

浮遊物による目づまりに関する研究
A Study on The Clogging Caused by Suspended Solids

建設省土木研究所 正 ○北川 明
" 正 石崎 勝義

1. はじめに

注入機による地下水の人工涵養を行なう場合、浮遊物（粒径が非常に小さいので、懸濁物という方が適切であるかもしれない。）は、一般的で、発生頻度の高い目づまりの原因である。それゆえ、懸濁物による目づまりがいかに発生して、それがどのように注入に伴う基本的な水理量に影響を与えるかを、前もって把握しておくことは、非常に重要である。

懸濁物による目づまりは、懸濁物の帯水層内での抑留と抑留に伴う透水性の低下という二つの機構によって発生する。このように、定性的な説明を始めるのは簡単であるが、現象に立ち入れば立ち入るほど、現象の記述は困難になってくるであろう。ここでは、細かな機構に立ち入るのではなく、これまでのろ過に関する研究成果を参考にし、今回実施した懸濁物による目づまりに関する実験結果によって、目づまりの結果として生ずる現象に主眼を置き、考察を進める。

2. コラム実験と懸濁物による目づまりに関する一般的特性

2-1 コラム実験

懸濁物による目づまりの一般的特性の把握と理論を展開する上で必要な基礎データを得ることを目的として、コラム実験装置によって、定水位浸透実験を行なった。装置の概略、用いた実験砂の特性を図1、表1に示す。実験水は河川から取水し、沈殿池を通したものであるいは急速砂ろ過したものを用いた。実験水の水質については、表2に示す。初期浸透速度は、20m/日、50m/日、100m/日、150m/日とした。

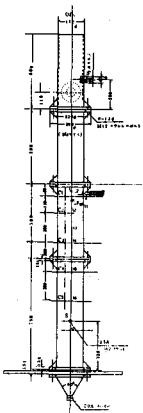


図1 コラム実験装置

2-2 実験結果と目づまりの特性

図2に、目づまりに伴う浸透速度の減少の一例を示す。同じ負荷量に対して、SS濃度の低い方が浸透量の減少が遅い。同じ負荷量に対する目づまり程度の差は、懸濁物の抑留状況の違いを意味する。濃度の高い方が、懸濁物の粒子が大きく、浸透層の表層に集中して、抑留されることになる。図3は、おのおのの場合の表層での透水係数の減少を比較したものである。やはり、懸濁物濃度の高い方が、透水係数の減少が速く、より表層に抑留物が集中されることが示されている。

懸濁物の抑留されやすさは、浸透層の間隙特性、浸透速度によって

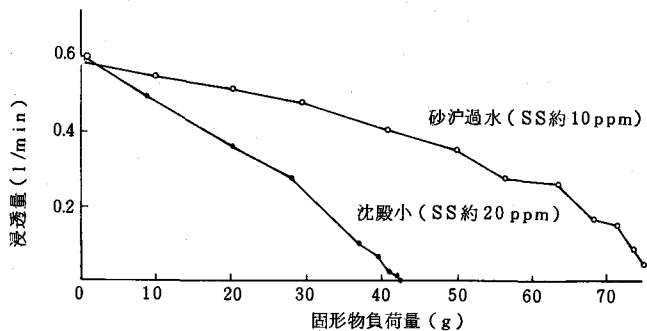


図2 負荷量と浸透量

試料	有効径	均等係数	間隙率(%)
1	2.15mm	1.35	41
2	1.50mm	1.50	42
3	0.98mm	1.43	41

表1 実験砂の特性

河川沈殿水	① 20ppm (SS) 52.2~3
	② 10ppm (SS) 53.7~8
砂ろ海水	10.6ppm(SS) 52.2~3

表2 実験水のSS濃度

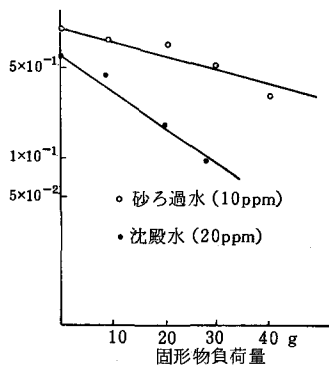


図3 表層での透水係数の変化

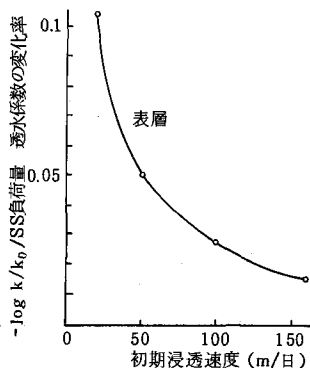


図4 透水係数の減少勾配

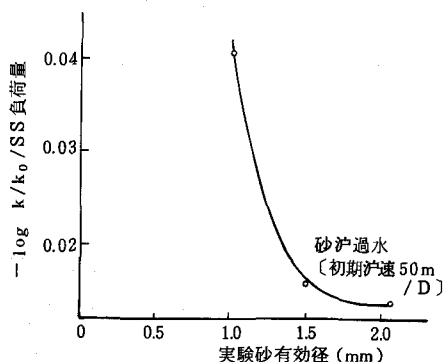


図5 透水係数の減少勾配

変わることは周知の事実である。図3に示されるように、目づまりに伴う透水係数の減少は、SS負荷量に対して、ほぼ指数関数的に減少しているので、この減少勾配を、浸透層の有効径、初期浸透速度に対して、プロットしたのが、図4、図5である。粒径の小さい方が抑留されやすいこと、初期浸透速度が大きいと、抑留されにくいことが示されている。

3. 懸濁物の抑留と透水係数の減少に関する考察

懸濁物濃度の浸透層での変化は、一次元浸透流の場合、一般的に次式で表わされる。

$$(e_0 - \sigma) \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial z} = Ez \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 e_0 は浸透層の初期間隙原、 σ は浸透層の単位体積内抑留量 (cm^3/cm^3)、 c は浸透層内の懸濁物濃度 (cm^3/cm^3)、 q は浸透層内みかけの流速、 Ez は分散係数、 t は時間、 z は流れ方向の座標である。

また、懸濁物の抑留に関する式は次式のように表わされる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda qc \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 λ は懸濁物の抑留のされやすさを示し、ろ過分野では、ろ過係数と呼ばれている。

懸濁物の濃度が主に、砂粒子への抑留によって変化する場合には、(1)式において、左辺の第一項および右辺は無視されて、次式のようになる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -q \frac{\partial c}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2)式における λ が、懸濁物の抑留を議論する上で重要なパラメータとなる。 λ は普通次のような形で表現される。

$$\lambda = \lambda_* f(\sigma)$$

ここに、 λ_* は初期の値、 $f(\sigma)$ は抑留量 σ の関数である。 $f(\sigma)$ については、 σ の一次式、あるいは二次式等が仮定されているが、確定的なものはだされていない。懸濁物の抑留機構が複雑でかつ微妙な条件の変化によって左右されるため、過去行なわれた実験値も、実験者ごとにはばらつくと考えられるからであろう。

ここでは、地下水の涵養の場合には、水質的及び水理的な厳しい管理のための精度の高い予測、監視が必要な浄水のろ過の場合と異なって、時間的なスケールも大きく、結果的に量的な予測のみであるという実際的な立場も考慮し、現象を簡略化し、 $\lambda = \text{const}$ と仮定する。そして、実験結果から、 $\lambda = \text{const}$ としてもよいことを明らかにする。

(2)式、(3)式から、次式を得る。

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\lambda z \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\lambda = \text{const}$ とし、(4)式を積分して、(2)式から、層内の抑留量は次式で表わされる。

$$\sigma = \lambda C_0 \int_0^t q \, dt \cdot \exp(-\lambda z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_0 は層内浸透前の懸濁物濃度である。また、 $C_0 \int_0^t q \, dt$ が、懸濁物負荷量となる。

図3に示されるように、透水係数は負荷量に対して、ほぼ指数関数的に減少する。すなわち、

$$k \propto \exp(-\alpha C_0 \int_0^t q \, dt)$$

と近似することができる。ここに、 α は定数である。

もし、抑留量 σ が(5)式で表現されるとすれば、抑留量は負荷量に比例することになるから、抑留量と透水係数の関係を次式で表わすことができる。

$$k = k_0 \exp(-a\sigma) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k_0 は初期の透水係数、 a は定数である。上式は上田等⁽¹⁾によっても仮定されて、用いられている。

図6は、(6)式と実験値⁽²⁾を比較したものである。実験値は破線で示されている。また図中の一点鎖線は、Camp T.R.によって提案されたものである。一様粒径で構成された浸透層の透水係数を与える。コッフェニーカーマンの式から導かれたものである。抑留量と透水係数との関係を知る由一のものと考えられて、次式で示される。

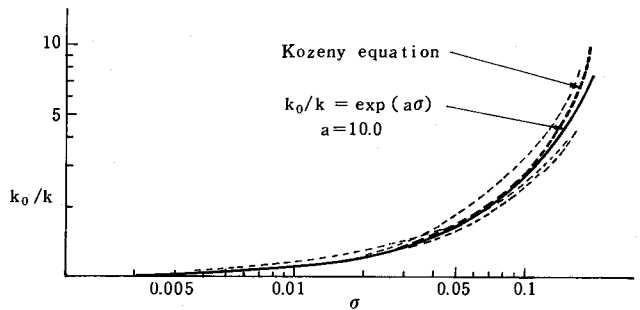


図6 透水係数の抑留量による変化(実験値との比較)

$$k_0/k = \frac{(1-e_0+\sigma)^2}{(1-e_0)^2} \cdot \frac{e_0^3}{(e_0-\sigma)^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{3(1-e_0) + \frac{1}{4} + \frac{\sigma}{3(1-e_0)} + \frac{1}{2}}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図6の(6)式($a = 10$ とした場合)と(7)式および実験値とは良く対応している。

(6)式と(7)式を対比して考えると、(7)式は流体の抵抗則から、物理的に間隙内の抑留量を考慮して、導かれたもので、所定の物理量(初期の透水係数、初期の間隙率)が得られれば、抑留量に対応した透水係数が得られる。しかし、式が少々複雑で、この式によって全層での透水性の変化すなわち、目づまりの進行を考察するのはめんどうである。(7)式は、式としては簡単であるが、係数 a が物理的にあいまいであるという欠点を有する。

a について考察する。図6に示されるように、(6)式は実験値のすべての抑留量 σ についてよく対応しているから、係数 a は σ には独立と考える。初期の間隙率 e_0 の大小によって、同じ抑留量 σ でも閉塞の効果が異なってくるから、係数 a は e_0 の関数となる。また、間隙中に抑留量が多くなると、抑留物の抑留状況が透水性に影響を及ぼす。そこで、 a は、主に初期間隙率と抑留物の間隙率の関数と考えられる。抑留の初期では抑留量の間隙を占める割合は小さいために、抑留物の間隙特性の影響は無視しえるであろう。よって、浸透初期においては、 a は e_0 のみの関数と考える。しかし、 a について定量的に定める方法はない。図6に示されるように、(6)式と(8)式は関数形 ていることから、便宜的に(7)式から推定することが考えられる。すなわち、 $\sigma = 0$ での透水係数の微係数を等しくしようとするものである。(7)式を微分して、 $\sigma = 0$ とおくと、 a に関して、次式のような関係が得られる。

$$a \approx \frac{4}{3(1-e_0)} + \frac{3}{e_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

初期間隙率 e_0 が小さいと、 a が大きくなり、同じ抑留量に対して、目づまりが早いことがわかる。

ここで、通常の砂層の間隙率を $0.2 \leq e_0 \leq 0.4$ と考えると、 $9.7 \leq a \leq 16.7$ となり、図 6 で、 $a = 10$ とした値はこの不等式を満足する。図 6 の実験値も均質な粒径の砂を用いて得られたものと考えられるから、 e_0 は 0.4 前後と考えられ、 $a = 10$ は妥当な値であることがわかる。

透水係数は抑留量の指数関数でよく近似されること、透水係数は負荷量に対しても指数関数的に減少することから、(5)式によって、懸濁物の抑留されやすさを表わす λ は時間的に一定とみなしてもよいであろう。

次に、 λ が空間的にも一定とみなしてもよいかどうかについて考察する。図 7 は浸透量における抑留量の分布を示したものである。浸透層の有効径は 0.98mm
実験水は河川沈殿水で、SS は平均約 10 ppm である。

(5)式から、抑留量の分布は

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\lambda z)$$

と表わされる。ここに、 σ_0 は表層での抑留量である。

図 7 中の実線は、 $\lambda = 0.14$ として、上式をプロットしたものである。定水位浸透のため、抑留物は表層により集中しているようであるが、実験値は概して、指数

分布に近く、結果的には、空間的にも、 λ を一定とみなしてもさしつかえないと考えられる。定量浸透の場合には、よりこの傾向が明確になると思われる。尚、 $\lambda = 0.14$ は、 λ が空間的な抑留量の分布を決定すると同時に、表面での抑留量 $\sigma_0 = \lambda C_0 \int_0^t q dt$ をも決定することから、表面での抑留量を実験値から与え、抑留物の水中単位体積重量を $W = 0.05 \text{ g/cm}^3$ と仮定して、求めたものである。

以上の検討の結果をさらに検証したのが図 8 である。全層での透水係数を実験値と計算値と比較したものである。計算値は次式によって求めた。

以上

$$\bar{k} = k_0 z_0 / \int_0^{z_0} \exp\{a \lambda C_0 \int_0^t q dt \exp(-\lambda z)\} dz$$

ここに、 $\bar{k}$ は全層での透水係数、 k_0 は初期の透水係数、 z_0 は層厚である。尚、 λ については、0.14 を、 a については、 $e_0 = 0.4$ として、(8)式から $a = 9.7$ とした。

実験値と計算値は、特に、初期の段階でよく一致している。

λ は種々の実験条件で異なる。図 9、図 10 は、図 4、図 5 に示される結果から、(5)式および(6)式を用いて得た値を図示したものである。 $W = 0.05 \text{ g/cm}^3$ 、 $a = 9.7$ とした。

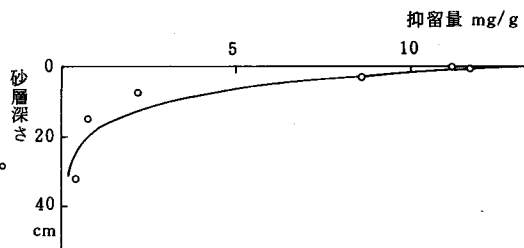


図 7 抑留物の抑留分布

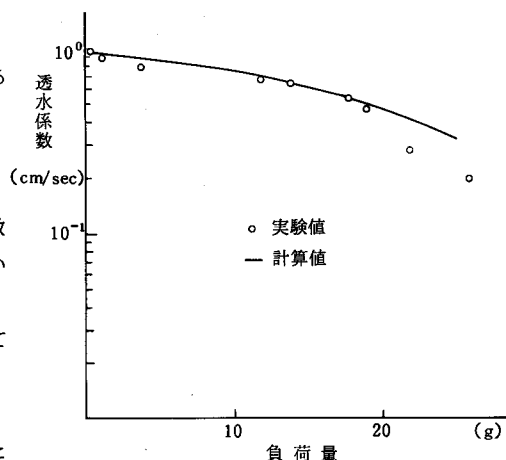


図 8 全層での透水係数の変化の比較

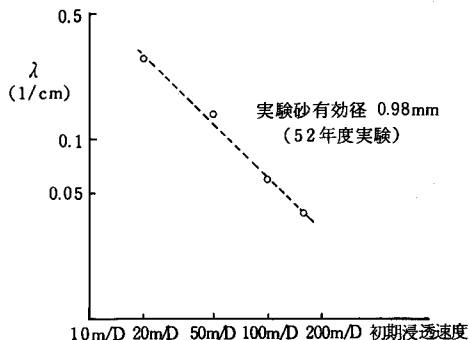


図 9 λ の初期速度による変化

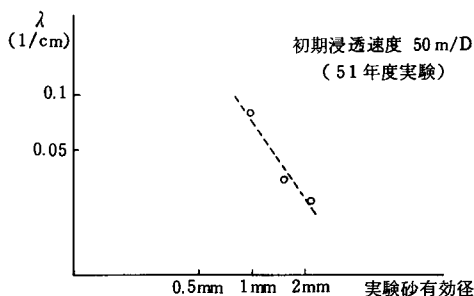


図 10 λ の粒径による変化

実験数が少なく、実験データの蓄積が必要と思われるが、 λ はほぼ q_0^{-1} に比例し、また有効径 d に対しては、 $d^{-1.5}$ に比例している。実験時期が異なっていて、実験水の性質も異なっているかもしれないが、 λ について、次のように書くことができる。

$$\lambda \propto q_0^{-1} d^{-1.5} \dots\dots\dots(9)$$

また、藤田は⁽³⁾濁質にカオリンを、硫酸バンドを凝集前に用いて、初期のろ過係数 λ_* について、次のような実験式を得ている。

$$\lambda_* \propto q_0^{-(0.5-0.67)} d^{-(1.4-1.5)} \dots\dots\dots(10)$$

凝集剤を添加しない場合においては、 q_0 に対する傾きはもっと大きく、 q_0^{-1} に近くなっている。 λ と λ_* は性格が異なり、 λ_* は初期の抑留程度を示すのに対して、 λ は通水期間にわたった、平均的な抑留の程度を示すものである。実験条件も、 λ_* 、 λ の求めかたもそれぞれ異なるであろう。が、 λ と λ_* は同様な傾向を示しており、 λ について、(9)式、あるいは、凝集剤が含まれていれば(10)式のような仮定が成り立つと考えてよいであろう。

4. 注入井における懸濁物による目づまりに伴う比注入量の減少

これまで、定水位での実験結果を基に、懸濁物による目づまりについて、考察してきたが、注入井による涵養は一般に、注入量を一定としたもので、目づまりの発生状況の違いが予想される。しかし、図11は低懸濁物濃度の場合であるが、定量、定水位とも負荷量に対して、同様な透水係数の減少を示しており、前節で論じた λ についての種々の仮定も、定量の場合にも、そのまま成り立つと考えて、議論を進める。

円筒座標において、(4)式に対応する式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial r} = -\lambda(q_0, r) C \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $\lambda(q_0, r)$ は抑留のしやすさを表わす係数で、注入井ストレートでの浸透速度 $q_0 = Q/2\pi br_0$ (Q は注入量、 b は帯水層厚、 r_0 は注入井の半径)と注入井中心からの距離 r の関数となる。 $r = r_0$ における λ の値を λ_0 とすれば、 q は r に反比例し、 λ と浸透速度の関係が(9)式のような形で表わされるとすれば、 λ は次式のようなになる。

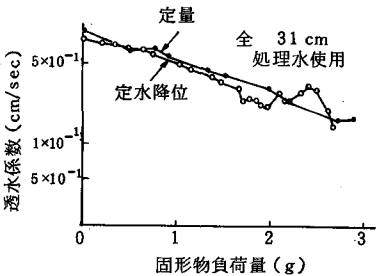


図11 定水位、定量浸透の比較

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-r}$$

ここに、 r は定数で、注入水が前処理で凝集剤を用いてあれば $r = 0.5$ 、用いてなければ $r = 1$ とする。上式を(11)式に代入して、積分すると次式のようなになる。

$$C = C_0 \exp \left[-\frac{\lambda_0 r_0}{1+r} \left\{ \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1+r} - 1 \right\} \right] \dots\dots\dots(12)$$

また、(3)式に対応する、懸濁物の連続式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (q r c) \dots\dots\dots(13)$$

(12)式を(13)式に代入して、積分すると、抑留量 σ について、次式が得られる。

$$\sigma = \lambda_0 q_0 t \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-r} \exp \left[-\frac{\lambda_0 r_0}{1+r} \left\{ \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1+r} - 1 \right\} \right]$$

よって、懸濁物の抑留に伴う透水係数の変化は次式のようなになる。

$$k = k_0 \exp \left[-a \lambda_0 C_0 q_0 t \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-r} \exp \left[-\frac{\lambda_0 r_0}{1+r} \left\{ \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1+r} - 1 \right\} \right] \right] \dots\dots\dots(14)$$

目づまりの進行に伴う地下水流動の非定常性は無視しえると考えると、地下水の運動式は次式となる。

