

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 42 December, 1967

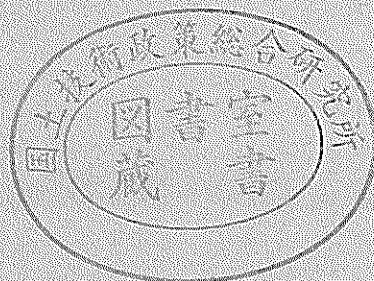
土砂の水力輸送に関する研究

— 土砂輸送時における電磁流量計の特性について —

……………入江 義次・白鳥 保夫・是石 昭夫

昭和 42 年 12 月

運輸省港湾技術研究所



土砂の水力輸送に関する研究

—— 土砂輸送時における電磁流量計の特性について ——

目 次

要 旨

1. まえがき	1
2. 電磁流量計の測定原理	2
2.1 測定原理	2
2.2 土砂混入による流量計への影響	3
3. 実験装置, 実験方法および供試材料	4
3.1 実験装置	4
3.2 実験方法	6
3.3 供試材料	7
4. 実験結果	7
4.1 測定結果	7
4.2 使用可能範囲の推定方法	7
4.3 土砂輸送時の測定可能範囲	8
4.4 使用可能範囲における精度	17
5. 結 論	17
6. あとがき	17
参 考 文 献	17

Research on Hydraulic Transportation of Soil
— **Characteristics of an electromagnetic**
flow meter at time of transporting soil —

Yoshiji IRIE *
Yasuo SHIRATORI **
Akio KOREISHI *

Synopsis

In order to transport soil through pipes economically, it is important to grasp a correct velocity of soil-water mixtures. Lately an electromagnetic flow meter is being used for this purpose, which has been widely employed in measuring flow rates of the water or homogeneous mixtures, and a lot of studies on it are reported but few dealing with its characteristics or applicable limit at time of transporting soil.

This report presents the result of the test done to investigate the applicable limit of an electromagnetic flow meter and its accuracy under transportation of soil. By using the electromagnetic flow meter of 100mm ID, the behaviour of particles in a pipe was observed to obtain the relationship between the conditions of flow of mixtures and the values indicated by it. The testing installation has a 100-mm line, about 70-m long altogether, inserting the measuring pipe on the way, of both 3-m steel and acrylic jointless tubes, and the behaviour of particles could be observed through transparent tubes, included one in the measuring pipe itself, of 7.8m in length. Materials used here are two kinds of sand with mean grain sizes of 0.25mm and 1.28mm, and a gravel of 7mm. Measuring instruments consist of electromagnetic flow meter, measuring tank to measure the flow rate and the soil content at the outlet, mud meter for consistency in a pipe, pressure gauges, etc..

Within our test, the error of values indicated was 2 or 3 per cent at maximum, in case of transporting soil generally and even installing its detector horizontally.

* Member of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division.

** Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division.

土砂の水力輸送に関する研究

—— 土砂輸送時における電磁流量計の特性について ——

入江 義次*
白鳥 保夫**
是石 昭夫*

要 旨

土砂を経済的に管路輸送するためには、土砂混合流れの流速を正確に把握することが必要である。近年この目的のために電磁流量計が使用され始めている。清、海水あるいは等質混合液の流量測定には電磁流量計が早くから利用され、この分野における研究は多いにかかわらず、土砂輸送時の特性、使用限界等についての報告は殆んど見当らない。

この様な理由から、当研究室では、室内実験装置により、電磁流量計の使用限界および精度について実験を試みた。

実験は口径 100mm の電磁流量計について、土砂の流動性状を色々な角度から観察し、これらと電磁流量計の指示値との関係を調べてみた。実験装置の管路は、内径 100mm 全長約70m で、途中に測定管を設けている。測定管は、3m の鋼管およびアクリル製の継目無しのもので、流動性状は、測定管を含め、7.8m の透明管部で外からも観察できるようにしてある。

本実験に使用した供試材料は、平均粒径 0.25mm, 1.28mm の砂および、7mm の砂利の3種類である。計測に使用した計器は、電磁流量計、吐出口における流量ならびに含泥率を計測するための計量装置、管内含泥率測定のための含泥率計、圧力計等である。

今回の室内実験の結果から推定すると、普通土砂を輸送する場合は、電磁流量計の発信部を水平に取付けた状態においても、誤差の最大値が2～3%程度で、十分信頼できる計器であることを確認できた。

1. ま え が き

浚渫船に対する計測機器の導入は、作業能率の向上、乗組員の浚渫作業に対する早期修熟、計器浚渫による稼働時間の延長、さらには、自動化による乗組員の削減等の要請から、真剣に検討され、最近建造される高能率船には、すでに大巾に採用したものが出現し始めている。土砂を水力輸送するポンプ浚渫船、ドラグサクシオン浚渫船等についても同様の傾向にある。これら、水力輸送を行なう浚渫船の浚渫関係計器のうちで、特に重要なものは、流量計、含泥率計であろう。日本鋼管株式会社が、昭和36年度、運輸省の補助金を得て、研究したり¹⁾所以もここにあるものと思う。

これら計器を装備した例をあげよう。現在関門地区で

鋭意稼働中のドラグサクシオン浚渫船「海鷗丸」²⁾には、電磁流量計および放射線含泥率計が装備され、これらは、単独指示および記録は勿論のこと、両者を積算することによって、浚渫土量が指示および記録される機構になっていて、運転方法が勘に頼る方法から、計器を仲介として、より正確に、早く対策を講じつつ行なえるようになってきている。さらに記録を解析することによって、浚渫土質に対するエコノミック・ローディング^{3), 4)}、最適吸込圧力等が求められる。実際に、流量計、含泥率計を装備した船とそうでない船について上記解析を試みれば、必ずその必要性を痛感するものと思う。流量計がな

* 機材部 流体輸送研究室

** 機材部 特殊作業船開発室

いドラグサクシオン浚渫船の場合、流量はオーバ・フローするまでの時間で、その大まかな数字はつかめるもの、オーバ・フロー後は、含泥率を基準にして流量の推定を行なう以外に適当な方法がない。この方法は非常に面倒であるにかかわらず精度が良い。

次にポンプ浚渫船では、管径、土砂の粒径、含泥率等によって、最適の輸送流速がある。もし流量計と含泥率計を装備しているとすれば、輸送土量が直ちに分り、無駄が少くなる。もしも、これらを装備していない船で、最も経済的な輸送条件を見いだそうとすれば、まず流速（流量）が問題になる。これを求めるためには、作業中にベニガラ等を投入して、吐出口から放出されるまでの時間と、排砂管長から算出するなり、吐出口における流線から算出せざるを得ないのであるが、これも面倒で、再々実験する訳にはゆかない。ましてや状態変化が激しい場合には、直ちに対策を講じる資料を得がたく、いきおい勘に頼ることになる。

このように、水力輸送において、最も重要な流量の計測装置は、必要であるにもかかわらず、ややもすると見落されたり、また装備していても、土砂輸送時の特性等は殆んど研究されていないのが実状である。

このような理由から、今回、当研究室では、電磁流量計の土砂輸送時における特性を調べてみた。

今回の実験は、土砂の流動状態が電磁流量計におよぼす影響と、流量計の使用可能範囲内の精度を実験によって求めることを課題とした。実験の結果は、管内含泥率および流速をパラメーターとして整理し、さらに、摺動限界流速、浮遊限界流速との関係を色々な角度から観察してみた。実験範囲内で、一応の使用可能範囲、精度は分ったつもりである。今後、浚渫船に、この種の計器を装備する際の参考になれば幸である。

2. 電磁流量計の測定原理

2.1 測定原理

電磁流量計の測定原理については、数多くの研究がある。ここでは、これらを参考にして⁵⁾、流量計の測定原理と、計測された流量が平均流量であることを簡単に述べる。

電磁流量計の原理は、Faraday の電磁誘導法則を用いたものである。すなわち、図-1のように、励磁コイルで、パイプ軸線に垂直な方向（図-1では、x 軸方向）に一樣な磁界を作り、パイプ内の導電性流体が磁束を横切って流れると、磁界および流れの方向に直角な y 軸方向に起電力を発生する。この起電力を増巾して記録させ

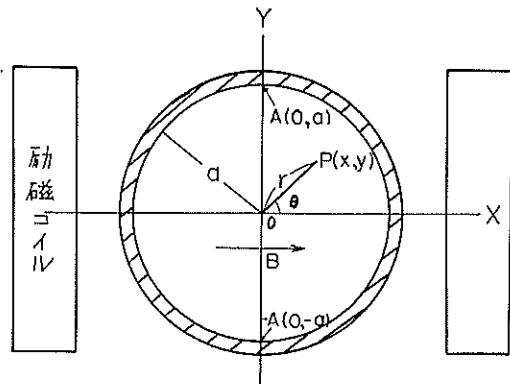


図-1 電磁流量計の原理図

るのが一般の電磁流量計である。今すこし理論的に述べる。図-1のように x 軸, y 軸, 流れの方向に z 軸をとり, x, y 軸を含む断面上の任意の一点を P(x, y) とし, P 点における流速を $v(x, y)$ とする。パイプの半径を a, 電極の位置を A, -A とし, P 点における磁束密度を B, 発生電圧を u とすると, 電磁流量計の基本式は, (1)式のように表わされる。

$$\nabla^2 u = \text{div} \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \text{Brot} V \dots\dots\dots (1)$$

速度 \mathbf{V} は z 成分のみ, B は x 成分のみであるから, $\mathbf{V} \cdot \mathbf{B}$ は y 成分のみで, 上式は次のように表わされる。

$$\nabla^2 u(x, y) = B \cdot \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$

$v(x, y)$ が与えられると, 電極間起電力は du は算出できる。

速度分布がパイプの軸線に対して対称であれば, x, y, z を円筒座表に変換できる。

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cdot \cos \theta \\ y &= r \cdot \sin \theta \\ z &= z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで r は中心 O から P(x, y) までの長さである。さらに $v(r, \theta) = v(r)$ とすると, (2)式は

$$\nabla^2 u(r, \theta) = B \cdot \frac{\partial v(r)}{\partial r} \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (4)$$

ここで, ポテンシャル $u(r, \theta) = g(r) \cdot \sin \theta$ と仮定すると

$$\begin{aligned} \nabla^2 u &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \\ &= \frac{\partial^2 g}{\partial r^2} \cdot \sin \theta + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial g}{\partial r} \cdot \sin \theta \\ &\quad - \frac{g}{r^2} \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(5)式を(4)式に代入して整理すると

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dg}{dr} - \frac{g}{r^2} = B \cdot \frac{dv}{dr} \quad \text{あるいは}$$

$$\frac{d}{dr} \left\{ \frac{dg}{dr} + \left(\frac{g}{r} \right) \right\} = B \cdot \frac{dv}{r} \dots\dots\dots(6)$$

(6)式を積分することにより

$$\frac{dg}{dr} + \frac{g}{r} = B \cdot v + K_1 \dots\dots\dots(7)$$

積分定数 K_1 は、 $v(a) = 0$, $\left(\frac{dg}{dr} \right)_{r=a} = 0$ から

$K_1 = g(a)/a$ となり、

(7)式は、

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (r \cdot g) = B \cdot v + \frac{g(a)}{a} \dots\dots\dots(8)$$

両辺に r を掛けて積分すれば、

$$\frac{1}{r} \int_0^r r \cdot v(r) dr + \frac{r^2}{2} \cdot \frac{g(a)}{a} + K_2 \dots\dots\dots(9)$$

$r=0$ で、 $u=0$ とすると $K_2=0$ 、従って

$$g(r) = \frac{B}{r} \int_0^r r \cdot v(r) dr + \frac{g(a)}{2a} \cdot r \dots\dots\dots(10)$$

$r=a$ を入れると、

$$g(a) = \frac{B}{a} \int_0^a r \cdot v(r) dr + \frac{g(a)}{2} \\ = \frac{2B}{a} \int_0^a r \cdot v(r) dr \dots\dots\dots(11)$$

よって、ポテンシャル u は

$$u = \frac{B \cdot \sin\theta}{r} \int_0^r r \cdot v(r) dr \\ + \frac{r \cdot B \cdot \sin\theta}{a^2} \int_0^a r \cdot v(r) dr \dots\dots\dots(12)$$

そこで、 Δu を求めると

$$\Delta u = u \left(a, \frac{\pi}{2} \right) - u \left(a, -\frac{\pi}{2} \right) \\ = \frac{4 \cdot B}{a} \int_0^a r \cdot v(r) dr \dots\dots\dots(13)$$

一方、平均流速 \bar{v} は、流れが軸対称であるとしたので、

$$\bar{v} = \frac{\int_0^a 2\pi r \cdot v(r) dr}{\pi a^2} \dots\dots\dots(14)$$

で表わされる。(13)、(14)式から

$$\Delta u = 2a \cdot B \cdot \bar{v} \\ = D \cdot B \cdot \bar{v} \dots\dots\dots(15)$$

ここで D は管内径

D を cm , B を gaus , \bar{v} を cm/s で表わせば

$$\Delta u = D \cdot B \cdot \bar{v} \times 10^{-8} \text{ (V)} \dots\dots\dots(16)$$

となる。以上が流量計の測定原理と、計測された流量が平均流量であることの説明である。

2.2 土砂混入による流量計への影響

電磁流量計を浚渫船に装備するに当って、まず考えなければならないのは、土砂混入が電磁流量計に与える影響とその程度である。一般に電磁流量計におよぼす影響として、次の事項が考えられる。

- 1) 速度分布の乱れによる影響
 - 2) 流体と土砂の相対速度による影響
 - 3) 土砂に混入した磁性体の影響
 - 4) 見掛けの導電度が低下することによる影響
 - 5) 混入物が電極付近を通過するときに発生する雑音の影響
 - 6) 混入物が発信器内面のライニングを摩耗させる影響
- 4)~6)は1)~3)に比較して非常に小さいと考えられるので、1)~3)について検討してみる。

1) 速度分布の乱れによる影響

2.1 では、流速が軸線に対して対称であるとして導いているが、土砂が混入すると、速度分布が乱れる。流速 v が r, θ の関数として表わされる場合の起電力は、

$$\Delta u = D \cdot B \cdot \int_0^a \int_0^{2\pi} v(r, \theta) \cdot w(r, \theta) r dr d\theta \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{ここで、} w(r, \theta) = \frac{1 + \frac{r^2}{a^2} \cos 2\theta}{1 + 2 \frac{r^2}{a^2} \cos 2\theta + \frac{r^4}{a^4}}$$

$$= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{r^2}{a^2} \right) \cos 2n\theta$$

v が r のみの関数でない場合、誤差が出るとされている。しかしながら実際には、指示誤差は、十分小さいと考えてよい5)。

2) 流体と土砂の相対速度による影響

流体に土砂が混入した場合の影響は、混入物が絶縁物(液体に比較して)のときは、電磁流量計は、流体と混入物の相対速度の有無にかかわらず、すべて流体の速度で流れている時に等しい起電力を発生する。すなわち、混入物の運動に、起電力の発生には影響を与えない。

土砂が絶縁物として、流体と土砂の相対速度による影響を求めてみる。

吐出真含泥率 (X_d) および吐出量 (Q_d) は、(18)、(19)

式で表わされる。

$$X_d = \frac{X_p \cdot \bar{V}_s \cdot S}{X_p \cdot \bar{V}_s \cdot S + (1 - X_p) \cdot \bar{V}_w \cdot S} \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 X_p は管内真含泥率

\bar{V}_s は粒子の平均移動速度

S は管断面積

\bar{V}_w は液体の平均流速

$$Q_d = (1 - X_p) \cdot \bar{V}_w \cdot S + X_p \cdot \bar{V}_s \cdot S \dots\dots\dots(19)$$

土砂混入時の流量計の記録値 (Q_{em}) と同量の送水時

の流量計の記録値 (Q_{ew}) との比、 $\frac{Q_{em}}{Q_{ew}}$ をとって影響を求めてみる。

$$\frac{Q_{em}}{Q_{ew}} = \frac{\bar{V}_w \cdot S}{Q_d} \dots\dots\dots(20)$$

(20)式は、更に(18)、(19)式から、

$$\frac{Q_{em}}{Q_{ew}} = \frac{\bar{V}_w \cdot S}{Q_d} = \frac{1 - X_d}{1 - X_p} \dots\dots\dots(21)$$

となる。

3) 土砂に混入した磁性体の影響

砂鉄など磁性体が混入している場合は、磁性体によって、管内の磁束密度が増し、結果的には、正の誤差を生じる。しかしながら、普通の土砂の範囲では、影響は少いようである¹⁾。

3. 実験装置、実験方法および供試材料

3.1 実験装置

(1) 実験装置の概要

実験装置は、すでに紹介している⁶⁾が、その後、改造を行なったので改めて概要を説明する。

装置は図-2に示すように、ホップ、ポンプ装置、管

路、計量装置および計測装置からなっている。

ホップは、写真-1のように、角形の漏斗状をしており、下部に土砂供給用ゲートおよび供給量を均一にするためのゴム・ローラが付いている。ホップのオーバーフローゲート近くには、土砂の沈澱を促進するために、2列の邪魔板を取付け、さらにゲートには金網を張って、土砂の流出を防いでいる。ホップに投入した土砂は、供給ゲートを通して、下部ホップに入る。下部ホップは、ピット内に設け、常に水没して、気泡の混入を防ぐと共に粒子の流出がないよう金網を張っている。この下部ホップには、サンドポンプの吸込管を挿入しており、揚程12m、流量 $2.4\text{m}^3/\text{min}$ のポンプによって、土砂を管路で輸送し、再びホップに戻る仕組みになっている。流速変化は、電磁接手の制御盤(写真-2)で、ポンプ回転数を500rpmから1,350rpm程度まで変化して行なうほか、バルブ操作によっても行なえるようになっている。

(2) 計測装置

(a) 電磁流量計

電磁流量計は、図-2に示す位置に写真-3のように

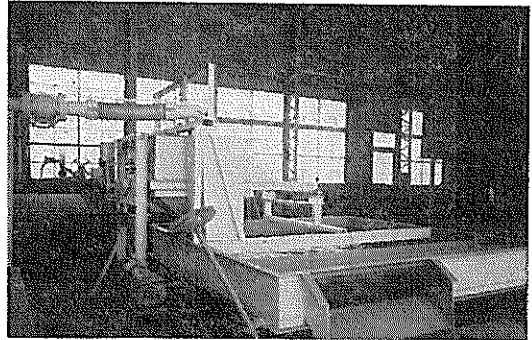


写真-1 ホップ

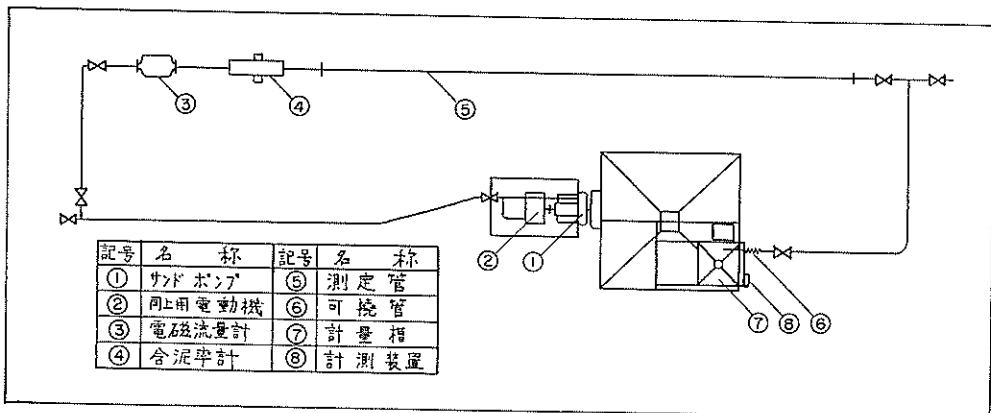
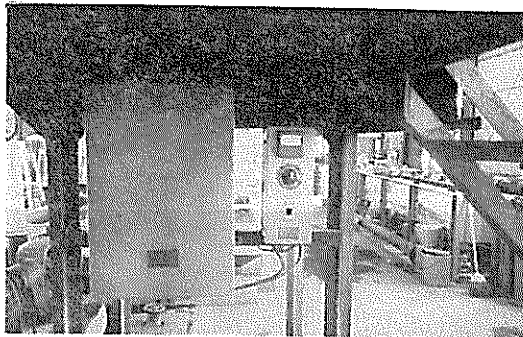
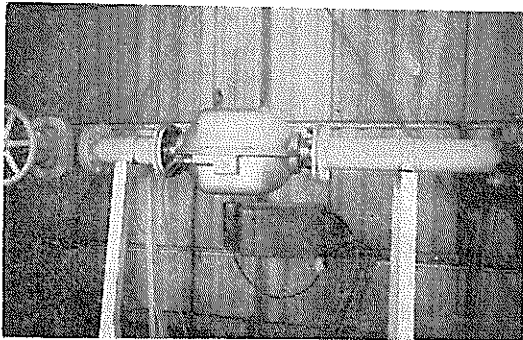


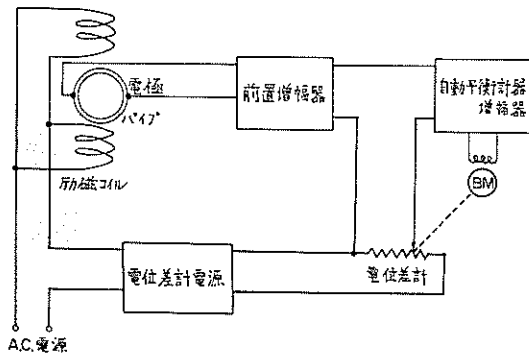
図-2 実験装置



写真—2 電磁接手の制御盤



写真—3 電磁流量計



図—3 電磁流量計の機構図

水平に取付けられている。この流量計は、日立製作所製であって、図—3に機構図を示す。励磁コイルは上下にあり、電極は、水平に取り付けてある。つぎに流量計の仕様ならびに構成を下記に示す。

仕様

流量	0~250m ³ /h
口径	100mm
精度	定格値 (250m ³ /h) の±1%以内
影響値	
電源電圧	定格値の±0.5%以内/100±10V

電源周波数 定格値の±0.3%以内/50±2
構成

V K P ₃₂ 形	流量指示記録計
FMR—4形	電磁流量計発信器
X—ED形	前置増巾器
X—ZM形	インピーダンス箱

以上が仕様ならびに構成である。本実験に入る前に、電磁流量計は、工場で分解調整を行なった。表—1は、当所立会の下に行なった試験結果である。

試験の結果は、上記仕様よりもはるかに良く、かつ低流速も予想外に誤差が少なかった。

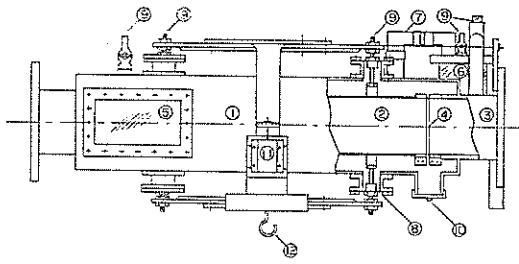
表—1 電磁流量計実流試験結果 (3回の平均)

指示値A (m ³ /h)	実流値B (m ³ /h)	誤差 (%)	
		A-B/250×10 ² (対定格値誤差)	A-B/B×10 ² (対実流値誤差)
245.3	246.56	-0.50	-0.51
200.3	199.70	0.24	0.36
148.5	147.56	0.38	0.64
129.0	128.63	0.15	0.29
110.4	110.20	0.08	0.18
90.0	89.20	0.32	0.90
68.7	68.60	0.04	0.15
49.8	49.13	0.27	1.36
29.8	29.46	0.14	1.15
24.9	24.80	0.04	0.40
20.0	19.60	0.16	2.04
15.3	15.40	-0.04	-0.65
10.0	10.07	-0.03	-0.70
4.8	4.90	-0.04	-2.04

(b) 含泥率計

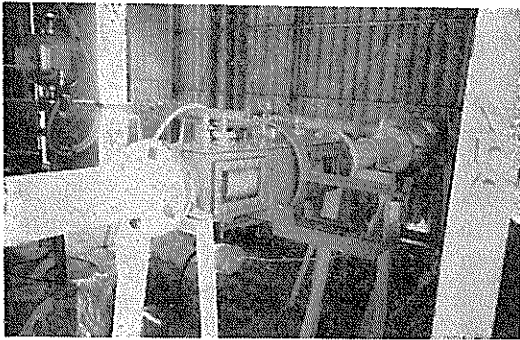
本実験に使用した含泥率計は、原理的には、すでに当所で使用してきたものと同じで、これに改造を加えたものである。(図—4、写真—4)

機構は、図—4に示すように、可動管②と吐出管③は、ゴム筒④でつながれているのみである。外套筐①と可動管の間は、圧力水導管⑦によって連絡し、水圧によりゴム筒が膨脹しないようにしている。管内に土砂が混入すれば、可動管内部の重量変化が起る。これをゲージで取り出し、動歪測定器を通して自動記録するようになっている。この装置の可動管とレバーの間は、ダイヤフラム⑧を使用してシールし、ヒステリシスを防いでいる。また可動管の重量による下り量が大いいと、可動管内の流れを乱し、流速による誤差を生じるので、歪量が



記号	名称	記号	名称	記号	名称
①	ホッパー	⑤	透明窓	⑨	空気抜き
②	可動管	⑥	注液ポンプ	⑩	ドレン抜き
③	吐出管	⑦	圧力水導管	⑪	UTゲージ
④	ゴム管	⑧	ダイヤフラム	⑫	外鋼製フック

図一四 含泥率計の構造図



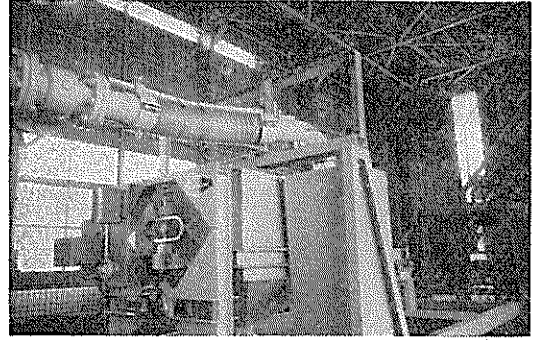
写真一四 含泥率計

少くて計測可能なUTゲージを使用している。その結果、真含泥率30%において、パイプの変位量を 6μ 程度にすることができ、流量の影響は殆んどなくなった。初期のバランスを取るためには、ゲージの反対側に移動できるバランスウェイトを取り付けてある。荷重試験の結果は、ヒステリシスを殆んど起さず、十分な精度が得られた。

(c) 計量装置

計量槽は、ホッパ上に設けた、内容積約380ℓの鋼製角形の容器で、下部は、土砂水の排出が容易に行えるように傾斜を付け、底には、バルブを付けている。計量槽は写真一五のように、一端をボールベアリングで支持し、他端には、リング式の荷重計を付けている。荷重(w)と水位(R)の関係は、あらかじめ計量した水を投入し、キャリブレーションした結果、 $w=3.464 \cdot R$ の直線で表わされた。これは、計算値とも非常に良く一致する。計量槽への吐出時間の測定は、自動的に行なえるようにしている。すなわち、写真一五に見られるように、吐出口が計量槽に入る際にスイッチが入り、電磁力でプ

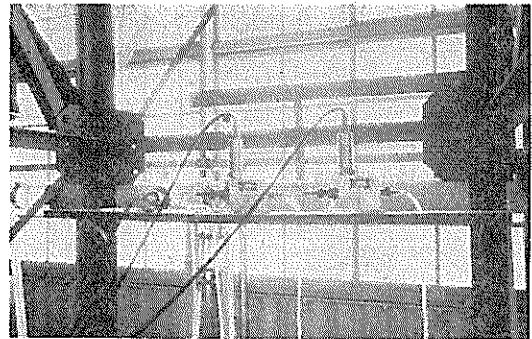
ッシュ・ロッドを動かし、回転30秒のストップ・ウォッチを作動させる。計量槽から出る際には、再びスイッチを押し、ストップ・ウォッチを停止させるようになっている。送水試験時における本装置による流量計測値と、電磁流計の流量とは、良く一致した。



写真一五 計量装置

(d) 圧力計

鋼管製およびアクリル製測定管部の差圧測定器として、 0.5kg/cm^2 の差圧計2台、同じく管内圧力測定器として、 1kg/cm^2 の圧力計1台を、写真一六に見られるように、測定管中心に合せて置いている。圧力は、歪量として計測され、動歪計を通して自動記録するようにしている。



写真一六 圧力計

(e) 記録器

流量は、電磁流量計の記録器により記録させ、前述の動歪計を通った含泥率および圧力は、有効記録巾250mm、タイムマーカー付の3ペンレコーダで記録させた。

3.2 実験方法

まず、清水で計器を調整しておき、バルブ全開の状態でポンプ回転数を1,200rpmから600rpmまで、50回転おきに下げ、送水試験を行なったのち、あらかじめホッパ

内に投入してある約 0.3m³の供試材料を、土砂供給ゲートを開けて、含泥率が定常状態になったところで、送流時の諸計測（含泥率、流量、管路抵抗等）を、1つの供試材料について、65回前後行なった。

計量槽での計量中に、流量、含泥率、圧力等が変化することも考えられたので、マーカを使用して、計測時間がどの記録でも明確に分るようにした。これにより、管内流速が計測中に低下し、流動状態が変動した場合でも積分し、平均値を正確に出せるようにした。なお流動状態は、アクリル透明管部を外部から観察するほか、写真撮影を行なって解析の参考にした。

3.3 供試材料

実験に使用した材料は、高萩産の砂2種類、木戸海岸産の砂利1種類であって、主要なる性質を表一2に示す。

4. 実験結果

4.1 測定結果

測定値の一部を、表一3に示す。数値の配列は、各粒径とも、管路のバルブ全開状態で、ポンプ回転数を、1,200rpmから、50rpm ずつ下げて行なった実験結果（最上段は1,200rpm の記録値）である。表一3において、

ds : 土砂の平均粒径

V m : 土砂混合水の平均流速

im : 管路単位長さ当りの圧力降下

Xp : 管内真含泥率

Xd : 吐出真含泥率

Qem : 土砂混入時の流量計の記録値

Qew : 土砂混入時と同流量の送水を行なった場合の流量計の記録値

である。

各粒径に対する流速低下の傾向、管路抵抗の大まかな比較も可能であるが、ポンプ吸込口における水面の高さは、実験中多少上下しているので、水頭や流量にも影響を与え、厳密には比較できない。

図一5, 6, 7は、土砂の流動状態を判定するため

に、 \bar{V}_m と im との関係を X_d 基準にして分類し、プロットしたものである。

図一8, 9, 10も同じく、土砂の流動状態を判定するためのものであって、横軸は \bar{V}_m 、縦軸は X_p/X_d であって、土砂が浮遊を始めると、 X_p/X_d は1に近づく。

図一11, 12, 13は、これから検討を加えようとする電磁流量計の特性を示すもので、横軸に \bar{V}_m 、縦軸に Q_{em}/Q_{ew} をとってある。この図では、特に流量計の記録値が管内土砂の流動状態に関係することを予測し、 \bar{V}_m と X_p 別にプロットしたのが特徴である。

写真7~18は、実験中にアクリル透明管部で撮影したものの一部である。

4.2 使用可能範囲の推定方法

浚渫船に使用する含泥率計の発信部は、管路の状態さえよければ、垂直に取付けることが望ましいが、場合によっては、水平にせざるを得ない。ここでは、水平に取付けられた場合の流量計の特性について考えてみる。

ポンプ浚渫船、ドラグサクシオン浚渫船等で、管路輸送される土砂の種類は、軟泥から砂利、転石に至るまで広範囲にわたっており、輸送状態も、浮遊、摺動、さらには、一部堆積を起すため浚渫、排送を繰返し行なっているものまでである。先に紹介した文献¹⁾は、土砂が、完全浮遊状態にあるものについて実験を行なっている。しかしながら、輸送する土砂の粒径が大きくなると、大型ポンプ浚渫船、ドラグサクシオン浚渫船といえども摺動状態で輸送されることが多いので、はたしてどのような輸送状態まで実用性があるかを検討してみることにした。特に状態変化の激しい、摺動ならびに浮遊限界流速と流量計の記録値との関係を調べてみた。

管内の状態は、次の方法により推定した。

- 1) アクリル透明管部分で、直接観察または、写真による方法
- 2) 土砂輸送時の圧力降下の傾向による方法
- 3) 土砂輸送時の管内、吐出真含泥率の傾向による方法
- 4) 計算による方法

表一2 供 試 材 料

産 地	粒 径 mm	平均粒径 mm	真 比 重	沈降速度 cm/s
茨 城 県 高 萩 産	0.177 ~ 0.42	0.25	2.67	3.4
〃	1.0 ~ 2.0	1.28	2.63	15.0
福島県双葉郡木戸海岸産	5.0 ~ 10.0	7.00	2.70	34.9

表-2 測定結果

ds (mm)	\bar{V}_m (m/s)	Qd (m ³ /h)	im (cm-Ag/m)	Xp (%)	$\frac{Q_{em}}{Q_{ew}}$	$\frac{X_p}{X_d}$	$\frac{1-X_d}{1-X_p}$
0.177~0.42	3.67	104.5	10.95	2.96	0.97	1.10	1.00
	3.33	94.7	10.00	7.65	0.98	0.88	0.99
	3.15	89.6	9.40	8.03	0.99	1.86	0.99
	2.99	84.9	9.05	6.41	1.01	0.80	0.98
	2.79	79.3	6.60	4.36	1.00	0.87	0.99
	2.42	68.7	6.40	4.88	1.07	1.02	1.00
	2.32	66.0	5.50	4.64	1.00	0.83	0.99
	2.29	65.0	5.00	1.64	0.96	1.17	1.00
	2.04	58.0	4.50	1.76	0.96	1.04	1.00
	1.59	45.3	5.15	4.57	0.97	1.09	1.00
	1.19	33.9	5.90	7.87	1.05	1.44	1.03
	1.04	29.7	3.60	3.55	1.01	1.08	1.00
	0.17	4.9	1.60	2.10	6.91	11.67	1.02
1~2	3.33	94.7	12.0	3.6	1.00	1.09	1.00
	2.75	78.3	12.3	9.2	0.98	1.03	1.00
	2.84	80.7	9.0	4.7	1.00	1.04	1.00
	0.94	26.8	25.0	27.3	1.20	3.33	1.26
	2.36	67.0	11.0	6.9	0.99	1.57	1.03
	2.13	60.6	11.5	8.4	1.00	1.53	1.03
	0.58	16.4	16.0	29.7	1.27	4.87	1.34
	1.88	53.4	7.5	4.1	0.99	2.28	1.02
	0.68	19.4	8.0	22.9	1.39	8.73	1.26
	0.82	23.3	6.5	15.6	1.28	10.40	1.17
	0.73	20.8	3.5	16.4	1.25	18.22	1.19
	0.59	16.7	3.5	12.6	1.31	31.50	1.14
	0.29	7.6	4.5	27.7	1.37	25.18	1.37
	5~10	3.52	100.1	12.50	2.46	0.99	1.22
2.85		81.1	15.50	6.72	1.02	1.01	1.00
2.51		71.4	14.15	7.11	1.03	1.26	1.02
2.78		78.2	10.65	3.97	1.01	1.08	1.00
2.68		76.1	8.60	3.11	1.00	1.13	1.00
2.50		71.1	7.60	2.71	1.05	1.63	1.01
2.15		61.0	7.50	4.63	1.05	2.44	1.03
1.65		46.8	9.60	9.15	1.06	4.14	1.08
1.02		28.9	10.05	19.51	1.18	5.79	1.20
0.41		11.7	9.10	34.33	1.46	23.35	1.50

4.3 土砂輸送時の測定可能範囲

1) ds=0.177~0.42mm (平均粒径0.25mm) の場合
浮遊限界流速 (Vcf) を(式6) によって求めたのが表
-4である。

$$V_{cf} = K_2 \cdot D^{0.14} \cdot (a-1)^{0.3} \cdot d^{0.36} \cdot X_d^{0.059} \dots\dots(2)$$

ここでK₂=47.4

表-4は、a=2.63, D=99.7mm, d=1.16ds として
算出した。

本実験による含泥率の範囲では、Vcfは1.8~2.0m/sで
あり、Xp/Xdもこの範囲ではほぼ1で、浮遊かこれに近
い状態と推定される。この状態では、Qem/Qew は1に
近く、バラツキも測定誤差の範囲に入るようである。

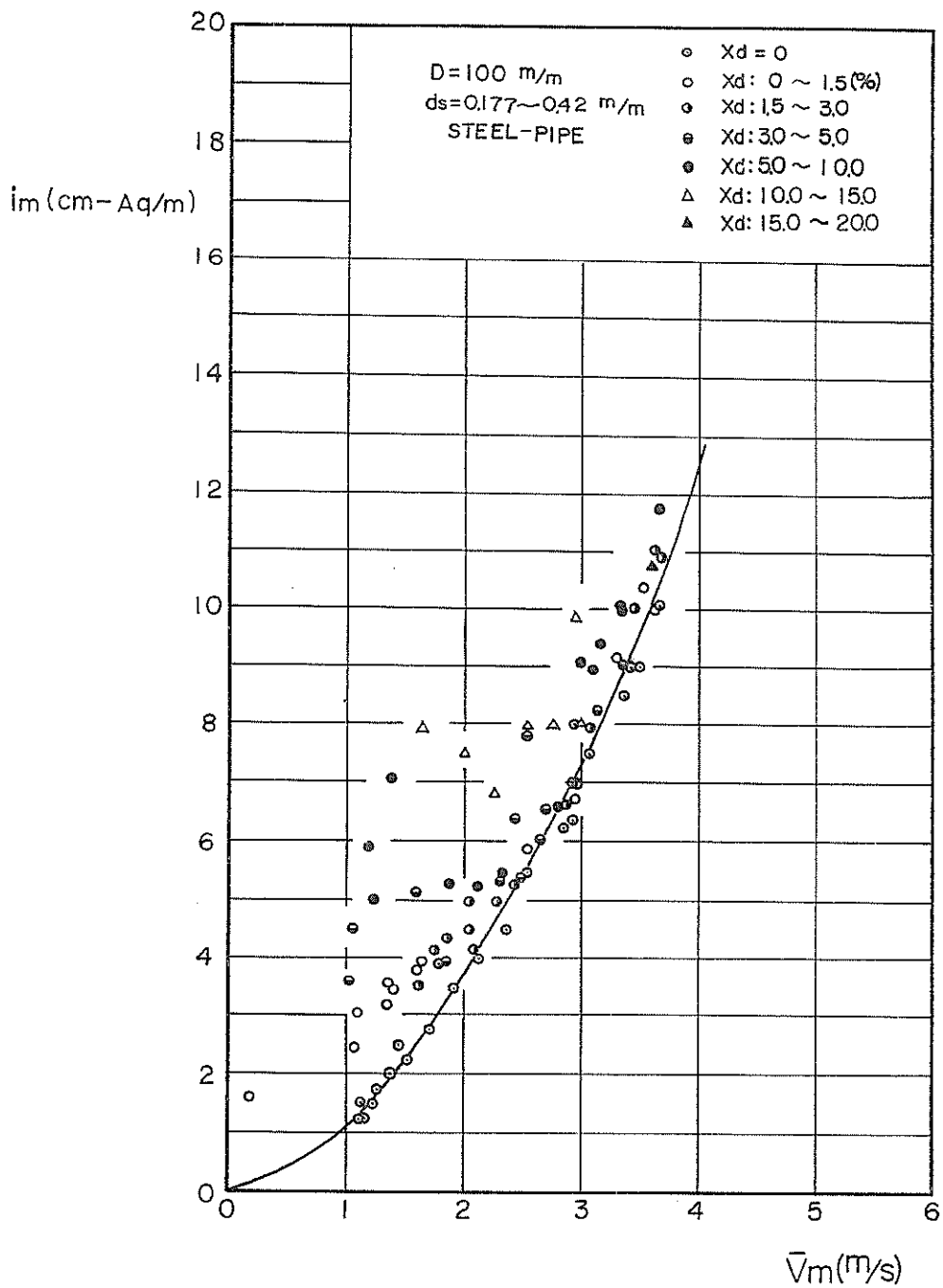


図-5 土砂輸送時の圧力降下 (その1)

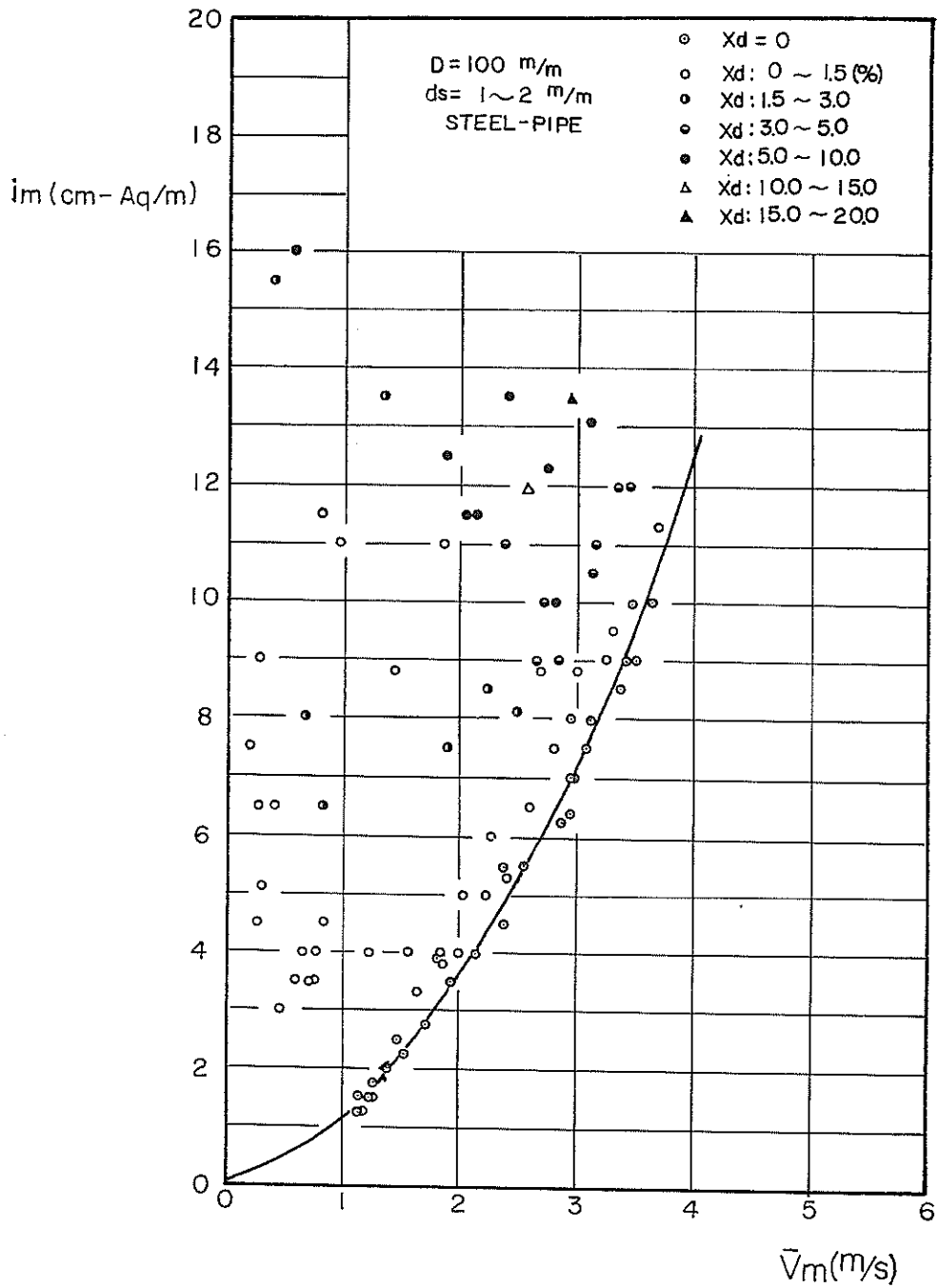


図-6 土砂輸送時の圧力降下 (その2)

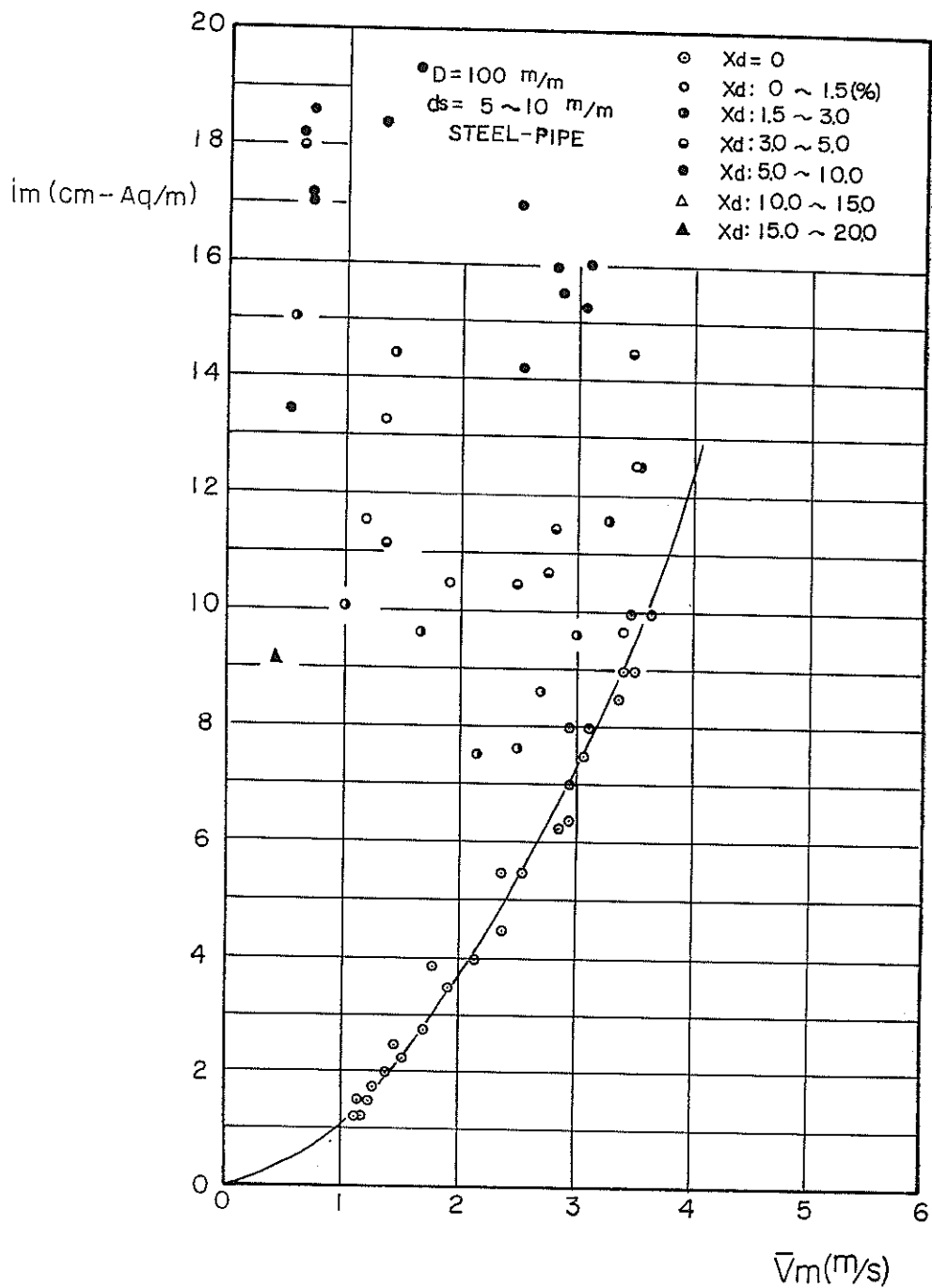


図-7 土砂輸送時の圧力降下 (その3)

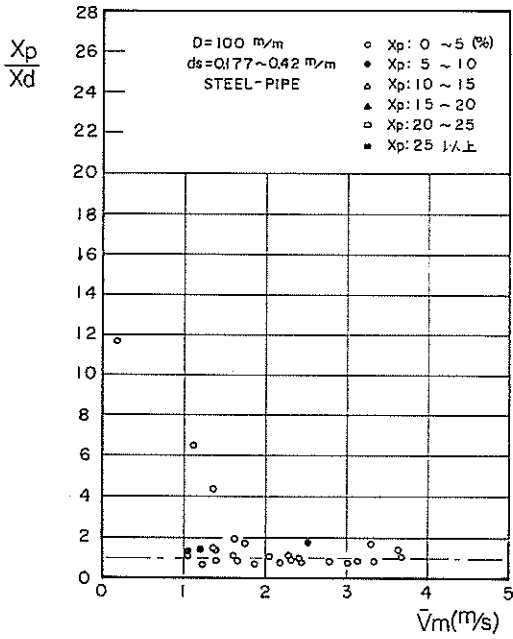


図-8 土砂輸送時の管内，吐出真含泥率比（その1）

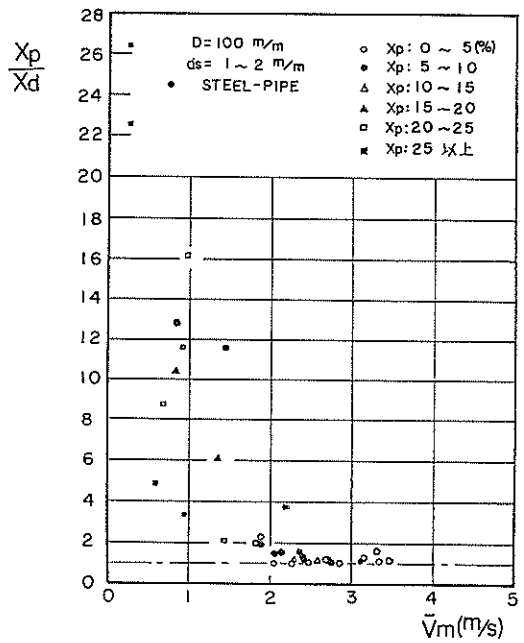


図-9 土砂輸送時の管内，吐出真含泥率比（その2）

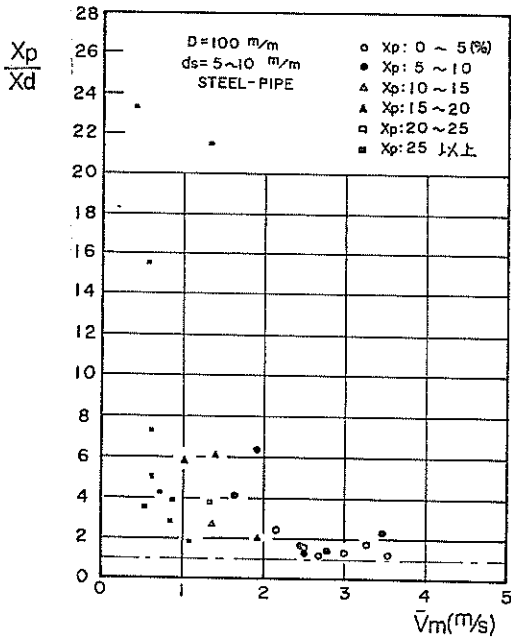


図-10 土砂輸送時の管内，吐出真含泥率比（その3）

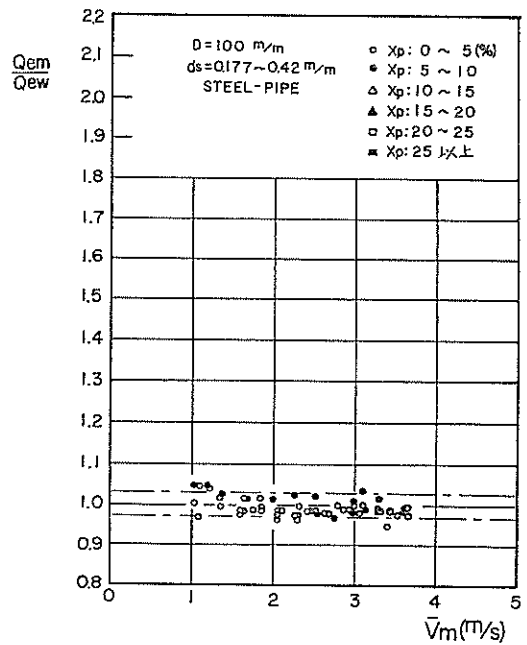


図-11 土砂輸送時の電磁流量計の特性図（その1）

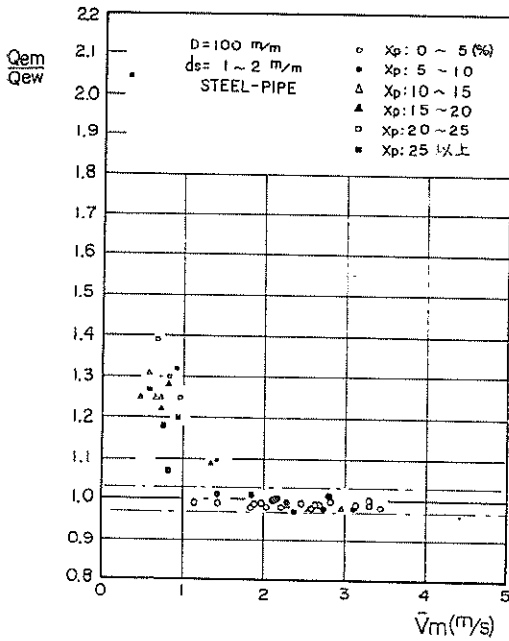


図-12 土砂輸送時の電磁流量計の特性図 (その2)

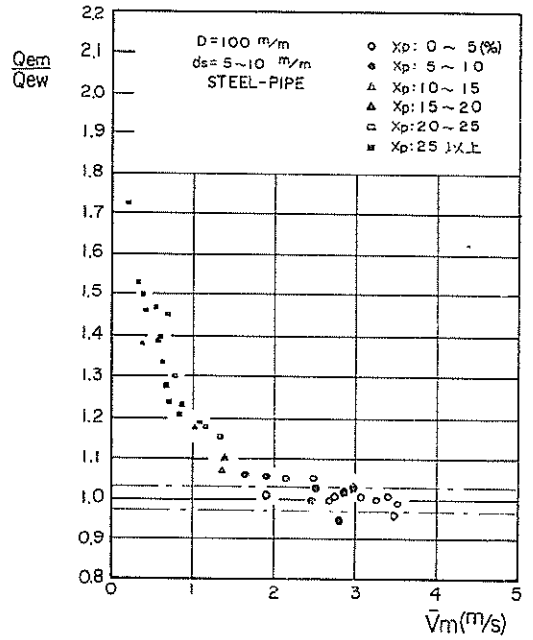


図-13 土砂輸送時の電磁流量計の特性図 (その3)

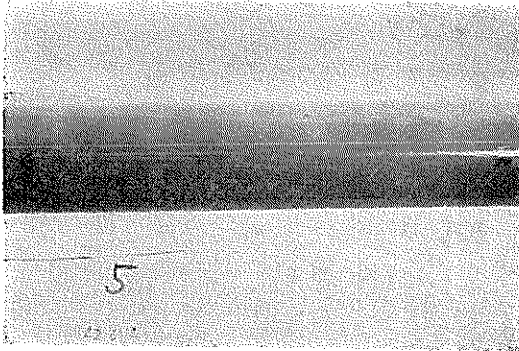


写真-7 $ds=0.177\sim0.42\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.90\text{m/s}$
 $X_p=3.10\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

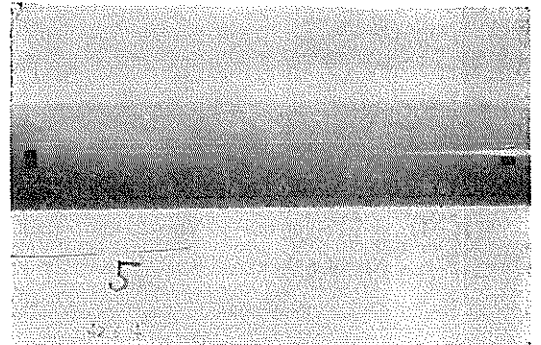


写真-8 $ds=0.177\sim0.42\text{m/m}$ $\bar{V}_m=3.71\text{m/s}$
 $X_p=2.96\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

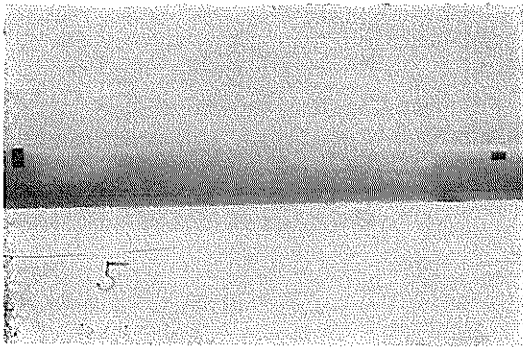


写真-9 $ds=0.177\sim0.42\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.90\text{m/s}$
 $X_p=2.96\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

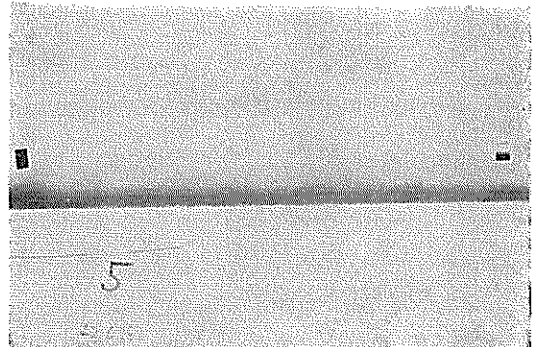


写真-10 $ds=0.177\sim0.42\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.07\text{m/s}$
 $X_p=2.84\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



5

写真—11 $ds=1\sim 2\text{m/m}$ $\bar{V}_m=3.48\text{m/s}$
 $X_p=4.2\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



5

写真—12 $ds=1\sim 2\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.84\text{m/s}$
 $X_p=6.78\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



5

写真—13 $ds=1\sim 2\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.43\text{m/s}$
 $X_p=6.8\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



4

写真—14 $ds=1\sim 2\text{m/m}$ $\bar{V}_m=0.98\text{m/s}$
 $X_p=21.0\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



5

写真—15 $ds=5\sim 10\text{m/m}$ $\bar{V}_m=3.07\text{m/s}$
 $X_p=5.37\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$



5

写真—16 $ds=5\sim 10\text{m/m}$ $\bar{V}_m=2.54\text{m/s}$
 $X_p=7.11\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

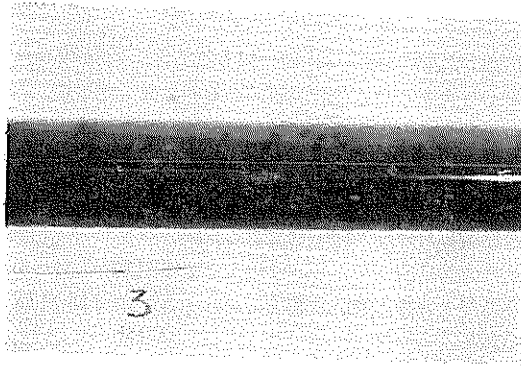


写真-17 $ds=5\sim 10\text{m/m}$ $\bar{V}_m=0.72\text{m/s}$
 $X_p=32.06\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

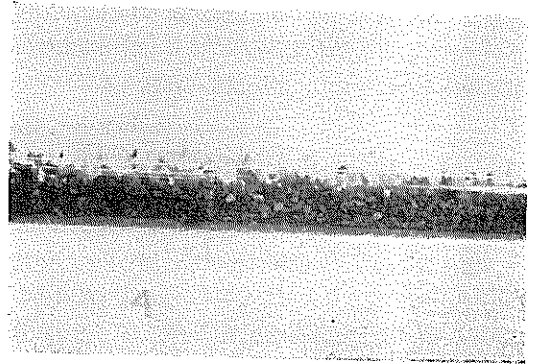


写真-18 $ds=5\sim 10\text{m/m}$ $\bar{V}_m=1.06\text{m/s}$
 $X_p=25.2\%$ $S=\frac{1}{1000}\text{sec}$

表-4 限界流速計算値 ($ds=0.177\sim 0.42$)

X_d (%)	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25以上
V_{cd} (m/s)	~1.79	1.79~1.91	1.91~1.97	1.97~2.02	2.02~2.07	2.07~

表-5 限界流速計算値 ($ds=1\sim 2\text{m/m}$)

X_d (%)	0~1.5	1.5~3	3~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25以上
V_{cd}	~1.23	1.23~1.56	1.56~1.91	1.91~2.37	2.37~2.73	2.73~3.01	3.01~3.25	3.25~
V_{cf}	~2.87	2.87~3.06	3.06~3.20	3.20~3.41	3.41~3.53	3.53~3.62	3.62~3.69	3.69~

表-6 限界流速計算値 ($ds=5\sim 10\text{m/m}$)

X_p (%)	0~1.5	1.5~3	3~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25以上
V_{cd}	~1.23	1.23~1.56	1.56~1.91	1.91~2.37	2.37~2.73	2.73~3.01	3.01~3.5	3.5~
V_{cf}	~5.33	5.33~5.67	5.67~5.93	5.93~6.31	6.31~6.54	6.54~6.71	6.71~6.85	6.85~

2) $ds=1\sim 2\text{mm}$ (平均粒径1.28mm) の場合
 前回同様、限界流速を式(2), (23)によって求めたのが
 表-5である。

$$V_{cd} = \xi \cdot \{g(a-1) \cdot D\}^{0.5} \cdot X_d^{0.345} \dots\dots\dots(24)$$

ここで $\xi=4.17$

ds が1~2mmになると、図-6のように同じ X_d でも、
 im 最小の点が現われてくる。 im 最小の点は、以前から
 V_{cd} であるとしていた。本実験において、透明管部の観
 察、図による im 最小の点と V_{cd} の数値の比較さらには

$\phi \cdot \frac{\lambda}{f}$ と F との関係 (ここでは省略させていただく)も、
 ほぼ一致する。今回の実験の範囲では、 X_d が10%程度
 までであり、この範囲であれば、図-6および表-5から
 V_{cd} は、2.4m/s以下である。また V_{cf} は表-5から、
 2.9~3.4m/sと V_{cd} に比較して大きい。これも図-6お
 よび図-9からほぼ妥当のようである。さて Q_{em}/Q_{ew}
 であるが、図-12を見ても分かるように、 \bar{V}_m が2m/s程
 度以下になると誤差が大きくなっている。ただし、その

程度は、 X_p/X_d に比較すると Q_{em}/Q_{ew} の変化は小さい。

いずれにしても V_{cf} 以下 V_{cd} つまり、管内に土砂が堆積し始めるあたりまで、計測誤差の範囲（3%）で一致する。

3) $ds=5\sim 10\text{mm}$ （平均粒径 7.00mm ）の場合

まず、例によって限界流速を算出したのが表-6である。 ds が $5\sim 10\text{mm}$ になると、さらに im の値は大きくなる。図-7を見ると、前回に比較し、同じ \bar{V}_m 、 X_d においては、 im の値こそ大きくなっているが、 im 最小の点は殆んど同じで上記計算値とよく一致している。これは、管内の流動状態の観察および別の解析によっても同様の数値となる。 V_{cf} の値は、 V_{cd} の値よりはるかに大きく、 5.3m/s 以上である。これは、図-7または、図-10における X_p/X_d の値が、 \bar{V}_m が大きくなるにつれて1に近づきつつあるものの、依然として1を上廻っている

ことから想像できる。

Q_{em}/Q_{ew} の関係は、図-13を見ると、 \bar{V}_m が 2m/s 程度より大きくなると計測誤差の範囲に入ってくる。

土砂の混入による流量計への影響は2.2に述べたが、このうち、土砂の相対速度による影響は(2)式で示された。そこで Q_{em}/Q_{ew} の実測値と、(2)式による計算値とを比較したのが、図-14である。大分バラツキはあるが、大勢は説明できる。このことから誤差要因1)~6)のうちでも2)の影響が支配的であるとみてほぼ間違いない。

以上3種類の土砂を使用して行なった室内実験の範囲では、 V_{cd} までは、 X_d と X_p の差がわずかであることから、 V_{cf} より流速の低い V_{cd} まで十分測定できるようである。

さらに、これを大口径まで拡張して考へれば、浚渫船

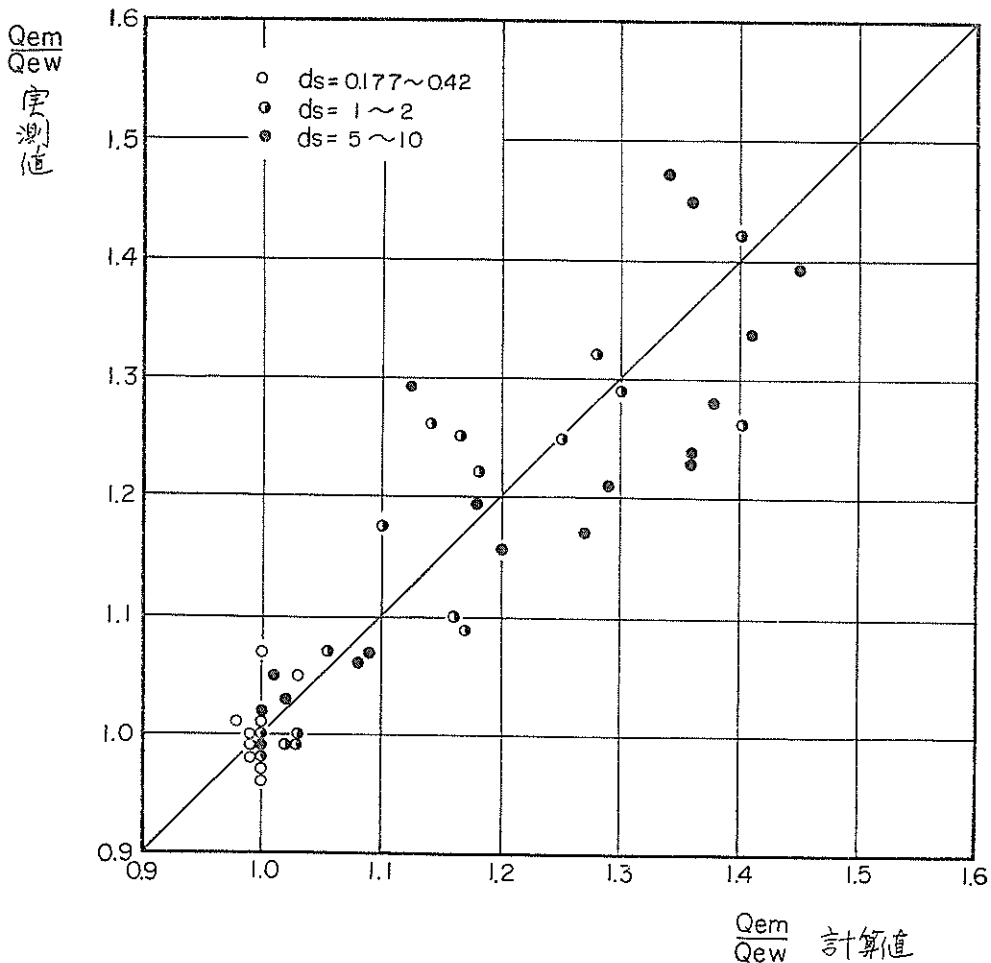


図-14 流体と土砂の相対速度による影響値

に装備したもので、通常の土砂の輸送を行なう限りでは、 V_{cn} まで計測可能範囲と考へてよいことになる。

4.4 使用可能範囲における精度

土砂を管内で堆積を起さない範囲内で輸送している場合の精度は、図—11, 12, 13に示すように3% (一点鎖線) 以内に入る。 X_p が高くなると傾向的には、誤差が大きくなるようで、これは、本実験でも認められるが、実験装置の総合的な精度 (記録、指示読取までの精度) を最大2~3%程度見込まねばならぬので、これ以上追求することは無意味と判断し、行なっていない。いずれにしても、実際の浚渫作業に使用する場合の精度としては、十分である。

5. 結 論

- 1) 土砂混入時の電磁流量計の測定可能範囲は、 V_{cb} までとみてよい。今回の実験が水平管部に取付け、沈澱に対して、悪い条件にあったので、垂直部分に発信器を取付けるとすれば、さらに精度が向上し、信頼性が増すものと思う。
- 2) V_{cn} 以上の流速であれば、実用される含泥率の範囲では含泥率による影響は、ごくわずかで、誤差は最大2~3%程度と推定される。
- 3) 流量計の誤差要因のうちで、流体と土砂の相対速度によるものが支配的で、誤差は、型式によって算出しても大差はない。
- 4) 計器の調整さえ行なっていれば、1 m/s 以下の低流速でも精度よく測定できる。

6. あとがき

今回の実験は、特定メーカーの、しかも口径 100mm のもの1種類について行なったもので、これですべての流量計を推定するのは、危険とも思われるが、測定原理が同じである以上同程度の性能は出せるものと思う。

実験は、ごく普通の砂、砂利を用いて行なったものであるが、特に鉄分を多く含んだ場合は、他の文献¹⁾を参考にさせていただきたい。

なお、本資料を作成するに当たり、種々御助言をいただいた、当所 松田機材部長、八木流体輸送研究室長ならびに、日立製作所、那珂工場の河井、小宮山両氏に謝意を表する次第である。

謝 辞

実験、データ整理、図面のトレース等について、流体輸送研究室の小島正雄君をわずらわした、ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼管株式会社, 1963年7月, ポンプドレジャ-の排泥量測定装置の研究, 作業船No. 28
- 2) 石川島播磨重工業(株), 1964年, 2,000m³ドラグサクシ-ン浚渫船「海鷗丸」, 作業船No. 33
- 3) 近藤基, 木原純考, 青木幸男, 菊谷徹, 1966年4月, ホッパーの沈澱効果に関する破究—ドラグサクシ-ン浚渫船海鷗丸のエコノミックローデング—, 港湾技研資料No. 23
- 4) 八木得次, 早乙女保二, 笹谷哲也, 入江義次, 青木幸男, 石塚浩次, 1966年4月, 作業船調査報告(その6)—海鷗丸実験報告—, 港湾技研資料No. 23
- 5) 工業計測技術大系編集委員会編, 電磁流量計による流量測定方法, 工業計測技術大系3 流量(下)
- 6) 八木得次, 入江義次, 青木幸男, 1967年4月, 土砂の水力輸送に関する研究, 一水平管流における限界流速について—, 港湾技術研究所報告 第6巻6号
- 7) 長谷川源太郎, 八木得次, 徳永省三, 1957年7月, サンドポンプの性能ならびに管抵抗の実験, 運輸技術研究所報告 第7巻第6号

(昭和42年9月29日受付)

港 灣 技 研 資 料 No. 42

1967年12月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 誠文堂印刷工業株式会社
川 崎 市 荻 宿 531-2