

ダム堆砂の排除に関する研究

——渦動排砂管の水利機能——

芦田 和男・高橋 保・千田 実

REMOVAL OF RESERVOIR SEDIMENTATION

——VORTEX TUBE SAND TRAP——

By Kazuo ASHIDA, Tamotsu TAKAHASHI and Minoru CHIDA

Synopsis

Sedimentation in reservoirs gives a large influence on the process of sediment transport and causes various problems.

Therefore, the removal of sediment from reservoirs is very important subject. The authors are carrying out a synthetic research program in order to establish a system for removal of reservoir sedimentation.

This paper describes the theoretical and experimental results on the vortex tube sand trap which is included in the research program.

The equations are theoretically obtained for the inflow velocity from slit of vortex tube and also discharge distribution along the tube, which were verified by the experiment.

Characteristics of the spiral flow in vortex tube which is responsible for the removal of sediment, is clarified by the experiment.

Concerning the function for sediment removal of vortex tube, theoretical and experimental investigations have been conducted.

A non-dimensional geometrical parameter which determines the efficiency of the vortex tube was obtained. And, also most effective geometry of vortex tube and critical condition over which the vortex tube can not be applicable are presented.

1. 緒 言

貯水池は、水資源の開発・洪水調節・水力発電等、治水・利水の面で大きな効用を持っているが、反面土砂の自然流下を阻害して、堆砂による貯水池機能の低下、背砂による洪水位の上昇、ダム下流域の河床低下さらには海岸侵食などいろいろな問題をひきおこす。

わが国における貯水池の築造は、昭和30年頃から急増し、現在山地流域の約1/2を占めるに至っており、土砂収支の不均衡に基づく上述の問題は各地でおこっている。

従来、貯水池堆砂の防止あるいは土砂の排除を目的として、砂防ダム、排砂門、排砂管あるいは直接的な浚渫掘削など各種の方法が試みられ、部分的には成功している所もあるが、いろいろな問題点もあり、十分な排砂機能を果しているとは言いがたい。したがって、総合的な排砂システムを確立することは緊急を要する課題であって、現在、行政当局においてもそのような努力が続けられている。

一般に、堆砂防止法は場所的に見て、1) 流域の計画的な土地保全・砂防、2) 貯水池への流入土砂の防止・軽減、3) 貯水池内堆積土砂の排除に分類される。さらに、方法論としては、1) 砂防ダムやスリットダムによる流入土砂の調節防止、2) 排砂管による土砂の流送・排除、3) ゲート操作による土砂排除、ならびに、

4) 浚渫・掘削に分類される。1) は砂防ダムやスリットダムによる粒径選別機能を主体とした流入土砂の直接拦止を目的とするものである。2) は排砂管によって、貯水池への流入土砂あるいは貯水池の堆砂を貯水池外へ流送排除するものである。3) は洪水時における掃流力を利用して貯水池堆砂の侵食流下を図るものである。4) は堆砂を直接人工的に除去するものである。著者らは、総合的な排砂システムの確立を旨として、上述の諸方法について主として水理学的な立場からの研究を進めているが、本論文では、排砂管による土砂排除の問題を取り上げる。

水路への土砂流入防止の問題に関しては、古くから、渦による土砂排除機能を利用した渦動排砂管 (Vortex tube sand trap) の有効性が認められており、その排砂機能に関する実験的研究^{1)~8)}が行われてきた。また、吉良ら⁹⁾によって、香川県満濃池への導水路である天川頭着工の堆砂排除に渦動管が実際に適用され、その有効性が確かめられている。一方、渦動管を貯水池堆砂排除に利用した例は比較的少ないが、村¹⁰⁾らによる藤井川防災ダムへの適用例がある。これらの研究により渦動排砂管の設計に有用な多くの情報が得られているが、これらは主として次元解析を用いた実験的研究であって、その排砂機能について一般的な議論をすることは困難であって、渦動排砂管の最適な形状や適用限界等は必ずしも明らかになっていない。そこで、著者らは、渦動排砂管を貯水池堆砂排除に積極的に利用することを目的として、その排砂機能や適用限界等に関して理論的、実験的研究を行う。

2. 渦動排砂管の土砂排除機能に関する理論

2.1 渦動排砂管(スリット管)への流入量に関する基礎方程式

スリットから管内への流入量分布は、一様スリット管あるいは変化スリット管の場合について、荒木¹¹⁾によって解析的に求められ、その理論の妥当性は実験によって確かめられている。この結果は、渦動排砂管による土砂排除機能を考察する上で非常に有効なものである。荒木の解析では、スリットから直角に流入する場合が取り扱われているが、渦動排砂管は流れに対して管軸をほぼ 45° に設置するのが最も有効であるといわれており、そのような場合には、流入水の管軸方向の運動量を無視することができない。以下、この点を考慮して荒木とほぼ同様な解析を進める。

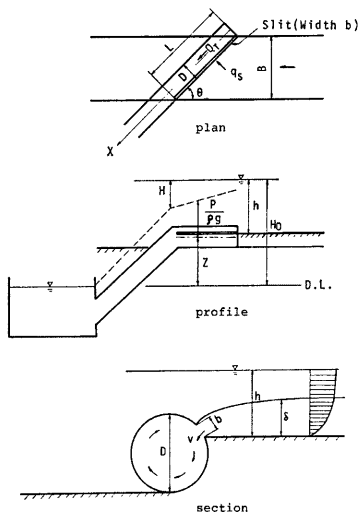


Fig. 1. Vortex tube sand trap — Notation —.

管内の連続式は、Fig. 1 を参照して、次式で与えられる。

$$dQ_T/dx = q_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Q_T : X 点における管内流量、 q_s : X 点における単位管長、単位時間当りのスリットからの流入量。

単位長さ当りの流入水により持たまれる管軸方向の運動量は、Fig. 2 に示すとおり、 $\rho q_s v_s \cos \theta_0 / \sin \theta_0$ である。いま、 $\cos \theta_0 / \sin \theta_0 \equiv K$ とおけば、管内の運動量保存則は、

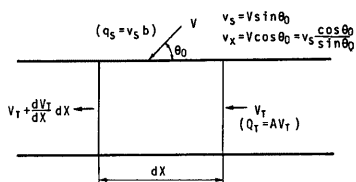


Fig. 2. Flow direction of inflow to vortex tube.

$$\frac{1}{gA} \frac{d}{dX} (\alpha A V_T^3) + \frac{d}{dX} \left(\frac{P}{\rho g} + Z \right) - \frac{1}{gA} q_s v_s K + \frac{\lambda}{R} \frac{V_T^3}{2g} = 0 \quad (2)$$

と書き表わされる。ここに、 A, V_T, P, R, λ はそれぞれ管の断面積、管内の平均流速、静水圧、径深および抵抗係数である。

スリットからの流入速度 v_s は流量係数 C を用いて次式で表わされる。

$$v_s \equiv \frac{q_s}{b} = C \sqrt{2g \left\{ H_0 - \left(\frac{P}{\rho g} + Z \right) \right\}} \quad (3)$$

ここに、 b はスリット幅。

$dH_0/dX=0$ として、 $V_T=Q_T/A$ の関係を用いて上式を Q_T について書き表わすと、

$$\frac{dQ_T}{dX} \left(\frac{d^3 Q_T}{dX^3} + \gamma \frac{dQ_T}{dX} - \beta^2 Q_T \right) - \frac{b^3 c^3 \lambda Q_T^2}{2RA^2} = 0 \quad (4)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= bc^2 K / A \\ \beta &= bc \sqrt{2\alpha} / A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4) 式は渦動排砂管内の流量 Q_T を与える基礎方程式であり、さらに (1) 式により渦動排砂管への流入量 q_s を求めることができる。

2.2 渦動排砂管内の流量 Q_T および流入量 q_s の解

(4) 式を解けば Q_T を求めることができるが、最後の項（摩擦項）のためにそのままでは、簡単な解析解を得ることは困難である。しかし、摩擦項は一般に小さいので、第一近似解としては、これを無視し、さらに第2近似解を摂動法により求めることができる。摩擦項を無視すると (4) 式は、

$$-\frac{d^3 Q_T}{dX^3} + \gamma \frac{dQ_T}{dX} - \beta^2 Q_T = 0 \quad (6)$$

となる。この式を境界条件

$$\left. \begin{aligned} X=0: Q_T &= 0 \\ X=L: Q_T &= Q_{TL} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

のもとに解くと、

$$Q_T = \frac{Q_{TL}}{e^{\kappa_1 L} - e^{\kappa_2 L}} (e^{\kappa_1 X} - e^{\kappa_2 X}) \quad (8)$$

$$q_s = \frac{dQ_T}{dX} = \frac{Q_{TL}}{e^{\kappa_1 L} - e^{\kappa_2 L}} (\kappa_1 e^{\kappa_1 X} - \kappa_2 e^{\kappa_2 X}) \quad (9)$$

となる。ただし、

$$\left. \begin{aligned} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \{-\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 + 4\beta^2}\} \quad (10)$$

また、 Q_{TL} は、 $X=L$ (渦動排砂管スリット部末端) における q_s の値を (3) 式および (9) 式から求め両者を等しいとおくことにより、次のように表わすことができる。

$$Q_{TL} = \frac{bc(e^{\kappa_1 L} - e^{\kappa_2 L})}{\kappa_1 e^{\kappa_1 L} - \kappa_2 e^{\kappa_2 L}} \sqrt{2gH} \quad (11)$$

ここに、 H はスリット部末端における管内外の水頭差で、Fig. 1 に示すように、

$$H = H_0 - \left(\frac{P}{\rho g} + Z \right)_{X=L} \quad (12)$$

である。

(8) 式は Q_T の第一近似解である。さらに、摂動法によって Q_T の第二近似解を求めた結果、実用上、第一近似解で十分であることが知られた。したがって、 Q_T および q_s は、スリットへの流入角度に関する K 、流量係数 C 、水頭差 H および管の形状に関する b, A, L の値を知れば、それぞれ (8) 式および (9) 式により求めることができる。

次に、渦動排砂管の流水および流砂の排除率を支配する流入水の層厚 δ について考察する。 δ は、主水路での流速分布が対数法則に従うものとすれば、次式で表わされる。

$$\delta = \frac{q_s}{u_* \sin \theta} - \frac{1}{A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\delta}{k_s}} \quad (13)$$

また、 $X=0 \sim X$ 間の主水路の流量 Q_m に対する渦動排砂管への流入量 ($=X$ 点における管内の流量 Q_r) の比, r は

$$r = \frac{Q_r}{Q_m} = \sqrt{2} \cdot C - \frac{1}{u_m / \sqrt{gh}} \frac{1}{\sqrt{h/H}} \frac{b}{h \sin \theta} \frac{e^{\kappa_1 X} - e^{\kappa_2 X}}{X(\kappa_1 e^{\kappa_1 L} - \kappa_2 e^{\kappa_2 L})} \quad (14)$$

で表わされる。 $X=L$ における r の値すなわち流水の排除率 r_L は、上式において $X=L$ として求めることができる。(14) 式には C と θ の他に、無次元量 $F_r (=u_m / \sqrt{gh})$, h/H , b/h , $L \cdot \kappa_1$, $L \cdot \kappa_2$ が含まれており、これらが流水の排除率を支配することが知られている。

上述の関係式は $K=0$, $\alpha=1$ とおくと非常に簡単となり、渦動管の排砂機能や有効な渦動管の形状ならびに適用限界等に関して一般的な考察を展開するのに好都合である。ただし、 $K=0$ とすると、後述するように、 Q_r や q_s に関する計算値は実験値と若干相異なるので、 $K=0$ としての議論は大体の目安を得るために用い、実際の設計には K の影響を考慮することが必要である。

$K=0$, $\alpha=1$ の場合には、 $\gamma=0$, $\kappa_1 = -\beta$, $\beta = bc\sqrt{2}/A$ となり (8) 式および (9) 式はそれぞれ、

$$\frac{Q_r}{A\sqrt{gH}} = \frac{V_r}{\sqrt{gH}} = \frac{e^{\beta L \cdot X/L} - e^{-\beta L X/L}}{e^{\beta L} + e^{-\beta L}} \quad (8)'$$

$$\frac{q_s}{bc\sqrt{2gH}} = \frac{v_s}{c\sqrt{2gH}} = \frac{e^{\beta L X/L} + e^{-\beta L X/L}}{e^{\beta L} + e^{-\beta L}} \quad (9)'$$

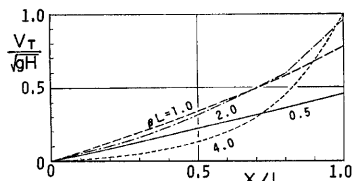


Fig. 3. Distribution of nondimensional flow velocity in vortex tube from eq. (8)'.

となる。管内の無次元流量 $Q_r/A\sqrt{gH}$ や無次元流速 $V_r/\sqrt{gH}$ あるいは無次元の流入流量 $q_s/bc\sqrt{2gH}$ や無次元流入流速 $v_s/c\sqrt{2gH}$ は管の形状に関する無次元量 $\beta \cdot L$ と相対位置 X/L のみの関数として表わされることが知られている。

Fig. 3 に示すように、 $V_r/\sqrt{gH}$ と X/L の関係は無次元量 βL によって非常に異なる。 $\beta \cdot L$ が小さいとき ($\beta L=0.5$ 付近まで) はスリットからの流入はほぼ一様であって、 $V_r/\sqrt{gH}$ は X/L とともにほぼ直線的に増加するが、 βL が大きくなるにつれて渦動排砂管上流端付近の流入量は下流端

付近のそれに比べて少なくなる。この傾向は $\beta=1, 2$ 付近においてはそれほど顕著でないが、 $\beta=4$ 付近においてはかなり顕著となる。排砂管の機能としては、 $V_r/\sqrt{gH}$ の小さい管の上流部分において、できるだけ $V_r/\sqrt{gH}$ が大きいものほどよいわけであるが、この点から $\beta L=1$ において、 $X/L=0 \sim 0.7$ の区間で、 $V_r/\sqrt{gH}$ は最大となり、 $\beta L=2$ においてもほぼそれに近い値を示す。 βL がこれより大きくても小さくても、 $V_r/\sqrt{gH}$ は減少する。この点から見ると、 $\beta L=1 \sim 2$ の範囲が好ましい水理機能を持っているといえる。

次に、 $v_s/c\sqrt{2gH}$ と X/L の関係を βL をパラメーターとして表示することができるが、与えられた βL に対して $v_s/c\sqrt{2gH}$ の値は $X/L=0$ において最小となる。一方、渦動管の排砂機能は、スリットからの流入によって形成される渦の強さに支配され、これはスリットからの流入流速 v_s と密接な関係があるものと考えられる。したがって、渦動管の排砂機能は、流入速度の最小値 v_{s0} ($X=0$ における v_s の値) に支配されるものと考えられる。そこで、 $v_{s0}/c\sqrt{2gH}$ と βL の関係を示すと Fig. 4 のとおりである。 βL が5より大きくなると、 $v_{s0}/c\sqrt{2gH}$ の値は非常に小さくなるので、排砂機能は急激に減少してくるものと考えられる。

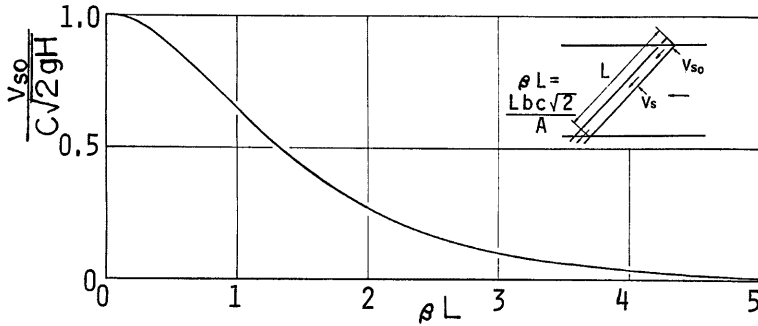


Fig. 4. Relation between nondimensional inflow velocity at the upstream end of vortex tube and nondimensional geometrical parameter βL from eq. (9)'.

したがって、排砂管として使用しうる βL の値はせいぜい 4 程度までであると考えられる。

2.3 渦動排砂管内の土砂濃度

Fig. 1 に示すように、流入水層 δ 内の流砂は、スリットにつまったり、管内に堆積を生じない限り、渦動排砂管に流入する。したがって、 δ が掃流層よりも十分に大きければ、掃流砂はほぼ全量渦動排砂管に流入することになる。また、 δ 層内の浮遊砂もこれに加わる。渦動排砂管の排砂機能は、浮遊砂よりも掃流砂に対して有効に働くので、ここでは簡単のために掃流砂のみの場合を考えることにする。 X 点における管内の土砂濃度 c_s は

$$C_s = \frac{c_m \cdot Q_m}{Q_T} = \frac{c_m}{r} \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 c_m は主水路の掃流砂量を流量で割った濃度、 Q_m は $X=0 \sim X$ 間の流量、 r は (14) 式で与えられる。

単位幅当りの掃流砂量を q_B とすると、 $c_m \cdot Q_m = q_B \cdot X \cdot \sin \theta$ であるから、これと (8)' 式を用いて (15) 式は次のようにも書き表わされる。

$$C_s = \frac{q_B X \sin \theta}{A \sqrt{gH}} \frac{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{e^{\beta L \cdot X/L} - e^{-\beta L \cdot X/L}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

C_s は $X=0$ において最大である。その値を C_{s0} とすると、

$$C_{s0} = \frac{q_B \sin \theta}{2 \sqrt{2gH}} \frac{1}{bc} (e^{\beta L} + e^{-\beta L}) \quad \dots \dots \dots (17)$$

また、管内の土砂濃度 C_s を渦動排砂管下流端の濃度 C_{sL} で基準化して表わすと、

$$\frac{C_s}{C_{sL}} = \frac{e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{e^{\beta X} - e^{-\beta X}} \frac{X}{L} \quad \dots \dots \dots (18)$$

のように、 βL をパラメーターとして X/L の関数として表わされる。ただし、(16)~(18) 式は $K=0, \alpha=1$ に対する式であって K の影響を考慮する場合には、それに対して求めた Q_T を用いて、直接 (15) 式から求めなければならない。

2.4 渦動排砂管の機能とその限界

渦動排砂管は、先端（上流端）における流速は非常に遅いが、スリットからの流入に伴って生じる渦と管軸方向の流れによるらせん流のため、流入砂れきは、管内に堆積することなく下流へ輸送されるのである。渦動排砂管が、十分機能を果している場合については、上述の関係式により、管内流量、流砂濃度、流水と流砂の除去率などを算定することができる。ここで、最も問題になる事は、どのような条件で渦動排砂管が機能を果さなくなるかという事である。その原因としては、次の事が考えられる。

- (1) スリットに砂れきがつまり、管内に流入しなくなる。
- (2) 河床に Sand waves ができると、管が埋没する恐れがある。
- (3) 渦動管の内に土砂が堆積し、遂には管を閉塞する。
- (4) 渦動排砂管のスリット部より下流部分の管内に土砂堆積し管を閉塞する。

以下、それぞれについて限界条件を考察しよう。

(1) に対しては、スリット幅が流砂の最大粒径よりも大きければよい。しかし、実際には砂れきは球形ではなく、種々の形状をしているので、最大粒径の 2 倍程度のスリット幅は必要であろう。

(2) に対しては、河床に dunes のような sand waves を生じさせないことが必要である。このためには流れの Froude 数を 1.0 近傍にして河床を upper regime にすることが必要である。

(3) に対しては、渦動管の内に土砂が堆積しないだけの十分な渦の強度を与えることが必要である。 $X=0$ において管内の土砂濃度は最も高く、流入速度は最も小さい。したがって、管内に堆積が生じる場合には $X=0$ からはじまり順次下流に及んでいる。このことは後述するように実験の結果によっても確かめられている。したがって、 $X=0$ において土砂が堆積しなければ、渦動管部には土砂が堆積しないことになる。すなわち、この面からの渦動管の機能の限界は $X=0$ における条件に支配される。

管内における土砂の運動は、渦の回転速度 V_w 、管内流速 V_T 、粒子の沈降速度 w ならびに流砂濃度 C_s に支配されるものと考えられる。渦動管の先端部付近においては、 V_w に比して V_T は非常に小さいので、主として V_w によって現象が支配されるものと考え、管内に土砂が堆積する限界は、次元的な考察から、次式で与えられる。

$$(V_w/w)_c = f(C_s) \dots\dots\dots (19)$$

さらに、 V_w はスリットからの流入速度 v_s と密接な関係があると考えられるから、次元的な考察から次のような関数式で表わされるものと思われる。

$$\frac{V_w}{v_s} = f\left(\frac{b}{D}\right) \dots\dots\dots (20)$$

したがって、管内に堆積を生じて管がつまる限界条件は、 $X=0$ における v_s の限界値を v_{soc} とすれば、(19) 式と (20) 式とから、

$$\frac{v_{soc}}{w} = f\left(C_{s0}, \frac{b}{D}\right) \dots\dots\dots (21)$$

で与えられるものと考えられる。(21) 式の関係は、後述するように実験によって求める。(21) 式における v_{s0} は (9) 式または (9)' 式より容易に求まるから、 $v_{s0} > v_{soc}$ ですなわち十分な機能を果す渦動排砂管の条件を求めることは比較的容易であり、(21) 式は実用上有用なものと考えられる。

(4) に対しては、管路における土砂輸送に関する従来の研究成果が数多くあるので、それらを用いてその限界条件を検討することができる。

3. 渦動排砂管の土砂排除機能に関する実験

3.1 実験方法と実験条件

Fig. 1 に示すような渦動管を用いて、まず、スリット区間の管軸に沿う流入速度の分布および管内の静水圧の管軸方向の分布を測定し、流量係数を求めるとともに、前章の理論との比較検討を行った。この際、流入速度は、スリット口元に直接流速計を置いて測定した。これと並行して、渦動管前面近傍の分離流線と流速分布とから流入量を求めたが、両者はよく一致した。また、これらの流入量を管軸に沿って積分したものは、管の末端から排除される流量の測定値とも一致し、実測値は信頼できるものと考えられる。また、管内の圧力分布は、渦動管底部に取りつけたピエゾメーターによった。実験条件は Table 1 のとおりである。

ついで、渦動管内における回転流の特性を調べるために、水とほぼ同一比重の球形粒子を作製し、渦動管上流 10 D の位置から投入し、粒子の運動軌跡を 16 mm カメラで撮影した。その結果をフィルムアナライ

Table 1. Experimental condition for hydraulic function of vortex tube.

Case No.	Geometry of tube $\theta = 45^\circ, L = 31.5 \text{ cm}$			Hydraulic condition $B = 20 \text{ cm}$			
	$D \text{ cm}$	$b \text{ mm}$	Attack angle of slit	$Q \text{ l/s}$	$h \text{ cm}$	F_r	$H \text{ cm}$
I -1-1	4.5	6	60°	2.0	6.0	0.2	10.9
I -1-2	"	"	"	"	"	"	7.1
I' -1-2	"	"	"	"	"	"	6.0
I -1-2 (30°)	"	"	30°	"	"	"	6.4
I -1-2 (85°)	"	"	85°	"	"	"	7.9
I -1-3	"	"	60°	"	"	"	3.5
II -1-1	4.5	4	60°	2.0	6.0	0.2	16.3
II -1-2	"	"	"	"	"	"	10.5
II' -1-2	"	"	"	"	"	"	10.5
II -1-3	"	"	"	"	"	"	5.1
IV -1-2	3.7	6	60°	2.0	6.0	0.2	8.9
IV' -1-2	"	"	"	"	"	"	9.1
V -1-2	3.0	6	60°	2.0	6.0	0.2	9.5
V' -1-2	"	"	"	"	"	"	10.4

Table 2. Experimental condition for removal of sediment by vortex tube sand trap.

Case No.	Geometry of the vortex tube $\theta = 45^\circ$			Hydraulic condition					
	$D \text{ cm}$	$b \text{ mm}$	Attack angle of slit	$Q \text{ l/s}$	$Q_s \text{ cm}^3/\text{s}$	$B \text{ cm}$	$d_{50} \text{ mm}$	F_r	$H \text{ cm}$
I-1- 1	4.5	6	60°	2.2	17.3	20	1.4		
- 2	"	"	"	"	21.7	"	"		
- 3	"	"	"	"	26.0	"	"		
- 4	"	"	"	"	11.7	"	"		
- 5	"	"	"	"	16.7	"	"		
- 6	"	"	"	"	21.7	"	"		
I-2- 1	4.5	6	60°	5.0	84.3	30	1.4	1.30	9.0
- 2	"	"	"	"	11.3	"	"	1.14	12.3
- 3	"	"	"	"	11.7	"	"	"	2.2
- 4	"	"	"	"	81.3	"	"	1.43	9.2
- 5	"	"	"	"	78.9	"	"	"	3.5
- 6	"	"	"	"	19.1	"	"	1.10	21.8
- 7	"	"	"	"	33.0	"	"	1.30	7.0
- 8	"	"	"	"	32.5	"	"	"	3.1
- 9	"	"	"	"	32.1	"	"	"	2.8
-10	"	"	"	"	33.5	"	"	"	2.4
-11	"	"	"	"	33.1	"	"	"	2.2
-12	"	"	"	"	54.0	"	"	1.63	11.7
I-3- 1	4.5	6	60°	8.4	69.5	30	0.3	1.37	2.2
- 2	"	"	"	5.5	28.6	"	"	1.19	1.2
- 3	"	"	"	"	42.4	"	"	1.48	2.0
II-2- 1	4.5	4	60°	5.0	42.3	30	1.4	1.43	14.0
- 2	"	"	"	"	42.4	"	"	"	4.1
- 3	"	"	"	"	22.8	"	"	1.14	18.1
- 4	"	"	"	"	23.5	"	"	1.27	2.8
- 5	"	"	"	"	22.8	"	"	1.43	3.3
- 6	"	"	"	"	14.0	"	"	1.30	8.9
- 7	"	"	"	"	13.3	"	"	"	2.8
- 8	"	"	"	"	93.1	"	"	2.20	10.7
- 9	"	"	"	"	96.4	"	"	1.90	4.7

Table 2. (Continued)

Case No.	Geometry of the vortex tube $\theta=45^\circ$			Hydraulic condition					
	D cm	b mm	Attack angle of slit	Q l/s	Q_s cm ³ /s	B cm	d_{50} mm	F_r	H cm
III-2- 1	2.0	6	60°	5.0	30.5	30	1.4	1.3-1.4	14.4
- 2	"	"	"	"	23.1	"	"	"	7.9
IV-2- 1	3.7	6	60°	5.0	23.7	30	1.4	1.25-1.35	14.5
- 2	"	"	"	"	23.1	"	"	"	4.3
- 3	"	"	"	"	23.5	"	"	"	3.5
- 4	"	"	"	"	24.9	"	"	"	2.5
- 5	"	"	"	"	24.5	"	"	"	2.1
- 6	"	"	"	"	49.4	"	"	1.43-1.53	16.6
- 7	"	"	"	"	50.9	"	"	"	8.2
- 8	"	"	"	"	49.5	"	"	"	5.7
- 9	"	"	"	"	50.4	"	"	"	2.8
-10	"	"	"	"	77.0	"	"	1.65-1.75	19.5
-11	"	"	"	"	82.3	"	"	"	10.5
-12	"	"	"	"	80.9	"	"	"	7.5
-13	"	"	"	"	80.0	"	"	"	5.5
-14	"	"	"	"	13.8	"	"	1.0	22.3
-15	"	"	"	"	13.5	"	"	"	2.2
V-1- 1	3.0	6	60°	2.2	7.8	20	1.4		
- 2	"	"	"	"	15.7	"	"		
- 3	"	"	"	"	21.7	"	"		
- 4	"	"	"	"	26.7	"	"		
V'-1- 1	3.0	6	60°, with lip	2.2	15.3	20	1.4		
- 2	"	"	"	"	23.0	"	"		
- 3	"	"	"	3.5	30.7	"	"		
- 4	"	"	"	"	45.5	"	"		
V-2- 1	3.0	6	60°	5.0	7.2	30	1.4		17.2
- 2	"	"	"	"	6.7	"	"		6.8
- 3	"	"	"	"	7.5	"	"		4.8
- 4	"	"	"	"	6.9	"	"		3.2
- 5	"	"	"	"	8.4	"	"		15.5
- 6	"	"	"	"	8.7	"	"		9.5
- 7	"	"	"	"	"	"	"		4.8
- 8	"	"	"	"	8.2	"	"		2.3
- 9	"	"	"	"	10.4	"	"		22.7
-10	"	"	"	"	11.1	"	"		8.2
-11	"	"	"	"	11.3	"	"		5.2
-12	"	"	"	"	10.0	"	"		2.7
-13	"	"	"	"	32.1	"	"		38.3
-14	"	"	"	"	32.8	"	"		24.3
-15	"	"	"	"	33.5	"	"		18.5
-16	"	"	"	"	"	"	"		10.3
-17	"	"	"	"	32.8	"	"		13.3
-18	"	"	"	"	72.0	"	"		14.0

ザーで解析 (1/250コマ/sec で分解可能) し, 粒子の回転の強さや回転の仕方について詳細なデータを読み取った。

最後に, 移動河床を用いて, 渦動管による土砂排除に関する実験を行い, 主水路の流砂濃度と管内流砂濃

度との関係、排砂効果、流入した砂れきが管内に堆積し、スリット管がつまる限界の諸条件等についての実験的検討を行った。実験条件は、Table 2 に示すとおりである。

3.2 実験結果とその考察

Fig. 5 は流量係数 C と b/D の関係を示したものである。実験条件は $\theta=45^\circ$ 、主水路の $F_r=0.2$ と限られており、かつ b/D の範囲も狭く、Fig. 5 の関係を一般的なものと見ることはできないが、実験条件の異なる Robinson⁶⁾ や吉良ら⁹⁾ の実験結果でも c の値は 0.7 付近を中心にばらついており、条件が異っても、Fig. 5 の関係とそれほど大きく相異なるものと思われる。

Fig. 6 は、上述の C の値を用いて (14) 式で計算した r の値 ($=0 \sim X$ 間の渦動排砂管への流入量/同区間の主水路の流量) と実験値とを比較したものの 1 例である。すなわち、スリットからの流入量分布に関する理論値と実測値との比較である。

$K=0$ 、すなわち横からの流入水の管軸方向の流速成分の持つ運動量を無視した取り扱いでは、実測値とかなり大きな相異を示す。図中に示した K の値は実測値と比較的よく適合するように逆算的に求めたものである。他の Case についても、計算値が実測値と比較的よく適合するような K の値を決めることが可能であった。このようにして求めた K の値は、 $F_r=0.2$ 、 $\theta=45^\circ$ という実験条件のもとで、Fig. 7 に示すように b/D とよい相関を示す。 $K=0$ および $K=1$ はそれぞれ管への流入水の流向が管軸に直角および主水路の流向になっていることを意味するが、実験値は $K=0$ と $K=1$ の間にあり、かつ b/D が小さくなるにつれて K が小さくなることは物理的に見て首肯される。しかし、Fig. 7 の関係は $\theta=45^\circ$ のものであるが、 $\theta=45^\circ$ についての一般的なものかどうかについてはなお検討の余地がある。

つぎに、管内の流れの特性について述べる。Fig. 8 は、水とほとんど同一比重の固体粒子をスリットの少し前面より河床面近くに投入し、それがスリットに近づき管に流入し、スリット区間を抜け出すまでの運動経路を高速度撮影カメラで追跡したものの 1 例であって、粒子は回転しながら流下するが、回転の状態は極めて不規則で複雑な挙動を示している。粒子の回転方向は多くの場合、管軸流下方向に向って反時計回りである。

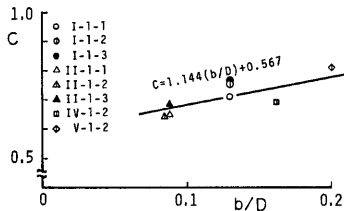


Fig. 5. Relation between coefficient of discharge C and relative slit width b/D

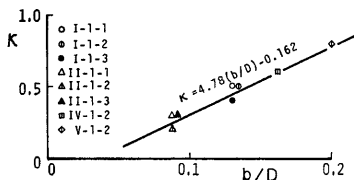


Fig. 7. Relation between coefficient K shown in Fig. 2 and relative slit width b/D

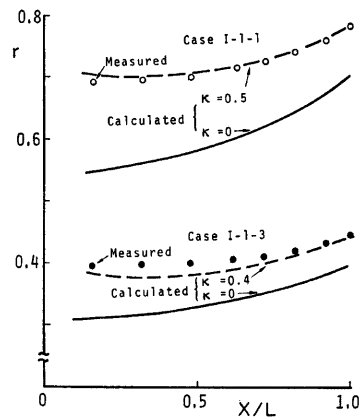


Fig. 6. Comparison between experimental and theoretical results eq. (14) for the distribution of the inflow discharge to vortex tube along the tube axis.

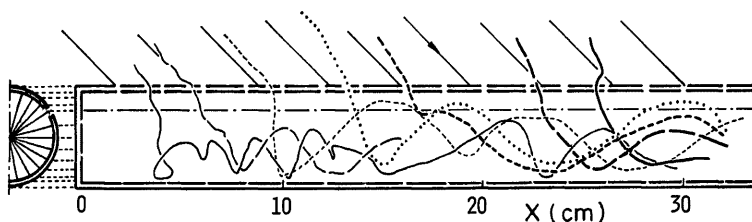


Fig. 8. Trajectories of neutral buoyancy particles in the Vortex tube which show the spiral motion.

あるが、時には時計回りのものも生じており、スリットを通過する水束は上下に変動しているものと想像される。

Fig. 9 は粒子の回転速度 V_w を読み取って、その頻度分布を示したものの 1 例である。資料数 303, V_w は平均値 55.15 cm/s 標準偏差 23.89 cm/s の正規分布をしており、不規則性が強いことを示している。

Fig. 10 は V_w/V_s の管軸方向の分布を示したものである。 V_w は V_s と密接な関係があることが知られる。また、 V_w/V_s は b/D^2 によって相異し、 b/D が大きい方が V_w/V_s は大きい。

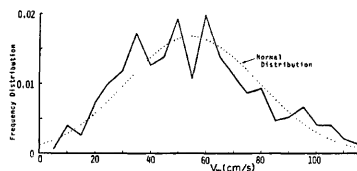
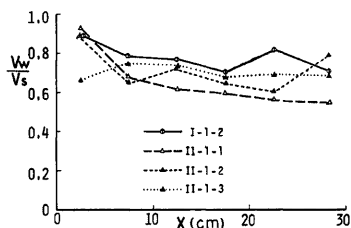


Fig. 9. Frequency distribution of rotating velocity in the vortex tube.

Fig. 10. Ratio of rotating velocity V_w in the vortex tube and inflow velocity V_s from slit.

つぎに、主水路の流砂量を増加させて行き、管内に土砂が堆積して、遂には管を閉塞するに至るまでの状況を調べた。Fig. 11 はその 1 例である。Fig. 中 Q_{ss} , Q_{Ts} および Q_{TL} はそれぞれ、主水路の流砂量、渦動管により排除された流砂量および流量である。また斜線をほどした所が堆積の生じている部分である。実験条件は移動床での Case I-1 であり、主水路幅 20 cm, 流量 2.2 l/s である。主水路の流砂量は時間とともに段階的に増加させ、平衡状態が得られると、しばらくその状態を保持して測定を行い、次の段階に変えるようにした。Fig. 11 はこのようにして得られた結果であるが、ごく、流砂量の少ない段階から管の先端部には堆積が生じる。しかし、流砂量のある段階までは、この堆積部は発達することなく、主水路の流砂量は全量渦動排砂管で排除される。しかし、主水路の流砂量がこの限界値より大きくなると、堆積区間は延びて行き、その時の流砂量に対応した渦動管長をとって平衡状態を保持する。このとき、渦動管のつまっている部分を流下して来た主水路の流砂量は渦動管を over して流下するからその分だけ排砂効率が悪くなる。さらに主水路の流砂量を増加していくと、堆砂区間は急激に延びて渦動管を完全に閉塞して排砂機能を停止する。こうした事実は渦動管内の堆砂が発達するかどうかの条件が、管の先端部における流入速度と粒子の沈降速度の関係ならびにその点での管内濃度に支配されることを示しているものであろう。すなわち、流砂濃度が増加すると、管長が短くなり、したがって先端部付近の流入速度 v_{so} が増加して平衡状態を作る。このことは前章において考察したとおりである。

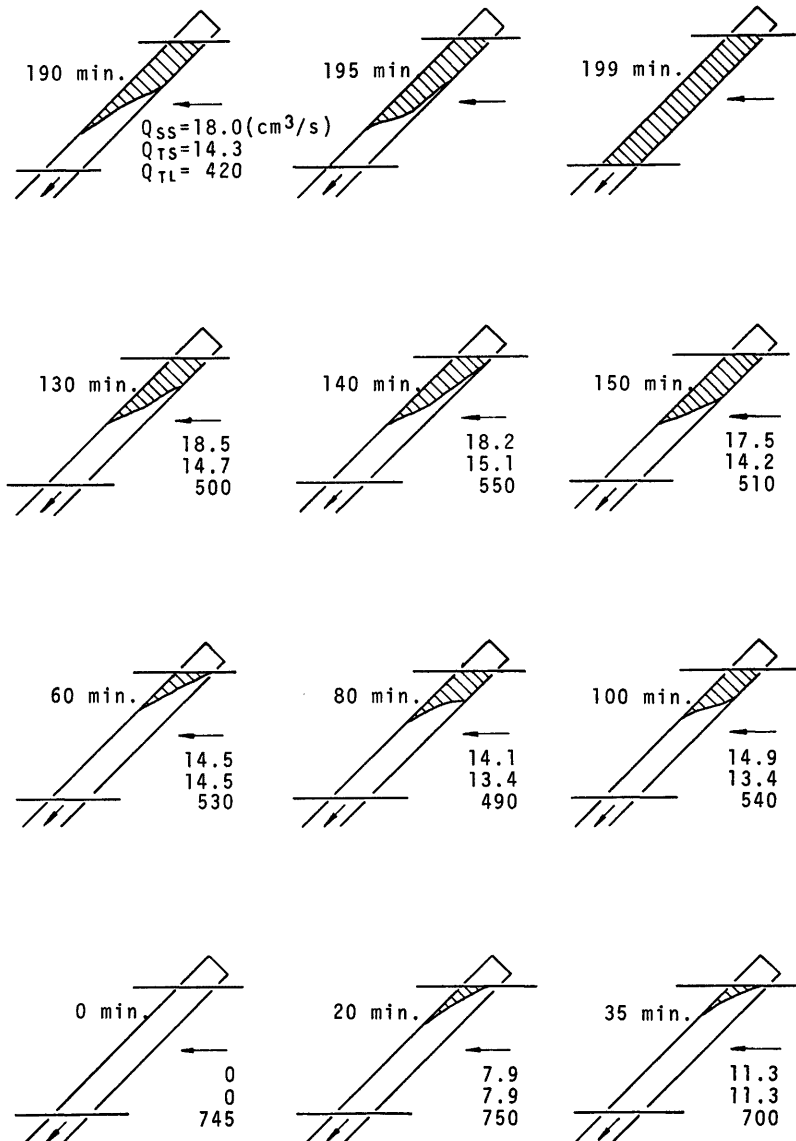


Fig. 11. Sediment removal by vortex tube sand trap. (Case 1-1) Hatch mark shows the part of sediment deposition in the vortex tube. Q_{ss} and Q_{rs} are sediment discharge and removed sediment discharge respectively.

そこで、このような実験を種々の条件のもとで行って、渦動管の堆積部が発達しない限界の先端部の流入速度 v_{soc} を示す (21) 式の関係を実験的に求めると Fig. 12 のとおりである。限界を与える v_{soc}/w の値は、与えられた b/D ごとに c_{so} の関数となり、 c_{so} がこの限界曲線より小さければ、渦動管はつまりず機能を果たすことになる。また、一定の c_{so} に対して v_{soc} がこの限界曲線の v_{soc} よりも大きければ渦動管は機能する。 v_{soc}/w の値は b/D が小さくなるにつれて、大きくなるが、これは、同じ v_{so} の値に対して形成される渦の強さは b/D が小さくなるにつれて減少することによるものと考えられる。しかし、Fig. 12 に対する実験の範囲は限られており、かつ実験値もそれほど多くないので、さらに実験を重ねて検討していくことが必要である。

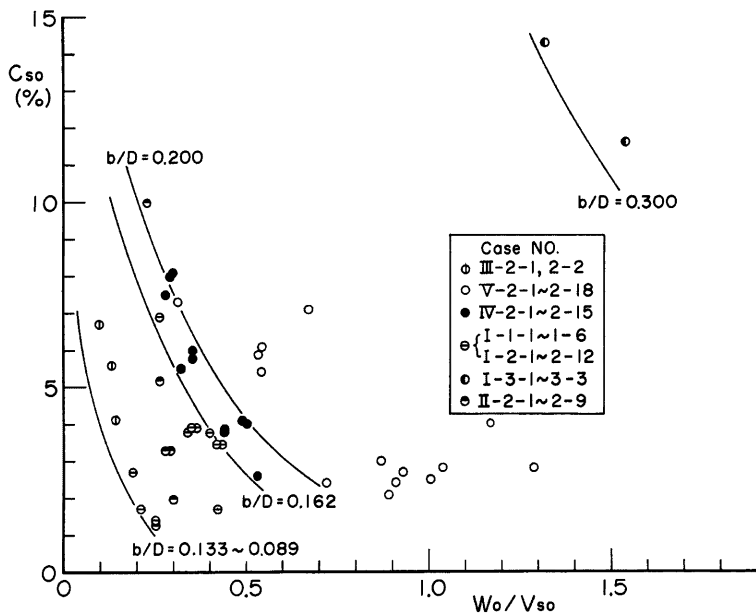


Fig. 12. Critical sediment concentration in the upstream end of the vortex tube over which clogging of the tube by sediment occur.

4. 結 語

渦動排砂管の水理機能に関して理論的、実験的研究を行った。得られた結果の主なものを要約して結語とする。

- (1) 渦動排砂管は流れに対して管軸を 45° に設置するのが最も効果的であることが従来により明らかにされているので、本研究はすべてこの条件に対して行った。このような場合に対しては、スリットから持ち込まれる管軸の方向の運動量を無視することはできない。
- (2) スリットから持ち込まれる運動量を考慮した管内流れに対する運動量方程式からスリットへの流入量分布、管内の流量ならびに流水の排除率などを求める式が導かれ、実験の結果、それらの妥当性が実証された。

- (3) 流量係数 C やスリットから持ち込まれる運動量に関する係数 K とスリットの相対幅 b/D の関係が求められた。
- (4) 渦動排砂管の機能を最も大きく支配する管内の渦の特性が中立粒子をトレーサーとして高速度カメラにより明らかにされた。その結果、管内の流れの回転状態は極めて不規則で、回転速度の速度分布はほぼ正規分布に従うこと、その平均回転速度はスリットからの流入速度と密接な関係を持っていることなどが明らかにされた。
- (5) 理論的な考察から、渦動管の形状に関する無次元量 βL が排砂機能に関する水理量を支配する重要なパラメーターであること、 $\beta L=1\sim 2$ 程度が最も効率がよいことが明らかにされた。一方、できるだけ広い範囲の排砂をするためには βL を大きく取る方がよい。しかし、 βL を4程度より大きくすると効率が非常に悪くなることが明らかにされた。
- (6) 渦動排砂管が排砂機能を果さなくなる条件が考察された、そのうち、渦動管に土砂が堆積し、管が閉塞するに至る限界条件として、理論的考察と実験結果とから Fig. 12 に示す関係が求められた。

本研究は、新日本技術コンサルタント 陳 活雄氏、中西 章氏の努力に負う所が極めて多い。ここに深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Rowhwer, C.: Effect of shape of tube on efficiency of vortex tube sand traps for various sizes of sand, Ft. collins, 1935.
- 2) Koonsman, G. L.: Efficiency of a vortex tube sand trap, Colo. St. Univ., Ft. Collins, Colo., 1950.
- 3) Parshall, R. L.: Model and Prototype studies of sand traps, Trans. of ASCE, Vol. 117, 1952.
- 4) Martin, H. M. and E. J. Carlson: Model studies of sediment control structures of diversion dams, Proc. of the Minn. Internat. Hydr. Convention, Minneapolis, Minn., 1953, pp. 109-122.
- 5) Ahmad M.: Final recommendation from experiment on silt ejector of D. G. Kahn Canal: Hydraulic Research, IAHR, 1958.
- 6) Robinson, A. R.: Vortex tube sand trap, Proc. of ASCE, Dec. 1960, IR4, pp. 1-34.
- 7) 吉良八郎・横瀬広司・中西 弘：滞砂防除に関する土砂水理学的研究 (II)―渦動管排砂工の水理構造に関する一実験的考察―，農業土木学会論文集第15号，1966。
- 8) 吉良八郎・石田陽博・畑 武志：滞砂防除に関する土砂水理学的研究，第6報，渦動管排砂工の沈砂池への適用，神戸大学農学部研究報告，第12巻第2号，1977。
- 9) 吉良八郎・佐々木孝：滞砂防除に関する土砂水理学的研究，第5報，渦動管土砂吐工の効果について，神戸大学農学部研究報告，第11巻第1号，1973。
- 10) 村 幸雄・荒木正夫・加藤正義：貯水池堆砂防止機構に関する実験的研究，建設省土木研究所報告，94号，1965。
- 11) Araki, M.: Study on the Hydraulics and function of slit conduit used for drain, Bulletin of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 20, 1960.