

1. はじめに

排水池や閉鎖の富栄養化にともなう排水中の藻類のために、水処理上やっかいな問題の一つとして、急速ろ過池の閉塞問題がある。閉塞の原因生物は斜珪藻が主であるので、ここではシネドラに着目し、ろ過現象をろ過の操作因子であるろ速、ろ径、空隙率、ろ層厚などをとりあげて主に損失水頭を比較しみて、シネドラの押留特性を明らかにし、急速ろ過池の閉塞について検討を加えることにする。

2. 実験装置および条件

(1) 実験装置：図-1に実験装置の概略を示した。ろ過筒は内径50mm、ろ過の制御は自然平衡型とし、フロックはマイクロフロック形式とした。

(2) 実験条件：実験条件をまとめて表-1に示した。実験条件については、実験番号1(No.1)を基準として、No.2はカオリン量を2倍、No.3は、凝集剤(硫酸アルミニウム)量を2倍にし、No.4-No.6は、それぞれ、ろ速、空隙率、ろ径を、清浄砂層の損失水頭がNo.1の2倍になるように選定した。No.7は、No.6のケースに1900 μ mのシネドラを添加した場合である。

(3) シネドラの培養：実験に使用したシネドラは、S市水道局で純粋培養していたものを譲り受け、それをひきつづきBG-11培地中で液体静置培養したものである。培養条件は、水温20 $^{\circ}$ C、照度200~700lxである。シネドラの増殖率は、ロジスティック曲線と近似おことができ、実験に使用したシネドラは減衰増殖期のもので体長は概ね65-85 μ mである。

(4) 表-1中の換算係数と他：表-1の換算係数(r, r')は、損失水頭や押留量の算定の際、式中に表われるろ過、斜井上の補正をするための係数で、それぞれ表-1の下に注として示した式により算定される。

なお、実験中末ろ水のpHは6.7~7.6、pHカル度度は14~27 $\%$ の範囲にあった。

3. 実験結果および考察

図-2は、ろ速による損失水頭の深さ方向の分布の経時変化を模式的に示したもので、ある時間のある砂層厚さあたりの押留による損失水頭 Δh を説明したものである。この Δh を、砂層全層にわたってたし合わせたものを $\Sigma \Delta h$ とし、その経時変化をまとめて示したのが図-3である。図より、まず、損失水頭 $\Sigma \Delta h$ は換算係数(r, r', r_0, r_0' , r_0')で補正しているにもかかわらず各ケースにおける、ろ速、ろ径、空隙率、ろ層厚の増加が著しいろ過因子は空隙率で、次にろ速、ろ径であるが、シネドラの存在による損失水頭の増加と大きな直を示す。特にろ過時間の経過にともなって押留による $\Sigma \Delta h$ の増加率は、一般に大きくなる。次に、ろ過性能

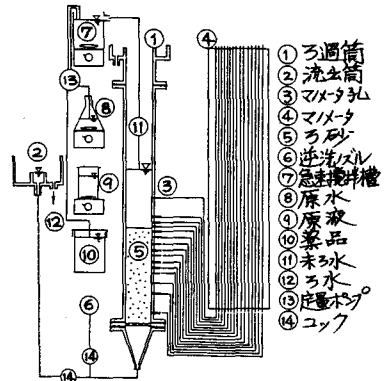


図-1 実験装置

表-1 実験条件におけるろ過操作因子の換算係数

項目	1	2	3	4	5	6	7
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.32	1.00	1.28	1.23	1.42	1.49
ろ層厚 (mm)	100	100	100	200	100	100	100
ろ速 (mm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ろ径 (mm)	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
空隙率 (%)	1.0	2.					

一つの考案として、同一の押留量 Σzh (cm) における損失頭の高さを比較する。図-4より次のことがわかる。なおここで押留量 (Σz) は過渡方程式(記号説明略) $\frac{\partial \sigma}{\partial t} + V \frac{\partial \sigma}{\partial z} = 0$ より、 $\sigma = -V \frac{\partial z}{\partial t}$ として求めた。実験番号 1 (No.1) を基準として考えれば、

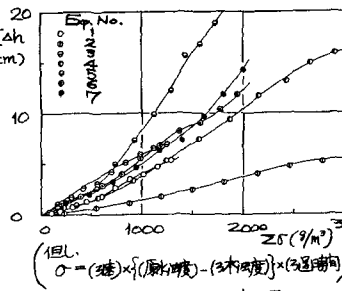


図-4 Σzh と $\Sigma \sigma$ の関係

No.4 では No.1 とほぼ同じで、また No.2 は、 Σz に対する Σzh が小さく、3枚中に高密度のフロックが押留されいると考えることができる。これに対し、凝集剤が増した場合、初期空隙率が低い場合、3枚径が小さい場合は、同一押留量あたりの損失頭が大きくなる。次に、3週間6~8時間における各砂層深さでの押留による損失頭 (H_{rel}) を図-5に示した。他の時間の図は省略しているが H_{rel} は時間の経過とともに増加し、やがてピークに達してついに減少するという傾向をたどる。 H_{rel} の値は頂部の最も大きく深くなるにしたがって小さくなる。表-2は、このピーク値をまとめたもので、これを押留量や押留能力の相対的評価に用いるとされる。やはり、No.1の実験を基準にすると、No.2は全砂層深さ方向に対してほぼ等しく、砂層の有効利用から考えて望ましいといえる。一方、No.3では、 H_{rel}/V_{rel} は約1.5倍となり、押留能力は若干増加するようである。また、他の V, E, d を一定ケースで H_{rel}/V_{rel} は約1.5倍となる。しかし、注水が入っている場合には約3倍と極端に大きくなる。つまり、注水による損失頭の影響は特に砂層頂部に集中してあらわれる点が特徴的である。また、本実験における比較的小さいサイズの注水であって、空隙率や3枚径の3枚径には又簡単に持たせしめる危険性が指摘できる。図-6は、逆洗水層度の経時変化を示したものである。状況の比較をするために図-6中の右上に示す模式図の各パラメータを表-3にまとめた。逆洗の効果からいうと、パラメータ t_{a1}, t_{a2}, T_d は小さいほど、また Q_a, Q_b, T_c は大きいほど望ましいといえることが注水の存在による逆洗への悪影響も明らかである。

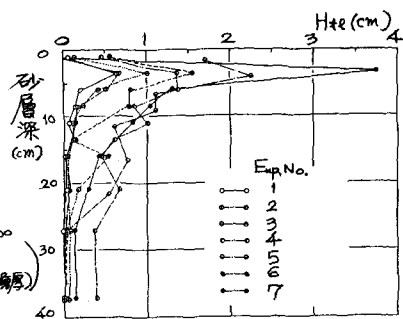


図-5 H_{rel} 分布 (6~8時間, $H_{rel} = H_{rel}^{max}$)

表-2 砂層頂部の H_{rel}

実験番号	H_{rel}^{max} (cm)	H_{rel}/V_{rel} (cm)	注水時間 (min)	注水流量 (L/min)	注水圧力 (MPa)
1	0.75 (max)	0.75	1	8-10	10-3.5
2	0.75	0.73	0.97	6-8	0.75-3.5
3	1.17	1.17	1.26	4-6	10-3.5
4	2.57	1.29	1.72	2-4	10-3.5
5	2.40	1.31	1.75	2-4	10.3-4.13
6	2.06	1.03	1.37	0-2	14-3.5
7	3.173 (max)	2.22	2.96	6-8	0.8-3.3

下向き注水 (MPa)

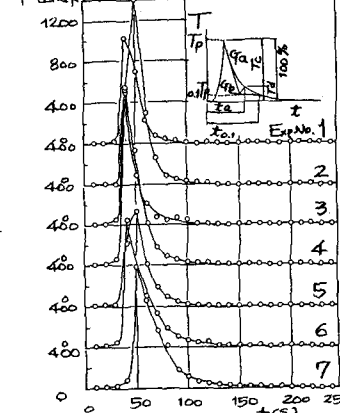


図-6 逆洗水層度下の経時変化

表-3 逆洗水層度変化の各パラメータ値

実験番号	注水時間 (min)	t_{a1} (s)	t_{a2} (s)	T_d (s)	T_c (s)	Q_a (L/min)	Q_b (L/min)
1	1067	78	69	92.7	7.3	4.5	1.00
2	1840	74	76	90.8	9.2	11.1	1.00
3	1325	66	63	88.8	13.2	8.3	1.45
4	1700	70	73	91.6	8.4	7.4	0.91
5	920	79	78	88.9	11.1	4.3	0.83
6	1240	87	79	84.7	15.3	4.0	0.88
7	1186	98	92	86.7	14.3	3.3	1.05

表-4 3週間の各因子ごとの押留特性の比較

因子	項目	注水時間 (min)	注水流量 (L/min)	注水圧力 (MPa)	注水速度 (cm/s)	注水圧力 (MPa)	注水速度 (cm/s)
ALT	1/2	1.1	0.4	1.0	0.4	0.4	0.4
ALT	2	1.3	1.0	1.6	0.5	0.5	0.5
V	2	3.0	1.0	1.7	0.6	0.6	0.6
E	0.88	3.6	2.5	1.8	1.0	1.0	1.0
d	1/12	2.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
d	1/12	3.3	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5

注 (1) の数字は、実験番号 1 に対する比を示す。
 ALT ; 原水 Al^{3+} (mg/L) と濃度 T (mg/L) の比

4. おわりに

今回は注水が存在する場合、他の3週間の操作因子を一定の場合を、主に損失頭と比較することによって押留特性を考察してきた。その結果を、今後注水による肉塞性を定量的に検討する糸口とするため表-4のように示した。① Al^{3+} はたいてい生菌が入るのをやめるとよい。注水の影響の最大なるものは、頂部の押留の集中であり、これによる損失頭の増加である。また逆洗性への影響はクロードアップされた。いずれ肉塞防止のためには表-4中の①の操作、あるいは X の場合は比率を1と境に反転させた3週操作が効果的と考えられるが、その点は今後具体的に検討していきたい。

おわりに、本実験に協力してくれた当時東北大学学生 武田幸信君、菊池いづみ君に感謝する。