

濁質による浸透層の浸透能力の低下について

Reduction of Permeability of Porous Media by Suspended Particles

九州大学 工学部 正 安田 裕
正 神野 健二
正 上田 年比古

1 まえがき: 流出抑制のための浸透施設¹⁾、地下水人工涵養のための浸透池²⁾が各地で計画されているが、これらの浸透施設の計画及び運用上問題となるのは、濁質による浸透能力の低下である。このような浸透能力の低下は浸透水中の濁質により浸透施設の浸透層が閉塞されることにより生じる現象であると考えられる。本報では浸透池の浸透能力低下は①浸透池底面下の浸透層に濁質が抑留して生じる目づまりによるものと②浸透池底面上に濁質が堆積して生じるマッドケ-キによるものとして、一次元浸透層について実験および解析を行なっている。

2 実験: 図-1は実験装置である。装置は10cm×10cmの角柱状のもの(a)と直径5cmの円筒状のもの(b)の2種類である。それぞれ、マンメ-タ-および実験終了後に砂を採取するための孔を持つ。濁度計で注入濁度を測定した。(a)の実験装置は実際の浸透施設に即した全般的傾向をとらえる実験を行なうためのものであり、装置下部40cmに0.5mmの均一粒径の砂を詰め、上部から濁水を注入する。(b)の実験装置はマッドケ-キのみの性質を調べる実験、及び砂層上部の目づまりとマッドケ-キ形成の関連を見る実験を行なうためのものであり、本体底部にろ紙を敷き濁水を注入する場合と、(a)と同様に装置下部2cmに0.5mmの砂を詰め濁水を注入する場合の2通を行なった。濁質には図-2に示すように50%粒径 $3\mu\text{m}$ ~ $12\mu\text{m}$ の博多湾ヘドロを用いた。実験条件等を表-1に示す。run4~run9の実験は装置(a)で、またrun12, run16の実験は(b)で行なった。装置(a)による実験のうちrun9のみマッドケ-キが形成され、それ以外は形成されなかった。また、装置(b)による実験のうちrun12は濁質のみによる実験であり、run16は2cmの砂層に濁水を注入して行われた実験である。

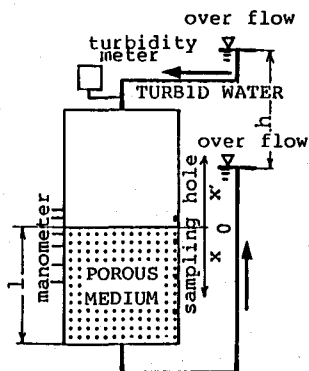


図-1 実験装置

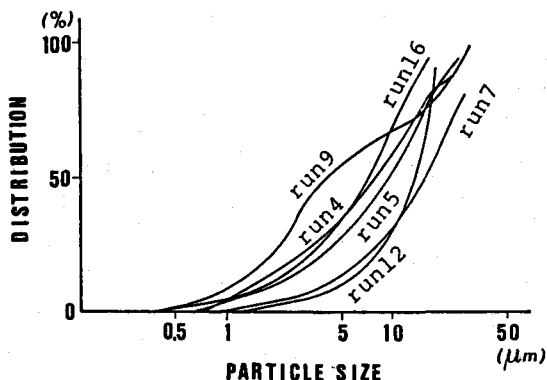


図-2 濁質の粒度分布

表-1 実験条件

実験 番号	注入濁度 C_0 (mg/l)	初期透水係数 k_0 (cm/sec)	初期空 隙率 ϵ_0	最終浸透 能力(%)*	マッドケーキ 形成の厚D(mm)
run4	500	0.15	0.47	71.0	0
run5	1000	0.23	0.48	35.9	0
run6	1100	0.19	0.45	1.9	0
run7	4200	0.27	0.48	12.8	0
run9	7000	0.16	0.46	(0)	46
run12	210000	----	----	(0)	44
run16	2500	0.23	0.40	(0)	2

* 浸透層全体についての初期透水係数と実験最終時の透水係数の比(%)

3 基礎式: 距離軸は、図-1のように砂層上面を0とし、砂層下方に x 、濁水部上方に x' とする。

① 砂層の目づまり³⁾ 流体の連続式; $\partial u / \partial x = 0 \cdots (1)$, Darcy則; $u = -k \partial \phi / \partial x \cdots (2)$

濁質の保存式; $\partial C / \partial t + u / \epsilon \cdot \partial C / \partial x + Q_S(1 - \epsilon_0) / \epsilon \cdot \partial q_S / \partial t = 0 \cdots (3)$

濁質の抑留式; $Q_S(1 - \epsilon_0) / \epsilon \cdot \partial q_S / \partial t = \beta_1(1 + \beta_2 q_S)(1 - \beta_3 q_S)C \cdots (4)$

空隙率と濁質抑留量の関係式; $\epsilon = \epsilon_0 - Q_S(1 - \epsilon_0)q_S / \{O_h(1 - f_0)\} \cdots (5)$

透水係数と濁質抑留量の関係式;

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\{\epsilon_0 - (1 - \epsilon_0)Q_S q_S / \{O_h(1 - f_0)\}\}^3}{\epsilon_0^3 [1 + Q_S q_S / \{O_h(1 - f_0)\}]^2} \left\{ \left(\frac{Q_S q_S}{3O_h(1 - f_0)} + \frac{1}{4} \right)^{1/2} + \frac{Q_S q_S}{O_h(1 - f_0)} + \frac{1}{2} \right\} \quad (q_S < q_{S*} \text{ の場合}) \cdots (6)$$

$$k = k \cdot \text{Exp}(-\theta(q_S - q_{S*})) \quad (q_S \geq q_{S*} \text{ の場合}) \cdots (7)$$

ここに、 u ; 断面平均流速(cm/sec), k ; 透水係数(cm/sec), ϕ ; 水頭(cm), x ; 座標(cm), C ; 濁度(g/cc), ϵ ; 空隙率, ϵ_0 ; 初期空隙率, Q_S ; 砂の単位体積重量(g/cc), O_h ; 濁質の単位体積重量(g/cc), q_S ; 砂単位重量あたりの濁質抑留量(無次元), f_0 ; 抑留濁質の2次空隙率, また、濁質が砂層空隙を埋めつくし、流体が濁質内部の空隙(2次空隙)を流れる状態に変化した時点の q_S , k を q_{S*} , k_* とする。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \theta$; 実験定数, t ; 時間(sec)である。

② 濁水部 液相の連続式; $\partial n / \partial t - \partial (u_f \cdot n) / \partial x' = 0 \cdots (8)$

液相の運動方程式; $0 = n \partial p / \partial x' - F(u_f - u_s) + n \cdot \rho \cdot g r \cdots (9)$

固相の連続式; $\partial (1 - n) / \partial t - \partial \{(1 - n)u_s\} / \partial x' = 0 \cdots (10)$

固相の運動方程式 $0 = (1 - n) \partial p / \partial x' + \partial \sigma / \partial x' + F(u_f - u_s) + (1 - n) \rho \cdots (11)$

ここに、 n ; 濁水の空隙率, u_s ; 固相流速(cm/sec), u_f ; 液相流速(cm/sec) (u_s, u_f は下向きを正の向きとする), F ; 抵抗係数, p ; 圧力(dyn/cm²), $g r$; 重力加速度, σ ; 有効応力(dyn/cm²), 数値計算はこれらの式を差分化して行う。

4 実験結果: 砂層内で目づまりが生じている場合、流量は図-3のように減少する。実験開始後数10分程度で砂層内で目づまりが進行し、砂層上部はほとんど閉塞される。その後は抑留された懸濁物質の空隙を水が流れ、小流量の状態では減する。特に、注入濁度が高く実験開始後、直ちにマッドケーキが形成された場合は、流量は図-5のように急速に減少する。一方、水頭は図-4のように砂層内で目づまりが生じて低下する場合(右側の図)と、マッドケーキが形成されケーキ内部で低下する場合(左側の図)がある。マッドケーキが形成された場合のケーキ内の透水係数の変化は図-5のようになる。ケーキの成長とともにケーキ底面から上に向かって、圧縮が生じ透水係数が低下していく。

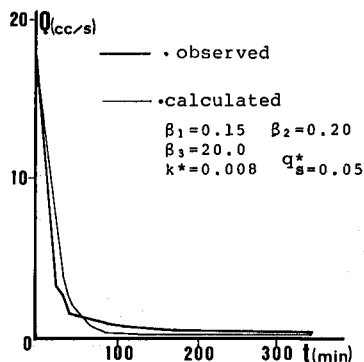


図-3 流量の時間変化 (run5)

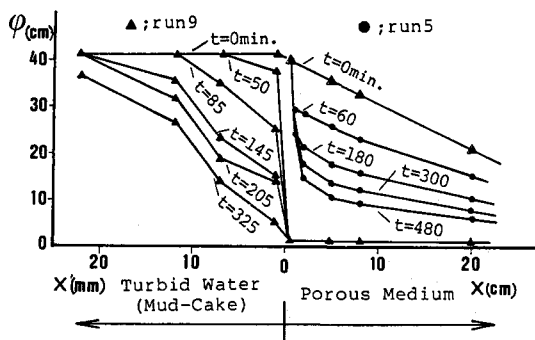


図-4 各時刻の水頭の場所的变化

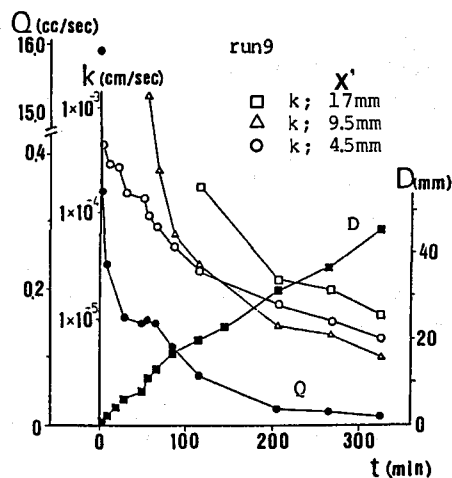


図-5 流量 Q , 透水係数 k , マッドケーキ厚さ D の時間変化

図-3にはrun5の場合を基礎式(1)~(7)を用いて数値計算して得られた流量変化も示している。この場合、砂層内の懸濁物質抑留量(q_s)は $q_s=0.05$ で飽和になるものと仮定して³⁾、 q_s が0.05に達した後は式(7)を用いて砂層に抑留された懸濁物質の透水係数を与えている。

マッドケーキの性質はrun12によって知ることができる。流量、透水係数は図-6、図-7のように低下する。透水係数は最終的に 10^{-5} (cm/sec)のオーダーにまで低下してrun9のマッドケーキ形成後の状態と同様になっている。一方、浸透層への濁水の注入による浸透層の目づまり、その後のマッドケーキの形成をrun16によってみることができる。実験開始時に、浸透層の透水係数は砂本来の値(10^{-1} cm/secのオーダー)であったが、砂層の透水係数は目づまりのため 10^{-2} cm/secのオーダーにまで低下する。その後砂層上面のケーキの透水係数は 10^{-5} cm/secのオーダーにまで低下して、マッドケーキが形成されたことがわかる。この場合、浸透層の浸透能力の低下はほとんどマッドケーキによるものであるといえる。

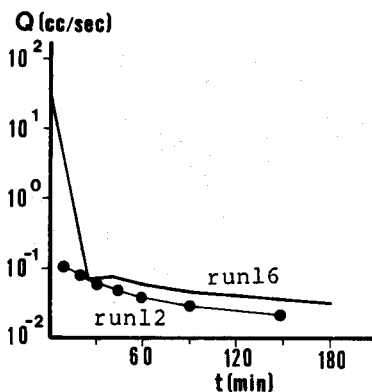


図-6 流量の時間変化

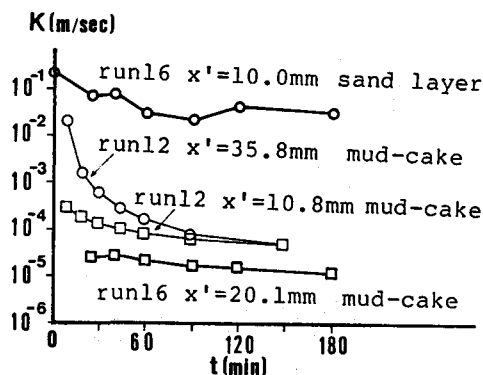


図-7 透水係数の時間変化

○ 透水係数の算定: いま、ケーキ内の透水係数の変化を算定してみよう。大坪ら⁴⁾は筒状容器に濁水を入れ、沈殿終了後の定常時の濁質濃度の鉛直分布を求めている。本報では底部にマッドケーキができた状態では底部はほぼ閉塞され流量は微量になるので、底とじと考えて大坪らの解析を近似的に利用する。大坪らは式(8)~(11)で $u_f = u_s = 0$ とした定常状態を解き次式を得ている。

$$x' = -B \cdot (1/A + \rho_s/C) \cdot \text{EXP}[-A\rho_s/C] + H^* \quad \dots(12)$$

ここに、 A, B は実験条件により算定される既知数である。積分定数 H^* は、 $x' = 0$ で $C = C_b$ として与えられる。すなわち

$$H^* = B \cdot (1/A + \rho_s/C_b) \cdot \text{EXP}[-A\rho_s/C_b] \quad \dots(13)$$

ここで、 H^* は濁質界面高さである。ここで、大坪らはヘドロの圧密実験を参照して

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \text{Exp}(A(e_1 - e)) \quad \dots(14), \quad C_b = \rho_s A / \{ \rho_s A / C_1 - \ln(\sigma_b / \sigma_1) \} \quad \dots(15)$$

と与えている。なお、 e_1, C_1, σ_1 はある時点の間隙比、濁度、有効応力で既知とする。

さてここで σ_b について著者らは次の値を与えた。マッドケーキに沈積してくる濁水部上方の濁質の濃度を C_{in} 、その沈降速度を U_s とする。 U_s は図-5のD線の平均勾配から近似的に求め、その値を一定とし、また C_{in} も実験中一定とする。したがって、単位面積あたりの堆積量は

$$\int C_{in} \cdot U_s \cdot dt = C_{in} \cdot U_s \cdot t \quad \dots(16)$$

である。したがって、時刻 t におけるケーキ底部の有効応力 σ_b は

$$\sigma_b = \{ (\rho_s - \rho) g r / \rho_s \} \cdot C_{in} \cdot U_s \cdot t \quad \dots(17)$$

いま、式(17)により各時間 t ごとに σ_b を求め、式(14)、(13)ついで(12)より各時間ごとの x' と C との関係が算定される。ここでは、run9を対象とし、 $\sigma_1 = 80.0$ (dyn/cm²)、 $A = 3.1$ 、 $C_1 = 0.767$ (g/cc)、 $U_s = 0.03$ (cm/sec)を用いた結果を図-8に示す。次に、透水係数を

$$k = \alpha \cdot n^3 / (1-n)^2 \quad \dots(18)$$

$\alpha = 0.2 \times 10^{-4}$ とし図-8の C を用いて各時間の透水係数の場所的変化を求めると図-9となる。また、run12に対しては式(17)において

$$\sigma_b = \{ (\rho_s - \rho) g r / \rho_s \} C_{in} \cdot L, \quad (L \text{は初期水深}) \quad \dots(17')$$

として同様の方法で濃度、透水係数を計算し、図-10、図-11を得た。これらの計算値は実験値と比較して、傾向は近似している。

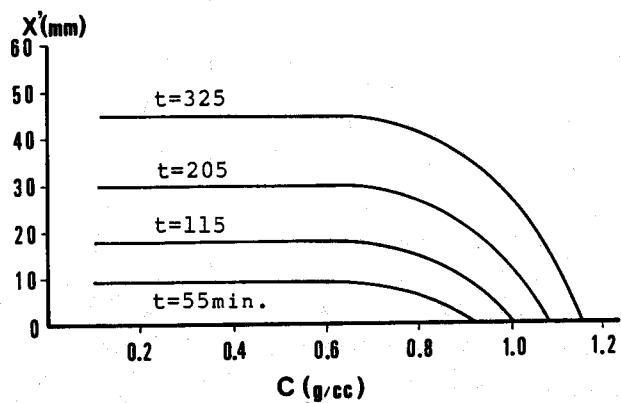


図- 8 各時刻の濃度の場所的变化 (run9)

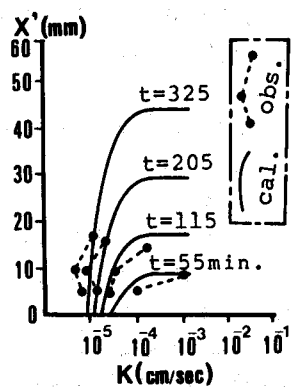


図- 9 各時刻の透水係数の場所的变化 (run9)

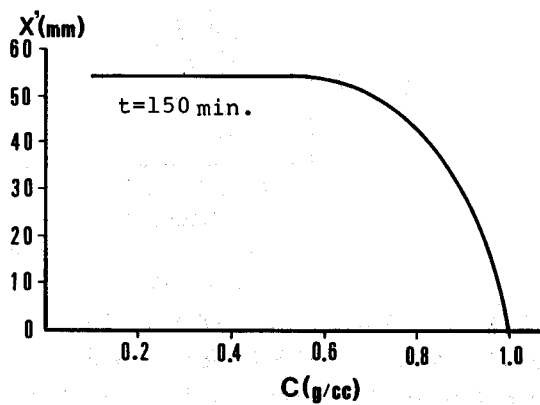


図- 10 濃度の場所的变化 (式(19)より)
(run12)

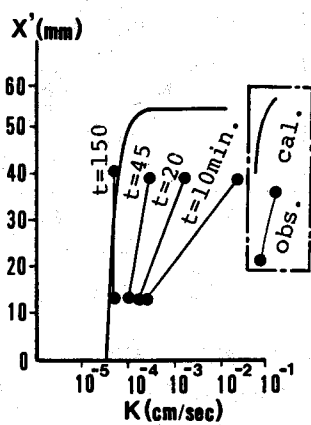


図- 11 各時刻の透水係数の場所的变化 (run12)

○ 濃度(濁度)の算定: ここで、濃度の変化を算定してみる。基礎式(10)より

$$\partial C / \partial t + \partial (C \cdot u_s) / \partial x = 0 \quad \dots(18)$$

ここに $C = \rho_s(1-n)$ である。また式(8)~(11)より

$$u_s = -n^2 / F \cdot \{ (1-n)(\rho_s - \rho) \cdot g r - \partial \sigma / \partial x' \} + q \quad \dots(19)$$

$$q = (1-n)u_s + n \cdot u_f \quad \dots(20)$$

である。有効応力 σ 、抵抗 F の与え方は問題となるところであるが、有効応力 σ については式(14)を用い、また F については

$$F = \beta \exp(\gamma(c - \delta)) \quad \dots(21)$$

と仮定した。このような方法で run12 について固相流速 u_s を求めると図-12 のようになる。ここに $A=3.1, \sigma_1=80.0, C_1=0.1, \beta=0.01, \gamma=10.0, \delta=0.0001$ である。これを用いて濃度変化を計算し、図-13を得る。なお、数値計算に際しては特性曲線の考えにもとづく方法⁵⁾によった。濃度が底面付近で増大していき、それとともに透水係数が低下する様子が図-14に示されている。

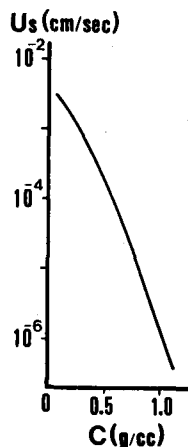


図- 12 固相流速 U_s と濃度 C の関係

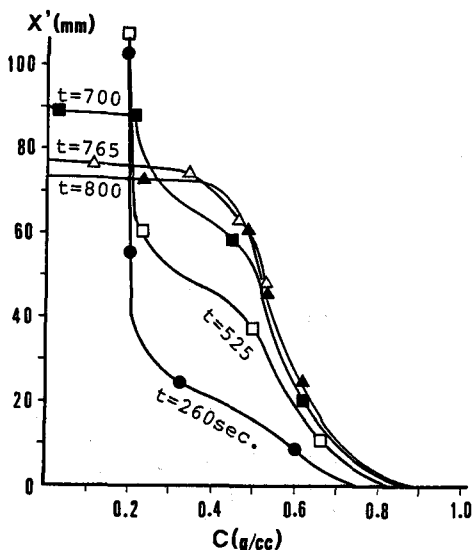


図- 13 各時刻の濃度の場所的变化 (run12)

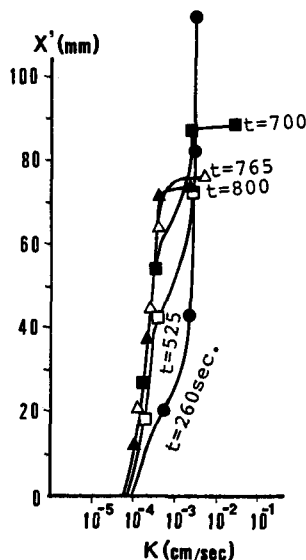


図- 14 各時刻の透水係数の場所的变化 (run12)

5 むすび: 1) 浸透層の浸透能力の低下は、浸透層内部の目づまりによるものと、浸透層表面のマッドケキによるものがある。2) マッドケキによって生じる浸透能力の低下は急速な現象で程度が大きい。3) 基礎式中の定数を与えることにより濁質による浸透能力の低下を近似的にシミュレーションできる。

参考文献 1) 小川、山本; 雨水浸透施設の浸透能、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, pp.101-102, 1984, 2) 山本、藤野、大野; 多目的地下水涵養計画について、第2回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.387-392, 1982, 3) 上田、神野、安田、重藤; 懸濁物質による砂充填層内の目づまりと再揚水による透水係数の回復について、日本地下水学会誌、第25巻、第3号、pp.121-138, 1983, 4) 大坪、村岡; 底泥の沈降特性に関する研究、第27回水理講演会論文集, pp.317-322, 1983, 5) 神野、上田; 粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討、土木学会論文報告集、第271号、pp.45-53, 1978