

II—3 急速ろ過における抑留濁質のはく離現象に関する基礎的研究(1)

室蘭工業大学 正 員 穂 積 準
学生員 橋 本 正 利

1. はじめに

急速ろ過における濁質抑留機構に関しては数多くの研究がなされているが、種々の要因が影響し合う複雑な現象であるため、未だ十分な解明はなされておらず、各研究者によって提示されている濁質抑留に関するろ過方程式もさまざまである。特に、濁質抑留を論ずるうえで重要であると考えられる抑留濁質のはく離現象については、ろ過方程式を求めるにあたってほとんど考慮されていない。はく離現象に関するこれまでの研究は主として顕微鏡下における肉眼観察あるいは写真撮影による定性的なものが多く、はく離現象の存在そのものに関しても肯定説、条件付き肯定説、否定説などが提唱されており、その定量的な評価法は確立されていない。

そこで、筆者らははく離現象を考慮したろ過方程式を求める前段階として、はく離現象の定量的な評価法について検討を加えるとともに、はく離現象に及ぼす凝集剤注入率の影響について検討を加えた。

2. 実験装置及び方法

実験は図-1に示すように内径 10cm のアクリル製円筒に粒径 0.70~0.85 cm の砂を厚さ 5.2cm に充てんし、逆流洗浄を施した砂層を用いて行なった。原水としては濃度 20 ppm のカオリン懸濁液に凝集剤として硫酸アルミニウムを 3, 6, 9, 12 ppm 添加し、pH 6.9 ~ 7.1 に調整したものをを用いた。実験の手順は次のようである。(1)混和槽から沈降筒に供試原水を採水し、沈降分析を行なう。

(2)供試原水を連続的にろ過筒に送り、ろ過を開始する。

(3)所定時間ごとにろ過筒側面に付した採水コックよりろ過水を沈降筒に採水し、沈降分析を行なうとともにろ過水濁度及び損失水頭を測定する。

なお、沈降分析は内径 10cm、高さ 50cm のアクリル製円筒に底部3cm の位置に採水コックを付した沈降筒を用い、次の手順で行なった。(1)フロックを破壊しないように、また、砂層内の濁質抑留状態に影響をあたえないようにろ過水を1時間にわたって沈降筒に採水する。このときの沈降水深は 32cm である。(2)フロックを破壊することなく、沈降筒を静かに上下に転倒し、フロックを全沈降水深にわたって一様に分布させる。

(3)沈降筒を静置し、5時間にわたって所定時間間隔ごとに懸濁液を 20cc 採水する。(4)得られた資料の濁度を測定する。

3. 実験結果

3-1 はく離量の定量的評価法

ろ過初期においては原水中の懸濁粒子が静電的クローン力、あるいはファン・デア・ワールス力などによって砂層表面に付着し、ろ過が進行するにつれて砂層表面に抑留された粒子にさらに粒子が付着する形で濁質が抑留される。一方、抑留が進行するにつれて砂層内の空隙率が減少し、空隙を通過する際の流速が増大し抑留

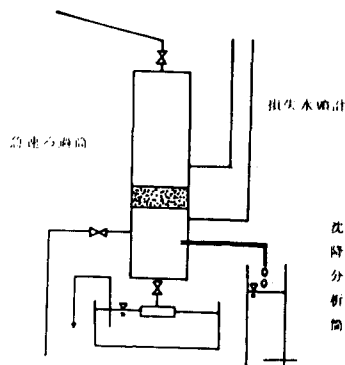


図-1 実験装置

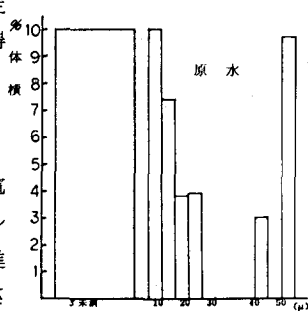


図-2a

粒度分布

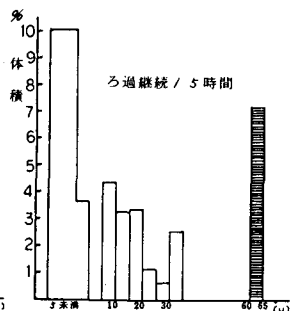


図-2b

粒度分布

濁質に対するセン断力が大きくなる。水流セン断力が抑留濁質粒子間の結合力を上まわる場合には抑留濁質ははく離し過水中に流出する。このような形ではく離流出してくる粒子としては原水中に存在する粒子と同程度の大きさを有するものと、それ以上の大きさを有するものが考えられる。大径のはく離粒子については原水とろ過水中の懸濁粒子の粒度分布の相異を求めることによって定量的に評価し得る。そこで、筆者らは大径のはく離粒子に着目し、その定量的評価を試みることにした。

懸濁粒子の粒土分布の測定法には種々のものがあるが、ここでは比較的簡単な沈降分析法と顕微鏡撮影法をとりあげ比較検討した。

図-2 a, b はそれぞれ顕微鏡写真撮影によって求めた原水とろ過継続 / 5 時間のろ過水の懸濁粒子の粒度分布である。この図から明らかなようにろ過水中には原水中に存在しない大径の $60 \sim 65 \mu$ の粒子が存在し、はく離が生じていることが認められる。しかしながら、図-2 a においては $25 \mu \sim 40 \mu$ 、 $45 \sim 50 \mu$ の粒子、図-2 b においては $35 \sim 60 \mu$ の粒子が欠けており、顕微鏡写真撮影では連続的な粒度分布が得られていない。また、粒径 10μ 以下の粒子が極めて多数存在するため、その個数を正確に測定することは困難である。そのため顕微鏡写真撮影による粒度分布と沈降分析による粒度分布とは一致せず、異なった結果が得られた。これに対して、沈降分析によって得られる粒度分布は図-4 a ~ h に示されるように連続的な分布を示し、微小粒径の存在割合も比較的正确に求めることが可能である。したがって微小粒子を多数含む懸濁粒子の粒度分布の測定法としては、沈降分析による方が顕微鏡写真撮影法よりも精度が良いものと考えられる。

沈降分析によって粒度分布を求める際に留意しなければならない点は、沈降過程における集かい現象によって懸濁粒子の粒度分布が変化するか、いなかである。このことを確認するために分散剤として陰イオン界面活性剤ABS を添加した懸濁液について沈降分析を行ない ABS 無添加の場合と比較した。

図-3 は原水に対して陰イオン界面活性剤 0, 3, 6, 9ppm を添加した場合の濁度-時間曲線を示したものである。濁度-時間曲線がいずれの場合もほぼ同一の曲線で表わされることから、沈降過

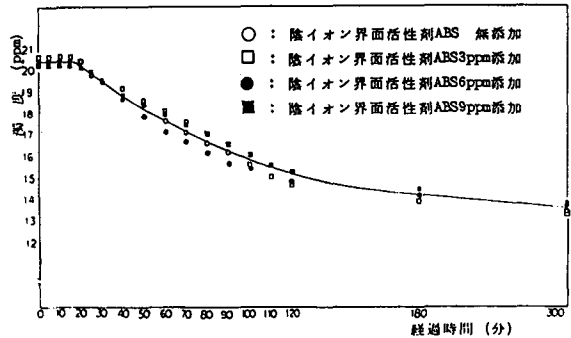


図-3 原水の濁度時間曲線

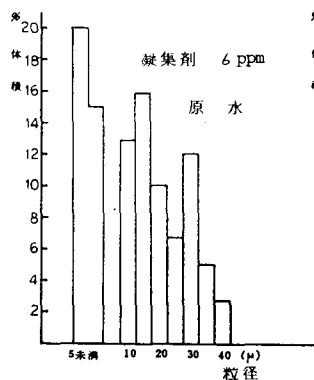


図-4 a 粒度分布

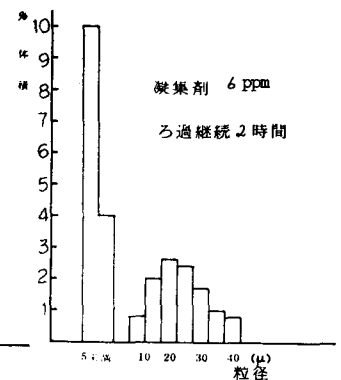


図-4 b 粒度分布

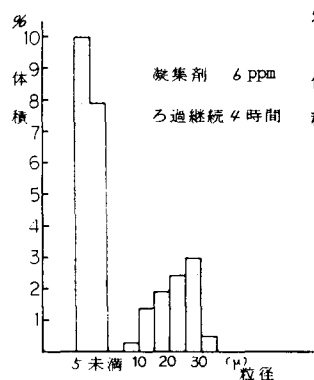


図-4 c 粒度分布

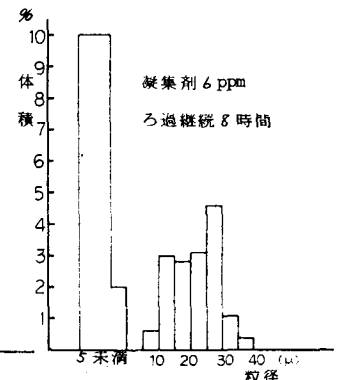


図-4 d 粒度分布

程中における懸濁粒子の集かい現象は無視し得るものと考えられる。

したがって、原水と各ろ過継続時間におけるろ過水について沈降分析を行ない得られた濁度－時間曲線から沈降速度分布を求め、さらに適当な沈降速度式を用いて粒度分布を求め、原水とろ過水の粒度分布を比較すれば各ろ過継続時間における大径のはく離粒子量を知ることができる。ろ過速度120m/日、砂層厚52cm、砂層空隙率42%であり、本実験における懸濁粒子の砂層内平均滞留時間は概略18秒程度できわめて短かく、かくはん強度も小さいことと

上記のろ過初期において40 μ 以上の粒子がろ過水中に存在しないことを考え合わせると、フロキュレーションの影響は無視し得るものと推察される。ただし、ろ過継続中に砂層内においてフロキュレーション

が生じている場合には、フロキュレーションによる粒度組成の変化を求めて補正しなければならない。この点に関しては後述する。

本実験における懸濁粒子のフロックについてはストークスの沈降速度式が適用できる。

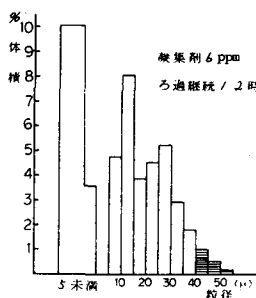
$$w = \frac{g}{18} \left(\frac{\rho - \rho_w}{\mu} \right) d^2 \quad \dots \dots (1)$$

ここで、w：沈降速度、d：フロックの直径、 ρ ：フロックの密度、 ρ_w ：水の密度、 μ ：粘性係数、g：重力加速度である。沈降速度を求める際にはフロックの粒径と密度との関係を表わす密度関数を考慮する必要がある。密度関数としては丹保ら³⁾によるもの、Gemmelによるものなどがあるが、ここでは便宜的に Gemmel による次の密度関数を用いた。

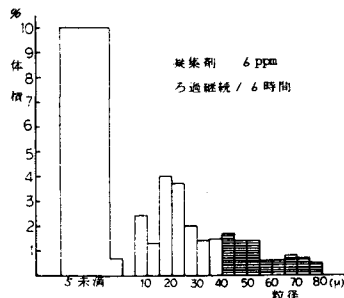
$$\rho - \rho_w = (\rho_0 - \rho_w) (d/d_0)^{-0.676} \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 ρ_0 ：フロックを構成する原粒子の密度、 d_0 ：原粒子の直径である。本実験における原粒子の平均径は3.56 μ であり、原粒子の密度としては2.65/cm³を用いた。

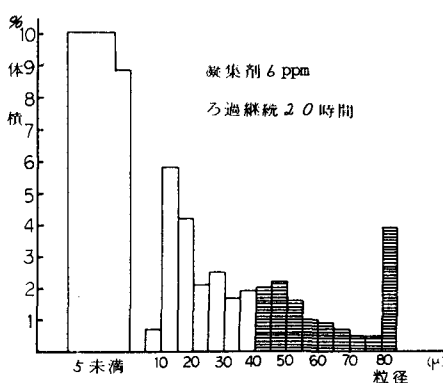
図－4 のは濁度－時間曲線から求めた沈降速度分布と式(1)、(2)を用いて得られた原水の粒度分布を体積割合で示したものである。同様に図－4 b～h はそれぞれ凝集剤注入率6ppm、ろ過速度120m/日の場合のろ過継続時間2、4、8、12、16、20、24時間におけるろ過水の粒度分布を示したものである。ただし、縦軸の体積割合は原水中の懸濁粒子の総体積を100として、それに対するパーセント



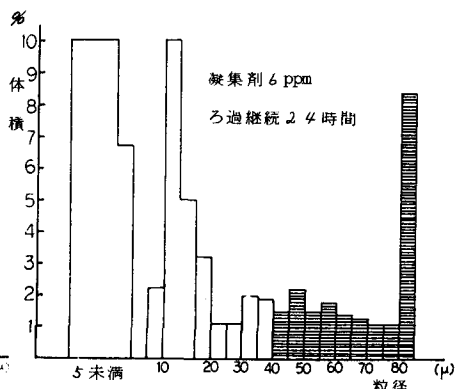
図－4e 粒度分布



図－4f



図－4g 粒度分布



図－4h 粒度分布

で表わしたものである。本実験における供試原水中には、 5μ 未満の粒子は34.9%、 $5\sim 10\mu$ の粒子は12.9%、 $10\sim 40\mu$ の粒子は50.2%で、 40μ 以上の粒子は存在しない。なお、粒度分布を重量割合で示すと、 5μ 未満の粒子は46.3%、 $5\sim 10\mu$ の粒子は17.0%、 $10\sim 40\mu$ の粒子は36.7%である。図-4 b~d のろ過継続時間8時間までのろ過水中には 40μ 以上の粒子は存在せず、また、各粒径の存在割合は原水のそれよりも低い。ろ過継続時間8時間以上では図-4 e~h に見られるように原水中に存在しない 40μ 以上の粒子がろ過水中に出現し、ろ過継続時間にもない 40μ 以上の粒子の存在割合が増大するとともにより大きな粒子が出現してくる。ろ過継続時間12、16、20、24時間における 40μ 以上の粒子の存在割合を図-4の結果から求めると、それぞれ1.7、7.8、13.2、20.3%となる。すなわち、抑留濁質のはく離量はろ過継続時間とともに増大する。

図-4 b~h の 40μ 以下の粒子について見ると、ろ過水中の $5\sim 40\mu$ の粒子の存在割合はいずれも原水中のそれよりも小さい。この差はすべて砂層に抑留された懸濁粒子量を表わすものか、あるいは抑留濁質が水流のせん断力によってはく離する際に 40μ 以上の大径の粒子群と、原水中に存在する粒子と同程度の粒径を持つ微小粒子群とに破壊される場合には、真の抑留量からはく離流出量を差し引いたものであるかのいずれかである。別の実験において 40μ 以下の粒子であってもろ過水中における存在割合が原水中のそれを上まわる結果を得ている。したがって、原水中にもともと存在する微小粒子に関しては、沈降分析による粒度分布の結果のみからはく離流出量を求めることはできない。しかしながら、原水中に存在する粒子に関しては原水とろ過水中の存在量の差、すなわち、見かけの抑留量を用い大径の粒子をはく離量として、はく離現象を加味して濁質抑留現象を定式化し、急速ろ過における濁質抑留にもなり阻止率の変化及び損失水頭の変化を評価することによって、ろ過のメカニズムをより一層、明確にし得るものと考えられる。

3-2 はく離現象に及ぼす凝集剤注入率の影響について

図-5 はろ過速度120m/日、砂層厚5.2cmにおいて凝集剤注入率を3、6、9、12ppmと変化した場合のろ過継続時間ともなりろ過水濁度の経時変化を原水濁度に対するろ過水濁度の比 C/C_0 をとって示したものである。ろ過水濁度はろ過継続時間とともに小さくなり、2~4時間付近で最低値を示し、その後はろ過継続時間とともにしだいに増大する。図-5の結果から各ろ過継続時間における抑留濁質量を求めて、その経時変化を示すと図-6のようである。この場合の抑留量は真の抑留量から全のはく離量を引いた見かけの抑留量である。抑留量はろ過継続時間とともに上に凸の曲線状に増加し、凝集剤注入率が大きくなるほど小さい。図-7 はろ過継続時間24時間までに砂層内に抑留された総抑留量を凝集剤注入率に対してプロットしたものである。凝集剤注入率が大きくなるにつれて総抑留量は減少し、丹保らの結果⁴⁾と同様の傾向を示している。これは凝集剤注入率の増大とともにろ過水中に流出する原水中の濁

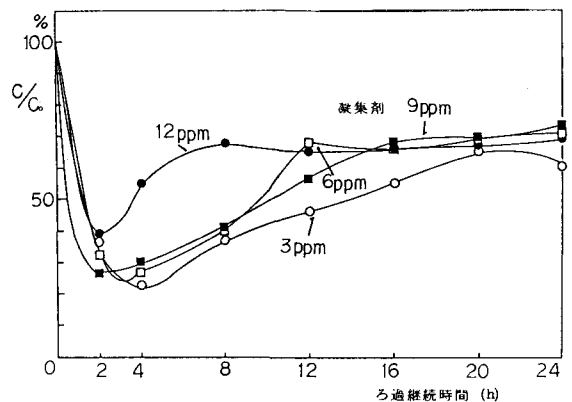


図-5 ろ過水濁度の経時変化

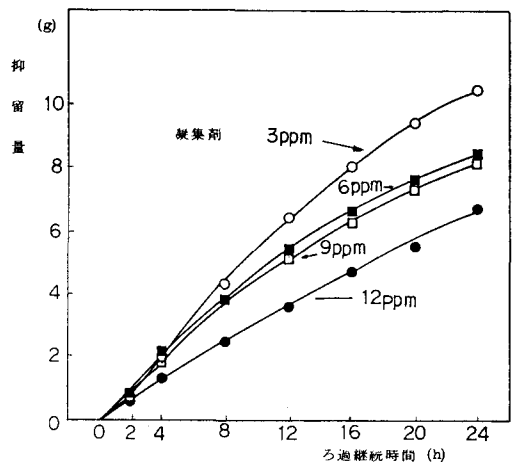


図-6 各凝集剤注入率におけるろ過継続と抑留量の関係

質成分が増加することに加えて後述するようににはく離流出量が增大することによるものである。凝集剤注入率が高くなるにつれて、結合力の弱い高含水率のより大きなフロックが生成されることが知られている。したがって、高注入率の場合には水流のせん断力によってはく離しやすいフロックが生成される。図-8 a ~ d は凝集剤注入率 3、6、9、12ppm における原水の粒度分布を示したものである。本実験の場合も注入率の増大とともにより大きなフロックが生成されており、図-7の結果を裏づけている。

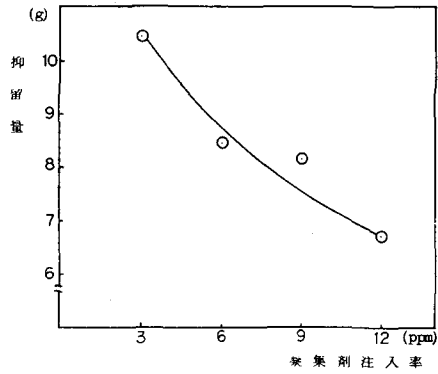


図-7 各凝集剤注入率に対する総抑留量

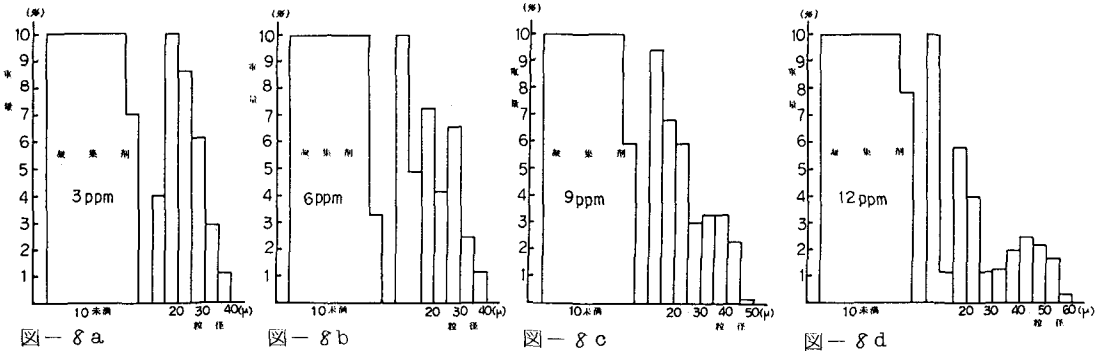


図-8 a 図-8 b 図-8 c 図-8 d
原水の粒度分布

図-9 は各凝集剤注入率について測定したろ過水の濁度-時間曲線と式(1)、(2)を用いて図-4 b ~ h の粒度分布を求めたと同様の手順によって各々の場合の粒度分布を求め、各凝集剤注入率における原水の粒度分布と比較して得られたはく離量をろ過継続時間に対してプロットしたものである。あるろ過継続にいたるまでは抑留濁質のはく離は生じないが、さらに、ろ過を継続するとはく離が生じ、ろ過継続時間とともにはく離流出量は急激に増大し上に凸の曲線を示す。図-10 は凝集剤注入率とはく離が開始されるろ過継続時間との関係を示したものである。凝集剤注入率の増加とともにはく離開始時間

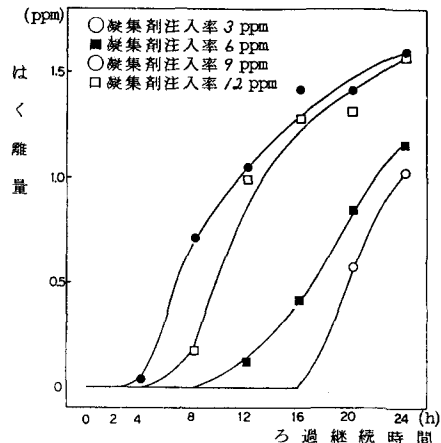


図-9 各凝集剤注入率のろ過継続時間
にともなうはく離量

時間は早くなり、注入率 3ppm で 16 時間、6ppm で 8 時間、9ppm で 4 時間、12ppm で 2 時間である。図-10 の結果は図-7 の結果と同様の傾向を示している。図-11 は各凝集剤注入率におけるはく離流出量を濁質抑留の関係を示したものである。また、図-12 は凝集剤注入率とはく離現象が開始される時点における濁質抑留量との関係を示したものである。図-11、12 はそれぞれ図-9、10 と同じ結果を示している。すなわち、凝集剤注入率が增大するにつれて結合力の弱いフロックが生成されるため、抑留濁質量が小さく水流のせん断力が小さい状態においてははく離が生じるようになる。

図-11 の結果からはく離流出量と濁質抑留量との関係は次のように与えられる。

$$\Psi = a(\sigma - \sigma_0)^n \quad \dots (3)$$

ここで、 Ψ ：はく離流出量、 σ ：濁質抑留量
 σ_0 ：はく離開始時点の濁質抑留量、 a 、 n ：
 係数である。 σ_0 、 a 、 n は凝集剤注入率などの
 凝集条件やろ過操作因子の関数である。種
 々の操作条件下における σ_0 、 a 、 n を求める
 ことによってはく離現象を定量的に評価する
 ことができ、従来はく離現象を考慮せずに求
 められてきた阻止率の内容をさらに明確にす
 ることができよう。

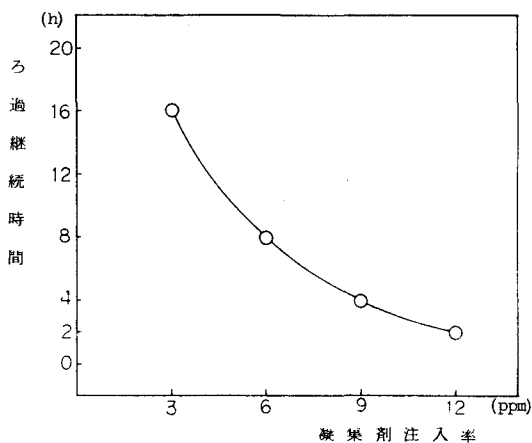


図-10 各凝集剤におけるはく離開始時間

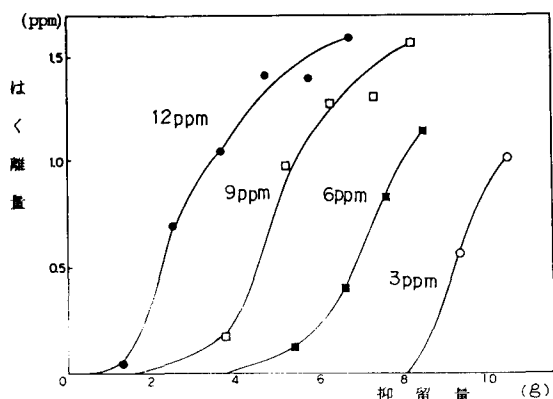


図-11 各凝集剤における抑留量とはく離量の関係

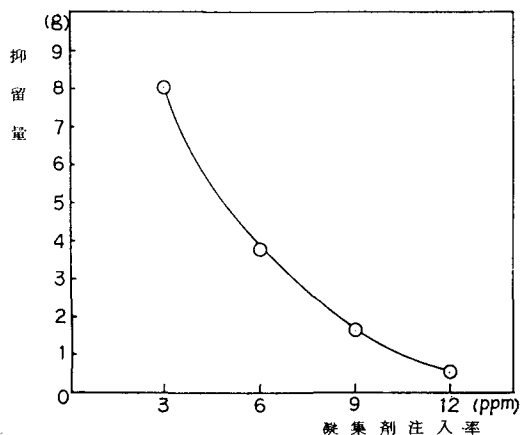


図-12 各凝集剤のはく離開始時における抑留量

4. あとがき

急速ろ過におけるはく離現象に関して検討を加え、沈降分析による粒度分布の測定によってはく離流出量を定量的に評価し得ることを示し、はく離現象に及ぼす凝集剤注入率の影響について若干の検討を加えた。今後、さらに、実験を重ねるとともにろ過速度、砂粒径の影響についても検討を加え、 σ_0 、 a 、 n とこれら因子との関係を明らかにすることとしたい。

最後に、本研究を行なうにあたり昭和55年度卒業生後藤敏寛（現佐藤工業）、松橋良和（現北海道開発コンサルタント）、56年度卒業生村上隆一（現日本高圧コンクリート）諸氏の協力を得たことを付記し、感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 佐藤：急速ろ過におけるろ過機構に関する研究(1),(2) 水道協会雑誌第427号,第430号
- 2) 海老江：急速ろ過層における抑留物質の挙動(3) 水道協会雑誌第507号
- 3) 丹保,渡辺：アルミニウムフロックの密度に関する研究(1)(2)(3)水道協会雑誌第397号,第410号,第445号
- 4) 丹保,小笠原,森峰,広田：砂ろ過の抑留機序に関する研究(2) 水道協会雑誌第484号