

Richrads 型測定装置による不飽和流の透水実験について

On the Permeability Experiments of Unsaturated Flow by Richards' Type Equipment

岡 橋 生 幸*

Osachi OKAHASHI

I はじめに

不飽和土における透水性の把握は、的確に捉え得る物理量が限定されるため大変困難であるが、農学・土質工学そして水文学において重要な問題である。具体的には、地すべりや地下水涵養機構等の解明に大いに貢献できるものである。

野外や室内において、不飽和土の透水性を吟味した研究は多くあり、特に室内実験を重ねて不飽和土中の水分移動を定量的に捉えようとする動きは少なくない。代表的な研究を見ると、不飽和流における Darcy 則の適用性を扱った Swartzendruber (1963)・Thames (1968) そして長谷川・前田 (1977) 等、また Davidson et al. (1969) や Vachaud・Thony (1971) のように不飽和透水係数を扱った研究^(註1)、さらに Topp (1971) や Mualem (1973) 等のヒステリシスを扱った研究があり、一口に透水性といっても、その内容は様々である。

前述のように、これらの研究の大半は実験を中心としたものであるが、その場合多くが透過型 γ 線水分計等の手数のかかる実験装置を利用している。しかし、このような透過型 γ 線水分計は、装置自体が高価で調整も難しく、野外で土壌の透水性を手軽につかむという点では不便である。もっとも将来はそのような点は改良されるであろうが、現在においては、もっと簡便に透水性を検討することも必要であると思われる。このような立場に

立った長谷川・前田 (1977) の研究^(註2)は、上述の意義から考えても注目されるべきである。

さて、筆者は不飽和土の透水性を誰にでも使えるような簡便な装置を用いて検討することに意義を求め、Richards (1931) が考案した市販の不飽和透水性測定装置に若干の改良を加え、これを使用して関東ロームおよび砂の透水実験を行なった。以下、不飽和透水性測定装置および実験結果とこの装置の長所、さらに実験により得られた若干の知見について述べる。

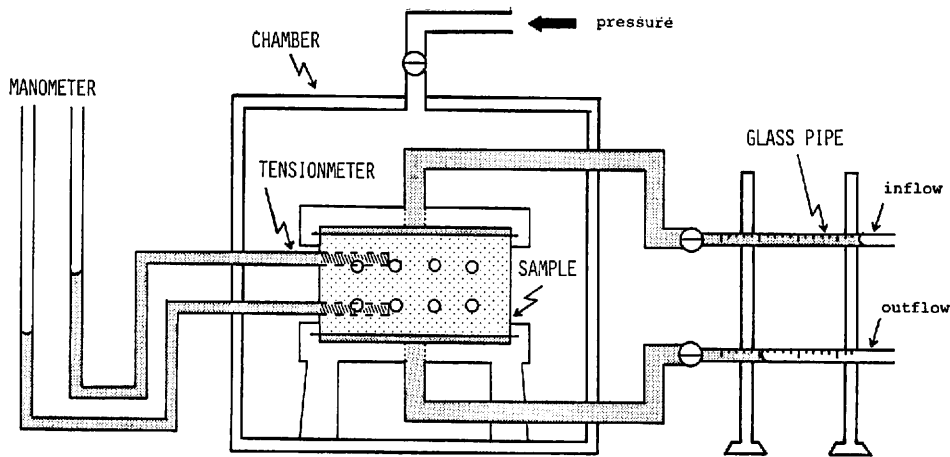
II 実験装置の概要と試料

Richards 型の不飽和透水性測定装置 (第1図) の原理は、Richards (1931) のポテンシャル理論に基づいており、チェンバー内を空気で加圧することにより、実験土を一定の吸引圧下に置くものである。この装置では、流量は流出または流入量の測定から得ることができ、動水勾配は試料中心から上下・等距離に挿入したテンションメーターの水頭差から求めることができる。

試料として、関東ロームと砂の2種を用いた。ロームは、すべて茨城県筑波郡谷田部町で採取したもので、LOAM 1~3 は内径10cm・高さ4cmの透水実験用サンプル管に、S 12、T 66、T 32は100cm³のサンプル管に採土した。このロームは関東ロームのうち武蔵野ローム層に相当する。

砂は粒径が0.35~0.50mmの佐原砂で、サンプル管に充填して用いた。それぞれの物理特性を第

*筑波大学、第1学群自然学類地球科学専攻



第 1 図 Richards 型不飽和透水性測定装置の模式図

第 1 表

試料名	土質	比重	乾燥密度 (g/cm^3)	間隙率 (%)	飽和透水係数 (cm/sec)
LOAM 1	ローム	2.50	0.716	71.3	...
LOAM 2	〃	〃	0.600	76.0	...
LOAM 3	〃	〃	0.686	72.5	...
S 12	〃	〃	0.665	73.4	4.40×10^{-3}
T 66	〃	〃	0.572	77.1	1.30×10^{-3}
T 32	〃	〃	0.804	67.8	8.19×10^{-4}
SAND	砂	2.71	1.660	38.7	...

1表に示した。この表において、飽和透水係数は変水位法により求め、比重値はゲーリッソック瓶により求めた。またロームはすべて同地点で採土したものであるので、比重値としてその平均値を用いた。

実験は、すべて温度一定 ($20 \pm 1^\circ C$) で光を遮断した状態で行ない、実験水には蒸留水を脱気したものを用いた。

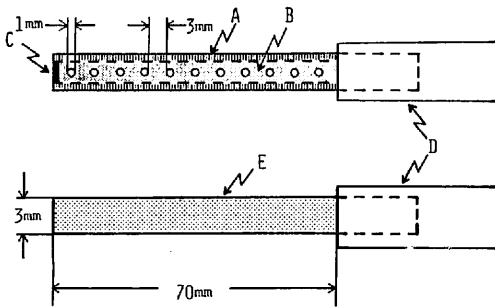
III 実験装置の改良点および実験方法

1) 関東ロームに関する実験

従来の装置では、水の流入にはマリョット給水管を用いており、流出にはガラス管からシリンダ

ーに滴下させる方法をとっている。本実験でも、砂の場合にはこの方法を用いたが、ロームのように、透水性が比較的良好でない土壌を試料として用いる場合には、流量が少なくなり、正確に流出量を測定することが困難になる。このため、本実験では長谷川・前田 (1977) がマイクロピペットを使用したことにヒントを得て、流入、流出口にガラス管を用いた。ガラス管は内径が 5 mm と 2 mm の 2 種類で、長さは両者とも約 70 cm である。内径 5 mm のガラス管の容量は $8.0 cm^3$ で、2 mm のガラス管は $1.8 cm^3$ である。

テンションメーターにも工夫を加えた。従来のテンションカップは土中に挿入される部分が 1.2



第2図 ポーラスカップの模式図

(1)砂用ポーラスカップ

(2)ローム用ポーラスカップ

A: ナイロン質管, B: 脱脂綿, C: アルルライト, D: 接続管, E: 素焼質管

cm程度であるため、試料の外側の部分でしか吸引圧を測定できなかった。そこで本実験では長さを70mmにしてみた(第2図)。(2)。またこれに伴い外径も6mmを3mmにした。

以上のように改良した装置を用いて、透水実験は吸引圧40・80・120・160cmH₂Oについて行なった。流入用ガラス管を上下させることにより動水勾配を変化させ、動水勾配を徐々に減少させる過程(decrease過程)と徐々に増大させる過程(increase過程)について実験を行なった。また実験が長期に及んだため試料は途中で交換した。従って吸引圧40・80cmH₂OではLOAM1, 120cmH₂OではLOAM3, 160cmH₂OではLOAM2を用いた。

水分特性曲線は、吸引法と透水実験用の装置を用いて水収支的に求める方法(以後水収支法とよぶ)の両者によって求めた。水収支法は透水実験とは別に行なった。試料中の水分量は流入・流出量および最終水分量を測定することにより収支計算で求めた。本実験では試料をまず飽和しておき、吸引圧を20・40・80・120・160・200cmH₂Oと上げてゆき、続いて160・120・80・40・20・0cmH₂Oと下げた。また、この実験で用いた試料はLOAM2である。

2) 砂に関する実験

砂を試料として用いる場合、流速はかなり大きく、測定時間は短くなるので、圧力変化に対して迅速に反応するテンションメーターが要求される。このため、本実験では長さ70mm外径3mmのナイロン質管に直径1mmの穴を3mmおきにあけ、管内に脱脂綿をつめたもの(第2図-1)をポーラスカップとした。

また砂の場合、従来のフィルターよりも透水性がよい可能性がある。ナイロン質の非常に透水性のよいもの(注3)をフィルターとして用いた。

IV 実験結果と考察

1) 関東ロームの実験について

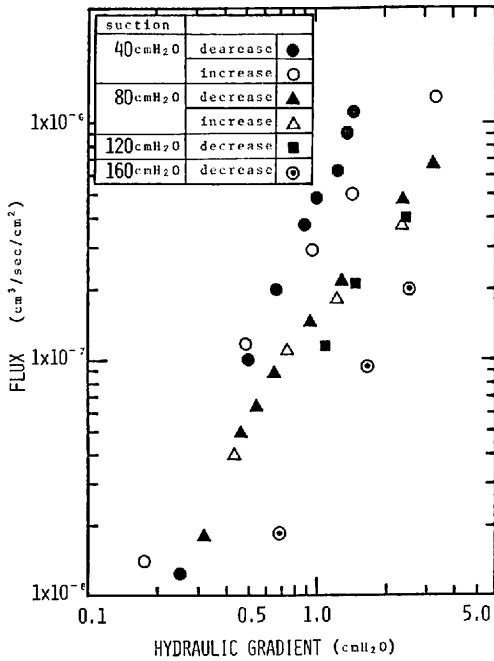
(1) ガラス管使用の問題点と効果

ガラス管を用いたにあたり、流入・流出両端における水のメニスカスが流量測定に影響を与えるのではないかという疑問が持たれたので、これを検討する実験を行なった。この実験は、透水実験用装置において、実験上の部分を接続管に代えて行なった。この方法により、水のメニスカスによる抵抗にガラス管壁および接続管壁における摩擦抵抗を加えた影響について検討できた。その結果は次の通りである。

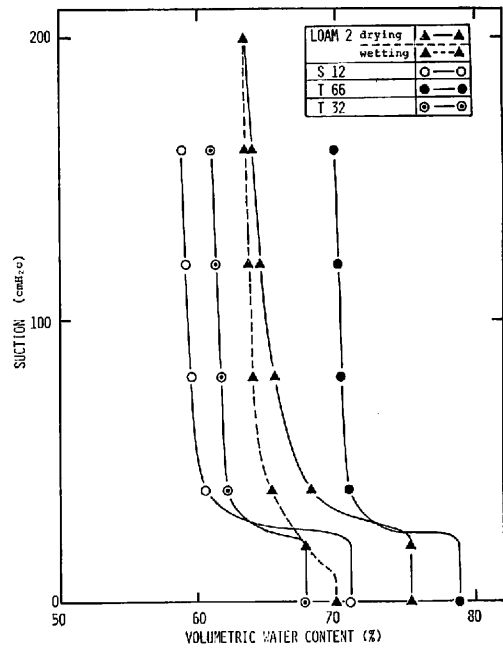
流入・流出ガラス管の水位差がある値以下になると、2種類のガラス管において、いずれにも水の流動はほとんど確認できなかった。その水位差は内径5mmのガラス管で1mm、内径2mmのガラス管で7mmであった。限界の水位差で、それぞれのガラス管が流し得る流量は、内径5mmのガラス管が221cm³/h.で、内径2mmのガラス管が4.8cm³/h.であった。

これらの結果は、ガラス管の最小流量が透水実験における流量の10²~10⁴倍であり、透水実験の流量測定において、水のメニスカスと管壁の摩擦の影響は考慮しなくてもよいことを示している。このため流量測定は1×10⁻⁸cm³まで可能になった。

以上のことをふまえて、ガラス管使用の効用を第3図にみている。第3図において、吸引圧40cmH₂Oのdecrease過程のデータは、従来のシ



第3図 関東ロームにおけるフラックスと動水勾配の関係



第4図 関東ロームの水分特性曲線
LOAM: 水収支法
S12・T66・T32: 吸引法

リンダーに滴下させる方法により得たもので、それ以外はガラス管を使用して得たものである。他に比べて 40cmH₂O の decrease 過程のフラックスの値は、動水勾配が小さくなるに従い、その減少の割合が大きくなっている。ガラス管の検討実験の時に、水のメニスカスの影響は管内よりも管口の方が大きいことが付随的に確認されたので、フラックスの減少はこの影響によるものと考えられる。

ガラス管の検討実験の結果および透水実験の結果より、流量が少ない場合、ガラス管を使用すれば流量測定精度向上を図れることが確認できた。

(2) 試料中の水分量決定

吸引法で求めた S12・T66・T32と水収支法で求めた LOAM 2 の水分特性曲線は第4図に示した。水収支法による曲線の傾きは、吸引法による曲線の傾きよりも幾分小さいが、両者ともほとんど同じ傾向を示している。吸引法による水分特

性曲線は3本あるが、それらは体積含水率に関してばらつきが大きい。水収支法による曲線は、それらの中間に位置し、かなり妥当な結果を示していると考えられる。

水収支法による吸水過程の結果は、第4図において破線で示した。吸水過程の吸引圧 0 cmH₂O の体積含水率の値は、乾燥過程の同吸引圧に戻らなかった。乾燥過程の吸引圧 0 cmH₂O の値は減圧飽和による値であることから、これは当然の結果と考えられる。また吸水過程の場合、水の供給が均等であったかどうかについても疑問が持たれるので、このデータは信頼性に欠ける。

しかし、乾燥過程の場合には正確に排水量を測定することができた。これに加えて、試料の大きさは体積にして吸引法の3倍以上で、圧力は試料側面全体からかけられるので、乾燥過程のデータはかなり信頼性の高いものであろう。

さらに、水収支法の過乾燥過程の場合、試料は透水実験と全く同じ状態にあり、水収支法は工夫次

第で透水実験に組みこむことができる。よって、透水実験における試料の水分量決定には、水収支法は最も簡便で正確な方法であると考えられる。

(3) 試料中の水分分布

本実験では、従来のテンションカップよりも長く細いものを用いたが、測定値は従来のテンションカップで求めた値とほとんど変わらなかった。これは試料の内側と外側では吸引圧は等しく、水分量が等しいことを意味している。

また長谷川・前田 (1977) によると、試料中の上下方向の水分勾配はほとんどの場合 1% 以下である。これにより試料上下ではほとんど水分量が一定であることが分かる。

上に述べたことをまとめると、試料中の水分状態は全域にわたって均等であり、試料は一様不飽和の状態にあることが確かめられたことになる。また自然界において、このような水分分布は浸潤前線後部にみられる。

(4) 温度変化の影響

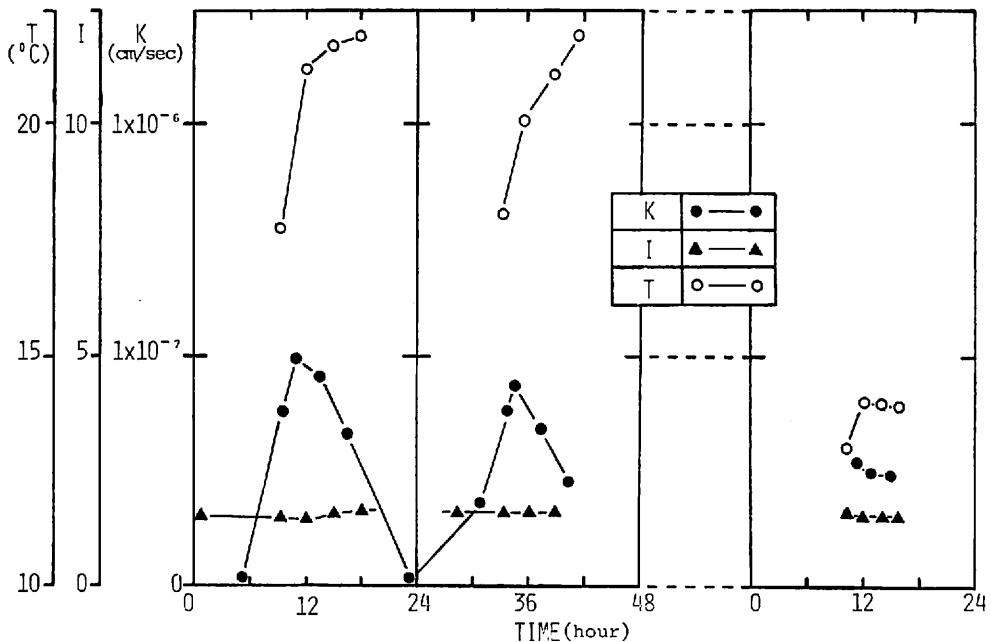
土壌の透水性は温度変化の影響を受けるときれている。温度変化が透水性に与える影響の一例を第 5 図に示した。このデータは、本研究の前に行なった予備実験の時に得られたもので、用いた料は関東ロームである。

第 5 図の(1)は温度変化がかなり大きい場合で、動水勾配はほとんど一定であるが、透水係数はかなりの変化を示している。(2)は温度変化が小さい場合で、透水係数の変化も小さい。

これらの結果より、試料の透水性は温度変化の影響を大きく受け、透水実験で正確な測定値を得るためには、温度一定という条件が必要になることがわかる。

2) 砂の実験について

砂について透水実験を行なったところ、水は試料中を上から下へ流れているにもかかわらず、上下のテンションメーターの水頭の高さはほとんど同じかむしろテンションメーターの水頭の方が高いようであった。また、何度行なっても同じ結果



第 5 図 温度・透水係数・動水勾配の時間変化
 (1) 温度変化が大きい場合
 (2) 温度変化が小さい場合

が得られた。

テンションカップとフィルターの改良を試みたことにより、上に述べた現象の原因が測定装置にあるとは考えにくく、むしろ原因は試料自体にあると考えられる。

試料として用いた砂は、粒径が0.35~0.50mmと非常に透水性がよいため、水は砂の粒子間に保持されずに下方へ落ちてゆき、ついには上下方向にかなりの水分分配ができてしまったのではないだろうか。すなわち、テンションメーターにみられたみかけ上逆の水頭公配は、このような水分分布により起ったものと考えられる。

以上のことは、Richards型不飽和透水性側定装置があまり透水性のよい土壌を試料にする場合には適さないことを示している。

V おわりに

本研究では、Richards型不飽和透水性測定装置を用いた実験について検討してきたが、結論を以下にまとめて記す。

- (1) 流量が少ない場合、流入・流出口にガラス管を用いると流量測定の精度向上を図ることができる。
- (2) 透水実験に用いた試料の各吸引圧における水分量決定には、本研究で考案した水取支法が最も適する。
- (3) 試料内部は砂の場合を除いて全域にわたり一様不飽和の状態にある。
- (4) 透水実験において、温度一定の条件は十分考慮されなければならない。
- (5) 透水性のよい土壌の不飽和透水実験には、Richards型は適さない。

尚、本研究は、卒業論文の一部として、水理実験センターの実験室及び諸実験設備を利用して行なったものである。

最後に、実験にあたって数多くの助言と御指導を頂いた梶根勇・助教授・古藤田一雄助教授・田中正講師・佐倉保夫研究員・開発一郎学兄ならびに農業技術研究所の岩田進午博士に厚く御礼申し上げます。また研

究の場を快く提供して下さった水理実験センターの方々に御礼申し上げます。

注

- 1) 不飽和透水係数を求める研究については、Klute (1972)に詳しい。
- 2) 同様の研究に、山本 (1978) がある。
- 3) ナイロンメッシュ、200メッシュ/2.54cm

文 献

- 岩田進午 (1975) : 不飽和透水係数. 土壌物理測定法委員会編「土壌物理測定法」養賢堂, 191-197.
- 岡橋生幸 (1979) : 不飽和流の非 Darcy 特性に関する実験的研究. 筑波大学自然科学類卒業論文 (未公表).
- 長谷川周一・前田隆 (1977) : 不飽和浸透流におけるダルシーの法則の適用. 農土論集, 70, 13-19.
- 山本慎司 (1978) : 不飽和透水係数の測定に関する実験的研究. 筑波大学自然科学類卒業論文 (未公表).
- Davidson, J. M. et al (1969) : Field measurement and use of soil-water properties. *Water Resour. Res.*, 5, 1312-1321.
- Klute, A. (1972) : The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Sci.*, 113, 264-276.
- Mualem, Y. (1973) : Modified approach to capillary hysteresis based on a similarity hypothesis. *Water Resour. Res.*, 9, 1324-1331.
- Richards, L. A. (1931) : Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Swartzendrubers, D. (1963) : Non-Darcy behavior and flow of water in unsaturated soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 27, 491-495.
- Thames, J. L. & Evance, D. D. (1968) : An analysis of the vertical infiltration of water into soil columns. *Water Resour. Res.*, 4, 817-828.
- Topp, G. C. (1971) : Soil water hysteresis in silt loam and clay soils. *Water Resour. Res.*, 7, 914-920.
- Vachaud, G. & Thony, J. L. (1971) : Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resour. Res.*, 7, 111-127.