

複層ろ過の効率に影響を与える諸因子について

EXPERIMENTAL STUDIES ON VARIABLES EFFECTING EFFICIENCY
OF DOUBLE LAYERED FILTRATION

篠原 紀*・網谷 力**

By Osamu Shinohara and Chikara Amitani

1. 緒 言

逆粒度構成ろ過の一方式である複層ろ過に関するこれまでの研究は、水質的に安全性を確保しながら、浄水能力の量的増大を目指して、改良がなされてきた。

急速ろ過方式が19世紀末以降、主としてアメリカで発展するに伴い、1920年 J.H. Fuertes によりろ過砂の代りに、無煙炭が用いられ、続いて1935年 Baylis によって複層ろ過方式が紹介され¹⁾、研究が進むとともに実際池でも用いられるようになった。

筆者らのこれまでの研究によっても急速ろ過においては、フロク抑留のほとんどが表層部でなされることから²⁾、ろ床におけるフロク抑留量の増大は、下層部までのフロク浸入を促す必要があり、軽比重大粒径ろ材と重比重小粒径ろ材とを重ねる方式、すなわち、逆粒度層構成(図-1)が急速ろ過研究の効率追求の帰結として見出されたのである³⁾。しかるに、逆粒度構成ろ層の中でも複層ろ過池を研究の対象にとりあげたのは、既設の浄水場施設をそのまま用いて改良可能であり、多層ろ過のように高価な特殊ろ材を用いる必要もなく、しかも上向きろ過あるいはバイフローろ過のように⁴⁾、操

作上・施設面での複雑な配慮を必要としない、破碎無煙炭もしくは素焼きゼオライトろ材一砂ろ材からなる複層ろ過池の構成が最も好ましいものとして、研究を進めてきたものである。

急速ろ過のろ過理論については1937年の岩崎の理論式提案に始まって多くの研究がなされ⁵⁾、最近の Deb の研究^{6),7)} によって急速ろ過の浄化機構を多くの変数を一括解く試みがなされ解決の糸口は見出されたが、その実験条件から考えても複雑な因子の影響のすべてを包含するにはまだ多くの実験的な検討が必要であると思われる。

多層ろ過の理論は Mohanka の研究^{8),9)} が最も新しいものであり、多層ろ過の設計と応用についての Conley と Hsiung の研究¹⁰⁾ とともに重要な指針を与えている。

しかし、複雑な理論式と数値解析のゆえに、実際池にすべて応用するにはかなりの年月がかかると思われる。

本報告では、そうしたろ過装置の改良・設計および操作管理の現状に対し、ろ過現象を左右する多くの因子の相関関係を実験室の画一化された条件の下での資料を基準として、応用にも適用できるように考察されたものである。

2. 影響因子の選定と実験目的

複層ろ過のろ過効率に影響を与える諸因子を、次の3つのパターンに大別した。

- (1) ろ池水(ろ過池への流入水)性状
- (2) ろ層構成
- (3) ろ過操作

各パターンにおいて可能な限り、これまでの研究成果を基に、細かく因子を選び出すと次の通りである。

- (1) ろ池水性状

前処理においては、凝結、凝集および沈殿のプロセス

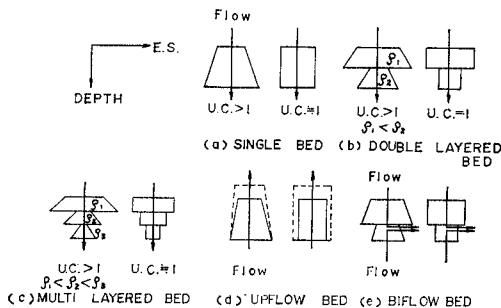


図-1 逆粒度層構成の各種模式図

* 正会員 近畿大学助教授 理工学部土木工学科

** 正会員 近畿大学助手 同

を経てろ池水の性状が種々変化するため、ろ過に関するこれまでの研究は統一性に欠け、効率比較に限られたものであった。実際池においては、凝集最適条件を個々の原水について見出し、操作しているのがこれまでの状態であり、ろ池水性状は、水質変化はもちろんのこと、フロクキュレーターや沈殿池の改良がメカニカルに行なわれたり、ポリマーを形成している PAC の使用、あるいは、種々の凝集助剤の注入によって千変万化し、それらがろ過池に与える影響を正確に定量的に把握することは不可能に近い。

ろ池水性状に関する因子としては、a) 注入薬品、b) 注入量、c) フロック形成過程が考えられる。

b) 注入量については、かなり詳細な実験的研究がなされている¹¹⁾ので、本研究では、a) ならびに c) について検討する。

(2) ろ層構成

ろ層構成に影響する因子としては、次にあげるようなものが考えられる。

a) ろ材粒径の大小

粒径の大なるものは水量的に、粒径の小なるものは水質的に効率が良いことは、すでに明らかにされているが、本研究では複層ろ過池の両層ろ材の最適粒径について検討する。

なお、ここでは都市上水道における浄水場のろ過池の改良あるいは新設を主眼としているため、工業用水処理にみられるような極端な大粒径のものは、研究の対象にしていない。

b) ろ材粒径のばらつき

これまでの多くの研究で示されてきたように、均等係数が大きいと、成層化された状態で表層部に小粒径ろ材が集積し、フロックによる閉塞が表層部だけに集中することから、ろ過効率を増大せしめるには、均等係数は1に近い方がよい。

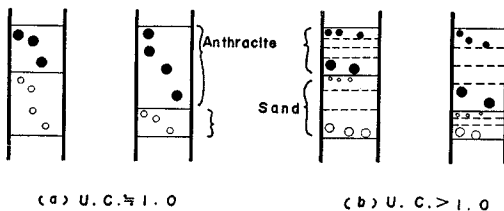


図-2 均等係数、ろ層厚比の違いとろ床成層化模式図

しかるに、複層ろ過池においては、図-2の模式図に示すように、ろ層厚さの違いによって、この均等係数の違いによる影響が大きく表われることが予想されるので、この点について検討する。

c) ろ材形状・空げき率

本研究ではろ材形状の違いをろ材の種類の違いによって比較してみた。立体的な形状の違いと、ろ材表面の微小凹凸の有無は空げき率の違いとなっても表われ、ろ過効率に与える影響は小さくない¹²⁾。

本実験では砂ろ材、アンスラサイトろ材および Zeolite を原料とした素焼きろ材を用いて比較検討した。

d) ろ層厚さ

最適ろ層厚さの決定はこれまで急速砂ろ過において限界厚さを求めることで研究されてきたが、複層ろ過池においては、フロック蓄積容量の増大の点から考えて、フロック浸入度に関連して上層部軽比重大粒径ろ材のろ層厚さの限界値を求めるためにも、その影響度を評価する必要がある。さらに、下層部の重比重小粒径ろ材層が水質的な安全帯となる点からもフロック浸入の深さごとのフロック性状の変化の追求に伴って限界厚を求める必要がある。

e) ろ層混合

ろ層混合についてはろ材粒径の大小、均等係数の違い、ろ層厚さの違いおよび逆洗膨張度の違いによって状態が変化してくるが¹³⁾、この混合状態がろ過効率におよぼす影響も検討する必要がある。なお、ろ層の成層化がろ過効率におよぼす影響も軽視できないので、本研究では、初期損失水頭の測定により条件統一を行なっている。

f) ろ層厚比

軽比重大粒径ろ層と重比重小粒径ろ層のろ層厚比の違いが、ろ過効率におよぼす影響を追求することによって最適ろ層厚比が決定される。ろ層厚比の最適条件は二つのろ材の均等係数によって変わってくるのが考えられる。

なお、ろ層厚比は、 l_a/l_s (l_a : アンスラサイト層厚、 l_s : 砂層厚) で表わす。

(3) ろ過操作

ろ過操作上問題となる因子としては、次のものが考えられる。

a) ろ過速度

ろ過速度の違いがろ過効率に与える影響は大きいですが、フロック浸入度と考え合わせて、ろ過速度の限界値をどう定めるかが問題になる。

b) 流速調整の有無

本研究では、現在大半の急速砂ろ過池が採用している定速ろ過方式に限定した。減速ろ過方式については、水質と操作管理上の両面から検討する必要があるが、データとしては、国際開発協会 (I.D.E.: International Development Association) の勧告があり、参考までにあげると、次の通りである¹⁴⁾。

- (1) 自動流出速度制御装置や表面攪拌装置を省略する。
- (2) 4.5 gpm/ft² (263 m/day) の平均速度で減速ろ過を使用する。
- (3) 最適砂粒径は実験によって決定してもよい。
有効径 0.7~0.6 mm 均等係数 1.7 以下のアンスラサイト 6 in (15.24 cm) 層を上層に、最大 0.8 mm~最小 0.6 mm を砂の有効径として用いる。総層厚は、最初の設計において 30 in (76.2 cm) にすべきである。

3. 実験装置・方法および条件

本報告に用いる実験結果資料は、すべて近畿大学理工学部土木工学科衛生工学実験室の、図-3 に示すようなモデルプラントによって得られたもので、ろ過池面積の大小の違いを除けば、その他は実物大である。

装置——

- (i) ろ過池：A型 直径 450 mm 2池（ろ過池面積は A-1 が 1550 cm²、A-2 が 1560 cm²）固定式表面洗浄装置付
B型 直径 100 mm 4池（ろ過池面積は全池共 78.5 cm²）汚染ろ材採取可能な構造で、内1池は実流速測定装置付、B-1~B-4 のろ過池は、図-4 に示すように中間部が解体できる構造になっている。フロック抑留現象を把握する場合は、数本のろ過筒を同一の床状態にして時間的なずれをもってろ過筒を取り出し、抑留されたフロック量を蒸発残渣で測定した。この資料と損失水頭観測資料によってろ層深さごとのフロック抑留の時間変化を解析することができる。
- (ii) 原液タンク 1筒（容量 2 m³）
- (iii) Sludge Blanket Clarifire 標準処理能力は

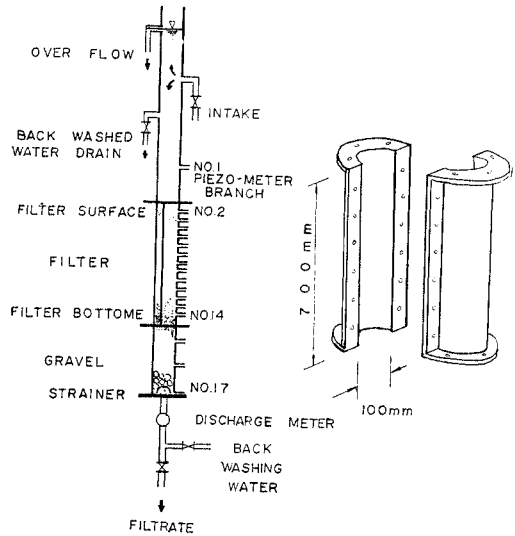


図-4 B型ろ過筒詳細図

2 m³/hr であり次のような3条件のフロック形成過程の違いを与える装置としている。

- (1) 凝結作用のみでろ過池に流入させる方式（図-3 図中記号 A—Micro Floc 方式）
- (2) 凝結・凝集させたフロックをすべてろ過池に流入させる方式（図-3 図中記号 B—実験室でよく用いる方式）
- (3) 凝結・凝集・沈殿のすべてのプロセスを経た上澄水をろ過池に流入させる方式（図-3 図中記号 C—実際池での方式）

以上の流入はすべて自然流下式である。

原水——東大阪市水道水にカオリンを混入したものを原水とした。

薬品——凝集剤としては、硫酸アルミニウムおよび PA C（ポリ塩化アルミニウム）、凝集助剤としては

SA（アルギン酸ソーダ）を用いた。本邦で上水道用水処理に広く用いられている凝集剤と助剤を使用したのは、他の研究報告との比較を容易にすること、応用面においても、かなり近似した値を得られると考えたからである。また、アルカリ剤としては、消石灰を用いた。

計測——測定は、各実験共時間間隔を統一し、前処

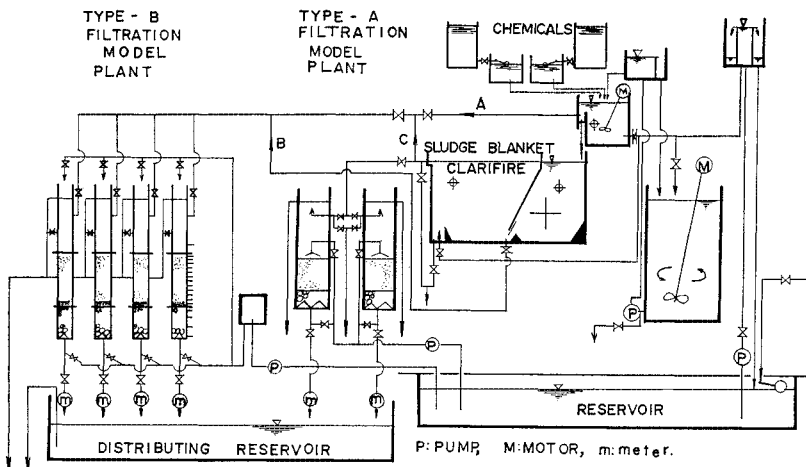


図-3 実験装置フローシート

表-1 単層ろ層での実験条件一覧

Run No.	Filter Media	Size (mm)	Depth (cm)	Filter Rate (m/day)	Coagulant & Coagulant Aid	Model Plant & Floc Formation Process (see Fig. 3)	Condition of Prefiltrate			Object for Experiment	
							Average Temperature (°C)	pH	Average Turbidity (unit)		
S 1	SAND	0.84~0.59	60	150	Aluminum Sulphate (4.2 ppm) only	Type B-1~B-4	A	14.2	6.4	17.7	1-a
S 2							B	12.1	6.6	19.4	
S 3							B	10.9	6.4	27.7	
S 4							A	10.5	6.4	27.9	
S 5	SAND	1.68~1.19	60	150	Aluminum Sulphate 5 ppm only	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type A	22.1	6.6	13.9	2-b	
S 6		1.19~0.84	60	150							
S 7		0.84~0.59	60	150							
S 8		0.59~0.42	60	150							
S 9	ANTHRACITE	1.68~1.19	60	150	Aluminum Sulphate 5 ppm only	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type A	21.9	6.6	14.5	3-c	
S 10		1.19~0.84	60	150							
S 11		0.84~0.59	60	150							
S 12	UNGLAZED FILTER MEDIA	1.68~1.19	60	150	Aluminum Sulphate 5 ppm only	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type A	22.3	6.5	16.2	3-c	
S 13		1.19~0.84	60	150							
S 14		0.84~0.59	60	150							
S 15		0.59~0.42	60	150							
S 16											

理関係では、水温、濁度、pH（自動記録計使用）、ろ過池では、ろ過速度、ピエゾメーターの読み取り、ろ水濁度を測定した。濁度は、一部自動記録させたが、それも含めてすべて複光路濁度計を用いた。閉塞がすすんだろ層にあっては、ろ速のわずかな変動でもフロクの移行に影響するため、ろ速の検定には、時間間隔を短くして、バルブ操作も、特に慎重を期した。

条件——本報告に用いた実験条件の一覧を、表-1 に単層ろ層、表-2 に複層ろ層における実験に関して示している。

4. 実験結果ならびに考察

(1) ろ池水性状

表-3 は、表-1 の Run No. S-1~4 ならびに、表-2 の Run No. D 13~24 について、ろ池水性状の違いに関する結果の概要を示したものである。

単層の実験結果は、図-5~図-8 に示す通りである。

図-5、図-6 は、硫酸アルミニウムのみを用い、図-7、図-8 は、硫酸アルミニウムと消石灰を用いた場合の総損失水頭の経時変化と、ろ層 5 cm 層当りの損失水頭の経時変化である。この実験では、アンストラサイト、素焼きろ材も同時に実験したが、図に示したような傾向は、ろ材の違いに関係なく、同じ傾向を示すので、その他の結果は省略した。以上の結果から次のことが導かれる。

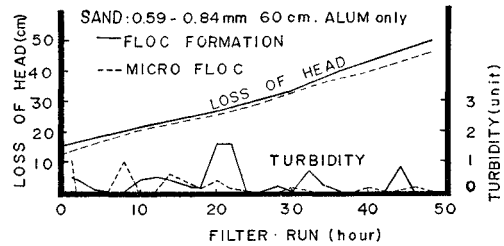


図-5 総損失水頭の経時変化とろ水濁質流出状況

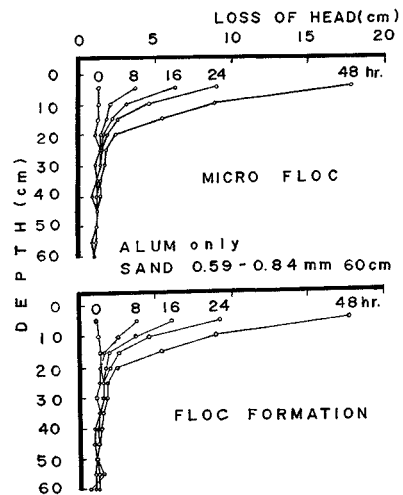


図-6 硫酸アルミニウム単独使用の場合の各層損失水頭の経時変化

硫酸アルミニウムのみ使用の場合には、損失水頭の経時変化はろ材の種類のいかんにかかわらず、いずれのフロ

表-2 Anthracite-Sand 複層ろ過に関する実験条件一覧

Run No.	Anthracite			Sand			Filter Rate (m/day)	Coagulant & Coagulant Aid	Model Plant & Floc Formation Process (see Fig. 3)	Condition of Prefiltrate			Object for Experiment	
	e.s. (mm)	U.C.	Depth (cm)	e.s. (mm)	U.C.	Depth (cm)				Average Temperature (°C)	pH	Average Turbidity (unit)		
D 1	0.7	1.5	15	0.7	1.5	45	150	Aluminum Sulphate (75 ppm)	Filtration : Type A-1 & A-2 Floc Formation : Type C	28.9	6.9	5.8	2-a 2-b 2-d 2-f	
D 2	0.7	1.5	15	0.5	1.5	45	150							
D 3	0.7	1.5	25	0.7	1.5	35	150							
D 4	0.7	1.5	25	0.5	1.5	35	150							
D 5	0.7	1.5	35	0.7	1.5	25	150							
D 6	0.7	1.5	35	0.5	1.5	25	150							
D 7	0.9	1.5	15	0.7	1.5	45	150							
D 8	0.9	1.5	15	0.5	1.5	45	150							
D 9	0.9	1.5	25	0.7	1.5	35	150							
D10	0.9	1.5	25	0.5	1.5	35	150							
D11	0.9	1.5	35	0.7	1.5	25	150							
D12	0.9	1.5	35	0.5	1.5	25	150							
D13	1.4	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Alum. (65~85 ppm)	Filtration : Type A-1 & A-2 Floc Formation : Type C	27.2	7.4	4.2	1-a 2-a 2-b	
D14	1.1	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Ca(OH) ₂ (35~50 ppm)						
D15	1.4	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Alum. (60~80 ppm) Sodium Alginate (0.5 ppm)						
D16	1.1	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Ca(OH) ₂ (35~40 ppm)						
D17	1.4	1.5	25	0.5	1.5	35	150	P.A.C. 4w/w% Solution (70 ppm)						
D18	1.1	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Ca(OH) ₂ 10 ppm						
D19	0.8	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Alum. (70~80 ppm)						
D20	0.5	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Ca(OH) ₂ (25~40 ppm)						
D21	0.8	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Alum. (70 ppm)						
D22	0.5	1.5	25	0.5	1.5	35	150	S.A. (0.5 ppm) Ca(OH) ₂ (35~50 ppm)						
D23	0.8	1.5	25	0.5	1.5	35	150	P.A.C. (70~75 ppm)						
D24	0.5	1.5	25	0.5	1.5	35	150	Ca(OH) ₂ 20 ppm						
D25	2.38~1.68	nearly 1.0	45	0.84~0.59	nearly 1.0	15	300	Alum. (16~35 ppm)	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type C	28.0	7.8	3.1	2-a 2-b 2-d 2-f	
D26			35			25								300
D27			25			35								300
D28			15			45								300
D29	1.68~1.19	nearly 1.0	45	0.84~0.59	nearly 1.0	15	300	Alum. (28~80 ppm)	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type C	27.4	7.6	1.9	2-a 2-b 2-d 2-f	
D30			35			25								300
D31			25			35								300
D32			15			45								300
D33	1.68~1.19	nearly 1.0	45	0.42~0.297	nearly 1.0	15	300	Alum. (52~80 ppm)	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type C	26.1	8.6	1.9	2-a 2-b 2-d 2-f	
D34			35			25								300
D35			25			35								300
D36			15			45								300
D37	1.19~0.84	nearly 1.0	45	0.42~0.297	nearly 1.0	15	300	Alum. (35~106 ppm)	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type C	8.1	8.0	5.4	2-a 2-b 2-d 2-f	
D38			35			25								300
D39			25			35								300
D40			15			45								300
D41	1.0	1.3	17.5	0.42~0.297	nearly 1.0	40	200	Alum. (35~60 ppm)	Filtration : Type B-1~B-4 Floc Formation : Type B	6.8	7.1	24.3	3-a	
D42	1.3	1.3	17.5			40								200
D43	1.0	1.3	17.5			40				300				
D44	1.3	1.3	17.5			40				300				
D45	1.0	1.3	17.5			40				400				
D46	1.3	1.3	17.5			40				400				

ック形成プロセスにおいてもあまり変わりはない (図-5)。

消石灰併用の場合は Micro Floc のほうが、フロック形成したものより、総損失水頭の経時変化は大きい

(図-7)。

硫酸アルミニウムのみ使用した場合、各層の損失水頭の経時変化の傾向は、フロック形成プロセス、ろ材の種類の違いにかかわらず表層でほとんど抑留されるが (図

表-3 ろ水水性状に関する結果概要

Run No.	Length of Run (hour)	Loss of Head (cm)								Break Through		
		0 hr. past	30 hr. past	60 hr. past	90 hr. past	120 hr. past	150 hr. past	180 hr. past	Final	0 ppm Running Time (hour)	1 ppm Over (hour)	2 ppm Over (hour)
S 1	48	13.9	33.0	—	—	—	—	—	45.7	12	—	—
S 2	48	15.9	33.6	—	—	—	—	—	49.0	8	20	—
S 3	20	14.3	—	—	—	—	—	—	71.8	12	16	—
S 4	12	14.4	—	—	—	—	—	—	89.5	6	7	—
D13	198	9.1	25.9	43.3	60.9	75.1	89.0	98.0	115.1	117	144	168
D14	198	9.7	30.4	48.9	68.8	90.4	106.0	115.0	135.5	147	153	186
D15	135	10.0	31.5	54.4	75.0	118.8	—	—	134.4	99	—	—
D16	135	11.1	37.6	62.3	83.4	133.5	—	—	144.0	111	—	—
D17	168	10.7	21.2	45.1	76.0	104.5	124.5	—	136.2	114	—	—
D18	141	10.8	24.9	51.4	90.1	118.7	—	—	135.9	111	—	—
D19	106	11.4	40.2	67.1	105.1	—	—	—	136.2	106	—	—
D20	63	14.3	77.7	127.6	—	—	—	—	135.6	63	—	—
D21	78	10.8	46.1	99.2	—	—	—	—	135.2	78	—	—
D22	48	13.5	87.5	—	—	—	—	—	141.1	48	—	—
D23	74	11.4	52.3	113.7	—	—	—	—	137.6	74	—	—
D24	40	14.2	93.2	—	—	—	—	—	136.8	40	—	—

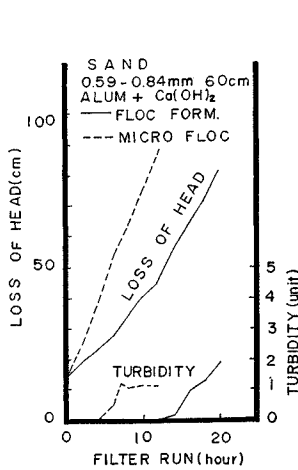


図-7 総損失水頭の経時変化とろ水濁質流出状況

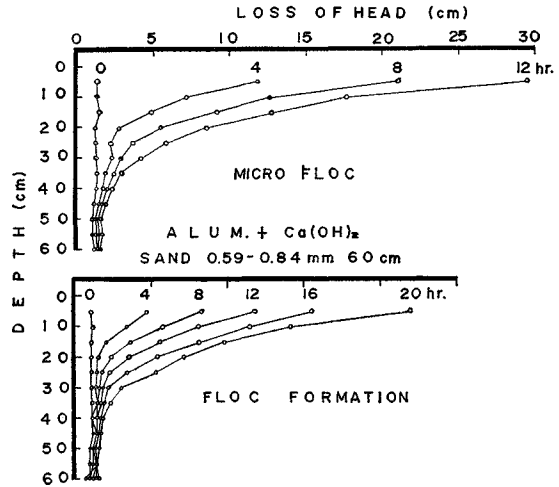


図-8 消石灰併用の場合の各層損失水頭の経時変化

—6), 硫酸アルミニウムと消石灰を用いて最適凝集条件を与えた場合, いずれのフロック形成プロセスにおいても, 内部ろ過の傾向を示し, 時間経過と共にフロックは深層へ浸入する(図-8)。さらに, ろ水濁度の流出状態を, 図-5, 図-7 に示しているが, これらから次のことがうかがえる。ろ水への濁質の流出は, 硫酸アルミニウムのみ使用した時, いずれのろ材についても, Micro Floc の場合, 濁度の低い部分で周期性を呈し, フロック形成の場合, 濁度の高い部分で周期性を呈しているが(図-5), 消石灰併用の場合, Micro Floc の方が, フロック形成ろ池水の場合より時間的に早く流出し始める(図-7)。

複層ろ層での実験は, フロック形成過程を同一条件下にした場合に, 使用薬品の違いによってもフロック性状

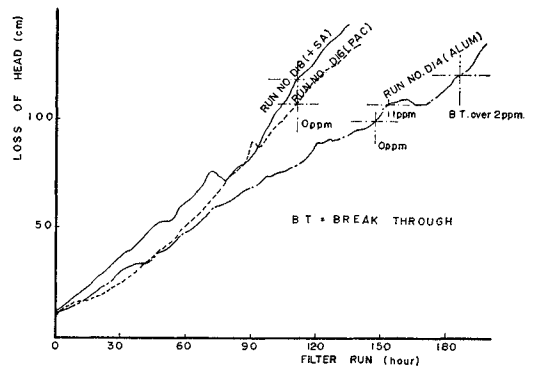


図-9 使用薬品の違いによる総損失水頭の経時変化

が異なることに着目して, それろ層内でいかに影響するかを検討するため行なったものである。

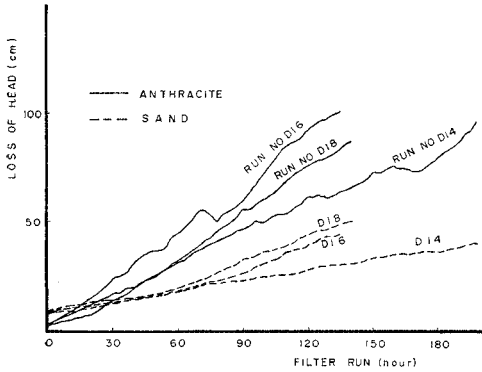


図-10 使用薬品の違いによる砂層アンスラサイト層損失水頭の経時変化

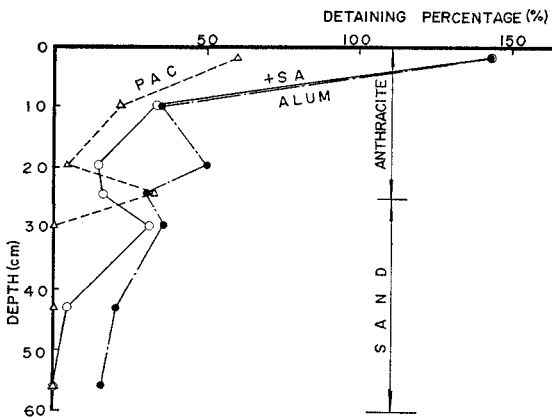


図-11 凝集剤の違いによるフロック抑留率

図-9 は、Run No. D 14, D 16, D 18 について、総損失水頭の経時変化を全層について表わし、図-10 は、アンスラサイト層および砂層について表わしている。

使用薬品の違いは、図-11 に示すようにフロック浸入の深さの違いとなって表われ、図-10 によっても明らかなように、PAC 使用の場合は、深層に達し、他二者の抑留のほとんどが、アンスラサイト表層でなされているのに比して、砂層表層での抑留が高い。このことはフロック径と密度および抵抗力の違いにより、フロック移動の状態が異なることを示している。

使用薬品の違いによる効率は、ろ水濁度を水質基準の2度以内に限定すれば、水量的には、硫酸アルミニウム単独使用が、PAC 使用、SA 併用以上の良い結果を得た(図-9)。

(2) ろ層構成

a) ろ材粒径の大小

ろ材粒径とろ材の種類の違いによるろ層内のフロック挙動については、表-4 に単層ろ層、表-5 に複層ろ層の実験結果の概要を示す。

表-4 単層ろ層の結果概要

Run No.	Length of Run (hour)	Loss of Head (cm)		
		0 hr. past	24 hr. past	Final
S 5	42	3.1	6.4	8.6
S 6	42	6.2	14.3	18.1
S 7	42	11.0	26.2	35.3
S 8	42	21.2	53.4	72.5
S 9	48	2.5	4.9	5.5
S10	48	5.8	8.8	12.8
S11	48	8.3	16.0	18.8
S12	48	19.9	47.8	52.8
S13	48	2.2	4.8	7.0
S14	48	4.8	11.5	15.8
S15	48	11.9	33.7	64.3
S16	48	17.7	43.9	82.8

この中で、特に粒径について、単層ろ層における考察をすると、次の通りである。

大粒径のろ層では、損失水頭の経時変化は小粒径に比してかなり少なく、ろ水への濁質流出は、大粒径ほど大きくなる(図-12)。

粒径が大なるほどフロック浸入深さは深くなり、小粒径より継続時間が長くなる(図-12)。

Run No. D 1~D 12 は、複層ろ過においてろ材粒径の大小を変化させてその影響度を知ることを目的としている。

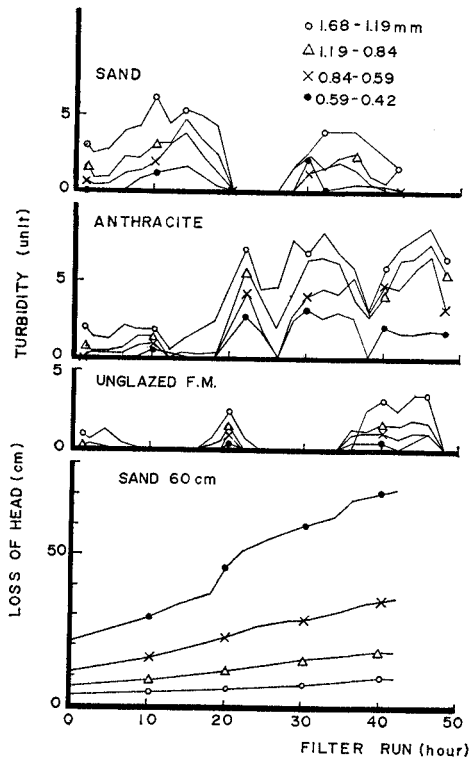
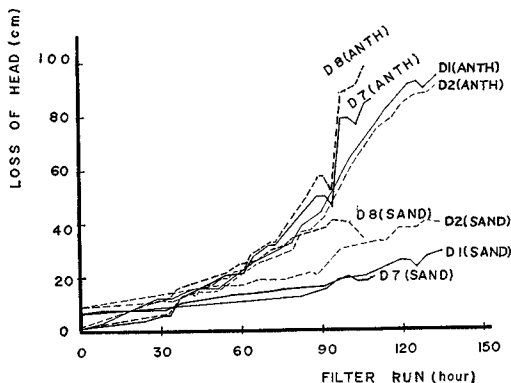


図-12 ろ材粒径とろ材の種類の変化による水濁質流出の変化と砂層総損失水頭の経時変化

表—5 複層ろ層の結果概要

Run No.	Length of Run (hour)	Loss of Head (cm)								Break Through		
		0 hr. past	30 hr. past	60 hr. past	90 hr. past	120 hr. past	150 hr. past	180 hr. past	Final	0 ppm Running Time (hour)	1 ppm Over (hour)	2 ppm Over (hour)
D 1	141	7.3	21.6	34.4	63.6	123.3	—	—	135.1	57	60	84
D 2	131	10.3	25.4	38.7	69.2	117.6	—	—	130.9	81	84	126
D 3	150	6.4	13.9	28.9	43.4	85.8	100.9	—	100.9	30	33	36
D 4	150	7.4	17.0	30.3	44.6	86.6	101.1	—	101.1	30	—	30
D 5	132	6.9	21.7	45.8	65.8	103.3	—	—	117.4	132	—	—
D 6	132	8.1	22.7	47.1	70.4	105.6	—	—	124.5	132	—	—
D 7	120	8.1	13.6	35.0	65.8	130.0	—	—	130.0	120	—	—
D 8	105	10.4	18.0	47.5	94.9	—	—	—	130.8	105	—	—
D 9	159	6.7	19.7	29.3	36.8	43.5	60.4	—	62.8	75	117	117
D10	159	9.4	25.0	35.9	45.2	56.2	59.5	—	66.3	75	120	120
D11	150	5.9	12.8	23.0	29.7	40.8	77.8	—	77.8	93	96	96
D12	150	7.9	14.9	25.0	32.2	44.4	78.5	—	78.5	93	96	96
D25	216	8.6	34.8	55.1	74.0	97.6	122.6	130.5	168.0	—	69	72
D26	184	10.7	39.8	67.1	90.2	116.7	146.7	160.5	168.0	—	33	75
D27	138.5	13.6	52.2	80.8	106.5	142.4	—	—	168.0	—	33	81
D28	104	19.2	69.7	108.7	144.6	—	—	—	168.0	—	66	—
D29	262	9.8	28.7	57.5	79.2	91.2	104.3	124.1	168.0	27	105	246
D30	222	12.1	34.7	66.6	87.9	104.4	113.4	137.2	168.0	30	102	—
D31	186	15.1	41.0	78.3	104.3	126.3	142.8	162.5	168.0	30	120	—
D32	132	17.9	50.0	93.9	135.2	150.1	—	—	168.0	30	—	—
D33	99	25.4	62.2	96.2	145.0	—	—	—	168.0	51	—	—
D34	74	35.9	79.2	127.8	—	—	—	—	168.0	63	—	—
D35	57	48.7	111.0	—	—	—	—	—	168.0	57	—	—
D36	39	67.8	154.7	—	—	—	—	—	168.0	39	—	—
D37	46	44.2	117.2	—	—	—	—	—	168.0	3	12	24
D38	34	61.6	156.3	—	—	—	—	—	168.0	24	27	30
D39	21	82.3	—	—	—	—	—	—	168.0	21	—	—
D40	13	94.3	—	—	—	—	—	—	168.0	13	—	—



図—13 アンスラサイト層、砂層の総損失水頭の経時変化

表—5 に総損失水頭の経時変化が示してあり、図—13 には、D 1, D 2 および D 7, D 8 について砂層、アンスラサイト層の総損失水頭の経時変化を示している。それらを考察すると、複層ろ過池においても砂ろ材の有効径が小なる方が、総損失水頭は大きい(表—5)。

また砂ろ材の粒径が小なる場合、砂層部での損失水頭値は、粒径が大なるものに比して、損失水頭値の比率が大きい。砂層部での損失水頭値の増加状態は、アンスラサ

イトろ材が大なるものほど大きくなっている。このことは、ろ過停止後のサンプルの抜き取り検査の結果からいえる。すなわち、アンスラサイト層の表層部での抑留度は最も高く、漸次下層に移り、砂層表層においていくぶん抑留度は高くなり、下層に移るにしたがって減少する。このことは損失水頭の測定結果からも裏付けられていて均等係数が1に近い場合についてもほぼ同様の結果を得ている。

さらに前述の表—5 の D 13~D 24 の実験条件から考察を進めると、図—14 には、60 cm 層厚が負圧0になるまでの時間とアンスラサイトろ材粒径の関係を示している。

ここでは均等係数 1.5 の場合は、有効径の大なるほど使用薬品に関係なく、ろ過継続時間は長いことを見出す。

さらに、図—15 は硫酸アルミニウム単独使用の場合の砂層およびアンスラサイト層の総損失水頭の経時変化を表わしている。これによると、アンスラサイトの有効径が 1.1 mm より大なる場合は、砂層部での抑留度が高くなる傾向にあり、小なる場合はアンスラサイト層での抑留度が高い。このことは、Run No. D 1~D 12 について前述した結果と同様である。

次に均等係数が1に近い状態における粒径変化の比較として、Run No. 25~Run No. 40 について考察すると、次のようである。

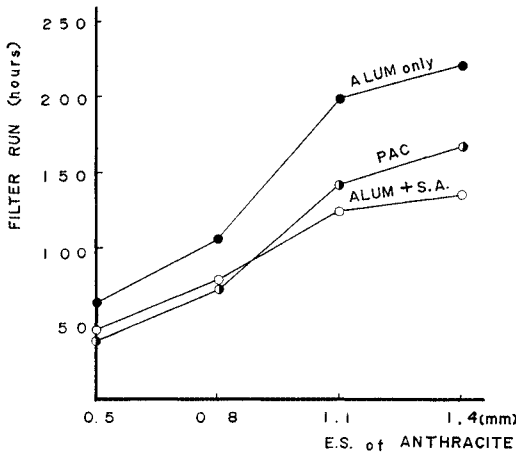


図-14 アンスラサイト有効径とろ過継続時間

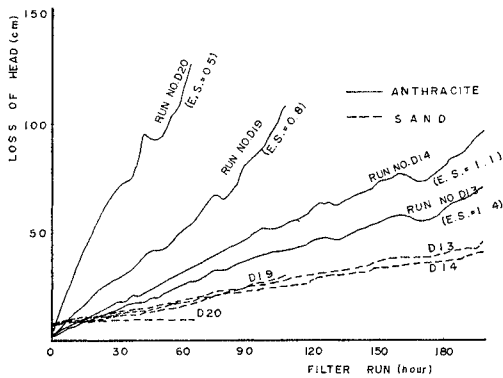


図-15 硫酸アルミニウム使用の砂層、アンスラサイト層総損失水頭の経時変化

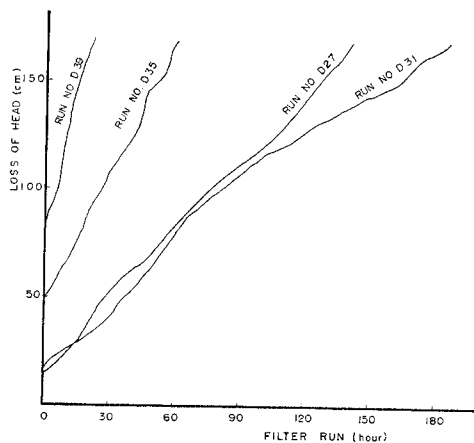


図-16 層厚比 $l_a/l_s=25/35$ における総損失水頭の経時変化

図-16 に層厚比 $l_a/l_s=25/35$ (Run No. D 27, D 31, D 35, D 39) についての総損失水頭の経時変化を示している。

Run No. D 27 と D 31 の砂ろ材粒径は同一径で、Run No. D 27 のアンスラサイト粒径は、D 31 より大きい損失水頭の経時変化は転倒している。このことは D 27 においてはアンスラサイト層でフロックのほとんどは抑留されず、砂層表層へ集積しているのに比して、D 31 が D 27 の砂層表層で負担している分をアンスラサイト層にも負担させているためであると考えられる。これは、層厚比 $l_a/l_s=35/25$ についても同様である。

つまり、均等係数が1に近い場合、後述の因子に関する効率比較とも考え合わせて、アンスラサイトが 1.68~1.19 mm、砂が 0.84~0.59 mm の場合が最も効率が良いといえる。

b) 均等係数

単層ろ層における均等係数が1に近い場合と、1より大なる場合については、表層部抑留と深層部への浸入に、かなりの差異を見出す。しかし、均等係数が1に近い場合においても、その量的な差こそあれ、表層部での抑留はかなり高く、このことはろ過機構の解明上、重要な要因となる。

均等係数が大きいほど表層での抑留が大きいことについて、定量的な把握は同実験装置を用いてすでに報告している¹⁵⁾。このことは、細菌除去の効率から判断してもいえる¹⁶⁾。図-17 に示す模式図は、単層ろ層の (a) $U.C.=1.0$ と (b) $U.C.>1.0$ の場合の各層損失水頭差の初期と末期の状態を示すものである。

Run No. D 1~D 12 と、Run No. D 25~D 40 において、 $U.C.=1.0$ と $U.C.>1.0$ について考察すると、単層ろ層同様抑留される量的な差はあるが、フロック抑留は両層の表層で大きく、均等係数が小なるほどフロックはそれぞれの層において浸入度が深くなる。

複層ろ過池にあっては、均等係数を大きくして水質的な安全性を確保するよりも、均等係数はできる限り小さくして、有効径を小さくすることによる方が、ろ層を有

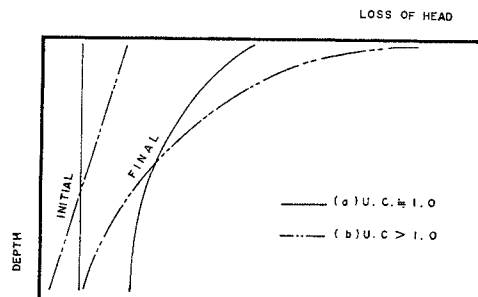


図-17 単層ろ層における各層損失水頭の均等係数についての比較模式図

効に使用できる。

c) ろ材形状・空げき率

図-12 にろ材形状・空げき率の異なる三種のろ材についての比較がなされている。そこで濁度流出と損失水頭の時間的変化から考えて若干の差が出ているが、あくまでも複層ろ過を考える場合は、比重の違いによる層組合せのろ過効率の相違に重点をおいて検討を重ねる必要がある。

本研究では、軽比重ろ材としてアンストラサイトをを用いた実験を主としているが、その他のろ材が現われても、ろ層組合せによる特性把握に考慮を払う必要がある。

d) ろ層厚さ

層厚は、その限界厚が 700 mm と施設基準では定められているが、現在各浄水場では千差万別である。

本研究では、複層ろ過の効率を考慮し、既設ろ過池の改良を目指すゆえに、さらに水質・水量の両面において、一応安全と思われる総層厚さとして 600 mm を採用した。

層厚を増すことによって損失水頭は増大し、水量的に不経済となり、減らすことによって水質的に安全性が損われる危険がある。

単層ろ層による補足実験として、本報告に条件等は記載していないが、層厚の違いによるフロック流出の状態を知るために、10, 20, 30, 40 cm 層厚の砂ろ層について、フロック形成プロセス、ろ過速度を変化させた実験を行なった。それによると層厚の違いによるフロック流出の傾向は、図-12 に示す粒径を変化させた場合と類似して、層厚が厚くなればなるほどフロック流出が少なく、水質的に安全となる傾向を知ることができた。

e) ろ層混合

複層ろ過池が、軽比重重大粒径ろ材と重比重小粒径ろ材の組み合わせによるものであるため、境界部における混合は不可避であり、従来より混合の是非は問題とされていた。筆者らのこれまでの研究で、ろ材粒径の大小、ろ材粒径のばらつき、ろ層厚比ならびに逆洗条件が、混合部形成の主因をなすものであることが判明している¹³⁾。

図-18 は、Run No. D 29~D 32 と Run No. D 33~D 36 について、停止時 5 cm 層当りの損失水頭を表わしている。

図-19 は Run No. D 30 と Run No. D 34 について、停止時の各層のフロック抑留状態（蒸発残渣による結果）と損失水頭を表わしている。

ここで、ろ材粒径の組み合わせと混合による影響を顕著に知ることができる。つまり、アンストラサイトろ材粒径と砂ろ材粒径の粒径比が大きいほど混合を起しやすく、混合したろ層については、均等係数が当然高くなるために、混合部でのフロック抑留は増加する。

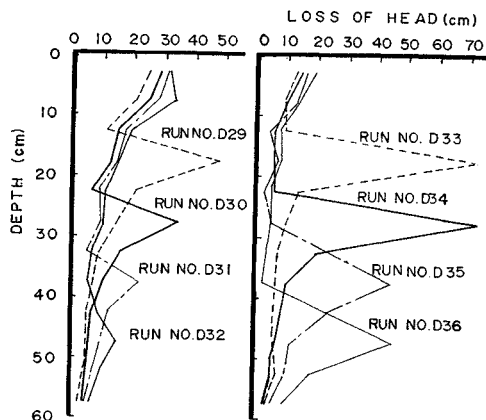


図-18 停止時 5 cm 層当損失水頭

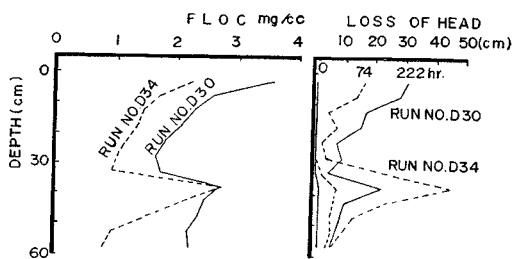


図-19 停止時 FLOC 抑留状態と各層損失水頭の比較

損失水頭の結果ならびに停止時ろ過筒を解体しろ材を採り出して測定した各層のフロック量の結果等から考察すると、次のことがいえる。

Run No. D 29~D 32 および Run No. D 37~D 40 においては、アンストラサイト層が薄いほど、混合部における抑留量は大きである。また Run No. D 29~D 32 においては、混合部よりもアンストラサイト層表層部の抑留量が大きとなる傾向にある。

Run No. D 25~D 28 にあつては、アンストラサイト層の薄い時は、境界層よりも下に抑留量のピークがあり、アンストラサイト層の厚い時は上にある。

粒径比が大きい場合、混合部での抑留量は全層を通じて最も大となる傾向にあり、アンストラサイト層が厚い時は、その傾向は小さく、薄い時はその傾向が大となる。

ろ過継続可能時間と濁質の流出から判断して、Run No. D 25~D 32 は水量的に、Run No. D 33~D 40 は水質的に効率が良いといえる。特に Run No. D 29~D 32 において、流出濁度の許容を 2 度とすると、継続中水質的にも、ほぼ良好な結果であると思われる。

f) ろ層厚比

均等係数が 1 より大なる場合としての Run No. D 1~D 12 の実験は、層厚比 l_a/l_s が 15/45, 25/35, 35/25 について検討しているが、図-13 について考察すると

次の通りである。

砂層が厚いものほど砂層粒径の大小の違いによる損失水頭の差は大きくなる。この傾向は、アンスラサイトの粒径が大なる方が顕著に表われている。

この実験における、損失水頭値とブロック浸入度の資料、さらに Break Through を考慮して判断すれば、砂層があまり小なるものは好ましくない。

すなわち、均等係数が1よりも大きい場合について、ろ層厚比に関して効率を比較すると、アンスラサイト層1/3、砂層2/3位が良好と見直し得る。

均等係数が1に近い場合としての Run No. D25~D40 の実験を通じて、水量的には、アンスラサイト層が厚いほど効率が良い傾向にあるが、表-2 の流出濁度ならびに各層でのブロック抑留の傾向から判断して、水質的、水量的に層厚比 l_a/l_s は、25/35~35/25 のあたりに最適な状態を見付ける。

(3) ろ過操作

a) ろ過速度

ろ過速度による比較をする場合、損失水頭の経時変化により、任意の時間における処理水量の大小と、ろ層が有効に使用されている状態を把握する必要がある。

つまり、図-20 に Run No. D41, D43, D45 について、すなわち 200, 300, 400 m/day についての比較を示しているが、ここで、負圧寸前までろ過継続をさせた場合、水量的には、300, 200, 400 m/day の順で、ろ層における抑留量から考えた効率はよいものと思われる。ろ水濁度が、0度を記録している時間(ろ水へ濁質流出を起こさない時間)を 図-20 の中に示しているが、水質の面から考察した場合の水量的な効率も 300, 200,

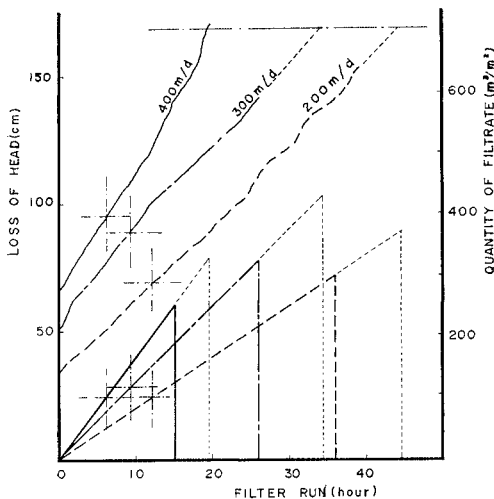


図-20 同一ろ層においてろ過速度を変化させた時の総損失水頭の経時変化と処理水量

400 m/day の順で良いと思われる。ろ水への濁質のその後の流出状態は、いずれのろ速条件にあっても類似したかなりの流出が見られた。

時間当りの処理水量 ($m^3/m^2 \cdot hr$) の効率から検討すれば、凝集薬品の違いと相まって、ろ速が高ければ高いほど効率がよいという傾向がある。

なお、前述の結果から、最適粒径条件と考えられる、Run No. D30, D31 においては、300 m/day のろ過速度でろ池水は2度の濁度で、120 時間前後ろ過が可能であることから、実際池において 300 m/day のろ過速度でも十分可能である。

5. 総括

都市上水道における、現在の施設基準を基にして、アンスラサイト-砂複層ろ過池の最適ろ層構成条件を以上の実験結果から判断すれば、全ろ層厚 600 mm, 定速ろ過、凝集剤は硫酸アルミニウムを主として用いることを条件として次の通りである。

- (1) 両層のろ材の均等係数は、1.0 に近いこと
- (2) 上層ろ材有効径は、1.4~0.9 mm, 下層ろ材有効径は 0.8~0.6 mm であること
- (3) ろ層厚比は、均等係数が、1.0 に近い場合、全ろ層に対する上層ろ層厚の比は、0.4~0.6, 均等係数が、1.0 より大きい場合は、0.3 付近であること

さらに、複層ろ過池の設計、操作を考慮する場合、施設条件ならびに使用ろ材の多様化に伴って、先に述べた条件のみでは考えられない場合が起こる。そこで以上の実験を基に複層ろ過池における諸因子のろ過効率におよぼす影響の傾向を総括すると次の通りである。

- (1) 標準的な凝集剤、助剤使用であれば、上層(たとえばアンスラサイト層)でそのほとんどの抑留がなされるのに比して、PAC 等高分子系の薬品を使用した場合は下層(たとえば砂層)表層での抑留が高い。
- (2) 下層ろ材の粒径が小なる場合、下層部での損失水頭値は、粒径が大なるものに比して、損失水頭値の比率が大きい。
- (3) 下層での損失水頭の増加状態は、上層ろ材が大なるものほど大きくなっている。
- (4) 上層の表層部での抑留度は最も高く、漸次深層に移るにしたがって減少する。
- (5) 上層ろ材有効径が大なるほど、使用薬品に関わらずろ過継続時間は長い。
- (6) 均等係数が1に近い場合でも、水質的には、ろ材粒径によって安全性を確保できる。
- (7) 両層ろ材の粒径比が大きい場合、混合部での抑

留量は全層を通じて最も大となる傾向にあり，上層が厚い時は，その傾向は小さく，薄い時は，その傾向が大となる。

(8) 下層が厚いものほど下層粒径の大小の違いによる損失水頭の差は大きくなる。この傾向は，上層ろ材の粒径が，大なる方が顕著に表われている。

(9) ろ層空けきの高効率利用の点から検討したろ過速度は 300 m/day 前後であり，時間当りの処理水量を考えれば，より高速化が可能となる。

謝辞：長期間にわたりまして，本研究に対し，数々の有益な討議を与えられ，終始変わらぬ激励を賜りました九州大学教授 上田年比古博士に，また，昼夜にわたる実験継続に，惜みなき協力を得ました，近畿大学理工学部土木工学科衛生工学研究室の元助手上井正隆氏ならびに昭和 42 年度～昭和 45 年度卒業研究生の諸君に，心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 寺岡 初・高木啓三：多層ろ過，用水と廃水，11：394 (May 1969)
- 2) 荒木正夫・仲山雄之助・篠原 紀：急速ろ過における表層部損失水頭変化に関する 実験的研究，水道協会雑誌 324：17 (Sep. 1961)
- 3) 篠原 紀：破碎無煙炭ろ過材の特性とその用いかたについて，水処理技術，6：21 (Sep. 1965)
- 4) Ives, K.J. : Progress in Filtration, Jour. A.W.W.A., 56 : 1225 (Sep. 1964).
- 5) 佐藤敦久：最近の濾過理論，用水と廃水，11：1 (Apr. 1969)
- 6) Deb, A.K. : Theory of Sand Filtration, Jour. of the Sanitary Engineering Division A.S.C.E., 95 : 399 (June 1969)
- 7) Deb, A.K. : Numerical Solution of Filtration Equations, Jour. of the Sanitary Engineering Division A.S.C.E., 96 : 195 (Apr. 1970)
- 8) Mohanka, S.S. : Multilayer Filtration, Jour. A.W.W.A., 61 : 504 (Oct. 1969)
- 9) Mohanka, S.S. : Theory of Multilayer Filtration, Jour. of the Sanitary Engineering Division A.S.C.E., 95 : 1079 (Dec. 1969)
- 10) Conley, W.R. and Hsiung, K.Y. : Design and Application of Multimedia Filter Jour. A.W.W.A., 61 : 97 (Feb. 1969)
- 11) 佐藤敦久：急速砂濾過における濾過機構に関する研究，東京大学学位論文 (1970)
- 12) 篠原 紀・網谷 力：ゼオライトを原料とする素焼きろ材のろ過特性，工業用水，149：36 (Feb. 1971)
- 13) 篠原 紀・赤枝和寛：複層ろ過池の逆流洗浄混合，第 20 回全国水道研究発表会概要集，p. 184 (May 1969)
- 14) Report on the High Rate Filtration : Experiment Design Division T.R.W.S.C. (Aug. 1962)
- 15) 篠原 紀・上井正隆：急速砂ろ過池閉塞現象の実験的研究，水道協会雑誌，397：11 (Oct. 1967)
- 16) 荒木正夫・遠山 啓・仲山雄之助・篠原 紀：急速濾過池における細菌除去の実験的研究，九州大学工学集報，33-4：223 (Feb. 1961)

(1971.1.5・受付)