



# 滞砂防除に関する土砂水理学的研究（第7報）：沈砂池における渦動管排砂工の水理に関する実験・解析（農業生産工学）

吉良, 八郎  
星野, 益三

---

**(Citation)**

神戸大学農学部研究報告, 13(1):103-109

**(Issue Date)**

1978

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/00228567>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00228567>



## 滞砂防除に関する土砂水理学的研究

第7報 沈砂池における渦動管排砂工の水理に関する実験・解析

吉良 八郎\*・星野 益三\*

(昭和52年8月10日受理)

### PSAMMO-HYDRAULICAL STUDIES ON THE CONTROL OF SEDIMENTS

#### VII. An Experiment and Analysis on the Hydraulic Problems of the Vortex Tube Sand Trap in the Sand Settling Basins

Hachiro KIRA and Masuzo HOSHINO

##### Abstract

Vortex tubes are special conduits having narrow slits along one-sided walls. Gravels and sands are sucked through these slits in to the conduits and discharge out of them by the spiral flow occurred in the conduits. What has been mentioned so far in this paper on vortex tube, a special pipe, will be summarized as follows.

1. From the preliminary experiment on the sand flushing tube without slit the value of friction factor as follows is calculated,  $\lambda_2=0.022$ . In the next place, by analyzing the experimental result of vortex tube, the values such as follows were considered to be appropriate.

$$\eta=1.18$$

$$\beta=0.345 (b/D)-0.004$$

where,

$\eta$  is a coefficient larger than 1, and as it is to be afferent more or less by the shape of slit, it ought to determined experimentally.

$\beta$  is a function determined only by the form of the vortex tube, as defined as follows.

$$\beta=\sqrt{2\alpha/\eta} (b/A)$$

2. Velocity of inflow through slit, mean velocity in the tube and pressure head in the tube obtained by experiments are shown in Figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 and 13 respectively. In Figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 and 13, there are shown the calculated values of the first approximate solution for special case due to Araki's equations (12), (19) and (13).

As seen in Figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 and 13, experimental values and calculated ones agree favorably.

3. Vortex tube sand trap is effectively used for removing sediment from the sand settling basins in the head works.

The authors earnestly hopes that such a vortex tube will be applied as much as possible in the future.

#### I. まえがき

頭首工などにおける沈砂池の自然排砂に、ラセン流を利用した渦動管排砂工を適用する場合の土砂水理機能を明らかにするために、基礎的・応用的な水理実験を行ない、実際の設計に役立つ水理諸元について検討した。

前報<sup>2)</sup>では、設計の指標となる諸元、たとえばスリット幅、渦動管断面積、スリット流入速度、渦動管内平均流速、ラセン流発生領域、支配フルード数、または有効渦動管長などの関係を明らかにした。また、有効渦動管長と関連させて特殊な排砂ゲートを併用し、下流側幹線水路へ通水しながら短時間に完全排砂を行なうという、沈砂池縦断方向の連続排砂方式に関する土砂理機能およ

\* 水利用工学研究室

びその適用性などについても実験・解析を行ない、この種の線排砂法は従来の点排砂法に比較して極めて高い排砂性能を示すことを立証、その適用性について論じた。この報告では、理論解析に必要な諸実験定数を明らかにし、荒木による近似解を適用して実験結果の検証を行った。

II. 解析および考察

狭いスリットを有する渦動管 vortex tube と同一な考え方である slit conduit (一様スリット管および変化スリット管) については、荒木<sup>1)</sup> による理論解析があるが、前報<sup>2)</sup> で示した $1/6$ 水理模型実験結果から、まず定数  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\Phi$  などを吟味し、誘導された各式の適合性を調べた。すなわち、第1図を参照して、この種スリットを有する渦動管 (またはスリット管) の定常流の運動方程式としては、運動量の関係から(1)式の連続式および壁面に働く摩擦力 $\tau_0$ を(2)式で表わせるものとして、(3)式の基礎方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} = q \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\tau_0}{\rho g R} = \frac{\lambda V^2}{2gR} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{w} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \right) + \frac{\alpha V q}{gA} \frac{\lambda V^2}{2gR} \dots\dots\dots(3)$$

式が与えられている。(3)式では、通常の管水路の基礎方程式に対して  $\alpha V q / gA$  なる項が付加された形となっており、また  $\alpha$  は、(4)式で定義される流速分布補正係数である。

$$\alpha = \int_A \frac{u^2}{V^2} \frac{dA}{A} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $x$ : 管軸に沿った下流方向軸、 $y$ :  $x$  軸と直角上方軸、 $z$ : 出口中心からの鉛直上方軸、 $u$ :  $x$  方向速度成分、 $V$ : 管断面平均流速、 $Q$ : 管内流量、 $q$ : 管の単位長さあたりスリットからの流入水量、 $A$ : 管断面積、 $R$ : 径深、 $g$ : 重力の加速度、 $\rho$ : 流体密度、 $w = \rho g$ : 流体の単位体積重量、 $\theta$ :  $x$  軸の接線が水平線となす角、 $\lambda$ : 摩擦抵抗係数、 $v$ : スリット流入速度、 $b$ : スリット幅、および  $p$ : 中心軸における圧力である。

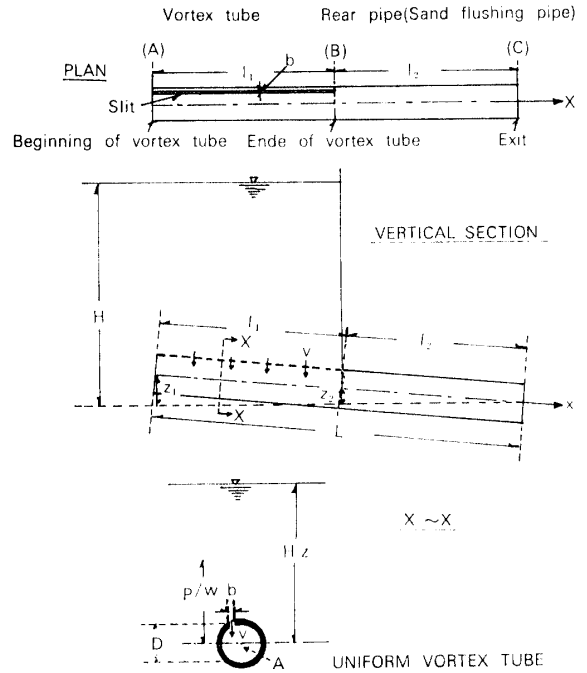
以上で(3)式の基礎方程式に(1)式および、次に示す(5)、(6)、(7)式の関係代入し、スリット管内流量  $Q$  について誘導された微分方程式は(8)式で示され、これが、前報<sup>2)</sup>

$$H - \frac{p}{w} - z = \eta \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(5)$$

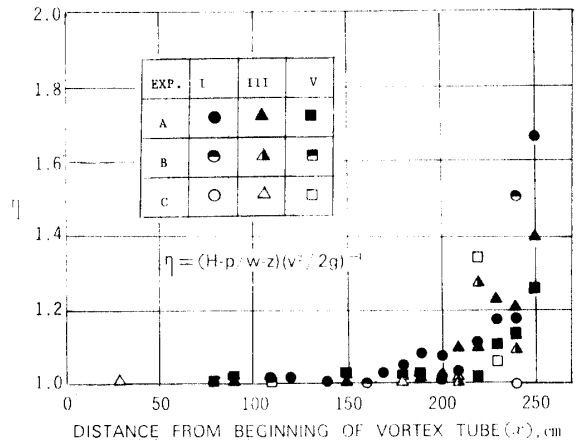
$$q = bv = b \sqrt{\frac{2g(H - p/w - z)}{\eta}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{p}{w} = H - z - \frac{\eta}{2gb^2} \left( \frac{dQ}{dx} \right)^2 \dots\dots\dots(7)$$

で扱った実験のように、等断面積で、かつ一定幅の狭いスリットを有する場合の、いわゆる一様渦動管 uniform



第1図 一様渦動管の概要図



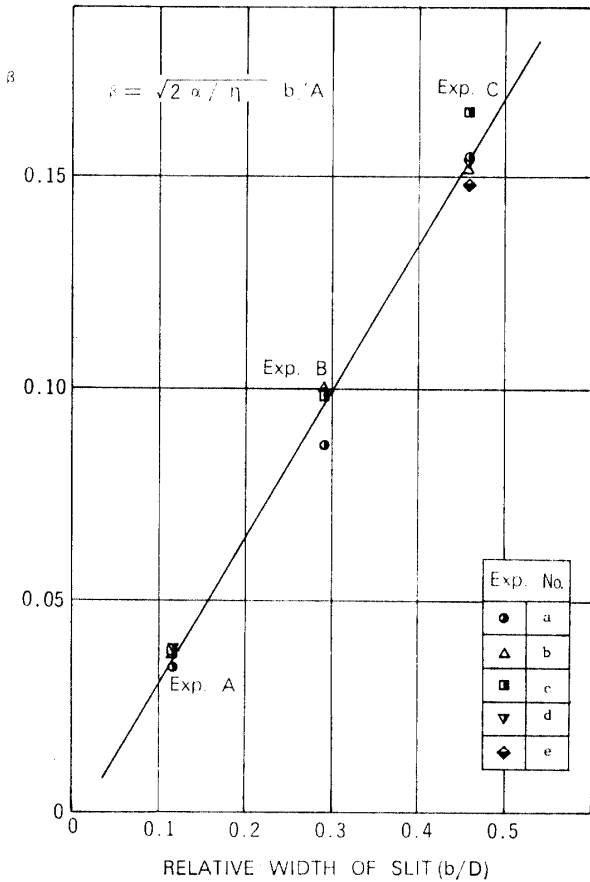
第2図 有効渦動管長域における速度水頭補正係数  $\eta$  の分布

vortex tube の微分方程式となる。

$$\frac{dQ}{dx} \frac{d^2Q}{dx^2} - \frac{2ab^2}{\eta A^2} Q \frac{dQ}{dx} - \frac{ib^2}{2\eta R A^2} Q^2 = 0 \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $H$ : 出口中心から水面までの高さ、 $z$ : 出口中心からスリット始端または終端までの高さ、 $\eta > 1$ : スリット形状により異なる定数である。

以上で、(8)式を境界条件のもとに解けばよいが、特解の外は一般解が直接得られないため、荒木<sup>1)</sup> は逐次近似解法により、摩擦抵抗係数  $\lambda$  の零次項を示す(9)式を、スリット始端および終端の両境界条件のもとに解いて、第  $\frac{d^2Q_0}{dx^2} - \beta^2 Q_0 = 0 \dots\dots\dots(9)$  一次近似解、更に第二次近似解を求めている。ここで(9)



第3図 相対スリット幅 b/D と β 関数の関係

式の β は、(10)式で示される渦動管断面形のみによって決定される関数で、水深 H や位置 x には無関係である。

$$\beta = \sqrt{\frac{2\alpha}{\eta}} \frac{b}{A} \dots\dots\dots(10)$$

さて、前報<sup>2)</sup>の模型実験例では、ラセン流を助長させるため管入口断面が閉塞されている条件であるから、特解としての第一次近似解を適用すると、流量 Q<sub>0</sub>、スリットからの流入水量 q<sub>0</sub> (または流入速度 v<sub>0</sub>) および圧力 p<sub>0</sub> はそれぞれ(11), (12), (13)式となる。

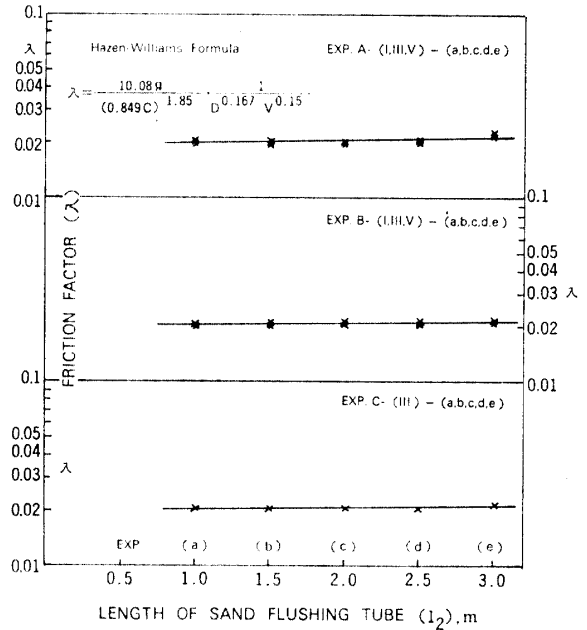
$$Q_0 = A\sqrt{2gH}\Phi(e^{\beta x} - e^{-\beta x}) \dots\dots\dots(11)$$

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= \frac{dQ_0}{dx} = \beta A\sqrt{2gH}\Phi(e^{\beta x} + e^{-\beta x}) \\ v_0 &= \frac{q_0}{b} = \frac{1}{b} \beta A\sqrt{2gH}\Phi(e^{\beta x} + e^{-\beta x}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{p_0}{w} = H - z - 2\alpha H \Phi^2(e^{\beta x} + e^{-\beta x})^2 \dots\dots\dots(13)$$

ここに、Φ は(14)式で示されるもので、β 関数と同様に水深 H や位置 x には無関係で、管断面形のみによって決定される関数である。

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\alpha(e^{\beta l_1} + e^{-\beta l_1})^2 + \lambda_2 \frac{l_2}{R}(e^{\beta l_1} - e^{-\beta l_1})^2}} \dots\dots\dots(14)$$



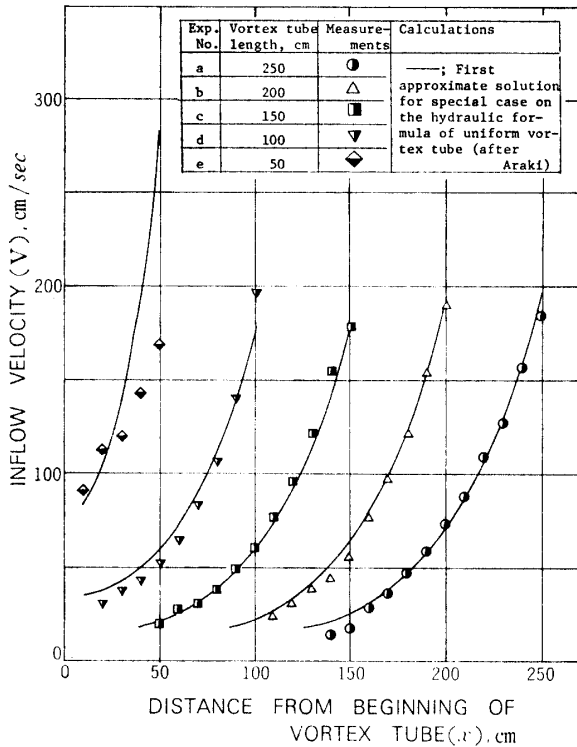
第4図 排砂管の摩擦抵抗係数 λ<sub>2</sub> (Hazen-Williams の経験式による計算値)

また(14)式で、l<sub>1</sub>: 渦動管長、l<sub>2</sub>: 排砂管長、λ<sub>2</sub>: 排砂管内の摩擦抵抗係数である。

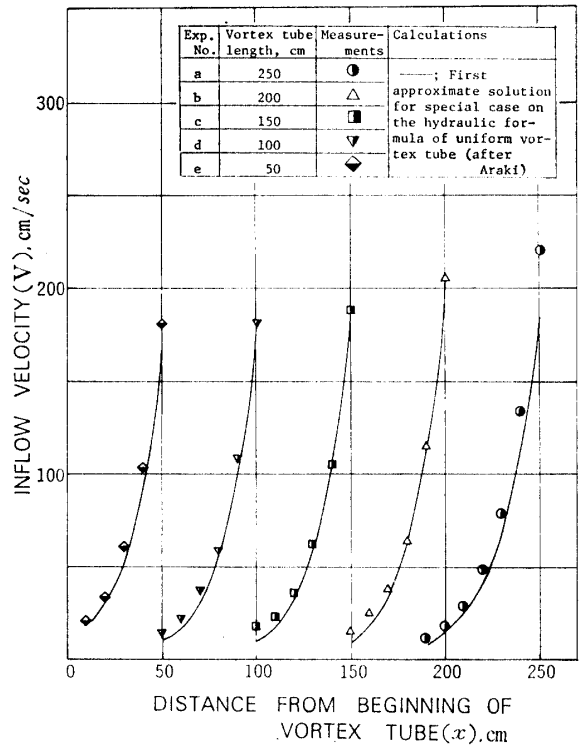
以上により、η、β または Φ などの決定が問題となるが、速度水頭の補正係数である η は、(5)式から 1 より大きい係数であって、スリット形状により異なるものといえ、また β や Φ などの係数はそれぞれ(10), (14)式に示されるように、水位 H や位置 x などには無関係な管 (渦動管および排砂管) 断面形状によって定まる関数である。その他、(4)式で定義される流速分布補正係数 α や摩擦損失係数 λ などを含め、いかなる値をとるべきかを吟味した。

まず(5)式に前報<sup>2)</sup>での実験値を代入して速度水頭補正係数 η を算出してみると、第2図に示すように有効渦動管長 l<sub>M.0</sub> の範囲においては η > 1 となり、位置 x やスリット幅 b、または下流側排砂管長 l<sub>2</sub> などにより多少異なるが、前報<sup>2)</sup>の基礎実験例の場合 (η ≃ 2.5~3.5) よりかなり小さく、むしろ荒木による一様スリット管での実験例の場合 (η = 1.15)<sup>1)</sup> に近似している。この際、解析には、水理模型実験結果から実用に適用できると考えられる Exp. A-(I, III, V)-a の有効渦動管長範囲における η = 1.18 (1.00 < η < 1.66) を用いることにした。

次に、β 関数は(10)式から η = 1.18、流速分布補正係数 α = 1.02<sup>1)</sup> として求めたが、第3図に示すように、相対スリット幅 b/D との間には、前報基礎実験結果<sup>2)</sup> と同じように linear な関係が認められ、実験式として(15)式が得られた。



第5図 スリット流入速度分布 (Exp. A—Ⅲ—a~e)



第6図 スリット流入速度分布 (Exp. B—Ⅲ—a~e)

$$\beta = 0.345 \left( \frac{b}{D} \right) - 0.004 \quad \dots\dots\dots (15)$$

β関数は、(10)式またはこれらの結果からみて、明らかに水深Hや位置xには関係なく、スリット幅b、管径Dまたは管断面積Aなど、渦動管断面形のみによって線形変化する関数であることが知れる。

下流側排砂管l<sub>2</sub>の摩擦抵抗係数λ<sub>2</sub>については、模型実験の場合、極めて平滑な硬質塩化ビニール管を用いたので、Cの大きい平滑管の流れに適している Hazen-Williamsの経験式(16)<sup>3)</sup>を用いて評価したのが第4図である。

$$\lambda = \frac{10.08g}{(0.849C)^{1.85}} \cdot \frac{1}{D^{0.167}V^{0.15}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

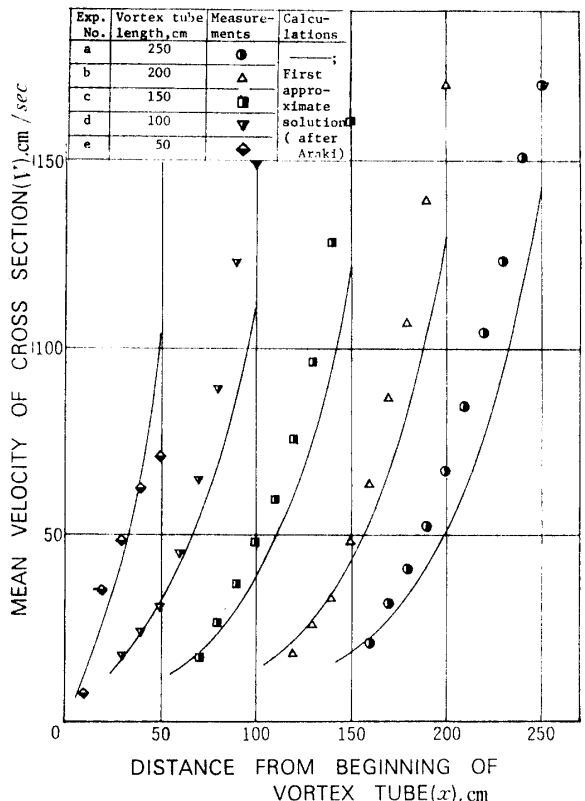
この際、Hazen-Williams式のCは、新しい塩化ビニール管として C=145、管内平均流速Vはそれぞれ排砂管始端(渦動管終端)を用いた。その結果によると、水深、スリット幅、排砂管長に関係なくほぼ一定値λ<sub>2</sub>≒0.02を示し、他方原型の場合を考え、(17)式のManningの経験式

$$\lambda = \frac{8gn^2}{R^{1/2}} = \frac{124.5n^2}{D^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

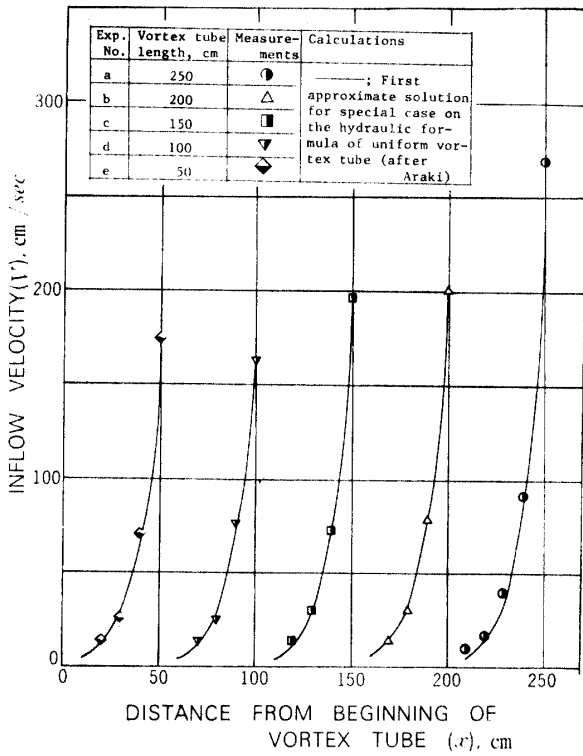
から、平滑コンクリート管(または新全溶接鋼管)の粗度係数n<sub>M</sub>=0.012、管径D<sub>P</sub>=D<sub>M</sub>/N=10D<sub>M</sub>=0.6mとして評価してもλ<sub>2</sub>=0.021が得られる。更に排砂管の圧力水頭を測定して、管径D、長さlの単一管水路で、管長が十分長く形状損失が無視される場合の等流の式(18)から摩擦損失係数λを求めた。この際実験では、渦動管部の

$$h\lambda = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (18)$$

スリット幅調節板を外して一般の点排砂方式となし、ラ



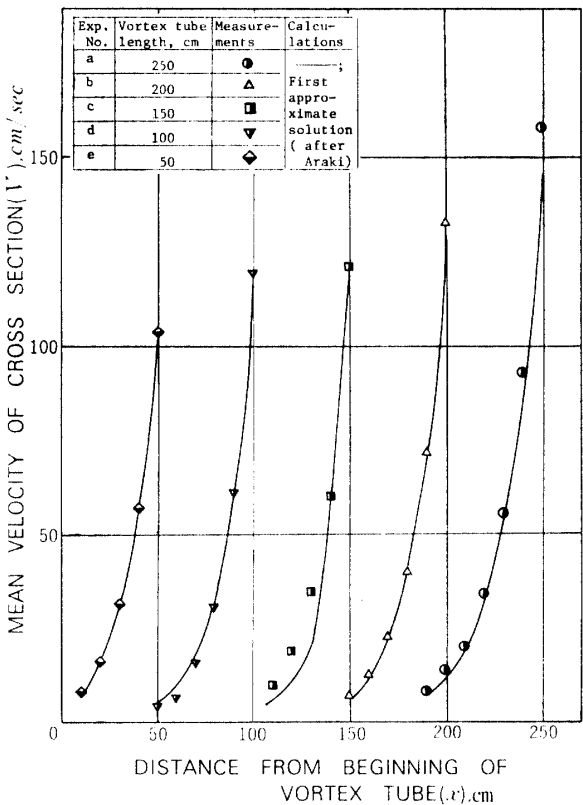
第8図 渦動管内平均流速分布 (Exp. A—Ⅲ—a~e)



第7図 スリット流入速度分布 (Exp. C—■—a~e)

セン流の発生を防いだが、その結果として  $\lambda_2 = 0.022$  が得られたので本解析ではこの値を用いた。

また、bはスリット幅そのものでなく、実験結果から



第9図 渦動管内平均流速分布 (Exp. B—■—a~e)

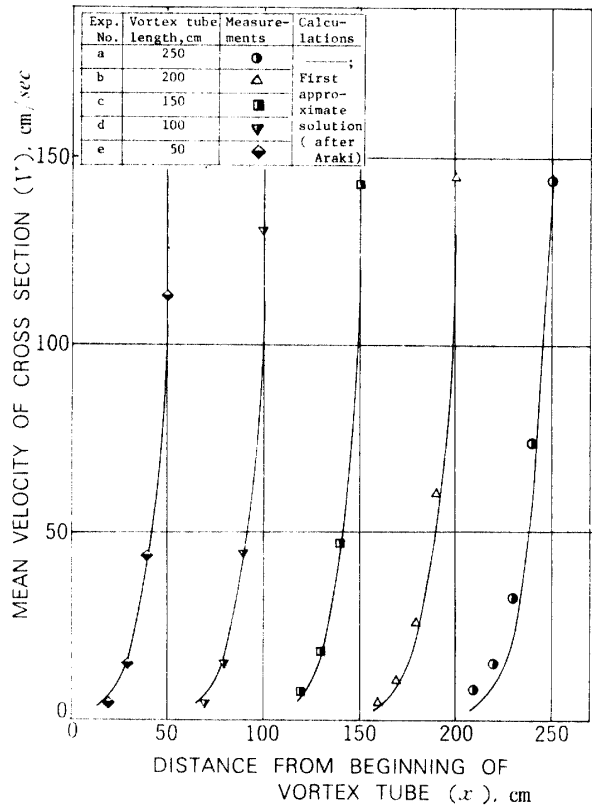
vena contracta の幅をとる必要があることがわかったので実験用渦動管のスリット幅に2次元スリットにおける収縮係数  $C_c = 0.611$  を乗じて用いた。

以上の諸定数を用い、スリット流入速度  $v$ 、渦動管内平均流速  $V$  および圧力水頭  $p/w$  などを、それぞれ(12)式、(19)式および(13)式から計算して、前報<sup>2)</sup>での実験値と比較してその適合性を検討した。ここに(19)式は、渦動管入口断面が閉塞されている場合の、特解としての第一次近似

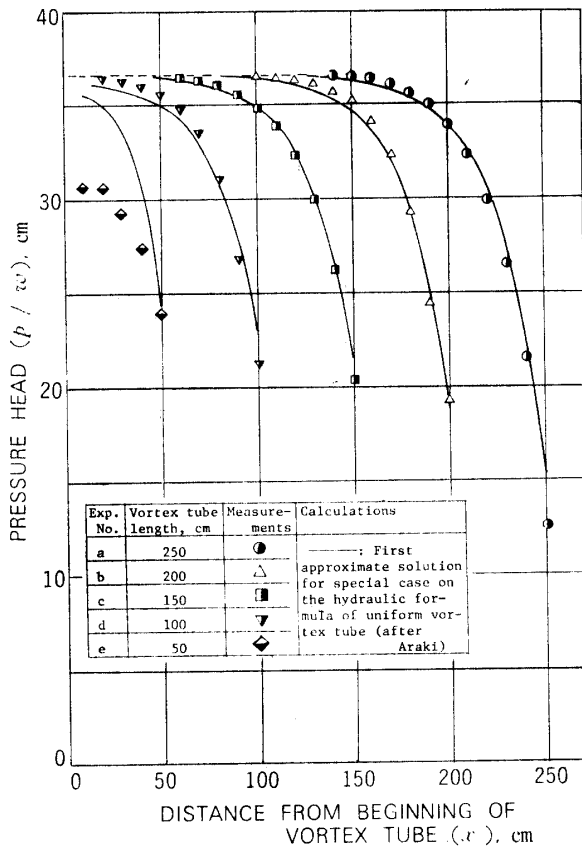
$$V_0 = \frac{Q_0}{A} = \sqrt{2gH} \phi(e^{\beta x} - e^{-\beta x}) \dots\dots\dots(19)$$

解に基づいた渦動管内平均流速  $V_0$  を示したものである。まず、スリット流入速度 ( $v$ ) 分布について、模型実験値と前(12)式による第一次近似解の計算値を対応させたのがそれぞれ第5図 (Exp. A-III-a~e)、第6図 (Exp. B-III-a~e) および第7図 (Exp. C-III-a~e) である。また、渦動管内平均流速 ( $V$ ) 分布について、前(19)式による第一次近似解の計算値を対応させたのが、それぞれ第8図 (Exp. A-III-a~e)、第9図 (Exp. B-III-a~e) および第10図 (Exp. C-III-a~e) で、更に渦動管内の圧力水頭 ( $p/w$ ) 分布、すなわち動水勾配線について、模型実験値と、前(13)式による第一次近似解の計算を対応させたのが、それぞれ第11図 (Exp. A-III-a~e)、第12図 (Exp. B-III-a~e) および第13図 (Exp. C-III-a~e) である。

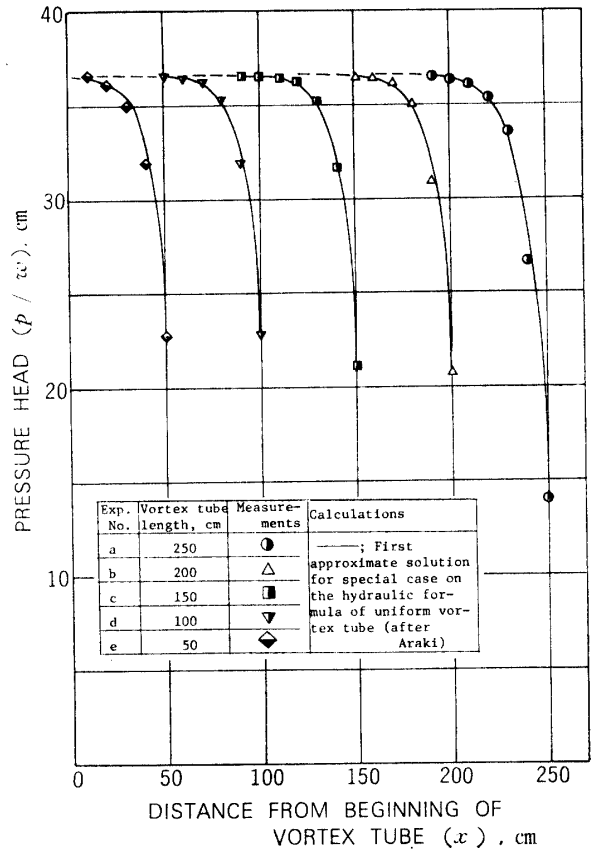
第5~13図で見られるように、実測値と計算値との一



第10図 渦動管内平均流速分布 (Exp. C—■—a~e)



第11図 渦動管内圧力水頭分布 (Exp. A—III—a~e)



第12図 渦動管内圧力水頭分布 (Exp. B—III—a~e)

致は、特例を除いて比較的良好である。この際、第8図 (Exp. A-III-a~e) において、Exp. A-III-e を除いて一般に管内平均流速測定値が計算値を上まわっているのは管内平均流速の測定に小型流速計 (SV101型) を使用したため、Exp. A (スリット幅  $b_M=0.75\text{cm}$ ) では、スリット幅が小さく、適正な渦動管中心位置の流速測定が困難で、多分にスリット流入速度の影響が現われたためと考えられる。また、それぞれの Exp. A-III-e ( $b_M=0.75\text{cm}$ ,  $H_M=36.60\text{cm}$ ,  $l_1=50\text{cm}$ ,  $l_2=300\text{cm}$  で、渦動管長が有効渦動管長より小さい  $l_1 < l_0$  の場合) の場合、たとえば第5図、第8図および第11図の Exp. e では、 $v$ ,  $V$  または  $p/w$  値の実測値が多少ばらついており、実測値が計算値から外れているのは、短区間における強度なラセン流の発生、空気トンネルの発生その他によったものと考えられる。

以上、模型実験値と計算値との一致が比較的良好であることから、この程度の原型渦動管の水理計算に対しては、適正な  $\eta$ ,  $\beta$  または  $\phi$  などの定数を選べば、荒木による第一次近似解(特解)程度で十分であると考えられ、更に前報<sup>2)</sup>の水理模型実験から得られた設計の指標となる水理諸元を併用すれば、渦動管排砂工の適正な設計が可能となろう。

### III. あとがき

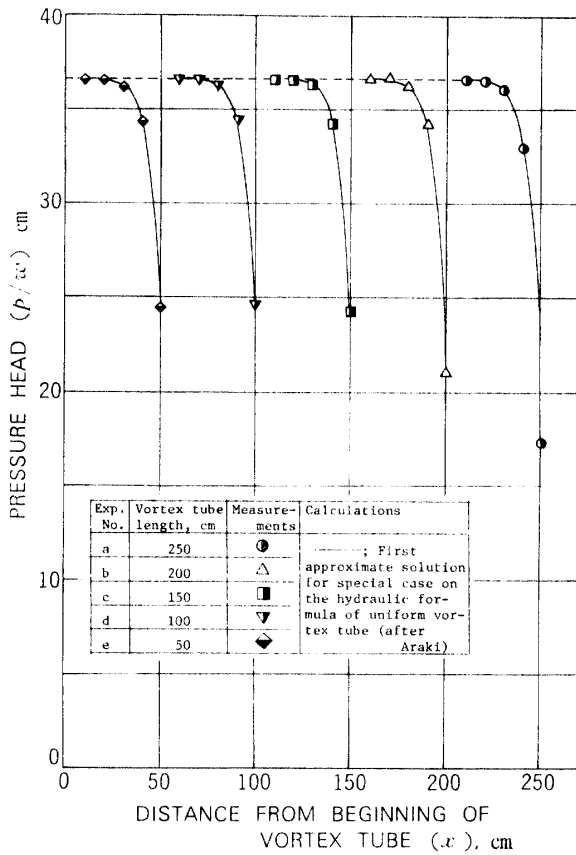
頭首工における沈砂池の自然排砂に、ラセン流を利用した渦動管排砂工を適用する場合の土砂水理機能を明らかにするため、水理模型実験を行ない、その結果から理論解析に必要な諸実験定数を明らかにして、荒木による近似解を適用して実験結果の検証を行なった。その成果の概要を示すと次のとおりである。

1) スリットを有しない管路についての予備実験の結果より、まず排砂管の摩擦抵抗係数として  $\lambda_2=0.022$  を算定した。次に、渦動管の実験結果を解析することにより、関数  $\eta$  および  $\beta$  は大体次のような値が適正と考えられた。

$$\eta = 1.18$$

$$\beta = 0.345(b/D) - 0.004$$

2) スリット流入速度  $v$ 、渦動管内平均流速  $V$  および渦動管内の圧力水頭  $p/w$  などの分布については、計算値と実測値との一致が比較的良好である。この際の計算には荒木による一様スリット管(管断面およびスリット幅が一定なスリット管)の特解(管入口断面が閉塞されている場合)としての第一次近似解を適用し、それぞれ模型実験結果と対応させた。



第13図 渦動管内圧力水頭分布 (Exp. C-III-a~e)

3) 渦動管排砂工は、有効渦動管長と関連づけて、特殊な排砂ゲートを併用し、その交互操作による縦断方向の連続線排砂法として採用すれば極めて効果的であり、頭首工の沈砂池自然排砂に適用すれば、下流側幹線水路へ通水しながら短時間に完全排砂が可能となる。

最後に、この種渦動管排砂工の実施設計には、なお適正な排砂ゲート（スリット調節ゲート含む）の開発という難問題が残されているが、将来このような渦動管がわが国でも広く実際に応用されることを望んでやまない。

引用文献

- 1) 荒木正夫：九州大学工学部紀要， 20(4)， 385-403， 1961， 土木学会誌 41(3)， 23-28， 1954， 土木学会論文集， 38， 20-26， 1955.
- 2) 吉良八郎， 石田陽博， 畑 武志：神戸大学農学部研究報告， 12(2)， 247-273， 1977.
- 3) 椿東一郎：水理学 I， 森北出版， 107-112， 1973.