

高懸濁水濾過時の浮上性濾層の濾過特性に関する研究

毛利 光 男
(技術研究所)

丹 羽 千 明
(技術研究所)

§ 1. はじめに

建設省のバイオフォーカスWTプロジェクト¹⁾の一環として、高懸濁水(下水)の高効率な一次処理用固液分離法の研究を行なった²⁾。下水という非常に広範囲な粒径分布を有する高懸濁水を従来の砂濾過法で濾過すると流入部の濾層は、粒径の大きな濁質により急速に閉塞する。このため、高懸濁水の濾過を行なう場合は濾層表面の閉塞防止のため、濾材や原水供給法に対する大幅な改善が必要となる。そこで、濾層流入部の閉塞防止と、内部濾過の促進によるSS捕捉量の増加を同時に図ることができる新しい濾過法を開発することを目的とした³⁾。

研究を行なった新しい濾過法の主な特徴は、次の(1)~(3)である。

(1)従来の濾材より5~10倍程度径が大きい(5.0~5.5mm径)発泡ポリスチレン粒子の浮上性人工濾材を使用する。

(2)濾材の浮上する方向と逆の下向流濾過である。

(3)濾層内に多段に原水供給管を設置し、濾層の目詰まりに応じ、自動的に上方の供給管から下方の供給管へ切り換えていく運転方法を用いる。

ベンチスケールおよびパイロットスケールの実験を通して、この濾過法が高懸濁水の直接濾過に適していることを示す、下記の濁質除去に関する優れた特性が認められた³⁾。

(a)粗濾材のわりに比較的微小な濁質粒子まで除去できる。

(b)濾層内の抑留濁質量に比べて損失水頭の上昇が著しく小さい。

(c)濾層内の抑留量が高くてもSS除去率が低下しない。

(a)~(c)は、高濃度原水に対して高容量濾過を実現する上で非常に重要な特性である。

これらの濾過特性が起きる原因としては、1)広範に検討した中で、5.0~5.5mmの濾材径が対象とする高懸濁水の濁質粒径分布に対して適正であった、2)浮上性濾層

を下向流で濾過を行なうため、濾層が膨張することが可能であった等が考えられる。

本研究は、高懸濁水濾過時の浮上性濾過の上記特性の原因を明らかにするため、ガラス濾材による固定層濾過(従来法の濾過)と同じ条件で比較しながら、濁質の粒子径による除去率の違い、濁質抑留濃度と損失水頭の関係、および濁質抑留濃度と阻止率の関係等の濾過因子について、実験と理論の両面から検討を行なったものである。なお、実験および理論的考察に当たっては、最もよく研究されている上水道の急速濾過法との類似点と相違点を明確にした上で、急速濾過モデルを拡張して考察し、浮上性濾材による濾過特性、濾過機構を明らかにしていくという立場で行なった。

§ 2. 実験装置と実験方法

実験は、茨城県湖北流域下水処理場内のバイオフォーカスヤードにおいて、同処理場流入下水のスクリーン処理水を用いて行なった。

2.1 実験装置の概要

実験装置の概略図を図-1に示す。濾過槽は、断面積0.64㎡(80cm×80cm)、槽高4.5mであり、濾材を3m充填した。濾材は、比重が0.03の代表径5.5mmの発泡ポリスチレン粒子を用いた。濾過槽内で浮上している濾層には、原水供給管が深さ方向に50cm間隔で4段設置されており、各段の濾層内損失水頭が設定値まで上昇すると、下段の原水供給管へ切り換えて濾過が継続できるシステムになっている。しかし、今回の目的は浮上性粗濾材の濾過特性を明らかにすることであるため、本実験期間中は1段目の原水供給管のみを使用し、多段切り換え運転は行なわなかった。

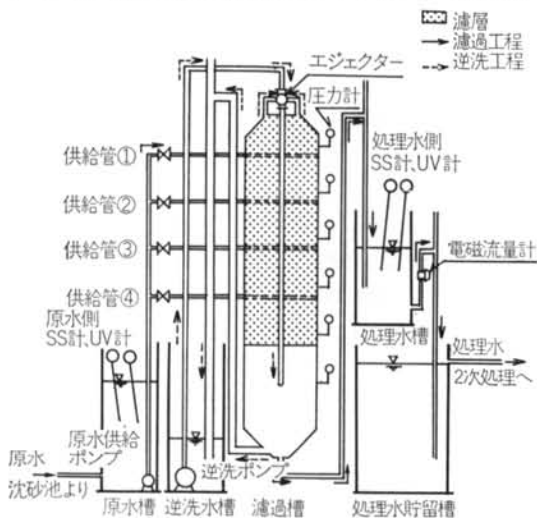
原水は、原水ポンプにより供給管上部の穴から濾層内へ噴出する。原水中の濁質は、濾層内を下向流で流下し

ていく過程で捕捉・除去されていき、濾層下部より濾過処理水が得られる。

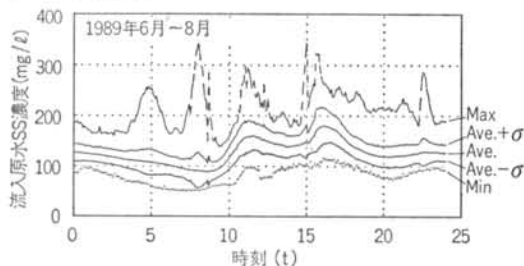
なお、濾層断面の幅80cmと濾材径5.5mmとの比が145と50以上であるので、本実験においては壁面効果の影響は無視して良いと考えられる⁴⁾。

2.2 実験条件と実験方法

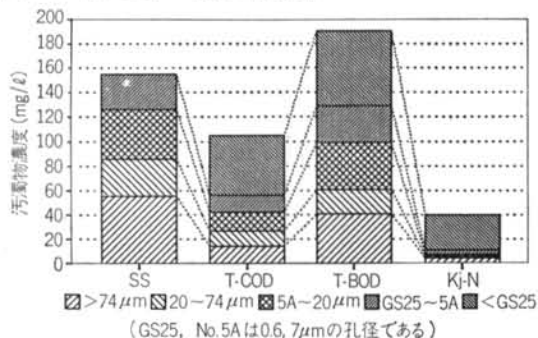
連続的に水質が変動する実下水を使用する本実験において、原水濃度変動の影響を小さくするには実験時間、



図—1 実験装置



図—2 流入原水 SS 濃度の経時変化



図—3 原水中の汚濁物の粒径分布特性

すなわち濾過継続時間を短くする必要がある。濾過速度を大きくすると濾層への濁質負荷も比例して大きくなり濾過継続時間が短くなるため、実験は主に 200 m/d (定速) の濾過速度で行なった。

原水および濾過処理水の SS 濃度の計測は、SS 計 (電気化学計器特製, SSD-10) により行なった。計測指示値の校正は、50個以上の分析値を用いて行なった。下水試験法による分析データと SS 計による計測データの相関性を寄与率(r^2)で表現すると、原水の場合は $r^2=0.90 \sim 0.92$, 処理水の場合は $r^2=0.66 \sim 0.82$ であった。濾過速度は、電磁流量計 (横河電機特製, CYM-10) の流量計測値から求めた。損失水頭の計測は、濾過槽の側壁に設置してある圧力計 (長野計器特製, KH21) とマノメータ管の両方を用いた。SS、濾過速度および損失水頭の自動計測はすべて 5 分毎に行なった。

濾層内の濁質捕捉分布は、濾過槽の側壁に濾層深さ方向に多点に設置してあるサンプル採水口から採取した濾過処理水の SS 値から算出し、損失水頭分布はマノメータ管を用いて調べた。この場合の SS の分析は下水試験法により行ない、損失水頭の変化は目視により測定を行なった。

2.3 流入原水の特性

図—2 に、1989年6月～8月の期間の原水 SS 濃度の各時間の平均値、最大最小値等を示す。これより、1日の間に12時頃と16～17時の2回のピークがあること、11時から17時の間の濃度は高く、平均的に 150mg/l 以上あることが分かる。原水中の SS および有機物の粒径別分布を図—3 に示す。これより、原水 SS の約80%は7μm以上の粒子であること、T-COD、T-BOD、Kj-N は7μm以下の粒子と溶解成分が50%以上を占めていることが分かる。

§ 3. 濁質粒子径と除去率の関係

粒状濾層における濁質粒子の除去特性は、現象論的な取り扱いにより濾過係数の形で定式化されてきたが、濾過係数への種々の因子 (濁質粒子径、濾材粒子径、濾過速度等) の影響については実験的にこれらを求めるのが普通である。しかし、清浄な濾層では粒子の捕集現象が濾材と濁質粒子との関係として取り扱うことができるため、捕集効率 (濾過効率) を粒子の衝突効率から予測することはある程度可能と考えられている⁵⁾。

今回は、幅広い粒径分布 ($10^{-2} \sim 10^3 \mu\text{m}$) を有する下

水を通常の砂濾材 (0.5~1.1mm) に比べてかなり大きい 5.0~5.5mm 径の粗濾材を用いて濾過するため、設定する濾過速度と除去可能な濁質粒子径および必要な濾層厚 (濁質粒子の浸透距離) の関係を十分に把握する必要がある。このため、浮上性粗濾材による濁質粒子の粒径別の除去率について、理論と実験の両面から検討を行なった。

3.1 衝突理論による除去率の予測

3.1.1 理論

粒状層濾過では、液中の微細な濁質粒子は濾材の間隙に抑留される。10⁰~10¹μm のオーダーの粒子が10²~10³ μm にも及ぶ濾材空間に流入し、そこで除去される機構としては、①微粒子の濾材表面への輸送と、②濾材表面への付着の2つの過程が考えられる。

下水中の微粒子は、シルト分のような比重の大きな無機質の粒子から比重の小さな有機質の粒子まで、比重と径および電位が異なる種々な粒子から構成されているため、付着過程は非常に複雑になる。ここでは、付着過程での効率に常に一定であると仮定し、濾層での除去率を濾材粒子と濁質粒子との接触機会のみで考える。

濾材表面へ微細粒子が輸送され、接触・衝突により捕捉される現象を、図-4に示すような流線に沿って流れる粒子が円筒濾材に接触・沈殿および拡散の因子によって捕捉されるという近似的なモデルとして取り扱う。接触(interception)による衝突率 η_I 、沈殿 (gravitational sedimentation) による衝突率 η_G および拡散(diffusion)による衝突率 η_D は、それぞれ次式によって求められる³⁾。

$$\eta_I = \frac{-1}{V_0 a_0} \int_0^{\pi a_0/2} V_{y=ap} dx = \frac{3}{2a_0} \left(\frac{a_p}{a_0} \right)^2 \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot a_0 d\theta = \frac{3}{2} \left(\frac{a_p}{a_0} \right)^2 \quad \dots\dots(1)$$

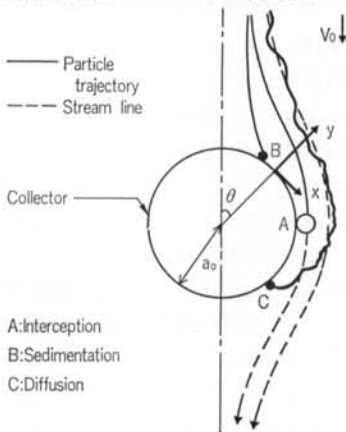


図-4 濁質粒子の濾材への衝突機構³⁾

$$\eta_G = \frac{-1}{V_0 a_0} \int_0^{\pi a_0/2} W_0 \cos \theta dx = \frac{W_0}{V_0} = \frac{2(\rho_p - \rho_0)g a_p^2}{9 \mu V_0} \quad \dots\dots(2)$$

$$\eta_D = 4.04 P_e^{-2/3} = 0.9 \left(\frac{\kappa T}{4 \mu a_p a_0 V_0} \right)^{2/3} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 a_p : 濁質粒子半径、 a_0 : 濾材半径、 ρ_p : 濁質粒子の比重、 ρ_0 : 原水の比重、 g : 重力加速度、 μ : 原水の粘性係数、 T : 絶対温度、 V_0 : 濾過速度、 W_0 : 濁質粒子の沈降速度、 P_e : ペクレ数、 κ : ボルツマン定数

濾材表面での輸送過程による衝突率 η は、接触、沈殿および拡散のそれぞれの効果の和となるため、 η は式(4)で示される。

$$\eta = \eta_I + \eta_G + \eta_D \quad \dots\dots(4)$$

次に、濁質除去率を考える。濁質粒子が濾材粒子1粒からなる層を通過する間に接触・捕捉される確率を η に等しいとすると、濾材粒子 m 段からなる濾層で濁質が捕捉される確率 r_m は $r_m = 1 - (1 - \eta)^m$ である。一方、濾層垂直方向の濾材粒子平均個数 m は式(5)で表わされる⁶⁾。

$$m = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{6(1-\epsilon_0)}}{d_0 \phi_s} \cdot \frac{L}{d_0 \phi_s} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 ϵ_0 : 濾層の初期空隙率、 L : 濾層厚さ
 d_0 : 濾材直径、 ϕ_s : 形状係数
空隙率 ϵ_0 が0.4前後の通常の濾層では $\sqrt{6(1-\epsilon_0)}/\pi \approx 1$ である。

濁質除去率がほぼ濁質除去率に等しいと考えると、濁質除去率 r は式(6)で表現できる。

$$r = 1 - (1 - \eta)^{L/d_0 \phi_s} \quad \dots\dots(6)$$

3.1.2 計算結果

濾材と濁質粒子の衝突率を式(1)~(4)を用いて計算した結果を図-5に示す。これより、濁質粒子径が1μm以下の領域では拡散により衝突すること、1μm以上の領域では通常の砂濾過の場合と異なり、接触より沈殿による衝突が圧倒的に卓越すること等が分かる。すなわち、5.0~5.5mmの浮上性濾層の清浄時の主除去機構は、層内

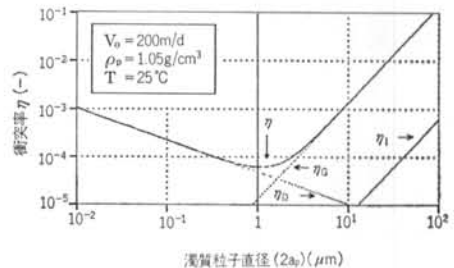


図-5 濾材と濁質粒子の衝突率の推定

の空隙での沈殿であると考えられる。次に、式(6) (濾材を球とし、 $\phi_s=1$)を用いて濁質粒子の除去率を濾層厚と濾過速度をパラメータとして計算した結果を図-6に示す。これにより、清浄濾層においては数 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子の除去率は粒径が小さいほど低くなること、 $7\mu\text{m}$ 以下の粒子の除去はほとんど期待できないこと、濾過速度が大きくなると除去率は低下すること、濾層厚が増すと除去率が高くなること等が推定される。

3.2 実下水を用いた濁質除去特性の検討

衝突理論の計算結果から、本濾過法において除去しにくい濁質粒径は数 $10\mu\text{m}$ 以下と考えられる。したがって、微細濁質粒子の除去特性を調べるため、実下水を原水として用いて濾過速度 200 m/d の条件で濾過を行ない、濾層厚さと捕捉・除去される濁質粒子径との関係を調べた。濁質の粒径分布は、原水、処理水とも $74\mu\text{m}$ の金網篩で篩ってからコールターカウンター(株式会社)

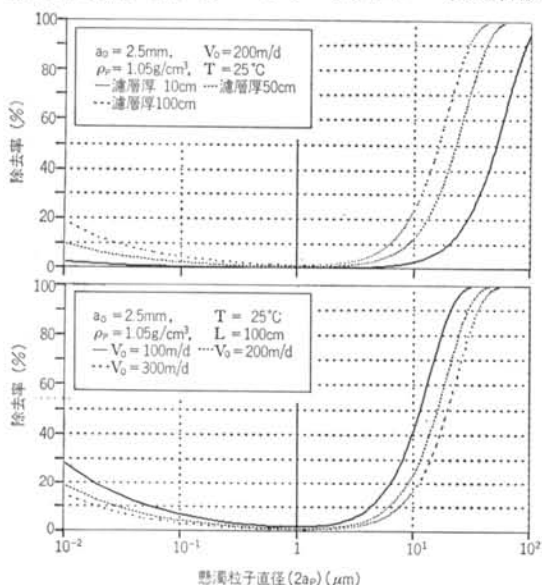


図-6 濁質粒子の除去率の推定

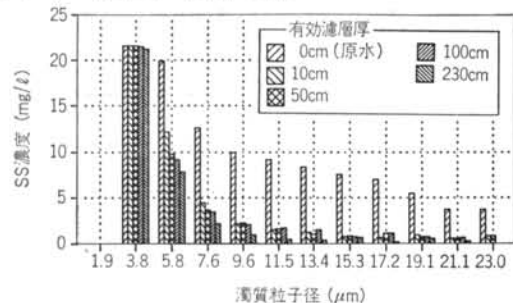


図-7 原水と浮上性濾過処理水の粒径分布特性

製, Coulter Multisizer)を用いて測定した。測定に用いた aperture (細孔)径は $100\mu\text{m}$ である。

濾過開始から1時間後の原水と、各濾層厚での濾過処理水の $23\mu\text{m}$ 以下の粒径分布の測定結果を図-7に示す。 $11.5\mu\text{m}$ より大きな濁質の大部分は $0\sim 10\text{cm}$ 区間の濾層で捕捉されること、 $3.8\sim 7.6\mu\text{m}$ の濁質粒子については濾層厚さが増すに従って除去率が上がること、および $3.8\mu\text{m}$ 未満の粒子は有効濾層厚が 230cm の場合でも殆ど除去されないことが分かった。

3.3 考察

衝突理論による予測よりも小さい濁質粒子まで除去可能なこと、および多くの濁質粒子は濾層の表層部分で捕捉されることが実下水による実験より明らかになった。下水中の濁質粒子の多くが 5.5mm 径の浮上性濾層の表層($0\sim 10\text{cm}$)部分で捕捉・除去されるのは、以下の理由によるものと考えられる。

(1)原水中の 55% (重量比)は、 $50\mu\text{m}$ より大きな濁質粒子で占められている(図-3参照)。粒径が大きな濁質粒子は、短い距離で捕捉・除去される。これらの径の大きな濁質粒子と比重の大きな粒子はともに濾層表層部分で捕捉され、その部分の抑留可能総表面積を増加させるため、表層部分での除去率は抑留量の増加に従ってさらに増加する。

(2)濾材径が大きく、短時間では濾層空隙は閉塞しないため、抑留濁質による総表面積増加の影響を間隙流速の増加の影響が上回るまでの時間は長い。このため、実質的に表層部の除去率が増加している時間も長くなる。

§ 4. 浮上性濾層の懸濁物抑留特性

浮上性濾材による下水の濾過は、上水道の急速濾過に比べて次の点が大きく異なる。

(1)原水の濁質粒子径分布がより広範囲である。
(2)浮上性濾材径は、通常の砂濾材に比べて $5\sim 10$ 倍程度大きい。

(3)損失水頭が上昇すると、比抑留量の大きな濾層部分が膨張することが予想される。

(1)、(2)の相異点は、濾層の抑留量や濾過時間等を変える要因となるが、濁質の抑留形態を通常の砂濾過に比べて変えるものとは考えられない。しかし、(3)の濾層の膨張可能という特性は、浮上性濾層の濁質抑留形態を独特のものに変える可能性があると考えられる。

浮上性濾層の懸濁物抑留特性を検討するに当たって

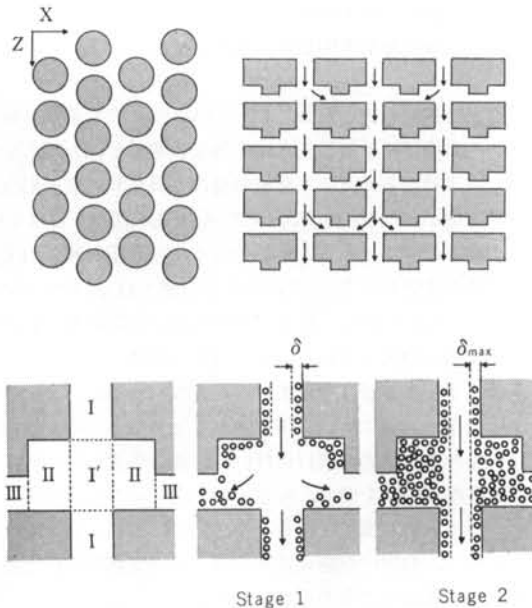
は、初めに急速濾過の抑留に関する既往の研究を明らかにし、次に固定層濾過と浮上性濾過とを比較し、砂濾過の抑留モデルを拡張して考える立場から実験的検討を行なった。浮上性濾材とほぼ同じ径の砂（固定層）濾過の濾過特性は、5.0mmのガラス濾材を円筒カラム（150cm, 10cm径）に充填し、浮上性濾過実験と同じ200m/dの定流量濾過条件で実験的に求めた。

なお、濁質粒子の多くは原水供給点（0cm）から比較的短い浸透距離、すなわち濾層表面部分（0～10cm区間）で捕捉されることが分かったため、本実験では濾層表面部分（ガラス濾層：0～12cm区間、浮上性濾層：0～10cm区間）についての濁質抑留特性（抑留量、損失水頭、阻止率等）を検討した。

4.1 既往の研究

丹保⁷⁾は、濾層を構成する濾材の水路を図—8のように模式化し、濾層内部で生ずる抑留の進行を以下のように説明した。

濾過の前期（Stage 1）：濁質の抑留が濾層上層部の空隙Ⅰ、Ⅱでともに進行している。空隙Ⅱでの抑留は、空隙Ⅱに抑留物質が収まっている限りは殆ど損失水頭には影響しない。損失水頭に影響するのは、空隙Ⅰの細管部の表面に付着し主流に触れる抑留粒子である。したがって、この期間は損失水頭の増加が抑留濁質量に比して極めて低いこと、抑留量の増加とともに阻止率も増加していくこと、および砂層の空隙Ⅱにおける抑留量がほぼ



図—8 濾層における抑留のモデル（丹保⁷⁾による）

飽和に近づいたときに最大阻止率が生じること等の特徴を有する。

濾過の後期（Stage 2）：空隙Ⅰにおける抑留物の体積が増大し、直接空隙Ⅰ'を通過する主流断面を減少させるため損失水頭が増大する。抑留の進行に伴って空隙Ⅰを構成する細管部の内表面積が減少するため、阻止率が急激に低下する。損失水頭の発現は、濾層空隙に抑留された濁質量ではなく、閉塞された空間の割合と分布によって定まる。

抑留された濁質の剝離と移動について D. M. Mintz⁸⁾は、損失水頭の増加に伴って増大するせん断力によって蓄積した抑留物が部分的に破壊、剝離され、小さなフロックとして下層に移行することを報告している。

また、穂積⁹⁾¹⁰⁾は濾過速度が速いほど累加剝離量が大きくなること、濾材径が大きくなるほど同一抑留量における累加剝離量も大きくなること、剝離開始時の抑留量は濾材径の増大とともに減少すること、および剝離濁質が下部の濾層で再捕捉されること等を実験により明らかにしている。

4.2 損失水頭

4.2.1 抑留濁質量と損失水頭の関係

濾過速度200m/dのときの Reynolds 数 ($Re = V_0 d_0 / \nu$) は $Re \approx 10$ であるため、初期（清浄時）の損失水頭 H_0 は次の Kozeny-Carman の式で表わされる。

$$H_0 = k_1 \frac{\nu L}{(\phi_s d_0)^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{V_0}{g} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 k_1 ：定数

L ：濾層厚さ（cm）

ϵ ：濾層空隙率（—）

g ：重力加速度（cm/sec²）

ϕ_s ：形状係数（—）（球の場合 $\phi_s = 1$ ）

d_0 ：濾材直径（cm）

V_0 ：濾過速度（cm/sec）

ν ：動粘性係数（cm²/sec）

濾材を球として扱い、式(7)を初期の損失水頭勾配 ($\partial h / \partial z$)₀ を示す式(8)に変形する。

$$\left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_0 = \frac{k_1 \nu}{36} \cdot \frac{V_0 S_0^2}{g \epsilon_0^3} \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 S_0 ：単位体積の濾層の初期表面積（cm²）

ϵ_0 ：濾層の初期空隙率（—）

S_0 と ϵ_0 は、抑留懸濁物量(q)の増加とその抑留の形態により S と ϵ に変化する。

一般に、 q だけ濁質量が抑留された濾層の損失水頭勾配は次式で表示される。

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_0 \cdot f(\vec{A}, q) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 $\vec{A}$ ：抑留の形態を表わすパラメータベクトル

q ：濾層単位体積中に抑留された濁質量 (cm^3/cm^3)

抑留懸濁質の平均密度を ρ とし、場所的、時間的に一定 ($\rho(z, t) = \text{constant}$) であるとしたら、 $\sigma = \bar{\rho}q$ の関係から、式(9)中の体積表現による q を重量表現による σ に置き換えることもできる。

損失水頭の記述には、体積濃度 q を用いることが一般的である。しかし、今回のように原水中の懸濁質の密度分布が時間的に変化する場合は、抑留物の圧密係数も変化するため、抑留量を体積密度に変換する操作には大きな誤差が付きまとう。このため、今回は便宜的に損失水頭を重量濃度 σ で表わすことにする。

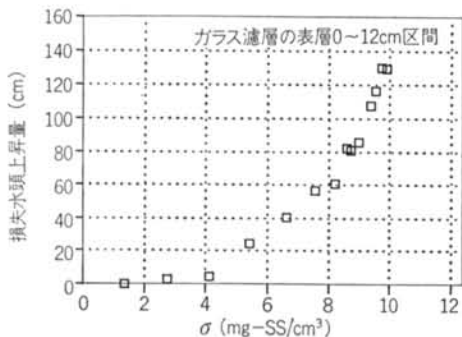
濾層が動かない固定層の場合、Ives⁽¹²⁾が提案した濾層内の抑留可能表面積と抑留量との次の関係が成立する。

$$S = S_0(1 + \alpha q/\varepsilon_0)^{\bar{y}} \cdot (1 - q/\varepsilon_0)^{\bar{z}} \quad \text{(Ives は、}\bar{y} = \bar{z} = 1\text{)} \quad \dots\dots(10)$$

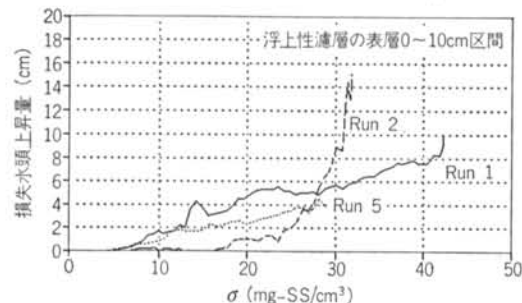
ここで、 α ：充填係数、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ ：実験定数

この場合、式(9)は次式になる。

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_0 \cdot \frac{(1 + \alpha q/\varepsilon_0)^2}{(1 - q/\varepsilon_0)} \quad \dots\dots(11)$$



図—9 ガラス濾層の抑留濁質量と損失水頭の関係



図—10 浮上性濾層の抑留濁質量と損失水頭の関係

式(11)を展開して2次項までで近似し、かつ q を σ で表示すると、

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_0 + K_1 \sigma + K_2 \sigma^2 \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 σ ：濾層単位体積中に抑留された濁質量 (mg/cm^3)

K_1, K_2 ：定数

これより、表層 L_1 部分 ($0 \sim L_1$ cm 区間) の抑留物のみによる損失水頭上昇量 h_{L1} は、式(12)で得られる。

$$\begin{aligned} h_{L1} &= H_{L1} - \int_0^{L1} \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)_0 dL \\ &= K_1 \int_0^{L1} \sigma dL + K_2 \int_0^{L1} \sigma^2 dL \quad \dots\dots(13) \end{aligned}$$

上式に示すように、抑留量と濾層内の表面積の関係が式(12)で表わせる場合は、抑留量が小さい間は損失水頭は1次関数的に増加する。抑留量が大きくなると、2次～3次関数的に増大する。

4.2.2 実験結果と考察

ガラス濾層の表層部分 ($0 \sim 12$ cm 区間) の抑留濁質量と、その抑留のみによる損失水頭上昇量の関係を図—9に示す。捕捉 SS 密度が $4 \text{ mg-SS}/\text{cm}^3$ までは損失水頭は発生しないこと、 $4 \text{ mg-SS}/\text{cm}^3$ 以上では損失水頭は急激に上昇することが分かった。

丹保のモデル⁷⁾を用いると、初期の $4 \text{ mg-SS}/\text{cm}^3$ までの抑留懸濁質は、模式的に図—8の空隙Ⅱに収まっており、殆ど損失水頭に影響しないこと、それ以後に捕捉された懸濁質は空隙Ⅰの細管部の表面に付着し、損失水頭上昇量 (h_{L1}) を2次関数的に増大させるものと考えられる。

浮上性濾層の表層部分 ($0 \sim 10$ cm 区間) の抑留濁質量と、その抑留による損失水頭上昇量の関係を図—10に示す。固定層であるガラス濾材の場合と異なり、表層部分の抑留量が $20 \sim 30 \text{ mg-SS}/\text{cm}^3$ でも損失水頭の上昇は 10 cm 未満とわずかであることが分かる。この濾材径での表層部分の空隙Ⅱの限界許容量が固定層では約 $4 \text{ mg-SS}/\text{cm}^3$ であることから、浮上性濾層の場合は空隙Ⅱの許容量が大幅に増大していることが認められる。両濾層の違いは、ガラス濾層は層膨張が不可能なのに対し、浮上性濾層は深さ方向に層膨張が可能なことである。浮上性濾層の場合は、濾過の進行に伴い抑留部分の濾層が膨張し空隙Ⅱの許容量を増し、空隙Ⅰの間隙容量の減少を遅らせているものと推定される。すなわち、濾層の層膨張性によって、抑留の形態 (式(9)の $\vec{A}$) が固定濾層と浮上性濾層では異なることが示唆された。

4.3 阻止率

4.3.1 抑留濁質量と阻止率の関係

懸濁液を粒状濾層で濾過する場合、深さ z 、濾過時間 t における懸濁質濃度を C とすると、 C は z と t の関数であり、 $C=C(z, t)$ となる。濾過の基礎式は、一般に岩崎の式⁽⁴⁾と連続の式⁽⁵⁾から構成される。

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

$$\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots(5)$$

阻止率 λ は、初期阻止率 λ_0 から濾層中に抑留された懸濁物量 q の増加によって変化し、次の一般形で示される。

$$\lambda = F(\lambda_0, q) \quad \dots\dots(6)$$

Ives⁽²⁾に従えば、阻止率の形は一般に次のようになる。

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \propto \left(1 - \frac{q}{q_u}\right)^{\bar{x}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{\varepsilon_0} q\right)^{\bar{y}} \cdot \left(1 - \frac{q}{\varepsilon_0}\right)^{\bar{z}} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 q_u ：最大抑留懸濁物（体積濃度）

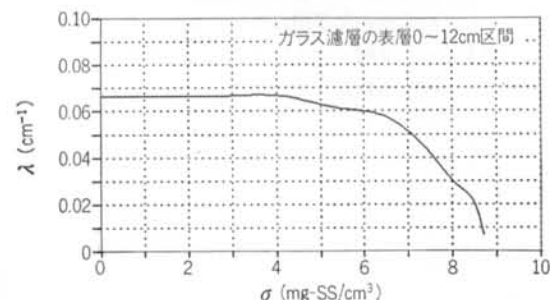
α ：充填係数（ $\alpha = \varepsilon_0 / (1 - \varepsilon_0)$ ）

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ ：実験定数

しかし、浮上性濾層の抑留の形態は固定濾層とは異なること、および4.2.1で述べた理由により体積濃度 q でなく重量濃度 σ を用いることから、式(7)をそのまま適用するのは困難である。したがって、今回は阻止率 λ を λ_0 と σ で表わすことを考える。

4.3.2 実験結果と考察

原水供給点から深さ L_1 cm（ガラス濾層12cm、浮上性濾層10cm）の濾層表層区間の抑留量 σ と阻止率 λ の関係を調べた。濾過開始（ $t=0$ ）から30分毎もしくは1時間毎に、原水（ $z=0$ ）および濾層下深さ L_1 cmの位置に設置されているサンプル採取管から濾過水を採取し、各時間の C_0 と C を求めた。式(4)を用いてサンプル採取時の表層0～ L_1 区間の λ を求め、これらのデータ間を3次Spline曲線により補間し、濾過時間中の λ の値を得た。この λ と式(7)から、濾過時間と λ および σ の関係を求め



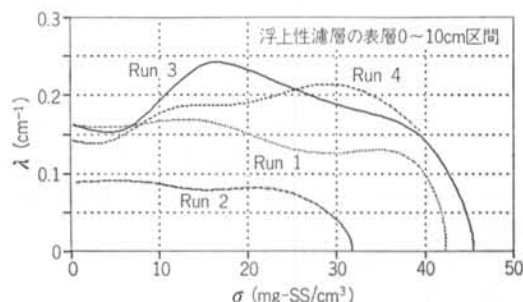
図—11 ガラス濾層の抑留濁質量と阻止率の関係

た。

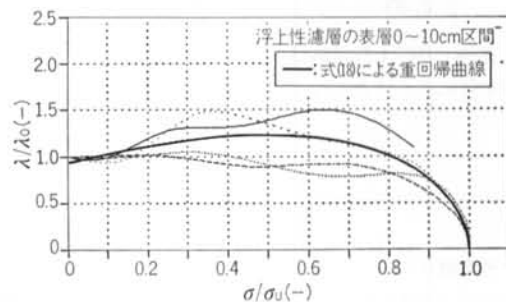
ガラス濾層の表層0～12cm区間の抑留量 σ と阻止率 λ の関係を図—11に示す。初期阻止率 λ_0 は約 6.6×10^{-2} (1/cm)であること、抑留密度が約4 mg-SS/cm³までは阻止率 λ は初期値 λ_0 のままほぼ一定であること、4 mg-SS/cm³以降は抑留の進行に伴い λ が低下していくこと、限界抑留量 σ_u が約9 mg-SS/cm³であること等が分かる。これより、4 mg-SS/cm³までの抑留物は損失水頭に影響しない反面、阻止率の増加にも寄与していないこと、それ以降の抑留濁質は図—8の空隙Iを徐々に閉塞し、間隙流速を増加させるため、阻止率を低下させていくこと等が示唆される。

浮上性濾層の表層0～10cm区間の σ と λ の関係を図—12に示す。初期阻止率 λ_0 が $0.9 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^{-1}$ (1/cm)であること、限界抑留量 σ_u は30 mg-SS/cm³以上であること、抑留の進行に伴い一度 λ が増加する場合と、前半は λ が λ_0 から余り変化せず、後半で λ が単調に減少する場合の両方の場合があること、 λ は σ_u の少し前から急激に減少すること等が分かる。浮上性濾層は、ほぼ同濾材径の固定層濾層の9 mg-SS/cm³に比べて3倍以上の抑留が可能であることが分かった。 λ の初期値 λ_0 および λ の σ の増加に対する変化のパターンの違いは、実験中の原水濃度と粒径分布の違いに起因すると考えられるが、今回の実験からは原因を究明できなかった。

原水濃度が高いほど、単位面積当たりの総SS捕捉量



図—12 浮上性濾層の抑留濁質量と阻止率の関係



図—13 浮上性濾層の抑留型モデル

が減少することが事前の検討から明らかになっている。また、 λ_0 と σ_u の値も原水濃度等により異なることも分かった。これより、 σ と λ の関係をすなわち抑留型モデルを検討するためには、各実験の σ と λ を σ/σ_u と λ/λ_0 の形に無次元化する必要がある。

図-13に、 σ/σ_u と λ/λ_0 の関係を示す。浮上性濾層の場合、 $\sigma/\sigma_u=0.8$ 程度から λ/λ_0 は急激に減少すること、 $\sigma/\sigma_u=0.8$ までは λ は λ_0 より最大1.5倍まで増加する場合と、 λ_0 の80%程度まで低下する場合とがあるが、 λ はさほど λ_0 と変わらないことが認められる。

これらのことから、浮上性濾層の阻止率と抑留量の関係を次のように考えた。

(1)抑留物の増加に伴い、濾材の表面は懸濁粒子によって覆われ、捕捉可能な表面積が増加する。この体積濃度 q による変化を近似的に $(1+\sigma/\sigma_u)^A$ で表現できる。

(2)懸濁物の抑留がさらに進行すると濾材間の流路(空隙I)の内径が減少し、間隙流速が増加し続ける。このため、阻止率は減少していく。ついに抑留が生じ得なくなる限界流速に達したとき、阻止率は0になる。この阻止率の変化を近似的に $(1-\sigma/\sigma_u)^B$ で表現できる。

(1)、(2)より、 λ と σ の関係を混合モデル型の次式で表現できる。

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \overline{C} \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^{\overline{A}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^{\overline{B}} \quad \dots\dots (18)$$

ここで、 $\overline{A}$ 、 $\overline{B}$ 、 $\overline{C}$ ：実験定数

式(18)で実験データを整理することの妥当性の判断と、式の $\overline{A}$ 、 $\overline{B}$ 、 $\overline{C}$ の係数を決めるため、図-13の4つの実験のデータから重回帰を行なった。寄与率(r^2)が $r^2=0.933$ と高いため、式(18)で σ と λ の関係をおおよそ整理できることが認められた。各係数の値は、 $\overline{A}=1.61$ 、 $\overline{B}=0.54$ 、 $\overline{C}=0.94$ である。図-13に、式(18)による重回帰曲線を示す。

§ 5. まとめ

高懸濁水の浮上性粗濾材による濾過について、1) 濁質粒子径による除去率の違い、2) 濁質抑留量と損失水

頭、および3) 濁質抑留量と阻止率等の点で従来の固定層濾過と比較しながら検討を行ない、以下の濾過特性が明らかになった。

(1)下水中の $11.5\mu\text{m}$ 以上の濁質粒子の多くは、浮上性濾層の表層部(0~10cm区間)で捕捉・除去される。また、 $3.8\mu\text{m}$ 未満の粒子は濾層厚が230cmと厚い場合でも殆ど除去されない。

(2)衝突理論と実験から、衝突効率 η の高い大きな粒子が濾層表層部で捕捉され、その部分の抑留可能総表面積を増加させるため、表層部分の除去率が非常に高くなるものと考えられる。

(3)浮上性濾層は、濾過の進行に伴い抑留部分が層膨張し、濾材空隙を広げることが確認された。この層膨張性により、濁質の抑留形態は固定濾層と異なったものとなる。

(4)上記(3)の特性により、 $20\sim 30\text{ mg-SS/cm}^3$ という高い濃度で濁質が抑留されても、その抑留による損失水頭の上昇量はわずかである。

(5)浮上性濾層の限界抑留量は 30 mg-SS/cm^3 以上である。このため、ほぼ同じ濾材径の固定層の 9 mg-SS/cm^3 に比べて3倍以上の抑留が可能である。

(6)浮上性濾層の表層(10cm)部分の初期阻止率は $0.9 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^{-1} (1/\text{cm})$ であった。阻止率は、濁質の抑留が限界抑留量の80%程度まで進行したところから急激に減少する。

(7)浮上性濾層の表層部分の阻止率(λ)と抑留量(σ)の関係を調べた。各々を無次元化した λ/λ_0 と σ/σ_u の関係は、混合モデル型の式で整理できることが分かった。

謝辞 本研究は、バイオフォーカスWTプロジェクトの一環として、建設省土木研究所と実施した共同研究の一部である。

研究の実施に当たり、建設省土木研究所下水道部の関係各位から多くの御指導と御教示をいただいた。また、実験および解析を行なう上で、地下技術研究部の高坂信章氏、環境技術研究部の福室和雄氏、シーブルー特別研究グループの柴田祐美子嬢および東海大学の五十嵐義直君(現大和ハウス㈱)には多大な協力をお願いした。末尾ながら、深甚な謝意を表します。

<参考文献>

- 1) “バイオテクノロジーを活用した新排水処理システムの開発報告書(下水道編)”建設省(1991年)
- 2) 小越真佐司:“下水前処理用的高効率固液分離装置の開発”土木技術資料 Vol.32, No.12 (1990年) pp.56~59

- 3) M. Mouri & C. Niwa: "Filtration of Raw Sewage using Floating Filter Media and Multiple Filter Column Inlets" Proc. of IAWPRC 15th Biennial Conf. on Water Pollu. Res. & Control (1990) pp.663~666
- 4) G. Ghosh: "Media Characteristics in Water Filtration" J. of Sanitary Engineering Div., ASCE, Vol., 84, No. SA1 (1958) pp.1533-1~1533-25
- 5) K.M. Yao, M.T. Habibian & C.R. O'Melia: "Water and Waste Water Filtration; Concepts and Applications" Envir. Sci. & Technol., Vol. 5, No. 11 (1971) pp. 1105~1112
- 6) 藤田賢二: "急速濾過池の濾材層厚と粒径に関する考察" 水道協会雑誌 第485号 (1975年) pp. 2~14
- 7) 丹保, 小笠原, 森峰, 広田: "砂濾過の抑留機序に関する研究 (II) —砂層内でのフロックの挙動—" 水道協会雑誌 第484号 (1975年) pp. 2~25
- 8) D.M. Mintz: "Modern Theory of Filtration" International Water Supply Congress & Exhibition, Special Subject, No. 10 (1966)
- 9) 穂積 準, 橋本正利: "急速濾過における既抑留濁質の剝離に関する研究 (I) —濾過速度の影響—" 水道協会雑誌 第648号 (1988年) pp. 16~25
- 10) 穂積 準, 橋本正利: "急速濾過における既抑留濁質の剝離に関する研究 (II) —濾材寸法と濾層厚の影響—" 水道協会雑誌 第658号 (1989年) pp. 8~16
- 11) P.C. Carman: "Fluid Flow through Granular Beds" Trans. of Inst. of Chemical Engrs., Vol. 15 (1937) p. 150
- 12) K.J. Ives: "The Scientific Basis of Filtration" Noordhoff (1975) pp. 203~224
- 13) 岩崎富久: "濾過阻止率の計算" 土木学会誌 第24巻, 第8号 (1935年)
- 14) 丹保憲仁, 小林三樹: "高容量濾過池の研究" 水道協会雑誌 第571号 (1982年) pp. 37~51
- 15) 丹保憲仁, 松井佳彦, 岡本裕三: "高容量濾過池の研究 (II)" 水道協会雑誌 第598号 (1984年) pp. 16~23
- 16) 井出哲夫: "水処理工学" 技報堂出版 (1990年) pp. 101~152
- 17) 合田 健: "水質工学 (応用編)" 丸善 (1979年) pp. 32~46
- 18) M.R. Matsumoto, T.M. Galeziewski, G. Tchobanoglous & D.S. Ross: "Filtration of Primary Effluent" J. of WPCF, Vol. 54, No. 12 (1982) pp. 1581~1591
- 19) 貫上佳則, 本多淳裕, 西谷道暢: "回転濾過筒を用いた排水の固液分離に関する研究" 水質汚濁研究 Vol. 13, No. 1 (1990年) pp. 39~47
- 20) "下水2次処理水の急速濾過設計マニュアル" 日本下水道協会 (1982年)
- 21) 毛利光男, 丹羽千明: "浮上性濾材を用いた下水の固液分離処理法の研究" 水質汚濁研究 (投稿中)

