

II-16 急速ろ過における抑留濁質のはく離現象に関する研究(2)

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、種々の因子が関与する複雑な現象であるため未だ十分な解明がなされておらず、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は種々様々である。特に、濁質抑留を論ずるに当って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、未だ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いる段階に留まっており、ろ過方程式を求めるに当ってほとんど考慮されていない。これは、はく離量を定量的に求める方法が確立されていないこともあって、はく離現象に関する研究が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実験に頼らざるを得なかったことによる¹⁾。

前報において、筆者らは沈降分析を行なってる過水中の懸濁粒子の沈降速度分布を求めることによって抑留濁質の砂層からはく離量を半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量の影響について示した。本研究では、急速ろ過において重要な操作因子の一つであるろ過速度を採り上げ、はく離現象に及ぼすその影響について検討を加えることとした。

2. 実験装置及び方法

実験は図-1 に示すような内径 10cm のアクリル製円筒に粒径 0.70~0.85mm 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 9 ppm 添加し、pH 6.9~7.1 に調整したものをを用いた。ろ過速度は120、240、360 m/日 の3段階に変化させた。実験の手順は次のようである。(1)混和槽から沈降分析筒に供試原水を採水し、沈降分析を行う。(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分析筒に採水し、沈降分析を行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から 3cm の位置に採水コックを付した沈降筒を用い、次の手順に従って行なった。(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与えないようにろ過水を1時間に渡って沈降筒に採水する。(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、3時間に渡って所定時間々隔ごとに 20cc 採水する。(4)得られた試料の濁度を測定する。

沈降分析によって得られた結果を図-2 に模式的に示ような濁度時間曲線として表わし、懸濁粒子の沈降速度分布を求め、さらに、これを次の Stokes の沈降速度分布式と Gemmel の密度関数を用いて粒度分布に変換する。なお、密度関数としてはこの他にもあるが本実験では上式を用いることにした。

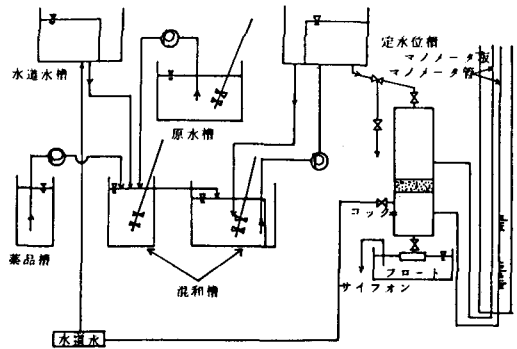


図-1 実験装置

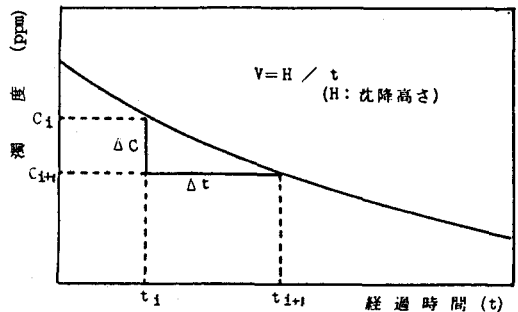


図-2 濁度時間曲線

$$W = \frac{g}{18\mu}(\rho - \rho_w)d^2 \dots \dots \dots (1)$$

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

ここで、W：沈降速度、 d、 ρ ：それぞれフロックの直径と密度、 d_0 、 ρ_0 ：それぞれフロックを構成する原粒子の直径と密度で、本実験においては $d_0=3.6\mu$ 及び $\rho_0=2.65g/cm^3$ である。このようにして求めた供試原水とろ過水中のフロックの粒度分布の相違からはく離量を求める。

3. 実験結果と考察

図-3 はろ過速度を 120、240、360 m/日 に変化させた場合のろ過継続時間に伴うろ過水濁度の変化を原水濁度 C_0 に対するろ過水濁度 C の比 C/C_0 をとって示したものである。同様に図-4 は各ろ過速度における損失水頭の経時変化を示したものである。ろ過水濁度はろ過継続時間とともに小さくなり、2～4 時間付近で最小の値を示し、その後はろ過継続時間とともにしだいに大きくなってゆく。この場合、ろ過速度の大きいほど砂層の濁質抑止能力が小さくなり、ろ過水濁度はろ過速度の小さい場合に比して大きく、また、ろ過水濁度の最小値の発現時間も早くなる。ろ過水中の濁度成分は、原水中の濁度成分のうちろ層を構成する砂粒子表面に捕捉されることなくそのまま流出してくるものと、後述するよう

にいったん砂粒子表面に捕捉された濁度成分のうち水流のせん断力によってはく離流出してくるものの2つからなる。図-3 の各破線は、沈降分析を行なって求めた原水とろ過水の粒度分布から求めたはく離量をろ過水濁度から差引いた濁度、すなわち砂層に抑留されることなく流出してきた原水中の濁質成分による濁度を示したものである。参考のため、ろ過水の濁度成分中のはく離成分の占める割合を、ろ過継続時間24 時間の場合を例にとって示すと、ろ過速度 120m/日 で 5.4%、240m/日 で 7.6%、360m/日 で 8.0% 程度である。各ろ過速度における損失水頭は図-4 に示されるようにろ過継続時間とともにほぼ直線的に増加してゆく。また、ろ過速度の大きいほど損失水頭が大きくなる当然の結果を示しているが、ろ過継続期間中に損失水頭が突然急激に変化する現象はみられない。これは損失水頭に急激な変化を与えるような砂層間隙率の変化が生じていないことを示すものである。言い換えると、ろ過継続期間中にそのような砂層間隙率の変化を引き起すような大規模なはく離現象が生じていないことを示すもので、後述の沈降分析による結果が妥当であることを裏付けている。したがってろ過の進行とともに抑留濁質量がしだいに大きくなるにつれて、砂層間隙率が小さくなり、間隙水路の実流速が大きくなり、損失水頭が増加してゆくとともに水流のせん断力が大きくなり、砂粒子表面に抑留された濁質粒子間の結合力が水流のせん断力よりも弱い部分ではく離が生じ、抑留濁質の一部がろ過水中に流出してゆくものと考えられる。

図-3 の結果から各ろ過継続時間における抑留

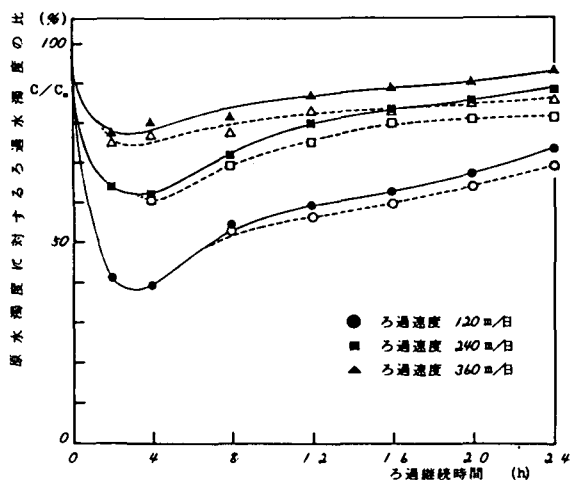


図-3 ろ過水濁度の経時変化

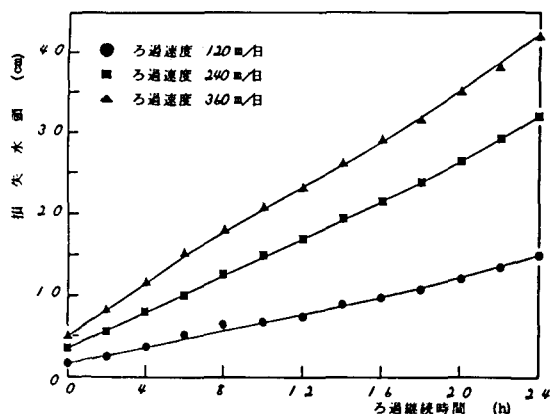


図-4 損失水頭の経時変化

濁質量を求め、その累加量とろ過継続時間の関係を示すと図-5 のようである。なお、任意のろ過継続時間までの累加抑留濁質量は次式によって求めた。

$$\sigma = Q C_0 A_t \dots\dots (3)$$

ここで、 σ :ろ過継続時間 t における累加抑留濁質量、 Q :ろ過流量、 C_0 :原水濁度、 A_t :図-3 において $C/C_0=1$ の直線とろ過水濁度の経時変化曲線及びろ過継続時間 $t=0$ と $t=t$ の縦座標で囲まれた面積である。図-5 の実線は図-3 の各ろ過速度における実線から求めた抑留量つまり真の抑留量からその時点までの全はく離量を差し引いた見かけの抑留量の累加曲線である。この場合の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、ろ過速度 120m/日のとき最も小さく、ろ過速度 240m/日のとき最も大きくなり、ろ過速度が 360m/日になると再び小さくなっている。これに対して、図-5 の破線は図-3 の破線から求めた抑留量すなわち離量を考慮して補正した真の抑留量の経時変化を示したものであるが、この場合の抑留量はろ過速度の増大とともに大きくなり、ろ過速度との間に一定の関係を示し、妥当な結果を表わしている。なお、図-5 の破線の抑留量とろ過速度の関係はろ過速度の増大とともに砂層の濁質抑止能力が大きくなることを意味するものではない。これは、ろ過速度が 120m/日から 240、360m/日と大きくなるにつれて砂層内に流入してくる濁質量もそれに比例して2倍、3倍になることによるものである。図-5 の抑留量をその時点までに砂層内に流入してきた全流入濁質量で除してその比を求め

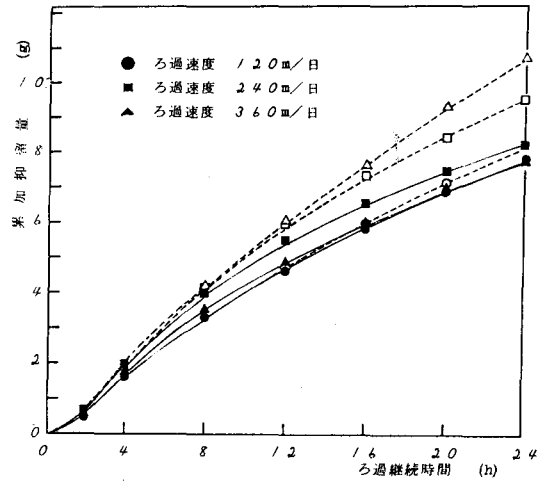


図-5 累加抑留量の経時変化

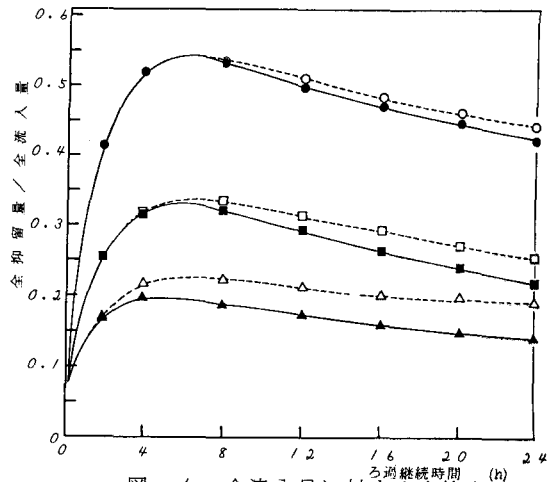


図-6 全流入量に対する全抑留量の経時変化

ろ過継続時間に対してプロットすると図-6 のようである。全流入濁質量に対する全抑留濁質量の比はろ過速度の大きいほど小さく、砂層の濁質抑止能力は当然のことながらろ過速度が大きくなるにつれて小さくなる。図-7,8 はそれぞれろ過継続時24時までには砂層内に抑留された全抑留濁質量及び全流入濁質量に対する全抑留濁質量の比をろ過速度に対してプロットしたものである。はく離を考慮して補正した全抑留量はろ過速度 120m/日で 8.26g、240m/日で 9.68g、360m/日で 10.87g 程度であり、全流入濁質量に対するその割合はろ過速度 120m/日で 44.0%、240m/日で 25.8%、360m/日で 19.3%程度で、ろ過速度によってかなりの相違を示している。

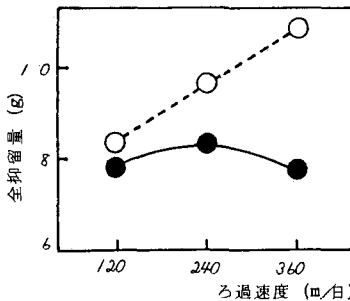


図-7 各ろ過速度の全抑留量

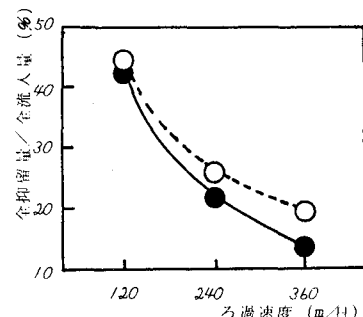


図-8 各ろ過速度の全流入量に対する全抑留量の割合

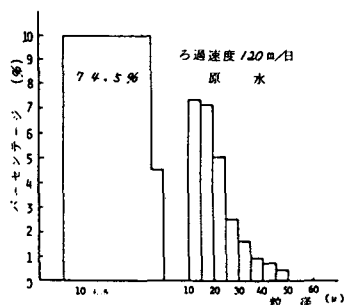


図-9

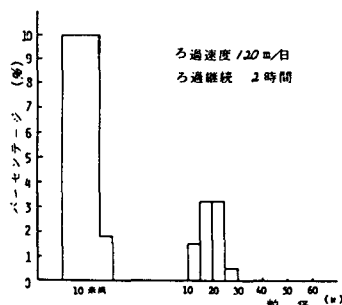


図-10-a

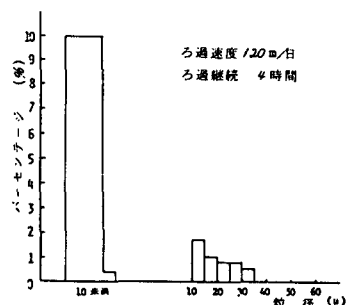


図-10-b

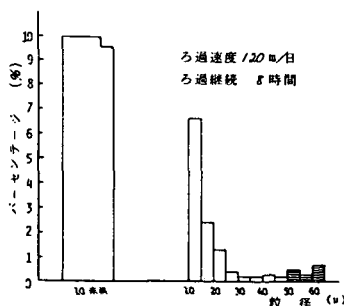


図-10-c

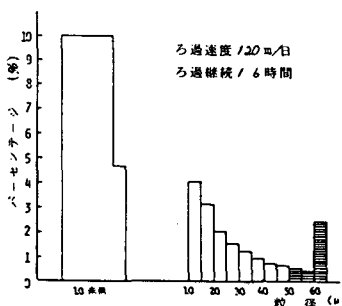


図-10-d

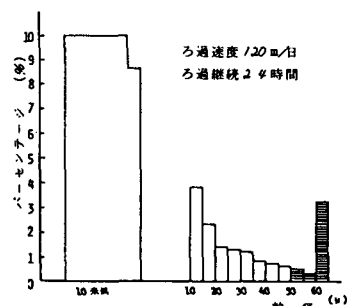


図-10-e

ろ過継続に伴うろ過水の粒度分布

次に、ろ過継続時間に伴うろ過水中の懸濁粒子の粒度分布の変化をろ過速度 120m/日の場合を例にとって示す。図-9 は沈降分析によって得られた濁度時間曲線から求めた沈降速度分布と式-(1)、(2)を用いて求めた供試原水中の懸濁粒子の粒度分布を示したものである。図-10のa~eは同様にして求めたろ過継続時間 2、4、8、16、24時間におけるろ過水中の懸濁粒子の粒度分布を示したものである。本実験における供試原水中には、10 μ未満の粒子は 74.5%、10~20 μの粒子は14.4%、20~30 μの粒子は 7.5%、30~50 μの粒子は 5.6%で、10 μ以上の粒子は合計 27.5% 程度で、50 μ以上の粒子は存在しない。10 μ以上の粒子と10 μ以下の粒子の2群に大別し、原水中のそれぞれの粒径の存在量を 100%として、ろ過継続時間に伴う粒度組成の変化を示すと図-11のようである。10 μ以下の粒子ではろ過の進行とともに砂層内に抑留される割合が大きくなり、ろ過継続時間 4時間で 59% が抑留され、その後抑留割合はしだいに減じ、ろ過継続時間 8時間で 47%、16時間で 40%、24時間で 21% 程度となる。10 μ以上の粒子の場合も初期においてはほぼ同様の傾向を示すが、その抑留割合は大きく、ろ過継続時間 2時間で 70%、4時間で 83% 程度抑留され、また、ろ過継続時間 8~24時間ではばらつきはあるが 59~56% 程度が抑留さ

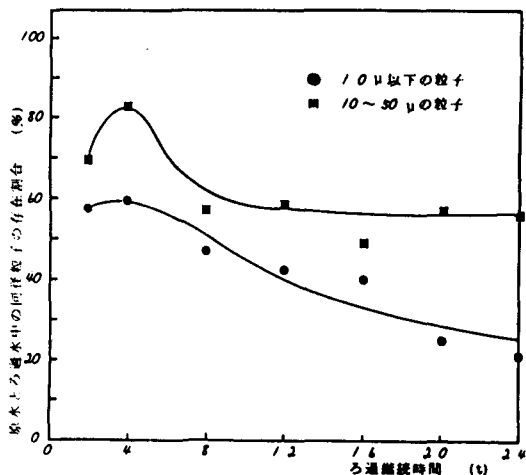


図-11 ろ過継続に伴うろ過水中の同径粒子存在割合の変化

れ、小粒径のものに対して高い抑留割合を示している。また、ろ過の初期においては抑留濁質のはく離は生じていないが、ろ過継続時間 8 時間前後で原水中に存在しない大粒径の粒子が出現し、はく離が生じていることを示している。さらに、ろ過が進行するろ過水中の大粒径の粒子の存在量が増加し、はく離量がしだいに増加してゆく。他のろ過速度の場合もほぼ同様の結果が得られているが、ろ過速度の大きいほどはく離量が大きく、また、はく離現象の発現する時間が早くなる。これについては後述する。前報⁴⁾において、凝集剤注入率が高く原水中により大きな粒子が存在するほど、はく離量が增大することを示した。したがって、大粒径の粒子ほど抑留され易く、かつ、はく離し易いものと考えられる。

図-12は各ろ過速度について図-10に示すような粒度分布を求め、原水中に存在しない 50 以上の粒子の濁質成分をはく離量としてその累加量をろ過継続時間に対してプロットしたものである。図-12の横軸をその時点までに抑留された濁質量に置き換え、はく離量と抑留量の関係を探めると図-13のようである。はく離量はろ過継続時間あるいは抑留量の増大とともに凹の曲線状に増加してゆく。ここで、はく離量と抑留量の関数関係について検討してみる。図-13の結果からはく離量と抑留量の関係は式-(4)のように与えられるものと考えられる。

$$\psi = a(\sigma - \sigma_0)^n \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ψ : はく離量、 σ : 濁質抑留量、 σ_0 : はく離開始時点の濁質抑留量、 a, n : ろ過速度、砂粒径などのろ過操作因子及び凝集剤注入率などの凝集条件によって異なる係数である。なお、ここで抑留量としては図-5 の実線で示されるみかけの抑留量を用いた。これは、はく離に直接影響を及ぼすものはその時点において実際に砂層内に抑留されている濁質量であると考えられることによる。式-(4)中の係数 a と n を決定するためにはあらかじめ σ_0 を知らなければならない。実測結果から正確な σ_0 の値を得ることはできないので、次のような便法によって σ_0 を求めた。式-(4)を変形すると

$$\sigma - \sigma_0 = \left(\frac{\psi}{a}\right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (4')$$

となるので、 $\psi_1 \psi_3 = \psi_2^2$ なる 3 点をとって a, n を消去すると次式が得られる。

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 \sigma_3 - \sigma_2^2}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2} \dots\dots\dots (5)$$

そこで、実測結果から任意の 2 点 ψ_1, ψ_2 を選び、上記の関係を満足する ψ_2 に対応する σ_2 を図-13から求めて式-(5)に代入して σ_0 を計算する。得られた σ_0 を実測結果と照合し、 σ_0 の値が妥当でない場合は別の 2 点 ψ_1, ψ_3 を選び、妥当な σ_0 の値が得られるまで試行錯誤を繰返す。このようにして各ろ過速度における σ_0 の値が得られたならば、次に、式-(4)の両辺の対数をとって直線表示した式-(4'')に対して最小二乗法を適用して各ろ過速度における係数 a 及び n を決定する。

$$\log \psi = \log a + n \log (\sigma - \sigma_0) \dots\dots\dots (4'')$$

以上のようにして求めた各ろ過速度におけるはく離量と抑留量の関係を示すと式-(6)~(8)に示すようである。

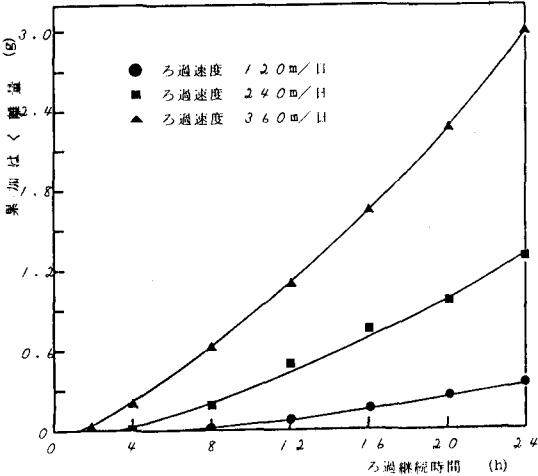


図-12 累加はく離量の経時変化

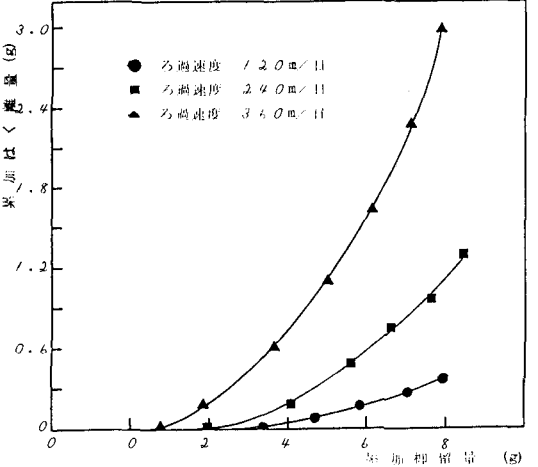


図-13 累加抑留量と累加はく離量の関係

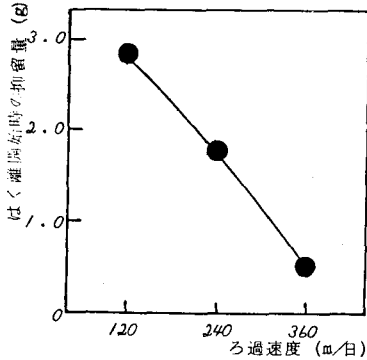


図-14 各ろ過速度におけるはく離開始時の抑留量

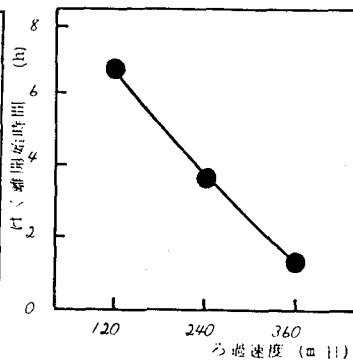


図-15 各ろ過速度のはく離開始時間

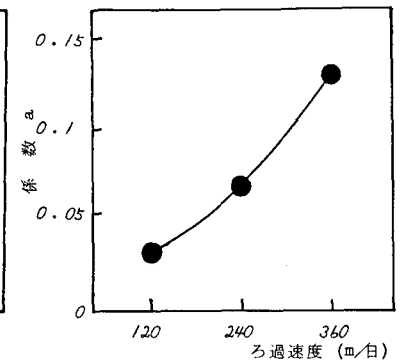


図-16 各ろ過速度の係数a

$$\text{ろ過速度 } 120\text{m/日} : \psi = 0.031(\sigma - 2.85)^{1.5} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{ろ過速度 } 240\text{m/日} : \psi = 0.066(\sigma - 1.77)^{1.5} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{ろ過速度 } 360\text{m/日} : \psi = 0.131(\sigma - 0.51)^{1.5} \dots\dots\dots (8)$$

図-14ははく離開始時点における抑留量 σ_0 とろ過速度の関係を示したものである。 σ_0 の値はろ過速度の増大とともにほぼ直線的に減少している。ただし、図-14の結果を直線として外挿すると、ろ過速度420 m/日付近で $\sigma_0=0$ となり、それ以後は $\sigma_0<0$ となるので、ろ過速度の増大とともに $\sigma_0=0$ の横軸に漸近してゆく曲線とみなすのが妥当であると考えられる。図-14をはく離現象の発現時間とろ過速度の関係にプロットしなおすと図-15のようである。はく離開始時間はろ過速度120m/日でおおよそ6.5時間で、240m/日で3.5時間、360m/日で1.5時間程度で、はく離開始時間はろ過速度の増大とともに急激に早くなり、横軸に漸近する。図-16は式-(4)の係数aとろ過速度の関係を示したものである。係数aはろ過速度の増大とともに上に凸の曲線状に大きくなり、概略ろ過速度の1.1~1.3乗に比例する。これに対して、式-(4)の係数nの推定値はろ過速度120m/日では1.49、240m/日では1.52、360m/日では1.50で、ろ過速度によってはほとんど変化しない。したがって、nの値は一定とみなしてよく、はく離量は抑留量 $(\sigma - \sigma_0)$ の $3/2$ 乗に比例し、はく離量に及ぼすろ過速度の影響は係数a及びはく離開始時点の抑留量 σ_0 の変化として表わされるものと考えられる。

4. あとがき

沈降分析によるろ過水の粒度分布の測定によって抑留濁質のはく離量を求め、急速ろ過におけるはく離現象に及ぼすろ過速度の影響について若干の検討を加え、はく離量と抑留量の関数関係を求め、 σ_0 、a、nのろ過速度による変化について示した。前報において、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が、抑留量の増加に伴うはく離量の変化傾向が本実験とは若干異なっており、再度凝集剤注入率の影響について検討を加えるとともに、はく離現象に及ぼす砂粒子の影響について検討を加えることとした。

最後に本研究を行なうにあたり室蘭工業大学土木工学科学生大工信也、原敬治両君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. 例えば、Mintz、D.M. : Modern Theory of Filtration、International Water Supply Congress and Exhibition、No.10、Barcelona (1966)
2. " 海老江：急速ろ過における抑留物質の挙動(Ⅱ)、水道協会誌、498号、1976.3
3. " 海老江：急速ろ過における抑留物質の挙動(Ⅲ)、水道協会誌、507号、1976.12
4. 穂積、橋本：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(Ⅰ)、土木学会北海道支部論文報告集 39号 1983.2
5. Jagvankar、A.L.and Gemmel、R.S. : A Size-Density Relationship for Flocs、J.A.W.W.A、vol.60、No.9 1968.9