

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

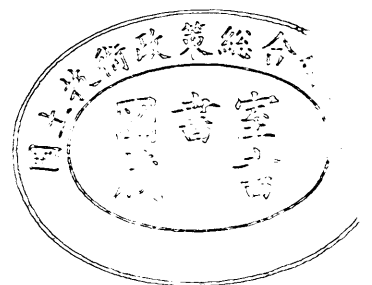
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 12

NO. 3

SEPT. 1973

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第12巻 第3号 (Vol. 12, No. 3), 1973年9月 (Sept. 1973)

目 次 (CONTENTS)

1. 衝撃碎波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察……………合田良実…………… 3
(Motion of Composite Breakwater on Elastic Foundation under the Action of Impulsive Breaking Wave Pressure……………Yoshimi GODA)
2. 防波堤の設計波圧に関する研究……………合田良実……………31
(A New Method of Wave Pressure Calculation for the Design of Composite Breakwater……………Yoshimi GODA)
3. 前面に遊歩道を持つ海浜護岸について——越波特性からの断面形の検討——
……………服部典節・佐藤昭二……………71
(On the profile of seawalls at the resort beach……………Michiyo HATTORI and Shoji SATO)
4. 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験
……………金子安雄・堀江毅・村上和男・上野信行・久保正則……………99
(Model Experiment on Tidal Current and Substance Diffusion OSAKA Bay……………Yasuo KANEKO, Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI, Nobuyuki UENO and Masanori KUBO)
5. 長期間海水作用を受けたコンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食について
……………関博・丸山浩…………… 203
(Corrosion of Steel Bars at Crack of Reinforced Concrete Exposed to Sea Environments……………Hiroshi SEKI and Hiroshi MARUYAMA)
6. 雑貨埠頭の上屋・倉庫のシステム設計 (第2報)
……………早藤能伸・工藤和男…………… 227
(System Design of Transitsheds and Warehouses (Part-2)
……………Yoshinobu HAYAFUJI and Kazuo KUDO)
7. 細砂送流時における濃度分布および流速分布について
……………是石昭夫・八木得次・奥出律…………… 245
(On the distribution of solid concentration and flow velocity at time of transporting the fine sand in a horizontal pipe……………Akio KOREISHI, Tokuji YAGI and Tadasu OKUDE)
8. エアリフトの揚水特性について……………岡山義邦・八木得次…………… 261
(On the Air-Lift Characteristics with Gas-Liquid Mixture……………Yoshikuni OKAYAMA and Tokuji YAGI)

7. 細砂送流時における濃度分布及び流速分布について

是石昭夫*・八木得次**・奥出 律***

要 旨

不均質流れ領域における管内の流動機構を知るには、濃度分布および流速分布を明らかにする必要がある。

本報告は、水平管路において細砂を流した場合の浮遊領域内でのそれらの分布を管断面の中心鉛直上の5個所にて測定し、平均濃度および平均管内流速との関係を調べた結果を示すものである。

流体のみを流した初期条件と平均濃度をもとに解析し濃度分布および流速分布の実験式が次のように得られた。

$$q/\bar{C} = (1 + 54.7\psi_w^{-1.38})e^{-\frac{26.5}{\psi_w}(y/D)}$$
$$v/v_w = 1 + \xi\psi_w^{-1.25}\bar{C}$$

ここで $\psi_w = \frac{\bar{v}_w^2}{gD(s-1)} \sqrt{C_d}$

$$\xi = 30 + 87 \log(y/D) \quad 0 < y/D \leq 0.5$$

$$\xi = 15 + 36.6 \log(y/D) \quad 0.5 \leq y/D < 1$$

なお、これらの分布式は、平均流速および輸送土量を図式解法により求めて、その妥当性を確めた。

* 機材部 流体輸送研究室
** 機材部 流体輸送研究室長
*** 機材部 水力浚渫主任研究官

7. On the distribution of solid concentration and flow velocity at time of transporting the fine sand in a horizontal pipe

Akio KOREISHI*

Tokuji YAGI**

Tadasu OKUDE***

Synopsis

In order to analyze the flow mechanics of the heterogeneous flow in pipes the distribution of solid concentration and flow velocity must be made clear.

This paper describes, on this particular points, the results of our experiment in which both distributions in a horizontal pipe were measured directly at five different points in the vertical direction of the pipe cross section at time of transporting the fine sand.

The experimental data are analyzed on the basis of the initial condition at time of flowing water alone and by use of the solid concentration delivered to express the experimental formulas for each distribution as follows:

$$q/\bar{C} = (1 + 54.7\psi_w^{-1.38})e^{26.5(y/D)/\psi_w}$$

$$v/v_w = 1 + \xi\psi_w^{-1.25}\bar{C}$$

in which $\psi_w = (\bar{v}_w^2/gD(s-1))\sqrt{\bar{C}_d}$

$$\xi = 30 + 87 \log(y/D) \quad \text{for } 0 < y/D \leq 0.5$$

$$\xi = 15 + 36.6 \log(y/D) \quad \text{for } 0.5 \leq y/D < 1$$

The propriety of these two distribution equations is recognized by the graphical solution for the means flow velocity and the total quantity of solids transported.

*Member of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

**Chief of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

***Senior Research Engineer Machinery Division

目 次

要 旨	245
1. ま え が き	249
2. 濃度分布の一般的考察	249
3. 実験装置とその方法	249
3.1 実験装置	249
3.2 実験方法	250
3.3 供試材	251
4. 実験結果とその考察	251
4.1 濃度分布について	251
4.2 流れ領域の検討	253
4.3 流速分布について	254
4.3.1 清水時の速度分布	254
4.3.2 送砂時の速度分布	255
4.3.3 平均流速との関係	257
4.4 輸送土量について	258
5. 結 論	258
6. あとがき	259
参考文献	259
記号表	259

1. まえがき

流体による管路内の固体粒子の動きは、一般に、浮遊摺動、転動および跳躍の流れを呈するもので、粒度および管内流速によって各々異なった流れ様式を示すとされている。また、これらを考慮した定性的な分類がなされて、四つのフローパターン、つまり均質流、不均質流、跳躍流および沈床流に分けられている。均質流は、事実上固体粒子の沈殿がなく、管断面の濃度分布が均一である流れであって、それは、ある密度および粘性をもった单相流として解析がなされている。一方、跳躍流および沈床流においては、粒子層と流体層を分離した流れのモデル化による理論的解析がみられる¹⁾。この領域の間にある不均質流については、それらの取扱いができなく、この流れの機構を理論的に求めることが現段階において極めて困難であるとされている。この領域における管内の流動機構を知るには、濃度分布および流速分布を明らかにする必要がある。筆者等は、水平管路で細砂を流した場合の浮遊流れ領域において、それらの分布を管断面の中心鉛直上にて測定し、平均濃度および平均管内流速の関係を調べた。その結果を報告するものである。

2. 濃度分布の一般的考察

不均質流れ領域は、粒子が浮遊状態にあるにもかかわらず、管断面の濃度勾配が不均一である流れの領域である。その粒子の浮遊は、流れの乱れによる拡散現象であり、乱れによる速度変動が存在することに起因するとされている²⁾。一般に、開水路での二次元定常流では、拡散による固体粒子の上方流と沈降による下方流との間の平衡方程式として次の如く表わされる。

$$qv_i + \epsilon_s \frac{dq}{dy} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

- ここで q : 濃度
- v_i : 粒子の沈降速度
- ϵ_s : 粒子の拡散係数
- y : 底面から鉛直上方にとった距離

ϵ_s は、乱れの大きさによって異なり、流速と壁面からの距離によって変化するものである。すなわち、式(1)を解くには、 y の従属変数 ϵ_s が既知でなければならない。いまこれを次のように仮定する。

$$\epsilon_s = \beta \epsilon \dots\dots\dots (2)$$

- ここで ϵ : 乱流動粘性係数
- β : 定数

したがって、 ϵ と y との関係があれば、式(1)は積分で

き濃度分布が求められる。 ϵ は、カルマン、プラントルの乱流の速度法則から求めると次式で示される。

$$\epsilon = k \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \cdot \left(1 - \frac{y}{y_m}\right) y \dots\dots\dots (3)$$

- ここで k : カルマン定数 (0.4)
- τ_0 : 底面における剪断応力
- y_m : 底面から最大流速の点までの距離
- ρ : 密度

以上は、二次元流として取扱ったものである。円管の場合は三次元の流れであるが、 $y=0$ と $y=2r$ (管の半径)の2つの平行な壁面にはさまれた二次元流と仮定すれば、ここに開水路の場合の理論式が適用でき、イスマイルの矩形管で求めた ϵ の分布形³⁾(図2-1)が用いられる。このときの式(3)における y_m は、管中心 r に相当する。ここで、 ϵ は平均値 $\bar{\epsilon}$ をもって管内の鉛直方向に一定とみなすと、式(1)から、 $y=a$ の点の濃度を q_a として次の一般式で表わされる。

$$q/q_a = e^{-\frac{v_i}{\epsilon_s}(y-a)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに } \epsilon_s &= \beta \bar{\epsilon} \\ \bar{\epsilon} &= 0.079 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \cdot r \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

r : 管の半径

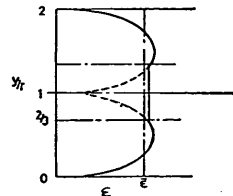


図2-1 εの分布形

3. 実験装置とその方法

3.1 実験装置

本研究に用いられた実験装置を、図3-1に示す。水平管部の装置は、すでに紹介¹⁾しているので概要のみにとどめる。管路は、100mmガス管の全長約40mからなり途中に測定管路を設け、その一部にアクリル透明管を使用し、外部から流れを観察出来るようにしたものである。流量制御は、ポンプ回転数を500~1,500r.p.mに変えることによって行なわれる。

分布測定装置は、図3-2に示す如く、100mmアクリル透明管の一部に7.25mmのアクリル透明管を挿入し、管の出口からビニール管を経て、計量箱に導いたものである。この取出管は、水平管断面の中心鉛直上に管底か

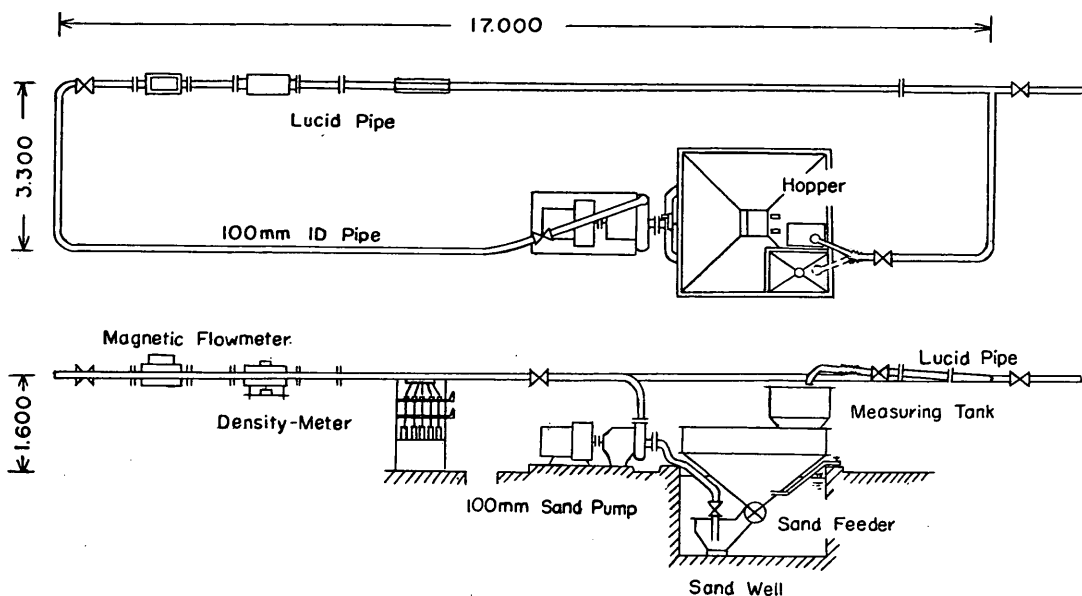


図-3-1 水平管流実験装置

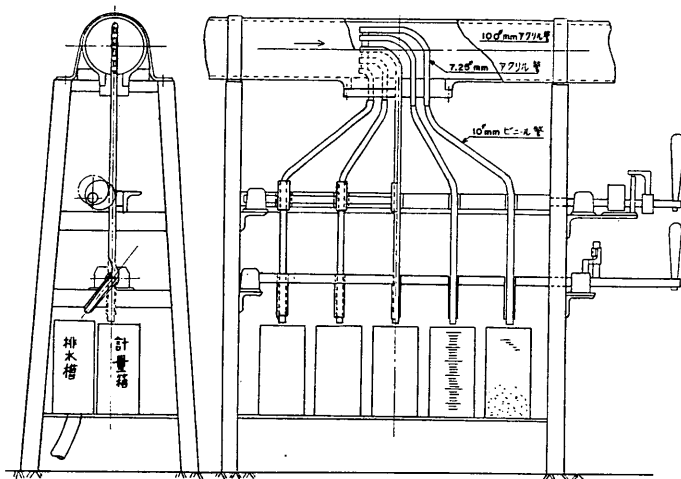


図-3-2 分布測定装置

ら、12, 31, 50, 69, 88mmの距離にセットした。この位置をNo. で示し、管底側からNo. 5, No. 4, No. 3, No. 2, No. 1とした。なお、各取出管の間には固定板をつけ、変動しない状態にした。取出管の開閉は、ビニール管部を偏心円板の脱着操作で行ない、計量箱への切換へは、切換装置によってNo. 1~No. 5まで同時に出るものである。計量箱の容量は、アクリルの角形容器で、90×90×200mmの大きさのものであり、吐出量の

重量は、2kgの台秤（1目盛5gr）を使用した。

3.2 実験方法

まず、送水時の吐出および管内の流量並びに流速分布を測定した。次に、土砂供給ゲートを開き、濃度計による管内濃度の状態と透明管での流れの状態を観察してゲートの開きを調節した。流れが定常状態になったところで流量、濃度および分布の測定を同時に行なった。計測は1つの送水時の状態から濃度を徐々に増し、再びゲ-

細砂送流時における濃度分布及び流速分布について

トを閉めて送水時に戻すまで一連として行ない、これを、種々の流量について繰返した。この時、バルブは全開とし、ポンプの回転数を制御することで流量を調整した。

なお、分布を測定する際、計測開始直前にビニール吐出管から土砂水を流出させ、ビニール管の圧着板により変形した部分を正常にしてから計測開始と同時に計量箱へ切替へ、No.1~No.5を同時に計測した。計量箱は、1.6ℓの容量で、計測時間にして10秒前後要した。

3.3 供試材料

実験に供した砂は、高萩産の砂で篩分されたものであるが、取出管の管径が小さく、砂利やゴミ等による詰りを防ぐため、実験前にさらに篩分を行なった。主要なる性質を表-1-1に、粒径加積曲線を図-3-3に示した。

表-1-1 供試材料

供試材	粒径 (mm)	50%粒径 (mm)	比重	沈降速度 (cm/s)	空隙率 (%)
細砂	0.177 ~ 0.42	0.25	2.66	3.5	43.3

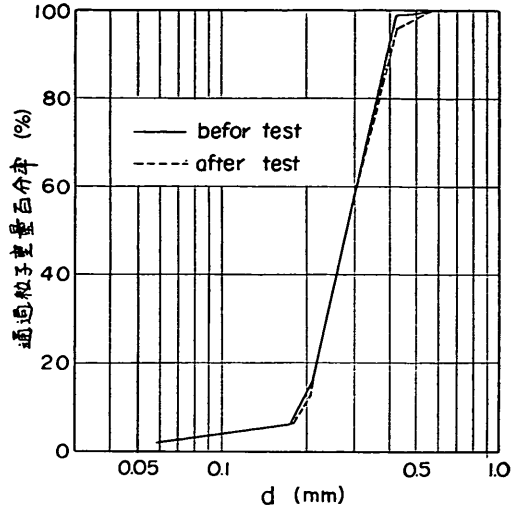


図-3-3 供試砂の粒径加積曲線

度 q_n を送水時の流速 \bar{v}_w 別 (回転数別) にプロットしたものである。この図からみて、測定点のバラッキはあるが \bar{C} と q_n は、ほぼ直線的な比例関係になることが判る。その直線の傾きは、管底側に近づくほど大きい。つまり濃度 q_n は増す。また、1つの位置についてみると、その傾きも \bar{v}_w によって変り、 \bar{v}_w が大きくなるほど No.3

4. 実験結果とその考察

4.1 濃度分布について

図-4-1 は、吐出平均濃度 \bar{C} に対する各位置の実測濃

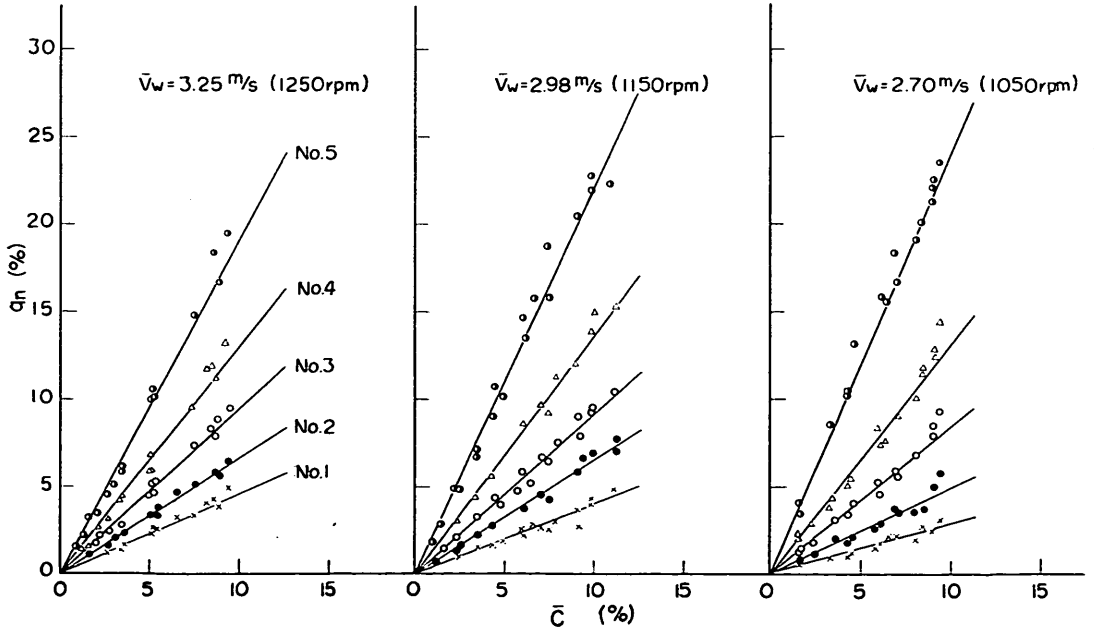


図-4-1 濃度の実測値 (1)

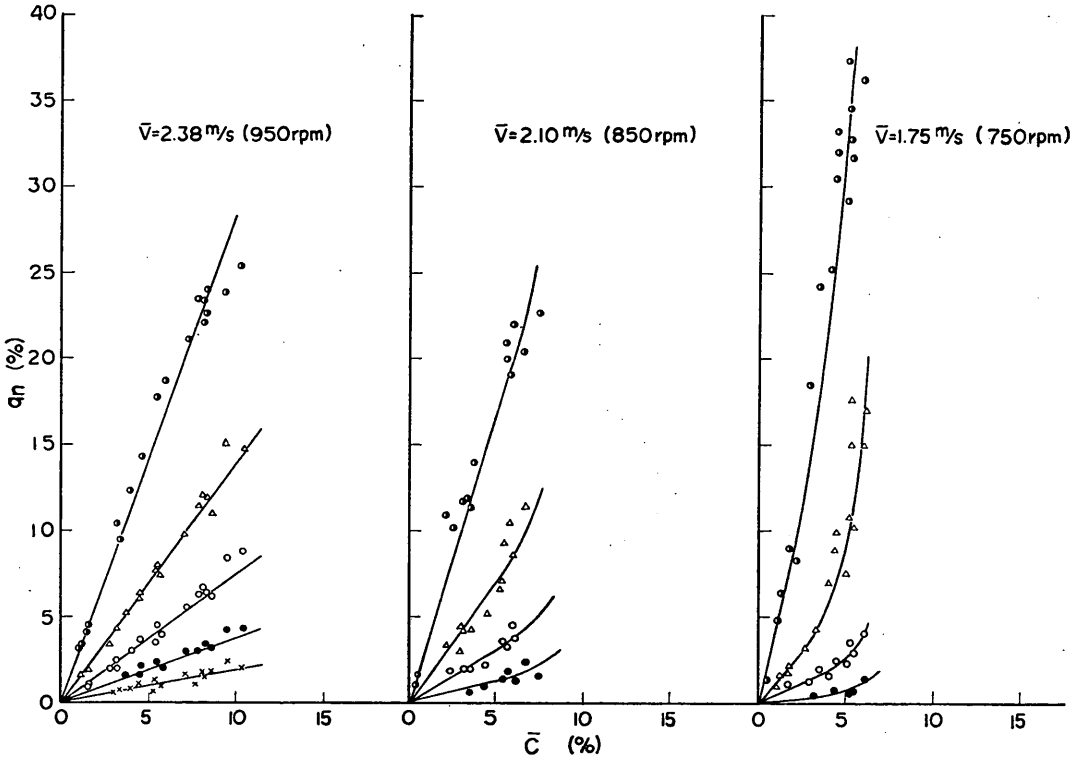


図-4-1 濃度の実測値(2)

～No.1で q_n は増し, No.4～No.5では減少してくる。すなわち, 管断面上の濃度分布は不均一であり, その分布の状態は流れによって変ることを示しているといえよう。しかし, この図の低流速時に見られるように, ある \bar{C} 近くになると, q_n はこの直線から離れて急増する傾向にある。これは, 実験中の観察からして, 浮遊粒子が管底を転摺動始めた, 所謂跳躍流れになるものと考えら

れる。よって, ここでは, \bar{C} と q_n が直線関とみなされる不均質領域について, 以後の考察を行なう。

図-4.1から各々の \bar{v}_w に対する q_n/\bar{C} と y/D の関係を求め, 管断面上にプロットしたのが図-4-2であり, 直線となる。これより, q_n/\bar{C} は次の指数関数形で表わされる。

$$q_n/\bar{C} = ne^{-m(y/D)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに n, m : 係数

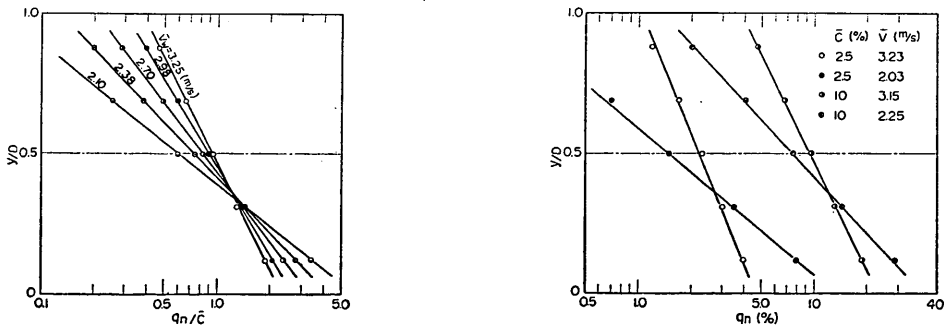


図-4-2 濃度分布図

細砂送流時における濃度分布及び流速分布について

ここで、 m, n は、 \bar{v}_w のパラメータとなることが予測されるが、(6)式からして、 \bar{v}_w を無次元数として表わす必要がある。 m, n は、この管径この粒子において \bar{v}_w との関係をもつものであるから、 \bar{v}_w にこれらの条件を与えた初期条件の流れの状態を考えれば、この流れの関数として m, n を表わすことが出来る。すなわち、流れは、フルード数に粒子の条件を考慮したもので表わすことができ、これを ψ_w ととして式で示すと

$$\psi_w = \frac{\bar{v}_w^2}{gD(s-1)} \sqrt{C_d} \dots\dots\dots(7)$$

ここで C_d : 粒子の抗力係数
 D : 管径
 s : 粒子の比重

図-4-3に、 ψ_w と n および m の関係を示した。これより、次の式を得る。

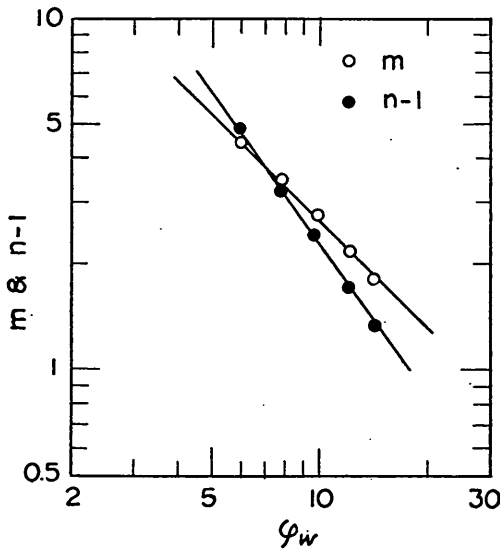


図-4-3 ψ_w と n および m の関係

$$m = 26.5\psi_w^{-1} \dots\dots\dots(8)$$

$$n = 1 + 54.7\psi_w^{-1.38} \dots\dots\dots(9)$$

したがって、式(6)は次のようになる。

$$q/\bar{C} = (1 + 54.7\psi_w^{-1.38}) e^{-\frac{28.5}{\psi_w} (y/D)} \dots\dots\dots(10)$$

ここに、不均質流れにおける濃度分布は、 ψ_w のパラメータとして式(10)で表わされた。いま、送砂時の平均流速 \bar{v} における管内の流れを考えた場合、流速の低下を起していることから当然、流れの性質が変わるものと云える。このときの流れを ψ で表わすと、 ψ は式(7)から、 \bar{v}_w を \bar{v} として次の如く示される。

$$\psi = \frac{\bar{v}^2}{gD(s-1)} \sqrt{C_d} \dots\dots\dots(11)$$

式(7)および式(11)から、 ψ_w と ψ の関係は次のようになる。

$$\frac{\psi}{\psi_w} = \left(\frac{\bar{v}}{\bar{v}_w}\right)^2 \dots\dots\dots(12)$$

すなわち、式(10)は、 ψ のパラメータとしても表わされることが判る。しかし、式としては複雑になる。

以上の如く、濃度分布は式として表わすことが出来た。これより、管内の平均濃度 \bar{q} は、管断面の水平方向に対して q が一定とみなして求めることができる。いま、簡単に、管断を水平に10等分し、各面積の中心濃度を用いて \bar{q} を求めた。結果を他の研究者¹⁾のものと比較するために \bar{q}/\bar{C} と \bar{v} の関係として図-4-4に示した。ほぼ、一致し、流速が大きくなるにしたがって \bar{q}/\bar{C} は1に漸近する。ここにおいて、式(10)の妥当性が確かめられた。

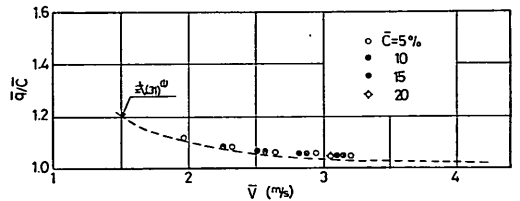


図-4-4 \bar{q}/\bar{C} と \bar{v} の関係

この流れ領域においては、開水路の理論式が、1つの仮定のもとに円管に適用され、式(5)が導入された。つまり、浮遊流砂が、流れの乱れによる粒子の拡散現象として表わされた。そこで、 ϵ_s と $\bar{\epsilon}$ の関係を、式(5)および式(10)から求めると、

$$\epsilon_s/\bar{\epsilon} = \beta = 0.96(v_t/u_*')\psi_w \dots\dots\dots(13)$$

ここで u_*' : 摩擦速度 $= \sqrt{\tau_0/\rho}$

すなわち、円管の場合には、流れの性質を考慮しなければならないと云えよう。

4.2 流れ領域の検討

管底面を考えた場合、滑らかな円管の場合その相当粗度は極めて小さい。然るに、式(10)が、管底においても適用されるとして、 $y=0$ の点の濃度 q_0 が、自然沈積した状態から空隙率を除いた真容積濃度になる時点の流れ領域の1つの遷移点と考え、そのときの平均流速 \bar{v} をここで浮遊限界流速 \bar{v}_c とみなす。したがって、式(10)から、 $y=0$ および $q=q_0=1-P_0/100$ (P_0 : 空隙率、供試細砂で43.3%) として、初期条件の \bar{v}_w における平均濃度 \bar{C} が求まり、その \bar{C} と \bar{v}_c の関係は、流速低下曲線(後述

する) から判るので、そのときの流れを ψ_c として、式(11)から求め、 ψ_c と \bar{C} の関係を図-4-5に示した。これから、次の式を得る。

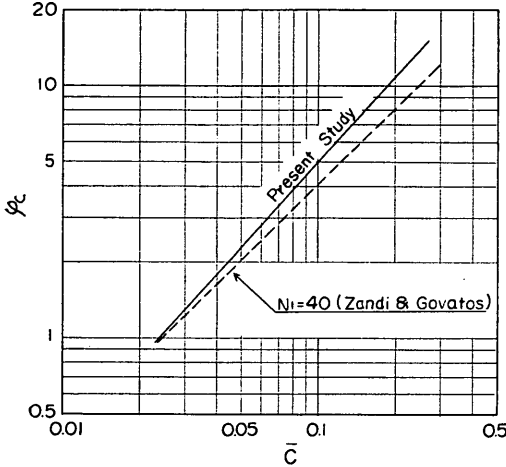


図-4-5 ψ_c と \bar{C} の関係

$$\psi_c = 72\bar{C}^{1.15} \dots \dots \dots (14)$$

式(14)を変形し、 \bar{v} について整理すると

$$\bar{v}_c = 8.2\bar{C}^{0.57} \sqrt{gD(s-1)} / \sqrt{C_d} \dots \dots \dots (15)$$

即ち、式(15)は、濃度分布から導いた1つの浮遊限界流速を表わすものである。限界流速については、多くの研究者が種々の定義のもとに論じているが、その1つに、流れ領域を区別する Zandi-Govatos⁴⁾ の無次元 Number $N_I = \psi_c / \bar{C}$ がある。彼らは $N_I = 40$ が摺動と不均質流の遷移域の上限になるとしているのので、比較する意味から図-4-5に点線で併記した。この図からみて、筆者等の区別する領域が浮遊限界とみることが出来るであろう。

4.3 流速分布について

4.3.1 送水時の速度分布

混相流における速度分布は、一般に、流体のみの場合と異なり粒子混入による流動状況の変化から非対称になることが知られている⁵⁾。然るに、その流れの速度分布に及ぼす粒子濃度の影響を知るには、まず流体のみの速度分布を知る必要がある。

用いた分布測定装置には、図-3-2に示す如く、取出管入口と吐出口に elevation があるため、実測した吐出流速 v_{dwn} を取出管入口における流速 v_{wn} に換算しなければならない。これをエネルギー式を用いて換算するには、管内の圧力分布および取出管の抵抗係数を要する。そこで送水時のみ、流体抵抗型流速計を併用し管断面の中心鉛直上の速度分布を測定した結果、ほぼ $1/7$ 乗則に近

いものとなった。したがって、清水の流速分布は、カルマンの一般式で表わされ、平均流速 \bar{v}_w と最大流速 v_{w0} の比 $v_{w0}/\bar{v}_w = 0.81$ から次式で示される。

$$v_{w0}/\bar{v}_w = 1.235(y/r) \dots \dots \dots (16)$$

図-4-6には、 v_{dwn} と v_{wn} の関係を各位置別に示した。

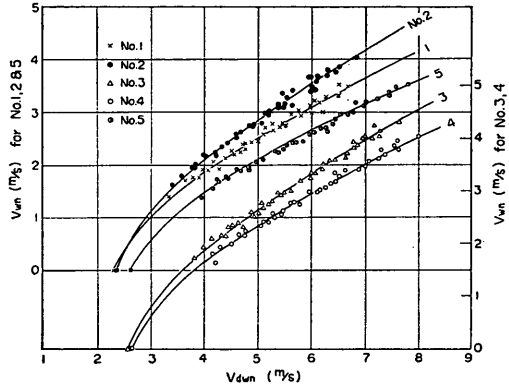


図-4-6 v_{dwn} と v_{wn} の関係

図からみて、実験の流速範囲では、ほぼ直線的な関係にあると云えるが、各位置によって異なる。いま、この v_{dwn} と v_{wn} の関係から、エネルギー式を用いて各取出管の損失係数を試算してみよう。図-4-7の取出管出入口におけるエネルギー式は

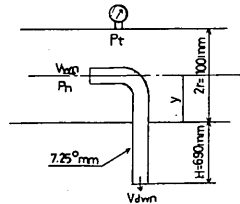


図-4-7 取出管の略図

$$\frac{v_{wn}}{2g} + \frac{P_n}{\gamma} + (H+y) = \frac{v_{dwn}}{2g} + \frac{P_0}{\gamma} + \zeta_0 \frac{v_{dwn}}{2g} \dots \dots \dots (17)$$

ただし P_n : 入口における圧力

P_0 : 吐出口における圧力

ζ_0 : 取出管の損失係数

H : 吐出口から水平管の管底までの距離

γ : 水の比重

ここで、 P_n は Static に考え管上壁で測定した圧力 P_t に Static head を補正したものとする。測定結果から

$$\frac{P_n}{\gamma} = 6.52 \frac{\bar{v}_w^2}{2g} + (2r-y) \dots \dots \dots (18)$$

したがって、式(16)および式(18)に代入し整理すると、 v_{dwn} の求まる次の式を得る。

細砂送流時における濃度分布及び流速分布について

v_{dan}

$$= \sqrt{[1 + 4.28 \{ (y/r)^{2/3} \} v_{wn}^2 + 2g(H+2r)] / (1 + \tau_0)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式(19)および図-4-6から、 ζ_0 は逆算され、結果を表-4-1に示した。

表-4-1 取出管の損失係数

*No.	1	2	3	4	5
τ_0	1.30	1.36	0.95	0.76	0.75

* No. は取出管の位置

ζ_0 は、取出管の抵抗係数の総和であって、入口損失、曲管損失、拡大損失、摩擦損失およびビニール管の縮流損失等を含んだものである。この表で判るように、 ζ_0 は

No. による系統だったものはないが、曲管部の形状に大きく依存するものと思われる。

4.3.2 細砂送流時の速度分布

まず、清水のときと同様、取出管出口の流速 v_{dn} を入口の速度 v_n に直さなければならないが、この出入口にエネルギー式を適用して式から算出するには、土砂混入時の管内の圧力分布が不明であり、また、それを static に考えることはできない。そこで、清水時の v_{dan} と v_{wn} の関係が、送細時においても云えるものとみなして、図-4-6から v_{dn} に対する v_n を直接求めるとした。図-4-8に、各位置の平均濃度 \bar{C} に対する速度変化を \bar{v}_w 別に示した。図からみて、実験範囲では、 \bar{C} に対して、ほぼ直線的な速度変化を知ることができ、この変化の状態は、

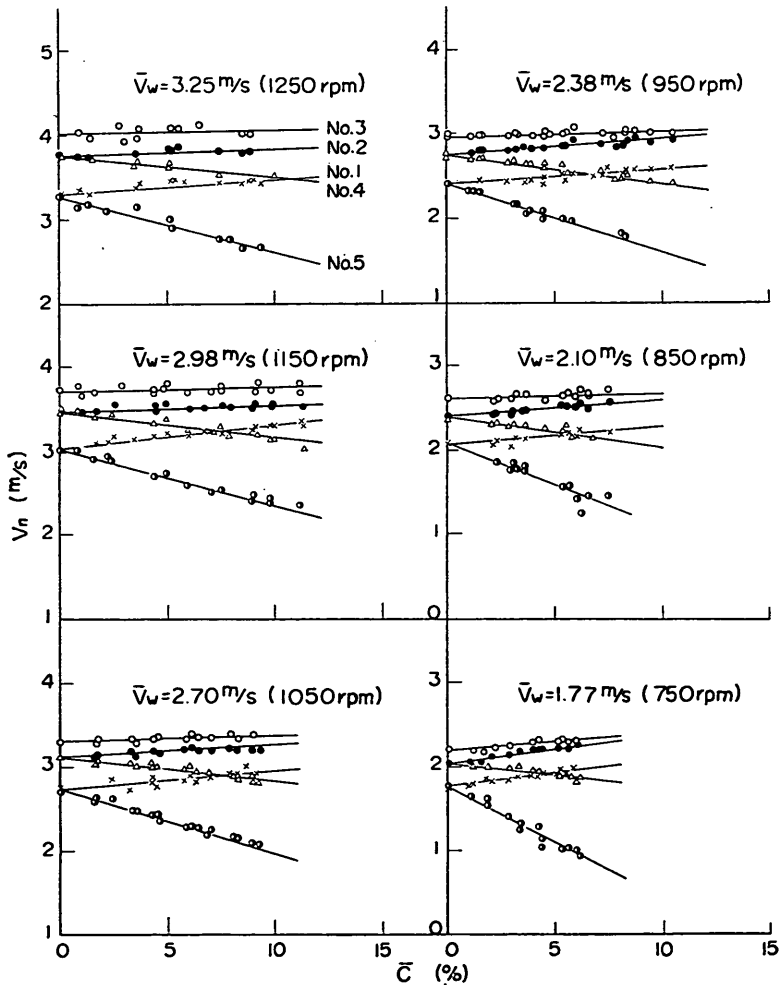


図-4-8 流速の実測値

\bar{v}_w および y/D によって異なることが判る。管中心 (No. 3) では、流体のみの速度とさほどの変化はみられないが、上位 (No. 2~No. 1) になるにつれて若干 v_n は大きくなり、逆に、管底側になるほど大きな速度低下がみられる。しかも、 \bar{v}_w が低くなるほどその変化は大きい。ここにおいて、流速の変化率は、次式の形で表わせる。

$$v_n/v_{wn} = 1 + \alpha \bar{C} \dots \dots \dots (20)$$

ただし、No. 4, 5 は $\alpha < 0$

ここで、 α は係数であり、 \bar{v}_w および y/D によって変るものである。然るに、濃度分布が ψ_w なる流れのパラメータで表わされたと同じ扱いがここにおいてもできることから、図-4-9に、 ψ_w と α の関係を各位置別に示した。No. 1 と No. 3 にバラツキは見られるが、全体的にみて、直線で表わされる。これより、次の式を得る。

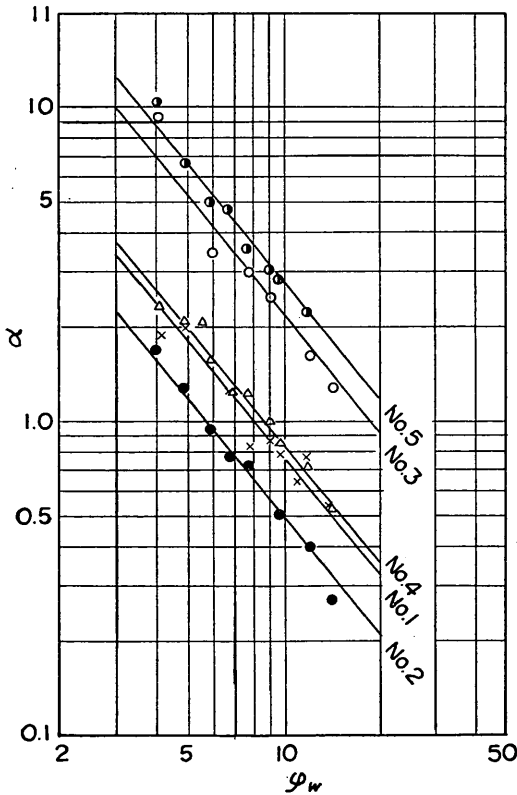


図-4-9 ψ_w と α の関係

$$\alpha = \xi \psi_w^{-1.25} \dots \dots \dots (21)$$

ここで ξ : 係数

次に、 ξ と y/D の関係を図-4-10に示すと、管中心を境に直線の傾きが変る。つまり、管底に近づくほど速度

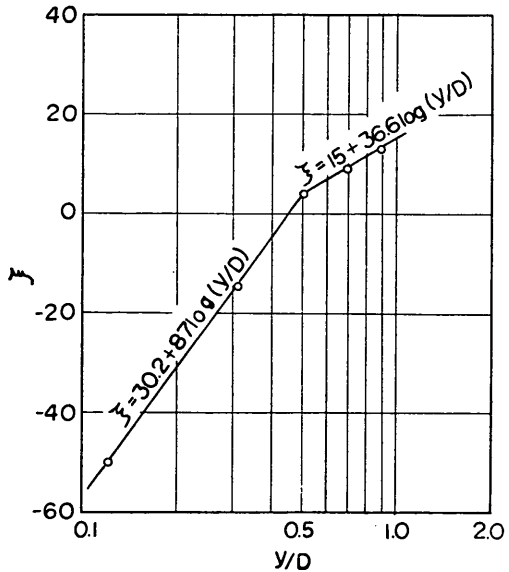


図-4-10 ξ と y/D の関係

は大きく、管中心から上位では、その変化は少ないと云えよう。ここに、 ξ は、次の式となる。

$$\begin{aligned} \xi &= 30 + 87 \log(y/D) & 0 < y/D \leq 0.5 \\ \xi &= 15 + 36.6 \log(y/D) & 0.5 \leq y/D < 1 \end{aligned} \dots \dots \dots (22)$$

よって、式(20)は、

$$v_n/v_{wn} = 1 + \xi \psi_w^{-1.25} \bar{C} \dots \dots \dots (23)$$

すなわち、細砂送流時における速度分布は、式(23)で示されるように、流体のみを流した初期条件と平均濃度の影響を受け、流体のみの速度分布が変化するものと云えよう。この式から、流速が大きくなると v_n/v_{wn} は1に、つまり、 $1/r$ 乗則の速度分布に近づき、管内の濃度分布が一定となった均質流れになるものと見なされる。逆に、低流速および高濃度になると、 v_n は v_{wn} より管底側で小さく、管上側で大きい、所謂、やせ形の速度分布となる。当然、この流れになると、粒子速度と流体速度の差が大きくなり粒子が管底近くに集中してくるから、濃度分布に不均一さを増し、管底側に速度の低下が大きく現われると云えるであろう。図-4-11は、図-4-8を管断面上にプロットした例である。この図から、最大流速の位置は若干、管中心から上位に移動するようであるが、ほぼ、管中心を軸心に非対称となることが判るであろう。

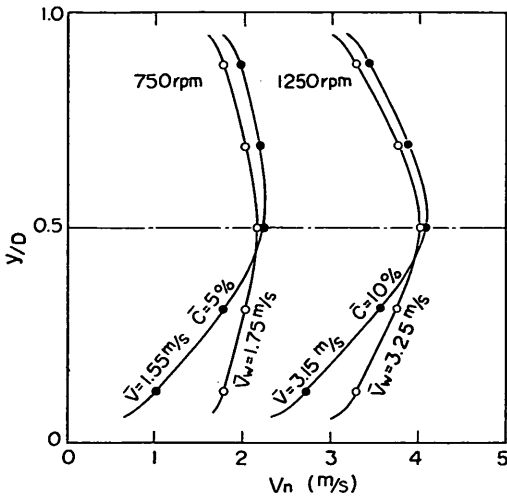


図-4-11 流速分布図

4.3.3 平均流速との関係

まず、管内の平均流速 \bar{v} を式(24)から図式的解法により求めてみる。式で示される流速分布は、管断面の中心鉛直上におけるものであり、 \bar{v} を求める際は、それを三次元の流れとして扱わなければならない。いま、図-4-12に示す如く近似的に分布の水平方向の断面が楕円とみなせば、次の式から求めることができる。

$$\bar{v} = \frac{\pi}{2} \int_0^{2r} \frac{v \sqrt{(2r-y)y} dy}{A} \dots\dots\dots(24)$$

ここで A: 管断面積
v: y 点における速度

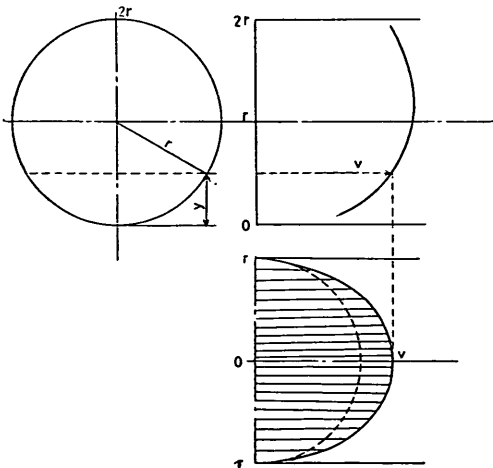


図-4-12 流速分布の水平方向の断面

その結果を吐出平均流速 \bar{v} との比較において図-4-13に示した。流速の小さい範囲で若干の誤差がみられるが、 \bar{v} に一致することから、式(24)は、満足されるものと考えられよう。

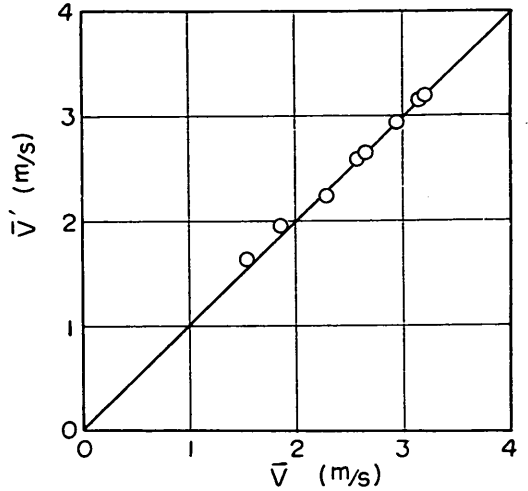


図-4-13 平均流速の計算値と実測値の比較

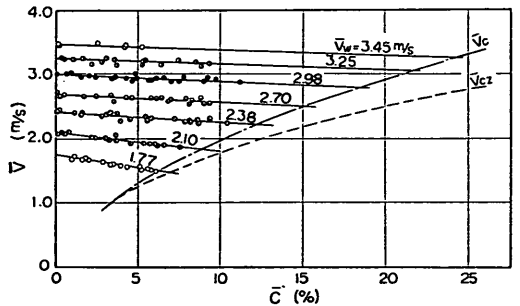


図-4-14 平均流速と平均濃度の実測値

ここで、式(24)を \bar{v} の関係で表わすために、 \bar{C} に対する \bar{v} を \bar{v}_w 別に図-4-14に示した。一見して、速度分布のときと同じことが云える。すなわち、速度の変化は、式(24)の形で表わされ、係数 $\bar{\alpha}$ は ψ_w の関数になることが予測される。図-4-15に、 ψ_w と $\bar{\alpha}$ の関係を示した。これから、次の式を得る。

$$\bar{\alpha} = 25\psi_w^{-1.7} \dots\dots\dots(25)$$

よって、流速低下率は、次式で示される。

$$\bar{v}/\bar{v}_w = 1 - 25\psi_w^{-1.7} \dots\dots\dots(26)$$

式(25)および式(26)から、

$$v/\bar{v} = \frac{1 + \xi \psi_w^{-1.25} \bar{C}}{1 - 25 \psi_w^{-1.7} \bar{C}} \cdot \frac{v_w}{\bar{v}} \dots\dots\dots(27)$$

ここで ξ : 式(23)の係数

ここにおいて、流速分布は、 \bar{v} の関係で表わされた。

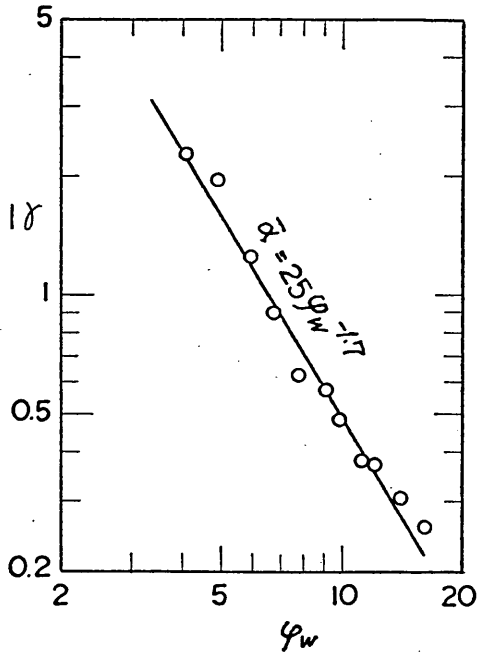


図-4-15 ψ_w と $\bar{\alpha}$ の関係

4.4 輸送土量について

管内の濃度分布および流速分布が求められたことから管内の輸送土量の検討を行なってみよう。

いま、管断面の管底からある高さにおける局部断面積 dA を考え、そこを通過する砂量を q_m とすると

$$q_m = q \cdot v \cdot dA \dots\dots\dots(28)$$

ここで、 q は、水平方向に一定とし、 v は、楕円とみなすと、管内の輸送土量 Q_n は

$$Q_n = \frac{\pi}{2} \int_0^{2r} q \cdot v \cdot \sqrt{(2r-y)y} dy \dots\dots\dots(29)$$

図-4-16に、 q_m を管断面上にプロットした1例を示した。これより、輸送土量は、管中心より下側で主として行なわれていることが判る。さらに、実測土量 $Q_m = A \cdot \bar{C} \cdot \bar{v}$ との比較を図-4-17に示した。低流速および高濃度になると、 $Q_n < Q_m$ の傾向を示すが、式(29)の仮定を考えれば、誤差の範囲とみなされる。ここにおいて濃度分布および流速分布式の妥当性が確かめられたものと云えるであろう。

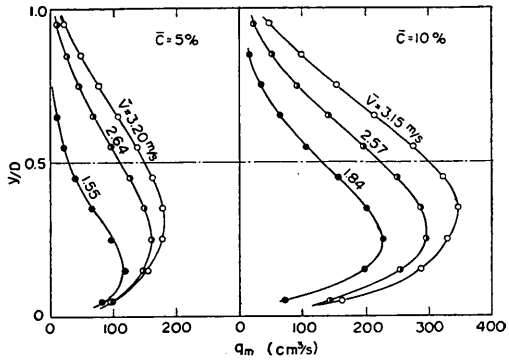


図-4-16 輸送土量分布

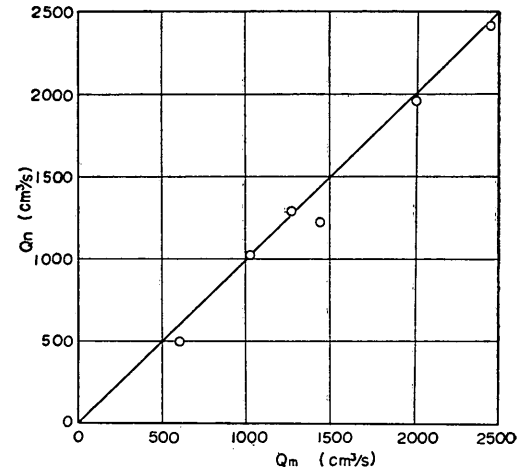


図-4-17 輸送土量の計算値と実測値の比較

5. 結 論

以上の実験および解析によって、明らかになった事項を要約すると、次の通りである。

- (1) 不均質流れ領域における管内の濃度分布および流速分布は、流れのパラメータ ψ_w を導入することによって解析され、その結果、式(10)および式(23)として示された。
- (2) 拡散係数は、円管の流れの特性を考慮したものと なった。
- (3) 濃度分布式から流れ領域を判定する1つの特性値を求めた。それは、Zandi-Govatos の $N_I = 40$ に極めて近い値を示した。
- (4) 流速分布は、濃度が大きく流速が小さくなるほど非対称性を示し、管底に近い程その傾向は著しい。したがって、濃度分布の非対称性が流れの性質を変え、その結果として、速度分布の非対称性を生じるものと考えら

れる。

(5) これらの分布式は、 \bar{q} 、 \bar{v} および Q_n を図式的解法により求めて比較し、その妥当性が確かめられた。

6. あとがき

本報告は、1つの室内実験の範囲にとどまったが、不均質流れ領域における流動機構を知るための濃度分布および流速分布を実験的現象論として述べたものである。

ここにおいて、幾つかの問題が課せられるが、その1つに、管径および粒子の及ぼす影響を調べる事が望まれるであろう。

なお、本報告作成にあたり、実験並に種々の助言をいただいた岡山技官、図面のトレースなどを手伝っていた佐藤技官に厚く感謝する次第である。

(1973年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 八木得次, 奥出律他; 水平管路における土砂の水力輸送について, 昭47年度港湾技術研究所講演会資料 1972年12月
- 2) K. Zagstin; Sediment Distribution in Turburent Flow,
- 3) 小川元; 管内における浮遊流砂の流砂量について, 土木学会誌40-9 昭30-9
- 4) I. Zandi and G. Govatos; Heterogeneous flow of Solids in pippelines. Jour of the Hydraulic Division. ASCE. Vol. 1.93 No. HY3. Proc. Paper 5422 May 1967, pp. 145~148
- 5) 鮎川恭三; 浮遊状態での固体粒子群の水平管水力輸送, 日本機械学会論文集38巻315号 昭47-11

記 号 表

A = 管断面積

\bar{C} = 吐出平均濃度

C_d = 抗力係数

D = 管径

H = 取出管吐出口から水平管の管底までの距離

k = カルマン定数

m = 式(6)の係数

n = 式(6)の係数

N_I = Zandi-Govatos の特性値

P_0 = 取出管出口圧力 (大気圧)

P_t = 水平管上壁の圧力

P_n = 取出管入口圧力

Q_n = 分布から水めた輸送土量

Q_m = 実測土量

q = 濃度

q_m = 局部土量

r = 管の半径

s = 粒子の比重

u_* = 摩擦速度

v = 流速

\bar{v} = 平均流速

\bar{v}_c = 限界流速

v_t = 粒子の沈降速度

\bar{v}' = 分布から求めた平均流速

y = 管底から鉛直方向の任意の点までの距離

α = 式(20)の係数

$\beta = \epsilon_s$ と ϵ の比

ξ = 式(21)の係数

ρ = 水の密度

τ_0 = 摩擦応力

ζ_0 = 損失係数

ϵ = 乱流動粘性係数

ϵ_s = 粒子の拡散係数

ψ_w = 流れのパラメータ

$\psi_c = \bar{v}_c$ における流れのパラメータ