

1. はじめに

急速砂ろ過は、多くの物理化学的諸量が複雑に絡み合った現象であるが故に未だ広く実用に供しうる普遍的な設計法は確立されていない。本報告は、砂ろ過の基礎式として砂層内における水質変化の式、水質の連続の式、損失水頭の式およびろ過係数を評価する式を誘導し、実験によって初期ろ過係数の支配因子、フロックの物理的諸量および砂層内抑留量について考察を加えたものである。

2. 砂ろ過の基礎方程式

2-1 砂層内における水質変化を示す式

砂層内の任意点における浮遊物濃度 C の変化は、 C の実質時間微分で表わすことができる。座標系を図-1 のようにとると C の実質時間微分は式(1)のようになる。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1) \quad \begin{cases} u: x \text{ 方向の速度成分} \\ v: y \text{ 方向の速度成分} \\ w: z \text{ 方向の速度成分} \end{cases}$$

式(1)の右辺第2項以降のオーダーを考慮、また Kozeny のモデルを適用すると、砂層内の流れは Poiseuille 流と見做し、 u, v は 0 とする。さらに、Dupuit の仮定を適用し、かつ抑留物間ギャキ内の流れを無視すると w は式(2)で表わせる。

$$w = V / \{ p_0 - \sigma_s / (1 - p_0) \} \quad (2)$$

図-1 座標系
 V : 流速, p_0 : 清浄砂層の空隙率, σ_s : 砂層単位体積あたりの抑留物実質体積(実質比堆積)
 p_0 : 抑留物単位体積あたりの抑留物内空隙率

従来、濃度変化が1次反応の類似形で、 λ を導入しているが、それに従うと結局砂層内の水質変化を示す式は、式(3)となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V}{p_0 - \frac{\sigma_s}{1-p_0}} \frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad (3) \quad (\lambda \text{ の単位: } [L^{-1}], \lambda [T^{-1}])$$

2-2 水質の連続を示す式

ある微小時間 δt に砂層の微小区間 δz 内で抑留されたフロックの質量は、その δz に流入する浮遊物の質量と δz から流出する浮遊物の質量の差に等しいとおき、浮遊物の実質密度(ρ_s) が $\rho_s f(z)$ で、抑留物間ギャキ内の流れを無視すると、水質の連続を示す式は、式(4)で表わすことができる。

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} + V \frac{\partial \sigma_s}{\partial z} + (p_0 - \frac{\sigma_s}{1-p_0}) \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{C}{V} \frac{\partial V}{\partial t} \right) = 0 \quad (4)$$

2-3 損失水頭を示す式

清浄砂層における損失水頭の式である Kozeny-Carman の式および Fair-Hatch の式を応用して、損失水頭を示す式を誘導した結果、式(5)、(6)を得る。

$$\frac{dh}{dz} \Big|_c = \frac{dh}{dz} \Big|_{oc} \cdot \frac{R/4}{R_0/4} \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma} \right)^3 \left(1 + \frac{\sigma}{1-p_0} \right)^2 \left(1 + \frac{ad}{d} \right)^{-2} \quad (5)$$

$$\frac{dh}{dz} \Big|_f = \frac{dh}{dz} \Big|_{of} \cdot \frac{C_p}{C_{p0}} \frac{\sigma/\rho_s}{\sigma_0/\rho_{s0}} \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma} \right)^4 \left(1 + \frac{ad}{d} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\text{ただし、} C_p/C_{p0} = \left(1 + \frac{ad}{d} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$\frac{ad}{d} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{3} \frac{\sigma}{1-p_0}} \quad (8)$$

式(5)、(6)は繁雑なもので、近似する ($\sigma < \frac{R}{2}$ で誤差1%以内)と式(9)、(10)を得る。

$$\lambda_c = \frac{dh}{dz} \Big|_c / \frac{dh}{dz} \Big|_{oc} = \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma} \right)^3 \left(1 + \frac{4}{3} \frac{\sigma}{1-p_0} \right) \quad (9)$$

$$\lambda_f = \frac{dh}{dz} \Big|_f / \frac{dh}{dz} \Big|_{of} = \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma} \right)^4 \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\sigma}{1-p_0} \right) \quad (10)$$

式(9)、(10)から、 σ について陽関数で表わすと式(11)、(12)のように数値勾配比から比堆積を評価することができる。

$$\sigma = \frac{1 - \lambda_c^{-\frac{1}{3}}}{1 + \lambda_c^{-\frac{1}{3}} \frac{4}{9} \frac{p_0}{1-p_0}} p_0 \quad (11) \quad \sigma = \frac{1 - \lambda_f^{-\frac{1}{4}}}{1 - \lambda_f^{-\frac{1}{4}} \frac{p_0}{12(1-p_0)}} p_0 \quad (12)$$

2-4 ろ過係数(λ)の評価

ろ過方程式の運用上最も重要な係数であるが、定式化されていない。一般に、 λ (初期ろ過係数) $\propto \frac{1}{V^a d^b \mu^c}$

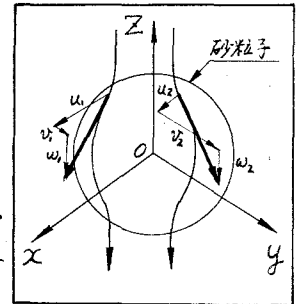


図-1 座標系

h : 損失水頭
 k : 定数
 ϕ : 砂の形状係数
 d : 砂の粒径
 C_p : 砂の拖引係数
 α, β : 砂の形状係数
 λ : 数値勾配比
 σ : 比堆積 ($= \frac{\sigma_s}{1-p_0}$)
 * 添字 0 は清浄砂層, C, f はそれぞれ Carman, Fair を示す。

(a, b, c は指数, μ : 粘性係数) といわれているが μ よりも初期空ゲキ率による影響の方が無視できないと考えて式(13)のようにおくと、抑留が始まった後は、 $\lambda_0 = \frac{C}{V^a d^b \rho^c}$ (C : 定数) (13)
式(14)でろ過係数を評価することができる。 $\lambda = \lambda_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho - \sigma} \right)^c \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\sigma}{\rho - \sigma}} \right) \right\}^{-b}$ (14)

3. 実験

表-1 実験条件および測定項目

ブロックの物理的諸量の定量化およびろ過係数と V, d, ρ との相関性を実験的に把握する。実験は、凝集試験とろ過実験に大別して実施した。

3-1 実験条件および方法

条件および測定項目は表-1にまとめて示した。凝集試験は試料1をビーカーにとり、ジャーテスターで実施した。ろ過筒は、内径20.5cmの透明なアクリル製の円筒であって、砂層厚は40~60cm、砂上水深は約9ヌ~11ヌcmである。ブロックの物理的諸量は、まず土粒子の比重試験法に準拠してブロック粒子の比重を測定し、次式により算出した。

$$\begin{aligned} \rho_s &= \rho_w \cdot G_s & (15) \\ V_s &= W / \rho_s & (16) \\ \rho_f &= (V_t - V_s) / V_t & (17) \\ C &= V_s / V_0 & (18) \\ \rho &= (\rho_w \cdot V_t \cdot \rho_f + W) / V_t & (19) \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho_w: 20^\circ\text{Cの水の密度}(9\%) \\ G_s: \text{ブロック粒子の比重}(-) \\ V_s: \text{ " の実固体積}(\text{cm}^3) \\ W: \text{ " の乾燥重量}(g) \\ V_t: \text{ " の沈降体積}(\text{ml}) \\ \rho_f: \text{ " のみかけ密度}(g/\text{cm}^3) \\ V_0: \text{試料水の体積}(\text{cm}^3) \end{array} \right.$$

砂層内濃度測定用の試料は、ろ過筒の側面にある5cm間隔のマノメーター接続ノズルから砂層内の流れを攪乱しないようにろ速と等しい流速で採水した。

3-2 実験結果および考察

3-2-1 薬注量とブロックの物理的諸量との関係(図-2)

ブロックの実質密度 $\rho_s(\bullet)$ は硫酸バンド注入量に対して一様傾向は認められず、2.55~2.80 g/cm^3 の値を示している。それに対して、みかけの密度 $\rho(0)$ はバンド量の増加に伴って減少しており、ブロックが大きくなると $\rho_f(0)$ が大きくなるという結果と合わせて考えると、ブロックは大きくなるにしたが

凝集試験		ろ過実験	
		ケース 1	ケース 2
原水濁度	カオリン 100 mg/l	カオリン 100 mg/l	
凝集剤	硫酸バンド	硫酸バンド	
注入量	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20 ppm	10 ppm (マイクロブロック形式)	
攪拌条件	急速 100 r.p.m. 20秒 緩速 8~12 r.p.m. 15分	ろ速	150, 180, 210, 240, 270 m^3/day
測定項目	ブロック 実質密度 ・ みかけ密度 ・ 体積濃度 ・ 内空ゲキ率	ろ過砂	幾何平均径 0.46, 0.54, 0.65, 0.77, 0.92 mm
		均等係数 1.00	
		初期空ゲキ率	40~50% 内 5% 選択 46.9%
		砂層内濃度分布	
測定項目		損失水頭	
		流入水温	
		ブロック 実質密度 ・ みかけ密度 ・ 内空ゲキ率 実質比堆積	

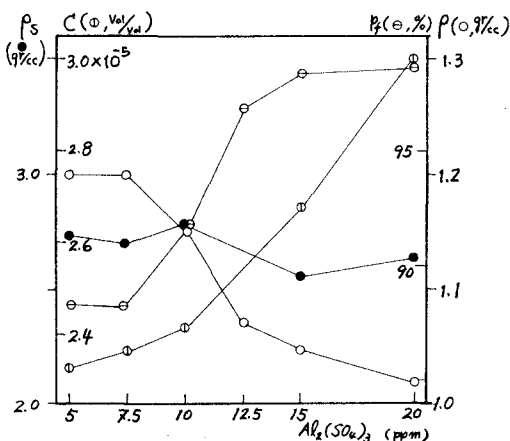


図-2 薬注量とブロックの物理的諸量との関係

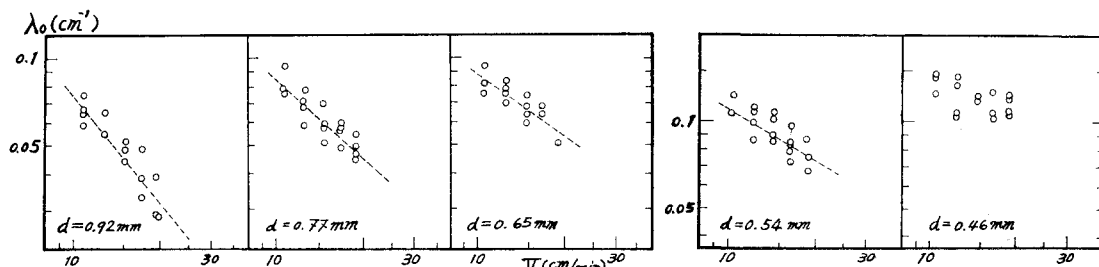


図-3 λ_0 と V との関係

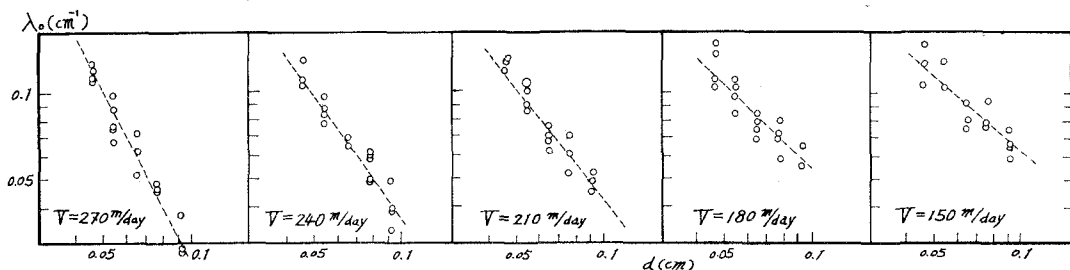


図-4 λ_0 と d との関係

ってフロック内の空ゲキ率が増加し、みかけの密度を低下させていることが明確である。フロック内の空ゲキ率は88%~99%と極めて高く、二の中に存在する水がろ過速度の水の流動に際して如何に挙動するかは一つの残された課題である。なお、 $C(0)$ は薬注量の増加に伴ってほぼ一様に増加する。

3-2-2 λ_0 と V, d, p_0 との相関性について

$p_0 = 40 \sim 50\%$ における λ_0 と p_0 の相関性は V と d に比較して低く、また、 $p_0 > 50\%$ 、 $p_0 < 40\%$ に設定するときは困難であるので、 p_0 を無視しても良いと考えられる。図-3は、 λ_0 と V の関係を d をパラメーターとして示し、図-4は λ_0 と d の関係を V をパラメーターとして示したものである。図から d および V が大きくなるにしたがって λ_0 が低下することが認められる。この結果から式(13)の V および d の指数 a, b の変化を図示したのが図-5である。図より、

$V = 150 \sim 270 \text{ m/day}$ で、 d の指数 $b = 0.9 \sim 1.8$

$d = 0.46 \sim 0.92 \text{ mm}$ で、 V の指数 $a = 0.2 \sim 1.3$

までほぼ一様に変化していることが明らかとなった。

3-2-3 比堆積の砂層内分布

図-6は動水勾配比の実験結果をもとに式(11)、(12)から算出した比堆積 σ の分布の時間的変化とろ過停止後の砂層内抑留量の測定値を示したものである。式(11)と式(12)の差違はほとんどないが、 σ_s の実測結果から算出した σ の値と比較しながら概観すると、砂層表層部では大きく、衣層部では小さく評価するようである。

ただし、 σ の実測は極めて困難で、 σ の評価が結局、 σ の値に多大な影響を及ぼすことになるのでこの点さらに検討を要するところである。

4. おわりに

今後、前述のような課題に取り組んでいくとともに、フロックの特性を考察したろ過係数の支配因子の定量化、砂層内の抑留量およびフロック内の空ゲキ率の評価等について検討を進めていきたい。なお、講演時には、前述したろ過方程式の数値計算の結果も合わせて発表する予定である。

最後に、昼夜問わず実験データ整理に協力してくれた東北大学学生 河合秀俊、神林孝雄の両君に謝意を表する。

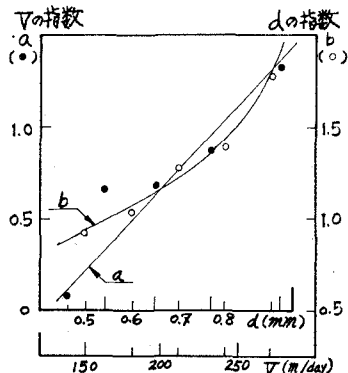


図-5 a と d, b と V との関係

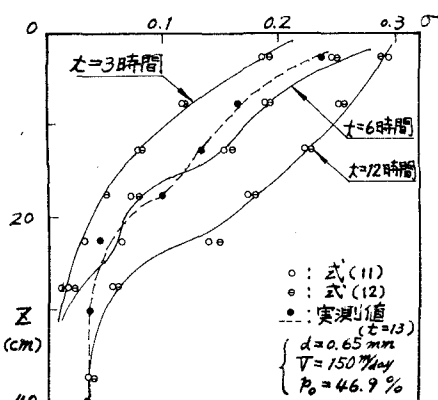


図-6 (a) σ の分布の時間的変化

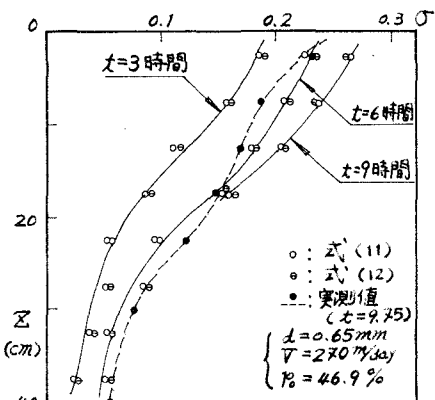


図-6 (b) σ の分布の時間的変化