

空気圧制御による不飽和砂質土の透水試験法

METHOD OF TEST FOR PERMEABILITY OF UNSATURATED SANDY SOIL WITH CONTROLLED AIR PRESSURE

宇野尚雄*・佐藤 健**・杉井俊夫***・柘植浩史****

By Takao UNO, Takeshi SATO, Toshio SUGII and Hiroshi TSUGE

A convenient method of test for permeability of unsaturated soil under controlled air pressure was examined. It was reflected on the improvement of procedure to measure a little rate of discharge infiltrated, headloss of filters attached to soil sample and so on. As a result, a guide to select filter in consideration of permeability of soil was obtained, and water content distributed through soil column was verified to be approximately uniform. It was also found that a fairly great value of hydraulic gradient was allowable to be burdened to sample, and that degree of saturation could be controlled corresponding to the air pressure, which made operation time shorter than in the previous procedure.

Keywords: unsaturated soil, permeability, laboratory test, filter, air pressure, hydraulic gradient, suction

1. ま え が き

不飽和土の浸透現象を定量的に表現する際には、ダルシー則における不飽和土の透水係数が重要となる。計算機の発達と解析手法の進歩に伴って、飽和、不飽和の区別なく浸透解析が行えるようになってきたが、不飽和土の透水係数（不飽和透水係数と略称する）を実際に試験して調べることなく、仮定値を使用する傾向が強い。この原因は、不飽和土の透水試験（不飽和透水試験と略称する）の方法が確立されてないことおよび研究のために製作された特殊で高価な装置はあっても、普及型の試験方法・試験装置がないためではないかと考えられる。

不飽和透水試験の非定常法としては、瞬時水分計測法などが工夫されているが、試料内の水の移動を測定するために中性子、 γ 線などの放射線を使用することがあるため、試験装置が特殊で、高価になる。定常法としては、

① 原理的方法（飽和度直接計測法：輪切り透水管を

使用する、土柱法など）

② 電気的方法（飽和度間接計測法：電気誘電率や水分量密度計などを使用して飽和度を間接的に推定する方法）

③ 間隙空気圧負荷による飽和度制御法（加圧型透水試験機などが、これに属する方法）

が考えられる。

本報告では、普及型試験法として有望である“加圧型不飽和透水試験”について、従来の問題点に対する改良を加え、簡便な不飽和土の透水試験として、その試験方法の具体的指針（負荷すべき動水勾配、試験時間などの指針）および試験装置の改善すべき点（フィルターを選択法、流量計測法など）を究明し、試験法として確立することを目的としている。

2. 試験法に関する従来の研究の考察

これまでの代表的な不飽和土の透水試験法としては、定常法である土柱法や加圧型透水試験法と非定常な水分移動を計測する方法がある。

土柱法は鉛直に立てた土柱の数か所での圧力水頭、上面からの浸透水量、下面からの排水流量を計測して求めるものである。一方、加圧型透水試験は、円柱供試体を加圧室内に置き、供試体両端につけたフィルターを通し

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (同上)

**** 正会員 工修 前田建設工業(株) 土木設計部
(〒102 千代田区富士見2-10-26)

て水を流し、定常状態での水頭差と流量の関係より、不飽和透水係数を求める方法で、本研究で検討しようとしている方法である。

非定常透水試験は、流出入計測法と瞬時水分計測法に分けられる¹⁾。流出入計測法には、土柱に一定の空気圧を負荷することによって、不飽和浸透を生じさせる方法や^{2),3)}、Boltzmann 変換をして、Klute の拡散係数を求める方法がある⁴⁾。瞬時水分計測法は、鉛直一次元の土柱内で、給水湿潤あるいは排水の開始後、時々刻々と変化する体積含水率の分布と圧力水頭を計測することにより、不飽和透水係数を求めようとするものである⁵⁾。

これらの不飽和透水係数を求める定常法の手法で共通している点は、①負圧状態の土試料中に発生する動水勾配、②不飽和試料を通過する浸透流量、および③試料の飽和度または負圧（サクシオン）、の3つの要因の計測が必要なことである。非定常法では③が間接的な手法として水分計測により推定され、②の代用も兼ねることが多い。

農業土木学会では⁶⁾、中野や塩沢らの研究^{7),8)}に基づいてかなり明確な試験法として、“吸引法”と“加圧法”を示している。Richards 型の方法が根拠になっており^{9),10)}、基本的に両者に大差はなく、いずれも定常法である。試料に与えるサクシオン分布とその制御については、フィルターの透水性との関連性を解説しつつ、充填試料の飽和度に応じて発生するサクシオンおよび与えられた水頭差により生ずる不飽和浸透水量との関連で試行錯誤により流れを制御する必要性が述べられているが、それは難しいとも述べられている。

瞬時水分計測法 (Instantaneous profile method) については河野らの研究に詳しく述べられている¹⁾。それは鉛直土柱の排水現象を数か所での間隙水圧（負圧も含めて）と水分量の経時変化で把握して、不飽和透水係数

を算出するのである。

いずれの方法によっても、原理的には不飽和透水係数は測定できるが、いくつかの問題が指摘される。定常法については、

- ① フィルターの選択法
- ② テンシオメータによる水頭測定に基づく動水勾配の推定（テンシオメータの大きさと計測間隔）
- ③ セット試料内のサクシオン分布と水頭条件の平衡所要時間（できるだけ短縮したい）
- ④ 流量測定の精度（マリOTTビンの改良）

一方、非定常法については、②と同様のサクシオン測定法の難しさ（テンシオメータ先端のフィルターの製作法の困難さ…大きさ、厚み、形状など）と水分計測のための計測機器の設備の作成費用に難がある。

農業土木学会の実験ガイドの吸引法では、試料の均一性と間隙空気の影響を計るため、パイプに小孔をあけて大気圧に通じさせた。加圧法はさらに積極的にサクシオンをコントロールしようとしたものである。これらの方法で共通している、土柱の2点でのサクシオン測定法について、実験ガイドではその測定誤差に対する精度を検討している。その際には必然的にフィルターと試料の透水係数の差が介入してくる。そこでフィルターの透水係数を事前に調べてその影響を除去して、しかも試料長をあまり長くしない方法が考えられる。テンシオメータの試料内への挿入による乱れの防止、先端部のフィルターの作動点検の煩わしさを避けるためにテンシオメータを省き、代わりに上下面のフィルター点検を十分なものにするのである。さらに浸透流量が少量であることに留意して、流量の計量法を改善する。

このように考えて、定常法の加圧型の透水試験法に改良を加えた方法の提案とその妥当性検討のため、以下には実験装置の試作とそれを用いた実験結果から得られる

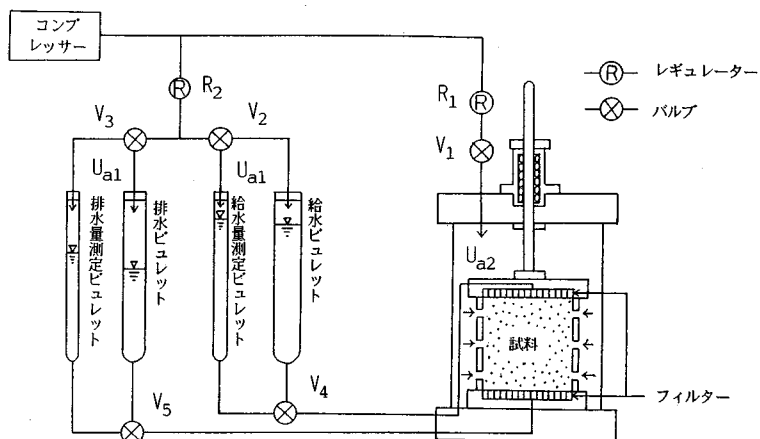


図-1(a) 加圧型不飽和透水試験装置

試験上の指針について論ずることとする。

3. 実験装置、試料および試験方法

(1) 加圧型不飽和透水試験装置

今回作製した加圧型不飽和透水試験装置は図-1(a)のように、試料室（加圧室）、圧力調整部および流量・水頭測定部からなる。この装置の特長として、

- ① 特別な装置を必要としないため、簡単に試験が行え、普及型の試験方法としての条件を満たしている。
- ② 供試体の側面から空気圧 U_{a2} を、給水・排水ピュレットにも空気圧 U_{a1} を作用させることができるため、供試体に作用するサクションと供試体の含水量を自由にコントロールすることができる。
- ③ 4本のピュレットを用いて $1/100$ (cm³) のオーダーで給水量・排水量を測定できるため、供試体をセットしたときの含水量と給水量・排水量から試験後の含水量をおおむね予測できる。
- ④ 小さな供試体を使用するため、不攪乱試料を容易に準備できる。

などが挙げられる。

試料リングは外径 76 mm、内径 60 mm で、高さは 20 mm、40 mm、80 mm の 3 種類を用意した。高さ 40 mm のリングの詳細図を図-1(b) に示す。平面図に示すとおり 30° 間隔で 12 個、断面図に示すとおり 10 mm 間隔で 3 段、計 36 個の小孔が空いている。小孔は直径 2 mm であり、試料内と加圧室内との空気の流れを保ち、試料に空気圧を負荷することができるように設けられている。しかし、これらの寸法は試行的なものであって、改良の余地がある。特に小孔についてそうである。

圧力調整部は高空気圧を送り続けるためのコンプレッ

サー、その圧力を調節するためのレギュレーター、圧力を計測するためのブルドン管式圧力計からなる。ブルドン管式圧力計はマノメータにより精度検証したものを使用した。コンプレッサーから送られる空気は二股に分かれ、一方はレギュレーター R_1 を通して試料室に側方空気圧 U_{a2} として負荷され、もう一方はレギュレーター R_2 を通して給水ピュレット（あるいは給水量測定ピュレット、これはバルブ V_2 で変換）と排水ピュレット（あるいは排水量測定ピュレット、バルブ V_3 で変換）に空気圧 U_{a1} が負荷される。この空気圧はピュレット内の水面に作用し、水圧として試料に負荷される。

流量・水位測定部の詳細図を図-1(c) に示す。4本のピュレットは右から給水ピュレット、給水量測定ピュレット、排水ピュレット、排水量測定ピュレットである。給水・排水ピュレットは 50 cm³ 計測用で、0.5 cm³ ごとに目盛りが付いている。給水量・排水量測定ピュレットは 10 cm³ 計測用で 0.1 cm³ ごとに目盛りが付いており 1/100 cm³ のオーダーで給水量、排水量が計測できる。水頭差は背板に付属している物差しを使って読み取る。

本実験は試料上下面のサクションをほぼ一定に保つ定水位型に準じた透水試験である。不飽和土中でも飽和土と同様にダルシー則は、

$$q = k \frac{\Delta H}{L} A \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k : 透水係数、 ΔH : 水頭差、 L : 試料長、 A : 試料断面積、 q : 流量

で表わされる。不飽和浸透の場合は、土が不飽和状態であることおよびそれに起因して水頭に含まれる圧力水頭が負の（サクション発生）状態であることが飽和透水の場合と異なるだけである。したがって、試料土の水分保持

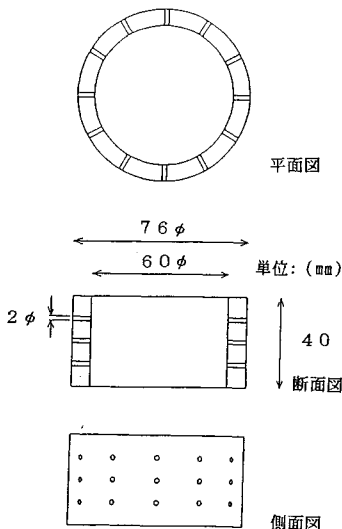


図-1(b) 供試体リング詳細図

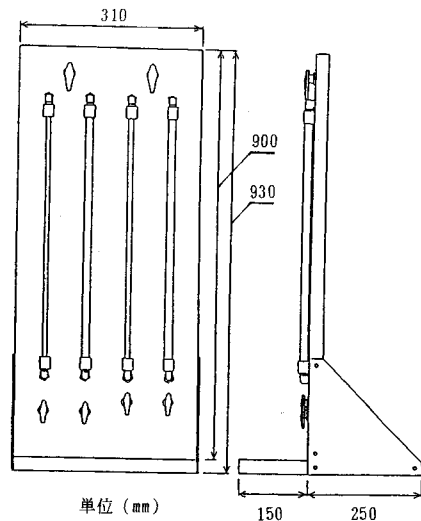


図-1(c) 流量測定部詳細図

特性から決まるサクシオンと飽和度が平衡した状態に落ち着いたときの流量 q および動水勾配 $\Delta H/L$ から不飽和透水係数を算出する試験である。

(2) 実験試料

実験に用いた試料は豊浦標準砂(以下、標準砂と略称)である。本研究は、不飽和土の透水試験法を究明することが目的であり、加圧型不飽和透水試験から得られた不飽和透水係数と他の方法で行われた透水試験の結果および不飽和透水係数推定式との対比が、標準砂については比較的行いやすいため、試験試料として使用した。また、標準砂より透水性の低い長良川堤防シルト(以下、シルトと略称)に対しても数ケースの試験を行った。

試料は標準砂、シルトともに自然乾燥状態で、供試体は自然乾燥試料に、設定初期含水比に見合った水を加えて作成した。標準砂、シルトの比重は、それぞれ 2.645, 2.712 であった。

(3) 実験方法

加圧型不飽和透水試験の方法を次に順を追って示す。

① 上蓋、底板に埋め込んだ上部、下部フィルターを飽和させ、フィルターの目詰まりを防ぐため、フィルター表面に汚紙を敷く。試料充填時には、別途求めておいた試料の水分保持特性からわかる、飽和度に応じたサクシオンをフィルターに与えた状態で、試料とフィルターを接触させることにより試料の初期飽和度の変化を微小にする。

② 供試体リングの上下端に漏水防止用のグリースを塗り底板に固定する。供試体リングは3種類あるが、今回の実験では、均質試料のつくりやすさ、飽和度分布の一様性を考えて高さ 40 mm のリングを使用した(図-1(b))。

③ 設定初期飽和度に応じた試料を4層(1層は10 mm)に分けて供試体リングに充填する。リングには図-1(b)に示すように多数の小孔が空いているため、標準砂のように粘着力のない土では試料を詰めるとき、この小孔から試料が少量こぼれるのを防ぐ必要がある。今回の実験では、先端を削ったマッチ棒を小孔に差し込んで、塞いだけれども試験時には開放した。サクシオンが小さく、飽和度も90%以上になると土粒子が少し流出することがあるので、今後改良の余地がある。

④ 供試体リングに上蓋を載せる。リングと上蓋を固定し、供試体とフィルターを密着させ気泡の残留を防ぐため、上蓋に押え荷重を掛ける。

⑤ 給水ビュレット、排水ビュレットに空気圧 U_{a1} を負荷し、所定の水位、水頭差に修正する。このとき図-1(a)バルブ V_4, V_5 はまだ閉じておく。

⑥ 加圧室の空気漏れを防ぐため、セルの上下端にグリースを塗り、セルを上下板の間に固定する。固定後、

試料室内に測定しようとするサクシオンになるように側方空気圧 U_{a2} を負荷させる。

⑦ バルブ V_4, V_5 (図-1(a) 参照) を開き透水を開始する。

⑧ 給水量、排水量、水位の読みを一定時間おきに測定し、試料内の水の流れが定常になるまで続ける。

本実験は、定水位型に準じた透水試験であるが、流入・流出水量の影響で、試料上下面に作用させる水位変動を許している。そうした水位変動を極力小さくして試験を行うために、測定時間の間隔は、水位変動を目安とした。すなわち、ビュレット目盛りの読みやすさから水位変動が 0.3~0.4 cm になったところで、バルブ V_4, V_5 を閉じ、図-2に示す手順で水位を修正し、給水量および排水量を測定する。

本実験では、 Δt 時間中の水頭差 ΔH (cm) を透水前の給水ビュレット・排水ビュレットの水位 H_1 (cm), H_2 (cm), 透水後の水位 H'_1 (cm), H'_2 (cm) を用いて次のように表わした。

$$\Delta H = \frac{(H_1 - H_2) + (H'_1 - H'_2)}{2} \dots \dots \dots (2)$$

つまり透水前の水頭差と、透水後の水頭差の平均を Δt 時間中の水頭差としたのである。このように式(2)を

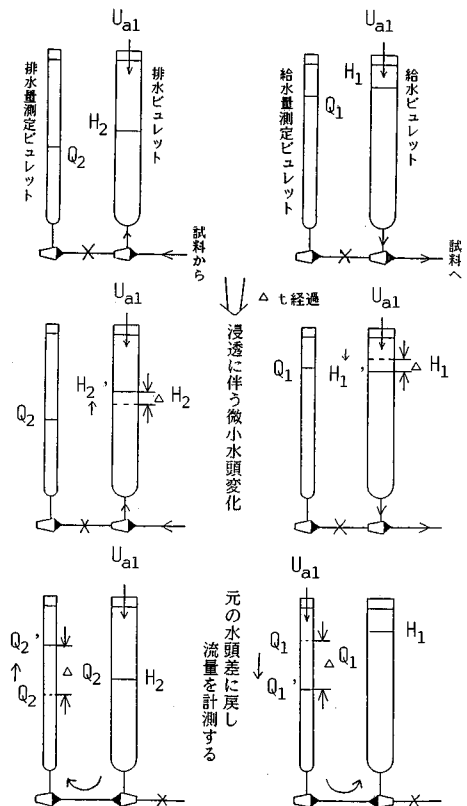


図-2 水位・流量修正法の説明図

用いて、 Δt 時間中の水頭差を算出することにより、水位変動による透水係数の推定誤差を防ぐことができる。また、 Δt 時間中の給水量 ΔQ_1 (cm³) と排水量 ΔQ_2 (cm³) が等しくなったとき、すなわち

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = q \dots\dots\dots (3)$$

のとき、水の流れは定常状態になったと考え、そのときの流量、動水勾配から不飽和透水係数を算出する。

4. 実験結果と試験指針の考察

(1) フィルターの選択

フィルターにはセラミック1種、ガラスフィルター3種類を用意したが、主として使用したフィルターの物性を表-1に示した。

G4フィルターを用いた標準砂の試験結果を図-3に示す。式(1)から透水係数を求めるには、試料上下面の損失水頭(ΔH)を知る必要があるけれども、実験では、上下のフィルターを介した見掛けの損失水頭(ΔH_F)しか測定できない。したがって、上下のフィルターの透水係数(k_{F1} , k_{F2})を別途求めておき、それを用いて

$$\Delta H = \Delta H_F - \frac{dq}{A} \left(\frac{1}{k_{F1}} + \frac{1}{k_{F2}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

より推定した。ここで、 d はフィルター厚さ(上下とも同じ)を示す。なお、試料とフィルターの間には置いた濾紙の厚さはきわめて薄いので、その補正は考えない。フィルターの補正をしないで算出した見掛けの透水係数に比べて、修正により大幅に改善されて、河西らの実験値に近づいているが¹¹⁾、G4フィルターの透水係数が小さすぎるため、補正の限界を示している。

G3フィルターを用いた標準砂の試験結果を図-4に示す。河西・塩崎らによると、Richardsの加圧型透水試験装置では、高飽和度において透水係数のばらつきが大きく、高飽和度領域で含水量を一定に保つのは難しいとされているが、図-4に示す今回の加圧型不飽和透水試験の結果においては、そのようなばらつきは生じていない。水分特性曲線から考察すると、傾きの小さい中飽和度でこそ、試料の含水量を一定に保つことが難しいと思われるが、今回の実験では、その領域でもばらつきを生じなかった。図-4において×印は見掛けの不飽和透

表-1 板状フィルター

種類 物性	セラミック	ガラスフィルター G4	ガラスフィルター G3
公称開孔径	0.2~0.5 μ m	5~10 μ m	25~30 μ m
板厚	6mm	6mm	6mm
A. E. V. 飽和時の 透水係数	$3.4 \sim 3.6 \text{ kgf/cm}^2$ $(6.6 \sim 7.9) \times 10^{-7}$ cm/S	$0.20 \sim 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ $(1.0 \sim 1.8) \times 10^{-5}$ cm/S	$\text{約} 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ $(2.3 \sim 2.8) \times 10^{-3}$ cm/S

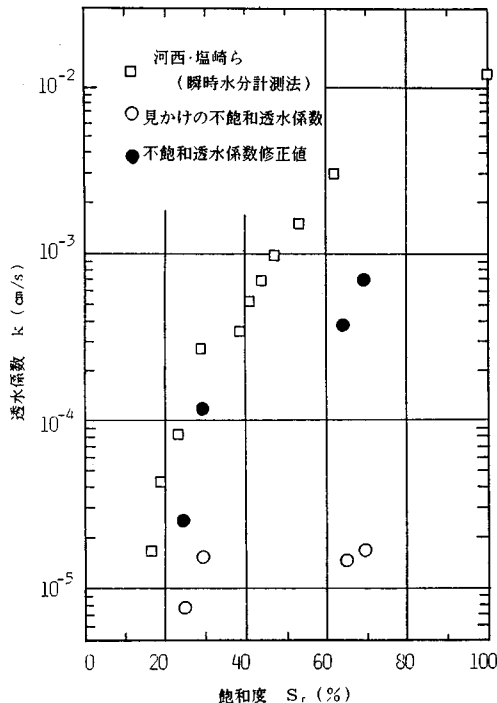


図-3 加圧型不飽和透水試験結果 (G4フィルター)

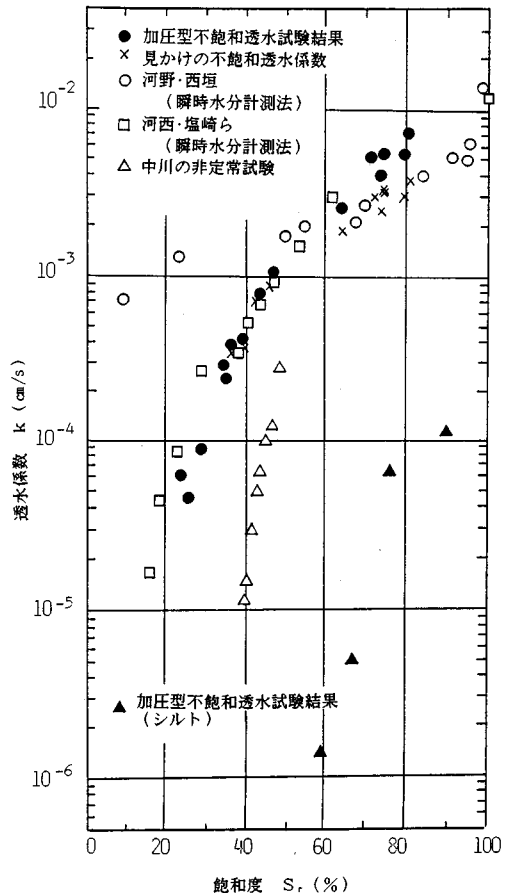


図-4 加圧型不飽和透水試験結果 (G3フィルター)

水係数、●印は修正を施した不飽和透水係数（以後、修正値を実験値とよぶ）であり、低飽和度領域では修正の量が小さく、×印は●印に重なってしまっている。

標準砂に対する他の研究者の他の方法で行われた不飽和透水試験の結果も図-4に示す。いずれも乾燥密度を1.5 g/cm³程度にコントロールした豊浦砂の結果で、今回の試験試料とほぼ同一条件のものであると判断した。

●印は加圧型不飽和透水試験結果を、○印は河野・西垣による瞬時水分計測法の結果¹⁾を、□印は河西・塩崎らの鉛直一次元排水試験結果¹¹⁾（瞬時水分計測法）を、△印は中川の非定常透水試験結果¹²⁾を表わしている。いずれの実験も試料は標準砂である。本実験の結果は、河西・塩崎らの鉛直一次元排水試験結果とほぼ一致し、河野・西垣の瞬時水分計測法から得られる不飽和透水係数より小さな値となり、中川の非定常透水試験の結果より大きな値を取る。ガラスフィルターG3は、ガラスフィルターG4に比べ約100倍の透水性をもっているため、定常状態においてフィルター内で消費されるエネルギー（水頭）が少ない。そのため、有効損失水頭 ΔH の算出精度が上がり、不飽和透水係数の修正の幅も小さく、修正精度も上昇する。しかし、ガラスフィルターG3を使用しても、飽和度が高くなるにつれ、試料の透水係数が大きくなり、相対的にフィルター補正が効いている。

図-4にはシルトに対する結果も併記している。2オーダー低い透水性の試料であるが、フィルターG3のA.E.V.の制約のため低飽和度まで測定できないが、60%までは計測された。

上述した実験の際に生じているフィルター補正の度合を示すために図-5には全水頭差 H に対する土試料に負荷されている有効水頭差 h の比を飽和度に対して示した。標準砂でもG4フィルターを使用した $S_r=60\sim$

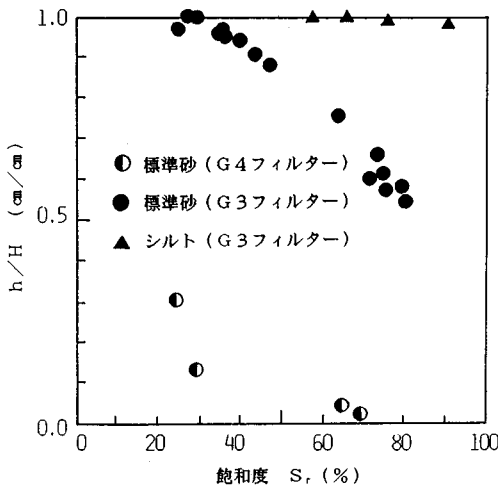


図-5 $S_r \sim h/H$ の関係 (G3 フィルター)

70% 付近のときの h/H は非常に小さく、精度的に問題があること、標準砂ではG3程度の透水性をもつフィルターが必要なことを示している。一方、シルトにG3を使用した場合はフィルター補正が微小である。しかし、A.E.V.の関係でシルトに対してはG3より細かい、G4との中間的なフィルターの方が低飽和度測定のために必要であることがわかる。

(2) 加圧 (空気圧負荷) による試料内飽和度の様性について

これまでに述べた加圧型不飽和透水試験の結果は、飽和度～透水係数の関係で整理してきたが、ここで用いた飽和度とは、直径60 mm×高さ40 mmの試料の平均飽和度であり、試料内の飽和度分布にばらつきがないのかが懸念される。また、サクシオン、含水比のコントロールのために、供試体リングの小孔を通して空気圧が試料に負荷されるため、試料内の円周方向にも飽和度のばらつきが懸念される。

加圧型不飽和透水試験後の試料の飽和度分布を表-2に示す。表-2(a)は、ガラスフィルターG3使用時における標準砂の飽和度分布を、表-2(b)は、シルトの飽和度分布をそれぞれ表わしている。表中のサクシオンは、試料上面のサクシオンと試料下面サクシオンの平均値である。サクシオンは空気圧と水圧の差として計算求めた。これらの表に示すように、試料内の飽和度のば

表-2(a) 試料内の飽和度分布 (標準砂, G3 フィルター)

CASE	A-1	A-2	A-3
S_r (%)	S_r (%)	S_r (%)	S_r (%)
上部	69.18	27.25	29.26
中部	68.40	28.60	23.02
下部	69.40	32.00	22.19
外周部	68.33	27.63	23.92
内周部	72.66	28.70	24.37
サクシオン (cm水頭)	14.6	34.6	41.6
有効損失水頭 (cm)	0.19	1.04	2.46
側方空気圧 (kgf/cm ²)	0.310	0.330	0.337
サクシオン水頭差 (cm水頭)	-3.81	-2.96	-1.54
初期飽和度 (%)	50.0	50.0	50.0
初期含水比 (%)	19.27	8.83	7.91
初期乾燥密度 (g/cm ³)	1.50	1.50	1.50

表-2(b) 試料内の飽和度分布 (シルト, G3 フィルター)

CASE	B-2	B-3	B-4	B-5
S_r (%)	S_r (%)	S_r (%)	S_r (%)	S_r (%)
上部 (内)	73.63	47.70	66.63	38.44
上部 (外)				36.05
下部 (内)	75.05	46.12	61.71	36.19
下部 (外)				35.43
サクシオン (cm水頭)	14.6	25.6	23.6	28.6
有効損失水頭 (cm)	4.78	6.94	5.94	7.39
側方空気圧 (kgf/cm ²)	0.310	0.322	0.311	0.326
サクシオン水頭差 (cm水頭)	0.78	2.94	1.94	3.39
初期飽和度 (%)	50.0	50.0	50.0	50.0
初期含水比 (%)	21.85	*	21.17	10.51
初期乾燥密度 (g/cm ³)	1.50	1.50	1.50	1.50

*測定されていない

らつきは上下方向、円周方向ともわずかであって、大きな問題でないと考えられる。なお、不飽和土中に空気圧を負荷することにより混相流が生じるが、透気に伴う土中水移動が生じる。このために間隙水分分布の一樣性が失われるのではないかという懸念があったが、鉛直一次元現象では、実験的にも¹³⁾理論的にも¹⁴⁾透気に伴う不飽和土中の飽和度分布は一樣になる方向に進行することを確認している。この性質は本研究の空気圧負荷という操作が要素試験としての条件を充足する作用に寄与している、上述の測定された飽和度分布の一樣性を発生させていると考えられる。

(3) 負荷すべき動水勾配の大きさ

試料に与える水頭差が大きくなると、試料上端、試料下端に負荷されるサクシジョンの差が大きくなり、試料中の飽和度分布にばらつきを生じる原因となる。また不飽和土の透水試験では、飽和度の低下に伴い試料の透水係数が低下し、計測する流量も少量となる。少量の流量を精度良く計測するには限界があり、精度向上を図るには、十分な流量が必要となる。そのために、十分大きな水頭差が必要となる。飽和土の定水位透水試験の場合には、乱流を防ぎ層流(Darcy則が成立する)状態での試験とするため、レイノルズ数が10以下の範囲での試験が推奨され、このときの動水勾配の上限は0.3と規定されている¹⁵⁾。しかし不飽和土の場合、透水係数自身が小さくなり流速も減少するため、上記の規定に関する留意は、さほど必要ないものとする。

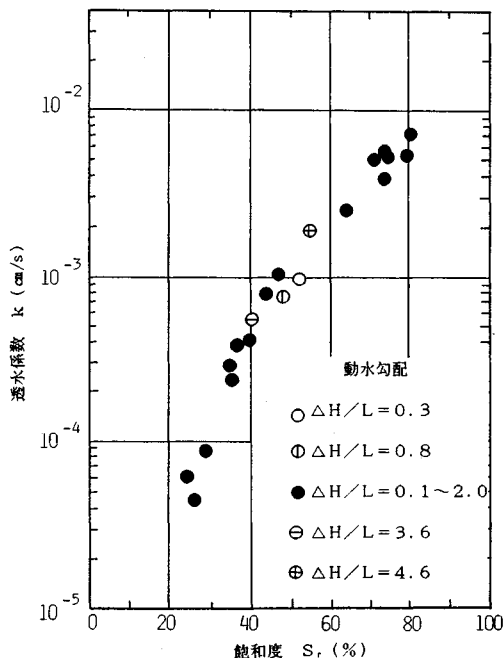


図-6 動水勾配の検定実験結果 (G3 フィルター)

表-3 大きな動水勾配を負荷したときの試料内の飽和度分布

CASE	D-3	D-4
	Sr (%)	Sr (%)
上 部	43.61	58.76
下 部	37.92	50.79
サクシジョン (cm水頭)	22.6	24.6
有効損失水頭 (cm)	14.49	18.42
側方空気圧 (kgf/cm ²)	0.319	0.319
サクシジョン水頭差 (cm水頭)	10.49	14.42

動水勾配検定のための加圧型不飽和透水試験の結果を図-6に示している。動水勾配は、0.3~4.6の範囲である。図-6に示した各点は、試料飽和度の平均値に対する不飽和透水係数としてプロットしてある。また表-3に水頭差の大きい Case D-3, Case D-4 における試験後試料の飽和度分布を示す。前述した表-2で述べた飽和度分布に比べ、水頭差が大きい分、上下部の飽和度の差が幾分大きくなっている。しかし、図-6に示す飽和度~透水係数の関係でみると、各実験結果のばらつきはほとんどなく、この程度の飽和度分布は概略的に大きな差異を生じる原因とみなさなくてよさそうである。

(4) 試験時間

試験後の試料の飽和度 S_r と Δt (水位修正を必要とするまでに要する時間) との関係調べると、飽和度が高くなれば試料の透水性が上昇し、 Δt が短くなる傾向が明確に現われる。ガラスフィルターG3を使用した加圧型不飽和透水試験では、高飽和度の試料については、定常状態に達するまでに2時間~3時間、低飽和度の試料については、6時間~12時間要した。

G3 フィルターを使用した場合の標準砂、シルトの加圧型不飽和透水試験において試験開始から、水位の修正

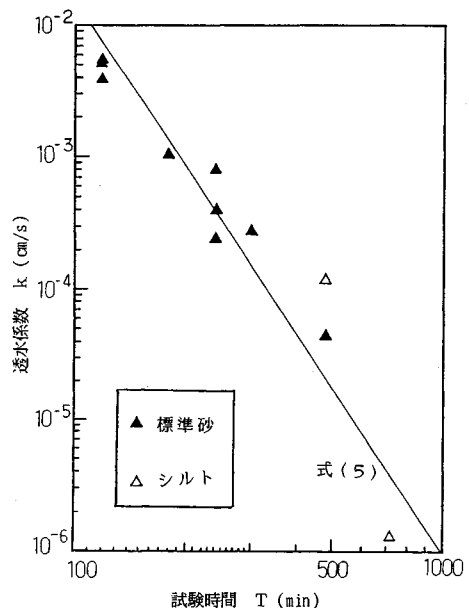


図-7 試験時間と透水係数の関係

を行いながら定常状態に至るまでに要するおおむねの時間 T (min) と試料の透水係数との関係を図一7に示す。初期含水比は8~24%と試料によって多少の差があったものの、試料内の流れが、定常状態に至るまでに要する時間は、試料の透水係数によるところが大きいことが認められ、回帰分析を行ったところ次式で近似される。

$$T = 37.88 k^{-0.238} \text{ (min)} \dots\dots\dots (5)$$

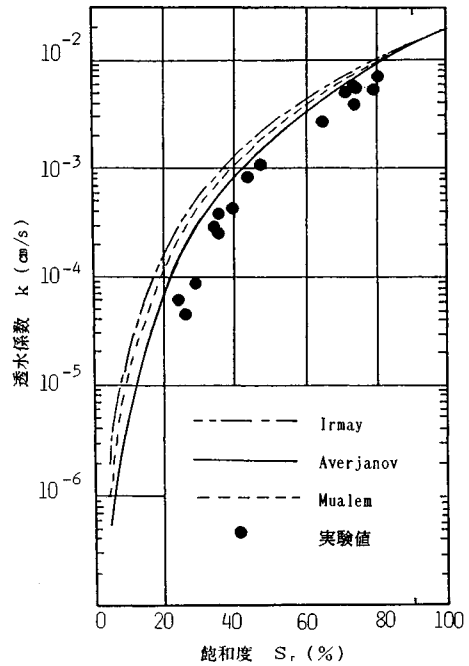
ただし k : cm/s

(5) 飽度の計測および“連続試験法”

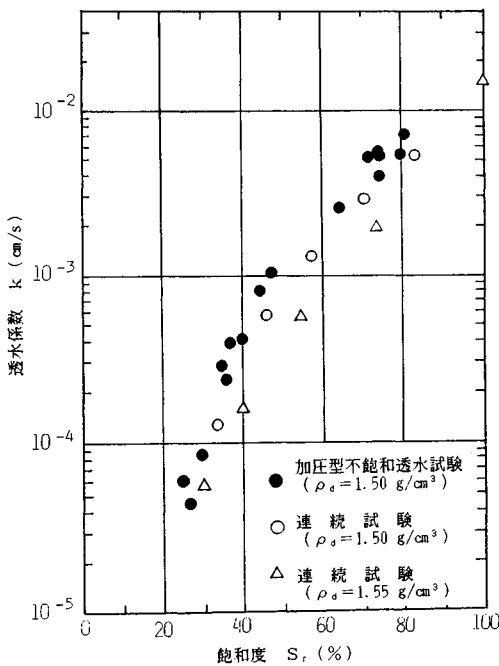
試験時間の短縮と試験の簡便化を図るため“連続試験法”（仮称）を実施した。この方法は、試料の飽和度を負荷する空気圧によって段階的に変化させ、飽和度変化を給水量・排水量から推定し、各段階での飽和度および透水係数を連続的に求めようとするものである。この方法は、試料を充填する手間を省き、各段階で定常状態に達するまでの時間が短縮できるという特長を有する。

実験は標準砂を試料として使用し、フィルター材としてガラスフィルター-G3（厚さ6mm）を使用し、乾燥単位質量 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ および、 $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ の2ケース実施した。 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ のときの飽和透水係数 k_s は $2.01 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であり、 $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ のときの飽和透水係数 k_s は $1.52 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であった。図一8の○印が連続試験の結果であり、●印は先述した標準砂（ $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ ）の加圧型不飽和透水試験の結果である。 $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ のときの結果も△印で比較のためあわせて示した。連続試験は、かなり良好な結果を示して

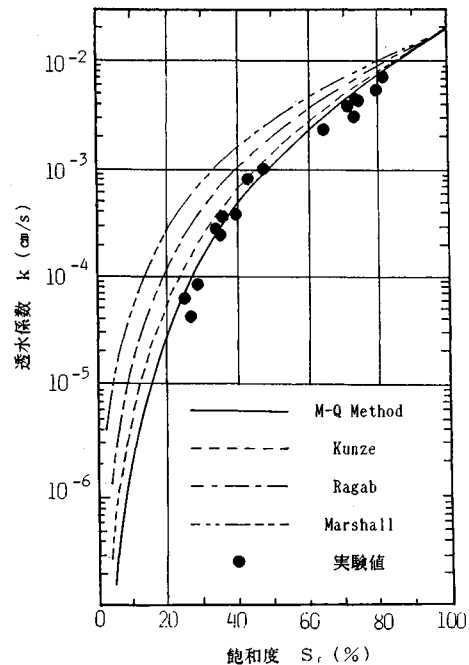
おり、十分適用可能であると思われる。なお、連続試験法では、低飽和度の試料の側方空気圧を徐々に小さくして、飽和度を上昇させる方法が制御しやすい。



図一9 不飽和透水係数推定式との対比（ベキ関数型）



図一8 連続試験結果



図一10 不飽和透水係数推定式との対比（排水過程の水分特性曲線に基づくもの）

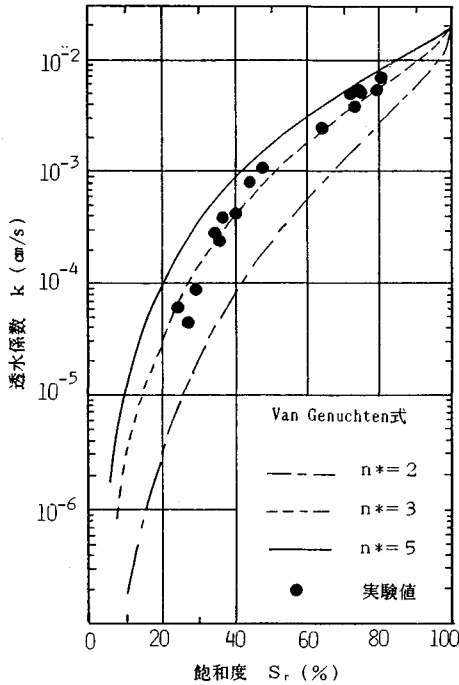


図-11 不飽和透水係数推定結果との対比 (Van Genuchten 式)

5. 種々の不飽和透水係数推定式との対比

先述した試験法で推定した不飽和透水係数の妥当性を調べるため、既往の提案されている推定法に基づく計算値と対比しておく¹⁶⁾。

多数の推定式が提案されているが、それらは①ベキ関数型、②ジャクソン法¹⁶⁾、③ファン・ゲヌヒテン式、に大別される。

図-9 にベキ関数型の不飽和透水係数推定式の適用結果を示す。図-10 に Jackson の式の適用結果を、図-11 に Van Genuchten の不飽和透水係数推定式の適用結果を示す。いずれの図にも加圧型不飽和透水試験の結果をあわせて示している。井上ら¹⁶⁾は、砂丘砂に対する適用結果より Kunze, MQ 法, Mualem の計算値は実験結果に比較的良く一致していると述べている。今回、標準砂に対していくつかの不飽和透水係数推定式を適用した図-10～図-11でも、井上らと同様の傾向があり MQ 法, Kunze は実験値と特に良く一致した。本研究で検討した加圧型の透水試験法による測定値は、フィルター補正, 流量測定精度の改善などの工夫により良好なものとなっていると考えられる。

6. 結 論

標準砂, シルトに対して行った加圧型不飽和透水試験を通して得られた結論は次のようである。

(1) フィルターの透水性の影響を考慮した修正を施すことにより、加圧型不飽和透水試験は、簡便で有効な普及型不飽和透水試験法となる。

(2) 加圧型不飽和透水試験では、フィルター材の選択はきわめて重要であり、試料に負荷すべきサクシオンと A. E. V. との関係を検討したうえで、できるだけ透水性の高いフィルターを使用することにより、不飽和透水係数算出精度の向上、試験時間の短縮を図ることができる。

(3) 同一フィルターを使用した場合、試験開始後、水位の修正を行いながら定常状態に至るまでに要する時間は、初期含水比によらず、試料の透水係数によるところが大きい。ガラスフィルター G3 を使用した場合、試料の透水係数が $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s のとき、定常状態に至るまでの時間は 2～3 時間で、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s のとき、8～12 時間であった。

(4) 試料上面と試料下面に負荷されるサクシオンの差が数 cm 程度であるとき、試料内の飽和度のばらつきは上下方向について数%、円周方向については 1～2% であった。

(5) 動水勾配 0.3～4.6 の範囲で透水試験したところ、動水勾配の大小は有意な差異を生じる原因にはならない。

(6) 今回の加圧型不飽和透水試験装置では、給水ビュレット～試料～排水ビュレットに至る透水経路が閉じ、給水量・排水量を $1/100$ cm³ のオーダーで精度良く計測することもできる。そのため、本試験装置では、試料セット時の含水量と給水量・排水量から試験後の試料の含水量をおおむね推定することができる。

(7) 試料セット時の含水量と給水量・排水量から算出される試験後の試料の含水比は、炉乾燥から求めた含水比をおおむね的確に表現しており、「連続試験」は、十分適用可能である。

本研究は昭和 62 年度, 63 年度の文部省科学研究費(試験研究(2), No. 62850093, 研究代表者: 宇野尚雄)の補助を受けた。関係者各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河野伊一郎・西垣 誠: 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 307, pp. 59～69, 1981.
- 2) Gardner, W. R.: Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 20, pp. 317～320, 1956.
- 3) Topp, G. C.: Soil-water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteretic domain model, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 33, pp. 645～651, 1969.
- 4) Philip, J. R.: Numerical solution of equations of the

- diffusivity concentration dependent, Trans. Faraday Soc., Vol. 51, pp. 885~892, 1955.
- 5) Klute, A. : The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils, Soil Sci., Vol. 113, No. 4, pp. 264~276, 1972.
 - 6) 農業土木学会編：土の理工学性実験ガイド(実験書シリーズ No. 1), 農業土木学会, pp. 106~113, 1983.
 - 7) Nakano, M. and Ichii, K. : Measurement and prediction of hydraulic conductivity in unsaturated porous mediums, Trans. JSIDRE., pp. 29~34, 1977.
 - 8) 塩沢 昌：定常法による不飽和透水係数の測定方法と精度について, 農業土木学会論文集, No. 106, pp. 73~79, 1983.
 - 9) Richards, L. A. : Capillary conductivity of liquids through porous medium, Physics 1, pp. 318~333, 1936.
 - 10) Richards, L. A. and Moore, D. C. : Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol. 33, pp. 531~539, 1952.
 - 11) 河西 基・田中靖治・駒田広也・塩崎 功：不飽和浸透特性に関する基礎的検討, 土質工学会「不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム」発表論文集, pp. 245~252, 1987.
 - 12) 中川加明一郎：不飽和土の透水試験の試み, 土質工学会「不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム」発表論文集, pp. 253~257, 1987.
 - 13) 宇野尚雄・小川隆幸：砂質土の透気性に関する実験的研究, 土質工学会「不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム」発表論文集, pp. 229~236, 1987.
 - 14) 宇野尚雄・佐藤 健・杉井俊夫・柘植浩史・小川隆幸：空気圧変化に伴う土中水移動について, 第 23 回土質工学研究発表会概要集, 2/2, pp. 1861~1862, 1988.
 - 15) 土質工学会編：土質試験法, 土質工学会, p. 353, 1979.
 - 16) 井上光弘・矢野友久・吉田 勲・山本太平・筑紫二郎：土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 土壌の物理性, No. 46, pp. 21~29, 1982.

(1989. 6. 5・受付)