

IV — 5 ろ過池の逆流における砂層内の乱れの効果について

九州大学工学部 上田年比古 埜口英昭 ○松尾 淳

(1) まえがき 急速ろ過池の逆流洗浄操作における砂層膨張比、および逆流速度の決定は、ろ過池の効率的運用にと、重要である。逆流による濁質除去に必要な最適膨張比は、経験的には30~40%前後であると言われている。しかしながら、逆流洗浄に関する従来からの貴重な研究の集積があるにもかかわらず、その物理的メカニズムについては明確な解答が与えられていないのが現状である。膨張し流動化した砂層内では、洗浄水による粒子の運動は複雑な不規則現象であり、砂粒子の干渉沈降による乱れ、およびろ層の支持砂利層(フィルター)から発生する洗浄水の乱れ等により、ランダムな運動をくり返している。従って、粒子、および洗浄水の乱れの特徴を知ることは、洗浄機構の解明には不可欠のものである。ここでは、砂粒子としてガラスビーズを用い、粒子の変動を直接計測することが困難な為、ろ層内の洗浄水の乱れを二成分ホットフィルム流速計により計測し、流動化したろ層内の乱れを推定する方法を用いた。

(2) 実験装置と方法 ろ過塔は、断面横5×10cm、高さ1mのアクリル製で、ろ過塔底部から13cmまでを整流部とし、これには $\phi=2$ mmの鉛玉を用いた。ガラスビーズろ材は、平均粒径1.02mm、0.455mmの2種を用いた。比重は2.48、初期ろ層高さ $L_0=20$ cm、充填時の平均空隙率は $e_0=42\%$ 、逆流時の膨張比は0.1~1.95まで変化させた。乱れの計測はDISA製2成分ホットフィルム流速計を用いろ層内の流体の乱れを計測した。実験は3回にわたって行い、粒径の相異、流体の温度差による乱れの違いについて調べた。オ1回目の実験では、ろ層表面から5cm下の1点のみ計測したが、オ2回目以後は、ろ層の位置による乱れの変化を調べるため、ろ層の表面から $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{5}{6}$ (L は流動状態でのろ層の高さ)、およびフィルターの直上の4点で計測した。また、フィルターによる流体の乱れを計測し、ろ層に及ぼす影響、その減衰性を調べた。尚、計測時に流速計表面に衝突する粒子によるノイズの影響は、スペクトルの計算結果から考えて小さいようである。

(3) 逆流速度と空隙率の関係 各実験条件は表-1に示す。逆流速度 U_0 を増加させると急激にろ層上下間の損失水頭 h_L が増大し、ろ層が流動化し始めるるとほぼ一定となる。単粒子沈降速度 U_d はアレンの式より算出した。 U_d によるレイノルズ数、 $Re = \frac{U_d d}{\nu}$ は34~175の値をとる。表-1 各実験条件

実験番号	水温 t (°C)	粒径 d (mm)	終端速度 U _t (cm/s)	レイノルズ数 $Re = \frac{U_d d}{\nu}$	指数 n
実験 I	13	1.02	13.04	110.5	0.35
II	27	0.455	6.51	34.5	0.32
III	27	1.02	14.66	174.1	0.35

また、 U_0 と空隙率 e は一般に、 $e = \left(\frac{U_0}{U_d}\right)^n$ の関係が成立し、 f_{air} の式における $n=0.22$ より大きい値をとる。

(4) 乱れ強度と空隙率の関係 鉛直、および水平方向の乱れ強度、 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ は実質速度 $U_e = U_0/e$ の30~40%程度の値を取り、図-1で示す様に、膨張比 E の増加とともに大きくなり、ある点で極大値をとる。また各実験によりピークのずれが生じており、例えば実験Iと実験IIIとを比較してみると実験Iの方が、空隙率が小さい点でピークを示し、ピークを過ぎた後の落ち方が大きいことが解る。これは各実験に対する粒径、水温(つまりレイノルズ数)の相異、および測定点の相異によるものと考えられる。洗浄水の乱れは主として粒子の干渉沈降によるもので、従って、粒子の変動も洗浄水の乱れと同じ傾向を示すと考えられる。

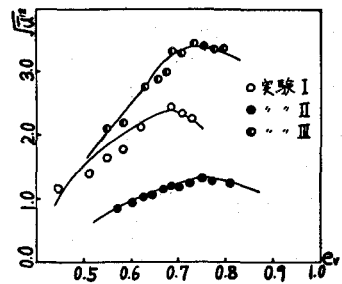


図-1 乱れ強度と空隙率の関係

(5) ろ層の場所的变化、およびフィルターによる乱れの影響 実験II、実験IIIはろ層の場所的变化による乱れの相異を調べるため界面より $\frac{1}{6}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{5}{6}$ 、およびフィルターの直上の4点で測定した。実験IIIの結果を図-2に示す。フィルターの直上、およびフィルターより $\frac{1}{6}$ 点においては、膨張比が大きくなるにつれて乱れ強度も大きくなっている。ろ層中央($\frac{1}{2}$ 点)においては、乱れ強度は他の点より大きく、 $e=0.735$ ($E=1.21$)で最大値をもっている。界面より $\frac{1}{6}$ 点では、ほぼ中間の値をとっている。次にガラスビーズを投入せず、フィルターの場合について同じく4点で測定した。図-2に示す様に、この場合は逆流速度が増加するほど乱れも大きくなる傾向を示

している。しかし、その値は小さくフィルター近傍のみろ層の乱れに影響を及ぼしていると考えられる。また、ろ過塔上方に向、て乱れは減衰している。風洞内の乱れ発生格子で作られた乱れの減衰は、一般に

$$\frac{U}{\sqrt{u'^2}} = \frac{1}{A^2} \frac{Z}{M} + \text{Const} \quad U: \text{一様流速}, \sqrt{u'^2}: \text{乱れ強度}$$

$M: \text{格子間隔} \quad Z: \text{格子からの距離}$

なる式で表現できるが、 U を逆流速度、 M をフィルターの粒径、 Z をフィルターからの距離とすれば、上式が成立していることがわかった。結局、ろ層下方の乱れはフィルターの影響を受けているが、その他は、干渉減降による乱れでフィルターの影響はないと考えられる。

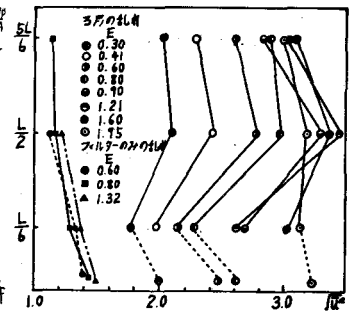


図-2 乱れ強度とろ層高さの関係

[6] エネルギースペクトルとエネルギー散逸率 エネルギースペクトルの計算はFFT法により行い、周波数から波数への変換は $k = \frac{2\pi f}{U}$ を用いた。スペクトルは $\frac{1}{k}$ 乗、 $-\frac{1}{4}$ 乗の部分が存在し局所等方向性が成立している。ミクロスケール d は、 $d = 1.02 \text{ mm}$ に対しては粒径の2~3倍の $0.25 \sim 0.35 \text{ mm}$ 、 $d = 0.455 \text{ mm}$ に対しては4~6倍の $0.2 \sim 0.26 \text{ mm}$ 程度で膨張比の変化による差は認められない。エネルギー散逸量 $\epsilon_c = 15 \nu \int k^2 F(k) dk$ は、乱れ強度と同じ傾向を示す。 ϵ_c は粒子の密度を ρ_p 、流体の密度を ρ_f とした場合 $\epsilon_c = (1-\rho_p/\rho_f)$

DATA.NO	E	ϵ_c	U_B	U_c	U'/U	ϵ_c	ϵ_c	d/d
1	1.84	0.773	6.48	8.17	3.20	135.0	786.1	0.34
2	1.60	0.714	6.15	7.95	3.37	173.2	814.5	0.34
3	1.44	0.757	5.74	7.58	3.42	167.7	817.4	0.32
4	1.21	0.735	5.23	7.12	3.46	183.6	812.2	0.23
5	1.00	0.708	4.70	6.64	3.30	181.6	804.3	0.27
6	0.90	0.671	4.43	6.61	3.32	180.0	802.2	0.28
7	0.80	0.675	4.11	6.07	2.98	142.1	782.8	0.36
8	0.71	0.657	3.78	5.95	2.88	137.7	757.8	0.28
9	0.60	0.633	3.37	5.11	2.78	126.6	724.1	0.26
10	0.47	0.584	2.65	4.54	2.43	97.2	646.1	0.33
11	0.30	0.551	2.22	4.03	2.11	65.7	584.7	0.34

表-2

$\times (1-\epsilon_c) g U_0$ より求めたものである。なお実験Ⅲの結果を表-2に示す。

[7] 乱れ強度と撃力の関係 ろ材粒子相互の衝突の瞬間的撃力を考え、全ろ材の単位時間当りにうける撃力の総和が最大の時、最もよく濁質の分離が行われると仮定する。この件に関しては、昭50年度年次講演会で既に発表しているので概略を示す。今、 N 個の粒子のうち速度が $\vec{v}$ と $\vec{v}+d\vec{v}$ の間にある粒子数を $f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$ と定義する。粒子の運動をブラウン運動と類似のランダムなものと考え、その速度分布を期待値0、分散 σ のMaxwell分布と仮定すれば $f(v_x, v_y, v_z) = N \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \right\}$ となる。この時の乱れ強度の2乗に相当する。撃力の総和を

$$F_t = [\text{衝突回数}] \times [\text{撃力}] \text{とすれば、} F_t = \frac{2\pi\sigma^2}{3} (1+\epsilon_c) \iiint d\vec{v}_1 d\vec{v}_2 d\vec{v}_3 \iiint d\vec{v}_4 d\vec{v}_5 d\vec{v}_6 f(v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}) f(v_{2x}, v_{2y}, v_{2z})$$

となり、最終的に $F_t \sim (1-\epsilon_c) \sigma$ の関係が得られる。求められた強度、空隙率から F_t との関係を調べてみると、図-3に示す様に、膨張比70%付近で最大値をもつことがわかる。

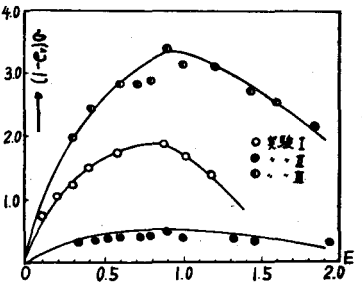


図-3 膨張比Eと $(1-\epsilon_c) \sigma$ の関係

[8] あとがき 粒子の変動を直接とらえるにはトレーサ粒子をシネカメラで追跡し、ラグランジュ的に測定する方法が考えられるが、これではろ過塔側壁付近の粒子のみで、ろ層内部の状態をとらえることができず、良い結果は得られない。従、ろ層内の洗浄水の乱れが粒子の乱れと同じ傾向を示すと考え、洗浄水の乱れを測定し、粒子の乱れを推定するという方法を用いたが、それによれば、ろ層内の衝突効率70%付近で最大となると考えられる。しかし、最適膨張比は30~40%と言われており、衝突効果が逆流機構の主要因と結論するには至らない。例えば巽氏は、フロック汚泥を1次汚泥、2次汚泥に分け、最初に破壊強さの低い2次汚泥が水流のせん断作用によ、て除去され、引き続いて破壊強さの高い1次汚泥が粒子相互の衝突、摩擦によ、て除去され、その結果初期高濁度が短時間に急速に減衰し、低濁度が長時間続くという状態が表われるとしている。従、今後、実際にフロックを投入してろ過の状態を形成し、逆流洗浄を行い、そのメカニズムを検討して行きたい。

- 参考文献: 1) 藤田賢二: 急速ろ過池における洗浄に関する諸元の水理学的考察, 水道協会誌, 第455号, S. 47. 8
2) 丹保憲仁: 上昇流式沈下池におけるフロックフライングの挙動(II), 水道協会誌, 第372号, S. 40. 7, 第381号, S. 41. 6
3) 巽 巖: 急速ろ過槽の逆流洗浄効果に関する研究(I), 水道協会誌, 第314号, S. 35. 11
4) 上田年比呂, 笠口英昭: 逆流洗時における砂層内の乱れ特性について, 第30回年次講演会概要集, S. 50. 10