

砂ろ過における懸濁粒子の砂層流出に関する研究

—ろ速変動のある場合*—

海老江邦雄**

(昭和46年9月29日受理)

An Experimental Study on the Break-through of Suspended Particles in Sand Filtration

by Kunio EBIE

There are four types of the break-through of suspended particles into the effluent, i.e.: 1) Initial break-through which is usually complete in 30 min. to 1 hr. from the start of a filter run; 2) Terminal break-through occurring toward the end of filter runs, especially when pretreatment is not sufficient; 3) Break-through which is caused by the fluctuations of the influent turbidity; and 4) Break-through resultant from the increased filtration rate.

This paper is an experimental study of the above-mentioned fourth break-through, with the purpose to understand more clearly the filtration phenomena under the increased filtration rate, of which a period lasts for 30 min. from point of 1.5 m total head loss.

As a result, it was disclosed how the value of total head loss changed during the increased filtration rate, and that the magnitude of increase in filtration rate was more contributive to the % of break-through of suspended particles from sand filter than others.

Some other observations are also presented.

1. まえがき

前処理を施された原水中に含まれる懸濁粒子はそのすべてが砂層内に抑留されてしまうわけではない。これは砂ろ過の抑留機構からくる必然の結果であって、原水およびろ材に関する多くのファクターならびにろ過池の運転条件をいかにコントロールし、設定するかによって、程度の差こそあれ常にその一部はろ過水中に流出してくるのである。

したがって、例えば、都市上水道にたずさわる水処理技術者は、このろ過水濁度がいかなる場合でも、少なくとも飲料水判定基準値におさまるよう不断の注意を払っているわけである。

このろ過水中への懸濁粒子の流出のタイプは図1に示すように分類される。

(A)は、原水濁度に変動のない定速運転時のろ過水濁度の推移を示したものであるが、問題

* 第22回全国水道研究発表会で一部発表、昭和46年5月27日、熊本県熊本市にて

** 北見工業大学土木工学科

となるのは、低濁が長時間継続する安定清澄期の前後にみられる初期流出 (Initial Break-through) と終期流出 (Terminal Break-through) である。前者はろ過開始時に見られるもので、主として砂層のろ過能力が十分に熟成していないことに起因する流出である。また、後者はろ過が進行し砂層の損失水頭がかなり大きくなつた頃に見られるもので、特に砂層内空隙の閉塞が進行した上層部における懸濁粒子の沈でん可能部や付着可能部の減少による抑留確率の低下に加えて、流速の増加によるせん断・剝離作用の活発化、ならびに Re 数の増大による懸濁粒子の細粒化など、これらすべてが相乗的に作用して懸濁粒子の下層への流送力を助長するものと推測される。

また (B) は、流入原水濁度の上昇に伴う流出であつて、現今においても、流入原水濁度の変動に対し速やかに凝集剤注入量を追従させえないことによる一時的な凝集剤量の不足 (Al-T 比の減少) またはフロック体積の増加などによる抑留確率の低下に起因すると判断される。

さらに (C) は、ろ過池の運転操作の都合上やむなく行なうろ過速度変動 (上昇) に起因する懸濁粒子の流出である。

この際の流出は、現象的には (A) の終期流出を強制的に惹起させているもので、抑留懸濁粒子が強いせん断・剝離作用を受けて砂層内を移動・流出してくるものと考えられる。

(A) の流出に対しては、その防止対策など不十分ではあるが過去に幾つかの実験的検討^{1)~3)} が行なわれているものの、(B), (C) の変動に伴う懸濁粒子の流出に関するろ過現象、つまり損失水頭の挙動ならびにろ過水濁度への応答についての系統だった研究⁴⁾ は今まで殆んど行なわれていない。

本論は、ろ過速度をろ過の後期に一定量上昇させた場合の砂ろ過現象を、変動要因としてろ過速度変動 (2 水準)、砂の径 (3 水準)、凝集剤注入量 (3 水準) を取りあげて実験的に検討したものである。なお、実際のろ過運転との多くの関連性についてはここではふれない。また、(B) の流入原水濁度の変動に伴うろ過の諸現象については統報に譲るとして、それと合わせて、従来とは別の角度から、つまり動的変動現象から砂ろ過の機構を一層明確にしていくことが究極の目的である。

2. 実験

2.1 実験装置と実験条件

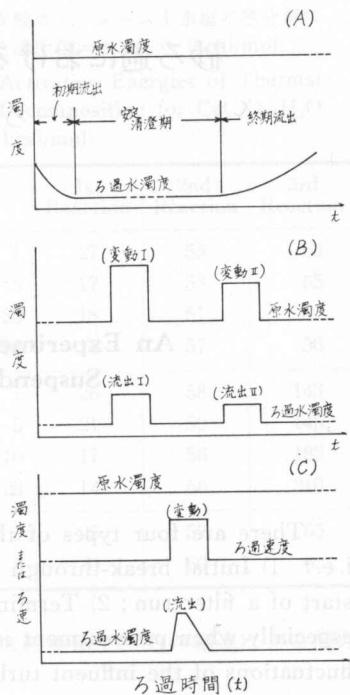


図 1 ろ過水中への懸濁粒子流出の型

Fig. 1. Types of Break-through of Suspended Particles into the effluent.

実験に使用した装置は、本学河海工学実験室内に設置されたマイクロフロックを含む原水を直接ろ過する、いわゆるシステム変換された小型水処理プラントで、ろ速変動を付加する部分を除いては前報⁵⁾に詳細に述べた通りであるが、その概略を図2に示す。また、実験に使用した原水は本学水道水でその水質試験の結果を表1に示す。この原水に対し予め調整しておいたカオリン懸濁液を薬注ポンプを用いて注入することにより人工的な加濁を行ない、その後ただちに凝集剤として液体硫酸アルミニウムの所定量を加えて急速かくはんを行ない、ろ過筒へ流入させた。今回の実験におけるカオリン添加量は原水濁度が20度となるよう注入した結果、測定による全実験を通しての平均流入原水濁度は20.7度(最小19.7度～最大21.7度)となり、当初の目的は達せられた。さらに、凝集剤注入量は、直接ろ過法であること考慮し、Jar Testによる最適注入量の40 ppmの他、20 ppmと10 ppmの3水準を採用した。

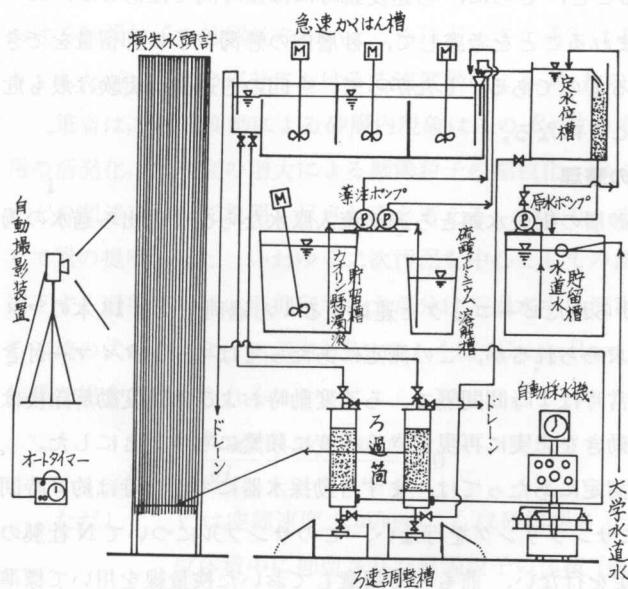


図2 実験装置の概略

Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

次に、ろ過筒内に充填された3種類の砂はともにN社製のろ過用珪砂で、その粒径については表2の通りである。これらの比重は2.63であり、初期空隙率44.4%にて60cm厚に充填された。さらに、ろ速変動を加えない時期の基準のろ速としては240m/dayを採用し、ろ速変動の大きさは40m/day(16.7%)と80m/day(33.4%)の2水準とした。ろ速変動の継続時間は30分間である。

表1 水道水の水質

Table 1. Quality Characteristics of Tap Water

水温	(°C)	9.5
pH		6.9
濁度	(ppm)	<1
COD as O ₂	(mg/l)	0.91
4.3アルカリ度 as CaCO ₃ (mg/l)		57
Ca ²⁺	(mg/l)	8.43
Mg ²⁺	(mg/l)	2.26
硬度 as CaCO ₃	(mg/l)	30.5
Mn ²⁺	(mg/l)	0.08
Fe ²⁺	(mg/l)	0.10
Fe ³⁺	(mg/l)	0.06
Cl ⁻	(mg/l)	4.18
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	16.6
SiO ₂ (比色)	(mg/l)	32.8
電気伝導度	(μΩ/cm)	94.1

表2 使用砂とその平均径

Table 2. Average Sizes of Sand

砂の径	フルイ目の開き (mm)	幾何平均径 (mm)	顕微鏡測定 による平均 径の10%径 (mm)
小砂	0.59~0.71	0.65	0.74
中砂	0.71~0.84	0.77	0.91
大砂	0.84~1.00	0.92	1.03

なお、実験の結果を統計的に解析することを前提として、実験の順序はランダムに行なわれた。

2.2 ろ過変動の加え方とろ過変動を加える時期

ろ過変動は、装置最下流端に位置するろ過調整槽にサイフォンの原理を応用した別系統のろ過水引き出し用のパイプを付設し、ろ過運転に先立って所定の流量が流出するよう検定を行なったのち固定し、ろ過変動時までサイフォンを切っておいた。ろ過運転開始後、正味の総損失水頭が1.5mに達した時点でこのパイプを吸引してサイフォンをきかせ、30分間のろ過変動を加えた。この時間の経過の後、再びサイフォンを切って基準ろ過での運転を続行させた。

なお、ろ過変動を加える時期として正味の総損失水頭が1.5m発生時としたのは、実際の都市上水道における許容損失水頭が2.0~2.5m程度⁶⁾であること、清浄砂層の損失水頭が表2の小砂で約48cm(水温13°C)生ずること、さらに、ろ過変動時には短時間ではあるが、25~50cm程度の損失水頭の上昇が見込まれることを考慮して、砂層内の懸濁粒子の抑留量ができるだけ多い時期で統一したことによるものである。したがって、今回のろ過変動実験は最も危険側でのろ過現象を観察したということになる。

2.3 実験における測定とデーターの整理

実験における経時の測定項目は砂層の損失水頭とろ過筒流入原水ならびに流出ろ過水の濁度である。

損失水頭は砂層5cm間隔に設けられたピーコックと連絡する1ろ過筒あたり13本のマノメーター中の水位を読むことにより求められるが、この測定にあたってはオートタイマー付きカメラにて自動撮影を行なった。平常時は1時間間隔で、ろ過変動時およびろ過変動解除後は損失水頭の変動が激しいため、その動きを忠実に再現できる程度に頻繁に写すことにした。

また、流入原水とろ過水の濁度測定にあたっては、まず自動採水器にて平常時は約2時間間隔で、ろ過変動時には2~3分毎にサンプリングを行ない、このサンプルについてN社製の積分球式濁度計によるHaze値の測定を行ない、前もって用意しておいた検量線を用いて標準カオリン濁度に換算した。

一方、フィルムにおさめた損失水頭は、現像の後、スライドプロジェクターにてスクリーン上に写し出し個々の読みを取った。以上のようにして得られたデーターを基に、現象の解析を行なったわけである。

なお、後に損失水頭配分率(%)と流出濁質率(%)という語句がでてくる。前者は正味の総損失水頭に対する相隣るピーコック間(5cm間隔)の正味の損失水頭の比率を百分率によって示したものである。また、後者はろ過変動を加えるまでに砂層に抑留された濁質量に対するろ過変動により流出してきた濁質量の比率を百分率で表わした値である。また、この場合のろ過変動により流出してきた濁質量としては、ろ過変動時の実際の流出濁質量からろ過変動が加えられるまでの平均流出濁質量の相当分を差し引いた値を採用した。

3. 実験の結果と考察

3.1 ろ過運動現象と総損失水頭の動き

ろ過運動のある時期にろ過運動（上昇） V' (cm/sec) が加えられると、砂層の空隙内流速は V'/f (cm/sec) だけ急激に増加する。ここで、Camp の Re 数表示⁷⁾ を用いるならば、次のように変化する。

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu \sqrt{f(1-f)}} \longrightarrow Re' = \frac{(V+V') \cdot d}{\nu \sqrt{f(1-f)}}$$

ただし V は空筒速度 (cm/sec), ν は水の動粘性係数 (cm²/sec), f は砂層の空隙率 (無次元), d は砂の代表径 (cm)

さらに f は砂層の位置 L とろ過時間 t により変化する変数である。すなわち、 f は砂層上部における懸濁粒子の抑留量の多いところほど、また通常はろ過経過時間の長いほど小さな値となり、したがってこの部分におけるろ過運動による Re 数の増加が最も著しくなるわけである。

筆者は、ろ過運動による砂層内現象はこの Re 数の増加と抑留懸濁粒子のせん断・剥離作用の活発化、乱流域の増大による懸濁粒子の細粒化、およびそれに伴う相対的な抑留確率の低下との関連において説明し尽されると考える。つまり、ろ過運動によっては砂層上層部の主として異の提唱⁸⁾ した、いわゆる二次汚泥を中心としての流出が起こるものと推定され、砂層を流下する過程で一部は再抑留され大部分はろ過水中に流出してくる。また、この状況下における連続の式は次のように示され⁹⁾、ほふく流 (Creep flow) に関する第三項を無視し得なくなる特異な場合と考えられる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{V \cdot \partial C}{\partial L} + \frac{\partial (V_c \cdot C_c)}{\partial L} = 0$$

ただし V は空筒速度 (cm/sec), L は砂層深さ (cm), t はろ過時間 (sec), σ は砂層単位体積中に抑留された懸濁粒子の体積 (無次元), C は砂層を流下する水単位体積中の懸濁粒子の体積 (無次元), V_c はほふく流の速度 (cm/sec), C_c は砂層単位体積中のほふく流の体積 (無次元)

この式を他の抑留の基本式とともに、理論と実験の両面から解いていくことは今後の課題である。以上のように、ろ過運動による懸濁粒子の移動・流出は本質的には流体力学的な現象ではあるが、懸濁粒子の、例えばせん断に対する強度などの物性に影響する諸要因を無視するわけにはいかないだろう。

ここでは、砂層内で起こっている現象を間接的ではあるが総損失水頭の動きを観察することにより推測してみる。

図3に正味の総損失水頭の推移について実験結果の一部を、さらに図4にはろ過運動時付近の正味の総損失水頭の推移の詳細図を示す。図中の P_1 から P_6 に至る過程は次のような状況

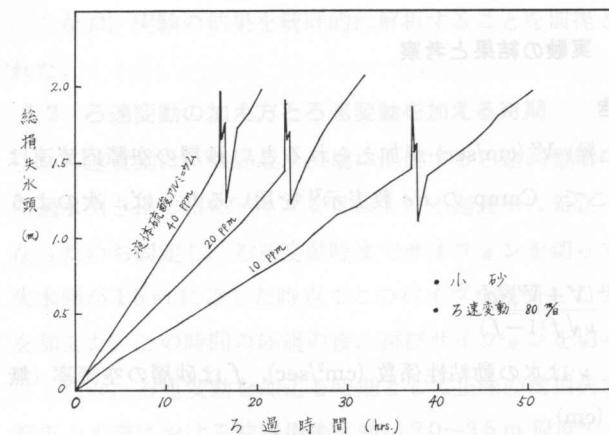


図 3 総損失水頭の動き

Fig. 3. Total Head Loss vs. Filtration Time

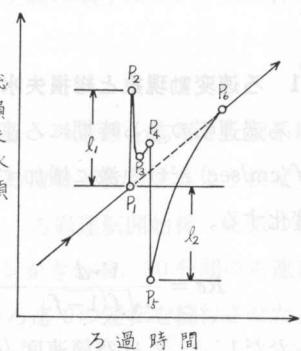


図 4 ろ速変動時の総損失水頭

Fig. 4. Details of Total Head Loss Change at the Increased Filtration Rate

である。 P_1 は正味の総損失水頭が1.5 mとなり、ろ速変動が加えられた点であるが、その後損失水頭は急速に増加し、約1.5分後にピーク P_2 に到達する。その後、損失水頭は急速に低下して約3.5分で P_3 に達する。外見上からは、懸濁粒子の移動・流出は P_2 近辺で開始し、ろ速変動時における最小の損失水頭を示す P_3 ではほぼ治まり、砂層内は変動時のろ速と一時的にバランスすると考えられる。その後、徐々に損失水頭は増加し P_4 に至る。ここでろ速変動を解除して基準ろ速にもどすと損失水頭は減少して約3.5分で最低点 P_5 に達した。また P_6 点は、その後再び空隙に懸濁粒子が抑留されて P_1 の延長線上に立ち返った点である。

次に、この推移の過程における l_1 と l_2 に注目してみよう。 l_1 は砂層内に抑留された懸濁粒子がろ速変動に対してどの程度まで抵抗しうるか、つまり、抑留懸濁粒子総体としての強度に関係する一つの指標とみることができる。また、ろ速変動の加えられ方によっても影響され、それが急速であれば砂層内がバランスしないままに大きな値を示し、緩速であれば抑留懸濁粒子を徐々に流出させながら進行するので、小さな値を示すことが予想される。今回の実験における平均値は、ろ速変動については40 m/日で24.4 cm, 80 m/日で39.9 cmと差異が顕著であったのに対し、凝集剤注入量については40 ppmで32.6 cm, 20 ppmで31.8 cm, 10 ppmで32.1 cm, また砂の径については小砂で33.8 cm, 中砂で31.2 cm, 大砂で31.6 cmと共に有意な差は認められなかった。 l_2 は砂層内に抑留された懸濁粒子の移動・流出量の指標になるものと考えられるが、実験データーを基にろ速変動、砂の径、凝集剤注入量の三つの要因について行なった分散分析¹⁰⁾の結果を表3に示す。 l_2 の変動におよぼす各要因の寄与率は、ろ速変動が最も高く、砂の径、凝集剤注入量の順であった。また、F検定の結果、ろ速変動は有意水準1%で有意(**), 砂の径は有意水準5%で有意(*)となった。実験における平均値は、ろ速変動については40 m/日で15.7 cm, 80 m/日で32.8 cmと著しい差が現われた。砂の径については、小砂で20.8 cm, 中砂で23.8 cm, 大砂で28.1 cm, 凝集剤注入量については40 ppmで21.7 cm,

表 3 l_2 の変動解析 (三元配置法による)Table 3. Analysis of the Variance for lost head l_2 by Increased Filtration Rate

要 因	反復数	範 囲	純効果	寄与率 (%)	F 検定
砂 の 径	3	0.59~1.00 mm	127.0	7.2	*
ろ速 変動	2	40~80 m/日	1,292.9	73.4	**
凝集剤注入量	3	10~40 ppm	66.4	3.8	—
そ の 他	—	—	273.8	15.6	—
合 計			1,760.1	100.0	

20 ppm で 23.8 cm, 10 ppm で 27.3 cm となっている。また、 l_1 と実際の流出濁質率(%)との関係は図 5 に示す通りであるが、どの凝集剤注入量においても損失水頭の変動の大きい場合ほど流出濁質率が高くなっている。予想通りの結果が得られている。

3.2 各砂層の損失水頭配分率とその動き

ろ速変動が加えられる直前、つまり正味の総損失水頭が 1.5 m 発生時における損失水頭配分率を、図 6 に示す。砂の径についてみると、上層部においては砂の径の小さいものほど損失水頭配分率が高く、逆に下層部においては砂の径の大きいものほど高くなっている。つまり、砂の径の

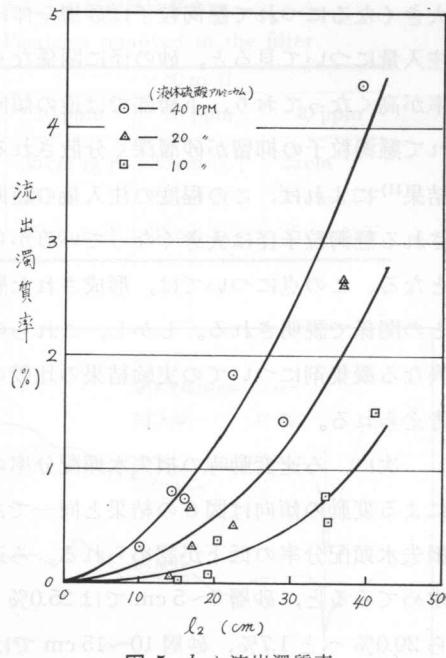


Fig. 5. l_2 vs. % of the Break-through of Suspended Particles

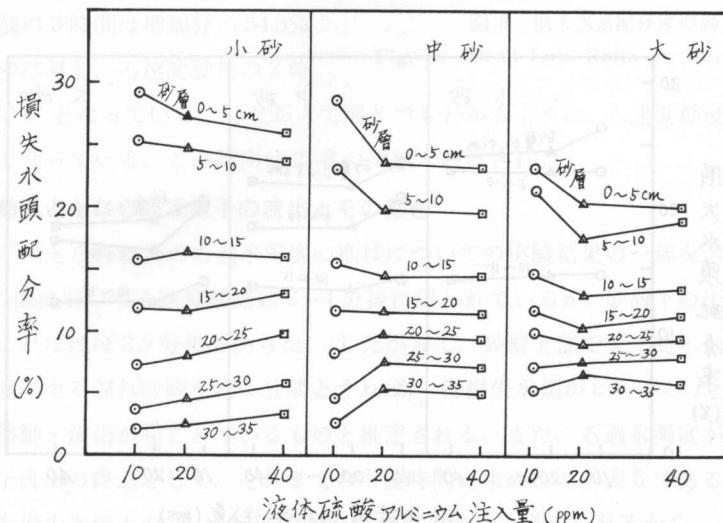


図 6 総損失水頭 1.5 m における各砂層の損失水頭配分率

Fig. 6. Head Loss Ratio in the Individual Sand Layer at 1.5 m Total head Loss

大きくなるにつれて懸濁粒子は砂層全体に分散して抑留される傾向が見られた。また、凝集剤注入量について見ると、砂の径に関係なく、注入量の少ないものほど上層部での損失水頭配分率が高くなっている、下層部では逆の傾向が見られる。したがって、凝集剤注入量を増すにつれて懸濁粒子の抑留が砂層深く分散されるということになる。筆者の顕微鏡写真による判定の結果¹¹⁾によれば、この程度の注入量の範囲においては、凝集剤注入量の多いほど前処理で形成される懸濁粒子径は大きくなっているから、径の大きな懸濁粒子ほど砂層深部へ浸入することとなる。この点については、形成された懸濁粒子のせん断強度の大小と砂層表面との接触点数との関係で説明される。しかし、これらの傾向がすべての条件で成立つとは考えられず、特に異なる凝集剤についての実験結果の比較の場合には、今回と異なる挙動を示すことは十分に考えられる。

次に、ろ速変動時の損失水頭配分率の最低値の動きを図7に示す。砂の径、凝集剤注入量による変動の傾向は図6の結果と同一であるが、抑留懸濁粒子の流出に伴って、これら各層の損失水頭配分率の低下が認められる。ろ速変動により減少した各層の平均の損失水頭配分率を求めてみると、砂層0~5 cmでは25.0%から22.2%へと2.8%，砂層5~10 cmでは21.7%から20.0%へと1.7%，砂層10~15 cmでは14.9%から13.6%へと1.3%の低下となり、上層ほど移動・流出する懸濁粒子量が多いことを示している。

さらに、ろ速変動によって砂層のどの辺の位置までの抑留懸濁粒子が相対的に流出したのかを、ろ速変動前後の実際の損失水頭の動きより求めてみたのが表4である。大雑把な傾向としては、砂の径の小さいほど、また凝集剤注入量の少ないものほど、より深い砂層まで抑留懸濁粒子の移動・流出が起こっているもようである。これらの結果と、先の l_2 の動きとを絡み合

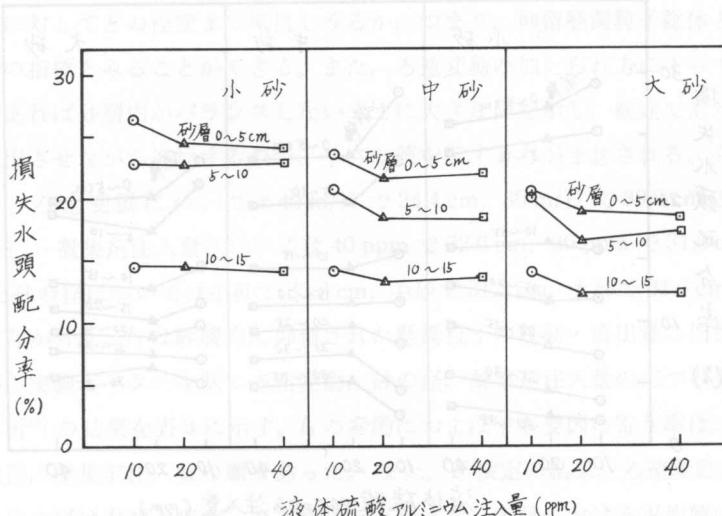


図7 ろ速変動時における各砂層最低の損失水頭配分率

Fig. 7. Minimum Head Loss Ratio in the Individual Sand Layer during the Increased Filtration Rate

表 4 ろ過変動による砂層内抑留懸濁粒子の移動流出深さ

Table 4. Movement Depth of Suspended Particles removed in the filter

砂の径	ろ過変動 40 m/日			80 m/日		
	凝集剤 10 ppm	20 ppm	40 ppm	10 ppm	20 ppm	40 ppm
小砂	25 cm	25 cm	25 cm	35 cm 以下	35 cm 以下	25 cm
中砂	35 cm 以下	35 cm 以下	30 cm	30 cm	35 cm 以下	35 cm 以下
大砂	35 cm 以下	35 cm 以下	20 cm	35 cm 以下	35 cm 以下	35 cm 以下

わせて考えてみると、砂の径の大きいものほど形成された懸濁粒子の密度が高くなり上層抑留の傾向を示すものの、ろ過変動時には、逆に凝集剤注入量の少ないものほど砂表面またはすでに抑留された懸濁粒子との付着力が弱いと推定されるゆえ、 Re 数のわずかな上昇に対してもかなり下層までの移動・流出が認められたのであろう。

図 4 の P_5 から P_6 はろ過変動によって懸濁粒子を流出させた空隙への再抑留の過程を示すものであるが、この時期の上層においては非常に高率の抑留傾向がみられた。例えば、図 8 で上層 10 cm についてみるとろ過変動前の 3 時間は増加分の 54.5% を占めているのに対し、ろ過変動後の 2 時間平均では 74.3% となっている。したがって図 8 でもわかるように、ろ過変動後の損失水頭配分率が急に高くなっている。この傾向は 2, 3 の実験で観察された。

3.3 ろ過変動にともなう懸濁粒子の流出とその動き

ろ過変動が加えられた後のろ過水濁度の推移についての実験結果の一部を図 9 に示す。最高濁度は、この図においてろ過変動開始 2~4 分後に現われているが、砂層下の圧力水室の肉眼による観察によればほぼ 2.5 分後であった。したがって、砂層上部でせん断・剥離された懸濁粒子が圧力水室に至る遅れ時間を約 1 分間とすれば、総損失水頭がピークの P_2 に到達したあたりで最大の移動・流出が起こっているものと推定される。また、ろ過水濁度が 1 度に低下した点を懸濁粒子流出の終点として、それまでの所要時間求めたのが表 5 である。懸濁粒子の移動・流出は総損失水頭上の P_3 に至る約 5 分間で終了すると考えられるから、その後に長く流出が起こっているのは主として圧力水室内での希釈混合によるものと判断される。

ろ過水中に流出してきた懸濁粒子量の動きは表 6 に示す通りである。 I_2 および損失水頭配

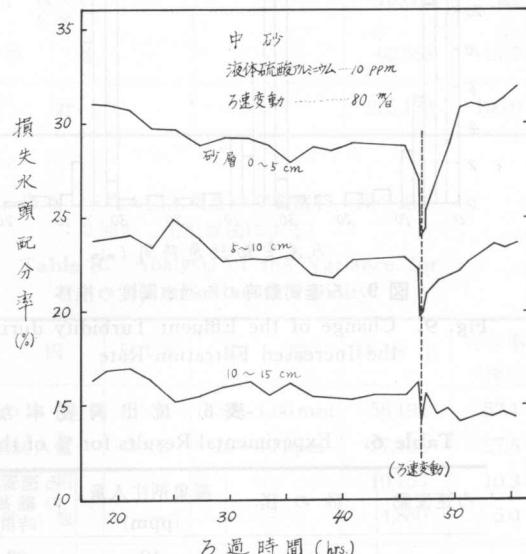


図 8 損失水頭配分率の動き

Fig. 8. Head Loss Ratio vs. Filtering Time

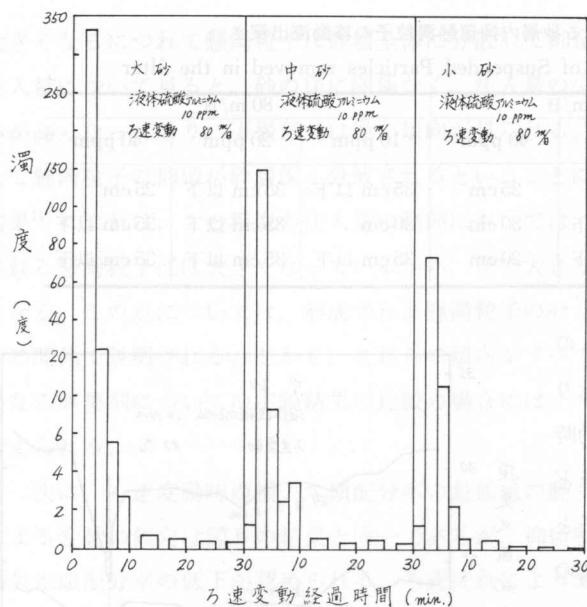


図 9 ろ過変動時のろ過水濁度の推移

Fig. 9. Change of the Effluent Turbidity during the Increased Filtration Rate

表 5 ろ過変動による流出時間
(終点としてろ過水濁度 1 度をとる)

Table 5. Break-through Continuation Time

ろ過変動	砂の径	凝集剤注入量 (ppm)		
		10	20	40
40 m/日	小砂	(min)	(min)	(min)
	中砂	7	13	19
	大砂	21	31	31
80 m/日	小砂	29	44	38
	中砂	8	12	28
	大砂	14	22	38

表 6 流出濁質率などの実験結果

Table 6. Experimental Results for % of the Break-through of Suspended Particles

ろ過変動	砂の径	凝集剤注入量 (ppm)	ろ過変動までの継続時間 (時間:分)	流出濁質率 (%)	流入原水濁度の何分ぶんに相当するか (分)
40 m/日	小砂	10	38:00	0.01	0.28
		20	25:30	0.05	0.78
		40	17:15	0.31	3.19
	中砂	12	45:31	0.10	2.62
		20	35:10	0.32	6.72
		40	20:50	0.81	10.13
	大砂	10	57:52	0.37	12.87
		20	41:45	0.67	16.74
		40	29:47	0.72	12.93
80 m/日	小砂	10	37:20	0.54	12.20
		20	24:15	0.54	7.82
		40	16:15	1.41	13.77
	中砂	10	46:40	0.77	21.45
		20	36:10	2.62	56.90
		40	22:00	1.84	24.33
	大砂	10	59:00	1.50	53.04
		20	42:25	2.64	67.29
		40	30:31	4.39	80.32

分率の傾向から予想されたようにろ速変動の大きいほど、砂の径の大きいほど、凝集剤注入量の多いほど流出濁質率は大きかった。この流出濁質率の最高の4.39%，最低の0.01%は、それぞれ原水中の懸濁粒子量の80.32分、0.28分ぶんに相当する量であり、その差は非常に著しい。この変動を表3と同様に三元配置法で分散分析し、各要因の寄与率を求めた結果を表7に示す。寄与率の大きさは、ろ速変動、砂の径、凝集剤注入量の順であった。さらに、ろ速変動を加えるまでの平均ろ過水濁度の変動解析の結果を表8に示すが、表7の結果と合わせみると、懸濁粒子の流出に関する限りでは凝集剤注入量よりも砂の径の影響が大きいことがわかった。

3.4 ろ速変動運転の許容限度

今回の実験範囲内でろ速変動運転の許容限度を考えてみる。許容限度の取り方としてはいくつか考えられるが、ここでは、ろ速変動による懸濁粒子の流出はその多くが30分程度で終わっており、更に継続させても流出は起こらないと考えられるので、一応ろ速変動が1時間加えられたとして、ろ過水濁度上昇1度以内を可とする。この条件に入るものは、ろ速変動40m/dayで、小砂の3種類と中砂の凝集剤注入量10ppmのものの合計4となる。これは今回の基準ろ速として240m/dayという高いろ速を採用しているためとはいえる、実際のろ過池におけるろ速変動運転の困難性を示すものとして受けとめるべきであろう。なお、凝集剤としての液体硫酸アルミニウムはせん断に対して弱い粒子を形成するとされている点からも、他の凝集剤についてのろ速変動に関するろ過実験を行なってみる必要があると思われる。

4. あとがき

砂ろ過における懸濁粒子の砂層流出は初期流出と終期流出のみならず、流入原水濁度の変動やろ速の変動によっても起こることが知られている。本論では、これらのうちからろ速変動

表7 流出濁質率の変動解析（三元配置法による）
Table 7. Analysis of the Variance for % of the Break-through of Suspended Particles

要 因	反復数	範 囲	純 効 果	寄与率 (%)
砂 の 径 (D)	3	0.59~1.00 mm	38,683	17.2
ろ 速 变 動 (K)	2	40~80 m/day	88,639	39.4
凝集剤注入量 (C)	3	10~40 ppm	24,825	11.0
D × K K × C C × D	—	—	10,633	4.7
そ の 他	—	—	62,353	27.7
合 計			225,133	100.0

表8 平均ろ過水濁度の変動解析（繰り返し2回の二元配置法による）
Table 8. Analysis of the Variance for Filter effluent turbidity

要 因	反復数	範 囲	純 効 果	寄与率 (%)
砂 の 径	3×2	0.59~1.00 mm	56,194	57.1
凝集剤注入量	3×2	10~40 ppm	27,106	27.6
交 互 作 用	—	—	10,153	10.3
そ の 他	—	—	4,880	5.0
合 計			98,333	100.0

によるろ過現象の詳細を損失水頭とろ過水濁度の動きから検討・解析してみた。その結果、要因として取りあげたろ過変動、砂の径、凝集剤注入量と種々のろ過現象がどのような関係を持っているかを具体的に理解することができた。

終わりに、昼夜の実験にたゞさわり、多くの苦労のすえ、これらの基礎データの採取にあつた本学2期生河端孝四郎君（現茨城県庁企業局鹿島水道事務所）ならびに千葉秀一君（現栗林建設K.K.）の両君の努力を多としたい。

また、本研究を行なうにあたり、昭和45年度文部省科学研究費補助金を受けたことを記し感謝の意とする。

文 献

- 1) 林 芳郎： 第21回全国水道研究発表会講演集，p. 180-181 (1970. 6).
- 2) H. E. Hudson Jr.: Jour. AWWA, Vol. 51, p. 121-122.
- 3) 海老江邦雄： 第22回土木学会年次学術講演会講演概要集（第II部），p. 141-1-2 (1967. 5).
- 4) 住友・末石： 第7回衛生工学研究討論会講演論文集，p. 36-46 (1971. 1).
- 5) 海老江邦雄： 北見工業大学研究報告，p. 151-164, Vol. 3, No. 1 (1971. 11).
- 6) 水道施設基準解説，p. 202 (1966)，日本水道協会。
- 7) T. R. Camp: Proc. ASCE., Vol. 90, No. SA 4, p. 7-8 (1964. 8).
- 8) 畿 嶽： 水道協会雑誌，第314号，p. 21.
- 9) W. A. Hall: Proc. ASCE, Vol. 83, p. 1276-1-9 (1957. 6).
- 10) 田口玄一： 実験計画法（上），(1967)，K.K. 丸善。
- 11) 5)と同じ，p. 151-164.