

II-58

直接砂ろ過における阻止率の解析

北見工業大学 正 員 海老江 邦 雄

北見工業大学 学生員 渋谷 真 祐

北見工業大学 学生員 安 出 卓 司

1 ま え が き

岩崎によって提唱されIves¹⁾らによって発展させられたろ過理論式中の阻止率は、ろ過のメカニズムや効果を評価する上で重要な指標と考えられる。従来、ろ過理論は非凝集性粒子を対象に展開されてきたが、実際の水処理で対象となるのは凝集性粒子である。凝集性粒子のろ過では、フロックの輸送、付着、剥離、ろ層内におけるフロキュレーションなどが複雑に作用するため、非凝集性粒子の除去に基づく理論を、直接凝集性粒子に対して適用することは非常に難しいとされてきた²⁾。

本論では、ろ層各部から直接採水する従来の方法に代わり、ろ層の抑留物質量の把握からろ層各部を流れる濁質の濃度を算出する方法を用いることによって、直接ろ過における凝集性粒子の阻止率の挙動の解明を目的にしている。さらに、抑留物質量に伴う阻止率の動きを最小自乗法を用いた多項式近似によって、ろ過阻止率のろ層設計への応用につながる一つの検討を行った。

2 ろ過理論式と阻止率の計算手順

ろ過理論式としては、次の水質変化式と物質収支式が提示されている。

$$\partial C / \partial L = -\lambda C \quad (1)$$

$$\partial C / \partial L + (1/V) (\partial S / \partial t) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ∂C はろ層の微小間隔 ∂L における懸濁粒子の濃度変化量(mg/cm^3)、 C はその部分を流れる懸濁粒子濃度(mg/cm^3)、 λ は阻止率($1/\text{cm}$)、 V はろ速(cm/h)、 ∂t は水流が ∂L の層を通過する時間(h)、 ∂S はその間の抑留物質の変化量(mg/cm^3)。

(1),(2)式を差分で表すと

$$\Delta C / \Delta L = -\lambda C \quad (3)$$

$$\Delta C / \Delta L + (1/V) \cdot (\Delta S / \Delta t) = 0 \quad (4)$$

(4)式を(3)式に代入して λ について整理すると、

$$\lambda = \Delta S / (C \cdot V \cdot \Delta t) \quad (5)$$

(5)式の分母分子にろ層の単位体積としてのろ過筒断面積と単位厚さ ΔL を乗じて整理すると、

$$\lambda = \Delta S / (C \cdot Q \cdot \Delta t \cdot \Delta L) \quad (6)$$

ここで、 Q (l/h)は流量である。 ΔS は ΔL における Δt 時間内の抑留物質量の増分であり、実験によってこの値を確定すれば、(6)式から Δt 、 ΔL での阻止率を順次計算できることとなる。

今回の阻止率計算では、ろ速として240と360(m/d) (それゆえ Q として53.0、79.5(l/h)になる)、 Δt として2時間、 ΔL として5cmをそれぞれ採用した。また、 ΔS は以下の手順により求めている。1) 原水平均濁度20度に対応する経時のろ過水濁度を求め、それらの相加平均からそれぞれの系列のろ過水濁度経時曲線を確定する。2) 1)の結果に基づく原水・ろ過水濁度差と流量の積から各ろ過時間に対する抑留物質総量を計算し、これを用いて採砂から求めた抑留物質総量を補正して、ろ過の経過に伴う抑留物質質量分布図を確定する。3) 抑留物質質量分布図の動きから、2時間、5cmごとの抑留物質増加量 ΔS を順次求めていく。

3 実 験

図1に実験に用いた直接ろ過装置を示す。ろ過筒には珪砂(径0.59~0.74 mm、比重2.65)を60 cmの厚さに充填し、空隙率は44.3%に調整した。流入原水としては本学水道水を用い、濁度成分としてはカオリン(20mg/l)を、凝集剤としては硫酸アルミニウム(10mg/l)を注入した。所定の条件で凝集剤とカオリンを急速混和したのち、直ちにろ過速度240m/d または 360m/d で直接ろ過した。ろ過時間は3, 6, 12, 18, 24, 36 時間とし、この間の所定時に採取された原水、ろ過水の濁度を積分球式濁度計を用いて測定した。また運転終了後、砂層内抑留物質が剥離しないよう層内の水をゆっくりと抜き取り、表1に示す部分から汚砂を採取し、その採砂に付着していた濁質をJar Tester によって剥離の後、定量した。

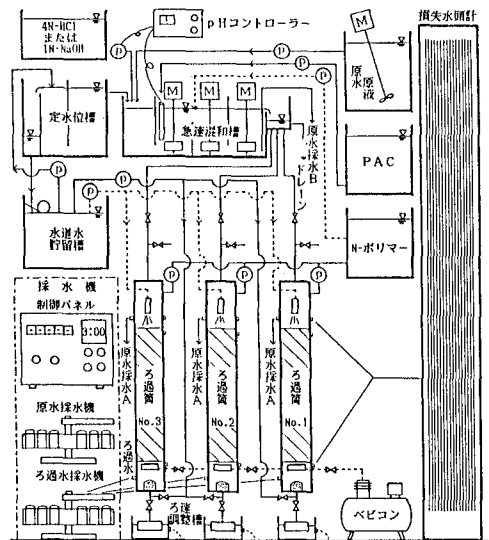


図1 実験装置の概要

4 ろ過理論式(6)に基づく阻止率の動き

阻止率の計算結果については、図2(1)~(3)と図3(1)~(3)に示した。図2はろ速240 m/d、図3はろ速360 m/dにおけるろ層5 cmごとの抑留物質質量に対する阻止率の動きを示している。

まず、ろ速の違いによる阻止率の動きを見ると、阻止率の最大値はろ速240 m/d では 9×10^{-2} (cm^{-1}) ($S = 2,400 \text{ mg/ろ層5cm}$)、ろ速360 m/d では 6×10^{-2} (cm^{-1}) ($S = 1,800 \text{ mg/ろ層5cm}$)であり、また、図3、4の全体的傾向からみても、ろ速が低い240 m/dの方が360 m/dに比べ、阻止率の値が高くなっている。

また、ろ層5 cmごとの阻止率の動きを見ると、抑留物質の過半を負担するろ層上部では、ろ速240、360 m/dのいずれにおいても、上から下に向かうに従い、最大値の出現は早まり、最大値そのものも減少している。こうした傾向は、(1) 逆洗によってろ層が成層化されるため、ろ層上部と下部のろ材径が異なること、(2) 付着力の高い粒子が上層部で、付着力の低い粒子が下層部でろ過されるなど、抑留フロックの付着力に差があること、さらに、(3) 凝集性粒子であるため、これらのフロックの圧縮力が異なることなどが原因と考えられる。それに対しろ層下部では供給濁質が少ないため、いまだ阻止率が上昇傾向を示している部分が多い。

つぎに、抑留物質質量の増加に伴う阻止率の推移型について考察する。非凝集性粒子のろ過における阻止率の推移型としては、岩崎によって上昇型、Stein、Ivesらによって山型(上昇部→ピーク→下降部)、Mintz、Shekhtman、Mackrleらによって下降型、Hallらによって一定値型が示されている。凝集性粒子を対象にした今回の結果を、ろ層5 cmごとで見ると、既往の研究で指摘されているような山型と上昇型、およびろ過初期のデータを無視すれば下降型ともいえる推移型が認められる。しかしながら、ろ層全体の阻止率の推移をマクロに捉えると、Ivesらの提唱する山型が最も良く適合していると考えられる。このことは、凝集性粒子のろ過においても、非凝集性粒子の場合と同様に、ろ過初期には、抑留に伴う有効表面積の増大による阻止率の上昇が起こり、その後、ろ層間隙の減少に伴う間隙内流速の増加(せん断力の上昇)に起因して阻止率が減少し、さらに、抑留有効間隙が使い尽くされて阻止率が0になる過程を辿ると考えられる。

5 ろ過阻止率の多項式近似の検討

ろ層設計に対する応用の第一歩として、先の実験結果をもとに、ろ層厚60 cmに対する阻止率の動きを、

表1 ろ層表面からの採砂位置

NO	採砂 (cm)	NO	採砂 (cm)
1	0~1	8	14~15
2	1~2	9	20~21
3	2~3	10	25~26
4	3~4	11	30~31
5	4~5	12	35~36
6	7~8	13	45~46
7	10~11	14	55~56

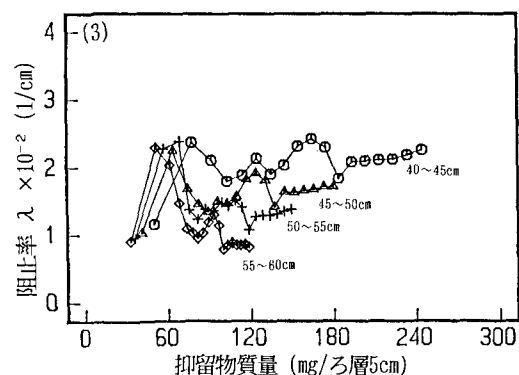
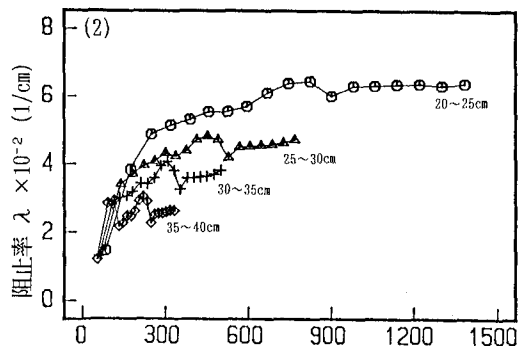
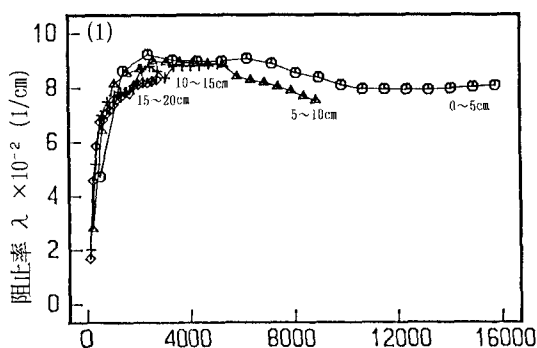


図2 抑留物質量に対する阻止率の動き
(ろ速 240 m/d)

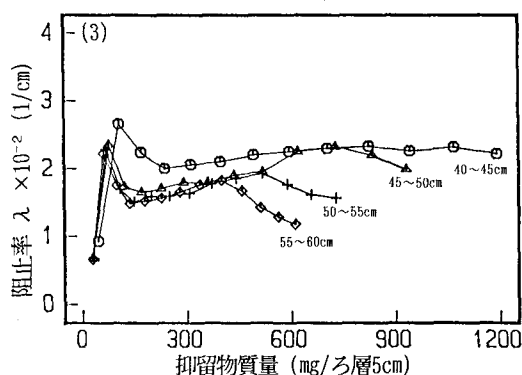
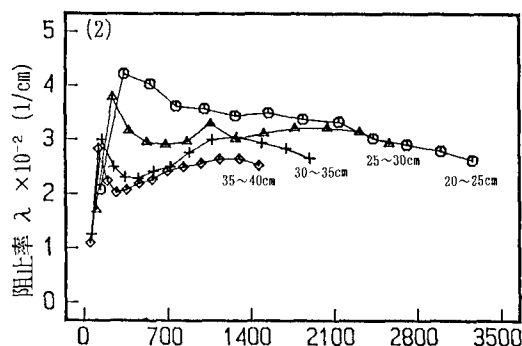
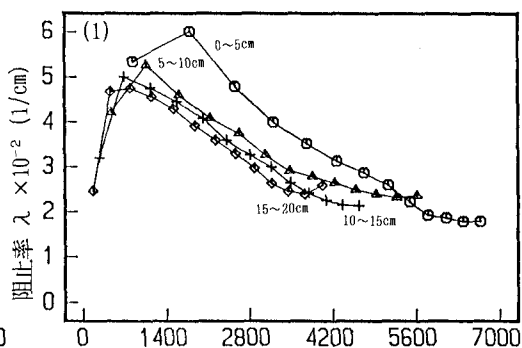


図3 抑留物質量に対する阻止率の動き
(ろ速 360 m/d)

最小自乗法を用いて多項式で表現するべく検討を行った。

その操作と計算手順は次の通りである。

- 1) 5 cm ごとのデータに基づき、最小自乗法によって多項式(1次から5次まで)の係数を定める。
- 2) 1)で定めたそれぞれの多項式に、先の2時間5 cm ごとの抑留物質量を代入してそれぞれ5 cm ごとのろ過時間経過に伴う阻止率を計算する。
- 3) 微小時間(2時間)、微小砂層厚(5 cm)における阻止率λはほぼ定数と考えることが出来るので、水質変化式(1)はつぎようになる。

$$C_i = C_{i-1} \exp(-\lambda L) \quad (7)$$

ここで、 C_{i-1} は該当層への流入濃度、 C_i は該当層からの流出濃度である。 L はろ層表面からの深さで、

この場合 5 cm となる。

4) 2)で求めた阻止率を(7)式に代入し、2 時間 5 cm ごとの流出濃度を順次計算していく。

5) 4)で求めたろ層 60 cm からの流出濃度の平均値と、先のろ過実験におけるろ層 60 cm からの流出濃度の平均値とを比較し、その差が最も小さいものを近似多項式として選定した。

これらの計算の結果、ろ速 240 m/d、360 m/d に対する阻止率-抑留物質量曲線として、いずれもつぎに示す 4 次の多項式が選定された。

$$\text{ろ速 } 240 \text{ m/d} : \lambda = 2.79 + 4.48 \times 10^{-3} S - 1.01 \times 10^{-6} S^2 + 8.48 \times 10^{-11} S^3 - 2.39 \times 10^{-15} S^4 \quad (8)$$

$$\text{ろ速 } 360 \text{ m/d} : \lambda = 1.66 + 2.68 \times 10^{-3} S - 1.23 \times 10^{-6} S^2 + 2.05 \times 10^{-10} S^3 - 1.20 \times 10^{-14} S^4 \quad (9)$$

これらの多項式を用いて、ろ層 0~5, 30~35, 55~60 cm における経時の流出濃度を算出し、図 4, 5 に示した。実験値は○、計算値は△である。ろ層厚 60 cm からの平均流出濃度は、ろ速 240 m/d では実験値 1.04 mg/l に対し、計算値 1.00 mg/l、ろ速 360 m/d では 3.72 mg/l に対し 3.82 mg/l となり、いずれも良く一致した。また、表層 0~5 cm、中間層 30~35 cm における実験と計算による平均流出濃度の差は、いずれも 2 mg/l 以内であった。以上の結果、抑留物質量に対する阻止率の動きは、ほぼ 4 次の多項式で扱いうると判断した。

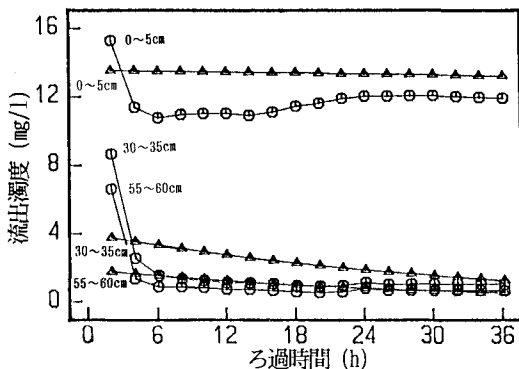


図4 流出濁度の比較 (ろ速 240 m/d)

6 あとがき

非凝集性粒子が対象の既往のろ過理論を凝集性粒子の直接ろ過に適用して解析したところ、ほぼ凝集性粒子のろ過に対しても適用可能であることが明らかになった。また、その際の阻止率の推移型はろ層全体をマクロに捉えれば山型になること、ろ速が速いほど阻止率は低下し、その最大値はろ速 240 m/d で $9 \times 10^{-2} \text{ (cm}^{-1})$ ($S \div 2,400 \text{ mg/ろ層5cm}$)、ろ速 360 m/d では $6 \times 10^{-2} \text{ (cm}^{-1})$ ($S \div 1,800 \text{ mg/ろ層5cm}$) となることなど、阻止率の詳細な動きを把握することが出来た。その後、これら阻止率の動きを多項式で近似表示したところ、4 次式がほぼ妥当という結果が得られた。今後は、細部をさらに詰めて、より有効性の高いものに行きたいと考えている。

【 文 献 】

- 1) Ives, K. J.: Theory of Filtration, International Water Supply Congress & Exhibition, Special Subject No.7, 1969.
- 2) Fox & Cleasby : Experimental Evaluation of Sand Filtration Theory, Jour. of Sa. Eng. Div., Proc. of ASCE, Oct.1966. SA5.
- 3) 海老江 邦 雄: 急速砂ろ過池の阻止率の動きについて, 土木学会北海道支部論文報告集第39号, P.69~72, 1982.2.
- 4) 海老江 邦 雄: 直接砂ろ過池の阻止率の動き, 土木学会第35回年次学術講演概要集第2部, P.702~703, 1980.9.

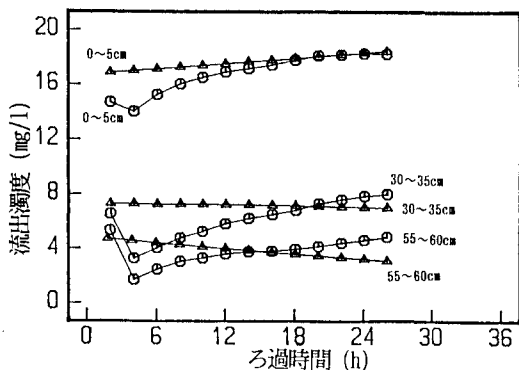


図5 流出濁度の比較 (ろ速 360 m/d)