

不飽和透水係数直接測定装置の試作

近畿大学理工学部 正員 江藤 剛治
 近畿大学大学院 学生員 岡田 明也

1. まえがき

一般的なダルシー則に従う飽和状態での浸透流に関する既往の研究は数多い。一方実際の浸透問題では不飽和状態での浸透流もまた重要な現象となる。一般に不飽和状態での水分移動の外力としては、重力よりもむしろ土壌水分量勾配による力が支配的となる。すなわち土壌水分量の場所的変化にともない、毛管水分吸引力もまた空間的に異った値となるので、これにより水分移動が起るわけである。この現象は次の2つの物理特性により支配されるといわれている。1) 毛管水分曲線、2) 不飽和透水係数。前者は土壌水分吸引力と、土壌水分量との関係を示す曲線であり、テンシオメーター、あるいは直接的にも後述の方法等により容易に求まる。後者の不飽和透水係数を、直接に実測することは、非常に難しく、これまでのほとんどの研究では、間接的な測定法により求められてきた。

最近、岡・角屋¹⁾らは直接測定のための装置を試作し、これによる実測結果と土壌水分拡散実験より間接的に求めた不飽和透水係数の値を比較している。彼らの文献によればこの装置による測定精度は必ずしも良くない。その理由は、この実験では極微流量(1cm³/sec~0.01cm³/sec)を供給する必要がある、これを場所的にも時間的にも長時間むらなく安定的に供給することが非常に難しいからである。しかしながらこの直接測定法は、もつとも自然に近い状態で不飽和透水係数を実測できるという大きな利点を有する。そこで筆者らは、主として水分供給部に新たな工夫を加えた直接測定装置を試作した。この装置では、供給水分量の制御も容易であり、また予備実験でもかなり信頼度が高いと考えられる実測結果を得たので、ここに報告する。

2. 充填試料の諸特性

使用試料は豊浦標準砂を用いた。比重：2.63、飽和透水係数：0.016cm/sec、間ゲキ率：0.424。一連の予備実験では、これらの諸量が再現されるよう注意して試料を充填した。

3. 間接的不飽和透水係数測定法

不飽和浸透流の基礎方程式は、不飽和領域にまで拡張されたダルシー則の式と連続式より誘導される。 $q = -k(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \dots\dots (1)$ 、 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \dots\dots (2)$ 、ここで q : 単位面積当りの流量 (cm³/sec/cm²)、 $k(\theta)$: 不飽和透水係数 (cm/sec)、 ψ : 毛管ポテンシャル、 θ : 土壌水分量 (cm³/cm³)
 これは体積含水率である、 t : 時間 (sec)、 z : 鉛直座標である。(1)式と(2)式より

$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} k(\theta) \dots\dots (3)$ 、ここに $D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \dots\dots (4)$ 。(3)式より $D(\theta)$ を求めるには(3)式右辺第2項の重力項 $\frac{\partial}{\partial z} k(\theta)$ を消去し、 z を x に変えて Boltzmann 変換を行ない1回積分すれば

(すなわち水平座標上の土壌水分移動問題としている)、 $D(\theta) = -\frac{1}{2t} \left(\frac{dx}{d\theta} \right) \int_{\theta_i}^{\theta} x d\theta \dots\dots (5)$ を得る。(5)式を解くには、長柱の容器に試料を充填し水平に設置して一端を開放にして他の一端か

ら大気圧に保ちながら水を供給し一定時間(t時間)放置した後、容器を解体し各x地点より採土し炉乾燥を行ない土壤水分量 θ を求める。(5)式にこれらを代入すれば土壤水分拡散係数D(θ)は求まる。次に(4)式においての $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ つまり土壤水分吸引力と土壤水分量との関係であるが、これを求めるには同様に長柱の容器に試料を充填し鉛直にたて水槽に下端を沈め水が上昇しなくなるまで放置した後、容器を解体し、各上昇高zの土壤水分量 θ を求めグラフに描くことによりz- θ 関係が得られる、これが ψ - θ 曲線となる。その理由は、この状態では $q=0$ であるから(1)式より $\frac{\partial \psi}{\partial z}=1$ すなわち $\psi=z$ となっている。よって間接的な不飽和透水係数を求めるには(4)式に上記のごとくして求めたD(θ)と $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ を代入することにより決定する。

4. 直接的不飽和透水係数測定法

時空間的に θ が一定であるとき $\frac{\partial \theta}{\partial t}=0$ でありまた $\frac{\partial \psi}{\partial z}=0$ 、よって $q=k(\theta)$ となる。すなわち q =一定の定常状態を作りこのときの θ を測定するという実験の繰返しより $k(\theta)$ が求まる。 k - θ 関係を求めるには内径10cm長さ200cmの円柱の容器を準備し、
 1)その内に試料を充填し容器を鉛直にたてる。
 2)上端より微量の水供給を続ける、
 3)wetting frontが十分進行した状態でz- θ 曲線を求める、
 4)wetting front及び上端部のわずかの部分を除いて θ はほとんど一定となるからこのときの θ と供給水量の関係から $q \sim \theta$ すなわち $k \sim \theta$ 関係を決定する。

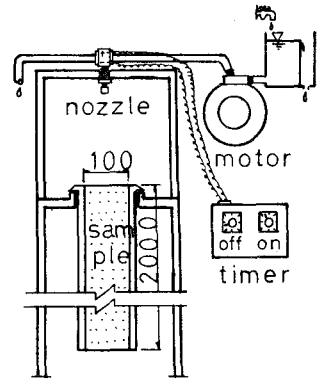


図-1. 試作装置概略図

筆者らの装置で工夫した点は、微量の水を長時間時空間的に安定して供給する装置である。この装置は図-1に示す。その特徴は以下の通りである。1)噴霧ノズルを用いたこの部分全体をアクリル容器で覆う、2)さらに微流量の調整の為にタイマー2個と電磁弁の組み合わせにより任意かつ一定の時間間隔で間欠的に水供給ができるようにしてある。wetting frontの進行が非常に遅いので間欠性の影響は容器上端のわずかの部分に限られる。

5. 実験結果

1)毛管水分曲線の実験結果を図-2に示す。各ケース毎のバラツキはあるが、8回の実験を平均することによりかなり信頼度の高い試料となっている。2)拡散実験結果を図-3に示す。wetting frontで θ が急減するので $\theta < 0.24$ では信頼度の高い資料は得られなかった。 $0.24 < \theta < 0.424$ (飽和)では信頼できる値が得られた。3)上記2)の実験よりD(θ)を求めたのが、図-4である。

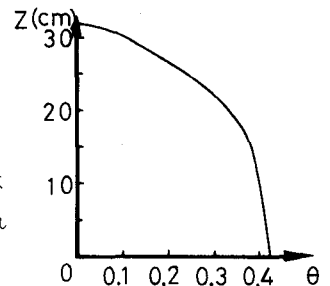


図-2. 毛管水分曲線

かなりまとまったプロットとなっており不飽和土壤水分移動における拡散モデルの妥当性がうかがえる。4)筆者らの装置による実験でのz- θ 関係を図-5に示す。予備実験1,2,3,では容器上端側では実験値がバラついている、これは試料充填のまずさによるものと考えられる。予備実験4,では試料の充填に、

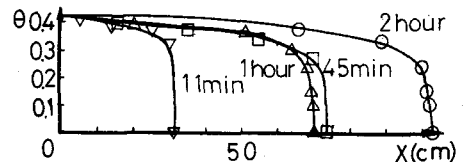


図-3. 水平拡散実験値

十分工夫と注意を加えたところ、実験結果に見られるごとくほとんど完全な定常状態を作り出すことに成功した。v) $D(\theta)$ 、 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ より求めた $k(\theta)$ と筆者らの装置より求めた $k(\theta)$ を図-6に示している。拡散実験による $k(\theta)$ 関係は $\theta < 0.24$ では信頼度の高い値は得られなかった。一方筆者らの装置による今回の予備実験は $0.137 < \theta < 0.267$ の範囲であったのでこれ以外の領域での比較はできないが、

このような $k(\theta)$ が非常に小さい領域でも、この装置を用いることにより十分信頼度の高い $k \sim \theta$ 関係を決定できることがわかる。

6. 結論

不飽和透水係数 $k(\theta)$ の直接測定装置を試作し、その性能を検討した。この装置によれば $k(\theta)$ の小さな領域においても、もともと自然に近い状態で信頼度の高い実測値を得ることができる。

7. 謝辞

今回の装置の試作にあたり 京都大学防災研究所 岡太郎助教授に貴重な体験をお聞かせ頂いた。記して謝意を表す。

(参考文献)

1) 岡太郎・角屋睦：裸地斜面域における雨水の浸入と地下水流出(1) - 傾斜ライシメータと土壤特性 -、京都大学防災研究所年報、第17号B、昭49.4、pp. 511 - 522

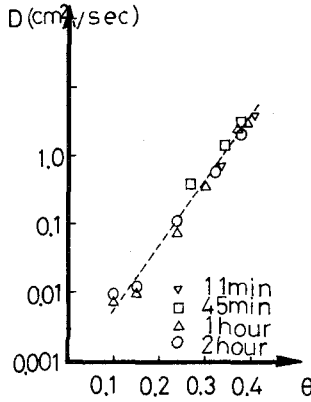


図-4. 不飽和拡散係数

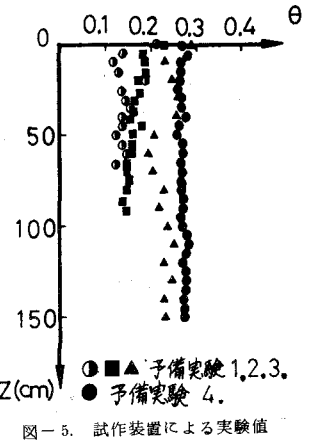


図-5. 試作装置による実験値

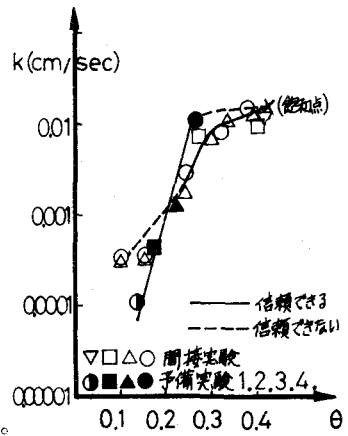


図-6. 不飽和透水係数