

立命館大学大学院 学生員 〇橋本 健
立命館大学理工学部 正 員 大同淳之

1. はしがき 貯水池堆砂の排除法としては排砂管法、サイフォンによる排砂が考えられる。ここでは、両者を取りあげ、閉塞条件、その解除法および砂を輸送するときの損失水頭について考察した。

2. 排砂管式、サイフォン式における閉塞状況

(1) 実験方法 排砂管式は図1に示すような管径 $D=5\text{cm}$ 、長さ $L_p=118\text{cm}$ の管を用い、種々の堆砂高 H_s で有効水頭 $h_o=34\text{cm}$ のもとで流動状況を観察し、管内圧力分布、堆砂形状の変化を測定した。一方、サイフォン式は、せきをまたぐ形で $D=5\text{cm}$ 、長さ $L_p=600\text{cm}$ の透明パイプを使用した。

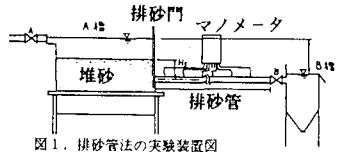


図1. 排砂管法の実験装置図

(2) 閉塞の生じる場所と限界 排砂管式では、入口、水平管部分、一方、サイフォン式では、入口および鉛直管部から水平管部に移るベンド部で閉塞がみられた。

i) 水平管部の閉塞 d/D が0.24以下の粒径の場合は、砂れきが砂水混合柱となって栓流状態で流入し管にある長さの堆積ができるが、閉塞しないときは上部から各個流動の形で最終的には流出してしまう。一方、閉塞するときは栓流の下部からしだいに流速が遅くなり、それが上部に及んで閉塞に至る。この場合の閉塞条件は、管内流速 u 、砂れき濃度 C 、 H_s に影響される。 C からの限界としては、固液混相流の損失水頭は一般に、 $i = i_w(1+C\phi)$ 、 $\phi = \phi_1 F_r^{-2}$ と表される。個々の砂れきが流送されるのに必要な限界有効水頭は限界掃流力より、 $dh_o/dx > (Kd/g)(S'/A')$ と表される。 S' 、 A' ：流水部分の潤辺、断面積、 K ：定数、 g ：重力加速度である。全水頭が与えられたときは限界損失水頭が決定し、閉塞しない限界濃度 C_c が決まる。限界の C_c は $C_c = f(H_s/d, U_o/W_s)$ と表される。 C_c を (H_s/d) で表し、 $u_o = \sqrt{2gh_o}$ とし、両者の関係を実験的に調べると図3のように閉塞限界の (H_s/d) が示された。

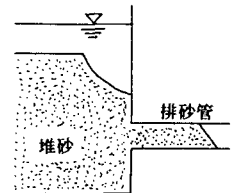


図2. 管内閉塞の状況

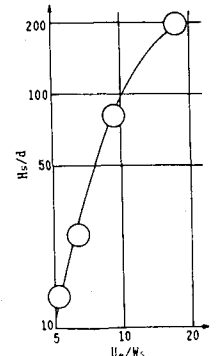


図3. 限界堆砂高 H_s/d の実験式

ii) 入口での閉塞 排砂管式では $d/D=0.36, 0.64$ の場合は H_s が大きくなると図4のように全く管内に流入せず閉塞する。一方、サイフォン式では $d/D \geq 0.64$ で閉塞した。排砂管の場合の閉塞条件は入口における損失水頭で評価でき、Darcy則より、

$$h_r = \beta \frac{u_o}{k} H_s = \beta \frac{\sqrt{2gh_o}}{k} H_s \quad (1)$$

と表わせる。 k ：透水係数、 β ：堆積層中の浸透水の拡がりについての補正係数である。一方、砂れきが抜け出す限界は、図4のモデルにおいて砂れき P に作用する抗力と a, b 点に作用する摩擦力のつりあいから、

$$\frac{\rho}{2} = C_D u_c^2 K_1 d^2 = \alpha \{ (2x+1) K_2 d^3 (\sigma - \rho) g \cdot \tan \psi \} \quad (2)$$

と表わせる。ここに、 σ 、 ρ ：砂れきと水の比重、 C_D ：抗力係数、 u_c ：限界流速、 K_1 、 K_2 ：面積、体積係数、 x ： P の上に載っている砂れきの個数、 ψ ：内部摩擦角、 α ：れきの充填状態に関する補正係数である。れきに作用する力を表面で評価することは難しいのでれき背後の流速で表すことにして、かつ、管の入口であるから管内の平均流速で表現すると、 $u_m = u_* (A_s + \frac{1}{\log \frac{u_* D}{\nu}})$ または、 $u_m = \sqrt{2gh_o}$ となる。

そして、 C_D 、 α 、 $\tan \phi = 1$ として(2)で求めた u_c を(1)式に代入して h_o を求め実測値 h_r と比較すると表1のようになり、実験で閉塞条件は砂れきが管内で流動するのに必要な落差の確保にあるといえる。

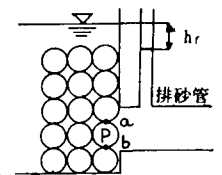


図4. 入口閉塞の状況

表1. 入口閉塞の条件の実験値との比較

d (cm)	k (cm/s)	H_s (cm)	β	h_c (cm)	h_r (cm)
1.8	28.0	13.5	0.48	55.8	26.3
3.2	39.0	22.5	0.46	85.4	30.5

(3)管内閉塞を解除するのに必要な圧力 水平管の閉塞を貯水池側から解除することは難しいため、バイパス管によって解除することを試みた。全面閉塞時の壁面せん断力は図5のように考えられ $\tau = 2\mu C \int_0^{\frac{\pi D}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} D \cdot \cos^2 \theta d\theta d\ell (\sigma - \rho)gL = \mu C (\pi D^2/4) (\sigma - \rho)gL$ で表される。ここに、 μ ：静止摩擦係数、 L ：堆積長である。よって、水平管における閉塞解除時のつりあい式は、断面に作用する圧力差が壁面せん断力 τ に等しいとして、

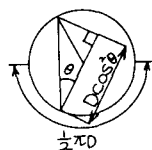


図5. 全面閉塞時の τ

$$\frac{\pi D^2}{4} \Delta P = \mu C \frac{\pi D^2}{4} (\sigma - \rho)gL \quad (3)$$

と表される。この式から実験値 ΔP を用いて μ を求めると種々の L について μ はほぼ一定であり、その平均値 μ は表2のようになる。参考のため、一個のれきの静止摩擦

表2. 全面閉塞解除時の μ

係数も示す。したがって、バイパス管の所要圧力はこの μ を用いて計算された(3)式に局所抵抗を加えたものであるといえる。ただし、 $d=0.35\text{cm}$ の場合は上層部から徐々に流動するため ΔP が全断面に対するものでなく、 μ の値が低くなっている。

$d(\text{cm})$	μ	μ_s
0.35	0.38	0.61
0.76	0.77	0.66
1.20	0.60	0.55

3. d/D が大きい場合の水平管における圧力損失

(1)目的 排砂管式、サイフォン式のいずれも水平管の摩擦が全体の損失水頭中大きな割合を占め、かつ d/D が比較的大きな場合の土砂流送時の摩擦係数についての実例が少ないため、実験を行った。

(2)理論式 砂れきが管底をしゅう動していると考え、砂れきによる付加圧力損失が壁面摩擦係数に等しいとして、 ξ を動摩擦係数とすると

$$\frac{\pi D^2}{4} (\Delta P - \Delta P_w) = \xi C \frac{\pi D^2}{4} (\sigma - \rho)gL \quad (4)$$

(4)式を水力勾配で表わし、清水時の動水勾配は $i_w = fu^2/2gD$ だから

$$\frac{i - i_w}{C i_w} = \frac{2\xi}{f} \frac{(\sigma/\rho - 1)gD}{U_m^2} = \frac{2\xi}{f} Fr^{-n} \quad (5)$$

となり、一般的に

$$\phi = \frac{i - i_w}{C i_w} = \phi_1 \left\{ \frac{U_m^2}{gD(\sigma/\rho - 1)} \right\}^n, \quad \phi_1 = \frac{2\xi}{f} \quad (6)$$

と表される。

(3)実験結果と考察 2で示した装置の水平管に砂れきを種々の供給量で流し、圧力勾配の変化、混合流量 Q 、吐き出し体積濃度 C の測定値を上記の方法にならって整理すると図6のようになった。ここで測定した d/D の領域では、砂れきの流動状態は浮遊粒子を含まず完全しゅう動であることが実験から確認された。 n は従来の例 $n=3/2$ にならって $n=-(3/2)$ とし、 ϕ_1 は例えば $d/D=0.36$ について $\phi_1=60$ とする。この値を $\phi_1=f(d/D)$ として示すと図7になる。従来の研究が $d/D>0.02$ で $\phi_1=150$ (一定)としているのに対し、本実験では、 ϕ_1 の値は150より低下する。 ϕ_1 は(6)式に示すように、しゅう動摩擦係数 μ と流体摩擦係数 f の比である。図1はMoodyの図を逆にしたもので、 ϕ_1 =一定は、滑面の流体摩擦によって支配される領域であることを示し、それから低下するのは、摩擦係数 f が相対粗度 d/D によって支配される領域であることを示す。すなわち、 d/D が大きく、濃度が増すと、れきが管壁で粗度として働きはじめたことをしめしている。

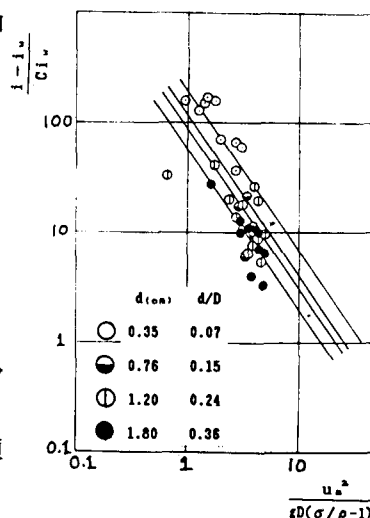


図6. ϕ と Fr の関係

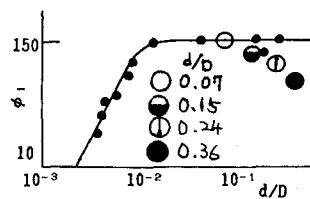


図7. ϕ_1 と d/D の関係

4. おまけ (1)排砂管式とサイフォン式による貯水池堆砂の排除法について、入口、管内の閉塞状況を実験から説明し、排砂管式においては、その水理学的条件を示した。(2)バイパス管によって管内閉塞を解除するのに必要な圧力を提案した。(3)水平管において d/D が大きい場合の砂れき輸送の圧力損失の測定を行ない、 d/D および濃度が大きいとき、(6)式の ϕ_1 が水理学的粗滑を示すことを述べた。

参考文献：(1)宮江；固体粒子の水力輸送における最適輸送条件、機械学会論文集、333号、昭和49年5月