

毛管モデルによる不飽和透水係数の評価

HYDRAULIC DETERMINATION OF PERMEABILITY IN UNSATURATED
INFILTRATION BY A CAPILLARY MODEL

玉井 信行*・浅枝 隆**・田中 靖治***

By Nobuyuki TAMAI, Takashi ASAEDA and Yasuharu TANAKA

Fundamental quantities to formulate mechanics of liquid column in capillary tube were investigated experimentally. They are the critical length for liquid columns, the contact angle of water column with the wall in dynamic condition and the thickness of liquid films retained on the wall of the tube. Magnitude of terms which consist of momentum equation is evaluated and it is concluded that the effect of the inertia term is negligibly small. Based on the dynamic parameters experimentally determined, permeability in unsaturated infiltration is successfully simulated as a function of water content by a capillary tube model in which water columns are assumed to distribute randomly. The capillary model developed herein possibly describes the major mechanism of unsaturated infiltration of water.

Keywords : permeability, unsaturated infiltration, capillary model

1. はじめに

不飽和浸透現象はその現象の複雑さのため、空隙中の水粒子の流れ方については、従来はブラックボックスとした扱いがなされており、具体的な物理像や力学的なつり合いは不明な部分が多い。すなわち、地下水の運動を拡散型微分方程式で記述し、その拡散係数にあたる透水係数は、経験的に吸引圧 Ψ の関数である体積含水率 θ の関数として求めようとするものである¹⁾。しかしながら、このようにして経験的に求められた透水係数を用いた解析においては、透水係数の力学的な裏付けがあまりないため、水の流動に影響する要因の相互関係に立ち入ることはできない。そのため、従来の方法では、同様の浸透現象であっても、高圧下の浸透現象のように物理条件が通常のものとは異なった現象への適用には限界がある。また、荻原²⁾は空隙率測定のみでは材料の空隙状態まで判定できないことを示すとともに、空隙分布がきわめて重要なパラメーターとなることを明らかにしている。さらに、放射性物質のような微量でも有害な物

質が地下水中に溶出する場合においては、少量でも水粒子が到達することが問題となるため、こうした場合においても従来の解析方法では適用に限界があるといえる。以上のような場合においても解析を可能とするためには、土粒子の空隙中の水の移動形態を微視的に明らかにする必要がある。

土中の空隙中の水の存在もしくは移動形態については、雨が降るとただちに流出が始まることなどの経験から、ピストン流的な滞留水の流出についての考察がなされている³⁾。しかし、完全飽和状態を実現させることの難しさを考慮すると、数十 m にもわたって水柱がつながっているとは考えにくく、細かく分かれた水柱が分散して存在していると考えの方が自然であろう。

分散した水柱が移動して行く場合、移動して行く先に別の水柱が存在すればそれと合併を繰り返しながら移動して行くことが考えられる。したがって、浸潤前線の移動や単一な水柱の移動とは異なった現象が生ずるのである。

本研究はこのような視点にたち、土中に細かい水柱が分散して存在すると考えた場合について、従来よく使用されている空隙を毛細管で近似したモデルについて浸透特性を求め、不飽和浸透流の力学機構についての検討を行ったものである。

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科(同上)

*** 学生会員 東京大学大学院土木工学専門課程(同上)

2. 毛管内の水柱の運動についての理論式

空隙を毛細管の集合で近似させたモデルは、従来、大山ら⁴⁾(1962), Campbel¹⁾(1974), Lenormanら⁵⁾(1983)により取り扱われている。このうち、大山らおよびCampbelは、静止した水柱を取り扱っているか、もしくは静止したものと同様な取り扱いをしている。Lenormanらによる取り扱いは、枝分かれした管における単純な水柱の圧力損失を求めたものであり、水柱の動きについての力学的関係については取り扱われていない。以上のことからここではまず、水柱に作用する力のつり合いの結果として生ずる速度について見積ることとする。

まず、図-1に示すような鉛直に置かれた毛管内の単一の水柱について考える。円筒座標系表示によるナビエー・ストークスの方程式は

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

である。ここに、 r, θ, z はそれぞれ半径方向、円周方向、軸方向の座標を意味し、 V_r, V_θ, V_z はこれらの方向の速度成分を示す。また、体積力 F_z は $F_z = \rho g$ と表わせる。

この式において、 $V_r \neq 0, V_\theta \neq 0, \partial V_z / \partial \theta = 0$ であり、 V_z の値は小さく鉛直方向にあまり変化しないことを考慮すると、 $\rho V_r \partial V_z / \partial r, (\rho V_\theta / r) \cdot \partial V_z / \partial \theta, (\mu / r^2) \cdot \partial^2 V_z / \partial \theta^2, \mu \partial^2 V_z / \partial z^2$ の項はほとんど無視でき、これらの微小項を除いたものを水平断面全体にわたり積分すると

$$\rho \int_0^a 2\pi r \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial V_z^2}{\partial z} \right) dr = \int_0^a 2\pi r F_z dr - \int_0^a 2\pi r \frac{\partial p}{\partial z} dr$$

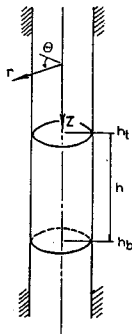


図-1 毛管における円筒座標系

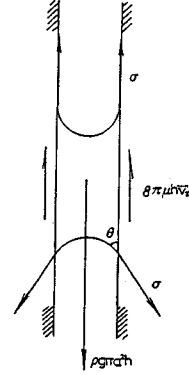


図-2 毛管内の水柱に働く力

$$+ \mu \int_0^a \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \cdot 2\pi r dr \dots\dots\dots(2)$$

が求まる。

水柱の断面平均速度を \bar{V}_z とし、断面内の速度分布 $V_z = 2\bar{V}_z(1 - r^2/a^2)$ を代入する。さらに水柱の上端においては水と毛管壁との接触角を 0° と仮定し、また水柱の下端における水と毛管壁との接触角を θ とおき、水柱の上端 h_t から下端 h_b まで積分し、表面張力を示す項を取り出すと式(2)は次のようになる(図-2参照)。

$$2a\sigma(1 - \cos\theta) = \rho g h a^2 - 8\mu h \bar{V}_z - \rho a^2 \frac{\partial(h\bar{V}_z)}{\partial t} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 a は毛管の内半径、 h は毛管内の水柱の長さ、 σ は表面張力、 μ は粘性係数で、式(3)の右辺の第1項は重力の効果を、第2項は粘性力を、第3項は慣性力を表わす。

ここで、式(3)の右辺の各項をそれぞれ

Term 1 = $\rho g h a^2$

Term 2 = $8\mu h \bar{V}_z$

Term 3 = $\rho a^2 \frac{\partial(h\bar{V}_z)}{\partial t}$

とおくことにする。

これより、式(3)は

$$\cos\theta = \frac{-\text{Term 1} + \text{Term 2} + \text{Term 3}}{2a\sigma} + 1 \dots\dots(4)$$

と書ける。

3. 実験

連続して存在する空隙を単純化した毛管内で生ずる基本的な現象を把握するために、単一毛管中で液柱を落下させる実験を行った。このような実験で得られる結果は、実際に空隙中で生ずる現象とは多少異なっていることが予想されるが、基本的なメカニズムを知るためには必要なものである。実際の土粒子間に存在する空隙の場合に

表—1 粘性に対する染料の影響

液体	温度(℃)	ν (cm ² /sec)	平均
水	17.0	$\times 10^{-2}$ 1.04	1.03×10^{-2}
		1.04	
		1.01	
ウォーター・ブルーで染色された水	17.0	$\times 10^{-2}$ 1.06	1.07×10^{-2}
		1.07	
		1.07	
エタノール	16.5	$\times 10^{-2}$ 1.61	1.58×10^{-2}
		1.56	
		1.57	
ウラニンで染色されたエタノール	17.0	$\times 10^{-2}$ 1.57	1.58×10^{-2}
		1.59	

は、空隙相互の連結の仕方も不規則であり、連結してパイプ状になった空隙の断面積も不規則に変化するものである。しかし、空隙相互の連結の仕方の不規則性を鉛直毛管で近似したことから生ずる誤差は2倍程度であり、連結した一連の空隙内の断面積が変化することにより抵抗等に及ぼす効果も最大数倍以内に収まるものと考えられる。従来の透水実験で生じている誤差やばらつきが数倍程度はあることを考慮すれば、この程度の差は許容範囲内にあると考えてよいであろう。

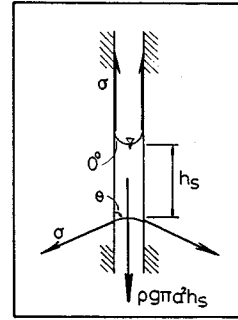
実験では内径が1.14 mm および0.64 mm の2本のガラス性の毛管を用いた。毛管を鉛直に設置し、目盛りを貼付した棒を毛管の横に密着させて固定した。この毛管の下端を密封した状態で注射器を用いて毛管の上端から液体を注入し、落下前の液柱の長さおよび液柱下端の位置を計測した。次に毛管の下端を開放し液柱を落下させ、その様子をビデオカメラで撮影し、経過時間と液柱位置、長さを求め、落下速度、落下中に管壁にとり残される量を計測した。

実験に用いた液体は、水、エタノール、シリコンオイルの3種類で、それぞれウォーターブルー、ウラニン、オイルレッドにより染色して用いた。

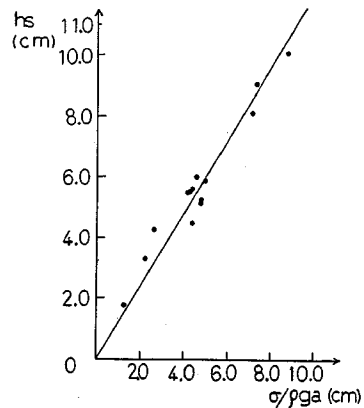
なお、実験に先立ちこれらの染料が粘性に及ぼす影響を調べ、その結果をまとめたものが表—1である。これより、水、エタノールの両方ともに粘性に対する染料の影響はほとんど無視してよいと判断される。

4. 水柱の移動特性

(1) 毛管内の水柱の臨界長、および接触角の臨界値
鉛直に立てられた毛管内の水柱は、ある長さまでは表面張力のために静止し得る。静止し得る最大の長さを臨



図—3 毛管内で静止している水柱に働く力のつり合い



図—4 毛管の内半径 a と臨界長 h_s の関係

界長とよび、 h_s で表わすことにする。

ところで、図—3のように水柱の上端の部分の水と毛管壁との接触角は、水柱が静止している場合にも表面張力の影響により 0° と仮定してよいと思われる。水柱の下端の部分の水と毛管壁との接触角は表面張力の影響のほかに水柱の自重の影響も加わるので 0° 以外の角 θ をとる。この場合、水柱は静止しているので、水柱に作用している力は水柱の自重と表面張力のみで、力のつり合いの式は

$$h_s = \frac{2\sigma}{\rho g a} (1 - \cos\theta) \dots \dots \dots (5)$$

である。

したがって、臨界長は原理的には、水柱下端の接触角がわかれば流体の物性、管の半径 a の関数として決まるが、ここでは水柱下端の接触角が未知なため、臨界長を実験から求めることにした。

この水柱の臨界長 h_s と毛管の半径 a との関係を調べるため、内径が異なる15種類の毛管(最大径1.14 mm, 最小径0.162 mm)を用いて、臨界長の測定を行った。測定は1つのケースについて数回行い、平均をとった。

$\sigma / \rho g a$ と臨界長 h_s の測定値をプロットしたものが図—4である。図中の直線は、

$$h_s = 1.14\sigma/\rho ga \dots\dots\dots (6)$$

を示す。

式(5)と式(6)を比較することにより

$$\cos\theta = 0.43 \dots\dots\dots (7)$$

を得、下端接触角は水の場合、今回用いた毛管で $\theta = 64.6^\circ$ となることがわかる。

(2) 液柱の長さの変化についての解析

液体に浸っている鉛直壁を一定の速度 w で引き上げた場合、図-5のように鉛直壁の表面上に液体の薄い膜ができ、液面よりも十分高い位置では層の厚さが一定値 h_0 に近づくことが知られている。Levich, V. G.⁶⁾(1962)は、この場合 h_0 と w の間には次のような関係が成り立つことを示している。

$$h_0 \propto \frac{(\mu V_z)^{2/3}}{\sigma^{1/6}(\rho g)^{1/2}} \dots\dots\dots (8)$$

毛管内を液柱が落下していく場合にも、同様にして毛管の内壁の上に液体の薄い膜ができるため、液柱の体積は落下とともに小さくなっていく。このとき、毛管の軸方向の単位長さ当たりに残る液体の量は、液体膜の厚さ h_0 と毛管の内周の長さ πd との積 πdh_0 で表わされる。ただし、 d は毛管の内径である。

式(8)の両辺を無次元化すると

$$R_e = \frac{V_z d}{\nu} \propto \frac{\pi dh_0 V_z^{1/3}}{\nu^{2/3}} \cdot \frac{g^{1/2} \sigma^{1/6}}{\rho^{1/6}} \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。

今回の実験のデータについて、式(9)の両辺の値を計算しプロットしたものが図-6である。図-6の中の直線はデータから得られた値を原点を通る直線で近似したものであり

$$\frac{\pi dh_0 V_z^{1/3}}{\nu^{2/3}} \cdot \frac{g^{1/2} \sigma^{1/6}}{\rho^{1/6}} = 1.91 \times R_e \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。これより膜厚として

$$h_0 = 0.61 \times \frac{(\mu V_z)^{2/3}}{\sigma^{1/6}(\rho g)^{1/2}} \dots\dots\dots (11)$$

が求まる。したがって、液柱の長さを h とし z 軸の正

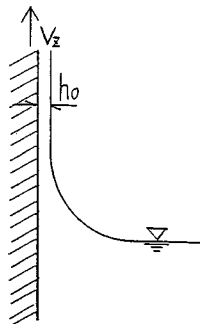


図-5 壁面上に残る液体膜

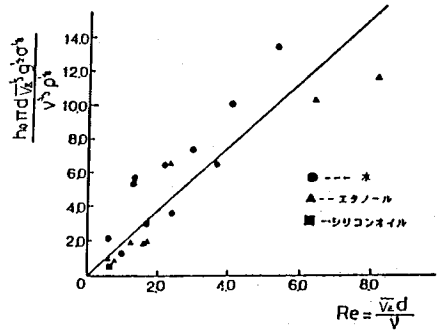


図-6 液体の膜の厚さ h_0 と落下速度 \bar{V}_z の関係

の向きを鉛直下向きにとり、式(11)を考慮すると液柱が dz 落下した時点における液柱の長さは

$$dh = -\frac{h_0 \cdot 2\pi a \cdot dz}{\pi a^2} = -0.61 \cdot \frac{2dz}{a} \cdot \frac{(\mu V_z)^{2/3}}{\sigma^{1/6}(\rho g)^{1/2}} \dots\dots\dots (12)$$

だけ短くなることがわかる。

(3) 運動時の水柱下端の接触角

水柱静止時の下端接触角は(1)に記してある順序で求まることになるが、水柱が落下している場合にはこの角は変化する。

3. の実験結果および該当する物理量を式(4)に代入することにより、水柱の下端の接触角 θ の値が求められる。実験で水を使ったケースのすべてについて、いろいろな時刻における θ/θ_s と h/h_s の値を計算によって求め、それをプロットしたのが図-7である。この図から水柱が止まっているときだけでなく動いているときにも、 θ/θ_s と h/h_s の間には有意な関係があると考えられる。

図中の曲線は θ/θ_s を h/h_s の2次式で近似したもので、

$$\theta/\theta_s = 0.644 + 0.269h/h_s + 0.084(h/h_s)^2 \dots\dots\dots (13)$$

である。

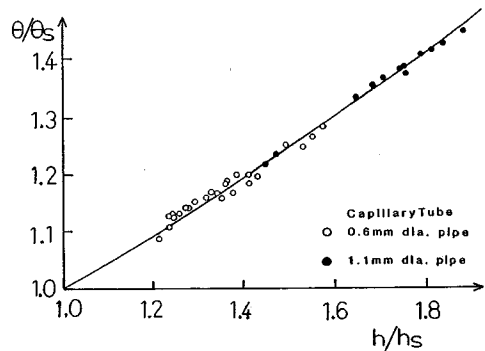


図-7 水柱下端の接触角 θ と水柱の長さ h の関係

表-2 式(3)における各項のオーダーの比較

実験 番号	Term 1 ×10 ⁵	Term 2 ×10 ⁸	Term 3 ×10 ¹⁰
R1	6.40	5.77	1.39
R2	6.73	4.54	3.93
R3	7.37	6.39	7.19
R4	7.59	28.52	12.06
R5	7.16	20.16	4.70

(4) 水柱の落下のメカニズム

ここで2. で定義された Term 1~Term 3 のオーダーを比べてみる。3. の実験において水を使って行った実験5回分について、Term 3の絶対値の最大値およびTerm 1, Term 2の最小値を表にしたものが、表-2である。表から明らかなように、Term 1, Term 2に比べ、Term 3は無視できる。Term 3は水柱の非定常性に起因する量であり、実際の土中ではこの傾向はさらに著しいであろう。したがって式(3)において $\rho a^2 \partial(h\bar{V}_z) / \partial t$ を無視すると次式が得られる。

$$\bar{V}_z = \frac{\rho a^2 g h - 2a\sigma(1 - \cos\theta)}{8\mu h} \dots\dots\dots(14)$$

実験によって得られた結果をまとめると、毛管の内半径 a と水柱の長さの初期値 h_0 を与えれば、

- I) 式(13)により θ の値が求まる。
- II) その θ および a, h_0 を式(14)に代入することにより水柱の落下速度 \bar{V}_z が求まる。
- III) その \bar{V}_z により Δt 秒間に水柱の動く距離 dz が求まる。
- IV) その \bar{V}_z, dz, a を式(12)に代入することにより、 Δt 秒後の水柱の長さがわかる。

I)~IV) を繰り返せば、毛管内を落下する水柱の運動の模擬ができる。

5. 不飽和浸透のシミュレーション

(1) 毛管モデルの考え方

4. で得られた結果を用い、多孔質媒体の空隙を毛管でモデル化することにより不飽和浸透現象のシミュレーションを行い、与えられた体積含水率に対する不飽和透水係数を求めることを試みた。

このシミュレーションにおいては毛管の径が平均値の周りに対数正規分布するものと仮定し⁷⁾、媒体中の体積含水率の初期値は各毛管にあらかじめ与える水柱により模擬させるものとした。なお、各毛管にはどの水平断面においても飽和度がほぼ一樣になるようにあらかじめ水柱を分布させることにした。本研究においては、水柱としての水分移動の基本的メカニズムを解明することを目

的としているため、ここでは水柱の長さは正規分布すると仮定し、正規乱数を用いて長短さまざまな長さの水柱が毛管内に分散しているとした。ただし、4. (1)において考察したように臨界長以上の長さをもつ水柱は存在しないと考えられるため、水柱の長さの最大値はその水柱の入っている毛管の径に対する臨界長とした。また、上下の水柱の間隔については一本の毛管における飽和度が全体の飽和度と一致するように間隔の平均値を設定し、各間隔の長さは一様乱数を用いて決定した。

そして毛管より成る多孔質媒体の上下面に圧力差を与えて、毛管内に存在する水柱の落下特性を4. で得られた結論を用いて追跡した。ここで、多孔質媒体の上下面の圧力差は媒体内部において線形に変化すると仮定しその圧力勾配を I とするとき、各水柱に働く外力は $(\rho g + I) \cdot a^2 h$ で与えられる。そのため、たとえば式(14)は次式のようになる。

$$\bar{V}_z = \frac{(\rho g + I) \cdot a^2 h - 2a\sigma(1 - \cos\theta)}{8\mu h} \dots\dots\dots(15)$$

また、水柱が落下していく際、1つの水柱が移動して行く先に別の水柱が存在すれば、2つの水柱の間に存在する空気は、その圧力が上昇することなく水柱間から脱出し、その結果2つの水柱は合併して1つの水柱になるとした。これは、空気が移動するときに受ける抵抗は水分が移動するときに受ける抵抗に比して無視し得るほど小さいことを考慮すれば、許容し得る仮定であろう。このようにして毛管内に散在する水柱は合併を繰り返しながら移動していくものとしている。

このシミュレーションにおいて不飽和透水係数は、適当な深さに検査断面をとり、その断面より流出する水の量から次式により計算した。

$$k = \frac{Q}{i} \cdot \frac{1}{S(1 + I/\rho g)} \dots\dots\dots(16)$$

ただし、 Q は断面積 S を t 秒間に通過する流量であり、 I は毛管内の圧力勾配、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

(2) 不飽和透水係数の算出

河西ら⁸⁾が用いた砂O(粒径0.075~1.0mm)、砂S(粒径0.075~0.5mm)に対する実験および、Watson⁹⁾の砂(粒径0.15~0.3mm)に対する実験のそれぞれに対し、5. (1)に示した毛管モデルにより不飽和透水係数を算出した。

毛管の内半径は図-8に示されるように、粒径の等しい4つの砂粒子にとり囲まれたすき間の中にすっぽり入るように一本の毛管の内半径を定めた。すなわち、毛管をとり囲む砂粒子の半径が R のときに、毛管の内半径 a は $a = (\sqrt{2} - 1)R$ となる。したがって、毛管の内半径はそれぞれの砂の粒径に対応して、砂Oでは0.031~

0.414 mm, 砂 S では 0.031~0.207 mm, Watson の砂においては 0.062~0.124 mm とした. そして, 毛管の総本数は 2000 本とし, その長さは 3~4 m とした.

また, 体積含水率等の条件は河西らおよび, Watson の行った実験条件と同一にした. これら 3 種類の砂のそれぞれについて, いろいろな体積含水率に対して 5. (1) に示された解析により算出した不飽和透水係数 k_c と, 同一条件において実験から求めた不飽和透水係数 k_e を比較したものが, 図-9 および 図-10 である.

なお, 図の中の直線は

$$k = A \cdot w^m \dots \dots \dots (17)$$

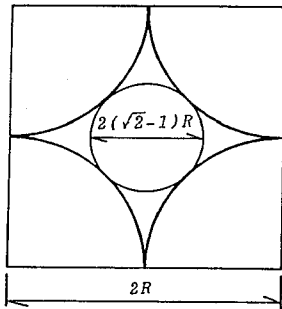


図-8 毛細管のサイズ

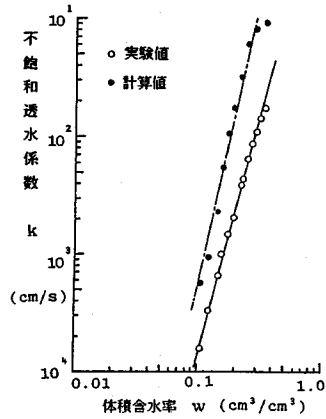


図-10 Watson の実験との比較

表-3 式 (17) における定数の比較

	モデル		実験
	A	m	
河西ら(1986)			
砂 S	6.836×10	1.517	2.226
砂 O	0.71	4.950	4.003
Watson(1966)	33.184	4.789	4.097

という式でべき乗回帰計算を行ったものであり, 実線が実験値, 一点鎖線が計算値に対するもので, 定数 A, m の値は表-3 に示すとおりである.

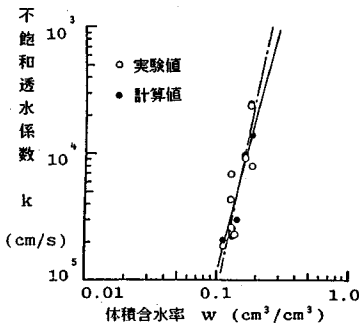
本解析により得られた不飽和透水係数の値は図-9, 図-10 に示される. この結果は実験における精度等を考慮すると非常によく一致しているといえる. 図-9, 図-10 において計算値が全体として実験値よりも大きい値を示している大きな原因として次のようなことが考えられる. まず, 現実の土中で地下水はきわめて複雑な経路をとるのに対し, このモデルにおいては簡単のために水柱の進行方向を鉛直下向きにしていること. 次に, 実際の粒子中の間隙における粒子面の抵抗は, 壁がきわめて滑らかで平らな毛管におけるものより大きいと考えられ, さらに, 水柱の接触角も実際の土中と毛管とでは異なっていることなど.

しかし, このようなモデルと現実の土中の状態の差を考慮すると, この毛管によるモデルは浸透機構の本質的な要因については, 十分によく説明しているものと考えられる.

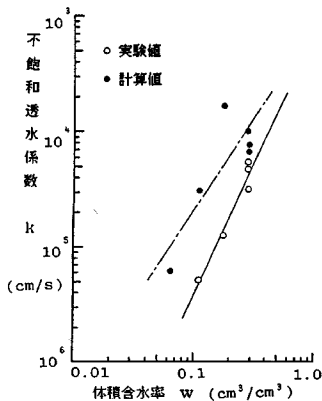
このように, 微視的には土中においては水分は間隙中に細分化されて散在していることを考慮した解析で実験値をよく再現できることがわかった.

6. むすび

土中において水は細かい水柱として分散して存在して



(a) 砂 O



(b) 砂 S

図-9 河西らの実験との比較

いるという仮定の下に、土の間隙を毛細管で近似し不飽和浸透現象のシミュレーションを行い、既往の結果と比較検討を行い次のような結論を得た。

(1) ナビエ・ストークスの方程式から毛管内を落下する水柱の運動方程式を求め、次に内径の小さいガラス管に染色した液体を入れた実験により、毛管内を落下していく水柱の運動特性を明らかにした。

(2) 液柱の臨界長、運動時の液柱と毛管との接触角、壁面に付着する液膜の厚さなどを実験的に明らかにすることにより、毛管内での液柱の落下運動の機構を明らかにした。

(3) 多孔質媒体の間隙を多数の毛管で置き換え、その毛管内に細かい水柱を分散させて不飽和浸透のシミュレーションを行い、その結果を実験値と比較した。それにより、従来経験的に得られていた結果を再現することができ、不飽和な土中において水は細かく分散して存在すると考えることが妥当であることを示すとともに、不飽和浸透の本質的な性格は毛管モデルによって表現し得ることを示した。

現実の間隙中の形状配置およびその中の水分の散在は非常に複雑であり、必ずしも本研究で取り扱っているような単純な毛管状でもなく、散在する水柱どうしの間に取り囲まれている空気が自由に脱出できるというわけではない。しかし、こうしたことにより生ずる誤差は数倍程度の範囲にとどまるものであり、本毛管モデルは不飽和透水係数のオーダーを算出することを可能にし、定性的にも不飽和浸透過程の特性を表わしていると考えら

れる。

参考文献

- 1) Campbell, G.S. : A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Science*, Vol. 117, No. 6, pp. 311~314, 1974.
- 2) 荻原能男・宮沢直季・萩原秀幸 : 毛管浸透実験による多孔体材質の判定方法, 第30回水理講演会論文集, pp. 331~336, 1986.
- 3) たとえば榎根 勇 : 水文学, 自然地理学講座3, 大明堂, pp. 168, 1980.
- 4) 大山義年・山口賢治 : 重力場における粒子層の平衡含水量について, 理化学研究所報告, 第38巻, 第4号, pp. 392~400, 1962.
- 5) Lenorman, R., Zarcone, C. and Sarr, A. : Mechanism of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts, *J. Fluid Mech.*, Vol. 135, pp. 337~353, 1983.
- 6) Levich, V.G. : Motion induced by capillarity, *Physicochemical Hydrodynamics*, pp. 372~394, pp. 669~683, 1962.
- 7) Burger, H. : Log-normal interpolation in grain size analysis, *Sedimentology*, Vol. 23, pp. 395~405, 1976.
- 8) 河西 基・塩崎 功・中井健二 : 不飽和土中の水分移動特性に関する実験的考察, 第30回水理講演会論文集, pp. 385~390, 1986.
- 9) Watson, K.K. : An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials, *Water Resources Res.*, Vol. 2, No. 4, pp. 709~715, 1966.

(1986.6.27・受付)