

急速砂ろ過による懸濁粒子の 抑留に関する研究

海老江 邦雄

(昭和44年4月30日受理)

An Experimental Study on the Removal Mechanism of Suspended Particles in the Rapid Sand Filter

by Kunio EBIE

Abstract

Rapid sand filtration is one of the most widely used and extensively investigated unit-operations in the water supply systems. Nevertheless, the fundamental removal mechanism of suspended particles in the sand filter is poorly understood at present.

In this paper, the author presents an approximate distribution function of suspended particles removed in the filter. Then, in order to compare the function with the data obtained in the experiments, to pursue M^* and S_0 in the function, and, in addition, to understand more clearly the removal mechanism of suspended particles, experiments were performed by the use of equipments in Fig. 1.

As a result, it was found that the data were fit for the function to a high degree. The other observations are also presented.

1. ま え が き

都市上水道における水処理プロセスは、衛生工学の中で最も体系的に整備された分野の一つではあるが、それを構成する個々の要素についての研究は、ここ10年来ようやく本格化してきた状況にありいまだに不明の点が多い。その中であって原水の固液分離に対する最後の要の位置にある急速砂ろ過も例外ではない。

さて近年、水源汚濁による原水の多様化とともに水需要が激増するなど水処理界にも大きな変革の波が打ち寄せているが、その中で砂ろ過についてみれば、ろ速の高速化や多層ろ過池の実用化へ向かって従来よりも一段と厳密な砂ろ過池の設計および運転が要求されるようになり、これに対する理論的な手法を開発することが水処理技術者にとって急務とされている。

そのためにはまず第一に、砂ろ過の本質的な問題である砂層内における懸濁粒子の抑留が種々の因子により影響され、どのように変動・推移するかを明らかにしておくことが必要である。

今回の実験は2種類の原水、すなわち急速混和池流出水と沈殿上澄水を採用して行なわれた。実験の目的は、(1) 懸濁粒子の砂層内抑留分布が特定の指数関数で近似的に表示されうることを示すこと。(2) 式中の M^* と S_0 がろ過継続とともにどのような値をとりながら進展するかを追求すること。(3) あわせて粒子の抑留機構そのものをよりよく理解することである。

2. 抑留の理論

2-1 抑留の基本式

懸濁粒子の抑留に関する研究は理論と実験との両方から多数行なわれてきたが、基本式として最初に提唱されたのは1934年土木学会記念講演会の岩崎^{1),3)}によってである。その後欧米諸国において、Stein, Hall, Mintz, Ives, Maroudas 等^{3)~12)}により種々論ぜられ今日に至っている。ここでは現在広く紹介されている K. J. Ives らによる式を示し、考察してみよう。

$$\frac{\partial c}{\partial L} = -\lambda c \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial L} + \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_0 + n\sigma - \frac{\phi\sigma^2}{f_0 - \sigma} \quad (3)$$

ここで、	c = 砂層を流下する水単位体積中の懸濁物の体積	[無次元]
	L = 砂層表面よりの深さ	[cm]
	λ = 阻止率	[cm^{-1}]
	t = ろ過開始後の時間	[sec]
	σ = 砂層単位体積中に抑留された懸濁物の体積	[無次元]
	v = ろ過速度	[cm/sec]
	λ_0 = ろ過開始時 $t=0$ における阻止率	[cm^{-1}]
	n = 阻止率増加係数	[cm^{-1}]
	ϕ = 阻止率減少係数	[cm^{-1}]
	f_0 = ろ過開始時の清浄砂層の空隙率	[無次元]

(1) 式は砂層内を流下する懸濁液の抑留による濃度の減小パターンを表わす式である。ろ過開始時における砂層内空隙の蜂窩構造を上下方向に一様とみなせば、その時点における阻止率は $\lambda = \lambda_0$ となり砂層全体を一本の (1) 式で表現することができる。しかしながら、砂層が成層化している場合やある程度ろ過が進行して砂層の縦方向に抑留量の分布が生じた場合には、(3) 式で示されているように、砂層各部に應ずる初期阻止率および砂層各部の抑留量 σ に対応する阻止率をとることになり、この時の濃度の減小パターンは、(3) 式の2つの係数も同時に変化することともからんで、厳密には(1) 式の無数の組み合わせにより求めなければならない。

(2) 式は砂層内における連続の式であって、微小時間間隔内に砂層を流下する懸濁液濃度の減小分 $-\partial c/\partial L$ が砂層内に抑留された懸濁物量の増分 $\partial\sigma/(\partial t \cdot v)$ に等しいとする式である。ただしここでは粒子の抑留後におこる圧密による体積減少は考慮していない。

また (3) 式は阻止率 λ を σ の二次関数で示した Ives の式である。これは岩崎が緩速砂ろ過池の実験結果から次の (4) 式の直線式で表わしていたものに対して第 3 項の補正項を加えたものである。

$$\lambda = \lambda_0 + n\sigma \tag{4}$$

つまり、緩速砂ろ過に比べて懸濁粒子の砂層内浸入が著しい急速砂ろ過では、ろ過初期には確かに岩崎のいうように阻止率が直線的に増加し続けるが、抑留量がある程度多くなってくると砂層内の懸濁粒子の抑留可能部分が少なくなり、空隙率の減少により間隙内流速が増大し、水流の剪断力が大きくなって懸濁粒子の下層への浸透が起こるなど結果的には阻止率が減小することになるとして第 3 項の負項を加えたのである³⁾。一方、このような阻止率表示式には異論もあり、Mintz, Shekhtman, Mackrle 等^{3),5)} は初期の阻止率増加を無視した (5) 式の型を主張している。

$$\lambda = \lambda_0 - b\sigma^2 \tag{5}$$

ここで、 b = 係数 $[\text{cm}^{-1}]$

2-2 基本式の運用上の問題点

これら抑留の基本式を誘導するにあたっては理想的なろ過条件を仮定しており、実際に運用する段階では現在のところ次のような問題点があると考えられる。

1) 理想的なろ過条件として、ろ過池流入水中の懸濁粒子は均一径の球でその径は砂粒子の 10^{-2} のオーダーであること、ろ過継続中流入水濃度は一定であること、その上、砂層は均一径の球より構成され上下方向に一樣な空隙を有するとしている。

しかしながら、実際にろ過池に流入する懸濁粒子は、ある径以下というように上半分を切られた粒径分布を持ち、その形状も近似的には球と立方体の中間位にあるとされ、形状係数は大体正八面体程度の値をとる¹⁴⁾と推論されている。また砂層も通常 1.3~1.7 位の均等係数を持ち、逆流洗浄により常に成層化しており砂の径は上に小、下に大となっている。そしてそのぼらつきの程度は使用する砂の均等係数の大きなほどはなはだしい。従って、実際のろ過池における懸濁粒子の抑留はますます上層に限定される傾向が強くなるわけである。

2) 1) と関連して、このように実際の砂層ではろ過開始時からすでに砂層の上下方向にわたって阻止率が異なり、その上、ろ過の進行とともに抑留量が増加すると、それがまた阻止率に影響してくるというように、例えばろ過開始からある時間経過後の抑留パターンを式から定めることは非常に複雑で事実上不可能である。

3) (3) 式において阻止率 λ は抑留量 σ の関数である。現在までこの σ を決定する方法と

して次の二つが提案されている。その一つは、砂層内を流下する懸濁液の濁度を測定し、連続の式から抑留量を知り、 σ に換算する方法であり、他の一つは清浄砂層の損失水頭式である Fair-Hatch 式あるいは Carman-Kozeny 式が一定の条件のもとでは適用可能であるとして式中の空隙項の変化より抑留量 σ を推定しようとする方法である。前者で問題となるのは濁度から体積への換算係数である。Camp や Ives は鉄塩による懸濁粒子の分子式を $\text{Fe}\cdot\text{SO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ とし、一応 2.3×10^{-45} または 2.5×10^{-43} という数値を与えているが、現在のところまだ懸濁粒子の分子式すら明らかでないことに加え、計算過程に抑留懸濁物の圧密に関して何らの考慮もされていない。ところが他方、巽¹⁶⁾の逆流洗浄の実験研究では洗浄排水濁度の特異な減衰傾向より砂層内の懸濁物は砂粒子にかたく付着して圧密の進行した一次汚泥と、ただ砂粒間隙に閉塞して圧密の進行していない二次汚泥とからなることが広く認められている。また、Camp 等¹⁵⁾による損失水頭式から求めようとする方法についても、清浄砂層の層流域に適用すべき式を懸濁物の乱流域にまで拡大使用しようとする上、懸濁粒子の抑留後も砂粒子は球形であるとするなどかなり無理な仮定を行なっているようだ。

2-3 近似法としての抑留分布関数

以上のように抑留の諸基本式をそのままの形で運用させようとする、現時点では種々の障害があり、また余りにも繁雑になる恐れがあるようだ。

さて、砂層内に抑留される懸濁物量は理想的なろ過条件を考えた場合の微小時間間隔では連続の式との関係を用いて (1) 式から得られるので、現象上ではその累積であるはずの、ある任意のろ過継続時間までの砂層内抑留量も近似的には (1) 式と類似する次の (6) 式で示されるであろう。

$$\frac{\partial S}{\partial L} = -ML \quad (6-a)$$

$$S = S_0 e^{-ML} \quad (6-b)$$

ここで、
 S = 単位重さの砂層に抑留された懸濁物量 [mg/100 g 砂]
 S_0 = 砂層最上層部の S [mg/100 g 砂]
 M = 抑留分布係数 [mg/100 g 砂 \times cm⁻¹]
 L = 砂層深さ [cm]

砂層内の懸濁物量の抑留分布の推移をこの近似式で考えるとその取り扱いが非常に容易になる。(1) 式と (6) 式とを比較してみると、まず阻止率は直接的には σ により時々刻々と変化するが、そのもとを正せばこの σ 量に関係するろ過速度、砂の径、流入懸濁粒子の径あるいは強さ、水の粘性などに影響される訳である。従って近似的には時々刻々の阻止率の累積である (6) 式の M も、当然これらの要素により同様の影響をうける。また、(1) 式による抑留分布のパターンは抑留量 σ の増加とともに上層部では次第に抑留の飽和量に近づき、指数関数的傾向を失なっていくように、(6) 式の場合も同様である。しかしながら、ろ過時間に対するその歪

みの程度は、異積量を扱う後者の方が遅く、かつ小量であろうと推察される。この意味において(6)式はろ過の全工程については必ずしも満足しうる精度では成立しないであろうが、実用的にはかなりの段階まで適用できるだろう。その上(6)式では、抑留量 S を実際に定量的に表示できる単位をとってあり、圧密現象を間接的に考慮した総括的な値として表わされるので σ の測定におけるようなあいまいさがなくなる。

(6-b) 式の両辺の常用対数をとることにより次の(7)式を得る。

$$\log_{10} S = \log_{10} S - M^*L \tag{7}$$

ただし、 $M^* = M \log_{10} e$ (8)

従って、砂層深さ L を横軸に、抑留量 S の対数を縦軸にとった片対数グラフでは直線表示できることになり、以下の実験では最初に(7)式の適合性の検討を行なった。

3. 実 験

3-1 実験装置および実験条件

— 前述の目的のために2種類のろ過筒流入懸濁液を調整した。その一つは急速混和池流出水でカオリン・水混合液に硫酸アルミニウムを滴加して急速攪拌を行なった極めてフロック形成性に富む微粒子(数ミクロン)を含むもの、他の一つは急速混和後、フロック形成・沈殿処理を経た沈殿上澄水で、これには前者に比べて不活性な粒子が多数含まれていると思われる。以後前者についての実験をI、後者をIIとする。

— これら装置の概略は図-1に示す通りであるが、図中で点線部分のフローシートは実験IIで加えられた装置を示すとする。

— 実験に使用した原水は北大医学部の自家用井戸水でその水質試験の結果は表-1の通りである。この原水に対して、あらかじめ調整しておいたカオリン懸濁液を添加して人工的に加濁

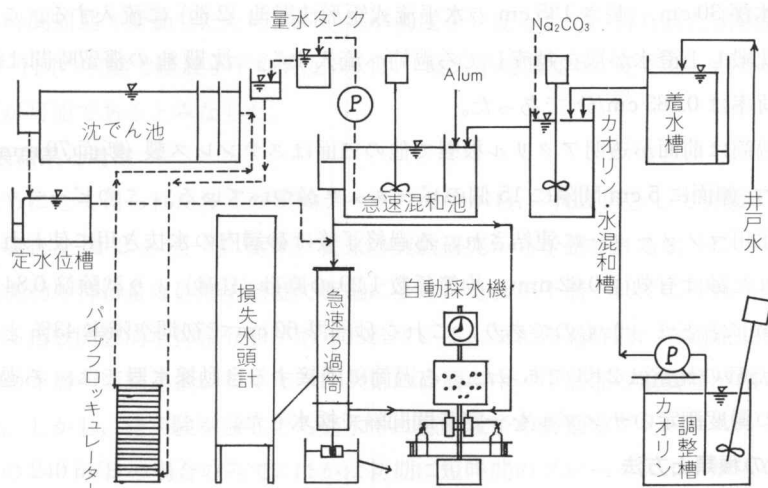


図-1 実験装置の概略

を行ない、その後凝集剤として硫酸アルミニウムおよびアルカリ度調整用として炭酸ナトリウムを適量注入した。各実験における注薬量については原水のカオリン濁度を実験 I では 5 度、実験 II では 50 度として、あらかじめ I 社製のジャーテスターにて凝集実験を行ない、最適注薬量を表-2 のように求めておいた。

表-1 原水の水質

水 温 (°C)	10	Fe ^{2+, 3+} (mg/ℓ)	<0.01
pH	6.9	Mn ²⁺ (")	<0.01
濁 度 (度)	<1	Cl ⁻ (")	26.5
4.3 アルカリ度 (meq/ℓ)	1.99	SO ₄ ²⁻ (")	30.0
COD as O ₂ (mg/ℓ)	0.32	熱 灼 減 量 (")	269
Ca ²⁺ (")	38.6	NH ₄ ⁺ -N (")	<0.01
Mg ²⁺ (")	12.3	NO ₂ ⁻ -N (")	<0.01
SiO ₂ (")	32.2	NO ₃ ⁻ -N (")	0.93

表-2 Jar Test による最適注薬量

実 験	急 速 攪 拌		緩 速 攪 拌		カオリン ppm	硫酸アルミ ニウム ppm	炭 酸 ナトリウム ppm	pH
	rpm	分	rpm	分				
I	150	10	30	20	5	6	0	7.1
II	150	10	30	15	50	30	80	8.0

実験 I では急速混和終了後の原水をただちにろ過筒へ導き砂ろ過を行なったが、実験 II では急速混和後パイプフロキュレーターに入る。これは内径 19 mm、長さ 90 m の透明ビニールパイプを直径 1 m の円筒に巻きつけたもので、管内流速 9.4 cm/sec、レイノルズ数は 1,500~1,800 程度であり、水流の速度勾配によるフロック形成が主体であろうと思われる。その後、幅 30 cm、水深 30 cm、長さ 135 cm の水平流式矩形沈殿池 (2 池) に流入する。ここで懸濁物の大部分は沈殿し上澄水が堰を越流してろ過筒へ流入する。沈殿池の滞留時間は約 1 時間 50 分、表面負荷率は 0.283 cm/分であった。

急速ろ過筒は前面が透明アクリル板製で他の三面はステンレス製 (断面 70 mm×70 mm、長さ 1 m) で左側面に 5 cm 間隔に 15 個のピーコックがついている。このピーコックは、ろ過中は損失水頭用マンメーターに連結され、ろ過終了後は砂層内の水抜き用に使われた。ろ材として使用された砂は有効径 0.62 mm、均等係数 1.29 の原砂 (珪砂) より試験篩 0.84 mm を通過して 0.59 mm にとどまったものであり、これを砂層厚 60 cm で初期空隙率 43% となるように詰めた。また砂の比重は 2.63 であった。ろ過筒に隣接する自動採水器では、ろ過筒流入水およびろ過水の濁度測定サンプルを一定時間間隔で採水した。

3-2 実験の種類と方法

2 種類の懸濁液についてろ過筒流入水濁度を一定 (≒5 度) となるようコントロールしな

がら、注薬量および装置内の滞留時間は固定し、ろ過速度とろ過継続時間のみを表-3に示すように変えて実験を行なった。予定のろ過時間が経過した後、運転を止め、砂層内に抑留された懸濁粒子が破壊して下層へ移動することのないように注意しながらろ過筒内部の水をピーコックより徐々に流出させた。次にろ過筒を架台よりはずして流し台の上に水平に置いて前面の亚克力板を除き、砂層の上部より下部へと、手製の砂取器にて0.5~1.0 cm厚の砂を18カ所から磁皿に採取した。その後、この砂を1個ずつ1ℓのビーカーに移し蒸留水を1ℓ加え、ジャーテスターで200 rpm 5分間の急速攪拌を行なって砂と懸濁粒子を完全に分離させ、これより濁度測定用の試料を約50 cc、先の穴を大きくしたホールピペットで採水した。この試料と自動採水器により採集した試料の濁度を積分球式濁度計にて測定し検量線より重量に換算した。一方、ビーカー内に残った砂は再び磁皿に移し電気乾燥器にて120°C、約3時間乾燥させた後、重量を測定した。

表-3 実験の種類

実験	ろ速	ろ過時間 (時間)						
	m/日	No. 1	2	3	4	5	6	7
I	120	4	8	12	16	24	32	48
	180	4	8	12	16	24	32	
	240	4	8	12	16	20	24	
II	120	4	8	12	16	24	32	48
	180	4	8	12	16	24	32	48
	240	4	8	16	16	32		
	300	4	8	16	16	20	24	32
	360	4	8	16	16	24		

砂層内抑留量およびろ過筒流入水・流出水のデータ整理にあたっては、ろ過筒流入水の濁度が長い時間周期で変動したため、一応基準濁度を5度として、得られた実験値をこの値に補正した。今回の実験では最小平均濁度3.6度、最大平均濁度5.4度であったためリニアにデータの補正が可能であるとみなした。

3-3 実験結果と考察

このようにして得られた多くの実験データの中から、代表例として実験Iと実験IIの180 m/日の場合を図-2と図-3に示す。従来の実験研究から予想されるように、どちらの図においても懸濁物の抑留量は砂層上層部で極端に多く、それが下層へいくにつれて急激に減少する、いわゆる指数関数的な抑留分布があらわれている。またろ過時間、ろ過速度を増すともない懸濁物の下層への到達量が多くなり、次第に砂層の中・下層部の重要性が増大する傾向が観察された。しかし、全実験を通じてろ過水中に懸濁粒子の終期のブレイクスルーがみられたのは実験Iの240 m/日の場合のみで、ほかは初期に短時間のブレイクスルーがみられたのみであり、伝統的に採用されているろ速120~150 m/日で砂層厚60 cmという値と比較するとき、か

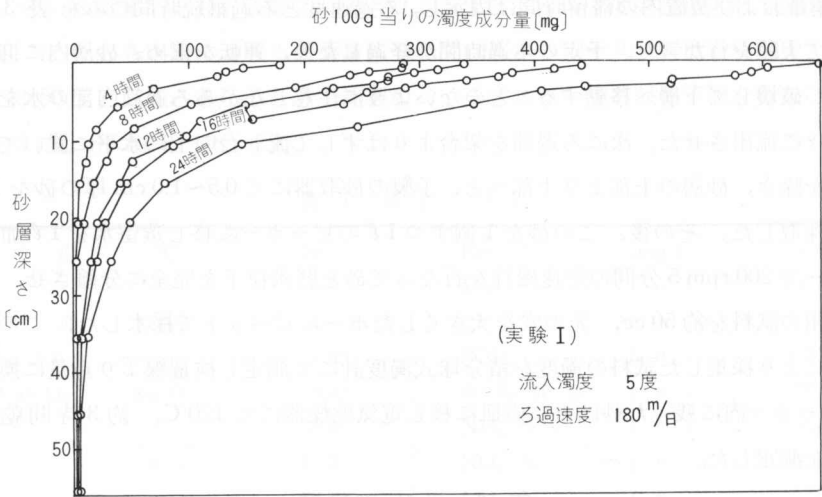


図-2 懸濁粒子の砂層内分布 (実験 I)

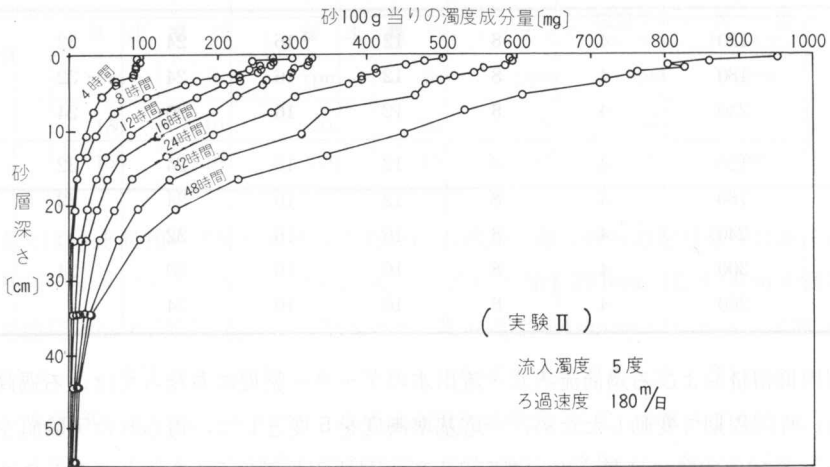
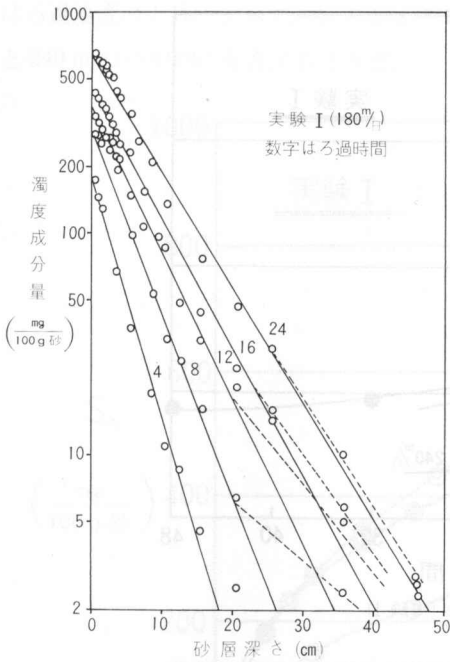


図-3 懸濁粒子の砂層内分布 (実験 I)

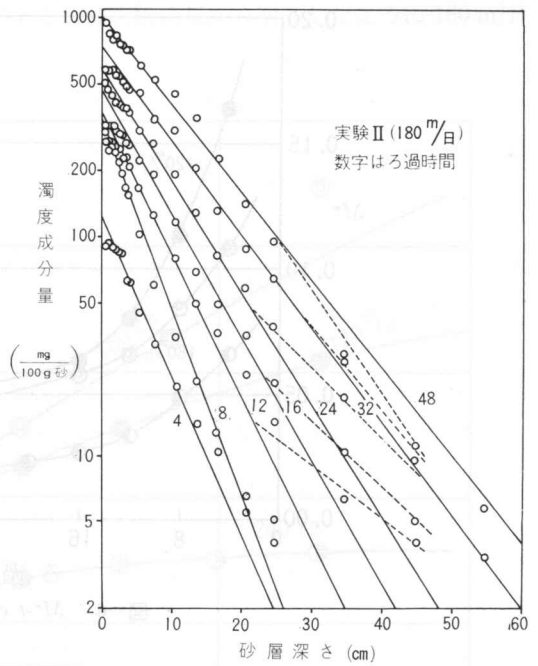
なりの余裕がみられ今後、更に詳細な実験での検討が必要であろう。

図-4 と 図-5 は 図-2 と 図-3 のデータを一対数グラフ上にプロットしたものであるが、直線表示がかなりの精度で適合しており、この程度のろ過時間までは (6) 式の指数関数で砂層内の総括的な懸濁物の抑留のパターンを示しても無理がないようだ。

グラフの直線の勾配である抑留係数 M^* がろ過時間とろ過速度とともにどのように変化するかを 図-6 と 図-7 に示した。実験 I ではろ過時間の経過するにつれて M^* は単純に小さくなっている。それにひきかえ実験 II では全般的にろ過時間 6~8 時間くらいまでは上昇し、ここをピークとして以後 M^* は小さくなっていく。また両実験ともろ過速度の大きいほど M^* は小さいという傾向がある。このような差は実験 I に使用した粒子がフロック形成性に富んでい



図—4 砂層内分布の片数表示 (実験 I)

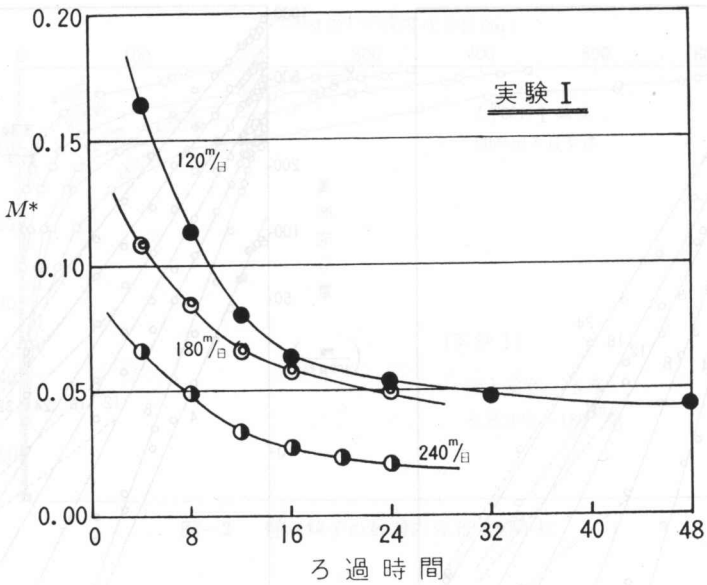
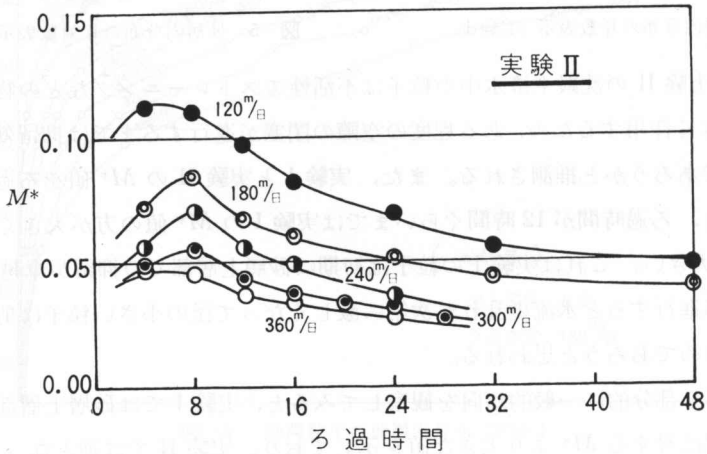


図—5 砂層内分布の片対数表示 (実験 II)

るのに対し、実験 II の沈殿上澄水中の粒子は不活性でストレーニングなどの物理的な抑留因子¹⁷⁾がより大きく作用するため、ある程度の空隙の閉塞が進行するまでは抑留効果が十分に発揮されないであろうかと推測される。また、実験 I と実験 II の M^* 値をろ過時間について比較してみると、ろ過時間が 12 時間ぐらいまでは実験 I の M^* 値の方が大きく、それ以後は実験 II の方が大きい。これは実験 I の粒子は初期に砂層上層部での抑留が卓越するため、ある程度の閉塞が進行すると水流の乱れが次第に激しくなって径の小さい粒子に剪断されて砂層深く浸入するためであろうと思われる。

しかしながら部分的に一般的傾向を観察してみると、実験 I では砂層上層部の勾配が砂層の平均的な抑留に対する M^* より大きな値を示しており、実験 II では逆となっている。これは両者の粒子の性質の差異によるものである。また砂層下部では、どちらの実験でも砂層内抑留量は抑留直線より大となっている。いま、この部分に第二の抑留直線を引いてみると、ろ過時間の長くなるにつれてこの勾配は急となり、砂層下部での抑留量が次第に高まっていることを示している。このことはろ過継続時間が長くなっているにもかかわらず、その割にはろ過水濁度が上昇しなかったことの原因を証明しているようだ。

次にそれぞれの実験においてろ過時間、ろ過速度とともに S_0 値がどのように推移するかを図-8 と図-9 に示す。この S_0 値は単に砂層最上層部における空隙内の抑留量を示すのみならず、砂層内で一番抑留量が多く、また最も早く飽和に達するという意味で、ろ過の進行につれて砂層内の抑留がどんな状態を経過して飽和に達するか、更に、それがどのように下層へ及

図-6 M^*-t curve (実験 I)図-7 M^*-t curve (実験 II)

んでいくかを顕著に示すという点において注目すべき値であろう。そしてこの値は粒子径、粒子の強度、間隙内流速などと、例えば強度が大きければ間隙内速度が大となり、剪断力が大となっても下層への移動は起こらないという具合に有機的に関連してくるであろう。

しかしどちらの場合もカーブの伸び方から飽和に達していないようだ。実験 I と II のどちらの場合も、 S_0 値は 120 m/日より 180 m/日の方が高くなり、以下 240 m/日から 360 m/日へと順次低い値をとっている。砂層内での抑留は粒子の強度、相互の付着力など懸濁粒子を抑留させようとする要素と、それに対抗して砂層深部へ運ぼうとする間隙内流速およびそれによる剪断力との相対的力関係によると考えられる。従って、それらがバランスする前後での S_0 値

はろ過速度の上昇によって逆転するはずであり、これは実験結果から明らかなように 180 m/日と 240 m/日の中間に存在するようだ。

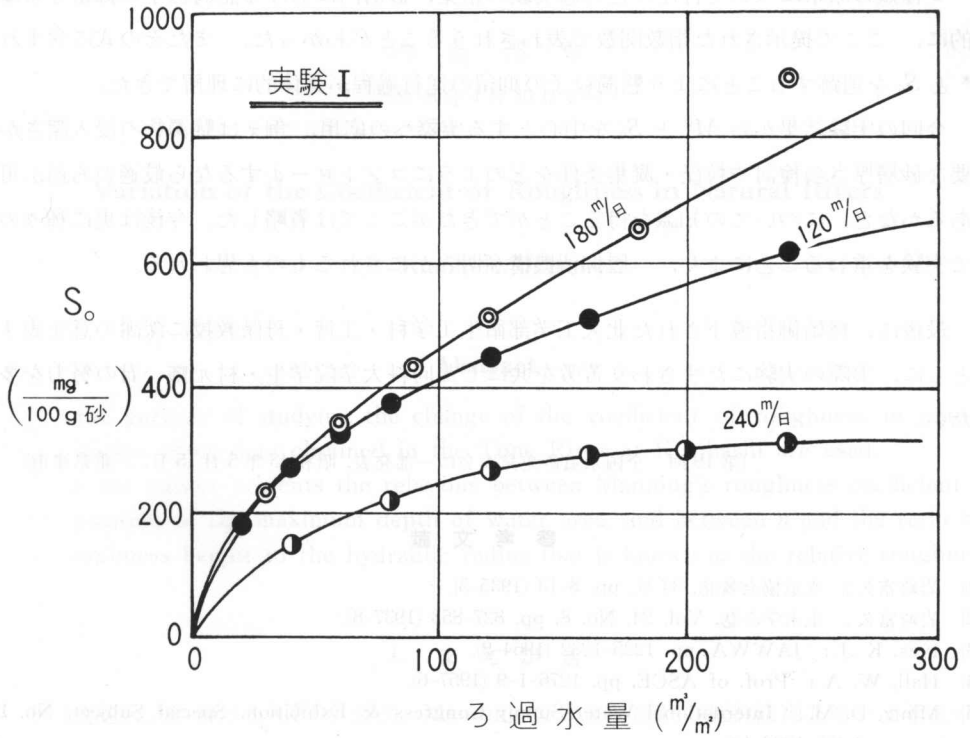


図-8 S₀ curve (実験 I)

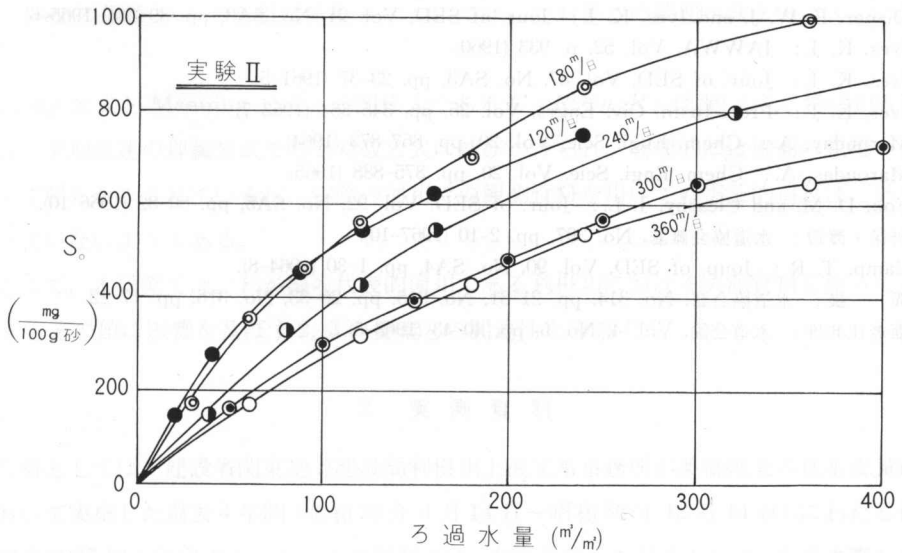


図-9 S₀ curve (実験 II)

4. あとがき

2種類の原水について行なつたろ過実験の結果、砂層内における懸濁粒子の抑留分布は近似的に、ここで提示された指数関数で表わされることがわかった。またその式に含まれる M^* と S_0 を追跡することにより懸濁粒子の抑留の進行過程が具体的に理解できた。

今回の実験結果から M^* と S_0 を中心とする実際への応用、例えば懸濁物の浸入深さから必要な砂層厚さの検討や粒径・凝集条件をどのようにコントロールするなら最適のろ過が可能であるかなど、についての知識を得ることができたがここでは省略した。今後は更に種々の条件で実験を重ねることにより、一層抑留機構が明らかにされるものと思われる。

最後に、終始御指導下された北大工学部衛生工学科・工博・丹保教授に深謝の意を表するとともに、実際の実験にたずさわり苦勞を共にした同科大学院学生・村元修一君の努力を多としたい。

(第19回 全国水道研究発表会に一部発表、昭和43年5月15日、三重県津市)

参 考 文 献

- 1) 岩崎富久：水道協会雑誌，34号，pp. 8-13 (1935-3).
- 2) 岩崎富久：土木学会誌，Vol. 24, No. 8, pp. 827-853 (1937-8).
- 3) Ives, K. J.: JAWWA, pp. 1225-1232 (1964-9).
- 4) Hall, W. A.: Prof. of ASCE, pp. 1276-1-9 (1957-6).
- 5) Mintz, D. M.: International Water Supply Congress & Exhibition, Special Subject, No. 10, pp. 1-32 (1966-10).
- 6) Ives, K. J.: Proc. Instn. Civ. Engrs. Vol. 16, pp. 189-193 (1960).
- 7) Diaper, E. W. J. and Ives, K. J.: Jour. of SED, Vol. 91, No. SA3, pp. 89-114 (1965-6)
- 8) Ives, K. J.: JAWWA, Vol. 52, p. 933 (1960).
- 9) Ives, K. J.: Jour. of SED, Vol. 87, No. SA3, pp. 23-37 (1961-5).
- 10) Ives, K. J.: Proc. Instn. Civ. Engrs. Vol. 25, pp. 345-364 (1963-7).
- 11) Marouday, A.: Chem. Engi. Scie, Vol. 20, pp. 867-873 (1964).
- 12) Maroudas, A.: Chem. Engi. Scie, Vol. 20, pp. 875-888 (1965).
- 13) Fox, D. M. and Cleasby, J. L.: Jour. of SED. Vol. 92, No. SA5, pp. 60-82 (1966-10).
- 14) 丹保・渡辺：水道協会雑誌，No. 397, pp. 2-10 (1967-10).
- 15) Camp, T. R.: Joup. of SED, Vol. 90, No. SA4, pp. 1-30 (1964-8).
- 16) 巽 一 巖：水道協会誌，No. 314, pp. 21-31, No. 315, pp. 26-33, No. 316, pp. 17-22.
- 17) 海老江邦雄：水道公論，Vol. 4, No. 5, pp. 40-43 (1968-5).