

(11) 下水2次処理水の2層ろ過における処理性能に及ぼす
砂粒径の影響と砂層閉塞パターン

EFFECT OF SAND SIZE ON FILTER PERFORMANCE IN
DUAL-MEDIA FILTRATION OF SECONDARY
WASTEWATER EFFLUENT

加爾肯 馬拉夫*、穂積 準*、吉田 英樹*、吉田 智志*

Manav JARHEN, Hitoshi HOZUMI, Hideki YOSHIDA, Satoshi YOSHIDA

ABSTRACT: Experiments on a proposed dual-media filter¹⁾ were conducted to investigate the effect of sand size on its performance in direct filtration with coagulation for secondary wastewater effluent. Aluminum sulfate was used as a coagulant to remove soluble substances and improve turbidity removal.

The results obtained are summarized as follows: (1) The over-all removal efficiency of the filter for turbidity, color and phosphate did not change too much with sand size at the filtration rate of 120m/d, but decreased with an increase in sand size at 240m/d and over. (2) On condition that the criteria for the limiting head loss and for the limiting filtrate turbidity were 3m and 5mg/ℓ, respectively, the length of the filter run depended on the head loss limit regardless of the filtration rate in the case of a sand size of 0.59~0.71mm. In the case of sand size larger than 0.85~1.00mm, it depended on the head loss limit at 120m/d and on the filtrate concentration limit at 240m/d and over. (3) The optimum sand sizes were larger than 1.00~1.20mm at 120m/d and 0.71~0.85mm at 240m/d and over. (4) The reduction of porosity with specific deposit (mass of deposit/unit filter volume) did not change too much regardless of sand size, but became smaller with an increase in filtration rate. **KEYWORDS:** Coagulation, Removal efficiency, Filter run time, Optimum sand size, Filter clogging.

1. はじめに

下水2次処理水の修景・親水用水への利用などその再利用用途の拡大に伴って、従来にも増して高い浮遊物質の除去や、これまで処理の対象とされていなかった色度その他の物質の除去が要求されるようになり、これらに対して暫定基準が提案されている²⁾。ろ過によって色度などの溶解性成分を除去するためには凝集によるそれら成分の粗大化が不可欠であり、これに伴ってろ過継続時間が著しく短縮される^{1,3)}。そこで、筆者らは浮遊物質と溶解性物質の同時除去を目的として、アンスラサイトに代わるものとしてろ過継続時間延長効果の極めて高い人工の半円筒状粗大ろ材を組み込んだ2層ろ過のろ過特性について検討を加えてきた。前報¹⁾では処理性能に及ぼす過速度の影響について明らかにするとともに、粗大ろ材のろ過係数と下部砂層の閉塞について検討結果を報告した。本研究では、濁度、色度、リン酸の除去とろ過継続時間に及ぼす砂粒径の影響について検討し、また、親水、修景用水への再利用を目的とした場合の最適砂粒径及び砂粒径を変化させた場合の砂層閉塞状況について検討した。

2. 実験装置と方法

実験装置は図-1に示すようで、M市某下水処理場に設置した。ろ過装置本体は二つからなり、ろ過筒の直径は

*室蘭工業大学、建設システム工学科(Depart. of Civil Engineering, Muroran Institute of Technology)

いずれも8cmである。砂は粒径0.59~0.71mm、0.85~1.00mm、1.00~1.20mmの3種類のものを用い、粗大ろ材は内径2mm、外径4mm、長さ6mmのビニルチューブを半円筒状に切断したものを用いた。砂層厚はいずれも60cm、粗大ろ材層厚は90cmである。また、砂層と粗大ろ材層の初期空隙率はそれぞれ41%、47%である。原水として活性汚泥法の最終沈殿池流出水を用い、凝集剤として硫酸アルミニウム、pH調整剤として塩酸を用いた。凝集条件は上記原水を用いた場合の本ろ過法における最適条件である注入率 $4\text{mg Al}^{3+}/\ell$ 、 $\text{pH}5.5\sim6.0$ に設定した⁴⁾。実験手順は次のようである。一定流量の原水を混和槽に送り、凝集操作を施した後、ろ過速度を調整しつつろ過筒へ流入させる。次いで所定時間毎に所定箇所より試料を採取し、濁度、色度、リンを測定すると同時に損失水頭をマンオメーターで測定する。実験は全損失水頭が3mに達した時点で終了するものとした。実験終了後は前報¹⁾と同じ方法で水道水を用いてろ層を洗浄し、再び実験を行う。なお、本実験においても砂層の初期空隙率は実験の都合上通常の砂層に比べて若干小さくなっているが、ろ過特性に及ぼす初期空隙率の影響については別の機会に報告することとしたい。

3. 実験結果及び考察

3・1 ろ過継続時間に及ぼす砂粒径の影響と最適砂粒径

図-2(a)、(b)はそれぞれ砂粒径0.59~0.71mm、ろ過速度 $240\text{m}/\text{d}$ における粗大ろ材層への流入濁度(CM Influent)、粗大ろ材層からの流出濁度(CM Effluent)、砂層からの流出濁度(SB Effluent)及び損失水頭の経時変化を示したものである。一般に、下水2次処理水の急速ろ過における許容損失水頭は浮遊物質の漏出、ろ過の効率性、ろ過池の建設費などの点から3m前後が適当であるとされている⁵⁾。そこで、許容損失水頭の限界値を3mとして、図-2(b)から許容損失水頭に達するまでのろ過継続時間を求めると10時間程度である。このろ過継続期間を通して2層ろ過における砂層からの流出濁度は図-2(a)に示されるように $0.4\sim1.8\text{mg}/\ell$ で、安定したろ過水が得られている。つまり、この場合はろ層が濁質抑留能力を残存保持した状態で損失水頭が許容限界値に達している。したがって、図-4に示すように砂粒径を大きくすることによって、ろ過水水质を許容限界内に保持した状態で許容損失水頭に達するまでのろ過継続時間を延長することが可能である。そこで、砂粒径を変化させて実験を行った。図-3(a)、(b)は粒径 $1.00\sim1.20\text{mm}$ の砂層を用いた場合を例にとってろ過速度 $240\text{m}/\text{d}$ における結果を示したものである。この場合には許容損失水頭3mに達するまでのろ過継続時間は20.5時

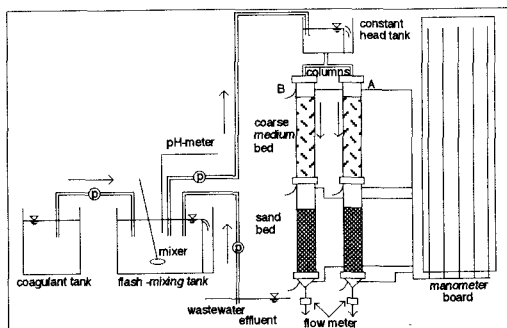


Fig.1 Experimental Apparatus

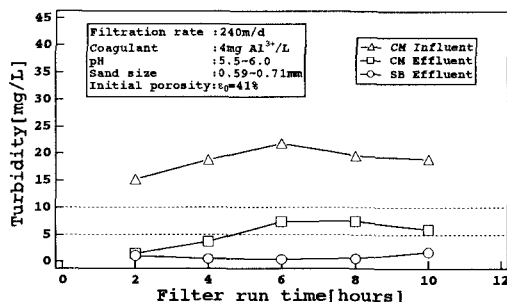


Fig.2(a) Variation of turbidity during the filtration

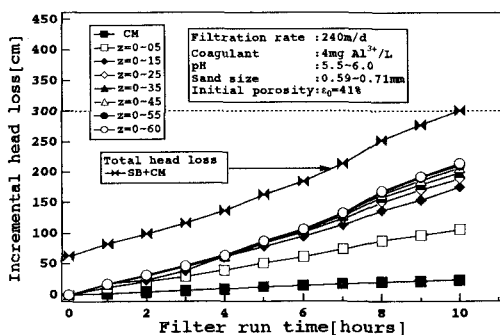


Fig.2(b) Variation of incremental head loss during the filtration

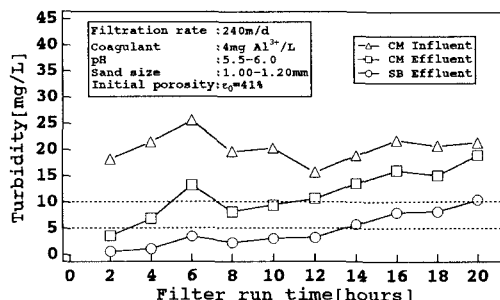


Fig.3(a) Variation of turbidity during the filtration

間程度で、砂粒径0.59~0.71mmの場合の2倍程度となっている。一方、ろ過水濁度はろ過継続時間13時間までは5mg/ℓ以下の比較的低い値を示すが、ろ過の進行とともに次第に上昇し、ろ過継続20.5時間では10mg/ℓ程度となっている。したがって、砂粒径を大きくすると許容損失水頭に達するまでのろ過継続時間を延長しうるが、これに伴うろ層の濁質抑留能力の低下について把握しておかなければならない。

通常、最適砂粒径はろ過速度、ろ層厚、その他の条件を一定とした場合、許容損失水頭 H_c に達するまでのろ過継続時間 T_a とろ過水水質が許容限界値 C_c に達するまでのろ過継続時間 T_b が等しくなる砂粒径として定義され、この時に最長のろ過継続時間が得られる。図-4は最適砂粒径を求める模式図で、ろ過継続時間は曲線(a)では砂粒径が小さく $T_a < T_b$ となって許容損失水頭によって、曲線(b)では砂粒径が大きく $T_a > T_b$ となって許容ろ過水濁度によって支配され、曲線(c)が $T_a = T_b$ となる最適砂粒径における結果を表す。いま、許容損失水頭 H_c を3mとし、許容ろ過水濁度 C_c を親水用水として再利用する場合の暫定基準(1990年・建設省案)²⁾である5.0mg/ℓとした場合、図-2(砂粒径0.59~0.71mm)及び図-3(砂粒径1.00~1.20mm)の結果はそれぞれ図-4の模式図の曲線(a)と(b)に対応し、最適砂粒径はこの中間に存在する。

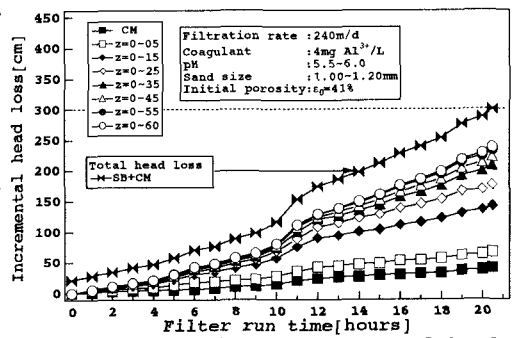


Fig.3(b) Variation of incremental head loss during the filtration

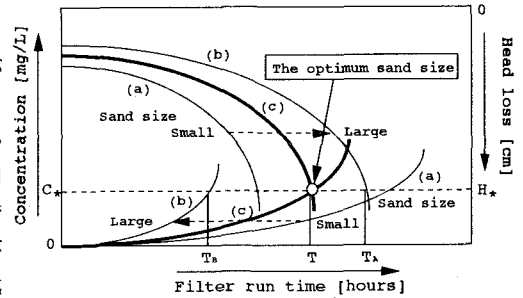


Fig.4 Optimum operation concept

表-1は $H_c=3\text{ m}$ 、 $C_c=5\text{ mg/ℓ}$ とした場合のろ過継続時間 T_a 、 T_b 、及びこれらに対応するろ過水量 V_a 、 V_b を異な

Table.1 Two types of filter run time and production

Filtration rate (m/d)	120			240			360		
Sand size (mm)	0.59-0.71	0.85-1.00	1.00-1.20	0.59-0.71	0.85-1.00	1.00-1.20	0.59-0.71	0.85-1.00	1.00-1.20
Filter run time T_a (Hour)	23.5	35.0*	41.0*	10.0	19.0	20.5	6.7	10.0	11.0
Filter run time T_b (Hour)	-	-	-	-	13.0	13.0	-	7.0	5.0
Production V_a (m³/m²)	117.5	175.0*	205.0*	100.0	190.0	205.0	100.5	150.0	165.0
Production V_b (m³/m²)	-	-	-	-	130.0	130.0	-	105.0	75.0

注：表中の「-」は許容損失水頭に達した時点 T_a においてろ過水濁度が許容限界値に達していないことを表す。つまり、 $T_b > T_a$ ($V_b > V_a$) なることを表す。また、※は損失水頭の経時変化から求めた推定値である。

る時期に行った2~4回の繰り返しろ過実験より求め、その平均値をろ過速度別に示したものである。なお、本実験ではろ過初期に許容限界値を上回る濁度が漏出する初期のブレイクスルーはなかった。図-5にろ過継続時間 T_a の砂粒径による変化を示した。ろ過継続時間 T_a は砂粒径の増大とともに長くなり、また、ろ過速度の増大とともに短くなる。これは砂粒径が大きくなる程、濁質抑留が均等化されてより深層ろ過になるとともに、初期損失水頭が小さくなり利用可能なろ過の有効水頭が増大することによるものである。一方、ろ過速度の増大はより深層ろ過となる効果を持つものの、流入濁質量の増大と初期損失水頭の増大に伴う有効水頭の減少を持たらし、ろ過継続時間を短縮させる。ろ過速度120m/dの場合、表-1に示されるようにいずれの砂粒径においても $T_a < T_b$ で、ろ過継続時間は許容損失水頭に支配される。また、砂粒径0.59~0.71mmの場合も同様にろ過継続時間はろ過速度によらず許容損失水頭に支配される。したがって、砂層厚を60cmと固定した場合、

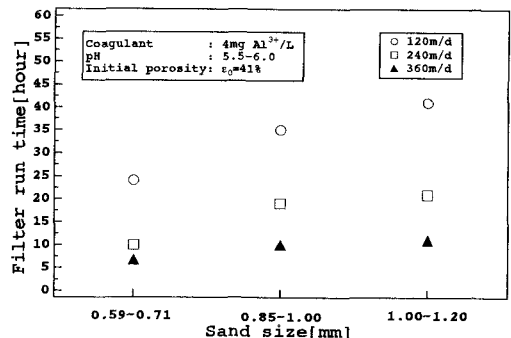


Fig.5 Effect of sand size on filter run time

ろ過速度120m/dでは最適砂粒径は1.00~1.20mmより大きいものと考えられる。ろ過速度240m/dの場合は、ろ過継続時間は砂粒径0.59~0.71mmでは許容損失水頭に支配されるが、0.85~1.00mm以上では $t_A > t_B$ となり許容ろ過水濁度に支配され、最適砂粒径はこの中間の0.71~0.85mm程度で、13~19時間の範囲のろ過継続時間を確保できる。ろ過速度360m/dの場合も240m/dとほぼ同様の結果を示し、最適砂粒径は0.71~0.85mm程度で、この時のろ過継続時間は7~10時間の範囲にある。通常、ろ層の洗浄は6~8時間に1回が限度であるとされていること⁶⁾を考慮すると、凝集操作を施した場合、2次処理水を親水用水として再利用することを目的とするときは採用しうるろ過速度の上限は360m/d程度と考えられる。次に、許容ろ過水濁度を修景用水として採用する場合の暫定基準(1990年建設省案)²⁾である10mg/lとした場合について述べる。ろ過速度120m/dの場合の最適砂粒径は上記と同様に1.00~1.20mmより大きい。ろ過速度240m/dの場合は、砂粒径1.00~1.20mmの時に図3-(a)、(b)に示されるように t_A 、 t_B がともに20.5時間で等しい。ろ過速度360m/dの場合も砂粒径1.00~1.20mmの時 $t_A = t_B = 11$ 時間なる結果が得られた。したがって、240m/d、360m/dの場合の最適砂粒径は1.00~1.20mm程度である。砂粒径1.00~1.20mmの場合のろ過水量はろ過速度360m/dに比べて240m/dの方が大きく、ろ過速度360m/dの採用はかえって不利になる。なお、ろ過継続時間は下水2次処理水の濁度、凝集操作によって大きく左右されるものと推測されるので、最適砂粒径の決定にあたっては長期間に渡る2次処理水の濁度変動を調査して、ろ過継続時間の変化幅について検討する必要があることは言うまでもない。本実験における下水2次処理水の濁度の変動幅は夏期7~20mg/l、冬期5~15mg/lで、ろ層への流入濁度の変動幅は凝集操作の影響を受けて14~30mg/l程度であった。異なる時期に行った数回の実験結果ではろ過継続時間にそれほど大きな差異はなかった。例えば、ろ過速度120m/d、砂粒径0.59~0.71mmでは t_A 1時間程度、ろ過速度240m/d、砂粒径1.00~1.20mmでは t_B 2時間程度であった。下水2次処理水のような比較的高濃度の色度成分を含む水では多量の凝集剤の添加を必要とし、生成フロックの体積量は添加凝集剤によって大きく支配される。その結果、ろ過継続時間は原水濁度によってそれ程大きく変化せず、概略凝集剤添加量によって決まるものと考えられる。なお、本処理場は標準活性汚泥法を採用し、通常の操作条件下で下水処理を行っており、濁度の変動は他とそれ程変わらないものとみなしうる。

3・2 ろ過水水质に及ぼす砂粒径の影響

図-6は許容損失水頭3mに達するまでのろ過継続期間に渡るろ過水濁度の平均除去率と砂粒径の関係をろ過速度別に示したものである。ろ過速度120m/dの場合、平均濁度除去率は砂粒径によってそれほど大きく変化せずほぼ一定で、95%程度ある。この場合のろ過水濁度はろ層への流入濁度、砂粒径によって若干相違するが、ろ過継続期間を通して1.0~1.5mg/lで、安定したろ過水が得られた。ろ過速度240m/dの場合は、平均濁度除去率は砂粒径の増大とともに低下し、砂粒径1.00~1.20mmの場合では0.59~0.71mmの場合より15%程度低下している。図-2(a)に示されるように、ろ過速度240m/dの場合、砂粒径0.59~0.71

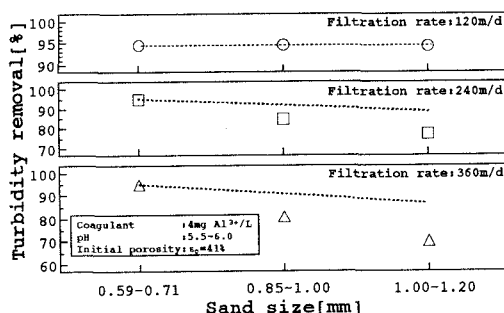


Fig.6 Effect of sand size on turbidity removal

mmではろ過継続期間を通して粗大ろ材層は比較的高い濁質抑留能力を保持する結果、砂層への流入濁度が低く、前述したように低濁度の安定したろ過水が得られている。砂粒径を大きくすると、許容損失水頭に達するまでのろ過継続時間が大幅に延長され、図-3(a)に示されるように、粗大ろ材層の濁質抑留能力はろ過前半では比較的高いものの、ろ過後半では低下し、砂層への流入濁度が高くなり、砂層における濁質抑留能力が増大する。これに付随して砂層空隙の閉塞が進行し、砂層内の水流の実流速が増大し、抑留濁質表面に作用するせん断力が大きくなる結果、付着抑留しえずにろ過水中に流出する濁質成分が増大し、ろ過の平均濁度除去率が低下する。ろ過速度360m/dの場合も240m/dの場合と同様の結果を示し、砂粒径1.00~1.20mmの場合では平均濁度除去率は0.59~0.71mmの場合より25%程度低下している。なお、砂粒径0.59~0.71mmの場合には、ろ過速度によらず平均濁度除去率はほぼ一定値を示す。図-6の破線は許容損失水頭3mもしくは許容ろ過水濁度5.0度に達した時点でろ過を終了したときの

平均濁度除去率と砂粒径の関係を示したものであるが、この場合ろ過速度240 m/d 以上では平均濁度除去率は砂粒径の増大とともに5~10%程度低下している。

図一 7、8 はそれぞれ色度とリン酸の平均除去率と砂粒径の関係をろ過速度別に示したものである。各ろ過速度における砂粒径の増大に伴う色度とリン酸の平均除去率の変化傾向は濁度の場合と同じである。ろ過速度120 m/d の場合は砂粒径によらず、また、砂粒径0.59~0.71 mm の場合はろ過速度によらず平均除去率は色度で50%、リン酸で90%程度である。ろ過速度240 m/d 以上では、平均除去率は砂粒径の増大とともに低下するが、色度では除去不可能な未凝集の溶解性成分が50%程度存在し、平均除去率自体が低いので、砂粒径の増大に伴う平均除去率の低下幅は5~10%と小さい。なお、上水試験法に準じて K_2PtCl_6 を標準物質として比色定量した下水2次処理水の色度は23~50 mg/l、リン酸は0.4~0.8 mg/l であった。

表一 2 はろ過終了時点における粗大ろ材層と砂層における濁質抑留量を示したもので、 σ_a 、 σ_b はそれぞれ許容限界損失水頭及び許容ろ過水濁度に達した時点における濁質抑留量である。なお、ろ過速度120 m/d の時の砂粒径0.85~1.00 mm、1.00~1.20 mm の場合の抑留量は表一 1 の T_A の場合

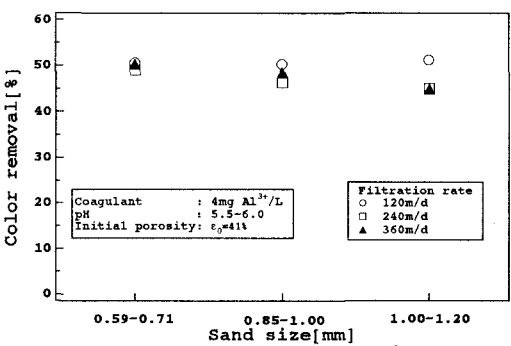


Fig.7 Effect of sand size on color removal

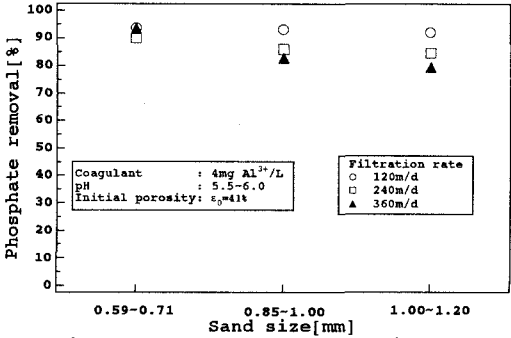


Fig.8 Effect of sand size on phosphate removal

Table.2 Two types of total deposit at the end of the filtration

Filtration rate [m/d]		120			240			360		
Sand size [mm]		0.59~0.71	0.85~1.00	1.00~1.20	0.59~0.71	0.85~1.00	1.00~1.20	0.59~0.71	0.85~1.00	1.00~1.20
σ_a	Coarse medium bed [g]	10.9	13.6	16.5	8.3	8.7	8.8	8.2	8.4	6.5
	Sand bed [g]	1.3	3.1	4.5	2.3	5.7	7.0	2.4	5.9	5.9
σ_b	Coarse medium bed [g]	-	-	-	-	7.2	6.9	-	8.3	3.7
	Sand bed [g]	-	-	-	-	2.8	3.9	-	3.2	1.4

と同様にして求めた推定値である。表一 2 は粗大ろ材層と砂層における濁質抑留割合に及ぼす砂粒径の影響を表わしたもので、ろ過速度の大きい程砂粒径の及ぼす影響が顕著になることを示している。ろ過速度が120 m/d の場合は、砂粒径0.59~0.71 mm では粗大ろ材層と砂層における濁質抑留量 σ_a の割合はそれぞれ90%及び10%程度で、砂粒径0.85~1.00 mm 以上では粗大ろ材層の濁質抑留量 σ_a はろ過継続時間の延長による若干の濁質抑留能力の低下によって80%程度となり、その分砂層における濁質抑留量の割合が高くなり、20%程度となる。ろ過速度240 m/d の場合は、粗大ろ材層における濁質抑留量 σ_a は砂粒径0.59~0.71 mm では全体の80%程度であるが、砂粒径1.00~1.20 mm では前述したようなろ過後半における濁質抑留能力の低下により55%程度となり、逆に砂層における濁質抑留量 σ_b はろ過水中に漏出する濁質量も多くなるものの、流入濁質量の増大によって著しく大きくなり45%程度となる。ろ過速度360 m/d の場合は、砂粒径1.00~1.20 mm では粗大ろ材層と砂層の濁質抑留割合はそれぞれ52%及び48%でほぼ同程度となる。

3・3 砂層における損失水頭の分布と砂層閉塞の状況

図一 9 はろ過終了時点での砂層各深さにおける損失水頭的全損失水頭（許容損失水頭からろ過終了時点の粗大ろ材層における損失水頭を引いた砂層の全損失水頭）に対する割合 $\Delta H/H$ をろ過速度120 m/d の場合を例にとりて示したものである。同一の $\Delta H/H$ を発現する砂層深さは砂粒径が大きい程大きくなり、砂粒径の増大とともに深さ方向により均等なる過が進行することを示している。例えば、 $\Delta H/H=95\%$ の発現する砂層深さは砂粒径1.00~1.20 mm では50 cm 程度で、砂粒径0.59~0.71 mm の場合の35 cm の1.4倍となっている。ろ過速度120 m/d の場合には、

前述したようにいずれの砂粒径においても平均濁度除去率は95%程度と高く、安定したろ過水が得られており、上記の砂層深さは近似的に濁質抑留の生じている深さとみなすことができよう。砂粒径0.59~0.71mmの場合も同様で、濁質抑留深さはろ過速度240m/dと360m/dではそれぞれ50cm及び55cm程度となっている。濁質抑留深さに及ぼすろ過速度の影響については前報とほぼ同じ結果が得られた。ろ過速度240m/d以上、砂粒径0.85~1.00mm以上の場合にはろ過後半では砂層からの漏出濁度が高く濁質抑留深さは60cmに達している。

図-10はろ層における流入、流出濁度の経時変化から求めたろ過終了時点における粗大ろ材層と砂層の濁質抑留量と損失水頭の増分の関係をろ過速度120m/dの場合を例にとって示したものである。粗大ろ材層では濁質抑留能力が大きいにもかかわらず、損失水頭が極めて小さく、濁質抑留に伴うその伸び率は小さい。砂層では濁質抑留に伴う損失水頭の伸び率は砂粒径の増大に伴う濁質抑留の均等化を反映して、砂粒径の大きい程小さくなる。しかしながら、いずれの場合も濁質抑留に伴う損失水頭の伸び率は粗大ろ材層では砂層に比して著しく小さく、濁質抑留に伴う砂層の閉塞が2層ろ過における損失水頭の変化を支配し、ろ過継続時間を規定する最大の要因である。なお、アンスラサイトと砂を用いた2層ろ過の場合にはアンスラサイト層における損失水頭の増分の発生が大きく⁷⁻¹⁰⁾、ろ過継続時間の検討にあたってはアンスラサイトと砂両層の閉塞を問題にしなければならない。

次に、濁質抑留に伴う砂層空隙の変化について検討する。砂層空隙の変化を直接測定することは極めて困難であるので、測定した砂層各深さにおける損失水頭と充填層の損失水頭公式からそれぞれの深さの空隙率の変化を求めた。砂層の損失水頭公式の代表的なものとしてはKozeny-Carman式とFair-Hatch式があり、いずれも適用可能であるが、ここではKozeny-Carman式¹¹⁾を用いることとした。

$$H/L = k(\mu/\rho g)U(A_p/V_p)^2(1-\epsilon)^2/\epsilon^3 \quad (1)$$

ここで、 H ：ろ層の損失水頭、 L ：ろ層厚さ、 ρ 、 μ ：それぞれ水の密度と粘性係数、 g ：重力の加速度、 U ：ろ過速度、 ϵ ：ろ層の空隙率、 A_p 、 V_p ：それぞれろ材一個の表面積と体積、 k ：Kozeny定数で、本実験で用いた砂では5程度である¹⁾。

濁質抑留量は表層で大きく深部で小さい分布を持つので、厳密には各深さの砂層毎に両者の関係を求めなければならない。本実験では深さ方向のろ過水濁度の変化を測定していないので、濁質抑留量の分布を求めることはできないが、図-10の結果では砂層60cmに渡る損失水頭の増分と濁質抑留量の関係がほぼ直線で近似できることから、各深さの砂層においても濁質抑留量と損失水頭の分布との間に1対1の対応関係があるものと仮定して濁質抑留量の分布を求め、各深さの砂層毎の空隙体積の減少量と濁質抑留量の関係を求めた。図-11は砂粒径0.85~1.00mm、ろ過速度120m/dの場合を例にとって砂層各深さにおける空隙の減少量と濁

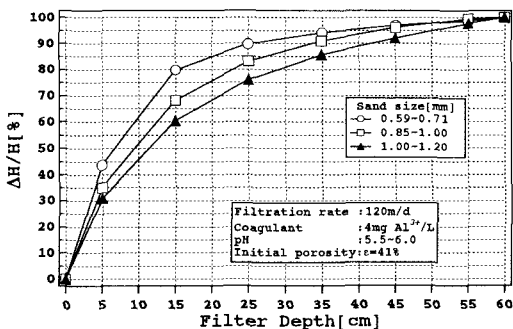


Fig.9 Effect of filtration rate on head loss distribution

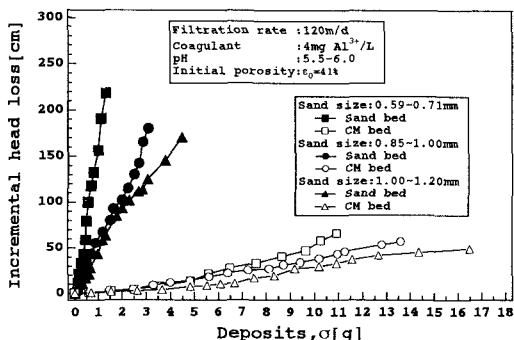


Fig.10 Build-up of the incremental head loss with total deposit

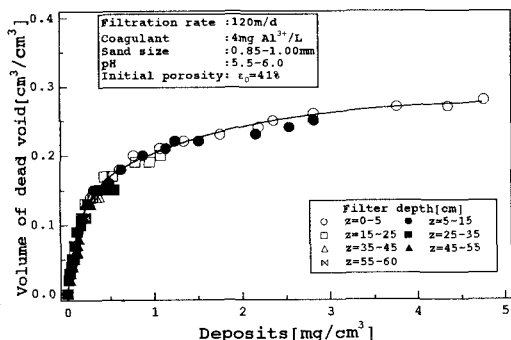


Fig.11 Correlation between reduction of porosity and specific deposit in the sand bed

質抑留量の関係を示したものである。この場合の空隙減少量と濁質抑留量は濁質抑留の生じている砂層単位体積当たりの量である。砂層空隙体積の減少量は濁質抑留量の増大とともに大きくなるが、その増加率は次第に小さくなっていく。また、抑留濁質の密度は 1 g/cm^3 より大きく、濁質 1 g の体積は 1 cm^3 を越えないので、図-11は濁質抑留体積に比べてはるかに大きな空隙体積が滅殺されることを示している。前報¹⁾でのべたように、砂層の空隙は数多くの狭窄部を有する水路の集合とみなすことができ、抑留濁質によるこの狭窄部の閉塞によって流れに有効な空隙水路が利用されない状態で死空間となる。その結果、損失水頭は濁質抑留量に相対して極めて大きくなり、みかけ上はるかに大きな体積の空隙が閉塞される状況を呈することになる。また、ろ過の初期においてはすき間間隔の小さい狭窄部が閉塞され、ろ過の進行とともに間隔の小さい狭窄部は減少し、すき間間隔のより大きな狭窄部が次第に閉塞されるようになる。その結果、濁質抑留に伴う砂層空隙体積の減少量の変化率はろ過の進行とともに次第に小さくなるものと考えられる。また、図-11に示されるように各深さの砂層における空隙体積の減少量と濁質抑留量の関係は一つの曲線で近似され、砂層の各深さにおいて類似の空隙水路の閉塞が生じていることを示している。通常、砂層においては径が大きく、表面正荷電の高いもしくは負荷電の小さい濁質粒子はろ過係数が大きく表層で抑留される割合が高くなり深さ方向の濁質の減少が比較的急激であり、径が小さく表面正荷電の小さいもしくは負荷電の大きな濁質粒子はろ過係数が小さく、深さ方向の濁質の減少は比較的緩慢でより下層にまで侵入して捕捉される。凝集生成粒子は寸法によって密度が異なり¹²⁾、同一質量の粒子群では小寸法の場合程その体積は小さく、また、砂層における抑留濁質の堆積構造は捕捉粒子の大小によって相違することも考えられるので、砂層空隙体積の減少量と濁質抑留量の関係は砂層各深さで異なることが予測されるが、図-11ではそのような関係は得られていない。これは、比較的高濃度（本実験では $23\sim 50\text{ mg/l}$ ）の色度成分を含む下水2次処理水では表面負荷電の高い粒度分布の狭い比較的均一な小寸法のフロックが生成されること^{4,13)}によるものと考えられる。

図-12はろ過速度 120 m/d の場合を例にとって、表面 $0\sim 5\text{ cm}$ の砂層における空隙体積の減少量と濁質抑留量の関係を砂粒径別に示したものである。両者の関係は砂粒径によらず一つの曲線で近似される。砂層の個々の空隙水路とその狭窄部の大きさ及びそれらの砂層単位体積当たりの個数は砂粒径によって異なる。個々の狭窄部の閉塞に要する濁質抑留量は狭窄部の大きさに応じて変化するが、同時に閉塞される狭窄部の数も変化するので、同一空隙体積を滅殺するのに要する濁質抑留量は砂粒径によらず、ほぼ一定になるものと考えられる。

図-13は砂粒径 $0.59\sim 0.71\text{ mm}$ の場合を例にとって、表面 $0\sim 5\text{ cm}$ の砂層における空隙体積の減少量と濁質抑留量の関係をろ過速度別に示したものである。両者の関係はろ過速度によって異なり、単位濁質抑留量当たりの空隙減少量はろ過速度の増大とともに小さくなる。ろ過速度が大きい程、流れのせん断力は大きくなるので、空隙水路の狭窄部等に抑留された濁質堆積は大きな流れの抵抗を受ける。そのため、濁質粒子の堆積構造はろ過速度によって異なり、同一空隙体積を滅殺するに要する濁質抑留量はろ過速度の増大とともに大きくなるものと考えられる。また、ろ過速度が大きい程、局所的な乱れも大きくなり、狭窄部以外の空隙部分、例えば流れに無効なポケット部分などへ持ち来されて抑留される濁質が増大するなど、狭窄部の閉塞に直接関与しない濁質抑留量が増大するものと考えられる。

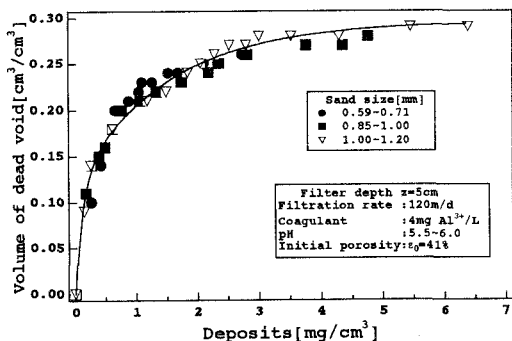


Fig.12 Correlation between reduction of porosity and specific deposit in the sand bed

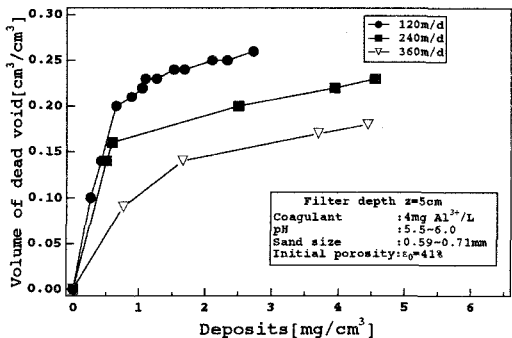


Fig.13 Correlation between reduction of porosity and specific deposit in the sand bed

4. 結論

濁度5~20mg/ℓ、色度23~50mg/ℓ、リン酸0.4~0.8mg/ℓの下水2次処理水に対する半円筒状粗大ろ材層と砂層からなる2層ろ過の処理性能に及ぼす砂粒径の影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1)ろ過継続時間は、暫定水質基準濁度5mg/ℓ以下の親水用水への再利用を目的とする時は砂粒径0.59~0.71mmの場合には許容損失水頭に支配され、砂粒径0.85~1.00mm以上の場合にはろ過速度120m/dでは許容損失水頭によって、ろ過速度240m/d以上では許容ろ過水濁度に支配される。
- (2)砂層厚を60cmに固定した場合の最適砂粒径は、ろ過速度120m/dでは1.00~1.20mm以上で、ろ過速度240m/d、360m/dでは上記親水用水への再利用を目的とした場合には0.71~0.85mm程度、暫定水質基準濁度10mg/ℓ以下の修景用水への再利用を目的とする場合には1.00~1.20mm程度である。
- (3)濁度、色度、リン酸の平均除去率はろ過速度120m/dでは砂粒径によらずほぼ一定で、ろ過速度240m/d以上では砂粒径の増大とともに低下する。また、平均除去率は砂粒径0.59~0.71mmではろ過速度によらずほぼ一定で、砂粒径0.85~1.00mm以上ではろ過速度の増大とともに低下する。
- (4)抑留濁質に伴う砂層空隙狭窄部の閉塞によって抑留濁質の体積よりはるかに大きな砂層空隙が滅殺されることが再確認された。
- (5)砂層空隙体積の減少量は濁質抑留量の増大とともに増大するが、その増加率は次第に小さくなる。また、砂層各深さにおける同減少量と濁質抑留量の関係はほぼ同一で、一つの曲線で近似しうる。
- (6)単位濁質抑留量当たりの砂層空隙体積の減少量はろ過速度の増大とともに小さくなるが、砂粒径によって変化しない。

参考文献

- 1) 穂積準、他：2階床ろ層による下水2次処理水の高度処理に関する研究—処理性能に及ぼすろ過速度の影響とろ過機構の検討—、環境工学研究論文集、Vol.32、pp339~347、(1995)
- 2) 小越真佐司：下水処理の修景・親水利用水質検討マニュアル（案）、下水道協会誌、Vol.29、No.338、p p3~5 (1992)
- 3) N'guessan bi tozan Michel, et al: Removing Color and Turbidity from Secondary Wastewater Effluent by Direct Filtration in a Dual Media Filter, Proc. of Environmental Engineering Research, Vol.31, pp29~35(1994)
- 4) N'guessan bi tozan Michel, et al: Direct Filtration of Secondary Wastewater Effluent by A Dual Media Filter, Proc. of Environmental Engineering Research, Vol.30, pp267~273(1993)
- 5) 建設省高度処理会議：高度処理施設設計資料、pp19、(1994)
- 6) EPA: Wastewater Filtration Design Consideration, EPA Technology Transfer Seminar Publication, PB-259, 448(1974)
- 7) 日本下水道協会：下水2次処理水の急速ろ過設計マニュアル、pp88、(1982)
- 8) 安中徳二、他：下水2次処理水の急速ろ過、第15回衛生工学研究討論会講演論文集、pp165~170、(1979)
- 9) 土川潤次郎、他：下水2次処理水の急速ろ過におけるろ過速度についての実験的研究、下水道協会誌、Vol.22、No.253、pp2~10 (1985)
- 10) 森頭、他：3次処理における急速ろ過に関する実験的考察、下水道協会誌、Vol.13、No.140、pp37~50 (1976)
- 11) Carman, P.C: Fluid Flow Through Granular Beds, Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol.15, pp150~166 (1937)
- 12) 丹保憲仁、他：アルミニウム・フロックの密度に関する研究、水道協会雑誌、397号、pp2~17、(1967)
- 13) 穂積準、他：粘土系濁質と有機着色成分からなる2成分の凝集、水道協会雑誌、723号、pp45~55 (1994)