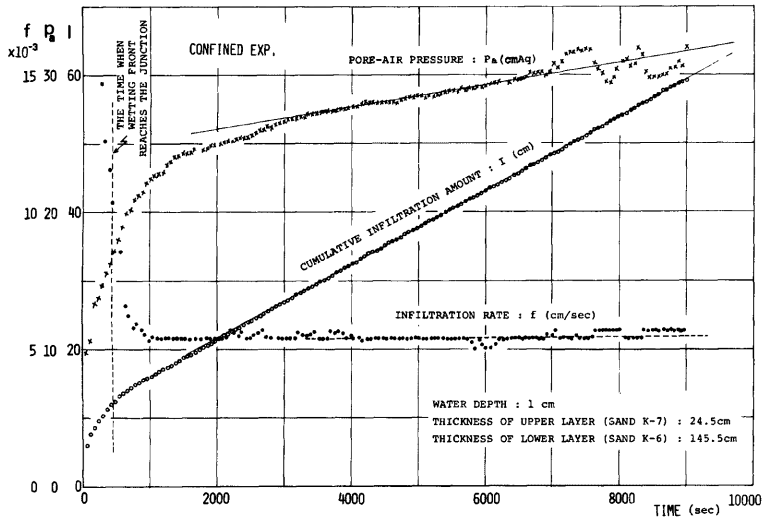


Fig. 12. Infiltration rate and pore-air pressure in confined K-7-K-6 system ($L_u=24.5$ cm)

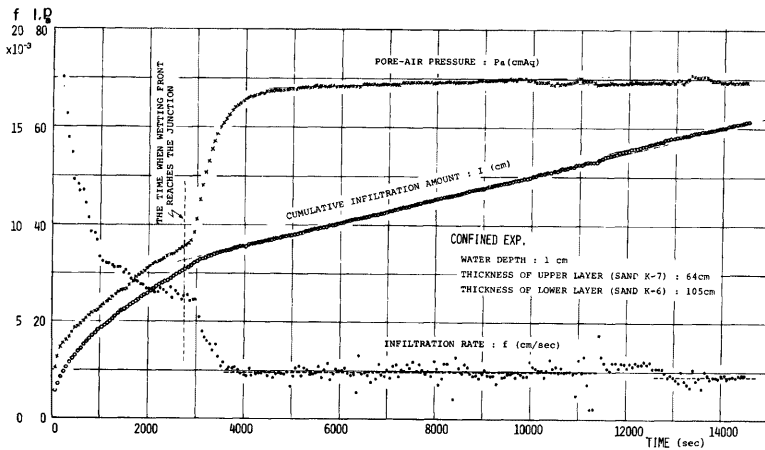


Fig. 13. Same as Fig. 12 ($L_u=64$ cm).

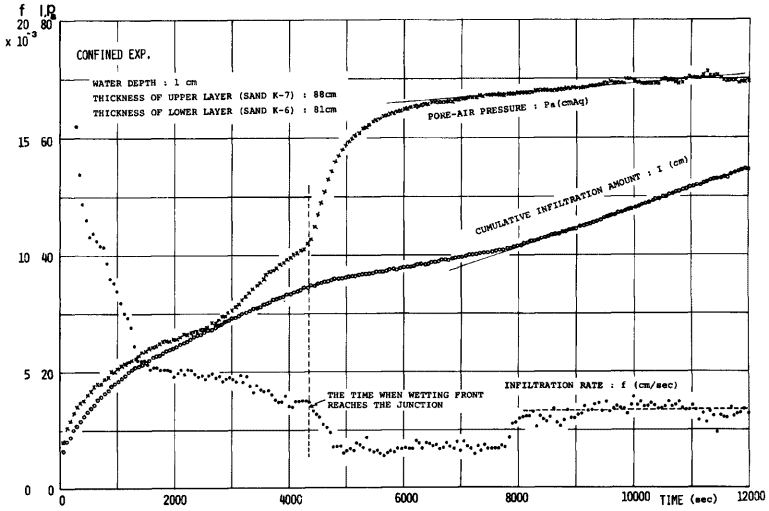


Fig. 14. Same as Fig. 12 ($L_u=88$ cm).

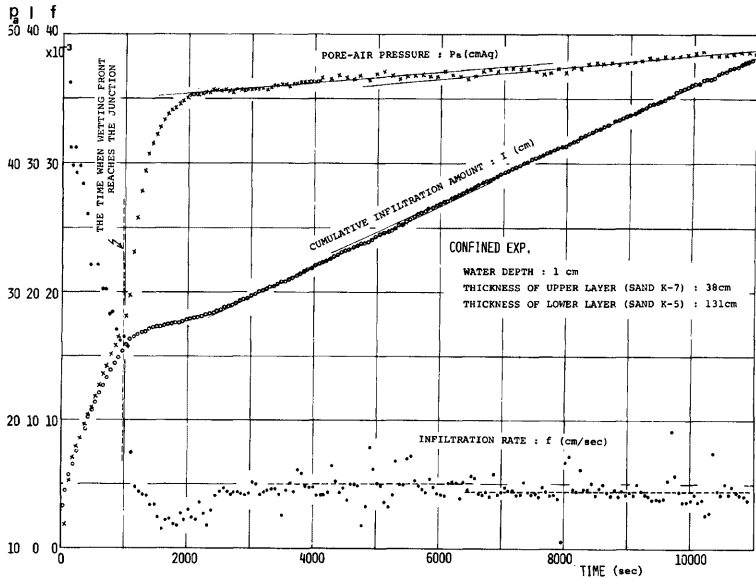


Fig. 15. Infiltration rate and pore-air pressure in confined K-7-K-5 system ($L_u=38$ cm).

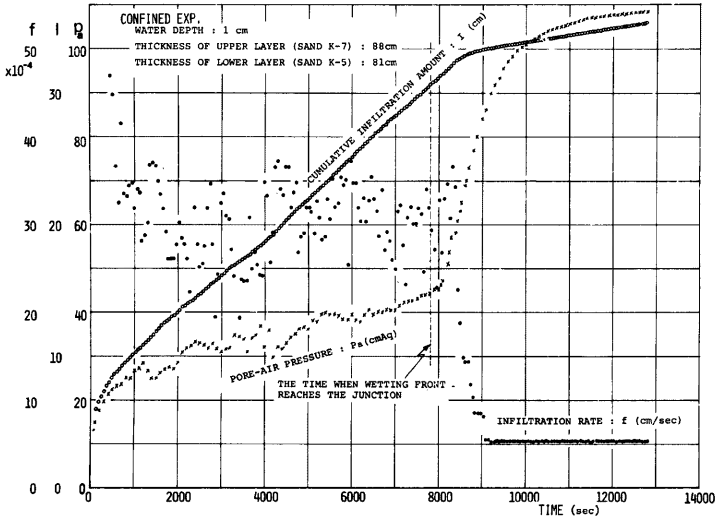


Fig. 16. Same as Fig. 15 ($L_u=88\text{cm}$).

気圧の時間的変化を示したものである。これらの図からつぎのような事実が見出される。

① 浸透強度は、wetting front が層境界到達後に急激に減少するが、その減少の割合は上層厚が小さい場合ほど大きい。

② wetting front の層境界到達後に急減した浸透強度は、その後一定値に漸進するが、空気閉塞を伴わない場合と異って、その値は上層厚が小さい場合の方が大きな値になるとは限らず、また固定的でなく時間の経過とともに別の一定値に変化する場合もある。

③ 間隙空気圧は wetting front が層境界に到達して浸透強度が減少し始めるのとほぼ同時に急激な増加をみせる。

④ その空気圧の増加割合は時間の経過とともに減少し、やがてほぼ一定の割合で緩やかに増加するようになるが、その時間は減少過程にあった浸透強度が一定値となる時間にほぼ対応している。なお、一定割合で緩やかに増加していた空気圧が別の一定割合の変化に移行する場合があるが、その移行は浸透強度が新たな一定値へ移行するのと時間的にほぼ対応している。

Fig. 17, 18 は上層厚がそれぞれ $L_u=24.5, 64\text{cm}$ の K-7・K-6系における水分量をパラメーターにとった wetting front の伝播速度を示し、Fig. 19, 20 は同じ系における水分量分布の時間的変化を示したものである。つぎに、Fig. 21 は K-7・K-5 系での wetting front の伝播の様子を示したものであるが、 $L_u=38\text{cm}$ 、 $L_l=131\text{cm}$ の場合を別にして、下層での水分量が非常に小さな値となったため、Fig. 8 の場合と同様に最大水分量の半分ということをパラメーターとしている。なお Fig. 22 は例外的に下層での水分量が比較的大きな値を示した $L_u=38\text{cm}$ 、 $L_l=131\text{cm}$ の場合 (Fig. 15 に対応) の水分量分布の時間的変化を示したものである。Fig. 23 は wetting front が層境界に到達する前後における上層での水分量の変化の様子を示したもので、前述の Fig. 6 のところで述べたと同様な見方ができる。これらの図から、さらにつぎのことがわ

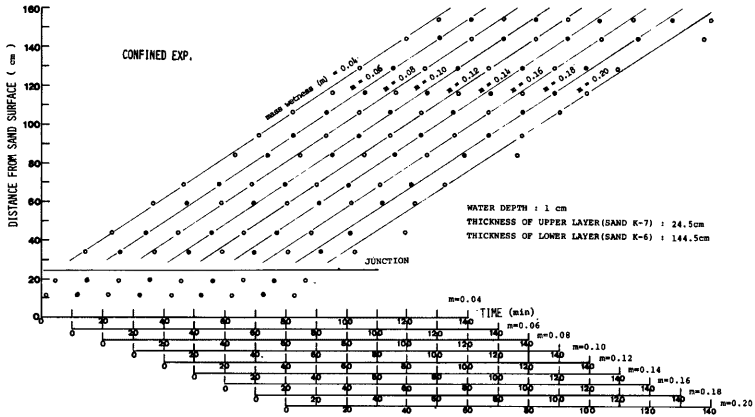


Fig. 17. Movement of moisture in confined K-7・K-6 system ($L_u=24.5\text{cm}$, $L_l=144.5\text{cm}$).

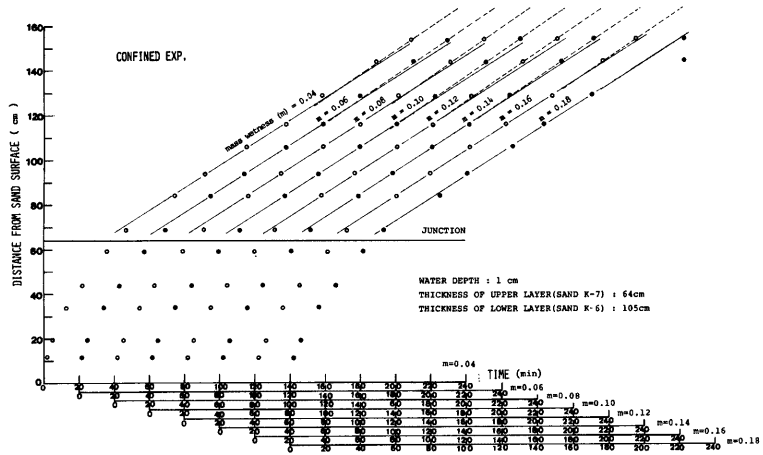


Fig. 18. Same as Fig. 17 ($L_u=64\text{cm}$, $L_l=105\text{cm}$).

かる。

⑤ wetting front が層境界に到達した直後，上層砂層での水分量が急増する。

⑥ 下層においては時間の経過とともに wetting front は一定の形状及び速度で下方へ伝播するようになる。なお，K-7・K-5 系の多くの場合，一定形状の伝播が必ずしも明確ではないが，いずれにしても一定

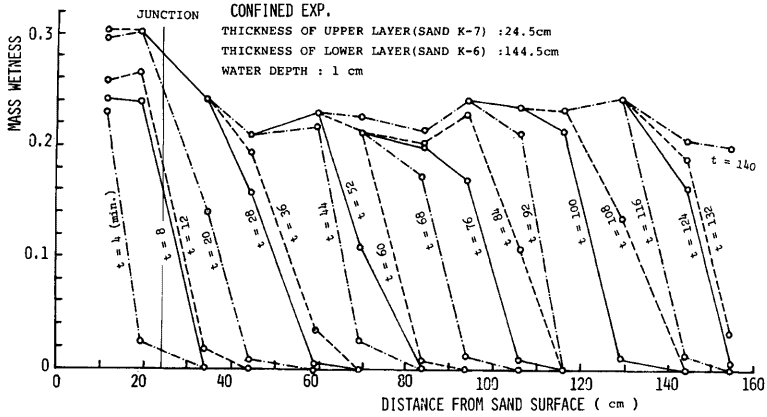


Fig. 19. Moisture profile in confined K-7 · K-6 system ($L_u=24.5\text{cm}$, $L_l=144.5\text{cm}$).

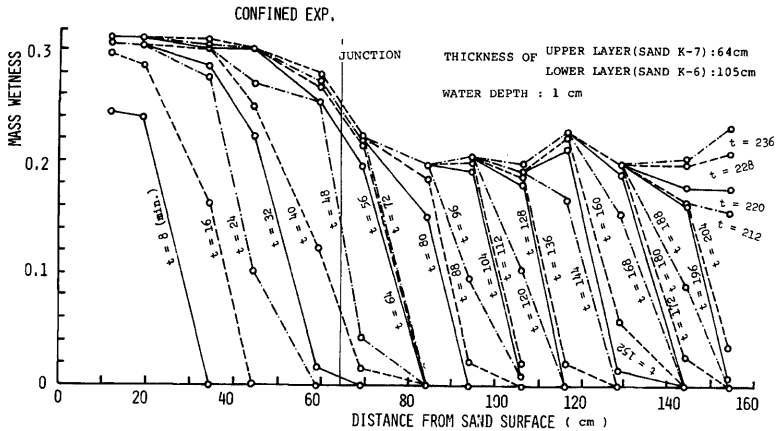


Fig. 20. Same as Fig. 19 ($L_u=64\text{cm}$, $L_l=105\text{cm}$).

形状をとるようになる時間は、浸透強度、間隙空気圧の変化割合が一定となる時間に対応している。

(2) 実験結果の考察

a. 下層での流れ形態

まず、wetting front が下層内を伝播しているときの流れ形態について考察する。著者らの研究によると⁵⁾、間隙空気が閉塞され、しかも全面的な不飽和流が形成される場合に、間隙空気圧が水分の移動に対してポテンシャル表現ができると仮定すると、wetting front が一定の形状及び速度で伝播するときの伝播速度 (ω_*)

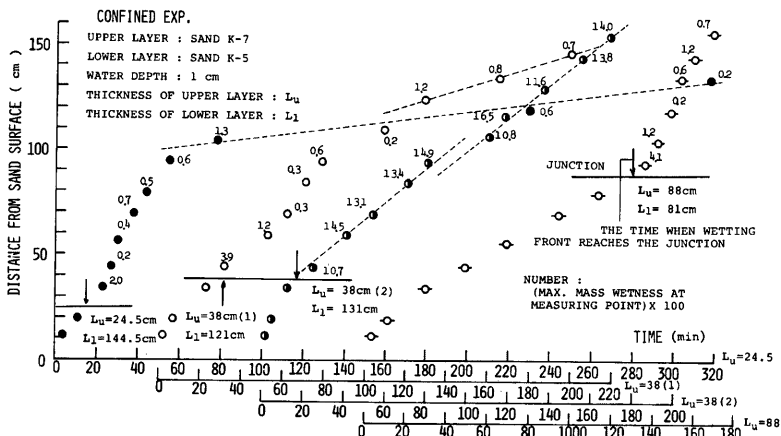


Fig. 21. Movement of moisture in confined K-7 · K-5 system.

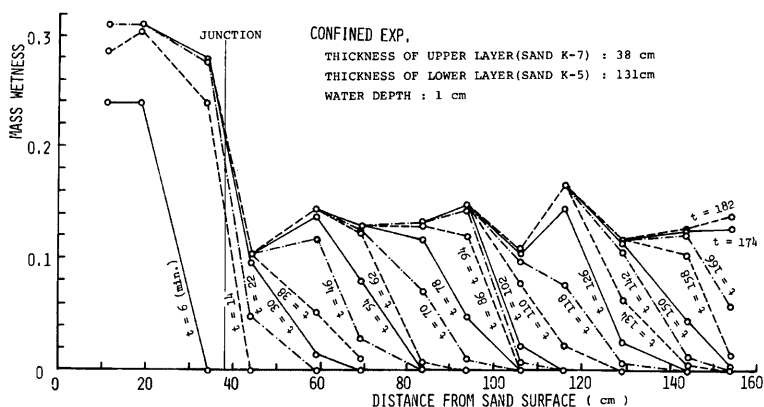


Fig. 22. Moisture profile in confined K-7 · K-5 system ($L_u=38\text{cm}$, $L_l=131\text{cm}$).

は、 p_a を間隙空気圧、 ξ を ω_* の速度で重力方向に進む移動座標として、 $\omega_* = (K(\theta_*)/\theta_*) \cdot (1 - \partial p_a / \partial \xi)_{\theta=\theta_*}$ で表わされるが、実験によって、単一砂層 (K-7 砂) 及び二層砂層 (K-7 · K-6 系) の下層における wetting front の伝播速度は $\omega_* = K(\theta_*)/\theta_*$ となり、また $1 \gg (\partial p_a / \partial \xi)_{\theta=\theta_*}$ としたときの理論的な front 形状が実測値とよく一致するという結果を得、それらから wetting front の伝播に及ぼす間隙空気の影響は近似的に無視してもよいという結論をえている。Fig. 15 及び Fig. 22 に示した K-7 · K-5 系の実験結果については、 $\omega_* = 1.1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、 $\theta_* = 0.19$ 、 $f_* = 2.3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ となっており、 $K(\theta_*)/\theta_* = 1.5 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ となり、 $\omega_* = K(\theta_*)/\theta_*$ の関係がほぼ満足されて、下層では全面的な不飽和流が生起していると考えてよい。

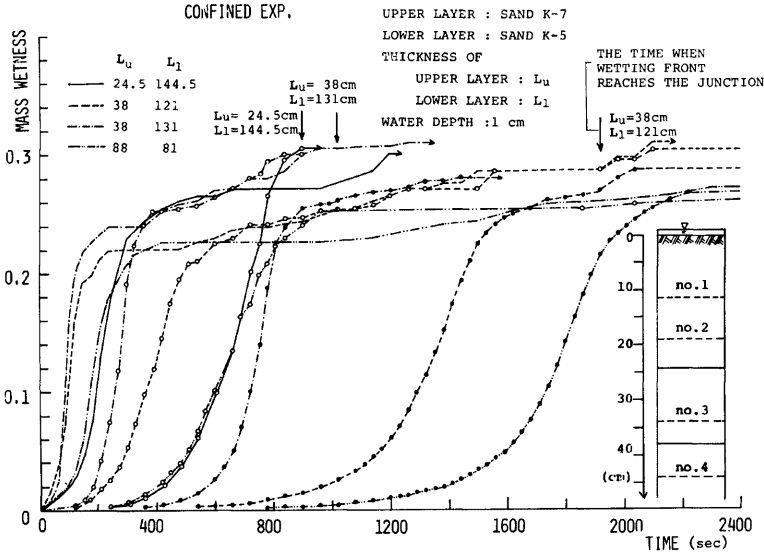


Fig. 23. Moisture content in upper layer in confined K-7·K-5 system.

一方、上記以外の K-7·K-5 系の実験例では浸透強度が非常に小さく測定精度があまりよくなくて上記のような検討ができなかったが、実験終了時に円筒を分解して観察したところによると、浸透全断面の一部にのみ湿潤の跡が認められた。また、間隙空気圧の変化割合が一定であるような時間帯では浸透強度が一定であったであろうとの推定のもとに wetting front の伝播速度を調べてみると、 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ の order であることがわかったが、この値は部分的飽和流れの伝播速度 $K(\theta_s)/\theta_s = 2.15 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ とかなり違っている。全面的不飽和流における結論を援用して、wetting front の伝播速度には空気圧の影響は比較的小さいとすると、これらの流れ形態は部分的不飽和流であると結論できよう。

ところで、とくに K-7·K-5 系における下層の流れは、実験の範囲内ではあるが、空気閉塞を伴わない場合にはすべて部分的不飽和流であったが、空気閉塞を伴う場合には全面的不飽和流が生起する可能性が認められ、間隙空気の影響として興味深い結果である。

b. 間隙空気圧と飽和領域

Fig. 24 は主として K-7·K-6 系で、間隙空気圧が最大値をとるとき、すなわち wetting front が下層の下端に到達したときの 上層砂層における水分測定点での水分状態を示したものである。もし間隙空気の放出が間歇的に行われているならば、少なくとも、 $p_a = h_w + x_s - \phi_{j,e}$ ($j = u, l$) なる関係が成立している時間が存在するはずである。一例として、上層厚が 88cm の場合について調べてみると、 $h_w = 1\text{cm}$, $\phi_{u,e} = -30\text{cmAq}$ 程度であるから、飽和領域が $x_s = 39\text{cm}$ まで発達していたことになる。一方、水分量の測定からは、 $x_s = 34 \sim 44\text{cm}$ の間にあるので、上で求めた値はこの範囲内にあることとなる。

同様の方法で調べた結果、上層厚 64cm 及び 24.5cm の場合は上例と同様に飽和領域が存在し、間隙空気は間歇的に放出されるという説明が可能であった。しかし、 $L_u = 13\text{cm}$, 38cm の場合は上のような説明

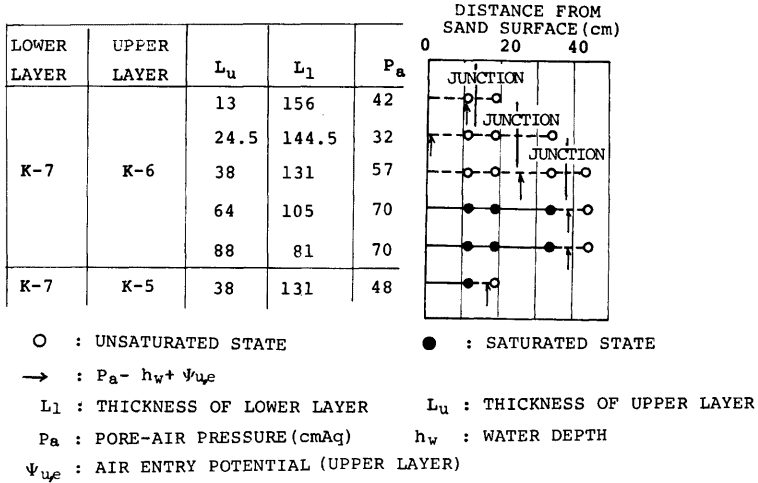


Fig. 24. Development of saturated zone in confined sand-layered system.

ができなくて、すなわち、上層で飽和領域が存在しておらず、間隙空気と水分が別々の経路で流れていたことになる。

つぎに、K-7・K-5系において、下層で部分的な飽和流が生起する場合には、wetting front が層境界に到達後の間隙空気圧の急激な増加はほぼ一定の値に落ち着くようであり、 $L_u=24.5, 38, 88\text{cm}$ に対してそれぞれ 41, 56, 108cmAq となる。この場合、実験中に間歇的な空気の放出が観察されたので、 $x_s=p_a-h_w+\psi_{ue}$ より飽和領域の大きさを求めてみると、それぞれ 10, 25, 77cm をえた。これより、 L_u-x_s は、14.5, 13, 11cm とほぼ同じ値がえられるが、このことは層境界よりほぼ一定の高さまで飽和領域が発達していたことを示すものである。下層で全面的な飽和流が生起した $L_u=38\text{cm}$ の場合も間隙空気の間歇的な放出が観察された。そこで、上の同様にして飽和領域の大きさを求めたところ $x_s=17\text{cm}$ となり、水分測定の結果とほぼ一致した。

以上の検討からつぎのことがいえる。すなわち、間隙空気の間歇的な放出が生起している場合は飽和領域は上層にのみ存在する。換言すると、間隙空気圧は $L_u+h_w-\psi_{ue}$ より小さな状態にある。この結果の検証は本実験の範囲内で行ったのであるが、間隙空気が閉塞されない場合で下層に全面的な飽和流が生起するときも飽和領域は上層にのみ存在するという事実との対応は大いに示唆的である。一方、K-7・K-6系で上層が比較的小さい場合は、間隙空気の連続的な放出の形態が予想されたが、このことは上下層での粒径差が小さく、かつ上層厚が小さい場合には飽和領域が形成されにくいことを意味しよう。

つぎに、wetting front が層境界に到達する前後の間隙空気の放出の様子を調べるために、まず近似的に放出速度を求めておく。すなわち、砂層の不飽和領域内での間隙空気圧は空間的に一様であり、空気は理想気体で等温変化をすると仮定すると、Boyle の法則より放出速度 v_a (鉛直方向を正符号) は次式で与えられる。

$$-v_a(t) = f(t) - \frac{L\phi - I(t)}{P_0 + p_a(t)} \cdot \frac{dp_a}{dt} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $f(t)$: 浸透強度、 L : 砂層長、 ϕ : 空隙比、 $I(t)$: 累積浸透量、 P_0 : 大気圧、 $p_a(t)$: 間隙空気圧 (増分)、

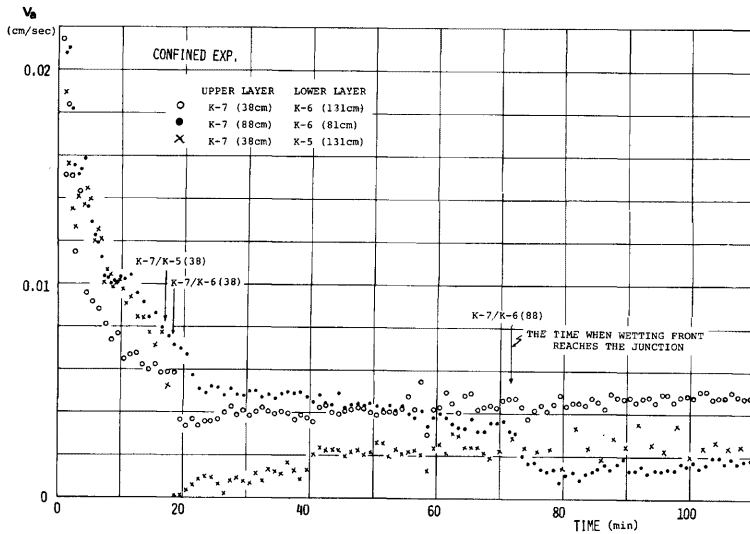


Fig. 25. Pore-air filter velocity at sand surface.

Fig. 25 は K-7・K-6 系で $L_u=38, 88\text{cm}$ 及び K-7・K-5 系で $L_u=38\text{cm}$ の実験で式 (7) から求めた $(-v_a)$ の変化を示したものである。wetting front が層境界に到達した直後 $-v_a$ は急激に減少するがその後々回復する。そのときの極小値は上層厚が大なるものほど小さく、同程度の上層厚では上下層の粒径差が大きいものほど小さい。この $-v_a$ の急激な減少は 3.1(2)a. 項でも述べたように、上下層の粒径の差に伴う上層砂層での土壌水分の増大現象 (実験結果⑤) に帰因しよう。

4. 上層が粗砂で下層が細砂の場合の浸透

本節における実験は主として間隙空気が閉塞される場合を対象としている。

(1) 実験結果

Fig. 26, 27, 28 は K-6・K-7 系でそれぞれ $L_u=38, 64, 88\text{cm}$ の場合の浸透強度及び間隙空気圧の時間的变化を示したものであり、また、Fig. 29, 30 はこれらの実験について wetting front が層境界に到達する前後を拡大して示したものである。Fig. 31 は K-5・K-7 系で $L_u=64\text{cm}$ の場合の結果であるが、この場合には K-5 砂の浸透能が大き過ぎて使用した給水装置では約 2 分後に所定の境界条件となった (このとき wetting front は上層中に存在していた)。これらの図と K-6・K-7 系で $L_u=13, 24.5\text{cm}$ の場合、及び K-5・K-7 系で $L_u=24.5\text{cm}$ の場合との実験結果からつぎのことが判明した。

① wetting front が層境界に到達したときの浸透強度は、K-6・K-7 系の場合、それ以前の減少割合が緩和され、ある時間ほぼ一定の値となるが、その時間は上層厚が大きいほど長い。一方、K-5・K-7 系の場合は、減少の割合の緩和よりむしろ増大する傾向を示し、その後減少することが認められる。

② wetting front が層境界に到達した直後の間隙空気圧は、K-6・K-7 系の場合、それ以前の増加割合はある時間の間一旦緩和されるが、その後急激に増大する。一方、K-5・K-7 系の場合は緩和区間なしに急増する。

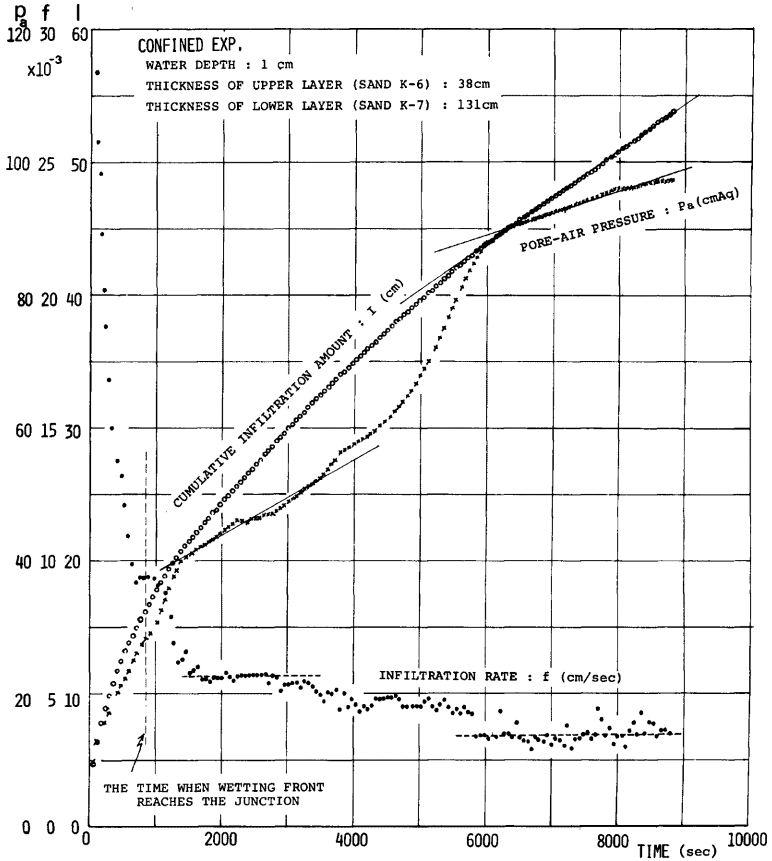
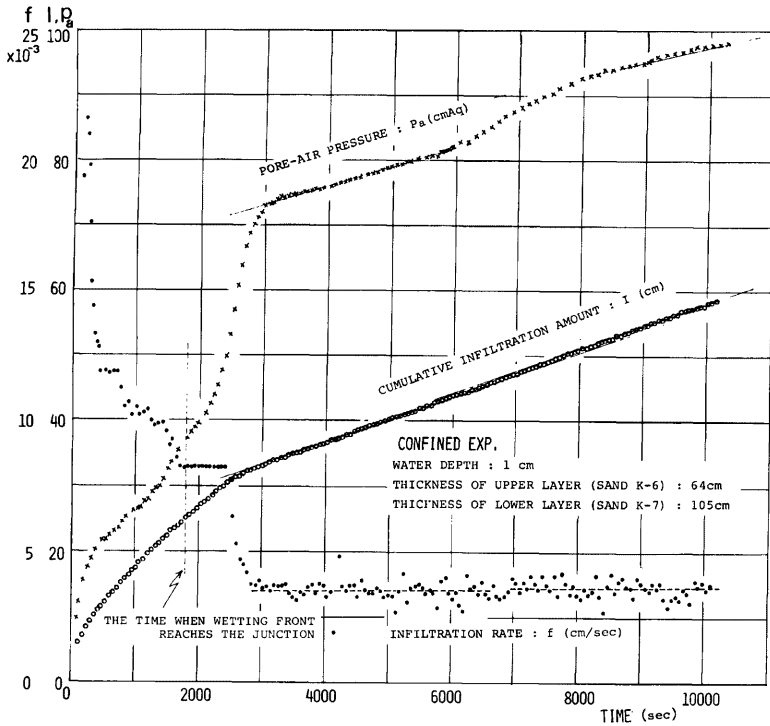


Fig. 26. Infiltration rate and pore-air pressure in confined K-6-K-7 system ($L_w=38\text{cm}$).

③ wetting front が下層中にある程度進んだ後においては、上層が細砂で下層が粗砂の閉塞のところ (3.2(1) 参照) で述べた浸透強度と間隙空気圧との関係が同様に成立する。

つぎに、Fig. 32, 33 は K-6-K-7 系で $L_w=88\text{cm}$ の場合及び K-5-K-7 系で $L_w=64\text{cm}$ の場合の水分量分布の時間的変化の様子を、また、Fig. 34 は Fig. 32 と同じ実験について、wetting front の伝播の様子を水分量をパラメーターとして示したもので、これらの結果からつぎのことがわかった。

④ wetting front が下層にまで進んでいる際の上層砂層においては、K-6-K-7 系の場合、その上部の飽和に近い領域と下部の若干水分量の少ない領域とで構成されているが、時間の経過とともに領域区分が変化していく。しかし、K-5-K-7 系の場合は全域が飽和に近い水分状態となってほぼ一定している。一方、

Fig. 27. Same as Fig. 26 ($L_w=64\text{cm}$).

下層では K-5・K-7 系, K-6・K-7 系のいずれの場合も, 単層の場合と同様⁵⁾に, 層の上部の飽和に近い領域とそれよりかなり水分量の少ない領域とで構成されている。

⑤ wetting front が下層内を進むに従って, 一定の形状及び速度で伝播する場合があります, その際の浸透強度, 間隙空気圧の変化の割合は一定となっている。

(2) 実験結果の考察

a. 間隙空気圧と飽和領域

wetting front が層境界に到達した直後では, 下層の浸透能が大きいため, 上層よりの流量はそのまま下層へ浸透していく。そして時間の経過とともに, 層境界直下の水分が増大しその勾配も小さくなり, また間隙空気圧が増大の方向にあるので, 下層の浸透能は次第に低下していく。しかし上層は下層より粒径の大きい砂で作られているために, やがて層境界の上面に湛水を生ずる可能性がある。このようにして飽和領域が, 上層において砂表面より下方へ, また層境界面より上方へと発達し, 下層においては層境界上で飽和領域の存在を必要条件として, 層境界より下方へと発達していくことが考えられるのである。

Fig. 35 は飽和領域が存在する場合の水分量分布を模式的に示したものである。図中左のパターン (A) の場合には, 間隙空気が放出される限界状態での飽和領域の大きさ $x_{s,1}$ は力の釣合条件より次式で与えら

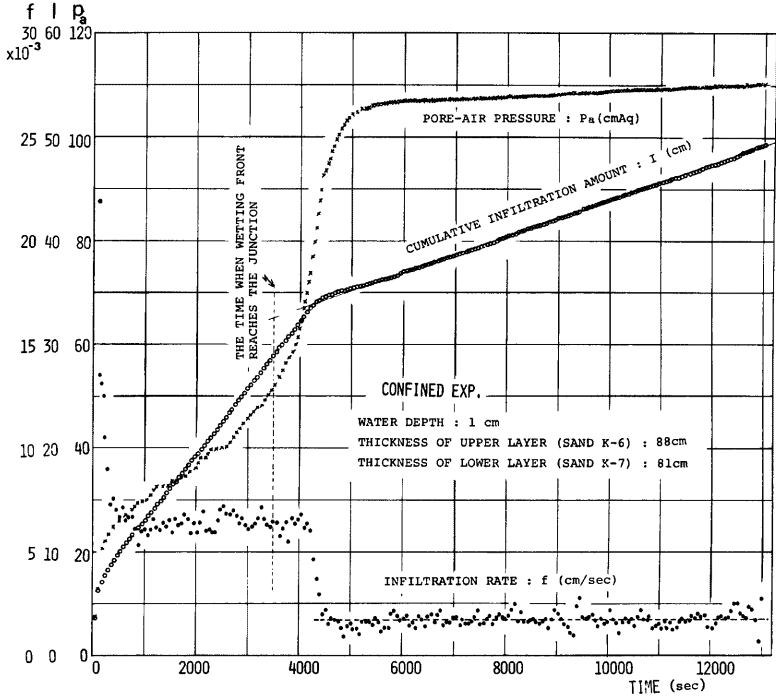


Fig. 28. Same as Fig. 26 ($L_u=88\text{cm}$).

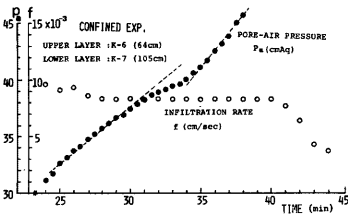


Fig. 29. Detailed figure of Fig. 27.

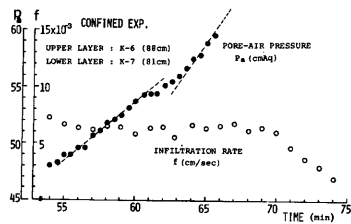


Fig. 30. Detailed figure of Fig. 28.

れる。

$$x_{s,1} = p_a - h_w + \psi_{u,e} \quad \dots\dots\dots (8)$$

一方、図中右のパターン (B) の場合には、下層での間隙空気が上層へ移動する限界状態でのつぎの釣合式が成立する。

$$p_w + x_{s,2} + x_{s,3} - \psi_{l,e} = p_a, \quad p_w = \psi_{u,e} + p'_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

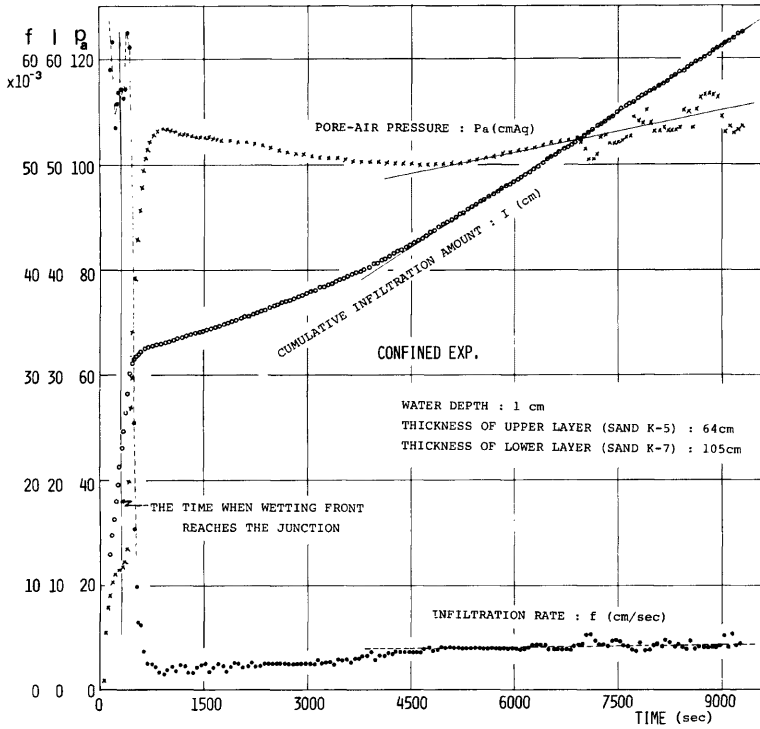


Fig. 31. Infiltration rate and pore-air pressure in confined K-5-K-7 system ($L_u=64$ cm).

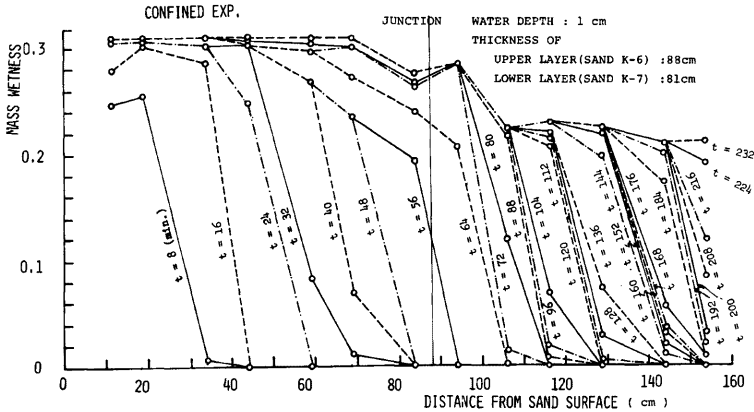


Fig. 32. Moisture profile in confined K-6-K-7 system ($L_u=88$ cm).

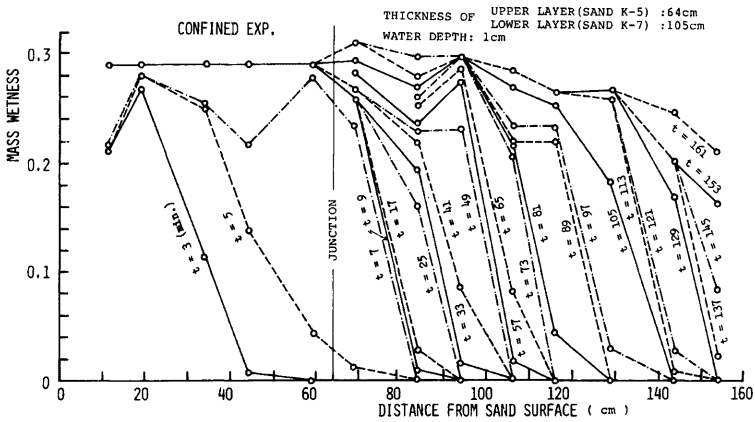


Fig. 33. Moisture profile in confined K-5・K-7 system ($L_u=64\text{cm}$).

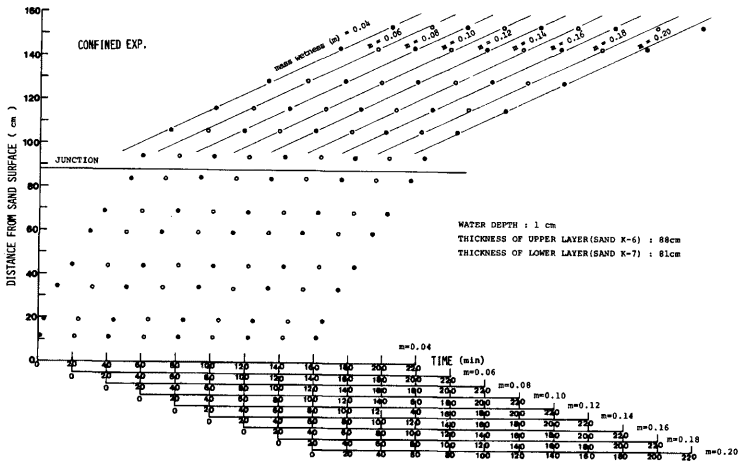


Fig. 34. Movement of moisture in confined K-6・K-7 system ($L_u=88\text{cm}$).

ここに、 p_w : 層境界より上方 $x_{s,2}$ での水圧、 p'_a : 上層での間隙空気圧、 p_a : 下層での間隙空気圧、 $x_{s,j}$: 飽和領域の大きさで、 $j=1, 2, 3$ はそれぞれ上層表面の直下、層境界より上方及び下方を意味する。つぎに、上層内の間隙空気が外界へ放出される限界状態に対しては、(8) 式と同様に次式が成立する。

$$h_w + x_{s,1} - \psi_{u,e} = p'_a \quad \dots\dots\dots (10)$$

(9) 式と (10) 式とを連立させることは、各々の間隙空気の移動に時差があるので必ずしも厳密ではない。

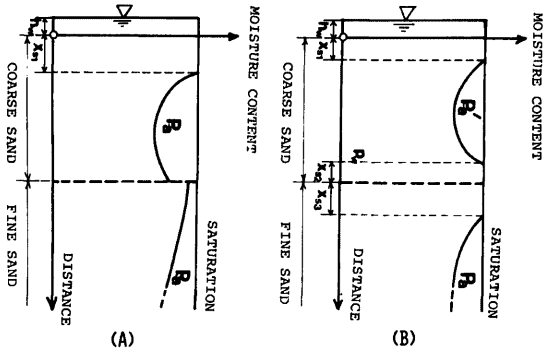


Fig. 35. Schematic patterns of moisture profile in confined course-fine sand system.

しかし、近似的に連立させることができるかと仮定すると、結局つぎの関係がえられる。

$$x_{s,1} + x_{s,2} + x_{s,3} = \rho_a \cdot h_w + \psi_{1,e} \dots \dots \dots (11)$$

以下において、(8) 式及び (11) 式に基づいて、本実験における飽和領域の形成過程を調べてみる。例として、K-6・K-7 系で $L_w=66, 88\text{cm}$ の場合、K-5・K-7 系で $L_w=64\text{cm}$ の場合を取り扱ってみる (Fig. 27, 28, 31 参照)。Fig. 36 は Fig. 24 と同種のものであるが、図中には、

矢印 \rightarrow で (8) 式の $x_{s,1}$ の値、矢印 \dashrightarrow で (11) 式の $x_{s,1} + x_{s,2} + x_{s,3}$ の値が砂層表面から測った長さとして図示してある。また、時間記号に関しては、wetting front が層境界に到達した時間を t_i 、その際に K-6・K-7 系に対して一定の浸透強度が減少し始める時間を \hat{t} 、減少した浸透強度が一定値に移行し始める時間を $t_{s,1}$ 、その一定強度が変化し始める時間を $t'_{s,1}$ 、再び別の一定値となる時間を $t_{s,2}$ 、実験終了時間すなわち wetting front が下層の最下端に到達する時間を t_{ed} で示してある。

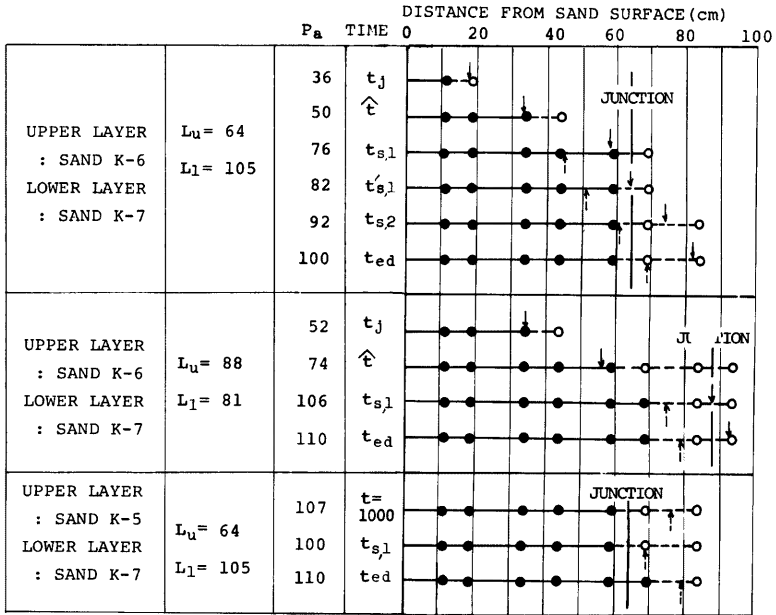
K-6・K-7 系, $L_w=88\text{cm}$ の場合：各点の水分量及び矢印との関係を考慮すると、少なくとも $t < \hat{t}$ では、飽和領域はパターン (A) の状態にあり、また少なくとも $t \geq t_{s,1}$ ではパターン (B) の状態にある。

K-6・K-7 系, $L_w=64\text{cm}$ の場合：少なくとも $t \leq \hat{t}$ での飽和領域はパターン (A) であり、また少なくとも $t \geq t_{s,2}$ ではパターン (B) である。問題は $t = \hat{t} \sim t_{s,2}$ の状態であるが、 $x=59\text{cm}$ での測定値は飽和に近い状態があるので、この点をいま考えている飽和領域に含めるかどうかによって層境界直上での飽和領域が湛水の形態によって形成されたかどうかの評価が変わる。したがって、 $t = t_{s,1}, t_{s,2}$ における $x=59\text{cm}$ の測点が飽和状態であれば、 $t = t_{s,1} \sim t_{s,2}$ の間隙空気圧の変化割合の急増は砂層表面から発達してきた飽和領域が層境界に達して、下層の層境界近傍が飽和状態となったことを意味しよう。

K-5・K-7 系, $L_w=64\text{cm}$ の場合：Fig. 31 からわかるように、 $t=1000\text{sec}$ での間隙空気は、wetting front が層境界に到達した直後に起った層境界から砂層表面までの急激な湛水化、及び下層への水の急激な浸透のために、過圧縮の状態となり、そのために間隙空気の放出は連続的の形態をとると考えられる。その後 $t=t_{s,1}$ 程度までは連続的の放出が続き次第に間隙空気圧が減少するが、 $t=t_{s,1}$ になってはじめて浸透強度と間隙空気の放出速度が等しくなった状態となり、それ以降の間隙空気の放出は間断的な形態をとると考えられる。これらの現象説明は当然下層での水分量の状態とよく対応している。

以上の例からもわかるように、wetting front が層境界に到達した直後のある時間内では、K-6・K-7 系の場合、上層は下層に対して湛水深と同様な物理的存在とはならないが、時間の経過とともにそのような存在になると考えてよいようである。

b. wetting front の層境界到達直後の浸透強度及び間隙空気圧
wetting front が層境界に到達した直後の浸透強度及び間隙空気圧の時間的変化を調べる前に、比較のために、上層が粗砂で下層が細砂の系で間隙空気が閉塞されない場合についての実験結果を説明しておく。Fig. 37 は K-6・K-7 系, $L_w=64\text{cm}$ の場合の浸透強度の時間的変化の様子を示したものである。wetting front が層境界に到達した際の変化は Fig. 27 と同様に減少割合の一時的緩和がみられ、その緩和の時間は閉塞の場合より短い。Fig. 38 はこうした場合を対象として、水分量の分布の変化と浸透強度とを対



L_u : THICKNESS OF UPPER LAYER (cm), L_l : THICKNESS OF LOWER LAYER (cm)
 P_a : PORE-AIR PRESSURE (cmAq)
 \rightarrow : $P_a - h_w + \psi_{u,e}$, $-\rightarrow$: $P_a - h_w + \psi_{l,e}$
 h_w : WATER DEPTH
 $\psi_{u,e}$: AIR ENTRY POTENTIAL (UPPER LAYER)
 $\psi_{l,e}$: AIR ENTRY POTENTIAL (LOWER LAYER)
 \bullet : SATURATED STATE \circ : UNSATURATED STATE

Fig. 36. Development of saturated zone in confined sand-layered system.

比して描いた説明図である。この場合の浸透強度は (3) 式または (4) 式で与えられるから、浸透強度が一定となっている間は砂層表面近傍の水分量は固定されることになる。Childs らは⁶⁾、このような浸透場での水の運動を Green & Ampt のモデルに置換えて、実験と解析を試みているが、その結果によると wetting front が層境界に達した際には浸透強度は一旦不連続に増大し、その後減少をたどるようになる。不飽和浸透理論による解析は極めて困難であるので、以下において Childs らと同様なモデルを設定して浸透強度について調べてみる。具体的には浸透強度を $f(t)$ とした場合、 $f(t_j) = f(t_*)$ 、 $t_* > t_j$ となるような $t_* - t_j$ の値と上層厚との関係を調べることにする。以下で使用する記号は、 L_u : 上層厚、 ϕ_f : front に働く毛管力、 x_f : 砂層表面から front までの距離であり、下付 1, 2 はそれぞれ上層及び下層におけるものを意味する。

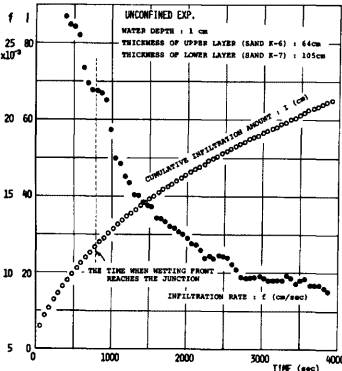


Fig. 37. Infiltration rate in unconfined K-6 · K-7 system ($L_u=64\text{cm}$).

このことは、上層厚が大きいかほど、 $f(t_j)=f(t_*)$ となるときの wetting front の位置は層境界からより下方にあることを意味している。また、 $\bar{\theta}$ を下層で wetting front が通過した部分の水分量とすると次式が成立する。

$$f_2 = \frac{x_f - \psi_2 + h_w}{\frac{L_u}{K_1} + \frac{x_f - L_u}{K_2}} = \bar{\theta} \frac{dx_f}{dt} \tag{15}$$

さて、wetting front が上層内及び下層内にあるときの浸透強度はそれぞれ、

$$f_1 = (x_f + h_w - \psi_1) / (x_f / K_1),$$

$$f_2 = (x_f + h_w - \psi_2) / \left\{ (L_u / K_1) + (x_f - L_u) / K_2 \right\} \tag{12}$$

で表わされる。よって、 $f(t_j)=f(t_*)$ を満足する $x_{f*}-L_u$ は、

$$x_{f*}-L_u = \frac{L_u(\psi_1 - \psi_2) / K_1}{\frac{L_u + h_w - \psi_1}{K_1} - \frac{L_u}{K_2}} \tag{13}$$

また、 $\psi_1 < 0, \psi_2 < 0$ であり、 $\psi_1 > \psi_2, K_1 > K_2$ であるから、結局次の関係が求められる。

$$\frac{d(x_{f*}-L_u)}{dL_u} = (\psi_1 - \psi_2) \frac{\frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{h_w - \psi_1}{L_u^2}}{\left\{ \frac{K_1}{K_2} \left(1 + \frac{h_w - \psi_1}{L_u} \right) - 1 \right\}^2} > 0 \tag{14}$$

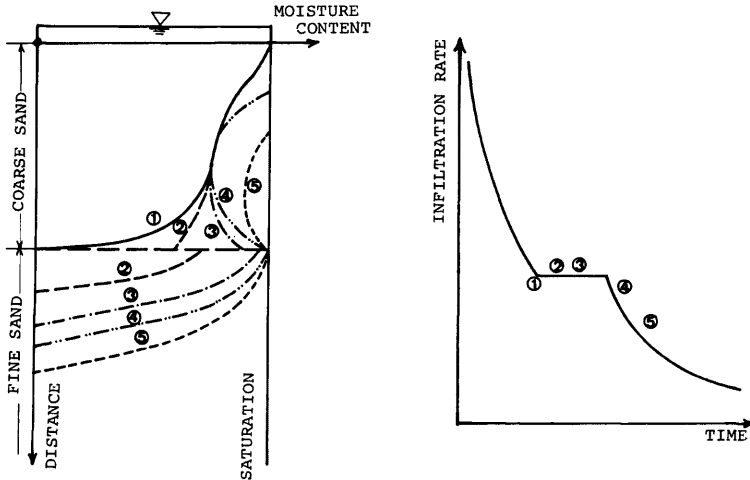


Fig. 38. Schematic figure showing relation between moisture profile and infiltration rate.

よって、

$$t_* - t_j = \theta \int_{L_u}^{x_f^*} \frac{1}{f_2} dx_f \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで、上層厚のみが異なった場合を考え、それぞれの層厚を $L_u, L'_u (L_u > L'_u)$ とする L'_u の場合、 $f(t_{j-}) \leq f(t)$ を満す wetting front の位置は、(13) 式を用いると、

$$x_f^* \leq \frac{\frac{L'_u}{K_1}(\psi_1 - \psi_2)}{\left(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1}\right) \cdot L'_u + \frac{h_w - \psi_2}{K_2}} + L'_u$$

であり、また (14) 式を用いると、次の関係がえられる。

$$(t_* - t_j) - (t'_* - t'_j) = \int_{L_u}^{x_f^*} \frac{1}{f} dx_f - \int_{L'_u}^{x_f^*} \frac{1}{f'} dx'_f > \int_{L_u}^{x_f^*} \frac{1}{f} dx_f - \int_{L'_u}^{x_f^*} \frac{1}{f} dx'_f$$

さらに、 $y = x_f - L_u$ 、 $y' = x'_f - L'_u$ とおくと、 $y = y'$ の場合には、

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} - \frac{1}{f'} &= \frac{L_u - L'_u}{(L'_u + y - \psi_2 + h_w)(L_u + y - \psi_2 + h_w)} \left\{ \frac{-\psi_2 + h_w}{K_1} + y \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \right\} \\ &> \frac{L_u - L'_u}{(L'_u + y - \psi_2 + h_w)(L_u + y - \psi_2 + h_w)} \left\{ \frac{-\psi_2 + h_w}{K_1} + (x_f^* - L'_u) \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \right\} \end{aligned}$$

しかるに、

$$\frac{h_w - \psi_1}{K_1} + (x_f^* - L'_u) \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) = \frac{\frac{(\psi_1 - h_w)(\psi_2 - h_w)}{K_2} + L'_u(h_w - \psi_1) \left(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right)}{K_1 \left\{ \left(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) L'_u + \frac{h_w - \psi_1}{K_2} \right\}} > 0$$

である。よって、いま考えている $(1/f) - (1/f')$ の値は正となり、結局次の関係をうる。

$$t_* - t_j > t'_* - t'_j$$

このことは、wetting front が層境界を通過した後、上層が大きいほど浸透強度が $f(t) \geq f(t_{j-})$ 、 $t_* \geq t_j$ を満す時間が長いことを意味する。また、実際の wetting front は Green & Ampt のモデルのようではなくある幅をもっているなど、このモデルに含まれる仮定を考慮すると、実際の減少はこのモデルから誘導されるように浸透強度は不連続とはならず、むしろ減少割合が緩和される形態をとると考えられるのである。

さて、間隙空気が閉塞される場合は、上述のような取扱いは少なくとも現段階では困難であるので、以下現象論的な説明を試みることにする。上層での小さな毛管力等を受けて伝播したき wetting front が層境界に達すると、下層での大きな毛管力を受けて一時的に加速されるような状態になるので、浸透強度の減少の割合が緩和される(実験結果①)と考えられる。ただし、K-5・K-7系では浸透強度が若干増大しているが、これは両層の著しい粒径差のためであろう。K-6・K-7系の場合、上記の緩和によって浸透強度がほぼ一定となることは、間隙空気の放出を連続的と仮定すると浸透強度が $\left| -K \frac{\partial \psi}{\partial x} + K \left(1 - \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \right) \right|_{\text{atsurface}}$ で表わされるので、概略的には、砂層表面近傍での水分量の分布が変化せず、また $\partial p_a / \partial x$ の変化の浸透強度への影響が二次的なものであると考えるとよいだろう。しかし、間隙空気の放出速度 v_a はほぼ $-K_a \cdot \partial p_a / \partial x$ で表わされるから、 v_a に対しては $\partial p_a / \partial x$ の変化が直接的に影響することとなる。

wetting front が層境界に到達した直後の砂層表面からの浸透水については、上述のようにかなりの水が下層の方へ供給される形になっているので、内部の間隙空気圧が小さい領域と考えられる上層の上部の水分量の変化が比較的少なく、そのためにその場の大きさや各種の抵抗等の変化が小さくなっていることが想像される。ここで、wetting front が層境界に到達した直後のある時間を対象として、(7) 式を $f = \text{const.}$ として時間微分をとると、 $dv_a/dt = \text{const.} \cdot d^2 p_a / dt^2$ となる。ここで、 $\text{const.} > 0$ であり、また p_a は増大方向に

あるので、 $|d(\partial p_a/\partial x)/dt|_{\text{at surface}} > 0$ 。よって、 $dv_a/dt < 0$ 、すなわち、 $d^2 p_a/dt^2 < 0$ となる。このことは間隙空気圧の増加の割合の一時的な緩和（実験結果②）を意味する。ところで、この空気圧の緩和時間の間でも、上層での水分量は増大しつつあるので、次第に $|\partial p_a/\partial x|_{\text{at surface}}$ が減少する。よって、浸透強度がほぼ一定値を保っている区間にも拘らず、間隙空気圧は徐々に増加の方向に向うものと考えられるのである。

5. むすび

本文は、2層砂層での浸透現象における間隙空気役割について実験的研究を行った報告であり、えられた成果を要約するとつぎのようである。

まず、上層が細砂で下層が粗砂の場合については、

(1) wetting front が層境界に到達した際の浸透強度は、間隙空气が閉塞されない場合は、両層の粒径差が小さいときは急激な減少後一定値となるが、粒径差が大きいと急減後若干の増加をして一定値となり、間隙空气が閉塞される場合にも、同様な急減後一定値に向うが、その値は可变的である。

同様な状態での水分量は、間隙空气が閉塞される、されなないに関係なく、上層内において急激に増加する。

同様な状態での間隙空气圧も急増するが、その程度は粒径差が大きいほど、また上層厚が大きいほど著しい。

(2) 下層での流れ状態は、上下層の粒径差が大きく、間隙空气が閉塞されないと部分的な飽和流となるが、空气が閉塞される場合には全面的な飽和流となることもある。粒径差が小さいといずれの場合にも全面的な飽和流となる。

(3) 間隙空气が閉塞された場合の空气圧は一定値 $L_u + h_w - \psi_{u,e}$ よりは大きくならない。すなわち、上層における飽和領域は層全体にまでは発達しない。

つぎに、上層が粗砂で下層が細砂の場合については、

(4) 間隙空气が閉塞された場合に、wetting front が層境界に到達したとき、浸透強度は、両層の粒径差が小さいと減少割合が緩和されてほぼ一定値を保った後再び減少するが、その保持時間の長さは上層厚が大きいほど長く、また空气閉塞を伴わない場合より長い。両者の粒径差が大きい場合で、空气閉塞を伴わないときには、一定値となる現象は認められなかったが、閉塞を伴うときには一定値というよりやや増加する現象が認められた。

同様な状態のときの間隙空气圧は、粒径差が小さいときには一旦増加割合が減少したのち浸透強度の減少とともに急増する。一方、粒径差が大きいときには緩和的現象は起らず直ちに急上昇することが認められた。

(5) 上層内における飽和領域は砂層表面からのみならず層境界より上方にも発達する可能性が認められたが、さらに wetting front が下方に進むに従って上層は下層に対して湛水深と同じような影響をもつようになる。

以上のように、2層砂層における浸透現象がいかなるものかをほぼ実験的に把握できたと考えている。今後の課題はこのような現象が何故起るかを理論的に解明することであり、そうした方向の研究を今後行っていくつもりである。最後に、実験及びその整理に協力していただいた、京大大学院生、古谷博司君と事務官、杉村寿子嬢に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Philip, J.R.: The theory of infiltration: 2. The profile of infinity, Soil Sci., Vol. 83, 1957, pp. 257-264.
- 2) Hill, D.E. and J.Y. Parlange: Wetting front instability in layered soils, Soil Sci. Soc.

- Amer. Proc., Vol. 36, 1972, pp. 697-702.
- 3) Philip, J.R.: Stability analysis of infiltration, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 39, 1975, pp. 1049-1053.
 - 4) Philip, J.R.: Sorption and infiltration in heterogeneous media, Australian J. Soil Res., Vol. 5, 1967, pp. 1-10.
 - 5) 石原安雄, 下島栄一: 閉塞単一砂層への雨水浸透に関する研究, 京大防災研年報, 第19号 B, 1976, pp. 99-122.
 - 6) Childs, E.C. and M. Bydordi: The vertical movement in stratified porous material: 1. Infiltration, Water Reso. Res., Vol. 5, 1969, pp. 446-459.