

1. 概説

一次元水平浸透現象は Lambe の毛管透水試験としてよく知られているが、浸潤距離と時間の関係、圧力水頭分布の時間的变化などは Hansen らによっても解析され、一定断面土柱内の圧力水頭は直線的になる。この解析法では、浸潤面前方の不飽和領域で一定の初期含水比による毛管圧力水頭が働いているとし、さらに浸潤面と境いに含水比は急変すると仮定している。このような考え方に対して、土試料の含水比がかなり高くなると、浸潤面という一種の境界面が不明確になってくるであろう。一方、排水現象を単純に浸透の逆現象とみなすと、排水に伴う境界面（浸潤面に対して排水面ともよぶべきもの）が移動して土中水が排出されると考えることになる。この場合、容易に推論されるように、境界面での含水比分布が急変するという仮定の意味が一層あいまいなものとなる。このような意味で、土試料の初期含水比を変えた場合の実験、浸透の対となる排水時における圧力水頭の変化を観察して、土中の浸透と排水の問題点を考えてみた。

2. 一次元水平浸透・排水の実験

(1) 実験装置および方法

実験装置は写真-1 に示す透水管が主体であって、内径 5.07 cm、長さ 30 cm の内筒アクリル管を 3 本連結したものである。1 本の管には 3 cm 幅の感体（金厚板）を等間隔に 5 ヶ所にアクリル管外側から巻きつけ、これに極針をつけて高周波を通して含水比の多少による誘電率と測定する（含水比測定）。この管にはさらに水頭測定のために感体と感体の中間部計 4 ヶ所にホースニプル（内径 7 mm、外径 10 mm、長さ 35 mm のネジ付小管）をとりつけた。土試料は長良川堤防土であって、均けり率 $\eta = 0.45$ 、有効径 2×10^{-3} mm、均等係数 $U_c = 72$ である。初期含水比は $w_i = 0\%$ 、 5% 、 10% の 3 種類とした。実験における境界条件は、一端は大気圧に放置されていて、圧力水頭 0 とみなす。他端は距離座標 x の原点 $x = 0$ で、浸透水の浸入口（後述の排水実験の場合には排水口）となるものであって、管の端から 5 cm 内側まで水が貯留される。土試料はこの 5 cm 区間につけられた金網から奥に充填してある。この浸透端にはパイプを通じて水タンクの水圧を作用させ、実験では 2 種類の定水圧 $h_{01} = 27.5$ cm、 $h_{02} = 45.0$ cm が与えられた。排水実験の場合には、浸潤過程終了後の定常状態に達した時点と初期として、この浸透端の水圧を -50 cm に下げて、一定の負圧を強制的に与えて排水した。

(2) 浸潤・排水過程の圧力水頭分布

浸潤・排水の各過程における圧力水頭の時間的变化を一例として、 $w_i = 10\%$ の場合を図-1 (a), (b) に示した。浸透過程における水頭分布は直線的でなく、下に凸な分布形状をしている

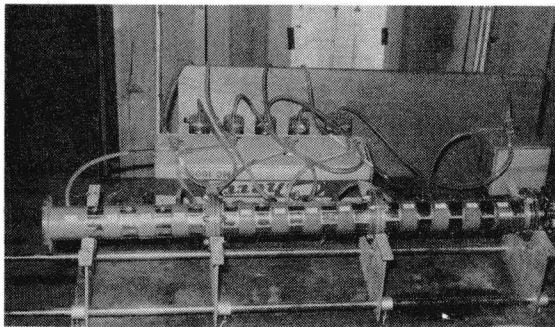
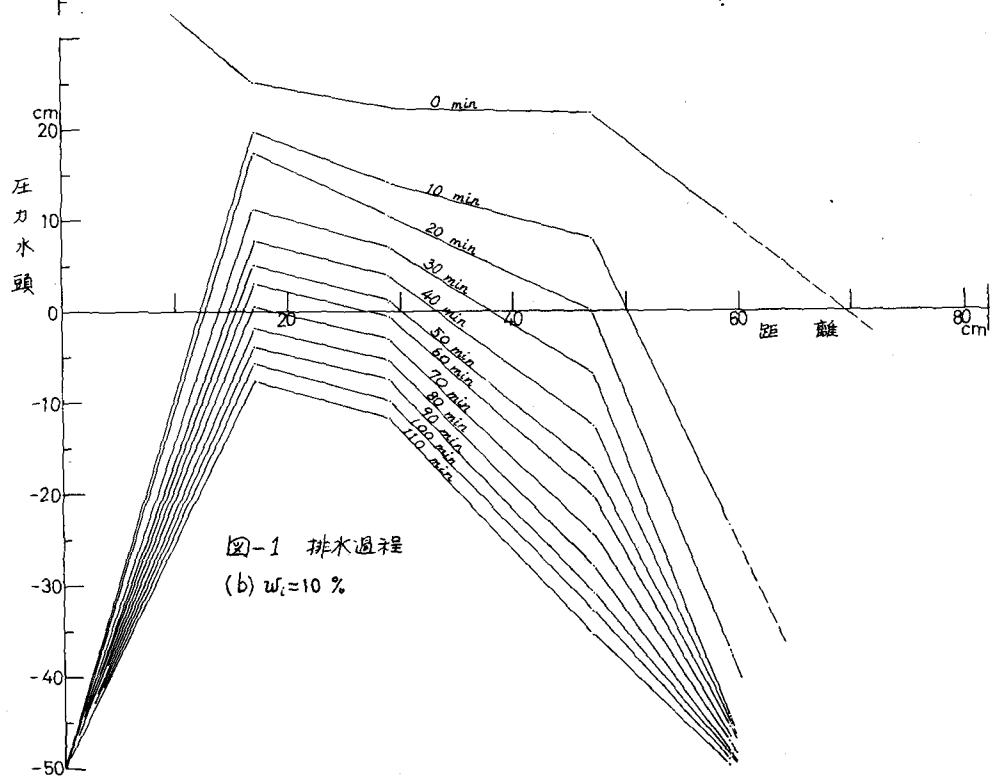
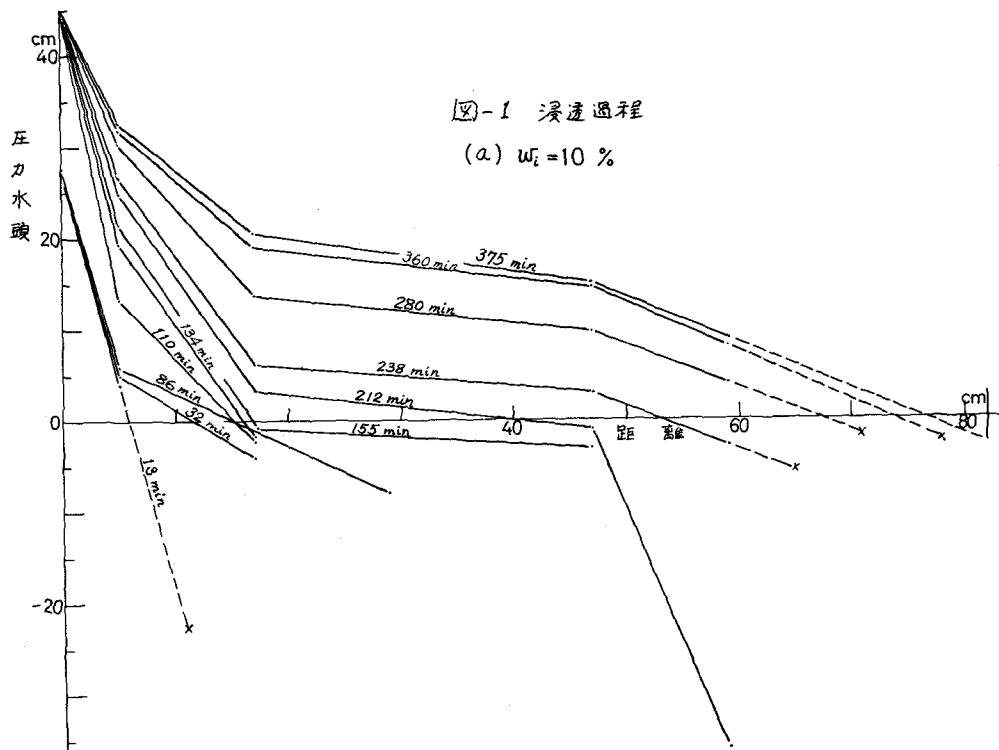


写真-1 水平一次元浸透実験装置



ことが認められる。一方、排水過程では、排水端で-50 cmの負の木頭が与えられることによって、そのすぐ内部は負圧に低下するけれども、他端の大気に放置してある側で速く、大きい圧力木頭の低下が生じ、中央より左寄りの部分での木頭は、かなりの時間経過後も高所に維持されている。同時に土中に投入された色素の動きによると、土柱内の木は図-1(b)の右方、大気圧側から排水端へ一様に向うことが認められた。このことは排水端側では動木傾度に基づく向きに排水されているが、大気に放置されている側では動木傾度の生じている他端への向きとは逆の方向へ向けて水の移動が生じていることとなって、図-1(b)の右方、大気放置端側ではダルシーの法則で表わされる向きとは逆に土中木移動が発生していることになる。

排水過程における上述の現象は豊浦標準砂を詰めた142.5 cmの木質土柱に対する実験でも確認され、土中水の移動には、ダルシーの法則で説明され得ないものがあることが見い出されたといえよう。この現象は、土中水が負圧となっている不飽和土中にみられたことに注目しなければならないが、いずれにせよ、興味深い現象といわざるを得ない。

(3) 初期含水比が浸透過程に及ぼす影響

初期含水比 $w_i = 5\%$ のときの実験結果は幾處の制約から省略するが、浸透過程の圧力木頭分布は図-1(a)に認められているものより直線的であって、浸透距離と時間の関係など別の整理からも、 $w_i = 10\%$ より 5% 、 5% より 0% の方がそれぞれ直線的な圧力木頭分布になっていることが推論された。さらに、すでに報告したように含水比測定の結果によれば、浸透にともなう含水比の増加は、初期含水比が小さい方が急激である。しかし浸透面のフロントが通過した直後の含水比はほぼ等しく、飽和に近い。浸透面が通過後の含水比は若干ながら低下して、ある一定値に近づく。この一定値は初期含水比によって若干異なり、初期含水比が大きいほど終局含水比は小さくなる。

上述の浸透過程における観察結果は、従来の概念では説明することすら困難である。すなわち、次のような仮説を検討していかねばならないであろう。① 初期向ける水は浸透により追出される向けと空気の移動とを妨げる。② 初期含水比があるより小さいものでは、初期含水比の増加とともに閉じ込められる向けと空気が増加する。③ 閉じ込められた空気量が多いときは再度浸透面を破って逃げる。④ 閉じ込められた向けと空気は、向ける木圧の増加に対して向ける空気の全体積が増加する。

インドでは、出木により河川水位の上昇が予想される場合、出木に先立って堤防に木を散く習慣があるといわれる。普通に考えるならば、堤体の含水比がかわって上昇するから堤体の安定に影響があると思われる。しかし上述の木質一次元浸透実験結果によれば、初期含水比がある程度ある方が浸透後の終局含水比は低く、かつ圧力木頭も低くなって好都合であることが理解される。この意味において、インドの習慣は理にかなったものを含んでいるといえるであろう。しかし、散木の程度には適切な量的制約があるはずからあるはずであって、今後この点について検討しなければならない。

3. 浸透・排水の解析法に対する反省

木質一次元浸透に対する従来の研究には2種類の流れが認められる。一つはLambeに始まるものであって、土柱の一端($x=0$)に正圧を与えたとき土柱内を浸透面が進行するが、その際「土の初期含水比 w_i が小さいところで浸透木は流れず、浸透面が通過する前後で含水比は初期含水比から飽和含水比まで急変化する」という仮定から現象を解析する。この仮定に立脚すると、連続の式は飽和値

域について成立する式となるので、基本式は圧力水頭を p 、透水性係数を k として

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

であって、浸透水の流速は β と貯留係数 (有効孔隙率) として次式で与えられる。

$$u = \beta \cdot \frac{dx_f}{dt} \quad (2)$$

この解析は ① 初期含水比 w_0 に応じた毛管水頭 h_c が浸潤面に生じていると考える。② 境界に与える圧力は正圧であって、浸潤面を境に含水比が急変する。③ 圧力分布は直線的である ($k = \text{const}$ として)、といった特色を有している。

もう一つの研究は、Philip らのものであって次の特徴を有する。① 土試料は不飽和であって、同じ水圧は ϕ または θ である状態と考える (圧力分布は浸潤過程と乾燥過程ごとに含水比 $\sim$ フンクション関係を用いて推定する)。② 含水率 θ (volumetric moisture content) は $\phi = x^{-1}$ の一価関数関係にある。

Philip らの解析では土中水が正圧の領域を考慮していないため、普通の浸透・排水実験のように正負の圧力水頭を生じる現象の解析は Lambe らの方法に思いつく解析によらざるを得ない。この観点からこれまでに筆者が検討してきた結果をまとめると、「(1) 粗砂のように、かなり粗粒な土に対しては Lambe らの解析法が水単一次元浸透現象をよく表現する。すなわち、浸潤面を境に含水比は急変化し、圧力水頭分布は直線的である。(2) 細粒土 (長良川堤防土など) に対しては、初期含水比が 0% という乾燥土に対して Lambe らの解析法が良好である。初期含水比が 5%、10% と大きい場合でも近似的には Lambe らの解析法である程度浸潤過程を説明できる。しかし詳細にみると、含水比の増加につれて、圧力水頭の分布は下に凸の形になり、含水比の終極値は小さめに低下する。」

一方、排水実験で認められた新しい圧力水頭分布の特異性は、「排水により生じる含水比低下の著しい、大気に接している端部にはダルシーの法則が適用できず、解析法の新しい展開の必要性」を意味すると考えねばならない。たとえば、ダルシーの法則は多孔質物体中の水の運動について、次元解析から導かれる関係

$$F\left(\frac{\Delta p}{\rho g \Delta s}, \frac{V^2}{g \Delta s}, \frac{V \Delta}{\nu}, \frac{V^2 \Delta}{\tau / \rho}\right) = 0 \quad \text{or} \quad F(I, Fr^2, Re, We) = 0 \quad (3)$$

の特殊な場合である。ただし ρ : 木の密度, g : 重力の加速度, V : 流速, ν : 動粘性係数, τ : 木の表面張力, I : 動水傾度, Fr : フルード数, Re : レイノルズ数, We : Weber 数。

式(3)の最後の項, We 数は表面張力に対する流体としての水の運動エネルギーの比の大きさを表現しているから、不飽和に肉連する量とみられる。したがって、 Fr 数と We 数を無視し、かつ $Re < 1 \sim 4$ のときに成立するといわれるダルシー則と、 We 数の無視できない肉連性^中の^中の^中状態方程式ともみられる $\mu \sim \omega$ 関係の取扱いを考慮した検討が今後必要と思われる。

参考文献

- 1) 宇野尚雄・奥村邦夫・林睦寿: 不飽和土中の非定常浸透特性について, 第3回土質工学研究発表会論文集, 1968, pp. 245 ~ 250.