

圧力トランスデューサを利用した 迅速変水位透水試験法

金 豊 多 満 田 幸 敦 徹 雄 敦*

Measurement of the Coefficient of Water Conductivity with a Pressure Transducer

Toru KON, Yukio TOYOMITSU and Atsushi TADA

Institute of Agricultural and Forestry Engineering, University of Tsukuba

I. まえがき

難透水性土壌（ここでは飽和透水係数 $=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下を考えた）の透水係数を求める場合、スタンドパイプを用いた従来の変水位透水試験法では、その測定に多くの時間を要し、温度管理や蒸発防止の面でも苦慮しているのが現状である。

測定時間を短縮するには大きな動水勾配を設定して透水試験を行う方法があるが、試料に大きな動水勾配がかかると圧縮が進行することが考えられ、好ましい方法とは言いがたい。

一方、難透水性土壌に対し、低動水勾配のもとで短時間に透水試験を行おうとすれば、試料内を浸透する水量は極微量となり、スタンドパイプでその量を正確に把握するのは困難となる。この微量な浸透量を正確に測定する方法として、Remy (1973) が圧力トランスデューサを利用する方法を提案している¹⁾。

しかし、その装置は三軸圧縮試験器や加圧ポンプを使った大がかりなものであり、透水係数の算出に用いる測定器の感度については、圧力トランスデューサの感度のみを考え、試料やその他の測定器の変形を考えていないなど、不十分な点が見られる。そこで著者等はこれらの問題点を修正し、圧力トランスデューサを用いた簡便な透水試験器を作成し、種々の土壌について透水係数の測定を行った。この測定において透水係数を求めるための測定器の感度が試料中の空気量によって変化することを明らかにし、試料中の空気量を考慮した測定器の感度の算定法を示した。

本試験器を用い上記感度を考慮して求めた透水係数とスタンドパイプを用いて求めた透水係数とを比較すると、両者の値はほぼ一致することが確認されたので、ここに紹介する。

II. 迅速変水位透水試験法の原理

スタンドパイプ（断面積 $a \text{ [cm}^2\text{]}$ ）を用いた従来の変水位法は、試料上下端の全水頭差が H_1 から $H_2 \text{ [cmH}_2\text{O]}$ に変化する水利条件のもとで断面積 $A \text{ [cm}^2\text{]}$ 、長さ $L \text{ [cm]}$ の試料を $a(H_1 - H_2) \text{ [cm}^3\text{]}$ の水量が流れるのに要する時間 $T \text{ [s]}$ を測定し、ダルシー則から次式で透水係数 $k \text{ [cm/s]}$ を求める方法である²⁾。

$$k_{15} = \mu_T \frac{a \cdot L}{A \cdot T} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 k_{15} : 15°C における変水位法による透水係数
 μ_T : 温度補正係数

一方、圧力水頭が $1 \text{ cmH}_2\text{O}$ 変化したときに圧力トランスデューサ受感部は $S \text{ cm}^3$ の体積変化を起こし、この変化量は圧力の大きさにかわらず一定である。このことを利用して、スタンドパイプの代わりに、この圧力トランスデューサを用いると、スタンドパイプを用いた変水位法と全く同じ原理で透水係数を求めることができる。すなわち、試料を流れる水量は $S(H_1 - H_2)$ で求められる。したがって、透水係数 K は次式で表される。なお、この S を以後測定感度 $\text{[cm}^3/\text{cmH}_2\text{O]}$ と呼ぶことにする。

* 筑波大学農林工学系

$$K_{15} = \mu_T \frac{S \cdot L}{A \cdot T} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(2)$$

K_{15} : 15°Cにおける迅速変水位透水試験法による透水係数

ここで $a \gg S$ であるので測定時間は非常に短くなる。ただし、測定器の測定感度は圧力トランスデューサ受感部のみでは決まらず他の要因も加わる。このことについてはIVで述べることにする。

III. 迅速変水位透水試験法の装置と測定方法

1. 装 置

試作した透水試験器の概要を図-1に示す。この試験器は従来のスタンドパイプ型透水試験器にコックと圧力トランスデューサを持続しただけの簡易なものである。ここで使用した圧力トランスデューサは、一般に測定器メーカーで市販されている。拡散型半導体圧力計で、その測定範囲は±100cmH₂O、測定精度は±0.5cmH₂O、

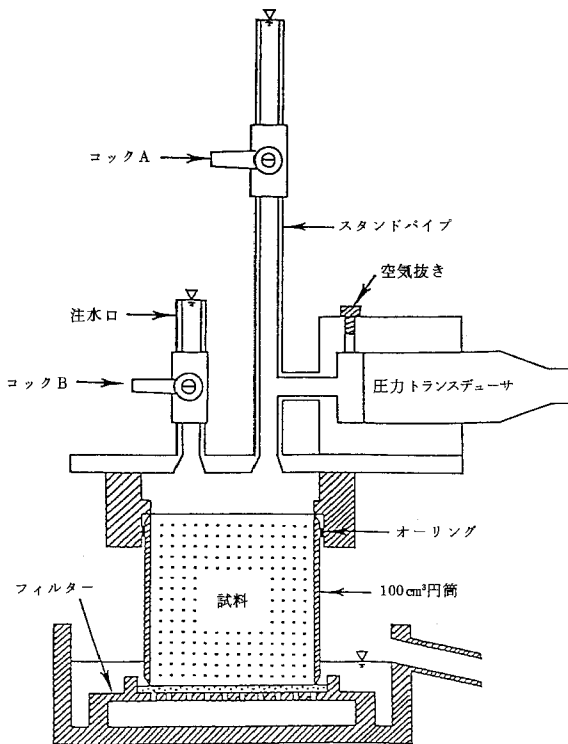


図-1 透水試験器の概要図

測定感度は $1.1 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{cmH}_2\text{O}$ である。測定圧力の読み取りはペンレコーダで行った。IVで詳述するが、この透水試験器内の水圧がかかる部分に体積弾性係数の小さい物質、例えばゴムやシリコンを多用すると透水試験の迅速性を損なうことになる。また、試験器内に空気が存在すると、大きな測定誤差を招くことになる。したがって、ゴム類の使用は試料と試験器の接続部にパッキングとしてオーリングを用いるにとどめた。また、試験器内に残留した気泡の確認が行えるよう、試験器各部に透明なアクリルや半透明のプラスチックを用いた。試験器内に残った気泡はコックから排出する。

この装置で測定できる試料は、直径5.0cm、長さ5.1cmの通常用いる100cm³円筒試料である。

2. 測定方法

本透水試験は以下の手順で行った。

- ① 試料を透水試験器にセットする。
- ② コックA、Bを開き、注水口から脱気水を注ぎ透水試験器内を水で満たし、コックBを閉じる。このとき、試験器内に気泡が残留することのないよう十分注意する。
- ③ 透水試験器が透水試験中動くことのないよう固定する。
- ④ スタンドパイプ上端まで脱気水を注ぎ、そのとき、ペンレコーダがスタンドパイプ内水位と排水位との差（本実験では25cmH₂O）、すなわち、試料上下端の全水頭差を示すように圧力トランスデューサの読みを調整する。
- ⑤ コックAを閉じ、試料上下端の全水頭差がH₁からH₂になるまでの時間を記録し、その結果をもとに(2)式より透水係数を算出する。なお、圧力トランスデューサの受感部の変形と全水頭差の変化との関係を図示すると図-2のとおりである。

IV. 透水試験器の測定感度

前述したように透水試験器の測定感度は圧力トランスデューサの測定感度のみで決まるものではない。すなわち、圧力変化を受ける系内において、体積変化を起こすものがあれば、それらの影響を受けることになる。そこで圧力トランスデューサや試料を含めた透水試験器全体の感度を求めておく必要がある。

圧力の変化に対して体積変化量の大きい空気は、測定感度に関して、最も大きい影響力を有する。したがって、ここでは試料が完全飽和の場合と、閉鎖不飽和の場合とに分けて考える。

圧力トランスデューサを利用した迅速変水位透水試験法

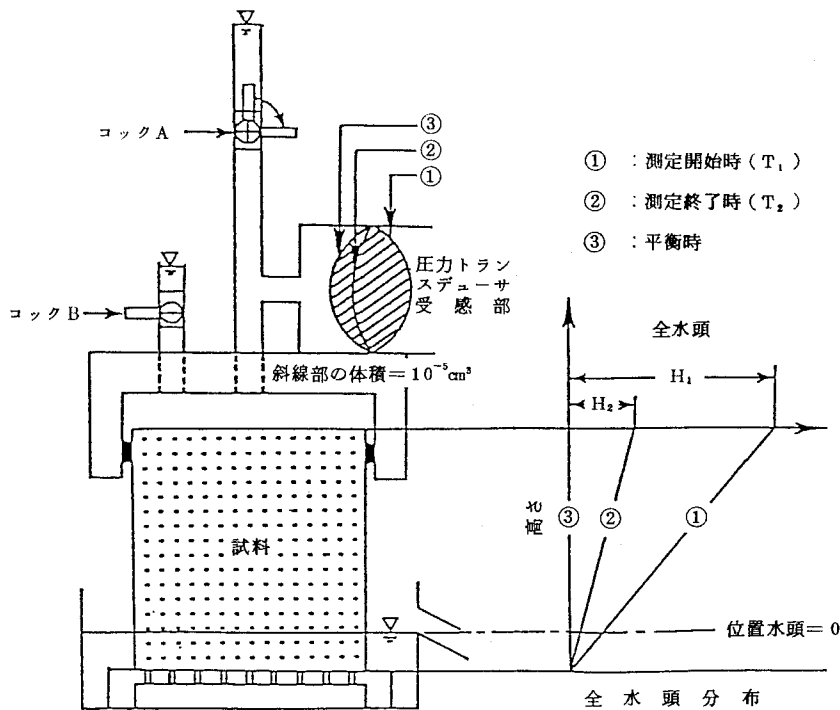


図-2 コック A を閉じたときの試料内の全水頭変化

1. 完全飽和試料の場合

試料が完全な飽和状態にあるときの透水試験器全体の測定感度を S_1 とすると、この S_1 は次のように表すことができる。

$$S_1 \Delta H = \Delta V_s + \Delta V_x + S_0 \Delta H$$

$$S_1 = (\Delta V_s + \Delta V_x) / \Delta H + S_0 \quad \dots(3)$$

ここで、

ΔH : 測定中の圧力トランスデューサの圧力変化量 (絶対値) [cmH₂O]

ΔV_s : 測定中の土粒子の体積変化量 [cm³]

ΔV_x : 測定中の圧力トランスデューサ受感部以外の試験器の体積変化量 [cm³]

S_0 : 圧力トランスデューサ本体の測定感度 (cm³/cmH₂O)

(3)式における S_0 は定数であるが、 $(\Delta V_s + \Delta V_x) / \Delta H$ は定数であるとは限らない。そこで、飽和時の本透水試験器の感度 S_1 が定数かどうかを調べるため、完全に飽和させたセッコウ試料およびポーラスカップ試料について、 $\ln H-T$ 関係を実測し検討した。試料の完全飽和に当たっては、試料を水中に浸し、-75cmHg以下の減圧度を3時間以上保ち、試料から気泡が出なくなった

ことを確認したうえで、透水試験に供した。

$\ln H-T$ 関係は、ダルシー則より次式で表される。

$$\ln H = -\frac{K \cdot A}{S_1 \cdot L} \cdot T + C \quad \dots(4)$$

(Cは積分定数)

K, A, L, C は定数であるから、 S_1 が定数であれば $\ln H-T$ 関係は直線関係になるはずである。

実測結果は図-3に示すように $\ln H-T$ 関係は直線関係にあり、試料が完全に飽和しているときの透水試験器全体の感度 S_1 は定数として扱えることがわかった。

そこで、この S_1 の値を実験により求めた。すなわち、セッコウが試料およびポーラスカップ試料について、スタンドパイプを使った透水試験により試料の透水係数 k_{1s} を実測した。次に同一試料について、本透水試験器を使った透水試験を行い、試料上下端の全水頭差 H_1 から H_2 に変化するに要する時間 T を測定することで、(2)式から $K_{1s} = k_{1s}$ 、 $S = S_1$ としてその結果を示したのが表-1である。-75cmHg減圧飽和試料の実測測定感度は $3.2 \sim 3.4 \times 10^{-4}$ cm³/cmH₂O の範囲であり、安定した値が得られている。したがって、試料が完全に飽和しているときの本透水試験器の測定感度 S_1 は 3.3×10^{-4}

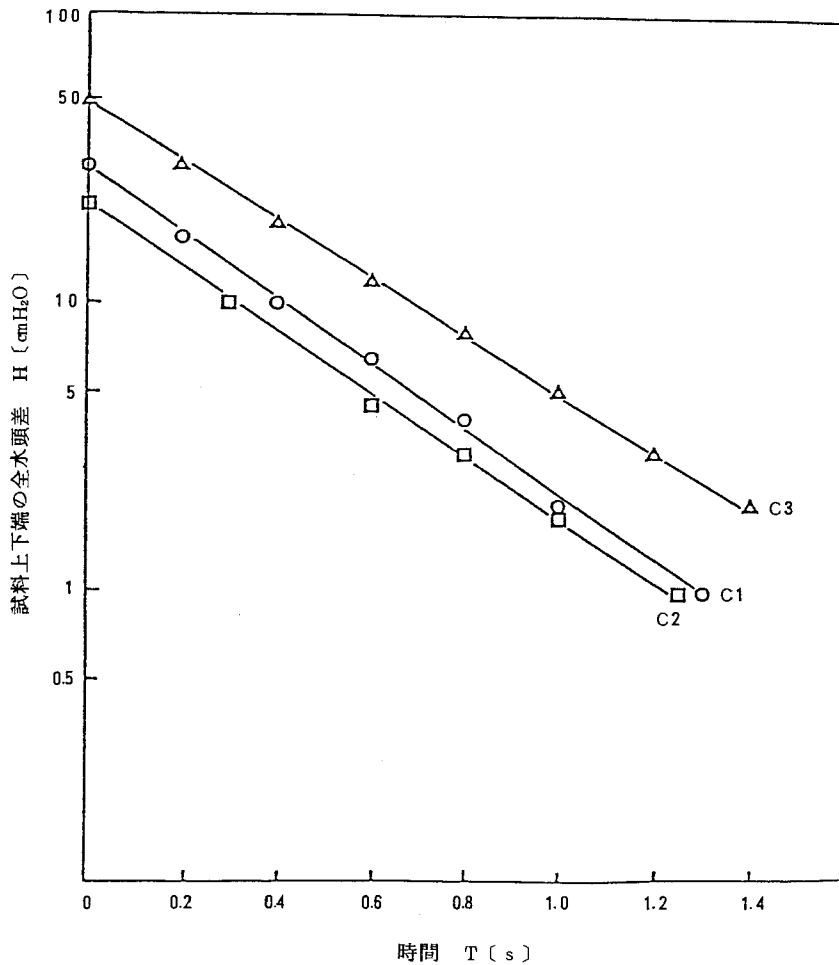


図-3 - 75 cm Hg 減圧飽和したセッコウ試料の $1nH - T$ の関係

cm³/cmH₂Oと考へた。この測定感度は、従来法のスタンドパイプの断面積に相当するものである。したがって、例えば、断面積0.55cm²のスタンドパイプを使った透水試験法と本透水試験器を使った透水試験法の所要測定時間を動水勾配条件を同じにして比較すると、理論的には本迅速法は $3.3 \times 10^{-4} / (0.55 \times 1) = 1 / 1700$ の測定時間で済むことになる。しかし、透水性のよい土壌の飽和透水係数を測定しようとするれば、圧力が瞬時に平衡に達してしまうため、記録計からその速度は読みとれない。本透水試験器で測定できた完全飽和試料の透水係数の上限は約 5×10^{-4} cm/sであった。

2. 閉鎖不飽和試料の場合

1) 理論式 試料が閉鎖不飽和の状態にあるときの、

透水試験器全体の測定感度を S_2 [cm³/cmH₂O] とすると、 S_2 は次のように表すことができる。

$$S_2 \cdot \Delta H = \Delta V_s + \Delta V_a + \Delta V_x + S_0 \cdot \Delta H$$

$$S_2 = S_1 + \Delta V_a / \Delta H \dots\dots\dots(5)$$

ここで ΔV_a : 測定中の試料内気泡の体積変化量 [cm³]
 (5)式の ΔV_a は次のように表すことができる。試料上端における絶対圧が P_1 [cmH₂O] の時を測定開始時 (T_1)、試料上端における絶対圧が P_2 [cmH₂O] の時を測定終了時 (T_2)、試料下端の絶対圧を P_3 [cmH₂O] とすると、試料内における高さ方向の圧力分布は次のように表せる (図-4)。

$$P_{T_1}(Y) = P_3 + (P_1 - P_3) Y / L \dots\dots\dots(6)$$

$$P_{T_2}(Y) = P_3 + (P_2 - P_3) Y / L \dots\dots\dots(7)$$

圧力トランスデューサを利用した迅速変水位透水試験法

表-1 飽和時の測定感度 S_1

試料	試料No.	V_a (cm^3)	k_{15} (cm/s)	S_1 ($\text{cm}^3/\text{cm H}_2\text{O}$)	S_1 の平均値 ($\text{cm}^3/\text{cm H}_2\text{O}$)
セッコウ ^{注1)}	C 1	0	1.9×10^{-4}	3.2×10^{-4}	3.3×10^{-4}
	C 2	0	1.7×10^{-4}	3.2×10^{-4}	
	C 3	0	1.5×10^{-4}	3.2×10^{-4}	
ポーラスカップ ^{注2)}	P 1	0	—	3.3×10^{-4}	

注 1): 従来の変水位法による透水係数 k_{15} と迅速法による透水係数 K_{15} が等しいとして、(2) 式から逆算により測定感度 S_1 を求めた。

注 2): ポーラスカップの断面積 A は測定困難であるので、 $k_{15} = K_{15}$ として、(1) 式、(2) 式から、 $S_1 = a \cdot T / T'$ で求めた。ここで、

T : 迅速法による測定時間 (s)

T' : 従来の変水位法による測定時間 (s.)

V_a : 透水試験終了直後の試料内気泡体積

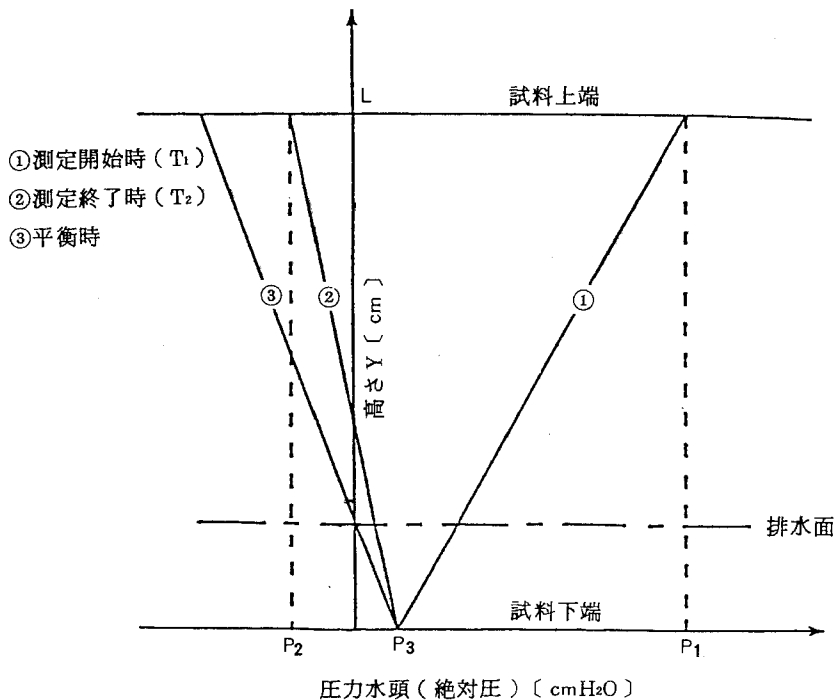


図-4 迅速変水位透水試験時の試料内の圧力水頭分布

ここで、

$P_{T_1}(Y)$: 測定開始時 (T_1) の高さ Y における絶対圧
[cmH₂O]

$P_{T_2}(Y)$: 測定終了時 (T_2) の高さ Y における絶対圧
[cmH₂O]

Y : 試料下端からの高さ [cm]

L : 試料長 [cm]

いま、測定が短時間で終了することから温度は一定と考えられるので、試料内の圧力分布が $P_{T_1}(Y)$ のとき、 V_{a1} の体積の気泡が試料内に均等に存在すると仮定すると、試料内の圧力分布が $P_{T_2}(Y)$ に低下したときの気泡の体積増加量 ΔV_a は、ボイルの法則から次のように表せる。

$$d\Delta V_a = \frac{P_{T_1}(Y) - P_{T_2}(Y)}{P_{T_2}(Y)} \cdot \frac{dY}{L} \cdot V_{a1} \dots (8)$$

ここで、

V_{a1} : 測定開始時 T_1 における試料内の気泡体積
[cm³]

(6)式、(7)式を(8)式に代入すると、

$$d\Delta V_a = \frac{P_1 - P_2}{L} \cdot \frac{Y}{P_3 L - (P_3 - P_2) Y} \cdot V_{a1} \cdot dY \dots (9)$$

(9)式を $Y=0$ から $Y=L$ まで積分すると

$$\Delta V_a = \frac{P_1 - P_2}{P_3 - P_2} \left\{ \frac{P_3}{P_3 - P_2} \ln \left(\frac{P_3}{P_2} \right) - 1 \right\} V_{a1} \dots (10)$$

(10)式を(5)式へ代入すると $\Delta H = P_1 - P_2$ であるから

$$S_2 = S_1 + \frac{1}{P_3 - P_2} \left\{ \frac{P_3}{P_3 - P_2} \ln \left(\frac{P_3}{P_2} \right) - 1 \right\} V_{a1} \dots (11)$$

ここで、大気圧を1000cmH₂Oとすると、 P_2 は試料上端上の水深3cmに相当するので $P_2 = 1003$ cmH₂O、 P_3 は、排水面が試料下端上1cmにあるとすると、 $P_3 = 1001$ cmH₂Oになる。ゆえに、(11)式は、

$$S_2 = S_1 + 5.0 \times 10^{-4} V_{a1}$$

となる。ここで、試験開始時の V_{a1} は実測できないので、透水試験後、試料の質量を測定し、-75cmHg減圧飽和したときの試料の質量との差を測定終了直後の試料内気泡体積 V_a として、 $V_{a1} = V_a$ とすると、

$$S_2 = S_1 + 5.0 \times 10^{-4} V_a \dots (12)$$

となる。

そこで、(12)式の理論式が実際に適合するかどうかを調べるために、セッコウ試料について、次の2通りの飽和处理を行い、試料内に存在する気泡体積を変えて、そのときの測定感度 S_2 を実測した。

①毛管飽和法：試料下端から水を供給し、毛管力を利用して水を上昇浸入させる方法

②-50cmHg減圧飽和法：毛管飽和させた後、試料を水中に浸し、-50cmHgまで減圧した状態の容器の中に約3時間静置して飽和させる方法

その結果を示したのが表-2である。透水試験の実測値によった測定感度 S_2' と試料内気泡体積の実測値から(12)式に従って算出した測定感度 S_2 とを比較すると、前者は後者に比べて若干小さめの値を示しているものの両者はほぼ近い値になっている。したがって、試料内の気泡体積 V_a と閉鎖不飽和試料の場合の透水試験器全体の測定感度 S_2 との関係は(12)式で表しても大きな違いとはならない。

表-2 閉鎖不飽和時の測定感度 S_2

試料	飽和方法	試料No.	V_a (cm ³)	k_{15} (cm/s)	S_2' (cm ³ /cm H ₂ O)	S_2 (cm ³ /cm H ₂ O)
セッコウ	毛管	C 1	3.7	1.0×10^{-4}	1.9×10^{-3}	2.2×10^{-3}
		C 2	3.3	8.9×10^{-5}	1.8×10^{-3}	2.0×10^{-3}
		C 3	3.8	8.3×10^{-5}	1.8×10^{-3}	2.2×10^{-3}
	-50cmHg 減圧法	C 1	2.1	1.5×10^{-4}	9.2×10^{-4}	1.4×10^{-3}
		C 2	2.1	1.3×10^{-4}	1.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}
		C 3	2.2	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}

S_2' : 従来の変水位法による透水係数 k_{15} と迅速法による透水係数 K_{15} が等しいとして、(2)式から逆算により求めた測定感度

S_2 : (12)式から求めた測定感度

V_a : 透水試験終了直後の試料内気泡体積

圧力トランスデューサを利用した迅速変水位透水試験法

V. 土壌試料を使った迅速変水位透水試験法の検証

迅速変水位透水試験法（以下、迅速法と略記する）で求めた飽和透水係数の妥当性に関して、同一土壌試料について迅速法で求めた透水係数とスタンドパイプを使った変水位透水試験法（以下、従来法と略記する）で求めた透水係数とを比較することで検討した。

迅速法による測定の際、適用する測定感度は、セッコウ試料およびポーラスカップ試料から求めた測定感度である。

1) 供試土

供試土は、茨城大学水田圃場の関東ローム耕盤層、土浦市沖宿の竜ヶ先層粘質土、および農業研究センター圃場の灰色低地土耕盤層の3種である。その物理性は表-3のとおりで行った。

試料の飽和は毛管飽和と-75cmHg減圧飽和との2通

りで行った。

2) 迅速変水位透水試験法による透水係数の測定結果の妥当性の検討

透水試験終了直後に測定した各試料中の気泡体積は表-4のとおりである。この表にみられるように、関東ロームではこの飽和の方法ではまだ空気を残しているため、(2)式を用いて測定感度を求め、(2)式から透水係数を求めた。なお、関東ロームについては、不飽和であったため S_2 が大きくなり、測定時間を長くとしたので、 10^{-3} cm/sオーダーの透水係数でも測定することができた。他の試料は気泡体積がほとんど0であったので、測定感度は飽和時の S_1 を用いて透水係数の計算を行った。

このように迅速法で求めた透水定数 K_{1s} を従来法で求めた透水係数 k_{1s} と比較すると図-5のとおりであり、比較的よく一致している。

以上のことから、試料中の気泡体積を考慮すると、本

表-3 供試土の土壌物理性

試料名		関東ローム	竜ヶ崎層粘質土	灰色低地土
採土深さ (cm)		17~24	3~8	21~26
真比重		2.58	2.64	2.69
乾燥密度 (g/cm ³)		0.86	0.95	1.25
三相分布	固相率 (%)	33.3	36.2	46.3
	液相率 (%)	60.9	61.8	51.7
	気相率 (%)	5.8	2.0	2.0
粒径組成 (%)	2~0.2 mm	4 *	7	6
	0.2~0.02 mm	32 *	16	26
	0.02~0.002 mm	35 *	36	34
	0.002 mm以下	29 *	41	34
土性名 (国際法)		Li C *	Li C	Li C

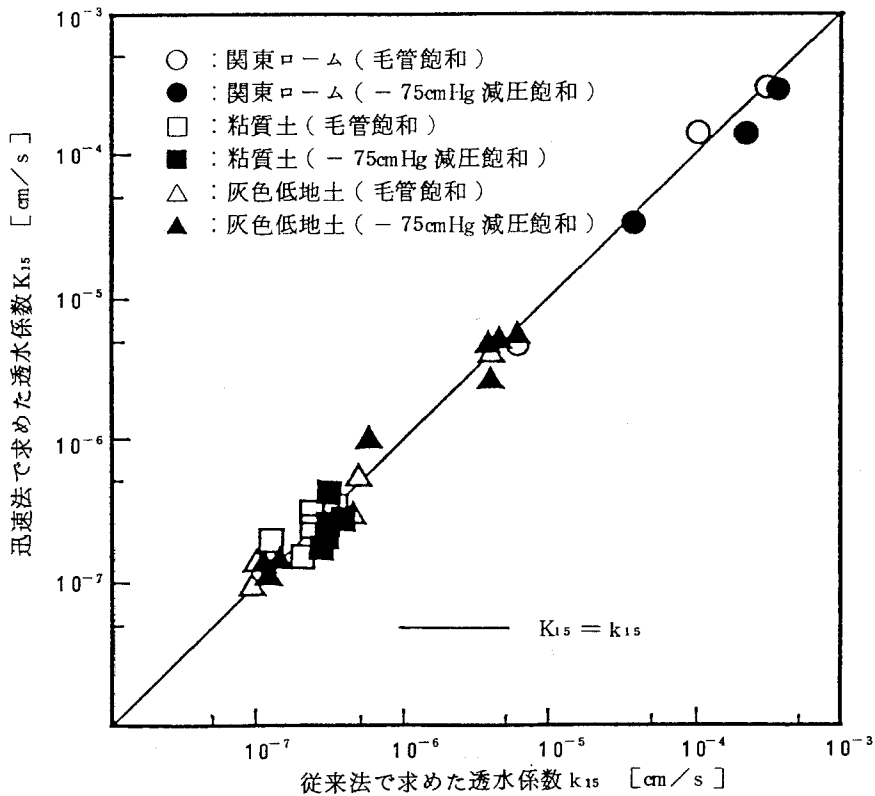
粒度分析：測定法-比重計法

分散剤-関東ロームは塩酸を、その他はヘキサメタリン酸ナトリウム

*：軽部氏のデータによる

表-4 透水試験終了直後の試料内の気泡体積 V_a (cm³)

試料名	関東ローム			竜ヶ崎層粘質土					灰色低地土			
	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4
毛管飽和	1.4	1.7	1.8	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0
-75 cmHg 減圧飽和	0.5	0.7	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0



図一五 迅速法で求めた透水係数 K_{15} と従来法で求めた透水係数 k_{15} との比較

方法で従来法よりも千数百分の一の短時間で難透水性土壌の透水係数が測定できることを確認した。

VI. ま と め

圧力トランスデューサを利用した迅速水位透水試験器を試作し、この装置を使った透水試験法を実験的に検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)迅速変水位透水試験器で求めた透水係数は従来法で求めた透水係数とほぼ等しい値が得られ、圧力トランスデューサを利用した本測定法は有効である。
- (2)本測定法により低動水勾配のもとで従来法に比べ、非常に短時間で測定できる。
- (3)試料が完全に飽和しているときの測定感度は透水試験器固有の定数であり、また試料が閉鎖不飽和のときの測定感度は次式で表される。

$$S_2 = S_1 + 5.0 \times 10^{-4} \cdot V_a$$

S_2 : 試料が閉鎖不飽和のときの測定感度 [cm³/cm

H₂O]

S_1 : 試料が飽和しているときの測定感度 [cm³/cm

H₂O]

V_a : 透水試験終了直後の試料内気泡体積 [cm³]

- (4)供試土には、関東ローム水田の耕盤層、竜ヶ崎層粘質土、灰色低地土の耕盤層の3種を用いた。火山灰土の関東ロームは本試験で用いた毛管飽和、-75cmHg減圧飽和によっても完全に空気間隙を排除することができなかったが、他の粘質土2種類ではほぼ完全に飽和できた。このことは、土壤の種類別にみた物理性をよく反映しており、火山灰土のように孔隙径に幅のある多孔質な土壤を供試するときには、空気間隙量の実測が重要であるが、飽和しやすい孔隙を持つ土壤ではこの種の飽和操作で十分のようであった。このことは、粘質土2種のような土壤では、湛水中の場合などには現地採土試料を直接測定することができる可能性を示唆している。

圧力トランスデューサを利用した迅速変水位透水試験法

謝 辞

引用文献

関東ロームのサンプリングは茨城大学の圃場から、灰色低地土は農研センターの圃場から採土した。

採土に当たり、田淵俊雄教授をはじめ茨城大学の方々、農業研究センター石井和夫室長、中司啓二研究員にお世話になった。また、関東ロームの粒度分析は茨城大学の軽部重太郎助教授のデータを利用させていただいた。さらに筑波大学農林工学系の関係各位には実験や討論に当たり御協力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

- 1) J. R. Remy : The measurement of small permeabilities in the laboratory, *Geotechnique*, Vol. 23, No 3, pp. 454~458 (1973)
- 2) 土の理工学性実験ガイド編集委員会 : 土の理工学性実験ガイド, pp. 102~105, 農業土木学会 (1983)

Summary

The falling-head permeability test with a stand pipe has been used for the determination of the hydraulic conductivity of soil. This method requires a long time for the measurement in soils with a low permeability. Therefore, the temperature and evaporation must be controlled throughout the test.

Remy (1973) measured the hydraulic conductivity with a pressure transducer in a short time. But he considered only the sensitivity of the pressure transducer and disregarded the total sensitivity of the apparatus equipped with a pressure transducer.

A simple apparatus equipped with a pressure transducer was designed to measure the hydraulic conductivity of low-permeable soils, taking account of the total sensitivity of the apparatus including the pressure transducer. The results were as follows:

1. In a saturated soil, the sensitivity S_1 can be expressed by the following equation.

$$S_1 = (\Delta V_s + \Delta V_x) / \Delta H + S_0$$

where, ΔV_s : Volume change of soil for experiment (cm^3)

ΔV_x : Volume change of apparatus without the pressure transducer (cm^3)

ΔH : Change in the difference of total head between the top and bottom part of soil (cmH_2O)

S_0 : Sensitivity of the pressure transducer ($\text{cm}^3/\text{cmH}_2\text{O}$)

2. In an unsaturated soil, the sensitivity S_2 can be expressed by the following equation.

$$S_2 = S_1 + \Delta V_a / \Delta H$$

where, ΔV_a : Volume change of air in soil for experiment (cm^3)

On the assumption that the air in the soil is uniformly distributed and by applying Boyle's law.

$$S_2 = S_1 + \left\{ P_3 \ln (P_3 / P_2) / (P_3 - P_2) - 1 \right\} V_a / (P_3 - P_2)$$

Where, P_2 : Absolute pressure on top of the soil when the measurement is completed (cmH_2O)

P_3 : Absolute pressure at the bottom of the soil during the experiment (cmH_2O)

V_a : Volume of air in the soil after the end of the experiment (cm^3)

In the current experiment, $S_2 = S_1 + 5.0 \times 10^{-4} V_a$.

3. The value of the hydraulic conductivity measured by this method with pressure transducer was in agreement with the value measured by falling-head permeability test with a stand pipe.