

砂柱における鉛直浸透の機構に関する研究

A STUDY ON MECHANISM OF VERTICAL INFILTRATION

高木 不折*・馬場 洋二**

By Fusetsu Takagi and Yoji Baba

1. 緒 言

河川流域に降った雨水は、地表付近を流れて流出する直接流出（表面流出と中間流出）成分と地下を流れて流出する間接流出（地下水流出）成分との供給源であることはいうまでもないが、雨水のうちのどれだけのものが間接流出の供給源となるかを決めるのが浸透現象である。また雨水の浸透は山腹斜面の崩壊にも重要な役割を果たすものと考えられる。したがって、雨水の鉛直浸透機構は、水の水文学的循環とそれにともなる諸現象を正しく理解するうえの1つの重要な要素であるが、この現象は土砂の間げきに水と空気とが共存する不飽和で、かつ鉛直方向の透水現象である。

さて、浸透に関する理論的研究はかなり古くから行なわれており、J.R. Philip によってほぼ完成されたといえよう。これらの研究においては、土砂の表面が常に浅い湛水でおおわれており、しかも間げき空気はきわめて容易に浸透した水と置換される場合を対象として、Darcy 則と同じ意味における断面平均的な取扱いを行なっている。しかしながら、実際の土砂層の下部には基岩があったり地下水面が存在したりしているので、浸透の進行によって土砂の飽和度が增大する際には、土砂の間げきに存在している空気は圧縮されるか、あるいは水と置換されなければならない。また置換されるとすれば、それは土砂の表面を通じてのみ可能である。このように考えると、実際の浸透現象は Philip らの研究結果とはかなり異なった性状を示すことが予想されるが、事実われわれが浸透現象の総括的特質を調べた研究³⁾において若干の特異な現象を見出している。

上述したような観点から浸透現象を考察するためには、Philip らの取扱いは異なって、かなり微視的な取扱いが要求される。本文はこうした意味において前論文に引続いて行なった研究結果をとりまとめたものであって、間げき空気の圧縮、水と空気との置換、雨滴状で水を供給したときの湛水の発生などの問題を考究したものである。

2. 従 来 の 研 究

近年、浸透現象を微視的に検討し、とくに間げき空気

が果たす役割に関する研究が発表されている。これらのうち本研究ととくに関連の深いものについて若干の考察を加えよう。

(1) Wilson と Luthin の研究³⁾

Wilson および Luthin は浸透におよぼす間げき空気の影響を明らかにするために、水平砂柱について間げき空気の動きを自由にした場合、および一部妨げた場合の浸透実験を行なった。その結果、空気の運動が自由な場合には浸透に際して排除される間げき空気の体積と浸入水量とはほとんど等しいが、わずかに前者の方が大きいことを観察している。この両者の差異が浸透の初期に最も大きいことに着目して、これは浸透に際して起こる温度上昇に起因すると説明した。

これに対して、空気の動きが一部妨げられている際には、逆に排除される空気の体積の方が浸入水量よりも少ないが、浸透が続行してある程度の時間経つと累加量は両者がほぼ等しくなっている。これは、初期では内部空気圧が大気圧と等しくて空気の流動が少ないが、浸透が進むと間げき空気圧が増大し、したがって空気の排除される割合が増えるためであると説明されている。そして、やがて排除される空気の量と浸入水量とが等しい圧力状態が形成され、このときに間げき空気圧が最大になると考えた。

また、浸透水量から砂柱内の飽和度を推定し、飽和度は浸透の方向に向かって徐々に減少するという結果をえた。これは浸透の進行にしたがって間げき空気圧が増加するためであるとしているが、浸潤前線より後方では大きい間げきの水が排除され、水の主流とは逆方向に空気の流れが生じて含水状態が変化することを示唆しており、微視的な立場からの検討として興味深いものがある。

しかし、この研究は水平砂柱に関するものであって、浸透に際して間げき空気が砂柱の上部に留まり、所定の空気圧が測定されているかどうか疑問があり、空気の流動の様子も鉛直浸透におけるものとはかなり趣きを異にしているであろう。また、大きい間げきを通った空気の排除、水と空気との置換の機構については何ら触れていない。

(2) Youngs と Peck の研究⁴⁾

この研究は水平砂柱および鉛直砂柱における空気圧と含水量の変化過程に関するもので、従来の拡散方程式と Boyle の法則とを基礎とした検討を行なっている。とく

* 正会員 工修 名古屋大学助教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 建設省土木研究所

に本研究と関係が深く興味深いのは鉛直浸透に関するものである。すなわち、有孔体内のメニスカスが破られて空気が逃げはじめる場合の圧力 air entry value と、再びメニスカスが形成されて空気が間げきに閉塞される場合の圧力 air exit value について論じ、空気が逃げ始める際の間げき空気圧は air entry value と飽和帯の最低部における水圧との和に等しいと述べている。また間げき空気圧の増加によって飽和度の大きい部分の毛管ポテンシャルが減少すること、累加浸透水量の時間的変化、含水量の分布状況、砂柱の長さによる諸性質の違いなどについても実験的に検討を加えている。

しかし、砂表面が浅い湛水状態にある場合を対象としているとともに、解析における諸仮定にも問題があり、さらに、空気の閉塞・圧縮および水との置換の機構については触れていない。

3. 鉛直浸透における 2, 3 の特性

以上の研究結果からもわかるように、雨水は間げき空気と置換されることによって土湿不足を補ないながら土砂中を鉛直に下降し、十分時間が経てばある落ち付いた状態になるのである。この間に間げき空気の閉塞・圧縮・雨水との置換、湛水の生成などが起こるわけで、これらがどのような条件のときに起こるかを調べることはきわめて重要であるといわねばならない。著者らは前論文²⁾においても、こうした問題について若干の検討を行っているので、重複はするが説明の都合上本研究と直接関係のある事柄について略記するとつぎのようである。

i) 降雨状態で水を供給したときに砂表面に湛水が現われるには一定限度以上の降雨強度でなければならない。

ii) 表面湛水を生じないときには、表面付近を除くと深さ方向に間げき空気圧・含水比のほぼ等しい様な包気帯が形成されている。

iii) 湛水を生ずる場合には、まず浸透の初期に間げき空気が閉塞圧縮されるが、やがて土砂表面を通して水と空気との置換が起こり盛んに泡が発生する。こうした過程をくり返しながらかん水状態に達するが、湛水が生ずると間げき空気の圧力はほぼ一定となるようである。

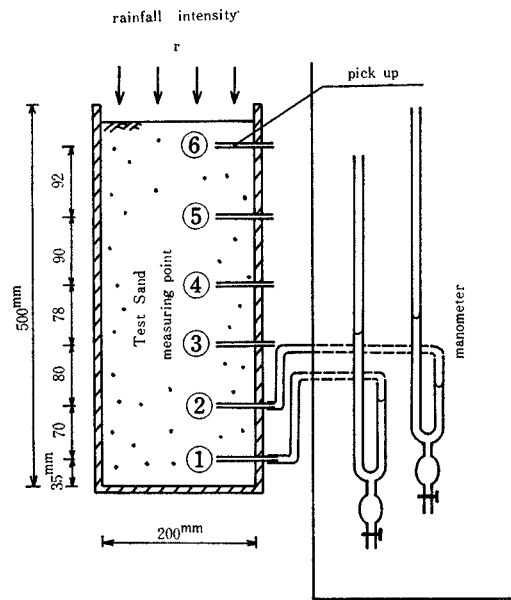
iv) 空気と水との置換は浸透初期にとくに多いが、間げき空気がある程度閉塞・圧縮されたのちは間歇的に起こる。

このように、間げき空気の挙動が浸透現象にかなり影響することが明らかである。そこでそれらをさらに詳細に調べるためにつぎの実験を行なった。

(1) 実験装置と実験方法(実験 I)

実験には Fig. 1 に示す装置を用いたが、主として間げき空気の挙動に着目しているため、地下水面および毛管水帯を作らないで、試料砂を詰めた円筒の底に不透水

Fig. 1 Experimental Apparatus I.



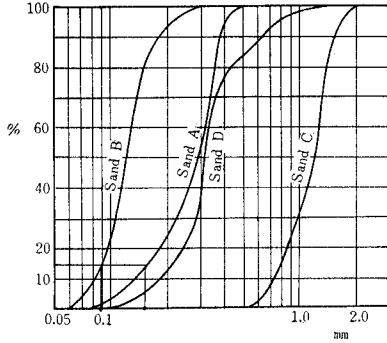
性板を置いて下部から空気が逃げないようにした。間げき空気圧の測定はきわめてむずかしくて今日信頼できる測定方法はないようである。ここでは間げき空気圧の概略の値を調べ、その変動特性を観察するために、内径 4 mm のパイプの先端を金網でおおったものを用い、これをU字管マンノメーターに導いて測定したのである。したがって、浸潤前線が測点に達したのちでは測定値の信頼度はあまりよくない。しかし、浸潤前線が測点に達するまでの誤差は小さくて、真の圧力が測定されていると考えてよい。浸潤前線の進行は側面より観察し、浸透流量は供給水量と装置の上縁より越流する量との差として求めたが、砂表面から装置の上縁までを 1 cm としたので、最大湛水深は約 1 cm である。この実験に使用した砂は Table 1 および Fig. 2 の A 砂と B 砂である。

実験では砂柱の上部よりスプレーノズルを用い、降雨状態で一定強度の水を供給・浸透させたが、その場所的分布状況は一様であると考えてよい。また雨滴の大きさは実際の降雨にみられるものより若干小さいが、この実験に差し支えるほど小さいものではない。かなり粗い砂を用いているので、降雨強度を非常に大きくしないと湛水を生じなかったが、このように大きな降雨強度で実験を行なったのは、とくに湛水発生前後の諸現象を調べるた

Table 1 Physical Properties of Test Sand

test sand	diameter in mm d_{10} d_{60}	coefficient of permeability in cm/sec (in mm/h)	porosity	capillary rise in cm
A	0.14 0.34	0.15 (5400)	0.47	19.2
B	0.08 0.13	0.88×10^{-2} (317)	0.53	66.2 for 4 days
C	0.76 1.30	1.01 (364000)	—	—
D	0.19 0.35	0.24 (8640)	—	—

Fig. 2 Accumulation Curves of Test Sands.

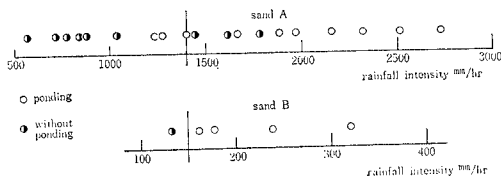


めである。湛水発生前後の降雨強度は砂柱の透水係数と深い関係にあるといわれている。ここで用いた A・B 砂の透水係数は $1.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$, $0.88 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ であるが、現地における砂柱の透水係数は、一般にこれらの値の 1/10 あるいはそれ以下であろう。また実際には、10 分間では強度にして 150 mm/hr 以上の降雨の降る可能性は十分あるわけで⁵⁾、この降雨は A 砂に対しては、ほぼ 1500 mm/hr といった大きな降雨強度に対応するであろう。通水開始と同時にマンメーターにあらわれる圧力の変動を写真撮影し、浸潤前線の進行状況・湛水状態などの観察・測定をも行なった。時間原点はすべて通水開始時である。

(2) 湛水の発生

この実験の場合には、下部に不透水性板があるので、浸透度が弱いときは、砂柱内の間げきは下方より順次飽和され、やがて砂表面に湛水が生ずる。しかし、条件によっては浸潤前線が砂柱下端に到達する以前に湛水が発生した。Fig. 3 は浸潤前線が砂柱下端に達する以前に

Fig. 3 The Criterion of Ponding of Water on Sand Surface.

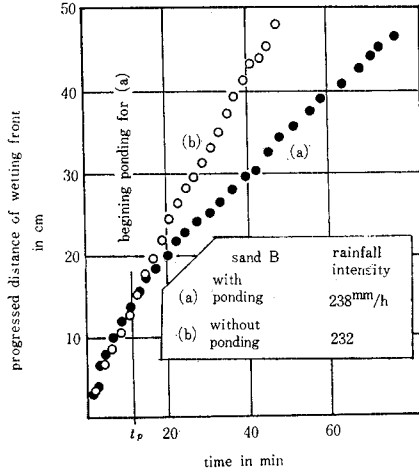


砂表面に湛水が発生したか否かを調べたものである。この図から一般に降雨強度が大きいと湛水し、小さいと湛水が生じていないことがわかる。この湛水を生ずる限界の降雨強度は A 砂で 1400 mm/hr, B 砂で 150 mm/hr 程度と考えられるが、A 砂で 1240 mm/hr でも湛水が起こっている場合があり、一方、1790 mm/hr でも湛水していない場合もあって、その限界は必ずしも明確ではなく、限界の降雨強度の付近ではいずれの場合も起こっている。

(3) 浸潤前線の進行

浸潤前線の進行距離と時間の関係を示したのが Fig. 4 である。一般に浸潤前線の進行速度は降雨強度が大きい

Fig. 4 The Progressed Distance of Wetting Front.

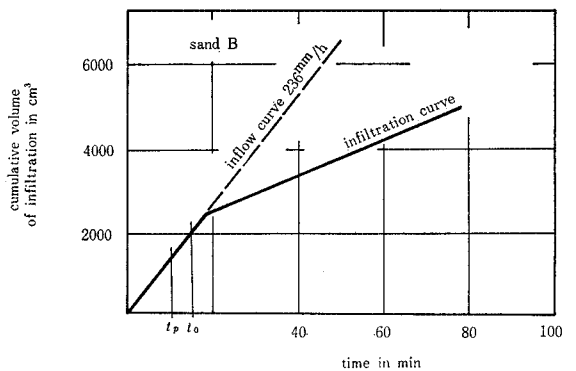


方が大で、湛水が生じるまではほぼ一定であった。しかし、Fig. 4 の (a) 曲線から明らかとなり、湛水が生じる時刻 t_p の前後で急に遅くなり、湛水発生以前と以後とはかなり浸透状況が変化していることがうかがわれる。

(4) 浸透流量

Fig. 5 は浸透流量の時間的変化の様子を示したものであって、図では累加水量として表わしてある。砂表面に湛水が生じてから、装置上縁より越流が始まった時刻 t_0 までの浸透流量は明らかではないが、湛水が発生すると浸透流量が急減していることがわかる。

Fig. 5 Accumulated Volume of Infiltrated Water.

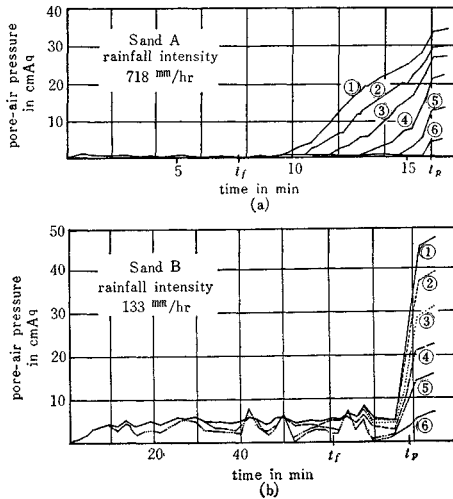


(5) 間げき空気圧

浸透の進行とともに砂柱内にあった空気は水と置換されるが、やがて間げき内に閉塞・圧縮されると間げき空気圧が上昇する。本実験で測定された各測点での間げき空気圧の変化過程の例を Fig. 6 および Fig. 7 に示した。図中 t_p は表面湛水の発生時刻、 t_f は浸潤前線が砂柱下端に到達した時刻であって、Fig. 7 には各測点への浸潤前線の到着を・印で示してある。

Fig. 6 は降雨強度が小さくて、浸潤前線が砂柱下端に達するまでには湛水が起こらなかった場合のもので、

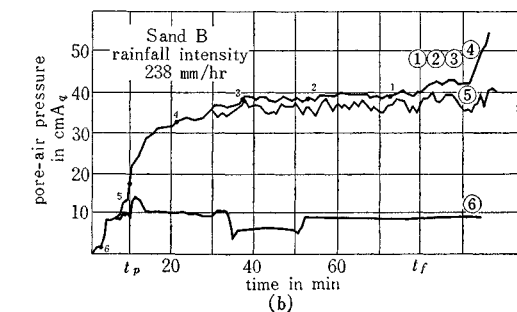
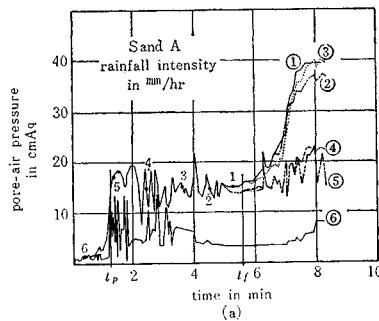
Fig. 6 The Pore-air Pressure in Bounded Sand Column without Ponding (after Experiment I)



浸透開始後間げき空気圧は徐々に上昇して、ほぼ1分前後で1つのピークに達し、それ以降は各測点とも若干変動はしているが、ほぼ一様でかつ小さい一定の圧力を示している。やがて浸潤前線が砂層の下端に達し、飽和水帯が下部より発生すると下部の測点より順次静水圧に相当する圧力となってくる。

これに対して、浸潤前線が砂柱の下端に達するまでに砂表面に湛水を生じたときは、Fig. 7 にみられるように浸透開始直後より間げき空気圧は上昇をはじめ 2~5 cmAq* の圧

Fig. 7 The Pore-air Pressure in Bounded Sand Column with Ponding (after Experiment I)



* cmAq: 圧力は水柱の高さ (cm) で表わした。

が、この変動は、後述するように、砂表面から空気が間歇的に抜けているためと、浸潤前線近傍での空気と水との置換によるものである。いずれにしても、表面に湛水を生じた場合には、ある程度の圧力状態が維持され、その平均圧力の近傍で変動をしている。なお、Fig. 7 で長時間後に各測点の圧力曲線が分離しているのも Fig. 6 の場合と同じ理由による。

ところで、上述した間げき空気圧の変動範囲を降雨強度に対して図示すると Fig. 8 のようになる。この図は多くの実験結果をまとめたもので、(a) 図は湛水が生じなかった場合、(b) 図は湛水が生じた場合である。(a) 図をみると間げき空気圧は 6 cmAq 程度以下になっており、○印で示した平均値としては 2~4 cmAq であるが、一方、間げき空気圧が非常に小さくてほとんど大気圧と等しい場合もある。粒径の細かい B 砂に関する資料は少ないが、B 砂ではほぼ 4 cmAq 前後であって、最大の場合には 8 cmAq 程度に達することもあった。いずれにしても、このように降雨強度が小さくて砂表面に湛水を生じない場合には間げき空気はあまり圧縮されていないことがわかる。とくに砂が粗い場合には間げき空気圧はきわめて小さく、水と空気との置換は砂表面から下部まである程度円滑に行なわれていることがうかがわれる。

一方、(b) 図は湛水が発生してからの圧力の変動範囲

Fig. 8 The Relation between the Pore-air Pressure and the Intensity of Rainfall

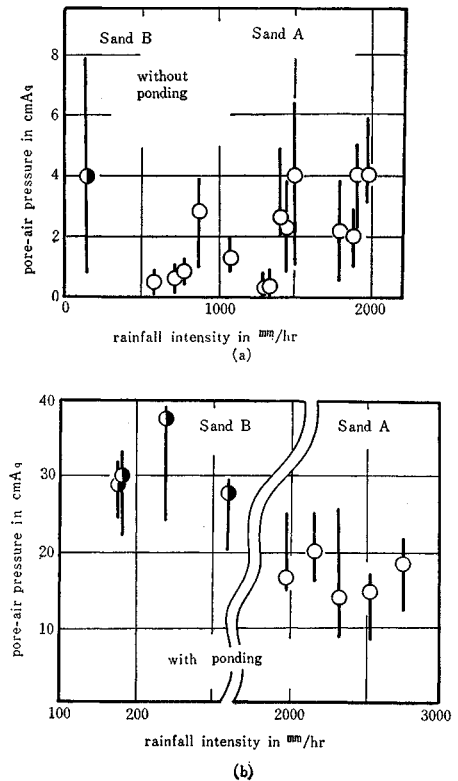
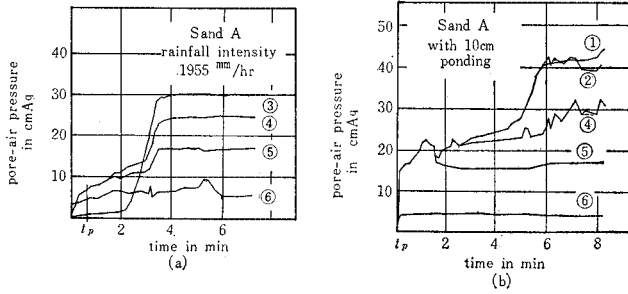


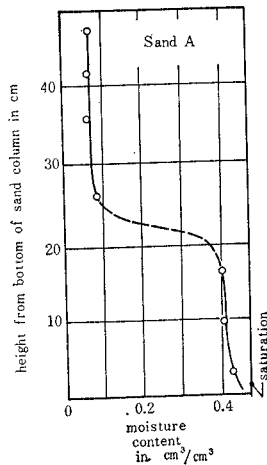
Fig. 9 The Pore-air Pressure in Bounded Sand Column with Initial Moisture Content (a) and with 10 cm-depth Ponding (b)



を示したもので、ある程度の圧力に達したのちの圧力の平均的な値を丸印で示した。図から湛水下では間げき空気圧はA砂で 15~20 cmAq, B砂で 29~38 cmAq 程度であることがわかる。なお、この平均値付近での圧力の変動状況はいずれの場合も **Fig. 7** の例と同様である。このように湛水が生じた場合には空気が間げきに閉塞・圧縮されていることを示しており、また圧力にみられる複雑な変動は水と空気との置換が連続的ではなくて間歇的に起こっていることを示している。

つぎに比較のために初期条件と境界条件を変えて行なった実験について触れておこう。**Fig. 9 (a)** はA砂を一度飽和させたのち2日間放置して自由排水をしてから底部を閉じて同様の実験を行なった例である。初期の含水比の分布は **Fig. 10** に示した。この場合には湛水時の間げき空気圧は 8~15 cmAq 程度であって、**Fig. 7** および **Fig. 8 (b)** の場合とくらべるとかなり小さくなっている。これは気乾砂ではないので圧力測定値の精度が悪いことにもよろうが、くわしいことはわからない。しかし、圧力は時間的に速く形成されているが、その形成過程は気乾砂の場合と定性的によく似ている。圧力が速く形成されるのは、初期含水比が大きいため不飽和と透水係数が大きく、浸透速度が大きいことに起因するものと思われる。

Fig. 10 The Distribution of Initial Moisture Content in Sand Column Corresponding to Fig. 9 (a)



また、**Fig. 9 (b)** は気乾砂で砂表面に 10 cm の深さの定常的な湛水を起こさせた場合である。この場合には、間げき空気圧は約 25~30 cm となっていて、**Fig. 7** の場合とくらべ湛水深に相当する程度圧力が高くなっている。

(6) 砂柱内の飽和度

透水時に砂柱内の飽和度がどのように分布しているかは興味ある問題である。ここでは飽和度を砂柱内に置かれた電極間のインピーダンスの変化として測定したが、その誤差は約 20% 以内である。この場合、前述の実験装置では小さすぎるので他の装置を用いた。すなわち、砂を詰めた直径 41 cm, 長さ 3 m の鋼管の上端より降雨状で水を供給した場合であって、試料砂は **Table 1, Fig. 2** の C 砂と D 砂である。ただし、この砂柱の下端は

貯水槽に入っていて、下部に地下水面と毛管水帯とがあり、測定は給水開始後十分の時間を経て砂柱内の状態が一定になってから行なった。

Fig. 11 The Final Distribution of Moisture Content in the Sand Column

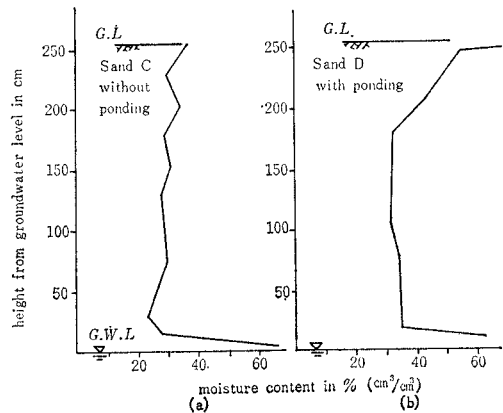


Fig. 11 の (a) および (b) 図は、それぞれC砂で湛水のない場合とD砂で定常的な湛水を生じている場合の飽和度分布の例である。湛水のない場合には地下水面のごく近傍を除くと飽和度はほとんど一定であって20~40%の値となっている。一方、湛水を生じた場合には、砂表面よりある深さまでの領域では飽和度が非常に大きい、その下方の砂柱中央部ではあまり大きくなくZ方向でほぼ一定である。

これらの場合の内部圧力の変化過程は、(a) 図の場合は **Fig. 6**, (b) 図では **Fig. 7** の場合と定性的に全く同様であって、湛水を生じないときには砂柱内にほぼ一様な包気帯が形成され、湛水を生ずると砂柱中央部にはかなりの空気が閉塞・圧縮され、一定圧力で圧力勾配がなく、飽和度もほぼ等しい中間包気帯が形成されていることがわかる。湛水時にはこの中間包気帯と砂表面の間に飽和度の高い遷移領域が形成されているのである。

4. 間げき空気の閉塞機構に関する実験

前節においては鉛直浸透に際して実験的に観察されたいくつかの特性について述べたのであるが、これら特異

な現象の多くはほとんど同じ時期に現われている。たとえば、Fig. 7 において間げき空気の圧力が急に上昇し始めたときに砂表面に湛水が起こり、さらにそのとき浸潤前線の降下速度が遅くなって浸透水量も減少している。また、表面付近の含水比は上部ほど大きいということも Fig. 11 より明らかである。こうした変化を生ずる原因がどこにあるかという問題は、気相・液相・固相の3相共存の下で、かつ大気にさらされている上面から雨滴状で水が供給されるというきわめて複雑な条件での現象を究明することによって、はじめて明らかにされるであろう。

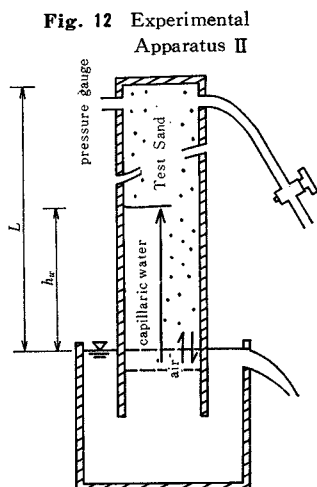
間げきの空気と水との置換がどのような機構によって行なわれるかを調べることによって、上述の現象を究明するための手がかりがえられるものと考えて、つぎのような実験を行なった。

(1) 実験装置および実験方法 (実験 II)

普通の浸透現象では、間げき空気は水の浸透方向とは逆に上方に向かって移動し、土砂の表面から大気中に放出される。このような場合には、表面付近の飽和度の高い層内では多少なりとも静水圧的水圧が存在し、そのうえ気泡に浮力が作用するとも考えられるので、こうした影響を除くためにつぎの方法によって水と空気の置換に関する実験を行なった。

すなわち、Fig. 12 に示すように一端を閉じたプラスチック製パイプを用い、閉端に2本のビニールチューブを取付け、その1本を50 cmAq まで測定できるダイヤフラム式圧力計に、他の1本を空気の出し入れのためのコックに接続した。砂は閉端より約5 cmAq のところまで詰めたうえで金網を張ってパイプを逆さにしても砂が落ちないようにした。このように閉端に余裕を残したのは、後述するように、時として水と置換し金網を通して出た空気が他に逃げないようにするためである。

まず、上述の方法によって気乾状態の砂を詰めたパイプを開端を下にして水中にたて、ついで閉端に取付けたコックを開き空気が自由に入出入りできるようにした状態でパイプをゆっくりと水中に沈める。金網が水面に接して砂柱に水がわずかに上昇したときに上部のコックを閉じるとともに、パイプをそのままの位置に保持させて実験を開始した。このように



すると毛管力によって水が砂柱に吸い上げられるにつれて、砂柱の間げきに存在する空気は閉塞圧縮され、圧力計にその圧力の時間的変化が記録される。このときの毛管上昇高 h_w の測定はパイプの側面から観察した。

さて、毛管上昇高 h_w が大きくなり、内部の空気圧がある大きさに達すると、上部に閉塞されていた空気の一部が水面近くの含水量の増大した砂層を突き破って、急激に下方に抜け出す場合のあることが観察された。このとき抜け出した空気は金網下のパイプの中に留まり、砂柱内の空気圧は激減する。このような状態になると、砂面と水との接触が絶たれるので、毛管上昇は進行しなくなる。このような場合には、上部の空気抜コックをゆっくりと開いて空気をわずかに抜くと、金網下の空気も外部の水圧によって砂柱を通して上部に移動する。このとき、パイプ内の水面がちょうど金網、すなわち砂の下面と接したときにコックを閉じて第2回目の実験を始めるようにした。

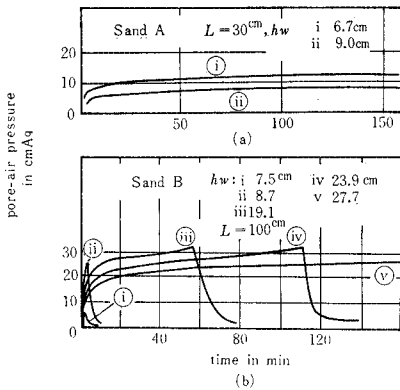
このように、自然状態の毛管上昇によって砂柱内の空気を圧縮させて圧力を増大させるという実験方法をとった理由は、浸透現象のときも毛管力による水の浸透が間げき空気の圧縮に対して主要な原因であると考えたためである。上部を開放して十分に毛管上昇を起こさせたのち、上部を閉じ人工的に圧力をかけて、毛管水帯を突き破って空気が下部に放出される限界の圧力を求めるという実験方法も考えられるが、どのような時間的変化で圧力をかけたらよいか問題であり、また、毛管上昇高が大きい場合から次第に小さい場合へ移行するので浸透の場合とは逆であって、しかもそのときの毛管上昇高の変化が観察しにくい。以上の理由によって、上述の実験方法をとったのである。

実験に使用した砂は Table 1, Fig. 2 に示した A 砂および B 砂であって、パイプは A 砂に対して $L=15$ cm および 30 cm, B 砂に対して 50 cm および 100 cm の長さのものを使用した。いろいろの長さのパイプを使用したのは、毛管上昇高とそれによって起こる空気の圧縮の程度との関係を変えるためである。

(2) 実験結果とその考察

Fig. 13 は間げき空気の圧力の時間的変化を示した一例である。(a) 図の長さ 30 cm のパイプを用いた A 砂の場合には、はじめの約 16 分間に約 12 cmAq の圧力に達するが、その後は曲線 i で示されるようにほとんど一定値のままになって、空気は下方へ放出されなかった。そこで、155 分後に上部のコックを開いて間げき空気の圧力を大気圧としたのち、再びコックを閉じるとその後は曲線 ii に示される変化をたどった。曲線 i と曲線 ii とはほぼ同じような変化を示しているが、一定圧力となるまでの時間は曲線 ii の場合が長く一定圧力の大きさは曲線 i の場合が大きい。なお図中の h_w は一定圧力にな

Fig. 13 Variation of the Pore-air Pressure due to the Capillary Rise (after Experiment II)



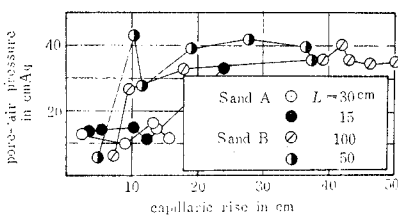
ったときの毛管上昇高を示している。

(b) 図は B 砂の場合であって、毛管上昇によって間げき空気の圧力がある程度大きくなると、毛管水帯を通して上部の間げき空気の一部が下方に押し出されて砂柱の下部に留り、砂柱と水面との連絡が絶たれる。この場合には前述した方法によって下部に留った空気を抜いてつぎの実験を行なったのであるが、図の i, ii, iii……の曲線はその順序にしたがって描いた圧力・時間曲線である。i の場合、すなわち、はじめて空気が押し出されときの最高圧力は第 2 回目以降のものにくらべて小さく、また早い時間で生じている。第 2 回目、第 3 回目……と最高圧力を生じる時間が長くなっているが、空気が押し出されときの最高圧力の値はほぼ一定値に近づいているようにみえる。

このような一定圧力、または最高圧力をそのときの毛管上昇高を横軸として示したものが Fig. 14 である。図中 B 砂に対するものは空気が押し出された場合、A 砂に対するものは空気が押し出されずに一定圧力を示した場合であり、右方向に第 1 回目、第 2 回目……の順序である。

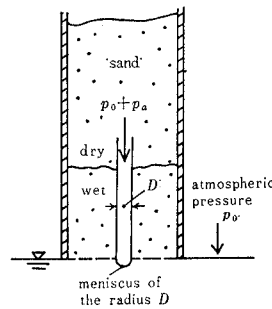
つぎに、間げき空気が圧力の上昇によって毛管水帯を突き破って下部に押し出される機構について考察しよう。毛管水帯の微視的構造を考えると、砂の間げきにはいろいろの大きさのものが存在し、それぞれの間げきでは違った大きさの毛管力が働いているはずである。いま

Fig. 14 The Limiting Pore-air Pressure, at which the Pore-air Leaves from the Test Sand



の場合には砂柱の上端が閉じられており、しかも気乾状態の砂が詰められているので、毛管水帯より上部の砂間げきの空気圧は常に一樣であると考えてよい。一方、毛管上昇中に上部の間げき空気を圧縮しようとする平均圧力は砂間げき直径に逆比例するので、小さい間げきのところでは上層の間げき空気圧に抗して毛管上昇が続く。これに対して、大きな間げきでは、はじめは毛管上昇が起こるが、ある程度時間が経過すると小さい間げきを通して上昇してくる水によって上層の間げき空気圧が増大するために、毛管上昇がおさえられるばかりでなく、かえって下降をはじめようになると考えられる。もし、大きな間げきのところが下方の水面まで続いていると、こうした下降はやがて水面のところまで達するが、ここにはもはや砂が存在しないので、さらに下降が続くような高い間げき空気圧が発生すれば、その間げきを通して間げき空気の一部が押し出されることになる。ここで注意すべきことは、このように間げき空気が押し出されるためには、大きな間げきがただ 1 つ存在すれば十分であるということである。

Fig. 15 Schematic Representation of the Pore-Space



いま、間げき空気が押し出される機構を上述のように考えると、押し出される瞬間にはメニスカスが水面近くに来ているはずである。こうした場合の限界の条件を求めるために Fig. 15 に示したような直径 D の仮想的な毛細管を考える。毛細管の下端はちょうど水面に接しているわけで、大

$$p_0 + p_a = p_0 + \pi T D / \pi \left(\frac{D}{4}\right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

よって

$$p_a = 4 T / D \text{ または } D = 4 T / p_a \dots\dots\dots (2)$$

がえられる。ここに表面張力の作用方向は鉛直上向きであると仮定している。式 (2) は間げき空気が押し出されときの条件を示す式である。Fig. 14 の B 砂の場合には $p_a \approx 35 \text{ cmAq}$ であるから、水温を 10°C (実験中は $5^\circ\sim 13^\circ\text{C}$) として表面張力 T に 74.11 dyne/cm を用いると、式 (2) より空気が逃げる仮想的な間げきの直径は $D = 0.086 \text{ mm}$ となる。この間げきは Fig. 2 の粒徑累積曲線で 15% 粒徑に相当している。

一方、A 砂の場合には空気が押し出されるほどには内部の空気圧が上昇しなかったが、もし空気圧がもっと上昇すれば間げき空気は B 砂と同様押し出されるであら

う。いまA砂についてもB砂と同様に15%粒径が限界状態を与える間げきの大きさであると仮定すると*, Fig. 2より15%粒径は0.15mmとなり,したがって,式(2)より $p_a \approx 20 \text{ cmAq}$ となる。すなわち,前述の実験の範囲では,A砂の場合には細かい間げきがなくて,間げきの空気を20 cmAqまで圧縮するような毛管力が働かなかったと考えられる。因に, Fig. 7, Fig. 8(b)の浸透実験の結果より,表面に湛水を生じたときの間げき空気圧をみると約15~20 cmAqであって,後述する理由によって本実験の範囲内では15%粒径でもって,間げき空気が押し出される際の限界圧力をほぼ推定することができると考えてよいだろう。

5. 鉛直浸透機構に関する考察

以上,砂中の間げき空気の閉塞・圧縮とその一部が水と置換するときの機構について検討したが,こうした性質が鉛直浸透時の空気の閉塞・圧縮および水との置換などの現象とどのような関係にあるかを考察しよう。

まず, Fig. 6と Fig. 8(a)に示した表面に湛水を生じない場合,A砂では間げき空気がほとんど圧縮されず,ほぼ自由に水と置換されている場合と,わずかに圧縮されて間げき空気圧が4 cmAq前後になっているときがある。一方,B砂では最大8 cmAq,平均で4 cmAq程度の圧力まで圧縮され,その後は変動はあるがほぼ一定の圧力に保持されている。このように表面に湛水がない状態で間げき空気がある程度圧縮されるのは,粒径が細かいために表面付近に薄い水膜が形成され,これが一種のメニスカスの作用をするためであって,それを破って空気と水とが置換するのに必要な圧力(これは後述の湛水時のメニスカスを破る圧力より小さいことはいうまでもない)が約4 cmAqに相当することを暗示しているのであろう。

つぎに Fig. 7に示した表面に湛水を発生する場合には空気と水との置換の機構はつぎのように説明することができる。浸透の初期には間げき空気は容易に水と置換され,また閉塞されても間げき内の空気の容積が大きくて,少々水が浸透しても圧力はあまり増大しない。また,一般に知られているように浸透能力は比較的大である。したがって表面湛水を発生しないで,前述の Fig. 6と同様な状態を保持しながら浸透が進む。しかし,浸透が進行するにつれて浸透の割合が減少し,しかも表面付近の含水量が増大して,わずかな湛水が始まるようになる。このようにして水と空気の置換が止められると,間げき空気の容積もかなり減少しているのだから,空気の圧縮が急に進行し,圧力も急激に増大する。その結果,さらに浸透の割合が減少してますます湛水が助長されるので

* このような限界状態を与える仮想的な間げきの大きさは,砂の粒度分布の模様,間げきの連りの様子によって変わると考えられ,この仮定は必ずしも正しくない。

ある。このように間げき空気圧と湛水とが互に作用しあって空気の閉塞が進行されるが,さらに進行して間げき空気圧が大きくなると,その圧力によって大きな間げきのメニスカスが押し上げられるようになり,ちょうど前節の実験を上下逆にしたものと同じ状態が形成されるであろう。このように考えると,圧力が上昇すれば,やがて砂表面付近に形成されているメニスカスが破られ,水と空気の置換が起こるはずである。

Fig. 7および Fig. 8(b)をみると,このような状態での間げき空気の圧力は,A砂に対しては15~20 cmAq,B砂では29~38 cmAqである。この場合の湛水深は約1.0 cmであったが,A砂で湛水深を約10.0 cmAqとした場合には30 cmAqの圧力となっていた(Fig. 9(b))。したがって,湛水深に相当する圧力1 cmAqを測定された間げき空気圧から差し引くと,前節で求めた空気と水とが置換する限界圧力,すなわち,A砂で20 cmAq,B砂で35 cmAqとほぼ一致している。こうした事実と,浸透中の砂柱内はごく表面付近を除くと不飽和状態であることを考慮すると,湛水を生じたときの空気と水との置換は,前節で考究したと同じ機構によるものと考えてよいであろう。

また,湛水が生じている場合には,間げき空気の圧力は平均的にはほぼ一定の圧力を示すが,細かく観察すると平均値のまわりを2~3秒の周期で変動している。これは空気と水との置換する経路にあるメニスカスが破られる寸前で極大となり,つぎに再びメニスカスが形成される寸前で極小値を示すためと考えてよく,これらはそれぞれ,ちょうど Youngs と Peck のいう air entry value および air exit value に対応するものと思われる。

最後に,空気と水との置換の場である表面付近を除いた下方の領域について若干の考察を加えておく。Fig. 7においては浸潤前線が通過して湿潤状態にある領域での圧力はあまり大きくなっていない。これはU字管式圧力計を用いたため,その先端部に水があると正しい圧力を示さないという一般的性質によるものと考えられ,これらの圧力の絶対値は信頼することはできない。

一方,定常浸透時の Fig. 11をみると,こうした領域での含水比は深さ方向にほぼ一様である。このような領域は中間包気帯と呼ばれ,飽和度も20~40%程度であり大きくない。したがって,この領域の各間げきに存在する空気は互に連らなっており,圧力は一様であると考えてよいだろう。

以上を総合すると,鉛直浸透においては中間包気帯が存在し,そこでは圧力がほぼ一様に保たれているが,この間げき空気圧を保持しているのは中間包気帯の上部にある含水比の大きい遷移帯であって,それを通して空気と水との置換が行なわれており,さらに砂の上面に湛水

のある状態で浸透が進んでいるものと考えられる。

6. 結 論

砂柱における鉛直浸透の断面平均的な性質は Philipらの取扱い方によってある程度捉らえることができる。しかし、実際には間げき空気と水との置換・間げき空気の閉塞圧縮によって現象はかなり影響されている。本論文では、主として間げき空気と水との置換の機構について微視的な立場から実験的に検討したわけであるが、ここでえられた成果を列挙するとつぎのとおりである。

i) 雨滴状で水を供給した場合、その強度が弱いと砂表面に湛水を生じないが、ある程度以上となると湛水が起こる。従来、湛水生成如何の限界降雨は透水係数と等しい強度の降雨であるとされていたが、それは水と空気との置換がきわめて容易な理想的な場合であって、間げき空気が閉塞・圧縮される本研究の場合では、限界降雨強度は砂柱の透水係数の約 $1/3 \sim 1/2$ 程度である。

ii) 湛水が発生し始めると、浸潤前線の進行が遅くなり、したがって浸透する割合が減少し、また間げき空気圧は急増して湛水発生以前とは違った性状を示すようになる。この場合の間げき空気圧と水との置換は間歇的に起こり、間げき空気圧はある平均値 (A砂で $15 \sim 20$ cmAq, B砂で $29 \sim 38$ cmAq) のまわりで $2 \sim 3$ sec の周期で変動している。

iii) 湛水を生ずると間げき空気が閉塞・圧縮されるが、この圧力を保持するのは砂間げきに形成されるメニスカスである。浸透の進行によって内部空気がさらに圧縮されると、その圧力によって大きな間げきのメニスカスが上方に押し上げられてやがて砂表面に達し、さらにこのメニスカスが破られるような圧力になったときにメニスカスが破られて砂と水との置換が起こる。この限界の圧力は砂の粒径および粒度分布によってほぼ一定であっ

て、本実験の範囲ではB砂で約 35 cmAq であった。この圧力はほぼ 15% 粒径に相当する円管の端に形成されるメニスカスが破られる限界圧力に等しい。

iv) このような過程をくり返ししながら浸透が続くが、浸透の進行中は、下部に含水比が比較的小さく、間げき空気の圧力が大きい中間包気帯、表面付近に含水量が大きくて空気と水との置換の経路となる遷移帯が存在し、その上部に湛水があるという状態になっている。

ここにえられた成果は定性的なものであるが、浸透における間げき空気の挙動、水によるその閉塞・置換の機構をある程度明らかにすることができた。今後こうした性質を基礎として、実用的な意味の大きい浸透水量について検討してゆきたいと考えている。

終りに臨み、本研究を行なうに際し終始ご指導を賜わった京都大学工学部 石原藤次郎教授、ならびに京都大学防災研究所 石原安雄教授に深く感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) J.R. Philip: The theory of infiltration, part 1, Soil Sci., Vol. 83, part 2, Soil Sci., Vol. 83, part 3, Soil Sci., Vol. 84, part 4, Soil Sci., Vol. 84, part 5, Soil Sci., Vol. 84, part 6, Soil Sci., Vol. 85, part 7, Soil Sci., Vol. 85, 1957.
- 2) 石原安雄・高木不折・馬場洋二: 雨水の鉛直浸透に関する実験的研究, Experimental Study on Vertical Infiltration of Rain-water, 京都大学防災研究所年報, 第9号, 551 ページ, 昭和 41 年 3 月.
- 3) Lorne G. Wilson and J.N. Luthin: Effect of air flow ahead of the wetting front on infiltration, Soil Sci., Vol. 96, 1963.
- 4) E.G. Youngs and A.J. Peck: Moisture Profile Development and Air Compression during Water up take by Bounded Porous Bodies: 1, Soil Sci., Vol. 98, 2, Soil Sci., Vol. 99, 3, Soil Sci., Vol. 100, 1965.
- 4) 石黒政儀: 本邦における降雨強度式型の地域的特性について, 水道協会雑誌, 313 号, 昭和 35 年.

(1966.9.12・受付)