

ポンプ船排砂管内の土砂濃度及び 乱流交換係数について

正員内田黎郎*
正員加藤正晴**
正員小川元***

要旨 ポンプ浚渫船の排砂管内の土砂濃度を実測しこれに先に行つた理論的計算方法¹⁾を適用して、その計算において用いた乱流交換係数が妥当なものであることを実証し、ついでその方法を細管に適用して、細管の場合には交換係数にかなりの補正を施さねばならないことを見出し、円管における土砂輸送に対する乱流交換係数の一般的傾向を定量的に決定したものである。

表一 実測場所その他

1. 実測

運輸省第四港湾建設局の協力によつて、2年間にわたり現場において流速、土砂濃度等の測定を行つた。実測場所及び期間は表一のようである。

現場によつて、種々異なる方法を用いたので、次にその大要を記す。

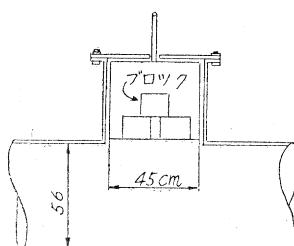
(1) 奥洞海：流速 はじめ吸込を海底よりあげて、海水のみを送水しおき、急にこれを海底にさげて、その瞬間から泥が排砂口に出てまでの時間を測る。土質ヘドロのためその進行は明瞭にわかる。測定区間 100 m～400 m。これに運輸技術研究所製作の含泥量測定機によつて求めた流速を参考とした。

濃度 管出口の上部と中部において各 300 cc の泥水をとり、この泥を乾燥させて実容積濃度を求め、かつ土砂の物理試験をした。この上部と中部二点の濃度と、一般の場合濃度分析が指數曲線になるということを考え合わせて、この場合の管内平均濃度を 13% と求めた。また一方昭和 28 年 8 月より 10 月末に至る間に浚渫された総浚渫土量と、総浚渫時間とから管内平均濃度を求めると約 3% になった。よつて濃度は全期間平均 3% 最高 13% と考えた。

摩擦損失係数 排砂管の直線部に 30 m ごとに 3 個の圧力計（容量 2 kg/cm²）をとりつけ、同時に動水圧を測つて摩擦損失を求める、これから係数 f を計算し、これと Nikuradse との粗管の場合の公式による値とを比較して判定。

図一

苅田港における流速測定装置



(2) 苅田港：流速 管途中の上部に 図一 のような側室を設け、ここにおいて柱内に直径 12 cm 長さ 15 cm の松材の木塊数個をおき、この柱を急に管内にさげて、木塊を流下させる。木塊は十分湿らせて比重を 1 に近くしてある。流速測定区間は 232 m。泥水の平均流速 5.00 m/sec、水のみの場合は 5.50 m/sec であった。

濃度 管出口の上中下 3 点に各径 2 インチの管を固定し、これから各約 45 l の泥水を採取し、沈澱させた後その泥容積を測ると同時に、一部を乾燥計量して実容積濃度を求めた。これによつて平均濃度約 10% と推定された。土質はヘドロ、泥土、粘土塊の混合物である。採泥管内の摩擦損失は

大体その水頭で相殺されるように採泥管出口の高さを加減する。

摩擦損失係数 約 22 m おきにとりつけた 3 個の圧力計によつた。

(3) 洞海湾北漁：流速 (4) に述べるような側管を用い、ここに約 2 l の赤ペイントを入れ、これを瞬時に管内に放流し、これが管出口から排出されるまでの時間を測つた。測定区間 166 m、平均流速は泥水の場合 $V = 4.30 \text{ m/sec}$ 、水の場合 $V = 5.00 \text{ m/sec}$ であった。

* 工学博士、山口大学教授、工学部土木工学教室

** 前運輸省第四港湾建設局長

*** 山口大学助教授、工学部土木工学教室

濃度 排砂管中央部で2インチ管により約50lの砂水採取、これから断面平均真濃度を求めるとともに、昭和28年11月1日より29年2月までの全浚渫土量と運転時間の集計から求めた真濃度とを比較して、平均濃度8%とした。

摩擦損失係数 50mごとに圧力計3個を用いた。

図-2 博多港における流速測定装置

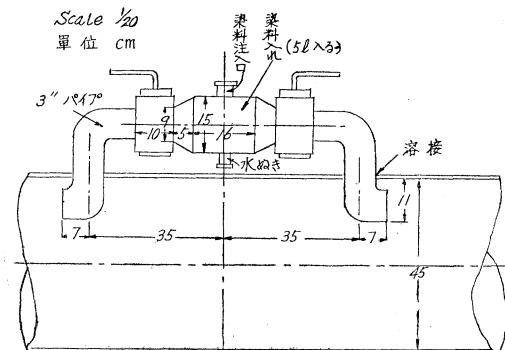
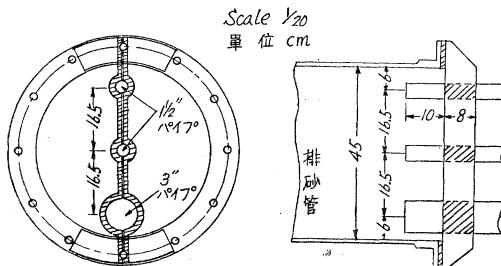


図-3 博多港における砂水採取位置



(5) 洞海湾ケーソン工場：流速 2法による。1は吸込管を急にさげて泥が排砂口に出るまでの時間及び浚渫中に吸込口に直径15cm、長さ20cm位の、釘を打ちこんで、比重1に近くした木塊数個を吸込ませて、それが排出されるまでの時間を測つた。他は排砂口附近に写真-1に示すよう、20m×5m×1mの水溜をつくり、ここに排出土砂流全部を受け入れて、水溜下流の矩形堰から溢流する土砂流の水位を測ることによつて求めた。

濃度 先づ上記水溜に泥水を送り、ここに沈澱した泥の量を測つて濃度を求めようとしたが、水溜の枠が通水後4分で一部こわれたので、これは測定不能となつた。別に浚渫前後の深浅測量を精密に行い、それから総浚渫土量を求め、一方純浚渫時間を詳細に記録し、これから先に測つた流速を用いて平均濃度を求めた。この浚渫区域は $4700 m^2$ で比較的狭く、かつ片側は鋼矢板で限られていたのでこの値はかなり正確な値を与えるはずである。平均濃度 $N=4.5\%$ 。

摩擦損失係数 100mおきに図-4のような3個の圧力計を用いた。

(6) 鹿児島港：写真-2に示すようなマスを用い、これのフタを瞬時に開閉することによつて中に泥

(4) 博多港：流速 管途中に図-2のような側管を設け、ここにベニガラを混ぜた水約5lを入れ、これを瞬時に管内に放出した。途中管継手から噴出する水、及び管出口の水の変色を見て流速を求める。水のみの場合の平均流速(8回測定) $V=4.80 m/sec$ 、泥水(17回測定) $V=4.20 m/sec$ 、測定区間170mであつた。

濃度 図-3のような装置によつて排砂管末端の断面内3カ所で試料をとり、各点の濃度を求め、これから後述のような手続きによつて断面内濃度分布及び平均濃度を求めた。試料採取回数は上部中部各9回、下部5回である。計算の結果は断面平均濃度2.3%。別に29年4月~12月間の総浚渫土量及び時間から求めた真濃度は4.6%であつた。この場合、上の実測結果はかなり精密な方法をとつてるので、この方の値2.3%を正しいものとした。

摩擦損失係数 約17mおきに3カ所の圧力計を図-4のようにとりつけ、海水のみの場合の読み20回をとり、これから求めた。

図-4 博多港における動水圧測定装置

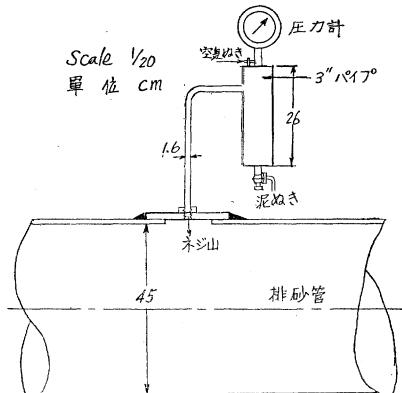


写真-1 洞海湾ケーソン工場における流速測定装置

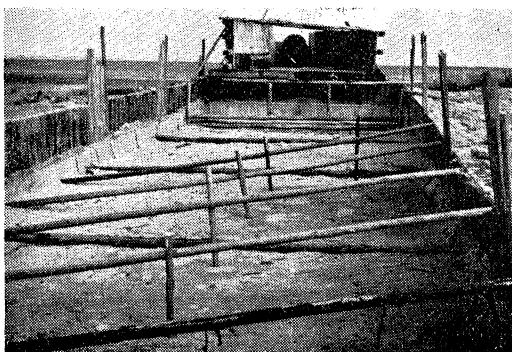


写真-2 鹿児島港における流速測定装置

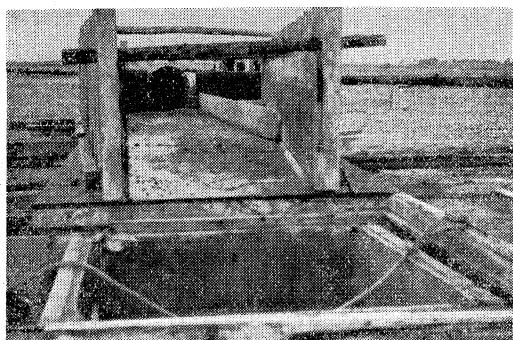
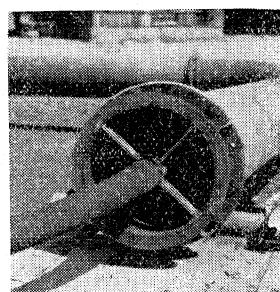


写真-3

唐津港における砂水採取方法



水を満たし、同時に計時し、計時と泥水容積とによって流速を、また沈殿土砂と全容積とによって濃度を求めた。摩擦損失の測定は行わない。

(7) 唐津港: 写真-3 のように管出口中心部に 2 インチ管をとりつけ、これにより 18 l 鍋に試料を採取し、同時に計時し、採取管の摩擦損失を考慮に入れて管内平均流速を推定し、かつ管内濃度を推定した。補助的実測である。

以上の実測値を集計すると表-2 のようになる。

表-2において、 V は砂水の平均流速、 f は海水の場合の摩擦損失係数、濃度は真容積濃度である。これらの実測において流送された土砂の諸値は表-3 及び図-5 に示す。

表-3 土砂数値表

| NO. | d_{50} | 沈降速度 | 比重 | 空隙率 |
|-----|----------|-------------|-----|-----|
| 1 | — | 0.19 cm/sec | 2.0 | 64% |
| 2 | — | 0.19 | 2.1 | 65 |
| 3 | — | 0.25 | 1.8 | 57 |
| 4 | 0.031 | 4.58 | 2.5 | 50 |
| 5 | 0.035 | 4.40 | 2.6 | 35 |
| 6 | 0.049 | 6.80 | 2.2 | 45 |
| 7 | 0.014 | 1.40 | 2.4 | 52 |

表-3において d_{50} は粒度曲線の 50% の粒径、沈降速度は d_{50} の砂粒の沈降速度、空隙率は水中で自然沈殿した砂の空隙率を示す。 d_{50} を求める場合多少の修正を施したものがある。すなわち鹿児島港においては、粗粒のものには軽石が多く、これはフルイ分析には入るが沈降速度は 0 である。故に粒度曲線の 85% までをとつてこの半分を d_{50} とした。また唐津港においては、砂粒とは全く不連続な石炭塊がかなりあり、これは流送される場合も掃流であるから、やはり上と同様 85% までをとつて、その半分に当る d をとつた。 d_{50} の砂粒の沈降速度をその砂全体の代表的沈降速度とすることは、筆者の行つた実験³⁾にもとづいている。さて以上の数値を用い、先に論文(1)に述べた式(1)を用いてその濃度を計算すると表-4 のようになる。

$$N = \frac{1}{\pi} PC_0 e^{bt} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$b = 12.7 \frac{k}{r_0} - 2.5 \frac{1}{1-k/r_0}$$

表-2 現場実測値

| NO. | 管経 | 管全長 | 平均流速 V | f | 実測濃度 |
|-----|------|------|-----------|-------|------|
| 1 | 56cm | 500m | 5.00m/sec | 0.024 | 13% |
| 2 | 56 | 390 | 5.00 | 0.021 | 10 |
| 3 | 51 | 480 | 4.30 | 0.019 | 8 |
| 4 | 45 | 300 | 4.20 | 0.015 | 2.3 |
| 5 | 56 | 660 | 3.60 | 0.024 | 4.5 |
| 6 | 38 | 500 | 3.60 | — | 6 |
| 7 | 45 | 540 | 1.60 | — | 7.5 |

図-5 土砂粒度および沈降速度曲線

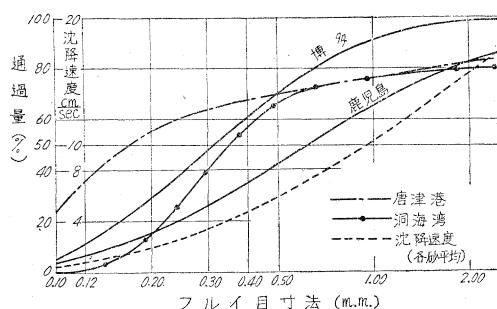


表-4 計算濃度

| NO. | r_0/k | t | 計算濃度 |
|-----|---------|-------|-------|
| 1 | 220 | 0.007 | 33.7% |
| 2 | 220 | 0.008 | 33.0 |
| 3 | 200 | 0.012 | 38.5 |
| 4 | 180 | 0.252 | 2.9 |
| 5 | 250 | 0.221 | 5.0 |
| 6 | 150 | 0.320 | 1.6 |
| 7 | 180 | 0.155 | 7.3 |

ここに N ; 真容積濃度, C_0 ; 空隙率を引いた真容積率, $t = w/u_*$, w ; d_{50} の砂粒の沈降速度, u_* = 摩擦速度 $\sqrt{\tau_0/\rho} = V \sqrt{f/8}$, k ; 相対粗度, r_0 ; 管半径。 w は実験室内で測定した値を実測時の水温に換算して用いた。 P は円管断面積についての積分項で、数値積分の結果を論文(1)に示してある。

表-2 及び表-4 によつて実測と計算の各濃度を比較すると No.4, No.5, No.7 はかなりよく一致し、No.1, No.2, No.3 は計算濃度が過過ぎ、No.6 は過小である。その理由を考えると、No.1-3は土質がヘドロまたは細砂であり、かつその試料は管の中部あるいは上部でとつたものである。この試料の d_{50} を全部の平均粒径として用いたので、それは実際の d_{50} よりかなり小さいと思われる。土質はヘドロであるが、かなり粗なものも混つており、それは管底に近いところを流れているので採取されていないためであろう。試みにこの 3つの場合の実測濃度から(1)式を用いて平均沈降速度を逆算してみると、それらは管底部の粗粒を考慮に入れれば十分考え得る値になる。

次に No.6 は土砂に軽石を多くふくむ場合である。これは実測濃度には軽石もはいつているのに対して、計算濃度に用いた w には軽石ははいつていない。そのため計算濃度が過小に出たものであり、これも(1)式を否定するものとは思えない。

以上によつて、(1)式は実際に用いられる排砂管に対しては、土砂がふつうの土砂すなわち細粗の粒径が連続していて、ヘドロの中に小石や粘土塊をふくむというようなものでない場合には、実用の精度で成立つようと思われる。ただし(1)式の与える濃度は、その管がその流速でふくみ得る最大濃度であつて、浚渫技術によつてはそれ以外の場合ももちろんある。

2. 実測値に関する考察

博多港(No.4)の場合について少し詳しく考察する。

(1) 平均濃度 実測は図-3の如く上中下3点で試料をとり、これから断面平均濃度を推定したものである。これには次のようにした。(1)式誘導の場合乱流交換係数 ϵ は定数と見なしている。すなわち ϵ_{ave} を ϵ の平均値とすると、これを用いて濃度分布は(2)式で表わされる。

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -\frac{w}{\epsilon_{ave}} (y-a) \right\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2)式は半対数紙を用いると直線になる。よつて半対数紙上で上中下3点の濃度をプロットして、これを通して一本の直線を引き、これを実際の濃度分布とみなす(図-6)。すると平均濃度は、この分布を円の面積について平均すればよいのであるが、これを Sympson の方法によつて $n=8$ として近似計算した値は $N=2.2\%$ 、また円の面積を水平に6個の等間隔な横線で分ち、各面積ごとにその重心の濃度を用いて全断面の平均濃度を求める $N=2.3\%$ となつた。表-2 にはこの 2.3%をとつてある。

(2) d_{50} について 上中下3点の試料から全体の粒度曲線を決定するのには、厳密には次のようにすべきである。すなわち各点の試料をふるい分け、それにその点の濃度をかけて、各粒度ごとの濃度分布を求め、これから各粒度ごとの全量を求めてそれによつて粒度曲線を描く。しかし測定の精度はそれほど高くはなく、かつ必要なのは d_{50} のみであるから、ここでは次のようにした。先づ各点の試料の粒度分析結果にその点の濃度を Weight としてかけ、これを上中下平均したものを全体の粒度曲線とし、これから d_{50} を求めた。かくすると粒度ごとの濃度分布曲線を積分する代りに、Weight を考えて粒度ごとに3点の算術平均をとることになる。すなわち各点の砂水1cc中にふくまれる砂を加え合わせたものを全体の砂の平均と考えるのである。こうして求めた曲線が図-5に示してある。

(3) ϵ 平均値について 実測と計算とによる各濃度分布を比較することによつて、(1)式の基礎として用いた ϵ 平均値がどの程度正しかがわかる。(1)式の基準として用いた濃度分布式は(2)式において

$$\epsilon_{ave} = \frac{1}{12.7} r_0 u_* \quad \dots \dots \dots (3)$$

としたものであり次の如くである。

$$C = C_k \exp \left(-12.7 t \frac{y-k}{r_0} \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

故に(4)式を用いて計算した濃度分布が実測濃度分布と合えば、これに用いた ϵ の平均値(3)式は妥当なものであるということになる。そこでまず実測された平均沈降速度 $w=4.58 \text{ cm/sec}$ を用いて、(4)式で濃度分布を求めてみると図-6に示すようになつて全く合わない。しかるにこの w を用い、同じ(4)式から導いた(1)式を用いて求めた管内平均濃度は前出の如くよく合つている。このことは今求めた計算濃度分布は、実は細粗混

合した砂の濃度分布ではなくて、沈降速度 4.58 cm/sec の単一粒径の砂の濃度分布を示すものであることを意味する。細粗混合した砂の濃度分布は各粒度ごとにこれを求め、その合計として計算すべきものである。

そこで改めて粒度曲線を 20% ごとに 5 分し、各区域の w 中央値を用い、これに温度補正をした上で、(4) 式を用いて各区域の砂ごとに濃度分布を計算し、これを合計して全体の濃度分布を出してみると、図-6 に示すようになつた。これで見ると、計算濃度分布と実測濃度分布とは、その直線のコウ配がかなりよく合つている。粒度区分を細かくすれば、このコウ配はさらによく合う傾向が見られるので、この計算法によれば直線のコウ配は一致するようと思われる。ところで ϵ 平均値が関係するのは、この直線のコウ配だけである。よつて以上の計算によつて、計算の基礎として用いている ϵ 平均値(3)式は、まず妥当であると考えられる。

ただし、図-6 において見るように両直線の位置は相違している。この位置は(4)式における C_k によって決まるものであり、 C_k は論文(1)に述べた如く C_0 を基準として求める。上の粒度別濃度分布の計算においては、この C_0 を、各粒度ごとに全体の C_0 の 1/5 づつと仮定した。しかし今試みに実測濃度分布によつて示される $C_k=0.05$ をとつて、この C_k を与えるような w を逆算してみると、この w は、粒度曲線の 90% 程度の粗粒に相当するものであることがわかる。そこで以上の結果からみて次のようにいえる。すなわち濃度分布直線のコウ配は、上のような計算で与えられるが、その位置は粒度曲線の 90% の粒径の沈降速度によつて計算される C_k によって決まる。これは結果についての考察以上に出ないが、ここで問題にしているのは ϵ 平均値の妥当性であつて、それは合理的に認められるものと思われる。なお上のように、濃度分布は粒度ごとでなければ求められないに對して、断面平均濃度が平均沈降速度を用いて一度に計算できるのは、図-6 でみると、 w_{50} を用いた濃度分布直線が実測濃度分布直線と円管中心で交わり、上下対称であるためであろう。

表-5 1.5 インチ、2 インチ管実験結果

| 管 経 | 砂 d_{50} | V | f | W | Void | 計算 N | 実測 N |
|---------|------------|-----------|-------|-----------|------|--------|--------|
| 2 インチ | 0.033cm | 215cm/sec | 0.022 | 5.2cm/sec | 0.41 | 0.42% | 9.3% |
| 5.29 cm | 0.061 | 220 | 0.022 | 7.5 | 0.40 | 0.08 | 9.2 |
| | 0.048 | 220 | 0.022 | 6.6 | 0.39 | 0.16 | 9.2 |
| 1.5 インチ | 0.091 | 200 | 0.022 | 8.9 | 0.38 | 0.01 | 16.1 |
| 4.13 cm | 0.048 | 200 | 0.022 | 6.6 | 0.39 | 0.09 | 16.5 |
| | 0.017 | 140 | 0.025 | 2.7 | 0.38 | 1.40 | 23.6 |

わかつた。 P の値を決める主要なものは ϵ 平均値である。(1) 式の信頼性については表-2 における大管の場合及び博多港の濃度分布の検討からして、いちおう信頼できるものとすれば、細管の場合には ϵ 平均値がかなり大きくなるものと考えなければならない。そこで細管の場合における ϵ の変化をしらべる。なお P は次式で示される。

$$P = 1.63 \left(1 + 0.34 \sqrt{\frac{f}{8}} \right) \left(e^{-6.71t} + e^{-18.7t} \right) \dots \dots \dots (5)$$

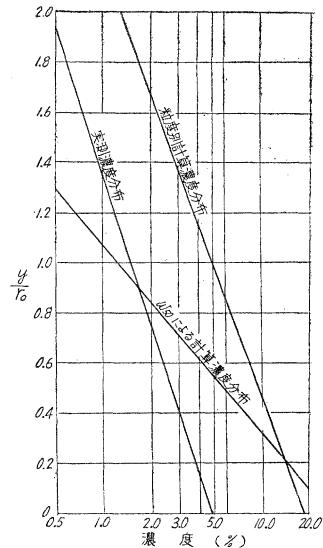
1 つの t に対して P の値を決定するものは(5)式における e の指数であり、 e の指数は ϵ 平均値から積分によつて導かれたものである。

さて ϵ 平均値が大なる場合として、 ϵ そのものが大きいか、その平均のしかたが異なるために大になる場合を考えられる。しかし細管の場合に必要な ϵ 平均値を逆算によつて求めてみると、それは ϵ の理論値と考えられる(6)式の ϵ の最大値よりもはるかに大きい。

$$\epsilon = \frac{1}{2.5} u_{*} y \left(1 - \frac{y}{y_m} \right) \dots \dots \dots (6)$$

ここに y_m : 底から最大流速の点までの高さ。

図-6 博多港における濃度分布



3. 細管の場合

筆者が行つた 2 インチ及び 1.5 インチ管による実験³⁾ における限界濃度に(1)式を適用してみる。その結果は表-5 のように実験値と計算値とは全く合わない。

この合わない原因を追究するため(1)式によつて平均濃度を計算した過程をしらべてみると、細管の場合には P の値が著しく小さいことが

のことから問題は ε の平均のしかたではなく、 ε そのものが大きくなっていることがわかる。そこで大管の場合と同じく二次元流の式に $1/A$ をかけたものを円管の場合の ε の一般式とおく。

$$\varepsilon = \frac{1}{A} - \frac{1}{2.5} u_* r_0 \frac{y}{r_0} \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) \quad (7)$$

そうすると (1) 式は次のように書き変えられる。

$$N = \frac{1}{\pi} PC_0 e^{bt} \quad (8)$$

$$P = 1.63 \left(1 + 0.34 \sqrt{\frac{f}{8}} \right) \left(e^{-6.71 At} + e^{-18.7 At} \right)$$

式 (8) に N その他の実測値を代入すると、各場合の A の値が試算法によつて求められる。これをみると大管の場合は A は 1 に近く、小管になるに従つて小くなる。すなわち大管の ε は平行二平面間の ε には等しく、小管になるほどこれより大きくなり、1.5 インチ管では、大管の場合の数倍に達する大きな値をと

表-6 A-値

| 実測種別 | A |
|---------|------------|
| 唐津 | 0.963 |
| 洞海湾ケーソン | 1.029 |
| 博多 | 1.070 |
| 2 インチ | No.1 0.319 |
| | No.2 0.229 |
| | No.3 0.265 |
| 1.5 インチ | No.1 0.123 |
| | No.2 0.145 |
| | No.3 0.210 |

る。次に ε は (7) 式で示されからこれは $(u_* r_0)$ の函数である。一方次元解析によつて ε に影響を及ぼすパラメーターを求めるとき、これは r_0 と u_* を用いたレーノルツ数 $R_* = u_* r_0 / \nu$ をとれば十分であることがわかる。よつて ε に関するパラメーターとして R_* をとる。そこで各場合の R_* を求めて、これらと各 A 値とのグラフを描くと図-7 のようになつた。なおここに、Howard の 4 インチ管の実験における A 値を求めてみると、これも他の諸点と合わせてほぼ一直線上にはいる。最小自乗法によつてこの直線を求めると

$$A = 0.00215 R_*^{0.589} \quad (9)$$

となる(図-7)。

A をふくんだ濃度の式 (8) 及び P の式をみると、これは A をふくまない場合の式 (1) において、 t の代わりに At を入れた形と全く等しい。このことは論文 (1) に示した P の図示において、新たに At の値を t と

考えれば、(8) 式を用いた場合でもそのまま用いることができるることを意味する。すなわち細管の場合には、見かけ上 t の値が減少したものと考えることができる。かくして式 (8) 及び (9) を用いて、表-6 に示した各場所の濃度を改めて計算して、それを実測濃度と比較すると、図-8 のようである。

以上によつてあらゆる管径に対して、その輸送し得る最大濃度を大体推定することができる。

4. 円管の ε について

円管内の ε あるいはその平均値が、管径によつてどのように変化しているかをしらべてみる。 A を用いた ε_{ave} は次のようになる。

$$\varepsilon_{ave} = \frac{1}{A} - \frac{1}{12.7} r_0 u_* \quad (10)$$

(10) 式に (9) 式を代入し、両辺を無次元化すると次のようになる。

$$\frac{\varepsilon_{ave}}{\nu} = \frac{1}{0.0272} R_*^{0.411} \quad (11)$$

R_* は $u_* = VV/f/8$ によって一般レーノルツ数 $R_e = VD/\nu$ に変えられるから、(11) 式はまた次のとくなる。

$$\frac{\varepsilon_{ave}}{\nu} = 16.2 f^{0.206} R_e^{0.411} \quad (12)$$

すなわち土砂輸送に関する円管の乱流交換係数の絶対値は、一般に (12) 式で表わされる。これを (10) 式に

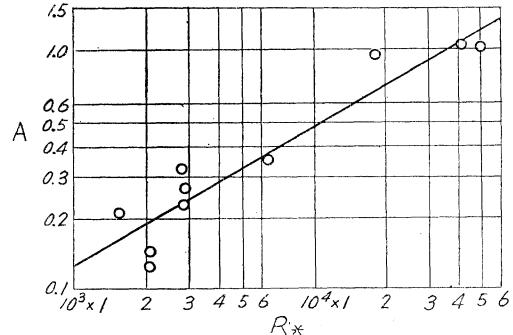
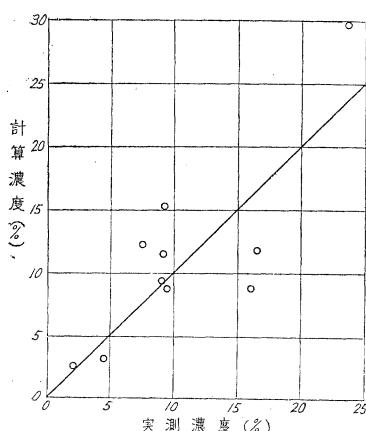
図-7 R_*-A グラフ

図-8 計算-実測濃度比較



よつて ϵ_{ave} の実験値を求め、 R_e との関係において図示すると図-9 のようになり、図中の直線は (12) 式において $f=0.025$ とした場合のもので、 f の値による直線の位置の差は僅かである。

(12) 式によれば ϵ_{ave} は管径流速の増大とともに増加する。これは一般に R_e 増大によつて乱れが大になるという原則に合つているのであるが、表-6 において A 値を求めた場合、小管の方が ϵ が大になつた事実と背反する。これは次のようにして解決される。すなわち ϵ_{ave} の絶対値は (12) 式で示されるが、(8) 式による濃度計算においては (10) 式の形で用いられており、今 (10) 式を (8) 式に代入すると、結局

$$N \propto \exp\left(-k_1 \frac{r_0^{0.589}}{u_*^{0.411}}\right) + \exp\left(-k_2 \frac{r_0^{0.589}}{u_*^{0.411}}\right) \dots \dots \dots \quad (13)$$

がえられて、積分計算の結果 r_0 と u_* が互に逆の効果をもつようになることがわかる。(8) 式が実験値に適合するためには、(12) 式の成立が必要となるのであるが、この (12) 式が一般的円管乱流の原則を満足するということは、(8) 式の真実性が示されるものではないかと思う。かくして濃度に関する限り、 ϵ_{ave} は (10) 式で表され、見かけ上細管の場合は大管の場合より大となり、濃度も (13) 式によつて小管の場合の方が大になることが示されるのである。

ただし、上の計算は実験を基礎としたものであり、その数値も実験から与えられたものであることを断つておかねばならない。

5. 結 語

以上の所論の骨子は、上の方針によると、円管内の土砂の平均濃度を、理論的根拠を失わずに定量的に求めることができるという事であり、かつもしこれが正しいとすれば、浚渫計画の概要を立てる上に有用であるだけでなく、さらにこれを基礎として、輸送量からみた円管の経済的設計に発展させることができるであろうということである。

以上の実測ならびに研究は、京都大学石原教授の御指導により、昭和 28 年及び 29 年度文部省科学試験研究費の補助を得、また運輸省第四港湾建設局管内の洞海湾、博多港、苅田港各工事事務所の懇切な援助によつて行つたものである。また計算について本教室学生諸君の援助を得ている。関係各位特に各港湾現場関係の方々に深く感謝の意を表する。

文 獻

- 1) 小川元：“管内における浮游流砂の流砂量について” 土木学会誌第 40 卷第 9 号、昭 30. 9.
- 2) 小川元：“管による砂輸送における管径の影響について” 山口大学工学部学報第 4 卷第 1 号、昭 28.
- 3) 小川元：“管内の砂水流れにおける各種限界流速について” 土木学会誌第 38 卷第 8 号、昭 28. 8.

(昭. 31. 1. 28)

図-9 $\epsilon_{ave}/v - R_e$ グラフ

