

## 吸着効果を受ける微速浸透流に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ABSORBED WATER FOR MICRO-SEEPAGE

佐藤邦明\*・室田明\*\*

By Kuniaki Sato and Akira Murota

### 1. まえがき

粘土、シルトのごとき微粒土中のレイノルズ数が小さい浸透流、いわゆる微速浸透流において、流れはダルシー流とはまったく異なる機構をもつ。

その理由の一つに、微粒土中の水の挙動は、砂、砂利などの粗粒土中の水のそれと物理的性質が非常に異なっているということがあげられる。

すなわち、微粒土の空げき中の水は分子密度が高く、土粒表面において吸着力を受け、流動によって大きい粘性を示す。

この特異現象は、水分子自体が極性を有し、土粒表面へ吸着される、いわゆる吸着効果に起因するが、浸透流を考える場合のみならず、土の力学的性質を吟味する際もこの吸着水の物理的、化学的性質を十分知る必要がある。

最近、非ダルシー流としてダルシー則の妥当性の吟味に関連し微速浸透流の研究がなされているが、現象そのもののメカニズムがわかっていない。

筆者らは吸着水の流れにおよぼす影響について、従来行なわれた透水実験のみでは十分でないと考え、水以外の物理、化学的特性のわかった流体（メチルアルコール、ベンゼン）で浸透実験を行ない、浸透流をそれら流体特性と対比しながら基礎的に研究する。

### 2. 微速浸透流の特異性

まず、問題点を明確にするため、微速浸透流における流れの特性をのべ、従来の研究成果について若干ふれる。

F.H. King (1898)<sup>1)</sup> は真ちゅう線網、細砂、砂岩を

\* 正会員 工修 大阪府立工業高等専門学校助教授 土木工学科

\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

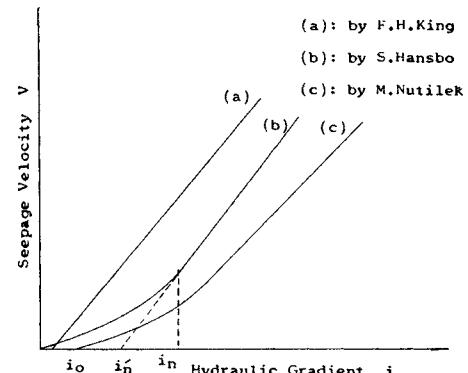


図-1 見掛けの流速と動水勾配の実験的関係

用いて綿密な透水実験を行ない、見掛けの流速  $v$  と動水勾配  $i$  の関係について、図-1 の (a) のような結果を得た。

その結果は、 $i$  が小さい場合、ダルシー則が成立しないことを示している。つまり、 $i$  がある一定値、始動動水勾配 (threshold hydraulic gradient)  $i_0$  に達しなければ、浸透流は起こらず、 $i$  が  $i_0$  より大きい場合のみ  $v \sim i$  関係は線型的変化をするというものである。

しかし、この実験で用いられた多孔体は粘土、シルトに比べれば、空げき規模は大きいといえる。

次に、粘土のような微粒土の場合については、S. Hansbo (1960)<sup>2)</sup> が粘土の透水実験で図-1 の (b) のごとき実測を得た。King の実測結果とまったく異なり、 $v \sim i$  関係は、 $i$  の増加に従い  $v$  が非線型的に変化し、ある動水勾配  $i_n$  をこえて、両者の関係が線型的であるということになる。

さらに、M. Kutilek (1967)<sup>3)</sup> によれば、同じく粘土の場合、図-1 の (c) のような実測結果が得られている。浸透流は始動動水勾配  $i_0$  に達するまで起こらないが、 $i_0$  より大きい  $i$  について  $v \sim i$  関係は Hansbo の結果とほぼ同様な変化をする。

以上、三つの代表的な実測結果について概略説明したが、これらの事実を要約すれば次のようにいえる。

透水試験によって細砂のごとき細粒土の  $v \sim i$  関係は始動動水勾配を考えれば、線型的変化をする。また、粘土のごとき微粒土の  $v \sim i$  関係は非線型的変化をするが、始動動水勾配の認められる場合と認められない場合がある。

従来、この  $v \sim i$  関係を説明するためのアプローチは、レオロジー的、あるいは流体力学的立場からなされている。

まず、レオロジー的立場から Buckingham-Reiner<sup>4)</sup> の式と呼ばれるものがある。

$$v = \frac{r_0^2 \rho g}{8\mu} i \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{i_0}{i} + \frac{1}{3} \left( \frac{i_0}{i} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\mu$ ：流体の分子粘性係数、 $\rho$ ：密度、 $g$ ：重力の加速度、 $r_0$ ：空げきと等価な断面積をもつ細管の半径、 $i_0$ ：始動動水勾配である。

この式は細管中のビンガム流動、いわゆる栓流（plug flow）から導入されたもので、 $v \sim i$  曲線は図-1 の (c) 曲線と同様の関係をもつ。

また、この (c) 曲線と類似の関係を表わすものとして、Swartzendruber の経験式<sup>5)</sup> が知られている。

$$v = B \{ i - J(1 - e^{-C_0 i_0}) \} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $B$ 、 $J$ 、 $C_0$  は実験的に決まる係数である。

この式は微速浸透流を非ニュートン流動と考えて導入されたものである。

さらに、Hansbo<sup>6)</sup> は

$$\begin{cases} v = k i^n & 0 < i < i_n \\ v = k(i - i_n') & i > i_n \end{cases} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $k$ ：透水係数、 $n$ ：土質、空げき率、温度によって決まる指数、 $i_n$ ：非線型-線型変化移行動水勾配である。

この式は図-1 の (b) と同様の関係を与える。

次に、流体力学的立場から、佐藤<sup>7)</sup> は吸着粘性の概念を導入し、理論的に微速浸透流を論じた。浸透流場内の粘性の見掛け上の増大、空げき中の流速分布、せん断力分布を的確に説明でき、抵抗係数の導入をあわせ、流れのメカニズムを的確に知ることができる。しかし、この考え方によって、先に述べた流れのレオロジー的性質を説明することは不可能である。

微速浸透流の特異性を略述したが、 $v \sim i$  関係の実測事実、さらに、その従来のアプローチを通じて、この種の浸透流は動水勾配が小さい間はレオロジー的特性を示し、動水勾配が大きくなると流体力学的特性（つまり、ダルシー則を満たす）を示す傾向があるということは銘記すべきである。

要するに、微速浸透流はレオロジー的、流体力学的特

性をあわせもつと考えられる。

### 3. 水分子と吸着水

周知のごとく水分子は水素と酸素からなり、それぞれの原子間で単純には共有結合をしている。しかし、多くの他の流体、気体分子に見られるように、水分子は分子自体（電気的）極性を有し、電気的に不安定である。

一般に、水分子は双極性分子（bi-polar molecule）であり、図-2 の (a), (b), (c) に示したごとくである。

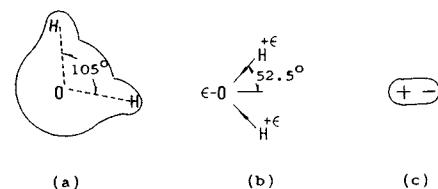


図-2 水分子

図中、(a) は水分子の幾何的形状<sup>8)</sup>、(b) は双極化、(c) は電気的にみた慣習的簡略記号をそれぞれ表わしている。(b) 図からわかるように、酸素原子付近が負、二つの水素原子付近がともに正に荷電（荷電強度  $\epsilon$ ）している。

通常の水は、双極性分子、無極性分子、双極性と無極性の中間的分子の集合体と考えられている。

無論、三者の割合からすれば、無極性分子は少なく、これらの全水分子はある温度、圧力の下で高速運動している。

こういった水分子が正、負いずれかに荷電した固体表面付近に電気的に吸着されたものが、通常、吸着水（absorbed water）と呼ばれる。

一般に、粘土、シルトのごとき微粒土の表面は負に荷電しているといわれているから、その表面に多量の吸着水を保持していることになる。

当面問題にしている微粒土中の浸透流において、この吸着水の存在は流れにきわめて重要な影響を与える。この吸着水は次のような物理的性質がある。

(1) 水分子相互間の引力は土粒子表面付近でもっとも強く、表面から遠ざかるにつれ減少し、十分離れたところで消失する。

(2) 吸着水は上記 (1) の強弱によって、土粒子表面付近の吸湿水層（hygroscopic water layer）と吸着水層に分けられる。

(3) 吸湿水層内の水は高い圧力、密度、粘性を顕わし外力によって流動しない。

(4) 吸着水層内の水は通常の水より大きい圧力、密度、粘性を有するが、外力によって流動する。

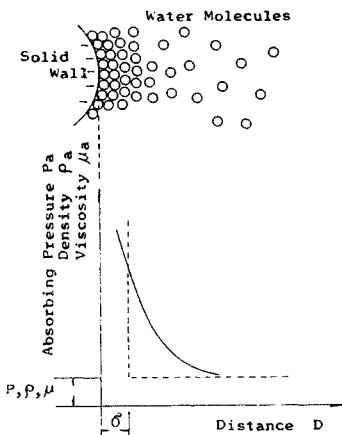


図-3 吸着効果

(5) 吸着力の強弱、吸湿、および吸着水層の厚さはともに微粒土の鉱物成分、水中の溶解イオンなどに關係する。

以上の(1)～(5)までの事柄を要約すれば、図-3のようになる。図中、 $p_a$ 、 $\rho_a$ 、 $\mu_a$ はそれぞれ吸着効果によって生ずる圧力、密度、粘性係数であり、 $p$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ はそれぞれ、土粒表面から十分離れたところでの圧力、密度、粘性係数である。さらに、 $\delta$ は吸湿水層の厚さである。

もちろん、土粒表面からの距離 $D$ と $p_a$ 、 $\rho_a$ 、 $\mu_a$ の関数関係が同一の曲線を与えるとは考えられないが、 $p_a$ 、 $\rho_a$ 、 $\mu_a$ のいずれも距離の $n$ 乗に逆比例して減少することは容易に推定できる。また、 $\delta$ の値は外力と前記(5)に関係し、一定の値をもたないが、ほぼ $1/100\sim 1/1000$ ミクロンと考えられる<sup>9)</sup>。

#### 4. 浸透実験

##### (1) 実験装置

実験装置の概略が図-4に示されている。

その主要部は図中の(1)～(7)である。この装置は通常の定水位透水試験装置と同じであり、試験方法も同様である。ただし、揮発性流体を用いるため、浸透流量の揮発性、さらに浸透流量が小さいため、流出部の越流面の安定性の二点で配慮が加えられている。

順次説明すると、まず、(1)はオーバフロー用直立管(長さ 9.0 cm、内径 2.0 cm、真ちゅう製)、(2)は整流貯留部(長さ 5.5 cm、内径 6.0 cm、真ちゅう製)、(3)は土試料充填円筒(長さ 16 cm、内径 7 cm、ガラス製)、(4)整流貯留部(長さ 5.5 cm、内径 6.0 cm、真ちゅう製)、(5)オーバフロー槽(内寸 10×9×6 cm、鋼鉄製)、

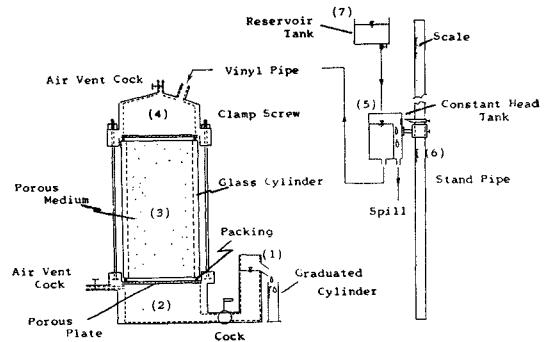


図-4 実験装置

(6) スタンドパイプ(寸法 2.5×2.5×75 cm、真ちゅう製)、(7) 貯留ビーカ(高さ 15.0 cm、内径 10.0 cm、ガラス製)である。なお、試験器とオーバフロー槽を連結するものは内径 0.8 cm のビニールパイプである。

実験方法は定水位透水試験の場合まったく同じであるため省略する。

##### (2) 土試料

土試料は図-5にその粒径加積曲線を示した三種である。それぞれの試料は土の三角座標による分類からすれば、粘土、シルト質粘土、細砂である。ここで、粘土は市販されている笠岡粘土(褐色)、また、シルト質粘土は大阪市内の地下鉄工事現場から採取したもので黒色である。さらに、細砂は市販のものである。

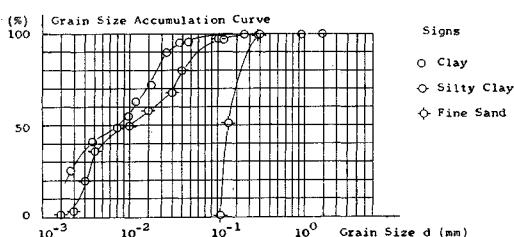


図-5 土試料の粒径加積曲線

平均粒径 $d_m$ は、粘土 $d_m=0.002$  cm、シルト $d_m=0.0031$  cm、細砂 $d_m=0.032$  cmである。また、土試料の比重、実験時の空げき率については表-1に一括して掲げてある。

##### (3) 浸透流体

実験に用いられた流体は水、メチルアルコール(メタノール) $CH_3OH$ 、ベンゼン $C_6H_6$ である。

水は普通の水道水であり、メチルアルコールは純度 99.5%、ベンゼンは純度 90% 以上で、市販のものである。なお、実験流体の特性は実験時の温度で表-1に示されている。

表-1 流体特性と多孔体特性

		粘 土	シルト質粘土	細 砂
水	$T$	11.0	16.0	15.0
	$r$	2.63	2.708	2.65
	$\lambda$	46.2	44.3	38.2
	$d_m$	0.002	0.0031	0.032
	$\rho$	0.9996	0.9987	0.9991
	$\nu$	0.0127	0.0112	0.0115
メチルアルコール	$T$	13.0	14.0	12.0
	$r$	2.63	2.708	2.65
	$\lambda$	46.2	44.3	38.2
	$d_m$	0.002	0.0031	0.032
	$\rho$	0.813	0.812	0.814
	$\nu$	0.0075	0.0075	0.0074
ベンゼン	$T$	11.0	11.0	11.0
	$r$	2.63	2.708	2.65
	$\lambda$	46.2	44.3	38.2
	$d_m$	0.002	0.0031	0.032
	$\rho$	0.88	0.88	0.88
	$\nu$	0.0078	0.0078	0.0078

$T$ : 水温 (°C),  $r$ : 土の真比重,  $\lambda$ : 空げき率,  $d_m$ : 平均粒径 (cm),

$\varphi$ : 流体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\nu$ : 流体の動粘性係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

(流体特性は水工学便覧による)<sup>10)</sup>

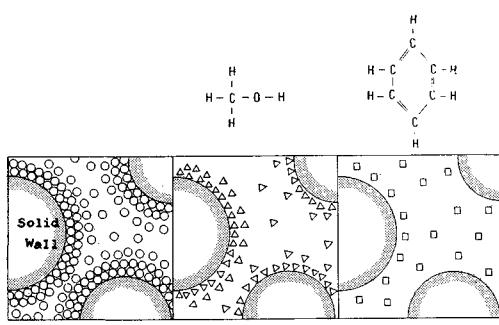


図-6 流場想定図

よく知られているように、メチルアルコール、およびベンゼンの化学構造式は図-6 に示したもので、メチルアルコールは弱い（電気的）極性を有し、ベンゼンは無極性分子である。

したがって、これら三種の流体で浸透実験を行なった場合、微粒土中の空げき内部での流場はミクロ的に図-6 に示したようになると考えられる。

つまり、図中 (a) のように、水分子は土粒子表面に吸着され、流水断面積を減少させ、流場内の粘性は高くなる。しかし、メチルアルコールの場合、(b) のように吸着作用は弱く、水ほど吸着粘性は顕われない。ベンゼンの場合、(c) のごとく無極性分子であるため吸着はまったく起こらず、吸着効果は考えられない。したがって、ベンゼンによる浸透実験の結果、吸着効果をまったく受けない流れを再現することができ、水による透水試験結果と照合し、吸着水の特性を把握することができる。

## 5. 実測結果

粘土、シルト質粘土、細砂の浸透実験結果がそれぞれ、見掛けの流速  $v$ 、浸透係数  $k$ 、レイノルズ数  $R_e$ 、抵抗係数  $\zeta$ について表-2~4 に掲げられている。なお、表中のレイノルズ数、抵抗係数の表現は最もしばしば用いられる

表-2 粘土の浸透実験結果

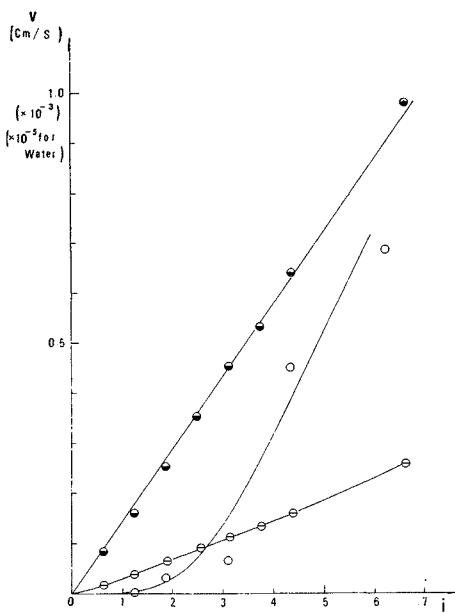
	$i$	$v(\text{cm/sec})$	$k(\text{cm/sec})$	$R_e$	$\zeta$
水	1.250	$3.530 \times 10^{-8}$	$2.824 \times 10^{-8}$	$5.764 \times 10^{-9}$	$3.932 \times 10^{15}$
	1.875	$3.236 \times 10^{-7}$	$1.726 \times 10^{-7}$	$5.284 \times 10^{-8}$	$7.019 \times 10^{13}$
	3.125	$6.496 \times 10^{-7}$	$2.079 \times 10^{-7}$	$1.061 \times 10^{-7}$	$2.903 \times 10^{13}$
	4.375	$4.511 \times 10^{-6}$	$1.031 \times 10^{-6}$	$7.366 \times 10^{-7}$	$8.428 \times 10^{11}$
	6.250	$6.857 \times 10^{-6}$	$1.097 \times 10^{-6}$	$1.120 \times 10^{-6}$	$5.211 \times 10^{11}$
	15.000	$1.715 \times 10^{-5}$	$1.143 \times 10^{-6}$	$2.800 \times 10^{-6}$	$2.000 \times 10^{11}$
メチルアルコール	0.625	$1.291 \times 10^{-5}$	$2.066 \times 10^{-5}$	$3.344 \times 10^{-6}$	$1.470 \times 10^{10}$
	1.250	$3.322 \times 10^{-5}$	$2.658 \times 10^{-5}$	$8.604 \times 10^{-6}$	$4.438 \times 10^9$
	1.875	$6.195 \times 10^{-5}$	$3.304 \times 10^{-5}$	$1.605 \times 10^{-5}$	$1.915 \times 10^9$
	2.500	$8.776 \times 10^{-5}$	$3.510 \times 10^{-5}$	$2.273 \times 10^{-5}$	$1.272 \times 10^9$
	3.125	$1.079 \times 10^{-4}$	$3.453 \times 10^{-5}$	$2.795 \times 10^{-5}$	$1.052 \times 10^9$
	3.750	$1.312 \times 10^{-4}$	$3.499 \times 10^{-5}$	$3.399 \times 10^{-5}$	$8.537 \times 10^8$
ベンゼン	4.375	$1.562 \times 10^{-4}$	$3.570 \times 10^{-5}$	$4.045 \times 10^{-5}$	$7.029 \times 10^8$
	6.563	$2.584 \times 10^{-4}$	$3.937 \times 10^{-5}$	$6.693 \times 10^{-5}$	$3.853 \times 10^8$
	0.625	$8.488 \times 10^{-5}$	$1.358 \times 10^{-4}$	$2.156 \times 10^{-5}$	$3.400 \times 10^8$
	1.250	$1.576 \times 10^{-4}$	$1.261 \times 10^{-4}$	$4.004 \times 10^{-5}$	$1.972 \times 10^8$
	1.875	$2.526 \times 10^{-4}$	$1.347 \times 10^{-4}$	$6.417 \times 10^{-5}$	$1.152 \times 10^8$
	2.500	$3.537 \times 10^{-4}$	$1.415 \times 10^{-4}$	$8.983 \times 10^{-5}$	$7.834 \times 10^7$
ゼン	3.125	$4.515 \times 10^{-4}$	$1.445 \times 10^{-4}$	$1.147 \times 10^{-4}$	$6.008 \times 10^7$
	3.750	$5.305 \times 10^{-4}$	$1.415 \times 10^{-4}$	$1.347 \times 10^{-4}$	$5.224 \times 10^7$
	4.375	$6.388 \times 10^{-4}$	$1.460 \times 10^{-4}$	$1.623 \times 10^{-4}$	$4.203 \times 10^7$
	6.563	$9.787 \times 10^{-4}$	$1.491 \times 10^{-4}$	$2.486 \times 10^{-4}$	$2.686 \times 10^7$

表-3 シルト質粘土の浸透実験結果

	$i$	$v(\text{cm/sec})$	$k(\text{cm/sec})$	$R_e$	$\zeta$
水	0.625	$1.804 \times 10^{-6}$	$2.886 \times 10^{-6}$	$4.817 \times 10^{-7}$	$1.167 \times 10^{12}$
	1.250	$3.299 \times 10^{-6}$	$2.639 \times 10^{-6}$	$8.808 \times 10^{-7}$	$6.981 \times 10^{11}$
	1.875	$1.074 \times 10^{-5}$	$5.728 \times 10^{-6}$	$2.868 \times 10^{-6}$	$9.881 \times 10^{10}$
	2.500	$2.512 \times 10^{-5}$	$1.005 \times 10^{-6}$	$6.707 \times 10^{-6}$	$2.407 \times 10^{10}$
	3.125	$2.806 \times 10^{-5}$	$8.979 \times 10^{-6}$	$7.492 \times 10^{-6}$	$2.411 \times 10^{10}$
	3.750	$3.753 \times 10^{-5}$	$1.001 \times 10^{-5}$	$1.002 \times 10^{-5}$	$1.617 \times 10^{10}$
メチルアルコール	4.375	$4.677 \times 10^{-5}$	$1.069 \times 10^{-5}$	$1.249 \times 10^{-5}$	$1.215 \times 10^{10}$
	6.563	$7.146 \times 10^{-5}$	$1.089 \times 10^{-5}$	$1.908 \times 10^{-5}$	$7.808 \times 10^9$
	0.625	$1.353 \times 10^{-5}$	$2.165 \times 10^{-5}$	$5.534 \times 10^{-6}$	$2.074 \times 10^{10}$
	1.250	$4.872 \times 10^{-5}$	$3.898 \times 10^{-5}$	$1.993 \times 10^{-5}$	$3.199 \times 10^9$
	1.875	$7.507 \times 10^{-5}$	$4.004 \times 10^{-5}$	$3.070 \times 10^{-5}$	$2.021 \times 10^9$
	2.500	$1.126 \times 10^{-5}$	$4.504 \times 10^{-5}$	$4.605 \times 10^{-5}$	$1.198 \times 10^9$
ベンゼン	3.125	$1.405 \times 10^{-5}$	$4.496 \times 10^{-5}$	$5.746 \times 10^{-5}$	$9.619 \times 10^8$
	3.750	$1.732 \times 10^{-5}$	$4.619 \times 10^{-5}$	$7.084 \times 10^{-5}$	$7.595 \times 10^8$
	4.375	$1.970 \times 10^{-5}$	$4.503 \times 10^{-5}$	$8.057 \times 10^{-5}$	$6.850 \times 10^8$
	6.563	$3.176 \times 10^{-5}$	$4.839 \times 10^{-5}$	$1.299 \times 10^{-4}$	$3.952 \times 10^8$
	0.625	$1.334 \times 10^{-4}$	$2.134 \times 10^{-4}$	$5.243 \times 10^{-5}$	$2.134 \times 10^8$
	1.250	$2.613 \times 10^{-4}$	$2.090 \times 10^{-4}$	$1.027 \times 10^{-4}$	$1.112 \times 10^8$
ゼン	1.875	$3.825 \times 10^{-4}$	$2.040 \times 10^{-4}$	$1.503 \times 10^{-4}$	$7.787 \times 10^7$
	2.500	$5.305 \times 10^{-4}$	$2.122 \times 10^{-4}$	$2.085 \times 10^{-4}$	$5.398 \times 10^7$
	3.125	$6.756 \times 10^{-4}$	$2.162 \times 10^{-4}$	$2.655 \times 10^{-4}$	$4.160 \times 10^7$
	3.750	$7.795 \times 10^{-4}$	$2.079 \times 10^{-4}$	$3.063 \times 10^{-4}$	$3.750 \times 10^7$
	4.375	$9.311 \times 10^{-4}$	$2.128 \times 10^{-4}$	$3.659 \times 10^{-4}$	$3.066 \times 10^7$
	6.563	$1.386 \times 10^{-3}$	$2.112 \times 10^{-4}$	$5.447 \times 10^{-4}$	$2.076 \times 10^7$

表-4 細砂の浸透実験結果

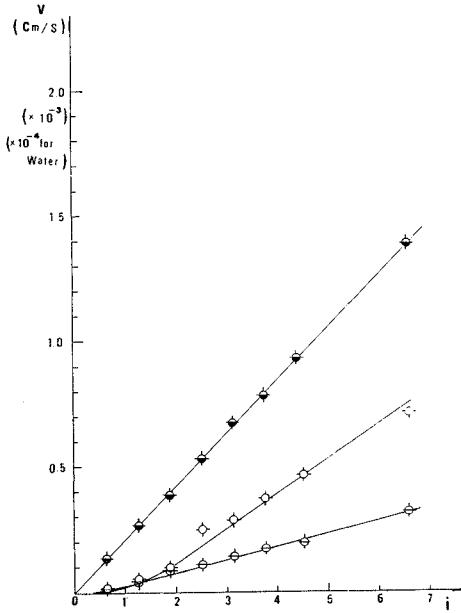
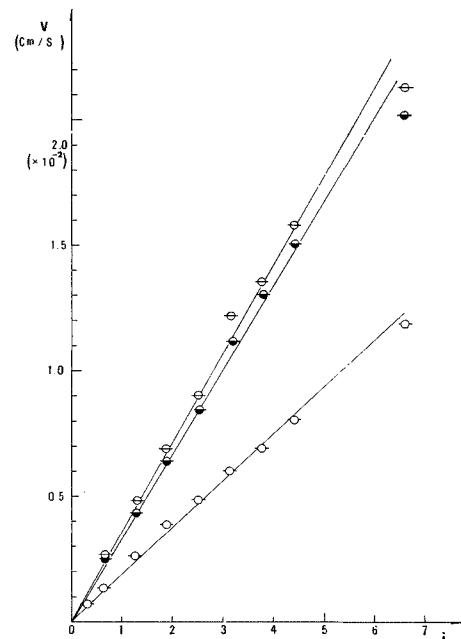
	$i$	$v$ (cm/sec)	$k$ (cm/sec)	$R_e$	$\zeta$
水	0.313	$7.150 \times 10^{-3}$	$2.284 \times 10^{-2}$	$1.868 \times 10^{-1}$	$3.842 \times 10^5$
	0.625	$1.364 \times 10^{-2}$	$2.182 \times 10^{-2}$	$3.563 \times 10^{-2}$	$2.108 \times 10^5$
	1.250	$2.546 \times 10^{-2}$	$2.037 \times 10^{-2}$	$6.650 \times 10^{-2}$	$1.210 \times 10^5$
	1.875	$3.655 \times 10^{-2}$	$1.949 \times 10^{-2}$	$9.547 \times 10^{-2}$	$8.802 \times 10^4$
	2.500	$4.885 \times 10^{-2}$	$1.954 \times 10^{-2}$	$1.276 \times 10^{-1}$	$6.572 \times 10^4$
	3.125	$5.976 \times 10^{-2}$	$1.912 \times 10^{-2}$	$1.561 \times 10^{-1}$	$5.489 \times 10^4$
	3.750	$6.860 \times 10^{-2}$	$1.829 \times 10^{-2}$	$1.792 \times 10^{-1}$	$4.998 \times 10^4$
	4.375	$7.968 \times 10^{-2}$	$1.821 \times 10^{-2}$	$2.081 \times 10^{-1}$	$4.322 \times 10^4$
	6.563	$1.182 \times 10^{-1}$	$1.801 \times 10^{-2}$	$3.088 \times 10^{-1}$	$2.944 \times 10^4$
メチルアルコール	0.625	$2.685 \times 10^{-2}$	$4.296 \times 10^{-2}$	$1.113 \times 10^{-1}$	$5.438 \times 10^4$
	1.250	$4.850 \times 10^{-2}$	$3.880 \times 10^{-2}$	$2.011 \times 10^{-1}$	$3.333 \times 10^4$
	1.875	$6.842 \times 10^{-2}$	$3.649 \times 10^{-2}$	$2.837 \times 10^{-1}$	$2.512 \times 10^4$
	2.500	$8.986 \times 10^{-2}$	$3.594 \times 10^{-2}$	$3.726 \times 10^{-1}$	$1.942 \times 10^4$
	3.125	$1.213 \times 10^{-1}$	$3.880 \times 10^{-2}$	$5.027 \times 10^{-1}$	$1.333 \times 10^4$
	3.750	$1.348 \times 10^{-1}$	$3.594 \times 10^{-2}$	$5.588 \times 10^{-1}$	$1.294 \times 10^4$
	4.375	$1.575 \times 10^{-1}$	$3.601 \times 10^{-2}$	$6.531 \times 10^{-1}$	$1.106 \times 10^4$
	6.563	$2.181 \times 10^{-1}$	$3.247 \times 10^{-2}$	$8.834 \times 10^{-1}$	$9.067 \times 10^3$
	0.625	$2.544 \times 10^{-2}$	$4.070 \times 10^{-2}$	$1.032 \times 10^{-1}$	$6.057 \times 10^4$
ベンゼン	1.250	$4.406 \times 10^{-2}$	$3.525 \times 10^{-2}$	$1.788 \times 10^{-1}$	$4.039 \times 10^4$
	1.875	$6.409 \times 10^{-2}$	$3.418 \times 10^{-2}$	$2.601 \times 10^{-1}$	$2.863 \times 10^4$
	2.500	$8.445 \times 10^{-2}$	$3.378 \times 10^{-2}$	$3.427 \times 10^{-1}$	$2.199 \times 10^4$
	3.125	$1.172 \times 10^{-1}$	$3.751 \times 10^{-2}$	$4.757 \times 10^{-1}$	$1.426 \times 10^4$
	3.750	$1.309 \times 10^{-1}$	$3.491 \times 10^{-2}$	$5.312 \times 10^{-1}$	$1.373 \times 10^4$
	4.375	$1.536 \times 10^{-1}$	$3.512 \times 10^{-2}$	$6.234 \times 10^{-1}$	$1.163 \times 10^4$
	6.563	$2.079 \times 10^{-1}$	$3.167 \times 10^{-2}$	$8.435 \times 10^{-1}$	$9.526 \times 10^3$

図-7 粘土の  $v \sim i$  関係

$$R_e = \frac{v \cdot d_m}{\nu} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$i = \frac{\zeta}{d_m} \frac{v^2}{2g} \quad \dots \dots \dots (5)$$

で計算されている。ここで、 $\nu$ : 流体の動粘性係数,  $d_m$ : 平均粒径である。さらに、これらの計算に必要な流体、多孔体特性値は表-1に掲げたものを用いた。粘土、シ

図-8 シルト質粘土の  $v \sim i$  関係図-9 細砂の  $v \sim i$  関係

ルト質粘土、細砂の  $v \sim i$  関係を水、メチルアルコール、ベンゼンについてプロットしたものが、図-7、8、9 である（図中の記号は図-10に対応する）。図-7、8 中、水による  $v$  はプロットの都合上、それぞれ、 $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  乗である。

水による  $v \sim i$  関係は粘土、シルト質粘土の場合とともに吸着効果による非線型性が明確であり、始動動水勾配

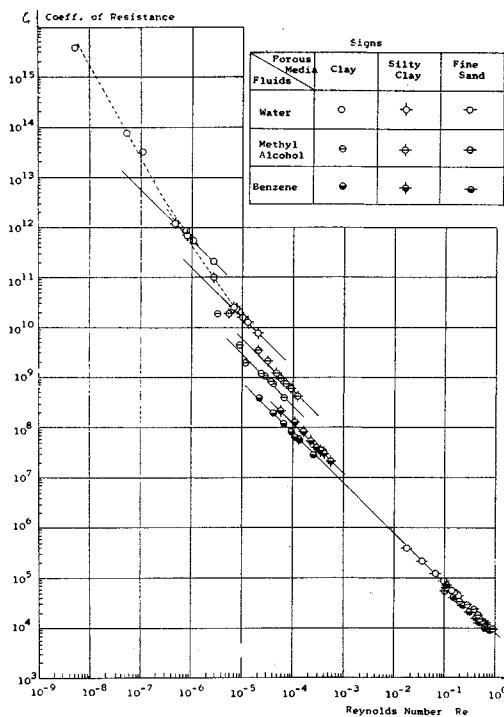


図-10 抵抗係数とレイノルズ数の関係

も認められる。

しかし、メチルアルコールの場合、吸着効果は弱いため、ほぼ  $v_i$  関係は線型的である。ベンゼンの場合、吸着効果がないためダルシー則がそのまま成立する。

他方、細砂の  $v \sim i$  関係は水、メチルアルコール、ベンゼンともにダルシー則を満たしている。

つまり、水、メチルアルコールの場合でも、細砂のように空げき規模が微粒土に比べ大きいとき、吸着効果は顕著でないことがわかる。

これらの結果は抵抗係数とレイノルズ数で整理すれば、図-10 のようになり、吸着効果による流場内の粘性の見掛け上の増加、いいかえれば、抵抗係数の増加を的確に知ることができよう。

6. 檢討

実測結果をもとに  $v \sim i$  関係,  $\zeta \sim R_e$  関係, 流場内の平均粘性係数、平均吸着水層の厚さについて考える。

(1)  $v \sim i$  関係

粘土、シルト質粘土の場合の透水実験から、 $v \sim i$  関係に注目する。

1. で述べたように、 $v \sim i$  関係の従来の実測結果には三通りのタイプが観測されているが、筆者らの実験では

図-1 の (c) の形である。つまり、粘土、シルト質粘土の二者の結果ともに始動動水勾配が存在し、 $v \sim i$  関係は  $i$  の増加とともに非線型的に変化している。

微速浸透流のメカニズムについて前述したように粘土では  $i_n=3$  程度、シルト質粘土では  $i_n=2$  程度を限界値として、 $i_n > i$  で  $v \sim i$  関係はレオロジー的変化を、 $i_n < i$  でダルシー則を満たす、いわゆるニュートン流動的変化を示すことがわかる。要するに、微速浸透流はレオロジー的特性と流体力学的特性をあわせもつことが実測結果から認められる。

次に、 $v \sim i$  関係の定式化であるが、これら実測では Buckingham-Reiner の式、Swartzendruber の経験式がそれぞれの式に含まれる定数を適当に決めれば、成立するものと考えられる。

## (2) 抵抗係数とレイノルズ数の関係

抵抗係数とレイノルズ数の関係は、通常水の吸着効果が流れに大きな影響を与えない場合、

であることが知られている。ここで、 $\alpha$  は多孔体の幾何的形状にのみ関係する定数である。

しかし、図-10 からわかるように粘土、シルト質粘土の実測結果は前者の場合、 $R_e = 10^{-6}$  程度、後者は  $R_e = 10^{-5}$  程度から、式(6)の関係に従わない  $R_e$  がある。

このことを明確に知るため、粘土、シルト質粘土による水、ベンゼンの実測結果を  $\zeta R_e \sim R_e$  関係でプロットしたものが 図-11 である。図から、ベンゼンの場合は吸着効果がないから式(6)は成立するが、水の場合は吸着効果のため、単純に式(6)が成立しない。ここで、特に注目したいのは、同一の粘土、シルト質粘土で空げき率が同一であるにもかかわらず(表-1 参照)、式(6)の  $a$  の値が水とベンゼンの場合に大きく違っていることである。これが後述する流場内の平均粘性係数の見掛け

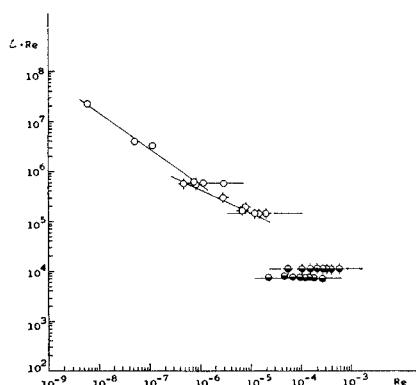


図-11  $\zeta R_s \approx R_s$  關係





存在、あるいは平均粘性係数の見掛け上の増大という概念によって簡単に扱うことができる。前者の立場をとれば、 $t=1.8$  ミクロン程度であり、後者の立場をとれば、 $\alpha=10\sim10^2$  程度であると考えられる。

## 8. あとがき

筆者らは微粒土中の浸透流の特異性をまったく水分子の土粒表面への吸着であると断定して、研究を進めた。しかしながら、微粒土中の水はそれ自体ミクロに観察すれば、化学的にも物理的にも非常にやっかいなものと考える。たとえば、最近、新しい水<sup>11)</sup>として発見され、注目されている“super water”あるいは“polywater”に着目しても、その一端はうかがえる。この新しい水は数十ミクロンの石英、あるいはガラスの細管の中で容易に形成され、物理特性（密度  $1.01\sim1.4 \text{ g/cm}^3$ 、粘性、通常の水の約 15 倍）が通常の水と異なっている。

このことから、筆者らが吸着水と呼んでいる水がこの新しい水である可能性が粘土の鉱物成分からみて皆無とはいえない。

もし、吸着効果の中にこの新しい水が存在するとすれ

ば、別の立場から微速浸透流を考える必要があろう。

## 参考文献

- 1) King, F.H. : Principles and Conditions of the Movement of Ground Water, U.S. Geol. Survey, the 19th Ann. Rept., Part 2, pp. 59~294, 1898.
- 2) Hansbo, S. : Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains, Swed. Geotech. Inst., Proc. No. 18, Stockholm, pp. 41~62, 1960.
- 3) Kutilek, M. : Temperature and Non-Darcian Flow of Water, Internat. Soil Water Symp., Praha, pp. 44~48, 1967.
- 4) Swartzendruber, D. : Modification of Darcy's Law for the Flow of Water in Soils, Soil Science, Vol. 93, p. 23, 1961.
- 5) Swartzendruber : Non-Darcy Flow Behavior in Liquid-Saturated Porous Media, J. Geophy. Res., Vol. 67, No. 7, p. 5207, 1962.
- 6) Hansbo, S. : 前出
- 7) 佐藤：低レイノルズ数浸透流における吸着水の影響について、土木学会論文報告集、187 号、pp. 67~77, 1971.
- 8) 崎川：物性論、共立出版、p. 33, S. 43.
- 9) 佐藤：前出
- 10) 春日屋編：水工学便覧、森北出版、pp. 2~7.
- 11) 伊藤：科学、Vol. 39, No. 12, p. 653.

(1971.5.24・受付)