

急速ろ過における濁質抑留に関する一考察

室蘭工業大学 正 穂積 準

室蘭工業大学 学。新妻哲也

1. はじめに

砂層の濁質抑留に関して理論的および実験的研究が数多くなされているが、各研究者によって提案されている理論式あるいは実験式は種々様々であり、濁質抑留機構の解明がいまだ十分とはいえない。これは、濁質抑留現象に關与する因子の数の多いこともさることながら、砂層内における水流ならびに濁質粒子の挙動を直接把握することができず、なんらかの間接的な方法によって抑留機構を解明せざるを得ないことによるものである。通常は、砂層における濁質抑留量と損失水頭の関係を式化して、濁質抑留に伴う砂層の開塞状況を追求してゆく方法、あるいは、砂層の濁質抑留能力を表わすものとして阻止率を導入し、これが濁質抑留量によってどのように変化してゆくかを調べて、砂層における濁質抑留のパターンを追求してゆく方法が採られる。筆者らも、同様の方法によって砂層における濁質抑留機構の解明のための基礎的研究を行ってきた。本報では、濁質抑留に伴う阻止率の変化ならびに阻止率の変化に及ぼす粒径、ろ過速度、凝集剤注入率の影響について述べる。

2. 実験装置および実験方法

実験は図-1に示すようなフローシートに基づいて行った。原水濁度20 ppmになるようにカオリン原液を水道水で希釈混合し、凝集剤注入率が3 ppmとなるように硫酸アルミニウム溶液を所定量ポンプで添加し、混和槽において250 rpmの急速かくはんを行ってマイクロフロックを生成し、直ちに、直径10 cmのろ過筒に流入させ、図-1に示すような約5 cmづつ3層に分けられた各砂層内に流入流出する濁度および各砂層における損失水頭を一定時間ごとに測定し、同時に水温を測定した。使用した砂粒径は、0.5~0.6 mm, 0.7~0.85 mm, 0.85~1.0 mm, 1.2~1.4 mmの4種類で、その各々についてろ過速度120%, 240%, 360%の条件で実験を行った。また、凝集剤注入率を7 ppmと変えて同様の実験を行い、凝集剤注入率3 ppmの場合と比較した。なお、PH調整は行っていないが、本実験におけるPHは7.1~7.3程度である。

3. 実験結果と考察

実験は4種類の砂粒径について行ったが、粒径変化に伴う流出濁度の変化の傾向も同じであるので、粒径0.5~0.6 mmおよび粒径0.85~1.0 mmの場合を例にとって第1層目における結果を示す。図-2~4は凝集率3 ppmに対する結果で、縦軸に流入濁度に対する任意の時刻における第1砂層流出濁度の比C/C₀、横軸にろ過経時

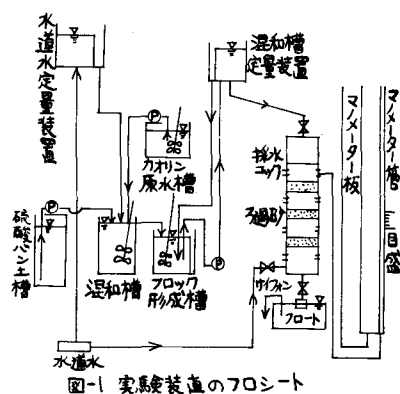


図-1 実験装置のフローシート

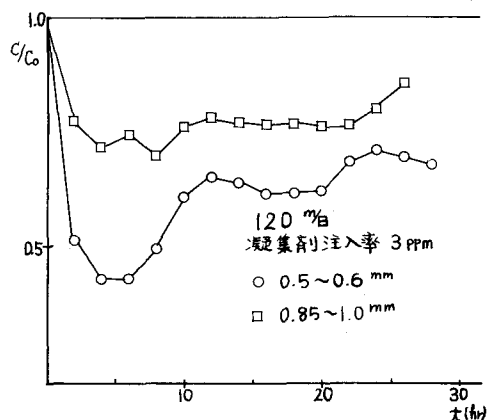


図-2 流出濁度の経時変化

時間をとって、ろ過速度ごとに流出濁度の経時変化をプロットしたものである。流出濁度はろ過継続時間とともに小さくなり、ある時間のところで最小となり、その後再び大きくなり、次第に抑止能力を失ってゆく。この場合、流出濁度の最小値の発現時間はろ過速度の大きい場合ほど早く、砂層はより短時間で最大の抑止効果を発揮するが、その後、流出濁度はろ過速度の小さい場合に比して急激に上昇し、より短時間で抑止能力に近しい状態になる。また、粒径の小さい砂層と粒径の大きい砂層では、前者の方が約1時間ほど早く流出濁度の最小値の発現時間が早く、小粒径の砂層ほど短時間で抑止効果を発揮し、また、その後の流出濁度も大粒径の砂層に比して小さく、より大きな抑止能力を有している。このように、粒径およびろ過速度が大きくなるにつれて流出濁度が大きくなり、砂層の濁質抑留量は小さくなるが、ろ過速度の増大とともに粒径の小さな砂層では粒径の大きな砂層に比して相対的に流出濁度が大きくなる。すなわち、ろ過速度の増大とともに各粒径の砂層における流出濁度の差が小さくなり、流出濁度に及ぼす粒径の影響は小さくなる。

図-5~7は同様に凝集剤注入率7 ppmに対する結果である。凝集剤注入率7 ppmの場合もうろ過継続時間に伴う流出濁度の変化のパターンは注入率3 ppmの場合と同じであるが、3 ppmの場合に比して抑止能力は小さい。とくに、粒径0.85~1.0 mmの砂層ではこの傾向が顕著で、ろ過速度240 %の場合では注入率7 ppmの方が抑止能力が大きくなっている。また、ろ過速度の増大に伴う流出濁度の最小値の発現時間の差異は注入率3 ppmの場合に比して小さい。さらに注入率7 ppmの場合には小粒径の砂層と大粒径の砂層における流出濁度の差は相対的に小さく、注入率3 ppmの場合に比して流出濁度に及ぼす粒径の影響も小さくなっている。ろ過速度240 %では大粒径の砂層の方が小粒径の砂層に比して抑止能力が大きく、注入率3 ppmの場合と逆の結果を示している。ただし、ここには示していないが、凝集剤注入率5 ppmに対する結果では注入率3 ppmの場合と同様の結果を示しているので、粒径0.85~1.0 mm、ろ過速度240 %の場合については追試してみる必要がある。

次に、前述の結果を用いて、阻止率と単位深さ当りの濁質抑留量の関係について求め、阻止率に及ぼす砂粒径、

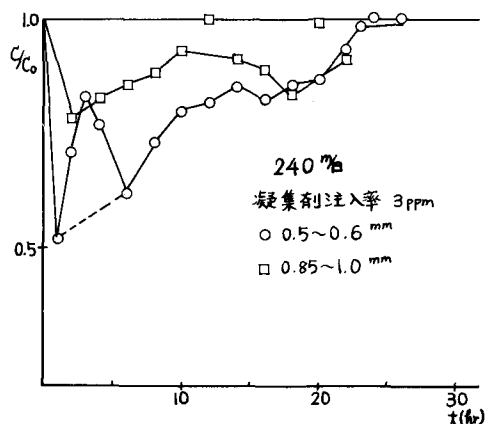


図-3 流出濁度の経時変化

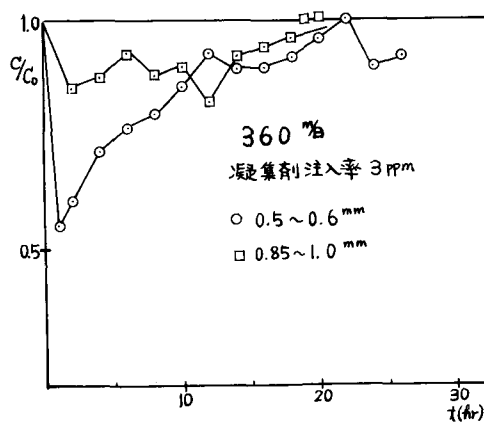


図-4 流出濁度の経時変化

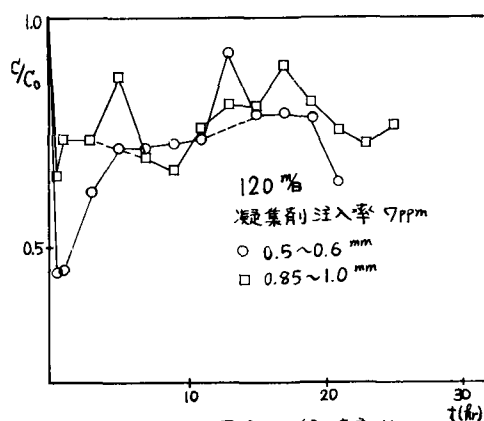


図-5 流出濁度の経時変化

ろ過速度および凝集剤注入率の影響について検討する。

砂層の任意の深さにおける濁質の濃度変化はその点における濃度に比例するものとして次のように与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 $C = C(z, t)$: 懸濁物質の重量(mg/cm^3)、 λ : 阻止率($1/\text{cm}$)

いま、簡単のため抑留濁質が厚さ5cmの砂層内で均等に分布しているものと仮定すると、流入濁度が C_0 であるから、阻止率 λ は次式のように与えられる。

$$\lambda = -\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\text{単位砂層当りの濁質抑留量}}{\text{流入濁質量}} \quad \text{--- (2)}$$

(2)式による λ はある時間間隔 Δt における単位砂層当りの平均残留率を意味する。式(2)における単位砂層当りの濁質抑留量は図2～7において $C/C_0 = 1$ の直線と流出濁度分布曲線および任意のろ過継続時間 $t = t_1$ と $t = t_1 + \Delta t$ の縦座標で囲まれた面積 ΔA_t を求めて次式によって算定される。

$$\Delta q = Q \cdot C_0 \cdot \Delta A_t / L \quad \text{--- (3)}$$

ここで、 Q : ろ過流量、 C_0 : 流入濁度、 L : 砂層厚
一方、任意のろ過継続時間までに抑留された単位砂層当りの濁質抑留量は $C/C_0 = 1$ の直線と流出濁度分布曲線および $t = 0$ と $t = t_1$ の縦座標で囲まれた面積 ΔA_t を求めて(3)式によって算定される。いま、これを $\Sigma \Delta q$ とする。

濁質抑留に伴う阻止率の変化を示す代表的なものとしては、Ivesによって与えられた次のようなものがある。

$$\lambda = \lambda_0 + a_1 q^* - \frac{a_2 q^{*2}}{\varepsilon - q^*} \quad \text{--- (4)}$$

ここで、 λ_0 : 初期砂層の阻止率、 a_1, a_2 : 定数、 ε : 清浄砂層の間隙率、 q^* : 単位体積の砂層中に抑留された濁質体積。

阻止率 λ は濁質抑留量とともに増大し、ある抑留量において最大となり、さらに濁質抑留量が増大すると減少してゆき、 λ と $\Sigma \Delta q$ の関係は一本の放物線で示される。しかしながら、図-8～10にみられるように λ は上記の場合と同様に $\Sigma \Delta q$ の増大とともに放物線的に変化してゆくが、ある点で極小値を示し、再び同様の変化をくり返す。したがって、Ivesの式で示されるような単一の放物線では λ の変化を示し得ず、正弦曲線式のようなもので $\Sigma \Delta q$ に伴う λ の変化を与えなければならない。図-8～10

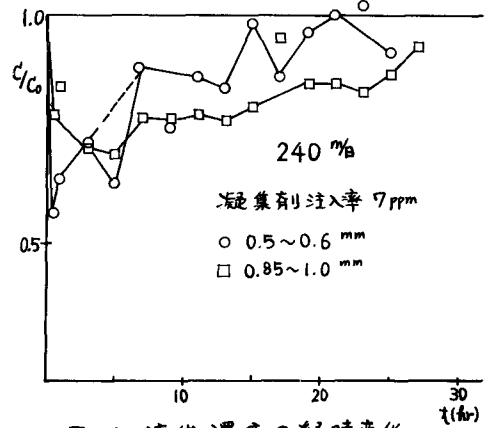


図-6 流出濁度の経時変化

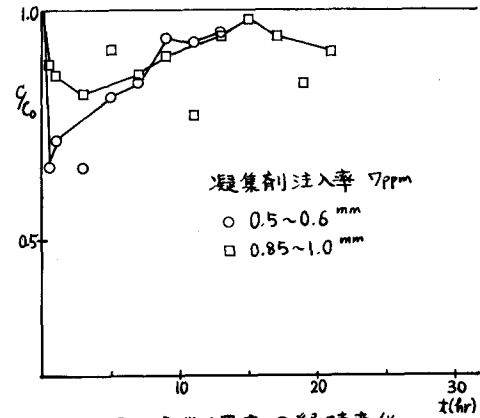


図-7 流出濁度の経時変化

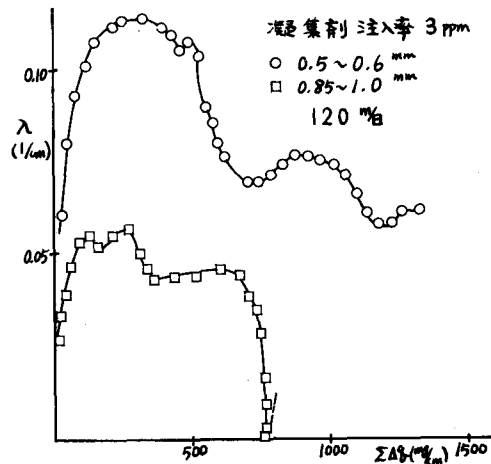


図-8 λ と $\Sigma \Delta q$ との関係

の結果は次のように考えられる。筆者らは、清浄砂層における損失水頭公式(Fair-Hatch 式)を用いて濁質抑留に伴う砂層空隙率の減少を求め、これと濁質抑留量との関係を求めた。濁質抑留に伴う空隙率の減少は、抑留量にみあうだけの空隙が減殺されるのではなく、抑留濁質が空隙のある部分に堆積することによって大きな空隙部分が減殺される結果を得、砂層が相等しい流水断面と流路長を有する多数の間隙水路からなり、各々の間隙水路は至るところで水平な管で連結され、間隙のある部分に堆積した抑留フロックによって水路が閉塞されるモデルを考えた。この場合、濁質抑留に伴って間隙水路の閉塞が進行すると砂層内の実流速が増大する。間隙水路の閉塞がある状況に達すると、抑留濁質と砂粒子との付着力よりも水流のせん断力が大きくなり、濁質粒子は砂粒子表面からはく離する。このようなはく離が生じると閉塞水路は再び水の流れに対して有効となり砂層の抑止能力も回復する。その結果、図-8~10にみられるような阻止率の変化パターンを生ずるものと考えられる。また、同一砂粒径では、ろ過速度が大きいほど、水流のせん断力が大きくなるので、図8~10にみられるように、阻止率の最大値はろ過速度の増加とともに小さくなり、最大阻止率を示す時間も小さくなる。ただし、この場合には、深さ5cmの砂層においても濁質抑留の分布があり、その分布がろ過速度によって異なってくることを考慮しなければならない。次に、阻止率と粒径の関係について検討する。粒径の小さい砂層では粒径の大きい砂層に比して個々の空隙の大きさが小さいので、濁質粒子を捕捉しやすい。粒径の大きい砂層では濁質粒子がろ層深部に侵入し捕捉されずに流出する割合が高い。したがって、その阻止率は、大粒径の場合に比して大きくなる。しかしながら、粒径の大きい砂層では、粒径の小さい砂層に比して水流のせん断力が小さいのでより多くの濁質を抑留し得るものと考えられ、濁質抑留とともにその阻止率は小粒径の阻止率に近づき、さらに、抑留が進行した状態では、小粒径の阻止率よりも大きくなるものと考えられるが図-8~10ではそのような関係はみられない。ろ過速度120%および360%では、濁質抑留量750 mg/cm^2 ~900 mg/cm^2 のところでは阻止率0を示しているが240%では濁質量400 mg/cm^2 で阻止率が0となり、再び、抑止能力を回復して阻止率が増大し、濁質抑留量600 mg/cm^2 のところでは阻止

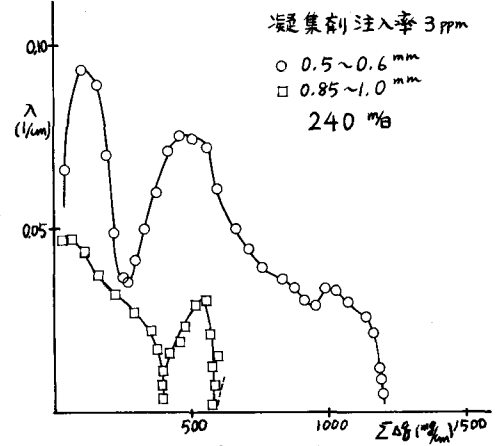


図-9 λ と $\sum \Delta s$ との関係

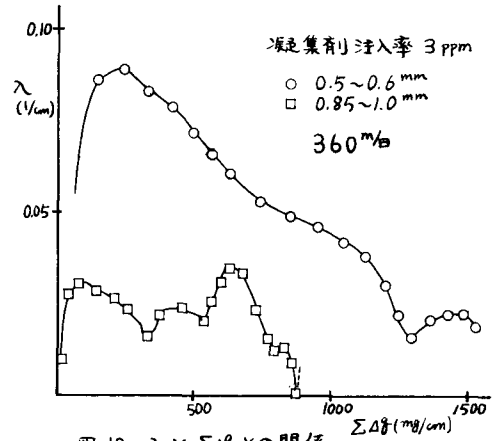


図-10 λ と $\sum \Delta s$ との関係

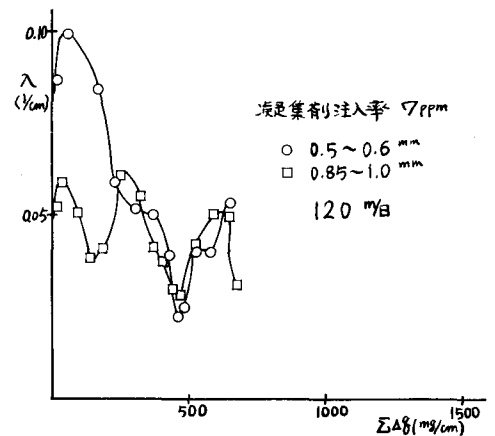


図-11 λ と $\sum \Delta s$ との関係

率が0となっている。ろ過速度120%、360%の場合もろ過を続行すれば、同様のサイクルを描くものと考えられる。さらに、ろ過を継続すればこのようなサイクルをくり返しながら濁質を抑制するものと考えられる。本実験では、30時間のろ過実験しか行っていないが、長期間にわたるろ過を行えば最終的には、粒径の大きい砂層では粒径の小さな砂層よりも濁質抑留量が大きくなることが推察される。

図11～13は、凝集剤注入率7ppmの場合の阻止率と濁質抑留量との関係を示したものである。注入率7ppmの場合と同様に阻止率は単一の放物線では示されず増減をくり返す。ろ過速度の増大に伴う阻止率の変化は3ppmの場合と同様であるが、粒径の大小による差異は3ppmの場合ほど顕著ではない。

4. あとがき

砂粒径、ろ過速度および凝集剤注入率を変化させた場合の砂層における濁質抑留機構について検討を加え、流出濁度に及ぼすこれら因子の影響について述べた。また、阻止率の変化を求めて、これら因子の阻止率に及ぼす影響について論じた。砂層における阻止率の変化は、従来、考えられているものよりはるかに複雑なものであり、砂層における濁質抑留機構の解明に当っては、さらに損失水頭等に及ぼすこれら因子の影響や砂層内における濁質粒子の挙動等を考慮して総合的な検討を加える必要がある。また、実際の急速ろ過では60～70cmの砂層厚を用いて濁質除去を行っているので、何段にも砂層を重ねて各々の砂層における阻止率の変化を求め、それらを相互に組み合わせて濁質抑留機構を追求してゆくことが必要である。現在、これらについて検討しており、その結果については別の機会に報告することとした。

最後に、本研究に当っては、過去3年間にわたる室蘭工業大学における卒業論文の資料の一部を利用させていただいたことを付記しここに関係諸氏に感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 1) Iwasaki, T. : JAWWA, Vol. 29, No. 10, p. 1591 (1937)
- 2) Ives, K.J. : Proc. Inst. Civ. Engrs., 16, p. 189 (1960)
- 3) Mintz, D.M. : International Water Supply Congress & Exhibition, No. 10, Barcelona (1966)
- 4) Maroudas, A and Eisenclam, P. : Chem. Eng. Sci., Vol. 20, p. 867 (1965), Vol. 20, p. 875 (1965)
- 5) Fair, G.M and Hatch, L.P. : JAWWA, Vol. 25, No. 11 (1922)
- 6) 丹保憲仁, 他3名 : 砂ろ過の抑留機序に関する研究
(1) 水道協会誌, 第458号, P3 (1972). (2) 水道協会誌, 第484号, p2~25 (1975)

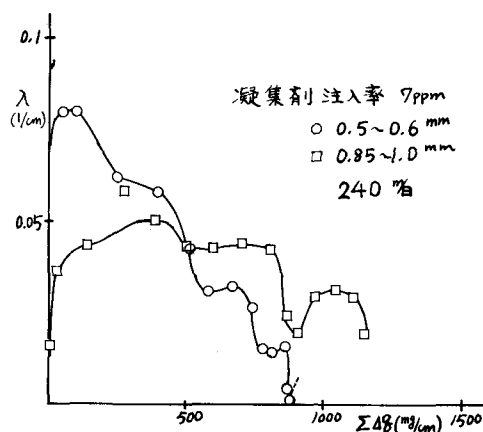


図-12 λとΣΔBとの関係

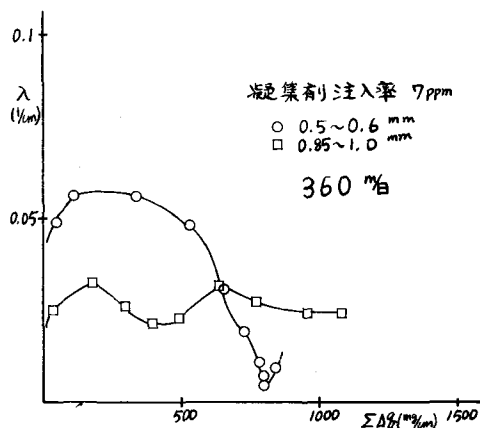


図-13 λとΣΔBとの関係