

不飽和浸透流について(3)

広島大学工学部 正員 ○ 三 島 隆 明
 広島大学工学部 正員 金 丸 昭 治
 岡 山 市 杉 原 慶 信

1. まえがき 一般に雨水の浸透現象は不飽和浸透流になるが、土中の空気圧が浸透の進行に伴って変化しない場合には、飽和浸透流的な流動になる。

この様な流動を表現する一つのモデルとして、互いに連結した径の異なる並列毛細管によつて構成される並列異径毛細管モデルを考え、その適応の可能性について考察した結果について述べる。

2. 基礎的考察 浸透場を構成する土粒子によつて形成される空隙を平均的にみれば、管径の異なる多数の毛細管が互いに連結した状態になっているものとみることができる。

この状態を更に単純モデル化したものが、並列異径毛細管モデルである。

すなわち、①土粒子が均一球体であると考えた時の代表的な充填状態は、表1に示すように、単純立方型など五種類の形態に分類され、また、これらの各充填状態に対応する、重力と表面張力の釣合いから求められる置換毛細管径 d_e が、表2のように算出されること。

さらに、②この置換毛細管にたいする Hagen-Poiseuille 流として算出される透水、透気係数が Kozeny, Rumer, Carman らの提案式と一致するように補正する為の係数 A_f が同表のように算出され、補正されること。

また、③一球体に接触する他の球体の接触数を表わす配位数 N と m の関係が、Smithの研究によると、 $m=36\%$ では $7 \leq N \leq 12$ で、それぞれの配位数のものが等分布し、 $m=44\%$ では、 $4 < N < 11$ で、 $N=7$ を中心に正規分布し、 $36\% < m < 44\%$ では、その分布は漸次変化しているが、いずれの場合も分布率の極大を与える配位数 N は 7あるいは8 になっており、概略、 $N=6$ と $N=8$ の 2グループに二分しうること。

一方、④湛水面をとおしての土中空気の放出のメカニズムを説明するのには、少なくとも二種類の毛細管が必要であること。

これらの各項目を考慮した単純かつ実用性のあるモデルが、並列異径毛細管モデルある。

前述の Smithの資料を用いて、代表の空隙率についてその 2グループの分布比率を計算すると、表3のようになり、均一体と考えたときのモデル化の基準になる。

並列異径毛細管モデルは、一般に単位面積当りについて 1本の比較的太い毛細管の回りに比較的細い n 本の毛細管が取巻いた状態で構成され、毛細管相互間の水平方向については、毛管力によつて常に平衡が保たれており、毛細管水の鉛直方向の流動は当然、層流であると考える。

表 1 均一粒径球体の充填状態 (d_s : 粒径)

充填状態	配位数 N	単位の層間隔	単位の体積	空隙率 m
単純立方型	6	d_s	d_s^3	47.6%
立方四面体型	8	d_s	$(\sqrt{3}/2)d_s^3$	39.5
立方斜方体型	10	$(\sqrt{3}/2)d_s$	$(\sqrt{3}/4)d_s^3$	30.2
角柱体型	12	$(1/\sqrt{2})d_s$	$(1/\sqrt{2})d_s^3$	26.0
面心四面体型	12	$\sqrt{(2/3)}d_s$	$(1/\sqrt{2})d_s^3$	26.0

表 2 置換毛細管径 d_e および透水、透気補正係数 A_f

充填状態	置換毛細管径 d_e	Kozeny式 A_f	Rumer 式 A_f	Carman式 A_f
単純立方型	$0.606d_s$	0.163	0.113	0.0544
立方四面体型	$0.436d_s$	0.0593	0.0290	0.0198
立方斜方体型	$0.333d_s$	0.0174	0.0057	0.0058
角柱体型	$0.330d_s$	0.0098	0.0028	0.0033
面心四面体型	$0.286d_s$	0.0092	0.0024	0.0031

また、現象的に見ると、土中の空気が大気中に放出される前後で現象が分かれ、それぞれ以下ようになる。

(a) 湛水時空気放出前の現象 この期間における流動の無次元基礎方程式は、以下ようになる。

$$dZ_i / dT = W_i = C_{i1} (1 + (H_0 - C_{i2} / (Z_1 + C_{i3} Z_2) + C_{i4}) / (1 - Z_i)) \quad (i=1, 2) \cdots (1)$$

$$C_{i1} = -A_{wi} D_i^2, C_{i2} = (H_{a0} + H_{aa})(1 + n D_{21}^2), \\ C_{i3} = n D_{21}^2, C_{i4} = B / D_i + H_{aa}, D_{21} = D_2 / D_1 \quad \cdots (2)$$

$$H_a = C_{i2} / (Z_1 + C_{i3} Z_2) - H_{aa} \quad \cdots (3)$$

$$T = (g l)^{1/2} t, Z_i = z_i / l, D_i = d e_i / l, \\ H_0 = h_0 / l, H_{a0} = h_{a0} / l, H_{aa} = h_{aa} / l, \\ A_{wi} = A f_i (g l)^{1/2} l / (32 \nu_w), B = (4 \sigma \cos \theta) / (\rho_w g l^2), W_i = w_i / (g l)^{1/2} \quad \cdots (4)$$

ここに、 g ：重力加速度、 l ：層厚、 t ：時間、 z ：鉛直上方に取った距離、 h_0 ：湛水深、 h_{aa} 、 h_{a0} ：大気圧、土中の初期空気圧（水頭表示）、 ν 、 ρ 、 σ 、 θ ：動粘度、密度、表面張力、接触角、 w ： z 方向の速度であり、添字の w は水、 a は空気に関するものを、添字 $i=1$ は太い毛細管、 $i=2$ は細い毛細管を表す。

(b) 湛水時空気放出後の現象 この期間における流動においては、空気の流動性の方が圧縮性よりも支配的になると考えられるので、その圧縮効果は無視すると、無次元基礎方程式は、以下ようになる。

$$dZ_2 / dT = W_2 = C_{22} (1 + (H_0 + B / D_2 - H_a) / (1 - Z_2)) \quad \cdots (5)$$

$$W_{1a} = -C_{13} W_2 = C_{1a} (1 + K_1 (H_0 + B / D_1 - H_a) / (1 - Z_2)) \quad \cdots (6)$$

$$C_{1a} = -A_{a1} D_1^2, K_1 = \rho_w / \rho_a, W_{1a} = w_{1a} / (g l)^{1/2}, A_{a1} = A f_1 (g l)^{1/2} l / (32 \nu_a) \quad \cdots (7)$$

従って、無次元浸透量 I は以下ようになる。

$$I = -D_1^2 / (D_1^2 + n D_2^2) W_1 - n D_2^2 / (D_1^2 + n D_2^2) W_2 \quad \cdots (8)$$

3. 試算結果 前述の各式を用いて試算した一例を示したものが図1である。この試算例は、表3の $m=43\%$ の状態について計算した結果であり、浸透開始直後の土中の空気圧の急激な上昇および

表3 各グループの分布比率

間隙率 m	N=6 グループ の比率	N=8 グループ の比率
36 %	15 %	85 %
37	14	86
43	20	80
44	40	60
45	54	46

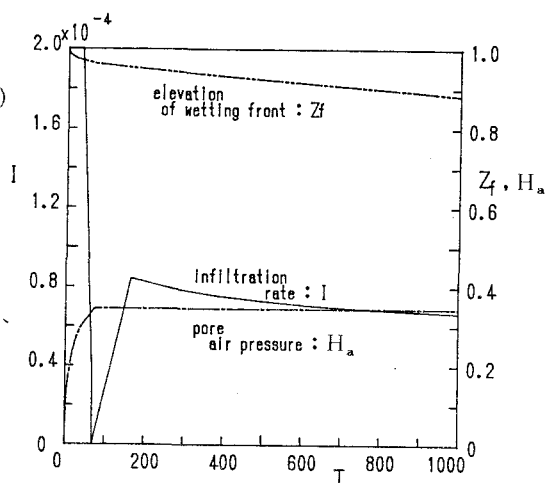


図1 試算例 ($m=43\%$, $D_1=1.2 \times 10^{-3}$, $D_2=8 \times 10^{-4}$, $H_0=0$)

counter flowの状況とその後の緩やかな浸透現象が良く表わされており、モデルの適合性の良いことがわかる。

今後、さらに多くの状態について検証していく予定である。

参考文献 1) Deresiewicz, H., Mechanics of granular mater, Adv. Appl. Mech. 5, 1958

2) Kozeny, J., Über Grundwasserbewegung, W. W. W., 22, 1927

3) Rumer, R., Flow Through Porous Media (edited by De Wiest, Academic press, 1969)

4) Carman, P., Fluid flow through a granula bed, Trans. Inst. Chem. Eng. London, 15, 1937

5) Smith, W., etc., Packing of homogeneous spheres, Phys. Rev., 34, 1929