

懸濁水の浸透による土壌の透水性の低下に関する実験

筑紫二郎*・河野 洋*・藤原輝男**

昭和60年5月31日受付

Experiments on the Reduction of Soil Water Permeability during the Flow of Clay Suspension in Soil

Jiro CHIKUSHI, Hiroshi KOUNO and Teruo FUJIWARA**

The deviation of measurements was examined for saturated hydraulic conductivity of sand and sandy loam (Masa-do), and the experiments followed on the reduction of soil water permeability by sealing with clay particles (kaolinite) during constant head flow.

The stability of the measured conductivities with time in the single experiment for sandy loam was obtained, but not necessary for sand. Especially when the direction of water flow was upward, the measured conductivities for sand were found unstable with time. The deviations of more than one order were also found between the tests, but not between tap water and air-evacuated water which were used as the percolating water.

The sealing experiments showed that the reduction of the permeability relative to initial value were 1/4 to 1/30 for sand and 1/4 to 1/11 for sandy loam respectively. The measured values obtained by some of tests fitted well with the equation derived as a function of time for the percolation through three layered soils. The clay particles were entrapped over the soil column depth for sand, while the entrapment occurred almost at the soil surface for sandy loam.

ま え が き

農地の高度利用に伴って、開拓農地も次第に高地に造られるようになった。このような所で造成された圃場は、当然ながら斜面をなしているの、常に土壤侵食を受けやすい状態にあるといえる。

降雨による土壤侵食は、降雨の雨滴の衝撃作用と雨水の流水作用によって生じることが知られているが、これら2つの作用はある程度関係を有する。雨滴の衝撃は、土壤団粒を破壊し、微粒子を生成して雨水を懸濁液にし

てしまう。この懸濁水の一部は、斜面を流下する際地中へと浸潤し、土壌間隙における懸濁質の沈着によって土壌の透水性の低下を引き起す。このことは、結果として地表流出水量及び流出土量の増大を招くことになる。著者らは、土壤侵食過程を地表流出との関係から追究していくつもりであるが、そのような場合上述の懸濁水による目詰りの機構を明らかにしておく必要がある。

本研究では、斜面浸透の立場から懸濁質の目詰りによる飽和透水係数の低下について実験的に検証することを目的とする。

* 鳥取大学農学部農業工学科農地造成学研究室

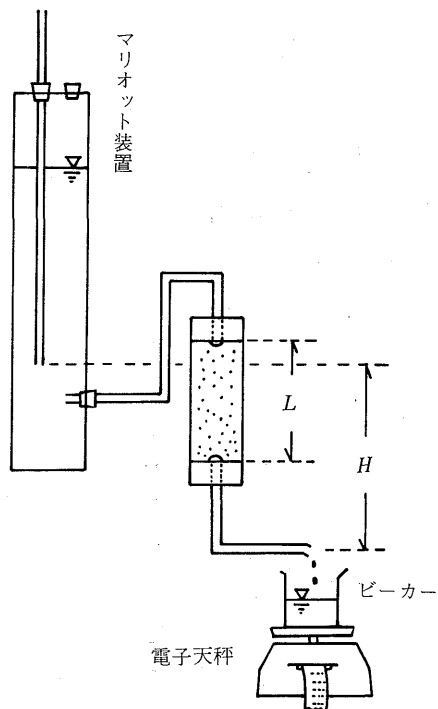
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

** 山口大学工学部土木工学科水工学研究室

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University

実験試料及び方法

土壌試料として、0.84mmフルイ通過の砂丘砂(砂-1)、0.74~0.84mmの砂丘砂(砂-2)、及び0.4mmフルイ通過のマサ土を用いた。



第1図 実験装置

飽和透水係数を測定するのに第1図のような実験装置を用いた。測定法は、マリオット装置の水頭と流出口の水頭とを一定に保つ定水位測定法である。マリオット中の液体は、実験に応じて水道水か、脱気水か、懸濁水である。浸透カラムは、内径5cm、長さ20cmのアクリル管であり、土壌試料はガラス棒を用いて均一に充填した。土壌カラムの両端は、ゴム栓で塞いだが、栓の中心線に沿って内径5mmのガラス棒を通すことによって水が流し入れできるようにした。ガラス管の先端には、土粒子の移動を妨げるために、ガーゼを巻いた。ゴム栓をすると、土壌カラムの長さは11cm程度になる。流出した水は、電子天秤の上に置かれたビーカーに集められ、重量が自動的に5min間隔で記録される。測定された積算流出量 Q から、透水係数 K は次式の形で求められる。

$$K \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) = \frac{Q(t_2) - Q(t_1)}{t_2 - t_1} \frac{L}{H} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 Q は積算流出量、 L は土壌カラム長、 H は水頭差である。

目盛りによる透水係数の低下に関する実験を行なう前に、まず透水係数自体の測定精度について調べた。厳密な飽和透水係数の測定法では、¹⁾減圧しながら土壌を飽和させるが、ここでは完全飽和(封入空気を完全に除去する)よりもむしろ自然に吸水したときの飽和を対象としているため、そのような方法は取らず単にカラムの底から水位を上げて飽和させた。ここでは、単一試行における測定値の経時的変化、浸透水が水道水か脱気水かによる測定値の違い、浸透水の流れが上向きか下向きかによる測定値の違いについて比較した。

つぎに、懸濁質の目盛りによる土壌の平均透水係数の低下について実験を行った。ここで言う平均とは、時間的な平均でなく目盛りによって不均一になった土壌カラムの各深さの透水係数に対する平均である。実験に用いた懸濁水は、蒸留水1000ml当り市販のカオリナイト100gを混入し、分散剤として0.05Nのヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を添加し、スターラを用いて攪はんして作った。土壌試料をカラムに充填する際、カオリナイトの土層表面での集積を予想して、土壌表面とゴム栓との間に多少の空間を設けたため、実際の土壌カラム長は、9.0~9.5cmになった。実験終了後、土壌中に捕捉されたカオリナイトの量を調べるため、1cmの厚さ間隔で土壌スライスを取った。そのスライスは、乾燥させ、0.074mmフルイを用いて粘土と砂とに分離した。マサ土の場合も同様にしたが、フルイ通過分には、最初からマサ土に含まれる粘土もあるので(約20%)、その粘土と捕捉粘土とを合計した量を粘土含量として測定した。

結果及び考察

(1) 土壌自体の透水係数の測定

土壌の透水係数を測定するとき、常に一定の値が得られるとは限らない。たとえ試料が同じでも実験の試行毎に異なることもあるし、又1回の実験においても測定経過中に透水係数の値が変化することもありうる。そこで3種の土壌に対して透水係数の測定を数回試みた。さらに、浸透水、水頭勾配、流れの方向の違いによって透水係数の値も異なると考えられるので、それらの条件を変えながら測定を定を行った。

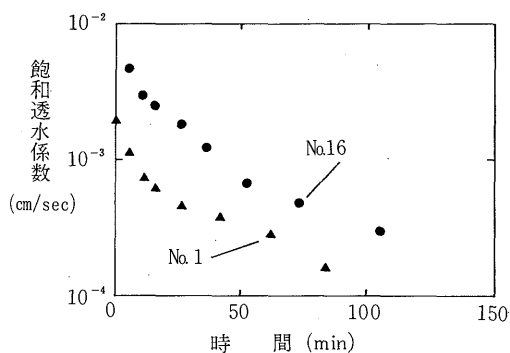
実験結果の一覧を第1表に示す。表中において、 K_{max} 、 K_{min} 、 K_{mean} は、それぞれ一回の試行中測定された透水係数の最大値、最小値、平均値である。表には、標準偏差の値も表示している。通常、 K_{max} は初期の測

第1表 飽和透水係数の測定条件と測定値

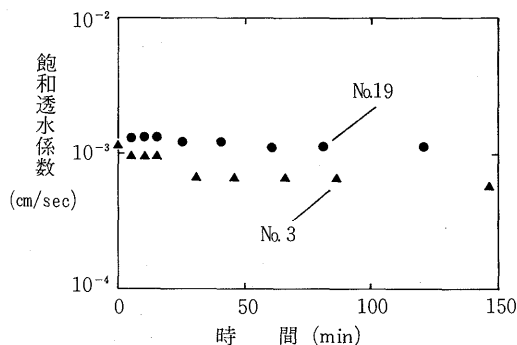
No.	試料	浸透水	流れ方向	L (cm)	H (cm)	Kmax(cm/sec)	Kmin(cm/sec)	Kmean(cm/sec)	標準偏差(cm/sec)
1	砂-1	脱気水	上向き	10.5	39.5	1.91 × 10 ⁻³	0.056 × 10 ⁻³	0.64 × 10 ⁻³	0.58 × 10 ⁻³
2	〃	〃	〃	10.8	50.0	1.10	0.37	0.70	0.27
3	〃	〃	〃	11.0	〃	1.12	0.56	0.79	0.19
4	〃	〃	下向き	11.2	〃	3.80	1.33	2.00	0.74
5	〃	〃	〃	11.3	〃	0.77	0.19	0.40	0.20
6	〃	〃	〃	11.5	〃	0.65	0.32	0.45	0.11
7	〃	〃	〃	11.0	〃	5.60	2.24	3.32	1.15
8	〃	〃	〃	11.0	37.0	6.56	2.01	3.84	1.45
9	〃	〃	〃	11.0	〃	10.00	3.78	5.80	2.18
10	〃	〃	〃	11.2	〃	10.70	8.22	8.71	1.14
11	〃	〃	〃	11.3	〃	10.10	6.48	7.78	1.26
12	〃	水道水	〃	11.3	〃	9.07	5.70	7.18	1.14
13	〃	〃	〃	10.8	〃	9.41	6.44	7.82	0.85
14	砂-2	水道水	上向き	11.0	14.3	4.89 × 10 ⁻³	1.08 × 10 ⁻³	2.80 × 10 ⁻³	1.16 × 10 ⁻³
15	〃	〃	〃	11.0	14.7	2.54	0.70	1.48	0.57
16	〃	脱気水	〃	11.2	14.3	5.98	0.30	2.29	1.97
17	〃	〃	〃	11.0	14.5	2.25	0.16	1.16	0.75
18	〃	〃	〃	11.0	50.0	1.30	0.84	1.03	0.14
19	〃	〃	下向き	11.0	〃	1.30	1.12	1.22	0.09
20	〃	〃	〃	11.4	〃	3.29	1.16	1.82	0.67
21	〃	〃	〃	11.5	〃	2.34	0.54	1.05	0.57
22	〃	〃	〃	11.5	〃	8.39	2.14	3.79	2.36
23	〃	〃	〃	11.4	37.0	7.84	2.87	4.35	1.68
24	〃	〃	〃	11.0	〃	7.82	4.03	5.52	1.38
25	〃	〃	〃	11.0	〃	11.80	4.29	7.49	2.48
26	〃	〃	〃	11.5	〃	11.30	3.95	6.74	2.22
27	〃	水道水	〃	11.3	〃	8.55	5.96	7.35	0.93
28	〃	〃	〃	11.0	〃	11.30	6.56	8.28	1.56
29	マサ土	脱気水	下向き	11.0	37.0	4.02 × 10 ⁻⁴	3.88 × 10 ⁻⁴	3.96 × 10 ⁻⁴	0.45 × 10 ⁻⁵
30	〃	〃	〃	〃	59.5	3.35	3.00	3.20	0.94
31	〃	〃	〃	〃	〃	2.49	1.18	2.40	3.38
32	〃	〃	〃	〃	〃	4.70	2.60	3.63	3.11
33	〃	〃	〃	〃	〃	5.62	4.83	5.03	1.65

定値であり、Kminは後の方での測定値である。したがって、KmaxとKminとの差が大きいとき、一回の試行で得られるKのバラツキが大きいことを意味する。例えば、No.1, 16, 17の場合は、KmaxとKminとの間では10倍以上の開きがあり、他の試行の場合よりもバラツキが大きいといえる。バラツキが比較的大きいNo.1, 16と、そうでないNo.3, 19の場合を第2, 3図に示すが、前者においては時間の経過に伴って透水係数の低下が大

きく、逆に後者ではその低下がそれほど顕著でないことが明らかである。このように測定値に差が生じた理由の一つに、浸透水の流れの方向が考えられ、つぎのような説明が可能であろう。試料はカラムの底から水位を上げながらゆっくりと飽和されるので、その際土壌間隙中には必然的に封入空気が残存する。そのような空気が間隙のネックにある場合、下向きの流れでは水は気泡の周りをすり抜けて流れようが、上向きの流れでは気泡はネッ



第2図 砂の飽和透水係数の経時的変化 (変化が大きい場合)



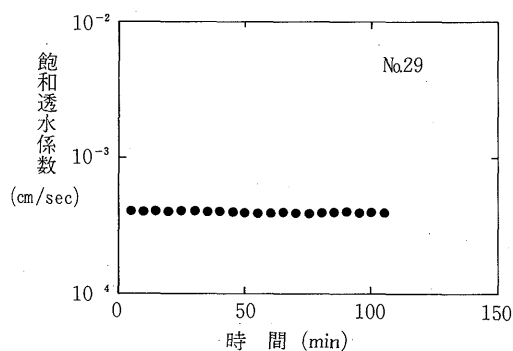
第3図 砂の飽和透水係数の経時的変化 (変化が小さい場合)

クを塞いでしまい、水の流れに対して大きな抵抗を有する。その結果として、上向きの流れでは気泡の移動によって透水係数の値が初期の値よりも大きく低下してしまうことになる。

つぎに、浸透水として水道水と脱気水を用いた場合について比較すると、これら水の種類による影響よりも、個々の試行による影響の方が大きいことが明らかであった。一般的には、水道水には溶解空気が含まれていて浸透中に気泡を放出する可能性が考えられる²⁾が、ここでは、その効果の断定はできなかった。結論的には、水道水、脱気水いずれを使用しても、透水係数の測定にはほとんど影響がないといえる。つぎに述べる目詰りの実験では、脱気水を用いることにした。

マサ土の場合、いずれの試行においても砂の場合より安定していて、しかも各試行間の差も小さかった(第4図)。このようにマサ土の測定値が安定しているのは、粘土含量が多く、間隙径が小さいため、気泡の移動が少なくなるためであろう。

第2表は、各試料について透水係数の最大値、最小値を整理したものである。砂の場合には、 K_{max} と K_{min} との間に10倍前後の差があり、マサ土では2倍の差があった。これからも、マサ土よりも砂の方が測定値にバラツキが大きいことが明白である。



第4図 マサ土の飽和透水係数の経時的変化

このように試行間においてもマサ土より砂の方がバラツキが大きいのは、平均粒径に対する試料の大きさの比、飽和過程における封入空気量の違い等に関係しているように思われる。

(2)目詰り実験

浸透水としてカオリナイトの懸濁液を用い、目詰りによる透水性の低下について調べた。土壌試料としては、砂-2とマサ土を用い、流れの方向は、下向きとした。流れが下向きであることは、前の実験から判断して、透水性の低下が気泡封鎖によるものでなく、目詰りの結果として生じていることを暗示している。

第2表 各実験で測定された飽和透水係数の中の最大・最小値とそれらの平均値

試料	K_{max}^{max}	K_{min}^{min}	K_{max}	K_{min}
砂-1	1.08×10^{-2}	6.51×10^{-4}	8.71×10^{-3}	3.96×10^{-4}
砂-2	1.19×10^{-2}	1.31×10^{-3}	8.28×10^{-3}	1.04×10^{-3}
マサ土	5.63×10^{-4}	2.50×10^{-4}	5.03×10^{-3}	2.40×10^{-4}

単位: cm/sec

第3表 目詰まり実験における条件と(7)式の適合性

No.	試料	L (cm)	H (cm)	K_s	(cm/sec)	A	分散 (SS/(n-1))
34	砂-2	9.5	37.0	2.90	$\times 10^{-4}$	0.10	3.68 $\times 10^{-4}$
35	〃	〃	〃	5.58		0.30	4.27
36	〃	9.0	〃	4.87		0.15	0.80
37	〃	〃	〃	3.05		0.018	3.56
38	〃	〃	〃	8.75		0.080	0.75
39	〃	〃	〃	4.49		0.075	5.62
40	〃	〃	〃	10.10		0.258	0.28
41	〃	11.0	〃	9.60		0.075	0.20
42	マサ土	9.0	60.0	0.24	$\times 10^{-3}$	0.010	23.29 $\times 10^{-4}$
43	〃	〃	〃	0.21		0.020	0.22
44	〃	〃	〃	0.28		0.020	0.14
45	〃	〃	37.0	0.26		0.020	0.30
46	〃	〃	60.0	0.31		0.021	0.12
47	〃	〃	〃	0.20		0.021	0.21
48	〃	〃	〃	0.16		0.010	0.34

実験結果の一覧を第3表に示す。この場合は、 K_{max} と K_{min} との差によって、透水性の低下の大きさが推定される。平均透水係数の値が、砂の場合初期値の1/4から1/30程度に、マサ土の場合も1/4から1/11程度にまで低下していることが分る。

目詰りによる平均透水係数の低下に関する理論として、Swarzendruber and Uebler³⁾の研究がある。ここでは、地表における懸濁質の集積層、地中の粘土捕捉層、未捕捉層の3つの層に分け、結果として平均透水係数 K_e の低下を浸透流出体積 V の関数として次のように表している。

$$K_e = K_s \exp(-\alpha V) \quad (2)$$

ここで、 K_s は初期飽和透水係数、 α は定数である。

(2)式は V の関数となっているが、本研究の実験表示に合わせるため、時間 t の関数に書き直すことにする。いま、動水勾配及び土層の断面積を一定とすると、Darcyの式は次式で表される。

$$\frac{dV}{dt} = b \cdot K_e \quad (3)$$

ここで、 dV/dt は懸濁水の体積流束、 b は定数である。

(3)式に(2)式を代入すると

$$\frac{dV}{dt} = b \cdot K_s \exp(-\alpha V) = \beta \exp(-\alpha V) \quad (4)$$

ここで、 β は定数である。初期条件 $t=0$ で $V=0$ を

用いて(4)式を変数分離して積分すると。

$$\alpha \cdot \beta \cdot t = \exp(\alpha V) - 1 \quad (5)$$

定数 $\alpha \cdot \beta$ を改めてAとおいて、(5)式を変形すると

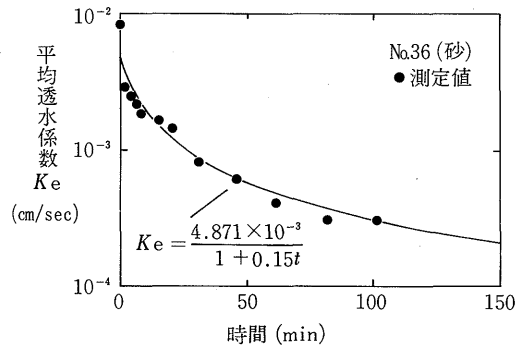
$$\alpha V = \ln(1 + At) \quad (6)$$

(6)式を(2)式に代入すると次のような双曲線型の式を得る。

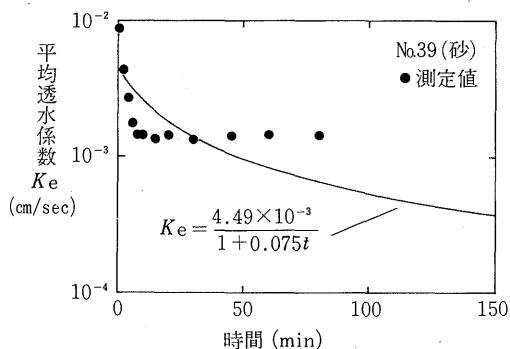
$$K_e = K_s / (1 + At) \quad (7)$$

平均透水係数の測定値の経時変化に対して(7)式のあてはめを行った。あてはめの方法として、最小二乗法を用いた。すなわち、残差の平方和を最小にするように、最大傾斜法を用いて K_s とAとを決定した。

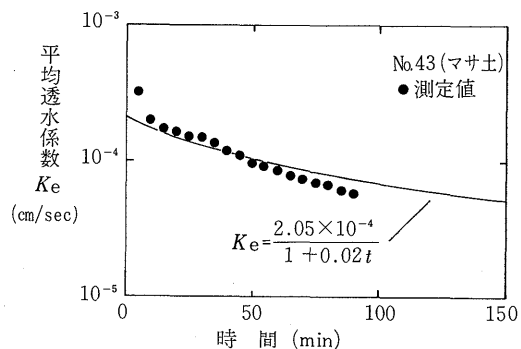
$$SS = \sum_{i=1}^n \left(K_i - \frac{K_s}{1 + At} \right)^2 \quad (8)$$



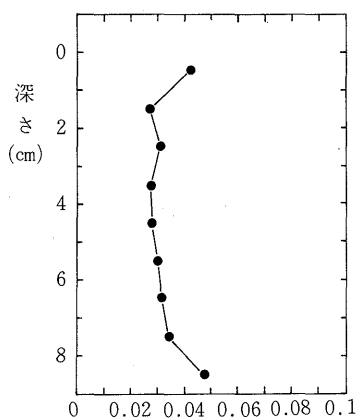
第5図 目詰りによる透水係数の低下 (式の適合性がよい場合)



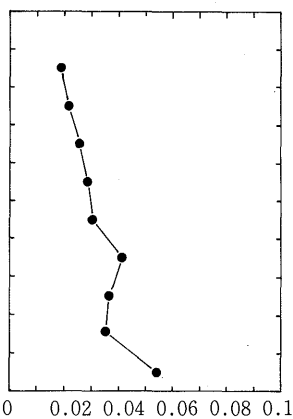
第6図 目詰まりによる透水係数の低下
(式の適合性が悪い場合)



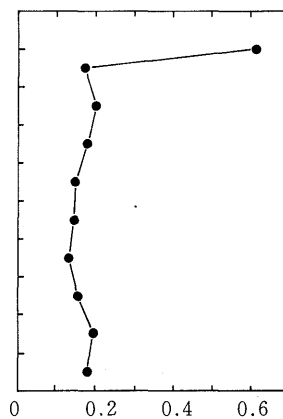
第7図 目詰まりによる透水係数の低下 (マサ土)



(1) No.36 (砂)



(2) No.39 (砂)



(3) No.43 (マサ土)

第8図 実験終了時における粘土含量分布

ここで、 K_i は平均透水係数の測定値、 n はデータの数である。得られた K_s と A の値も第3表に示している。(7)式のあてはめの式は測定値によく適合する場合も、しない場合もあった。砂の場合の例として、No.36とNo.39を第5、6図に示す。前者はよく適合している場合で、分散の値も 0.80×10^{-4} と小さい。それに比べて、後者は初期に K_e の急激な低下があり、その後ある一定値に落ち着いているため、(7)式のような双曲線型の関数には適合しなかった例である。マサ土の場合の例No.43を第7図に示すが、この場合も多少の誤差があるといえる。

(7)式のモデルの適用には限界が存在するように思われる。(7)式の誘導に当っては、地表の懸濁質集積層の透水

係数が経時的に一定であること、土壤による粒子の捕捉は地表から始まり、経時的に下方に伸びていくが、捕捉層の間隙率は一定であることが仮定されている。より適合するモデルを開発するには、目詰りの機構をより詳細に解明していく必要がある。

最後に、カオリナイトの捕捉状況を見るために、実験終了後における土層内の粘土分の含量を調べた。No.36, 39, 43に対するその結果を第8図に示す。ここで、粘土含量は乾燥土の重量に対する粘土重量の比率で表している。No.36の場合、地表での集積がなく、3~5%の割合で分布している。下端部付近で多少大きくなっているのは、流出口が狭いため流れが収縮するという下端の効果

のためかも知れない。No.39の場合にも地表付近の2%から下端の6%位まで下方に行くほど増大していて、そのような下端の効果があるようである。No.43のマサ土の場合、地表部ではカオリナイトの集積が生じ60% (2~3mmの表土を含む) と高く、それ以下では15~20%の範囲にあった。土壌中において、マサ土の方が砂に比べてカオリナイト含量が高いのは、その中に最初から存在していた粘土分を含むためであろう。マサ土には最初から粘土分が20%近く含まれていたため、土壌カラム中に捕捉されたカオリナイトはほんのわずかであることが分る。

(3) これからの課題

同じ試料に対して (砂の場合) 透水係数の測定値に10倍もの差があることは重大である。すなわち、斜面流出においては、この差は浸透量に対して10倍、流出量に対して1/10と直接反映するからである。幸か不幸か開発圃場が砂でできていることは稀である。一方、マサ土は中国地方には広く分布しており、造成地の土壌としては一般的である。マサ土では透水係数の推定に砂ほどバラツキが大きくないが、それでも最大値と最小値とで2倍ほどの差がある。このような推定値のバラツキを無くするのは困難であるが、できるだけ小さくする努力を行なうことは重要である。

ここで述べた目詰り現象は飽和状態で行った。しかし、実際の斜面浸透は不飽和浸透である。目詰りに関する研究は、従来は濾過浸透、水田における浸透、最近では土壌による汚水処理問題で行われているが、その理論は主に飽和に関するもので、不飽和条件下の目詰り現象についてはまだこれからの問題である。

また、本研究では、一定水頭下の条件で懸濁水の浸透を行った。実際の斜面浸透では降雨の変化、斜面の形状変化、位置によって懸濁水の供給の仕方も非定常的に変化する。このような非定常浸透下の目詰り機構についても、土壌のスレーキング機構と共に今後解明の余地が残されている。

ま と め

飽和透水係数の測定値の誤差について検討した。さらに、飽和浸透下におけるカオリナイトの目詰りによる透水性の低下について実験を行った。得られた結果を要約すると次の通りである。

1. 飽和透水係数の測定において、流れを上向きにすると経時的に大きく低下することがある。
2. 各測定における透水係数の平均値を比較すると、砂の場合では最高20倍程度の差が生じている。
3. 浸透水として水道水を用いた場合と脱気水を用いた場合とを比較すると、透水係数の値にそれほどの差はなかった。
4. カオリナイトの懸濁水を浸透水として用いた場合、透水係数の値が大きく低下することが明らかであった。
5. 懸濁質の捕捉によって経時的に低下する透水係数の変化は、双曲線型の曲線で適合する場合としない場合があった。
6. カオリナイトの捕捉は、砂の場合は全土層に亘っているのに対し、マサ土の場合はそのほとんどが地表部で生じている。

最後に、本研究の遂行にあたり多大の協力を得た井上修氏 (現鳥取県庁) に厚く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法，養賢堂，東京 (1972) p p . 177—182
- 2) 八幡敏雄：エアリー・バインディングによる土の透水性の低下について。東大農土工，研究の資料と記録，10 (1960)
- 3) Swarzendruber, D. and K. L. Uebler : Flow of kaolinite and sewage suspensions in sand and sand-silt: II . Hydraulic conductivity reduction, Soil Sci. Soc. Am. J., 46 912—916(1982)