

九州大学の学生員 百田 徹也

九州大学 正会員 神野 健二

九州大学 正会員 上田 年也古

1. まえがき 地下水の過剰取水による地盤沈下および地下水の塩水化を防止するため、また地下水源の増強を目的として、地下水の人工涵養が注目されている。人工涵養水源には、雨水、下水処理水、河川水（洪水時の余剰水も含む）等があるが、いずれの場合も注入井あるいは浸透池の周壁における目づまりにより時間とともに注入水量が減少する。目づまりは注入水中の微生物の増殖や化学変化、懸濁粒子の物理的・化学的沈着等が原因となるが、本報では主に河川水等のように比較的高濃度の懸濁物を含む水を対象に、粘土質シルトを懸濁する水に対する砂の沈着現象を実験考察し、その過程方程式を用いて定式化した。

2. 実験 図-1の粒度分布を持つ砂と、その砂をふるったハッチの部分の粒径の砂を用い、図-2の粘土質シルト（博多湾埋立地で採取）に対する実験を行った。図-3は実験装置である。実験は砂層に懸濁水を供給しつつ、流量、水頭分布、流入流出濃度、および実験終了時の砂層の場所ごとの沈着粒子量を測定した。

3. 基礎式 流れは一次元流であるので、

$$\text{連続の式は, } \rho u / \rho x = 0 \quad \text{--- ①}$$

$$\text{Darcy 則 } u = -k \rho R / \rho x \quad \text{--- ②}$$

$$\text{懸濁粒子の保存則 } \rho C / \rho t + \rho (u C / \varepsilon) / \rho x = -\sigma_s (1 - \varepsilon_0) / \varepsilon \times \rho q_s / \rho t \quad \text{--- ③}$$

$$\text{沈着条件式は上の式と同様に, } \rho q_s / \rho t = \varepsilon \beta_1 C (1 - \beta_2 q_s) (1 + \beta_3 q_s) / \sigma_s (1 - \varepsilon_0) \quad \text{--- ④}$$

透水係数と沈着量の関係式として、Kozeny式を Stein が変形した式を用いて

$$\frac{k}{k_0} = \frac{(\varepsilon_0 - (1 - \varepsilon_0) q_s \sigma_s / (1 - f_0) \sigma_h)^3 (1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon^3 \{ (1 - \varepsilon_0) + (1 - \varepsilon_0) q_s \sigma_s / (1 - f_0) \sigma_h \}^2} \left[\sqrt{\frac{q_s \sigma_s}{3(1 - f_0) \sigma_h} + \frac{1}{4}} + \frac{q_s \sigma_s}{3(1 - f_0) \sigma_h} + \frac{1}{2} \right] \quad \text{--- ⑤}$$

$$\text{空げき率と沈着量の関係式 } \varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) (1 + q_s \sigma_s / (1 - f_0) \sigma_h) \quad \text{--- ⑥}$$

t: 時間(sec), x: 距離(cm), h: 水頭(cm), u: 断面平均流速 (cm/sec), ε : 空げき率, ε_0 : 初期空げき率, k : 透水係数 (cm/sec), k_0 : 初期透水係数 (cm/sec), C : 間隙流体中の粒子濃度 (g/cm³), q_s : 砂 1 g 当りの沈着粒子重量 (g/g), σ_s : 砂の単位重量 (g/cm³), σ_h : 懸濁粒子の単位重量 (g/cm³), f_0 : 沈着粒子内の二次空げき率, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: 実験定数 (β_1 は 1/sec, 他は無次元)

④式の $\beta_2 (1 - \beta_2 q_s) (1 + \beta_3 q_s)$ は過程方程式における阻止率 λ に対応する。 λ は、上述においては沈着量の増加と共に図-4の曲線4のような変化をするとされている。²⁾ いま $\beta_2 = \beta_3 = 0$ とすると直線1のように阻止率は一定となる。実際には飽和沈着量 q_s が存在する。 $\beta_2 = 1/q_s$, $\beta_3 = 0$ とすると阻止率は直線2のように近似できる。 β_3 沈着の進行と共に阻止率を増加させるパラメーターであるが、ここで

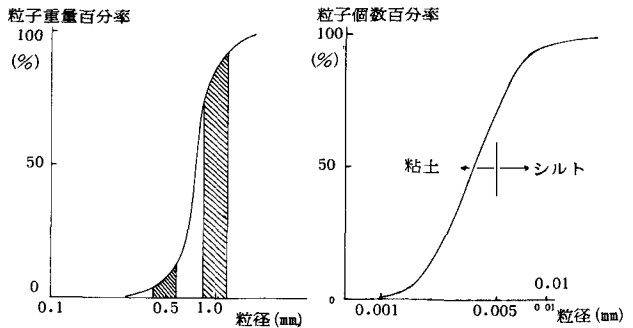


図-1 砂の粒度分布

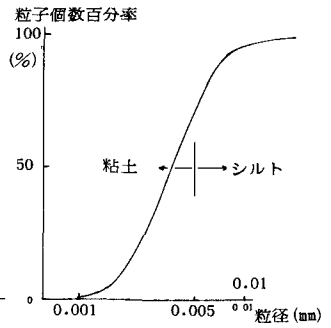


図-2 懸濁粒子の粒度分布

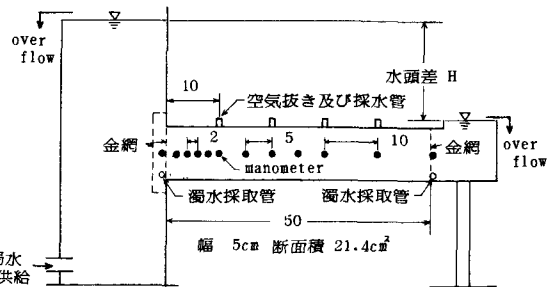


図-3 実験装置 (寸法単位 cm)

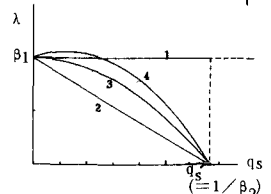


図-4 阻止率と沈着量

はその判定が困難であるので $\beta_2 = \beta_3$ とした。この時停止率は曲線3のように、 $q_s = 0$ のときに最大となる放物線になる。
①～⑥式は差分化して数値計算した。

4. 実験結果 まず④式の妥当性を検討した。実験終了直前の砂層各部分の透水係数と終了後に実測した抑留粒子量との関係を図-4に示す。図に示すように $f_0 = 0.8$ 程度で、④式は実験結果とほぼよく一致している。通常の急速ろ過では f_0 は $0.8 \sim 0.9$ 程度となっており、ここで得られた f_0 もそれに近い値になっている。また⑤式は砂粒径とは無

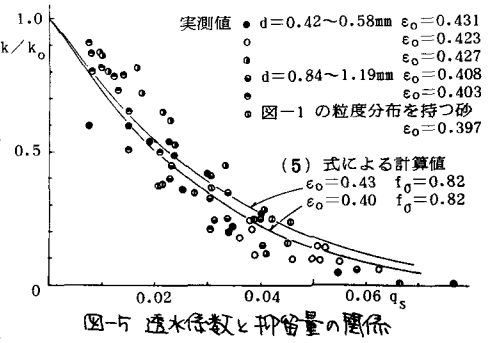


図-4 透水係数と抑留量の関係

関係に成り込んでいるが、実験結果でも砂粒径による差は小さいようである。また初期空けき率による相違もあり大きくはない。実験定数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ について考えると、 β_2 の値は、各実験の抑留量実測値の最大値を図-4から $0.06 \sim 0.1$ とし、これを q_s とすれば、 $\beta_2 = 1/q_s \approx 10 \sim 15$ が得られる。 β_1 については、抑留の初期を考えると $q_s = 0$ として、流入端に近い所で $C = C_{in}$ (流入濃度) とすると、④式より、 $\partial q_s / \partial t = \epsilon_0 \beta_1 C_{in} / (1 - \epsilon_0)$ 、 k/k_0 を t で微分すると、 $\partial(k/k_0) / \partial t = \partial(k/k_0) / \partial q_s \cdot \partial q_s / \partial t = \partial(k/k_0) / \partial q_s \cdot \epsilon_0 \beta_1 C_{in} / (1 - \epsilon_0)$ とより、 $\beta_1 = \partial(k/k_0) / \partial t \cdot (1 - \epsilon_0) / (\epsilon_0 \beta_1 C_{in})$ ⑦
よって図-4の $q_s = 0$ 付近の傾きと、流入端での透水係数の時間変化から β_1 が求められる。これによると、 β_1 は 10^3 (1/sec) 程度となった。図-6～8には、 $d = 0.42 \sim 0.58$ mm の砂についての流量、流入流出濃度、実験終了時の砂層中の抑留量分布の実測値と計算値を示した。実験条件として、水頭差 $H = 48$ cm、初期空けき率 $\epsilon_0 = 0.423$ 、初期透水係数 $k_0 = 0.143$ cm/sec、初期 Reynolds 数 $Re = 0.23$ で Darcy 則が成立する範囲にある。図-6-8から計算結果はこの現象の傾向を表現しているといえる。他の実験でも、 $\beta_1 = 10^3$ 程度が、ほぼ良い結果を与えた。 β_1 は懸濁水中の比較的小さい粒子の影響を受けやすく、供給する濁水とよく混ざりて径の大きい粒子の沈降を防いだ場合、 β_1 の値は1桁近く大きくなる。

5. おわりに 現在、本報で報告した粒子以外の砂についても実験考察を行っている。それにより、④式の妥当性をさらに検討し、また $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の関数形を見出したいと考えている。(これらの定数は、砂粒径・空けき率・動水勾配・砂の形状・および流入水中の懸濁粒子の粒度分布の関数であると思われる。)すでに数値計算は2次元流についても行っており、これによって実際の人工塩差について、沿岸地の土質と注入水の特徴から、流量変化等と数値計算可能にしたいと考えている。

1) Theory of Water-Filtration T.R Camp F. ASCE 8.1964

参考文献 2) 急速ろ過工程の数学表現(I) 藤田賢二 水道協会誌 510号
3) 砂層の抑留機構に関する研究(I) 丹保健二 他 水道協会誌 498号

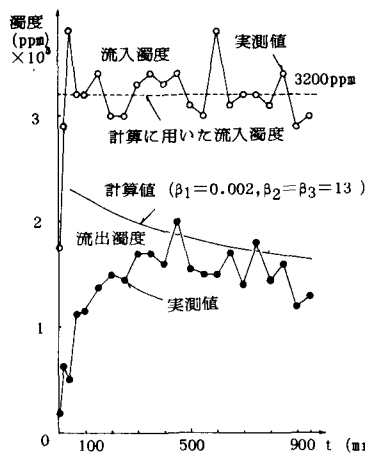


図-6 濃度変化

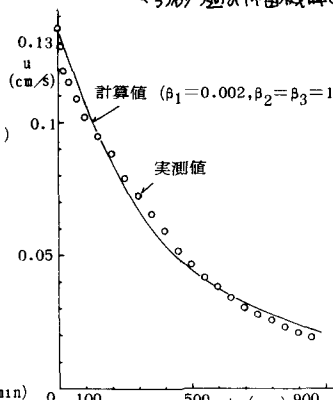


図-7 流量変化

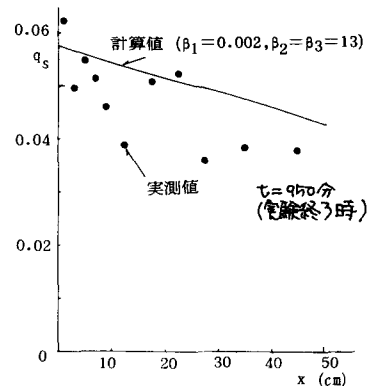


図-8 抑留量分布