

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. 17

NO. 4

DEC. 1978

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第17巻 第4号 (Vol. 17, No. 4), 1978年12月 (Dec. 1978)

目 次 (CONTENTS)

1. Random Wave Velocity Field From Periodic Wave Theory
.....Koji KOBUNE..... 3
(規則波理論による不規則波中の水粒子の算定.....小舟浩治)
2. 浮体係留における粘性抵抗力および拘束条件の影響について
.....小舟浩治..... 59
(On the Effect of Viscous resistance and Non-linear Mooring System on the Mooring
Force of a Floating Body.....Koji KOBUNE)
3. 直立式円筒浮体の波浪中の動揺振幅に関する研究
.....合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉..... 89
(Prediction of the Oscillation Amplitude of a Bottom-hinged, Vertical Buoyant Cylinder
in Sea Waves.....Yoshimi GODA, Yasumasa SUZUKI, and Kazuyoshi HACHISUKA)
4. 地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究
.....高橋邦夫・沢口正俊..... 121
(Experimental Study on the Bending of Battered Piles due to Ground Settlement
.....Kunio TAKAHASHI, Masatoshi SAWAGUCHI)
5. ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装評価とかさ上げ厚設計
.....佐藤勝久・福手 勤・佐藤峰夫・山崎英男..... 169
(The Evaluation and Overlay Thickness Design of Airport Asphalt Pavements by Dynaflect
Deflections.....Katsuhisa SATO, Tsutomu FUKUTE Mineo SATO and Hideo YAMAZAKI)
6. 繰り返し曲げを受ける PC パイルの力学的性質
.....大 即 信 明..... 193
(Strength and Deformation Characteristics of Prestressed Concrete Piles Subjected to
Repeated LoadingNobuaki OTSUKI)
7. 船舶の主要寸法に関する解析
.....寺 内 潔・吉田行秀・奥山育英..... 265
(Analysis on the Interrelations among the Several Dimensions of Ships
.....Kiyoshi TERAUCHI, Yukihide YOSHIDA and Yasuhide OKUYAMA)

8. 差圧式含泥率測定法の実用性について

.....浜田賢二・八木得次・斉藤 勝・是石昭夫... 329

(On Practical Characteristics of Solid Concentration Measurement by Differential
Pressure in Pipes.....Kenji HAMADA, Tokuji YAGI, Masaru SAITO and Akio KOREISHI)

8. 差圧式含泥率測定法の実用性について

浜田賢二*・八木得次**・

斉藤 勝*・是石昭夫***

要 旨

ポンプ浚渫船、ドラグサクシ ョン浚渫船等の水力浚渫船において、その管内含泥率をは握することは極めて重要である。現在使用されている含泥率計は、その取り扱いや管理上に問題があり、必ずしも現状を満足しているわけではない。

本研究は、垂直管およびベンド管の差圧による管内含泥率測定法を取り上げ、細砂、粗砂および中れきについて室内実験を行ない、その実用性について検討したものである。実験結果を要約すると次のようになる。

(1) 土粒子が細砂、粗砂の場合、垂直上昇流と垂直下降流の差圧による含泥率（U字管方式）および垂直上昇流または垂直下降流の差圧による含泥率（単管方式）と吐出含泥率の差は約1%以内である。またこれらの場合、差圧含泥率と吐出含泥率の相関係数は約0.99と強い相関関係があり、実用化が可能である。

(2) 円形180°ベンド管の差圧による含泥率（ベンド管3点方式）と吐出含泥率の差は2～3%であり、また両含泥率の相関係数は細砂、中れきの場合同程度で約0.89となり、上記二方式に比べてやや精度が落ちる。これは円弧部の流れの遠心力、二次流れの影響が大きいためである。

(3) 単管方式より求めた差圧含泥率は、土粒子の沈降速度の影響が無視できない場合にも管内含泥率によく追従する。特に、垂直上昇流を利用する場合には、差圧含泥率と吐出含泥率の差は中れきの場合2%程度以内であり、その精度は高いといえる。

(4) 垂直上昇流と垂直下降流の差圧の和より求めた管内平均流速と吐出平均流速の関係は、本実験の範囲ではあまり精度が良くなかった。これは下降流がやや不安定なことによるものである。

* 機材部 流体輸送研究室

** 機材部 流体輸送研究室長

*** 前機械部 流体輸送研究室

8. On Practical Characteristics of Solid Concentration Measurement by Differential Pressure in Pipes

Kenji HAMADA*

Tokuji YAGI**

Masaru SAITO*

Akio KOREISHI***

Synopsis

A solid concentration is an important factor for supervising operating conditions of hydraulic dredgers including the cutter suction dredger, drag suction dredger and so on.

The instruments for measuring solid concentration used at present don't satisfy maintenances and handlings sufficiently.

Some model tests on measurements of solid concentration by differential pressures in vertical pipes and bend tube with slurries containing solid particles such as fine sand, coarse sand and pebble gravel respectively were carried out and discussed those characteristics to practical application.

Results are summarized as follows.

(1) In a case of fine sand or coarse sand, the delivered solid concentration and both measured solid concentrations which are obtained by differential pressures in U-pipe method (using up and down flow) and Single-pipe method (using up flow or down flow only) are strongly interrelated as the difference between those solid concentrations are about under 1%, and the correlation coefficient is about 0.99. Therefore both U-type method and Single-pipe method are expected as for practical applications.

(2) An accuracy of solid concentration obtained by Bend-tube method (using differential pressures at three points in an arc shaped bend tube) is unsatisfactory as the difference between the delivered solid concentration and the solid concentration by the above method ranges from 2 to 3% and the correlation coefficient is about 0.89 in both cases of fine sand and pebble gravel. The main reason of those matters depends on a centrifugal force and secondary flow in a pipe.

(3) Even though a case may not be ignored the effects of settling velocity of particles, the solid concentration measured by Single-pipe method represents exactly with the solid concentration in a pipe. Especially the accuracy for the use of the up flow pipe is better than of the down flow pipe.

(4) The relation between the delivered flow rate and the mean flow rate obtained by U-pipe method is not satisfactory in these experiments because of unsteady flow in down flow pipe.

* Member of the Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

** Chief of the Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

*** Ex-member of the Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	329
1. ま え が き	333
2. 差圧方式による管内含泥率，流速の測定原理	333
2.1 垂直上昇流と垂直下降流を利用する方法（U字管方式）	333
2.2 垂直上昇流，または垂直下降流を利用する方法（単管方式）	334
2.3 曲管における3点間の差圧を利用する方法（ベンド管3点方式）	334
3. 実験装置および供試土砂	335
3.1 実験装置	335
3.2 供試土砂	336
4. 実験概要	337
5. 実験結果および考察	337
5.1 送水時の管路摩擦損失	337
5.2 差圧による含泥率	338
5.3 土粒子沈降速度の差圧含泥率への影響	344
5.4 差圧による管内平均流速	347
6. ま と め	351
7. あ と が き	352
参考文献	352
記号一覧表	352
付録	353

1. まえがき

ポンプ浚渫船、ドラグサクシオン浚渫船など水力輸送を行なう作業船には、浚渫関係の機器が各種装備され、時々刻々変化する作業条件に能率的に対応できるようになっている。これらの計器のうち、含泥率計は特に重要なものであり、効率的な運転状態を保つための直接的な監視装置としての役目を有する。

これまでに実用化されている含泥率計としては、フロー式含泥率計、放射線式含泥率計があるが、前者は海上管に設置するため、常用計器としては保守、管理に難点があり、後者は法規上浚渫船への搭載が禁じられている。したがって、これらに換わるべき、保守、管理が容易で、かつ精度の高い含泥率計の開発が望まれ、種々のものが検討されている。これらの一つに垂直管流れの差圧を利用する方法があるが、これに関する文献は少く参考文献(1)～(3)等)、その精度や適用土質の範囲等不明な部分が多く、一般的に実用化されるには及んでいない。また、差圧を利用すれば、原理的には管内流速を求めることもできる。すなわち、差圧を計測することにより含泥率と流速を同時に求めることも可能である。しかしながら、これら差圧方式は、いずれも現実面に応用するには資料不足であり、実験的な裏付けも十分とは言い難い。

そこで、この差圧方式による含泥率、流速測定の実用性を調べるために実験を行ない、差圧測定区間、土砂の粒径、沈降速度の影響について検討した。本報告は、これら一連の実験結果について述べたものであり、差圧式含泥率計の実用化に向けての基礎資料とするものである。

2. 差圧方式による管内含泥率、流速の測定原理

2.1 垂直上昇流と垂直下降流を利用する方法 (U字管方式)

垂直管内の固液二相流においては、固体粒子は管内壁の境界層付近を通らずに管軸付近に集中するように流れるため、固体粒子群と管内壁との摩擦によって生ずる抵抗は実際上無視できる程度である^(4),5)。したがって、図-1のようなU字管内のスラリー流れに対する損失水頭は、次のように表わすことができる。下降流 AB 間の損失水頭 h_d は、

$$h_d = \lambda \frac{V^2}{2g} \frac{L}{D} - (\rho_{md} - 1)L \quad (1)$$

であり、上昇流 CD 間の損失水頭 h_u は、

$$h_u = \lambda \frac{V^2}{2g} \frac{L}{D} + (\rho_{mu} - 1)L \quad (2)$$

となる。ただし

λ : 抵抗係数, V : 管内平均流速, g : 重力加速度
 D : 管内径, ρ_{md} : 下降管内混合比重
 ρ_{mu} : 上昇管内混合比重, L : 差圧計測区間長
 であり、(1), (2)式における右辺第1項は、流体と管路壁面との摩擦損失水頭を表わし、第2項は、土粒子増加による付加損失水頭を表わす。

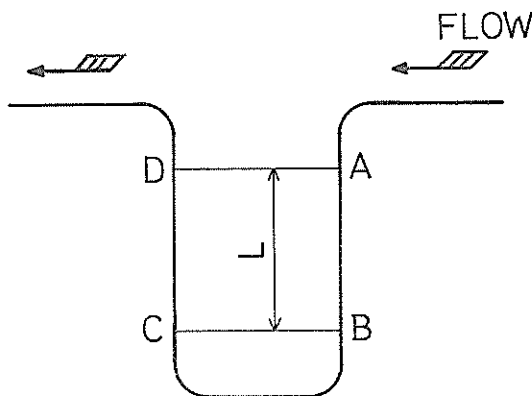


図-1 U字管流れ

ここで、 $\lambda \frac{V^2}{2gD} = i_w \dots (3)$ とおくと、(1), (2)式は次のように書ける

$$h_d = \{i_w - (\rho_{md} - 1)\} L \quad (1')$$

$$h_u = \{i_w + (\rho_{mu} - 1)\} L \quad (2')$$

厳密には、土粒子の沈降速度の影響により、 $\rho_{mu} \neq \rho_{md}$ であるが、沈降速度が管内流速に比べて十分小さい場合には、沈降速度の影響は無視することができ、

$$\rho_{md} = \rho_{mu} = \rho_m \quad (4)$$

と考えて差し支えない。また、固液混合体の混合比重 ρ_m と真容積含泥率 C_v の間には、土粒子の真比重を ρ_s 、水の真比重を $\rho_w = 1$ とすると次の関係がある

$$C_v = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} = \frac{\rho_m - 1}{\rho_s - 1} \quad (5)$$

したがって、(1), (2), (4), (5)式 (または(1)', (2)', (4), (5), 式) より

$$C_v = \frac{h_u - h_d}{2L(\rho_s - 1)} \quad (6)$$

が得られる。すなわち、上昇管流と下降管流の差圧の差より、管内の真容積含泥率が求められる (U字管方式)。実際の浚渫においては、真容積含泥率よりも見掛け容積含泥率の方がよく用いられるが、本報告においては、管内含泥率の絶対的表示の観点から、真容積含泥率を用いるものとする。なお、両含泥率の定義および対応関係については付録Aに記してあるので参照されたい。

また、(1)', (2)', (3)式より

$$i_w = \lambda \frac{V^2}{2gD} = \frac{h_u + h_d}{2L} \quad (7)$$

が得られ、これより

$$V = \sqrt{\frac{gD(h_u + h_d)}{\lambda L}} \quad (8)$$

となる。すなわち、上昇管流と下降管流の差圧の和より管内平均流速を求めることができる。

(3)式における抵抗係数は、一般には定数ではなく、レイノルズ数によって変化する。したがって、管径、流体の動粘性係数が一定の場合には、単位長さ当たりの管路摩擦損失水頭は管内平均流速 V の関数として表わされる、よってこの場合、 $i_w = f(V)$ (f は関数を表わす) と表示して、 $V = f^{-1}(i_w)$ と(7)式より V を求めるのが実際的である。 $f(V)$ の形としては、ある狭い V の範囲に対しては比較的簡単な式

$$f(V) = a \cdot V^b \quad (a, b \text{ は実験定数}) \quad (9)$$

で実測値とよく一致し、この表示式は現実においてもよく使用されている。したがって(7), (9)式より

$$V = \left(\frac{h_u + h_d}{2aL} \right)^{1/b} \quad (10)$$

が得られる。

2.2 垂直上昇流、または垂直下降流を利用する方法 (単管方式)

前述のように、 i_w は管路と流体の種類が決定されれば、平均流速 V の関数として表わされるから、平均流速 V と差圧の測定により、(1), (5)式から

$$C_v = \frac{f(V) - h_d/L}{\rho_s - 1} \quad (11)$$

が下降管流に対して得られ、(2)', (5)式より

$$C_v = \frac{h_u/L - f(V)}{\rho_s - 1} \quad (12)$$

が上昇管流に対して得られる。

このように、単管方式においては、平均流速を計測する手段を設け、事前に $i_w = f(V)$ の具体的表示を調べておく必要がある。しかしながら、この方式では差圧計測を行なう垂直管は2.1のようにU字管部を別途設ける必要は無く、配管における適切な垂直部を利用することができる。ポンプ浚渫船、ドラグサクソン浚渫船は、通常船内管路に垂直部があるから、本方式を利用するのは容易であろう。

2.3 曲管における3点間の差圧を利用する方法 (ベン ド管3点方式)

以上の垂直管の差圧方式の他に、曲管部の差圧を利用する方式も考えられている^{1), 6)}。しかしながら、この方

式の理論的、並びに実験的考察は、文献^{1), 6)}ではなされてい
ない。そこでここでは、180°ベン
ド管による3点間の差圧方式
について検討してみる。

曲管について考える前に、水平面と θ の角度をなす直管の損失水頭について考えてみる。管路が水平に置かれている場合の単位長さ当たりの損失水頭を

$$i'_1 = i_w + \Delta i_h \quad (13)$$

と表わすと (ただし、 Δi_h : 水平管の土砂混入による附加損失水頭)、管路が水平面と θ の角度をなす時(3)式は

$$i''_1 = i_w + \Delta i_h \cos \theta \quad (13)'$$

と表わせる。さらに実際には、これに管内含泥率 C_v による鉛直方向の増加分、 $C_v(\rho_s - 1) \sin \theta$ が加わるため、結局、水平面と θ の角度をなす直管内を管内含泥率 C_v でスラリーが流れる場合の単位長さ当たりの損失水頭 i_1 は

$$i_1 = i_w + \Delta i_h \cos \theta + C_v(\rho_s - 1) \sin \theta \quad (14)$$

と表わされる⁷⁾。

そこで次に、図-2のような、鉛直面内で曲率半径 R を有する180°ベン
ド管流れについて考える。図においてA
B間
は上昇流、BC間
は下降流である。

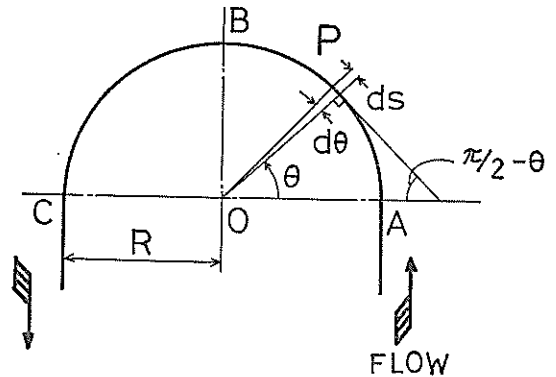


図-2 180°ベン
ド管流れ

今、 $\angle AOP = \theta$ となる点Pにおける微小長さ ds 部分について考える。 ds 部分が水平面となす角は $\pi/2 - \theta$ となるから、この間の損失水頭 dh は(14)式を用いて

$$dh = \{i_w + \Delta i_h \cos(\pi/2 - \theta) + C_v(\rho_s - 1) \sin(\pi/2 - \theta)\} ds = R \{i_w + \Delta i_h \sin \theta + C_v(\rho_s - 1) \cos \theta\} d\theta \quad (15)$$

となる。したがって、AB間における損失水頭 h_{AB} は、AB間の管内含泥率を C_{vw} とすると

$$h_{AB} = \int_A^B dh = R \int_0^{\pi/2} \{i_w + \Delta i_h \sin \theta + C_{vw}(\rho_s - 1) \cos \theta\} d\theta \quad (16)$$

となる。ここで、 Δi_h と C_{vw} が θ に無関係と仮定すると(16)の積分は容易であり

$$h_{AB} = R \left\{ \frac{\pi i_w}{2} + \Delta i_h + C_{vd} (\rho_s - 1) \right\} \quad (17)$$

討する。

が得られる。下降流部 BC 間の損失水頭 h_{BC} も同様に

$$h_{BC} = R \int_{\pi/2}^{\pi} \{ i_w + \Delta i_h \sin \theta + C_{vd} (\rho_s - 1) \cos \theta \} d\theta$$

$$= R \left\{ \frac{\pi i_w}{2} + \Delta i_h - C_{vd} (\rho_s - 1) \right\} \quad (18)$$

となる (ただし, C_{vd} : BC 間の管内含泥率)。よって 2.1 と同様に $C_{vd} = C_{vw} = C_v$ とすれば (17), (18) 式より

$$C_v = \frac{h_{AB} - h_{BC}}{2R(\rho_s - 1)} \quad (19)$$

が得られ, AB, BC 間の差圧を計測することによって含泥率を求めることができる。また (19) 式は, 前記 U 字管方式による (6) 式の L を R で置換した形式となっていることがわかる。

差圧による管内含泥率測定に対しては, 基本的に以上の 3 方式が考えられるが, 土粒子の垂直管内での粒群干渉沈降速度の影響が無視できない場合には解析は相当面倒である。粒群干渉沈降速度の影響については 5.3 で検

3. 実験装置および供試土砂

3.1 実験装置

実験装置を図-3に示す。本実験装置は循環式であり, 図中の構成要素は①～⑤次のとおりである。

① 混合槽

容量: 1 m³

攪拌翼: 船用プロペラ型, 羽根径 200mm × 3 枚

傾斜羽根ふく流タービン型, 羽根径 400mm × 3 枚

電動機出力 3.7kW (無段変速機付)

② サンドポンプ

仕様: 口径 80mm, 揚程 12m, 吐出量 0.8m³/min

電動機出力 7.5kW (500~1450rpm)

③ 管路

構成: SGP3B

④ 差圧測定用管路構

構成: 内径 80mm 透明アクリル管

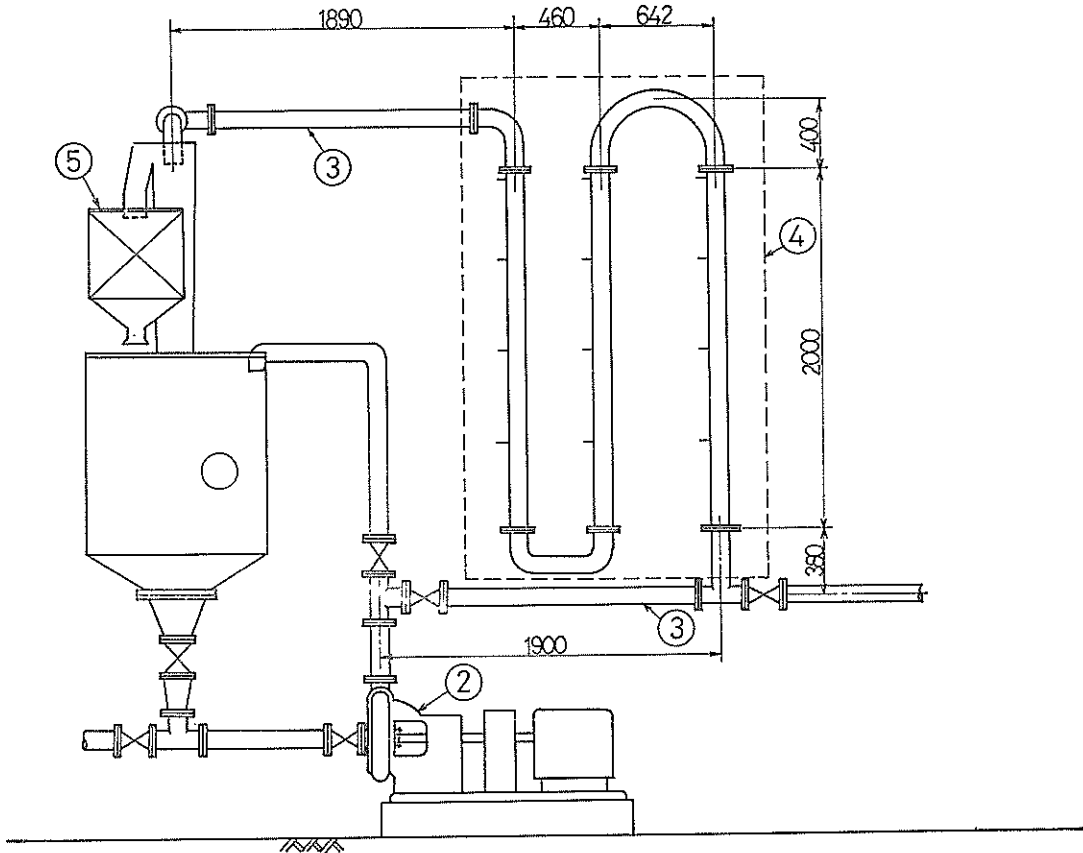


図-3 実験装置

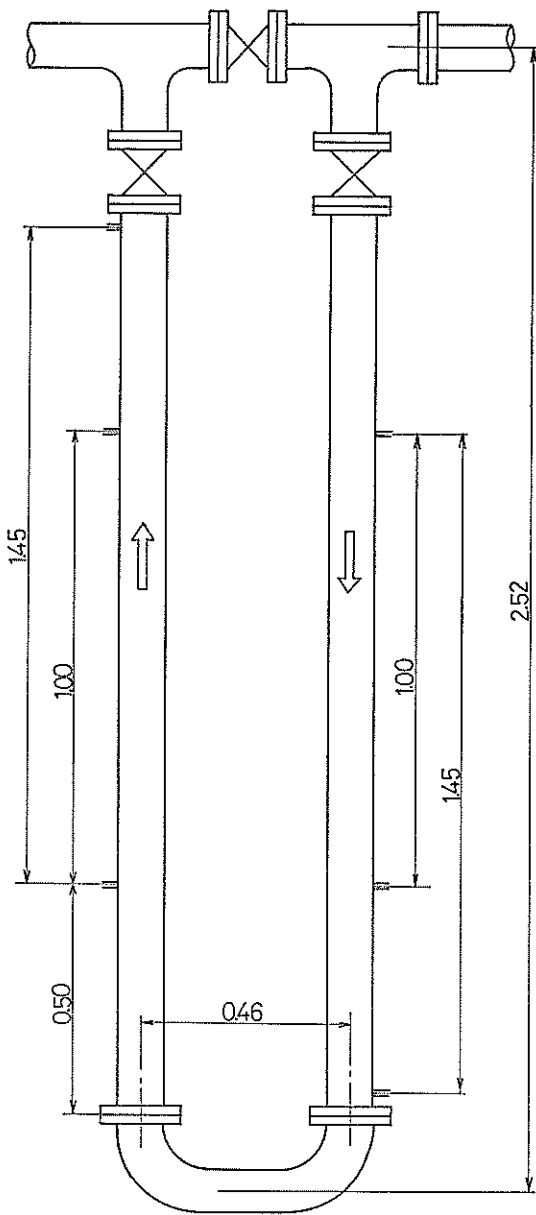


図-4 (1) 差圧測定用管路 I (単位 m)

なお、本実験においては差圧測定用管路として、差圧測定用管路 I および差圧測定用管路 II の 2 種類を使用した。これらを図-4(1)、図-4(2)に示す。

差圧は、内径 4 mm の銅管を測定用管路に取り付け、ビニールチューブで沈殿びんを通して差圧計（ひずみゲージ式、容量 0.2kg/cm²）に導き計測するようになっている。

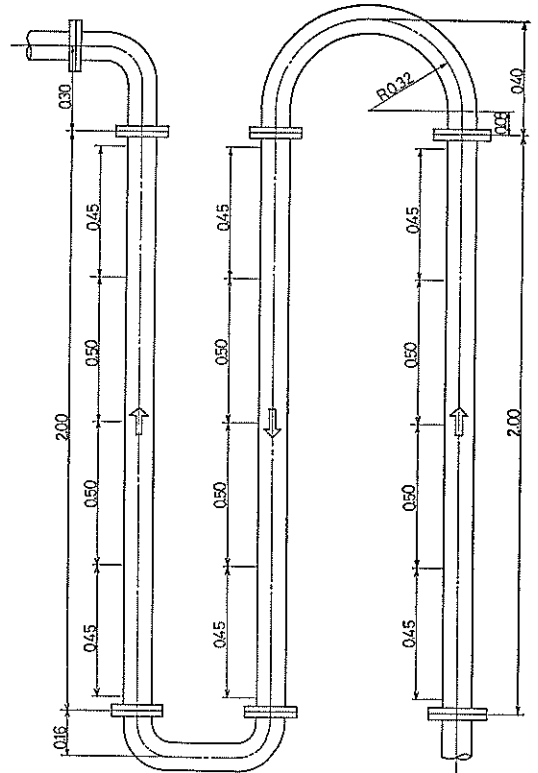


図-4 (2) 差圧測定用管路 II (単位 m)

また、差圧計測区間長は各管路について $L=1.0\text{m}$ と 1.5m の 2 種類である。一方、差圧測定用管路 II における 180° バンド管の曲率半径は $R=0.321\text{m}$ である。

3.2 供試土砂

本実験に使用した土砂は、細砂、粗砂および中れきの 3 種類である（これらの呼称は、日本統一土質分類による）。これらの土砂の物性および粒径加積曲線を図-5に示す。なお、中れきの土粒子形状は多種多様で、球形に近いものは非常に少く扁平なものが多かった。

各供試土砂は実験中繰り返し使用したので、土粒子の粉砕、流出の影響を調べるため、実験後にも粒度分布を測定した。この結果は同図に併記してある。細砂、粗砂については混合槽内からのオーバーフローにより微粒子が流出したため、実験後は実試前に比べて相対的にやや粗くなっている。また中れきについては、混合槽内攪拌翼とサンドポンプによって破砕され、幾分細くなっている。しかしながら、これら実験前後のわずかな差は、いずれも本実験の土質条件を左右するほどのものではないといっていよう。

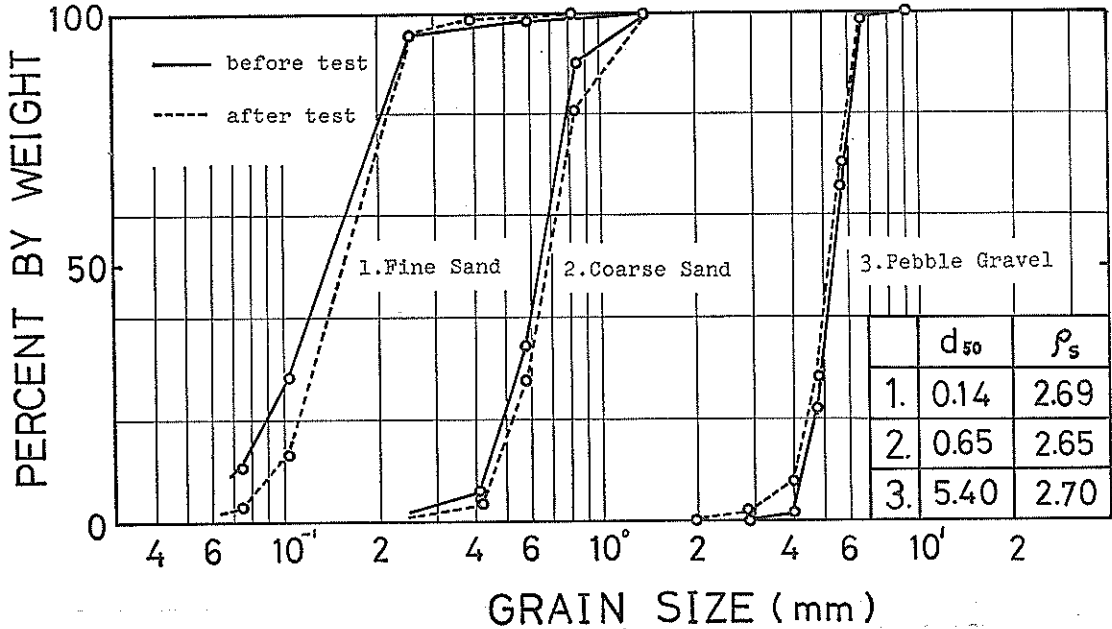


図-5 供試土砂の粒径加積曲線

4. 実験概要

実験は第一、第二段階に分けて行ない、2. の理論の精度、適用性、並びに土粒子の大きさの影響について調べた。

第一段階では、差圧測定用管路Ⅰを用いて、粗砂に対して実験を行ない、その結果から差圧方式の実用性がほぼ確かめられた。そこで第二段階では、バンド管3点方式についても同時に測定できるように、測定部を差圧測定用管路Ⅱに改造し、細砂、中れきについて実験を行なった。

実験は次の要領で行なった。まず実験管路に清水を循環させておき、混合槽内に一定の供試土砂を供給した。差圧の変動状態および管路内の流れの観察により、定常流れとなった時点で差圧を計測し、続いて計量槽により吐出含泥率と平均流速を計測した。以上の操作を各供試土砂毎に、種々の含泥率、流速について行なった。なお、サンドポンプにかかる押し込み圧を一定に保つために、混合槽内に水を補給し、余剰水はオーバーフローさせて混合槽内の水位を一定に保った。

本実験における管内平均流速は、ポンプ回転数によって調節し、1.7m/s~3.3m/sの範囲であった。また設定含泥率は、現実の浚渫を考慮し、真容積含泥率で0~25%の範囲とした。

5. 実験結果および考察

5.1 送水時の管路摩擦損失

一様断面積の真直ぐな円管内を流体が流れる場合、長さ L の区間での損失水頭 h は、平均流速を V 、管径を D 、抵抗係数を λ とすると

$$h = \lambda \frac{V^2}{2g} \frac{L}{D} \quad (3)'$$

と表わされ、これはワイスバッハ・ダーシーの公式として知られている。(3) 式における抵抗係数 λ は定数ではなく、レイノルズ数の関数として表現される。したがって、管径、流体の種類が決定している場合には、損失水頭は平均流速のみの関数として表わされ、より実用的な表現となる。さらに実際には、乱流の場合、管壁の粗さも影響を及ぼすため⁹⁾、損失水頭と平均流速の関係は各管路毎に求める必要がある。

本実験に使用した差圧測定用管路について、損失水頭と平均流速の関係を調べた結果、以下の実験式が得られた。まず差圧測定用管路Ⅰに対しては、その上昇流部、下降流部とも

$$i_w = 0.0153 V^{1.72} \quad (20)$$

で表示され、これを図-6(1)に示す。また差圧測定用管路Ⅱに対しては各構成管毎にわずかな差があり、上昇流部、下降流部、上昇流部の順に

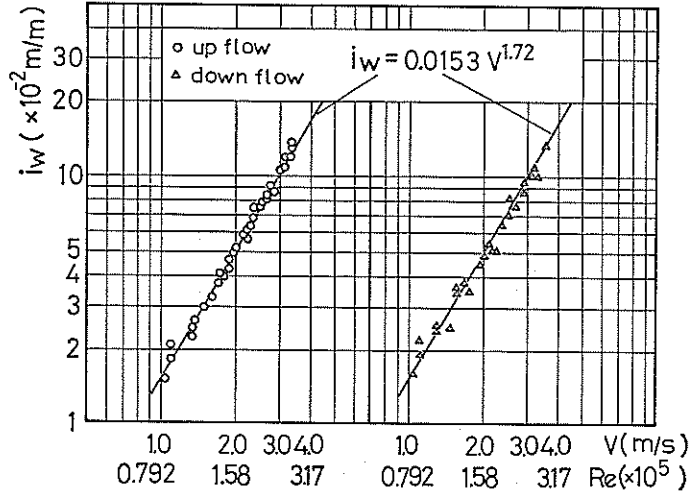


図-6 (1) 差圧測定用管路 I の清水時摩擦損失水頭

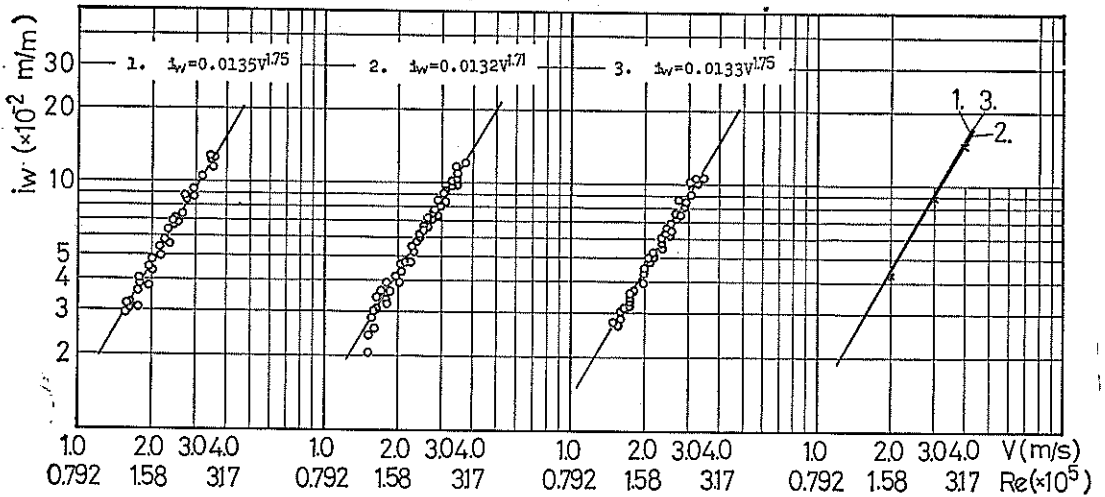


図-6 (2) 差圧測定用管路 II の清水時摩擦損失水頭

$$i_w = 0.0135 V^{1.75} \quad (21)$$

$$i_w = 0.0132 V^{1.71} \quad (22)$$

$$i_w = 0.0133 V^{1.75} \quad (23)$$

と表示された。これらを図-6(2) に示す。図中の最右部は(21)~(23) 式をまとめたものであり、(21)~(23) 式は実際上ほとんど等しい。また同部の3個の×印は、Nikuradse の公式を適用した場合の平均流速と損失水頭の関係を表わし、本実験の測定結果はこれらとよく一致している。したがって以後の解析において、平均流速から管路摩擦による損失水頭を求める場合には、(21)~(23) 式を用

いるものとする。

5.2 垂直管および曲管の差圧による含泥率

垂直管部と曲管部の差圧より求めた含泥率の正当性を評価するには、信頼できる別の方法で求めた含泥率が必要となる。ここでは、管端からの吐出含泥率 C_w を実測し、これと差圧より得られた含泥率との関係を調べ、差圧方式の実用性を検討した。評価は主として差圧による含泥率 (C_p で総称する) 吐出含泥率に対してプロットしたグラフを用い、また両含泥率の相関関係の数量的評価として、統計学的によく使用される相関係数 C 、(相

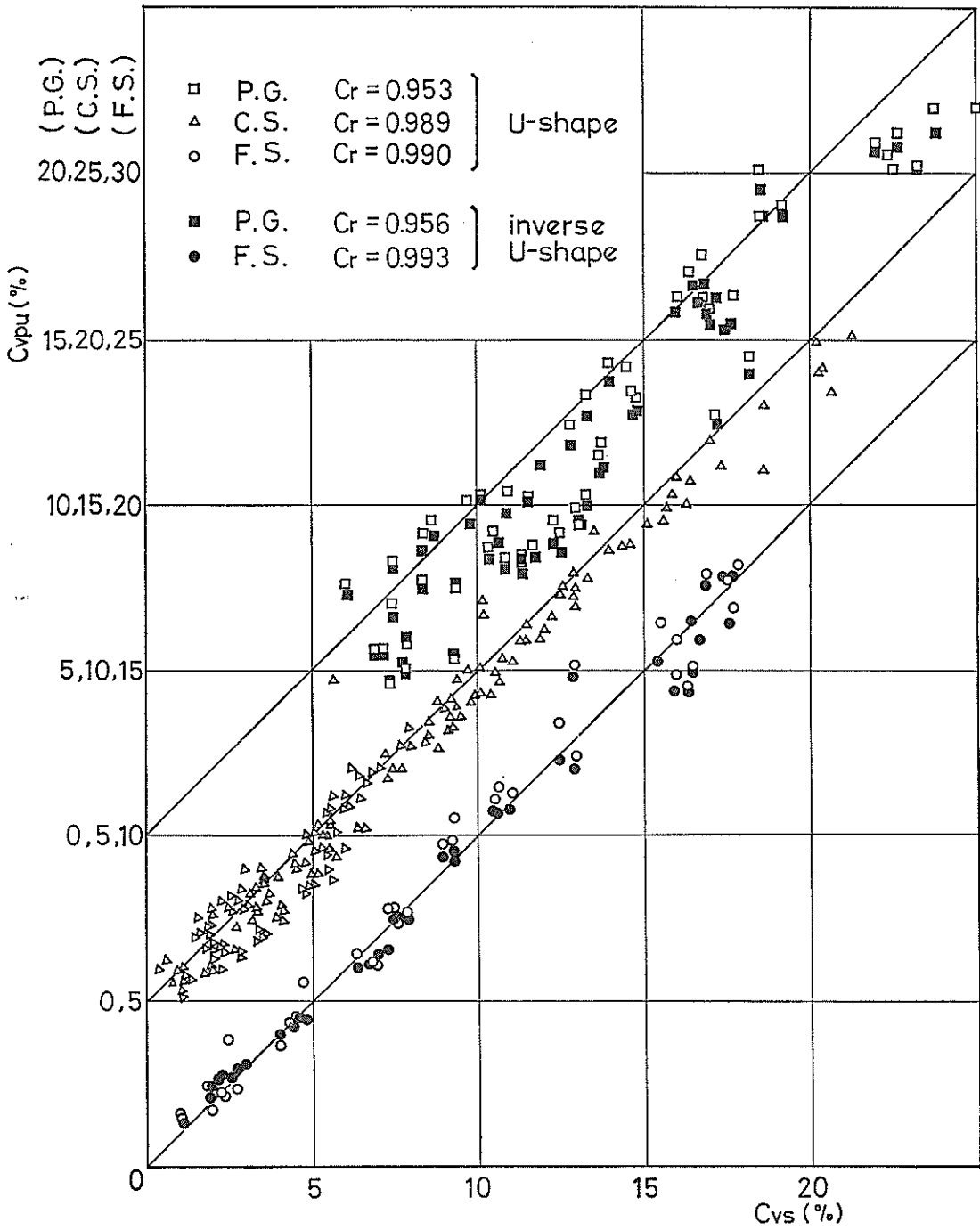


図-7 U字管方式による差圧含泥率と吐出含泥率の関係 (L=1.45m)

関係数については付録B参照)も併用するものとする。

(1) U字管方式による差圧含泥率

垂直上昇流と垂直下降流の差圧計測より得られる含泥率、すなわち(6)式より求まる含泥率を C_{vpu} 表示し、これと吐出含泥率 C_w の関係を細砂、粗砂および中れきについて図-7に示す。図中、F.S.は細砂、C.S.は粗砂、P.G.は中れきを表わし、以後の図においても同様である。これら各場合の差圧計測区間長はいずれも $L=1.45m$ である。

図より細砂、粗砂の場合には、 C_{vpu} と C_w の関係はほぼ同様の傾向にあり、両者の差は概して含泥率にして1%以下である。一方、中れきに対しては45度の直線に対するずれ、ばらつきが大きい、これは中れきの粒径干渉沈降速度の影響が無視できないためである。 C_{vpu} と C_w の関係におけるこれらの傾向は相関係数 C_r にも現れている。 C_r は細砂、粗砂に対して約0.99であり、 C_{vpu} と C_w の間に強い相関関係があるが、中れきに対しては約0.95であり、相関関係は細砂、粗砂の場合に比べて弱くなる。

なお、細砂および中れきに対しては、上昇管路→下降管路→上昇管路より構成されている差圧測定用管路Ⅱを使用したため、上昇流と下降流の組み合わせは2通り考えられる。すなわち、U字管流れと逆U字管流れである。上記の論議は差圧測定用管路のⅡ前半部、すなわち逆U字管流れに対する結果について述べたものである。もう一つの組み合わせ、すなわちU字管流れに対する結果も図-7に黒塗つぶし点で併記してあるが、その傾向は逆U字管方式の場合と変わらない。したがってU字管方式と逆U字管方式のどちらを用いても結果は同じであると言える。

(2) 単管方式による差圧含泥率

垂直な単管における差圧を利用して含泥率を求める場合には、下降管流に対しては(Ⅲ)式を、上昇管流に対しては(Ⅱ)式を適用することになる。(Ⅲ)、(Ⅱ)式における $i_w=f(V)$ は事前に求めておく必要があり、本実験に使用した各差圧測定用管路について6.1はで記した様に(20)~(23)式で表わされる。管内平均流速 V は、実験等においては電磁流量計から求めるのであろうが、ここでは計量槽により直接得られた値を使用した。

単管方式のうち、垂直上昇流の差圧(差圧計測区間長 $L=1.45m$)から得られた含泥率 C_{vpu} と C_w の関係を3種の供試土砂に対して図-8に示す。図より細砂、粗砂に対しては C_{vpu} と C_w の差は含泥率にして1~2%であり、また C_r も約0.99であり、両含泥率の相関関係は強いことがわかる。細砂、粗砂に対する差圧含泥率と吐出

含泥率の関係は前記(Ⅰ)で述べたU字管方式と類似している。これに対して中れきの場合には、総じて $C_{vpu} > C_w$ であり、両者の差は最大で含泥率にして4~5%におよぶ。また両含泥率の相関係数も約0.95であり、細砂、粗砂の場合に比べて低下している。これは土粒子の管内粒径干渉沈降速度の影響を無視できないためである。

次に下降流の差圧を利用する単管方式の含泥率 C_{vpd} と C_w の関係をみてみよう。 C_{vpd} と C_w の関係を細砂、粗砂および中れきに対して図-9に示す。両含泥率間の相関係数 C_r は、細砂、粗砂に対して約0.99、中れきに対して約0.95であった。図における傾向は、垂直上昇流の場合とは逆に、総じて $C_{vpd} < C_w$ である。しかしながら、細砂、粗砂に対する両者の差は含泥率にして1~2%以下であり、これらの土質に対しては実用可能と判断される。

これに対して中れきの場合には、両含泥率の差は大きく最大で5~6%におよぶ、これは垂直上昇流の場合と同様に、管内粒径干渉沈降速度の影響が無視できないことにも起因する。

ところで以上の事項、流れの観察等から総合的に判断すれば、本実験においては、下降流は上昇に比べてその流れが不安定、非定常になる傾向が強いと考えられる。これに対する要因の一つに粒径の干渉沈降速度の影響が考えられる。本実験における垂直管部に流入する前の固液混合体流れにおいては、流体の平均流速は土粒子のそれよりも大きいと考えられる。一方、定常な垂直上昇流においては流体流速の方が土粒子流速よりも、土粒子の沈降速度分だけ大きい、定常な垂直下降流においては、両流速の関係は逆になる。したがって垂直下降流においては、土粒子は定常状態に落ちつくまでに重力によって加速され、流体流速に追いつき、さらに沈降速度分だけ追い越さなければならない。この粒子の速度変化は、土粒子の沈降速度が大きくなるほど大きくなり、したがって定常状態に落ちつくまでの助走区間も長くなる。ところで土粒子が鉛直下向きの加速度を有している場合には、土粒子増加分の差圧におよぼす影響は $C_w \cdot (\rho_s - 1)$ よりも小さくなるはずである。しかしながら計算上は、 $C_w \cdot (\rho_s - 1)$ のままに使用するために土粒子加速度の影響は C_w におよぶことになり、したがって C_w の過小評価につながることになる。しかしながら垂直上昇流に対しては、土粒子は垂直下降流の場合ほど速度変化を受けずに定常状態に落ち着くものと考えられる。

また、流体と土粒子のすべりに起因する二次流れの影響も、下降流の場合の方が上昇流の場合よりも大きいであろう。

以上を考慮すれば、単管方式で含泥率を求める場合に

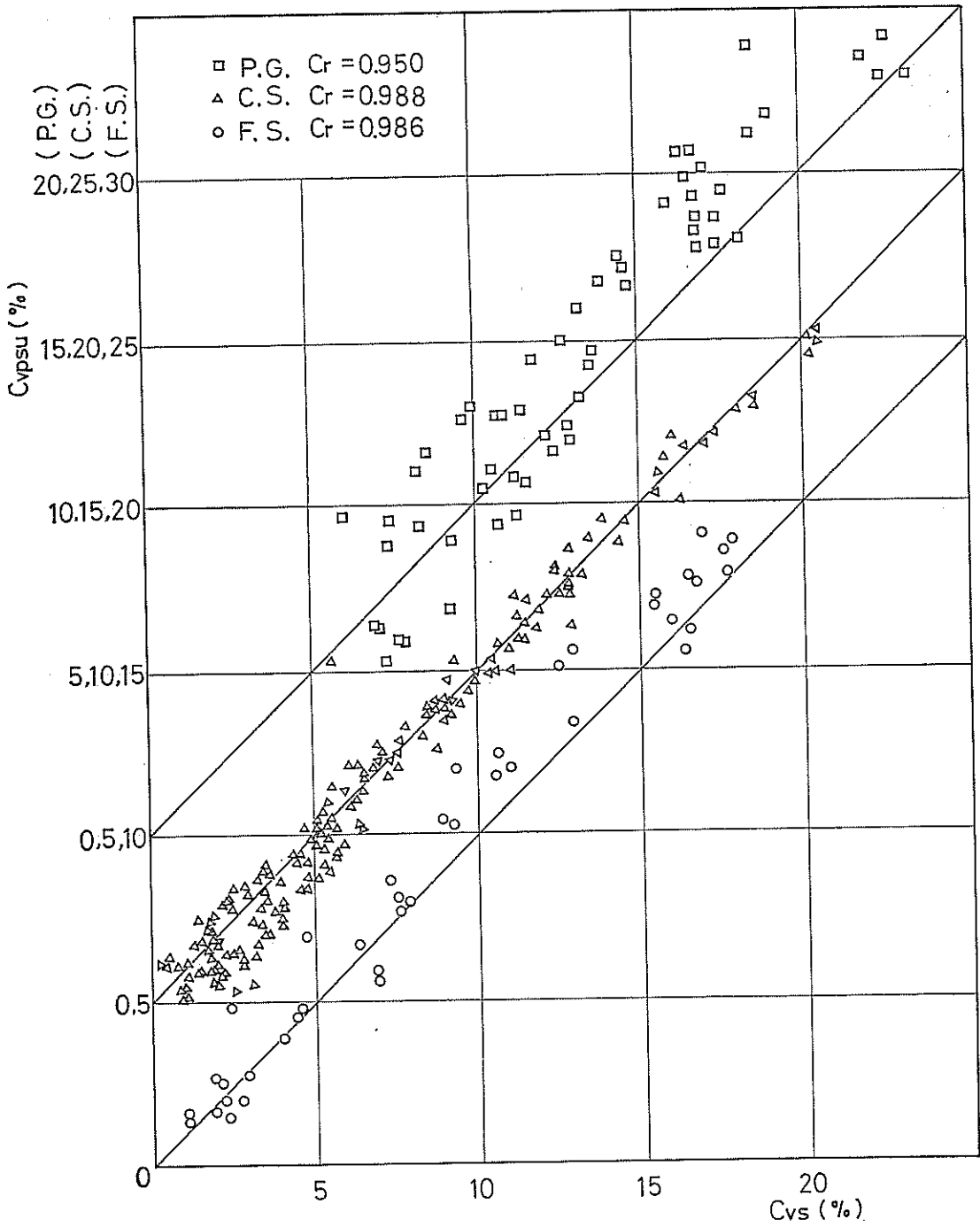


図-8 単管方式上昇流による差圧含泥率と吐出含泥率の関係 (L=1.45m)

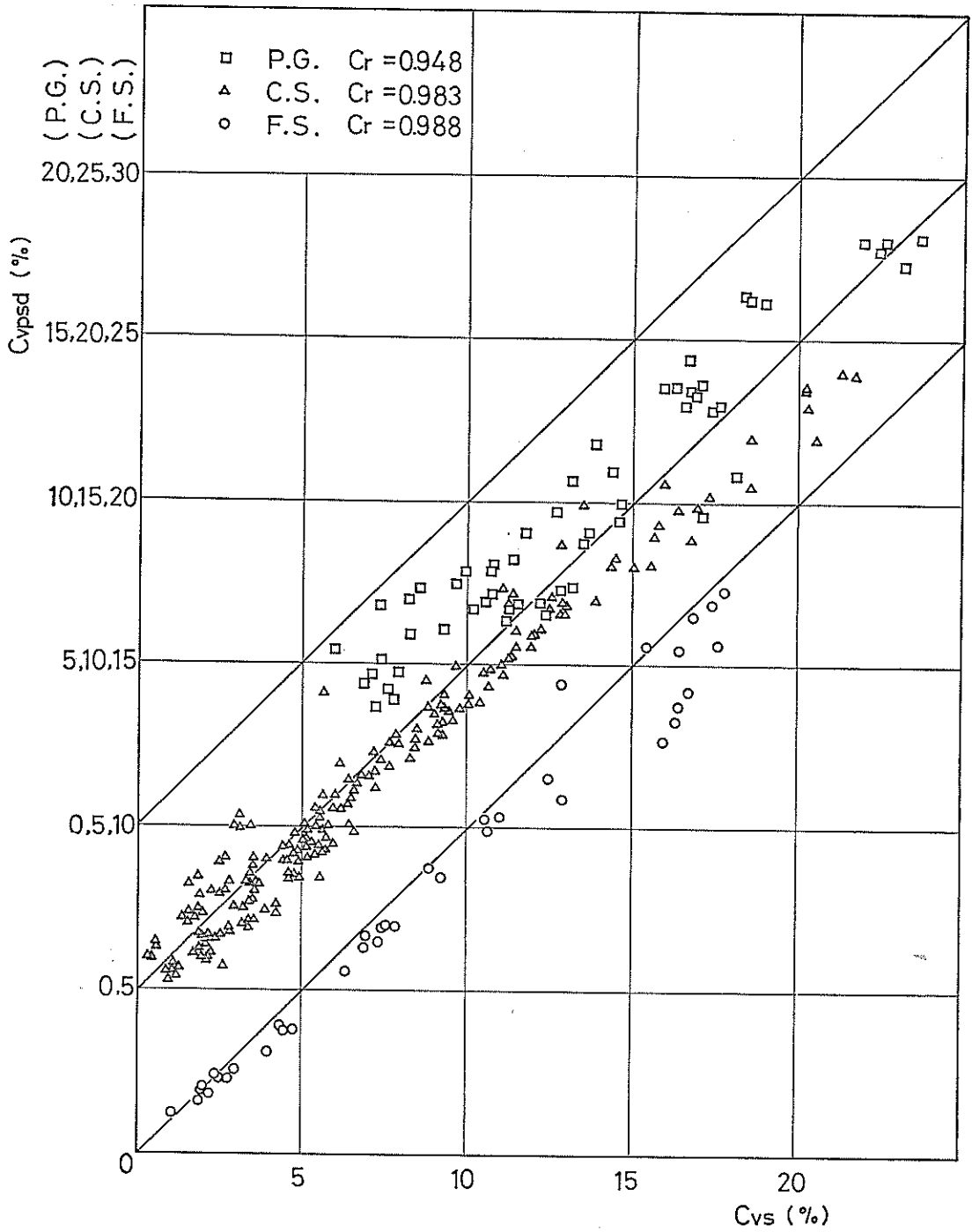


図-9 単管方式下降流による差圧含泥率と吐出含泥率の関係 ($L=1.45m$)

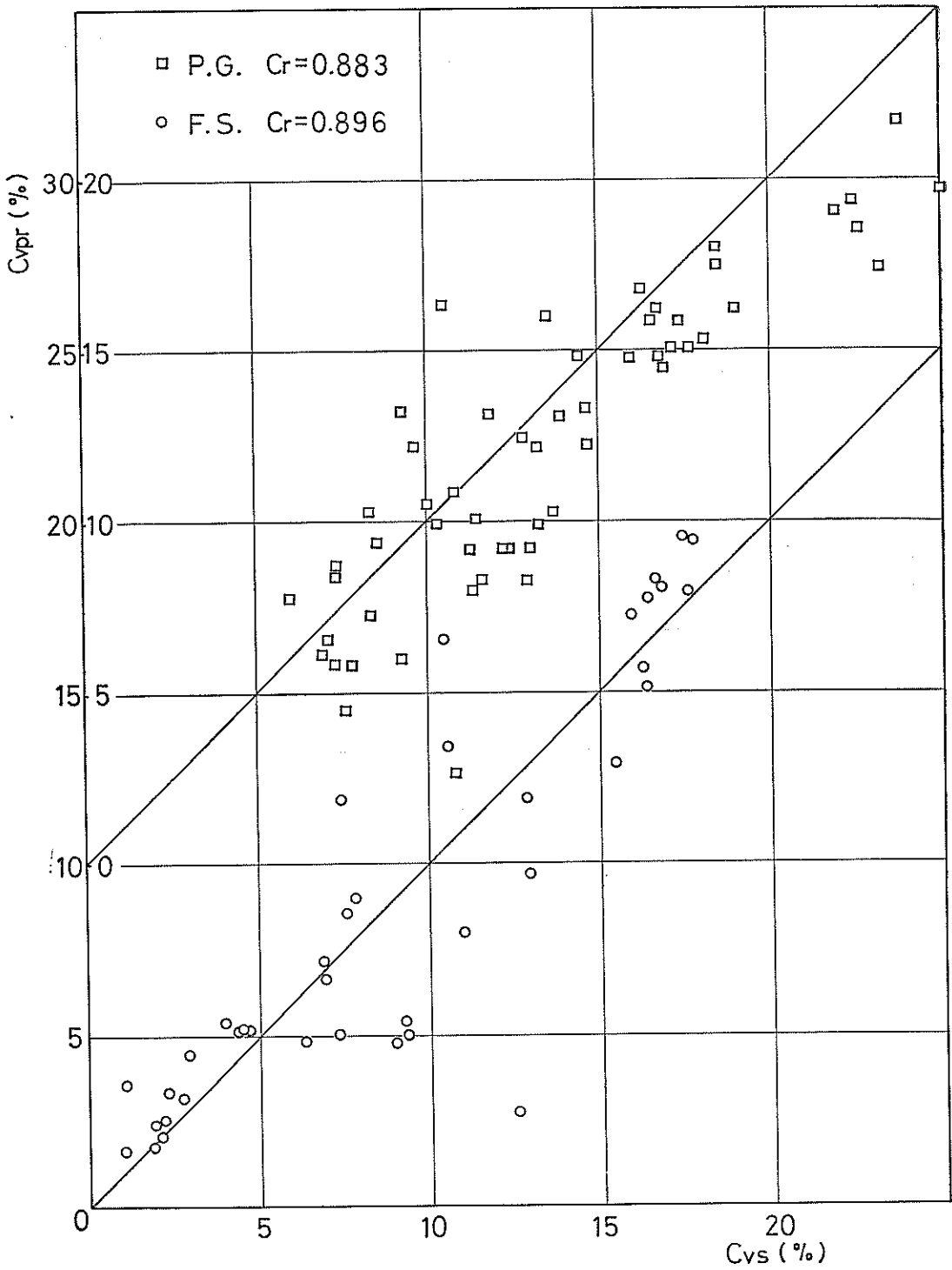


図-10 ベンド管3点方式による差圧含泥率と吐出含泥率の関係

は、流れが差圧測定区間に入るまでの管路状態、すなわち混相流の流れの状態にも十分配慮する必要があることがわかる。一般的には、垂直上昇流を用いる単管方式の方がより実用性が高いといえよう。

(3) ベンド管3点方式による差圧含泥率

差圧測定用管路Ⅱにおける円弧部の3点で計測した差圧を用いて含泥率を求める場合には、前記(9)式を適用する。(9)式による含泥率を C_{sp} とし、これと C_m の関係を細砂および中れきに対して図-10に示す。両含泥率間の相関係数は、細砂に対して0.896、中れきに対して0.883であった。図および相関係数からわかるように、本方式による差圧含泥率と吐出含泥率の相関関係は、前記の2方式に比べて弱く、しかも細砂、中れき間に顕著な差異はない。したがって、粗砂に対しても同様な結果が期待される。

本方式による差圧含泥率と吐出含泥率間の相関関係が

弱く、しかも土粒子粒径の影響をほとんど受けないのは以下の理由によるものと考えられる。すなわち、ベンド管に流入した直後の流れには慣性があること、流速分布により遠心力が異なることによって誘発される二次流れ、土砂に作用する遠心力によって土粒子と管内壁による摩擦が無視できないこと等により、(9)式を導く際の仮定、すなわち、 $C_m=C_{sp}$ 、 $A_i=1$ が一定が成立しなくなることによるものと考えられる。したがってベンド管3点方式は、概略的な含泥率のは握に対しては適用可能と考えられるが、詳細な含泥率の測定、評価に用いるのには不十分と判断される。

(4) 3方式の比較

以上3方式の実験結果について、差圧含泥率と吐出含泥率の差および両者の相関関係を示す一指標である相関係数を一覧表にすると表-1のようになる。

表-1および図-7~10より、U字管方式および単管方式

表-1 3方式の比較

供試土砂 項目 方式	細砂 ($d_{50}=0.14$)		粗砂 ($d_{50}=0.65$)		中れき ($d_{50}=5.40$)	
	ΔC_{sp}	C_r	ΔC_{sp}	C_r	ΔC_{sp}	C_r
U字管方式	$\pm < 1\%$	0.990	$\pm < 1\%$	0.989	$+ < 1\%$ $- < 3\%$	0.953
単管方式 (上昇流)	$\pm < 1.5\%$	0.986	$\pm < 1\%$	0.988	$+ < 4\%$ $- < 1\%$	0.950
単管方式 (下降流)	$\pm < 1\%$	0.988	$\pm < 1.5\%$	0.983	$< -5\% \sim$ 6%	0.948
ベンド管3点 方式	$\pm 2.5\%$	0.896	—	—	$\pm < 3\%$	0.883

(ただし、 ΔC_{sp} : 45度線に対するばらつき)

については、前記2.で述べた原理式で細砂、粗砂に対しては実用可能である。またベンド管3点方式は、前記2方式に比べてやや精度は落ちるが、大まかな含泥率の評価に対しては適用であろう。

なお、差圧測定区間長 L は実用化に際しては問題となる。以上までの論議においては、ベンド管3点方式を除けばすべて $L=1.45m$ であった。本実験においては、 $L=1.0m$ とした場合についても計測を行なった。一例として、U字管方式で $L=1.0m$ の場合の差圧含泥率と吐出含泥率の関係を細砂の場合について図-11に示す。この場合の相関係数は、 $C_r=0.987$ であり、図の傾向も $L=1.45m$ の場合とほとんど同じであることがわかる。以上の結果も含めて、差圧計測区間長は原理的には制限は無いが、実際には計測器の精度等の影響から、その下限は制約を受けるであろう。

5.3 土粒子の沈降速度の影響

以上までの論議により、垂直管の差圧による含泥率と吐出含泥率の差は、細砂、粗砂に対しては小さく実用上は差し支えないと考えられよう。しかしながら中れきの場合両含泥率の差は概して大きく、かつ相関の度合いも細砂、粗砂の場合に比べて弱い。これは主として土砂粒径の違いによる沈降速度の影響によるものである。

土粒子の沈降速度の影響が無視できない場合には、垂直上昇流部と下降流部の管内含泥率は異なる。すなわち、定常流れにおける土粒子は、上昇流では流体流速よりも沈降速度分だけ遅れて流れ、逆に下降流では沈降速度分だけ先行する。その結果、上昇流の局所的含泥率は下降流のそれよりも大きくなる。したがってこのような場合には、管内含泥率と吐出含泥率は必ずしも一致しないが、浚渫システムのオペレーションの観点に立てば、管内含

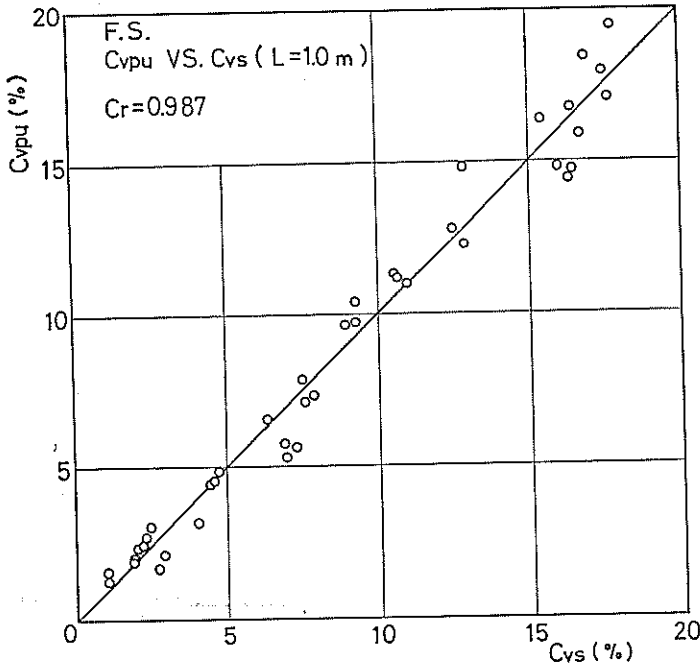


図-11 U字管方式による差圧含泥率と吐出含泥率の関係 (L=1.0m)

泥率をは握ることが重要である。一般的に含泥率計は、まさにこの管内含泥率を計測しているわけであるが、土粒子と流体のすべりを無視できる場合には、管内含泥率と吐出含泥率を同等に評価してよい。

さてここでは、土粒子の沈降速度が無視できない場合の管内含泥率と差圧による含泥率との関係について検討してみる。

その前に土粒子の沈降速度について少し触れておく。無限広さを持つ静止流体内で、単粒子が重力の作用によって落下する場合、流体による抵抗と重力が釣り合った後は一定速度で降下する。この時の粒子速度は終末速度 (terminal velocity) と呼ばれ、通常は単に沈降速度と言われている。粒子に作用する圧力抵抗と摩擦抵抗から成る抵抗は、粒子が球形の場合には粒子レイノルズ数 $R_{ep} = V_t \cdot d / \nu$ (V_t : 沈降速度, d : 粒子径, ν : 流体の動粘性係数) の影響を受ける。 $R_{ep} < 0.3$ に対してはストークスの抵抗法則 (Stokes's Law), $0.3 < R_{ep} < 500$ に対してはアレンの抵抗法則 (Allen's Law), $500 < R_{ep} < 10^5$ に対してはニュートンの抵抗法則 (Newton's Law) がよく用いられる⁹⁾。

以上は粒子の沈降が容器の影響を受けない場合であるが、容器が小さい場合には、容器の干渉により沈降速度は小さくなる。有限の直径を持つ垂直円管中での単粒子

の干渉沈降速度についてはムンロウ、スマルズイレフ等の実験式がある⁴⁾。

さらに粒子が単体ではなく粒群となった場合には、容器壁面の他に粒子間の干渉が生じて沈降速度はさらに減少する。すなわち粒群の干渉沈降速度は、粒子径、比重、流体の種類のみならず粒群の濃度にも影響される。草間等の石岩塊での実験では、粒群干渉沈降速度は管内含泥率の増加に伴ってほぼ直線的に減少すると報告されている⁴⁾。

さて次に、粒群干渉沈降速度を考慮した場合の垂直管内含泥率と吐出含泥率の関係について考えてみよう。

定常状態流れを考えると、垂直管内を流れるスラリーの流体と土粒子間の速度差は、まさに上述の粒群干渉沈降速度である。今、土粒子および流体の種類および管径が決定されているものとして、粒群干渉沈降速度 V_{ig} を含泥率の関数として次式で表わすものとする。

$$V_{ig} = V_{ig}(C_v) \quad (24)$$

また、垂直管内の流体の平均流速を V_{av} 、土粒子の平均流速を V_s 、含泥率を C_v で表わし、上昇流に対しては u 、下降流に対しては d を添字としてさらに付加するものとする、上昇流に対しては

$$V_{av} - V_{su} = V_{ig}(C_{vu}) \quad (25),$$

下降流に対しては

$$V_{fd} - V_{ud} = V_{fg}(C_{vd}) \quad (26)$$

となる。一方、管断面積を A とすると、流体の体積流量 Q_w 、土粒子体積流量 Q_s は、吐出含泥率 C_{vs} 、混合体平均流速 V を用いて、 $Q_w = A(1 - C_{vs})V$ 、 $Q_s = AC_{vs}V$ で表示され、これらの値は連続の関係から管路の場所に関係なく一定である。したがって上昇流に対しては

$$Q_w = A(1 - C_{vs})V_{vs} = A(1 - C_{vs})V \quad (27)$$

$$Q_s = AC_{vs}V_{vs} = AC_{vs}V \quad (28)$$

の関係がある。したがって、28式を27式に代入して次式を得る。

$$C_{vs} = C_{vd} \left\{ 1 - \frac{V_{fg}(C_{vd})}{V} (1 - C_{vs}) \right\} \quad (29)$$

$V_{fg}(C_{vd})/V \neq 0$ であるから29式を C_{vs} について解けば次式を得る

$$C_{vs} = \frac{1}{2} \left[(1 - V/V_{fg}(C_{vd})) + \sqrt{(1 - V/V_{fg}(C_{vd}))^2 + \frac{4VC_{vs}}{V_{fg}(C_{vd})}} \right] \quad (30)$$

同様の操作を下降流について行なえば

$$C_{vs} = C_{vd} \left\{ 1 + \frac{V_{fg}(C_{vd})}{V} (1 - C_{vd}) \right\} \quad (31)$$

が得られ、したがって C_{vd} について解けば

$$C_{vd} = \frac{1}{2} \left[(1 + V/V_{fg}(C_{vd})) - \sqrt{(1 + V/V_{fg}(C_{vd}))^2 - \frac{4VC_{vs}}{V_{fg}(C_{vd})}} \right] \quad (32)$$

となる。

29, 31式において沈降速度の影響を無視できる場合には、右辺 { } 内第二項が 0 となり、 $C_{vd} = C_{vs} = C_{vs}$ すなわち管内含泥率に吐出含泥率は一致する。これについては既に述べたとおりである。逆に、沈降速度の影響が無視できない場合には、上昇流については29式と30式（または27式）、下降流については31式と32式（または31式）が同時に満足されなければならない。

さて、以上の考えに基づいて、本実験結果について検討してみよう。29, 31式からわかるように、土粒子沈降速度の影響は、その絶対値ではなく、混合体流れの平均速度との比として相対的に含泥率に影響を及ぼす。本実験で使用した供試土砂のうち、細砂、粗砂についてこれらを球体とみなし、アレンの抵抗法則から単粒子の自由沈降速度を求めると、 d_{50} についてそれぞれ、 0.0237m/s ($R_{sp} = 3.28$)、 0.108m/s ($R_{sp} = 69.5$) が得られる。実際には、管壁と粒群の干渉により、さらに低い値となる。したがって、本実験の混合体平均流速 ($1.7 \sim 3.3\text{m/s}$) と対比すると、粒群干渉沈降速度は小さく、含泥率に及ぼす影

響は実際上無視して差し支えない。これは差圧含泥率と吐出含泥率の関係を示すグラフおよび相関係数により5.2で実証されているとおりである。

中れきに対しては、粒子形状が不規則で、かつ球形とはみなし難いものがほとんどであったため、実験によってその粒群干渉沈降速度を求めた。粒群干渉沈降速度が $V_{fg}(C_v)$ の時、逆に流体が $V_{fg}(C_v)$ の速度で鉛直上向きに流れれば、粒群は浮遊静止することになる。この考えに基づいて作製した粒群干渉沈降速度測定装置の略図を図-12に示す。管路は差圧測定用管路 I、II と同様に内径 80mm のアクリルパイプである。ポンプ仕様は、流量 $0.20\text{m}^3/\text{min}$ 、揚程 11.5m、電動機出力 0.75kW 、1400r

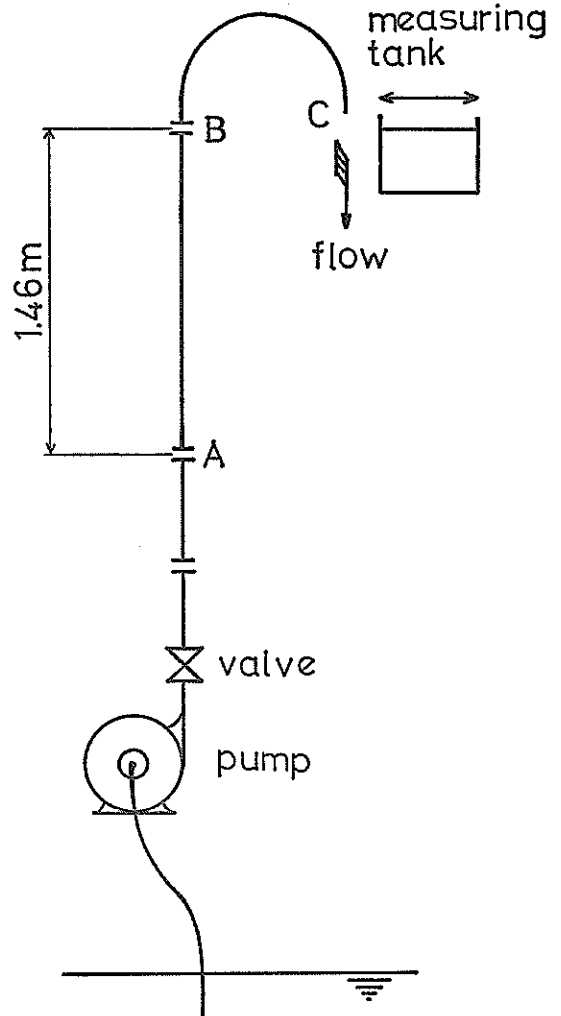


図-12 粒群干渉沈降速度測定装置

pmである。図中A, B部には、12メッシュの網(網目の広さ1.4mm)をはさみ込んである。

計測は次の要領で行なった。まず、A B間に適量の中れきを封入する。次にポンプを駆動し、バルブを除々に開いて流量を増加させてゆく。土粒子がA B間にほぼ均一に浮遊静止する状態までバルブを開き、管路吐出口(図中C部)で、この時の流量を計測する。以上の操作をA B間に封入する土砂量を変え、すなわち管内含泥率を種々変化させて行なう。そしてこの吐出流量から算定した平均流速を粒群干渉沈降速度とする。

以上の操作を本実験に使用した中れきに対して行なった結果、 $V_{tg}(C_v)$ 、 C_v について図-13の関係が得られた。 $V_{tg}(C_v)$ は、 (C_v) の増加に伴ってほぼ直線的に減少しているが、両者の関係を最小二乗法で放物線近似を行なった結果、次の実験式が得られた(ただし、 $[C_v]=[\%]$)

$$V_{tg}(C_v) = -0.0173C_v^2 - 0.0501C_v + 32.6 \text{ (cm/s)} \quad (33)$$

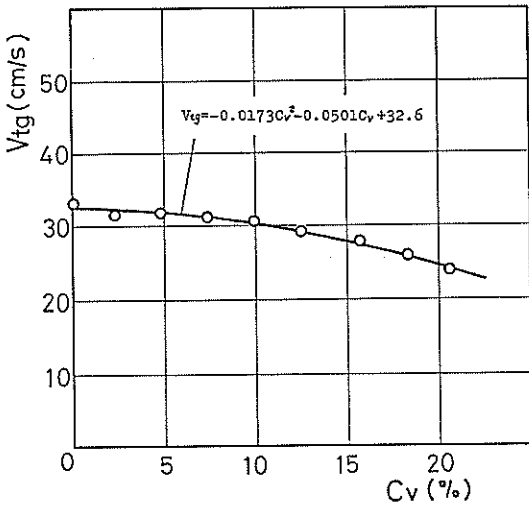


図-13 中れきの粒群干渉沈降速度 (パイ径80mm)

そこで中れきに対する V と C_{vm} の計測結果および (9), (10), (11) 式を用いて計算した管内含泥率を C_{vm} で表示し、これと単管方式による差圧含泥率との関係を図示すると、上昇管流に対して図-14(1)、下降管流に対して図-14(2)のようになる。なお、図には比較のため、差圧による含泥率 (C_{vpsu} , C_{vpsd}) と吐出含泥率 (C_{vm}) の関係も併記してある。図-14(1)より、上昇流に対しては、 C_{vpsu} と C_{vm} の関係を表わす点が45度の線より上側に位置し、全体的な傾向として $v_{psu} > C_{vm}$ であるのに対して、 C_{vpsu} と C_{vm} の関係を表わす点は45度の線を中心にして、両含泥率の差が1~2%程度以内の範囲に納まっており、傾向として

$C_{vpsu} \approx C_{vm}$ とみなせる。すなわち、垂直上昇流の差圧より求められた含泥率は、測定部の管内含泥率をかなり忠実に表示しているものといえよう。

一方下降流に対しては、図-14(2)より、総じて $C_{vpsd} < C_{vm}$ であり、その差は含泥率にして最大で5~6%に及んでいる。これと比べれば、粒群干渉沈降速を考慮した C_{vpsu} と C_{vpsd} の差は2~3%と相当改善されてはいるが、依然として $C_{vpsd} < C_{vm}$ の傾向は残っている。これは前記5.2(2)で述べたように、本実験における下降流の差圧測定においては、土粒子の沈降加速度、流れの不安定性の影響が加わったためと考えられる。したがって下降流の場合には、差圧測定区間の位置選定にも十分配慮する必要がある。

5.4 差圧による管内平均流速

垂直上昇流と垂直下降流の差圧の和より管内平均流速を求めるには、前出(9), (10)式を用いる。(9)式は管内平均流速と単位長さ当たりの損失水頭の関係を表わす式であり、各管路毎に定数が幾分異なるのが普通である。本実験に使用した差圧測定用管路Ⅰの上昇流管と下降流管に対する(9)式は実質的に同一であり(21)式で表わされた。差圧測定用管路Ⅱについては、(21)~(23)式のように各構成管毎に実験定数がやや異なるため、上昇流と下降流に対する(9)式を統合することを考える。ここでは(21)式と(22)式を統合することにする。(21), (22)式は図-6(2)の両対数グラフより得られた実験式である。したがって両式の数値表示は次のようになる

$$\log i_w' = \log 0.0135 + 1.75 \log V \quad (21')$$

$$\log i_w'' = \log 0.0132 + 1.71 \log V \quad (22')$$

そこで(21), (22)式を統合した式の数値表示を $\log i_w = \log a_2 + b_2 \log V$ とし、これと(21)', (22)式の間

$$\log i_w = \frac{1}{2} (\log i_w' + \log i_w'') \quad (34)$$

の関係が成り立つように a_2 , b_2 を定めるものとする。かくして $a_2 = 0.0134$, $b_2 = 1.73$ が得られ、(21), (23)式を統合した式の数値表示は

$$i_w = a_2 V^{b_2} = 0.0134 V^{1.73} \quad (35)$$

となる。したがって流速と差圧の関係を表わす(10)式は、差圧測定用管路 に対しては

$$V = \left(\frac{h_w + h_f}{0.0306L} \right)^{1/1.72} \quad (36)$$

となり、差圧測定用管路については

$$V = \left(\frac{h_w + h_f}{0.0268L} \right)^{1/1.73} \quad (37)$$

となる。

(36), (37)式から得られる流速を V_{dp} とし、これと吐出

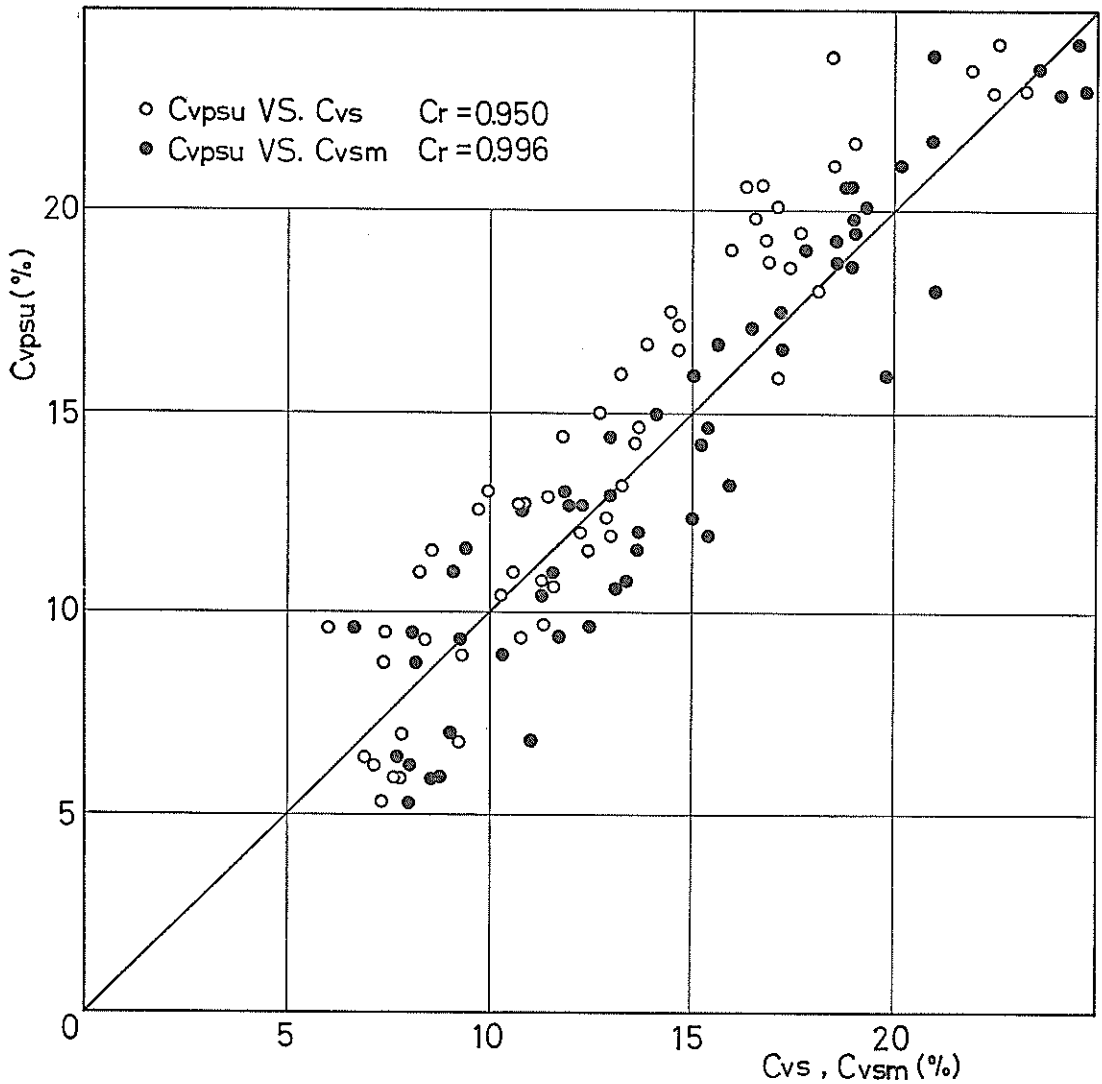


図-14 (1) 差圧含泥率と補正管内含泥率との関係 (上昇流)

平均流速 V_d の関係を、細砂、粗砂、中れきに対してそれぞれ、図-15(1)、図-15(2)、図-15(3) に示す。図より総じて $V_{dp} > V_d$ であり、 $V_{dp} = V_d$ からのずれは粒径の増加に伴って増加している。これは前記 5.2(2) で論じたように、本実験においては下降流が不安定であり、下降流の差圧による含泥率が計算上過小に表示されることが主たる要因の一つと考られる。

今、不安定要因がなく、かつ粒群干渉沈降速度の影響のない理想的な流れを考え、その管内含泥率を C_{v0} 、平均流速を V_0 とすると、上昇管流、下降管流における単

位長さ当たりの損失水頭はそれぞれ

$$i_{u0} = f(V_0) + C_{v0} (\rho_s - 1) \quad (38)$$

$$i_{d0} = f(V_0) - C_{v0} (\rho_s - 1) \quad (39)$$

と表わされる。しかるに下降流において、5.2(2) で述べたように粒子加速度等の影響により

$$C_v = C_{v0} - \Delta C_v (\Delta C_v > 0) \quad (40)$$

と見掛け上 ΔC_v だけ含泥率が低く評価された場合には、(39)式で表わされる下降管流の差圧は

$$i_d = f(V_0) - C_v (\rho_s - 1) = f(V_0) - (C_{v0} - \Delta C_v) (\rho_s - 1) \quad (39)$$

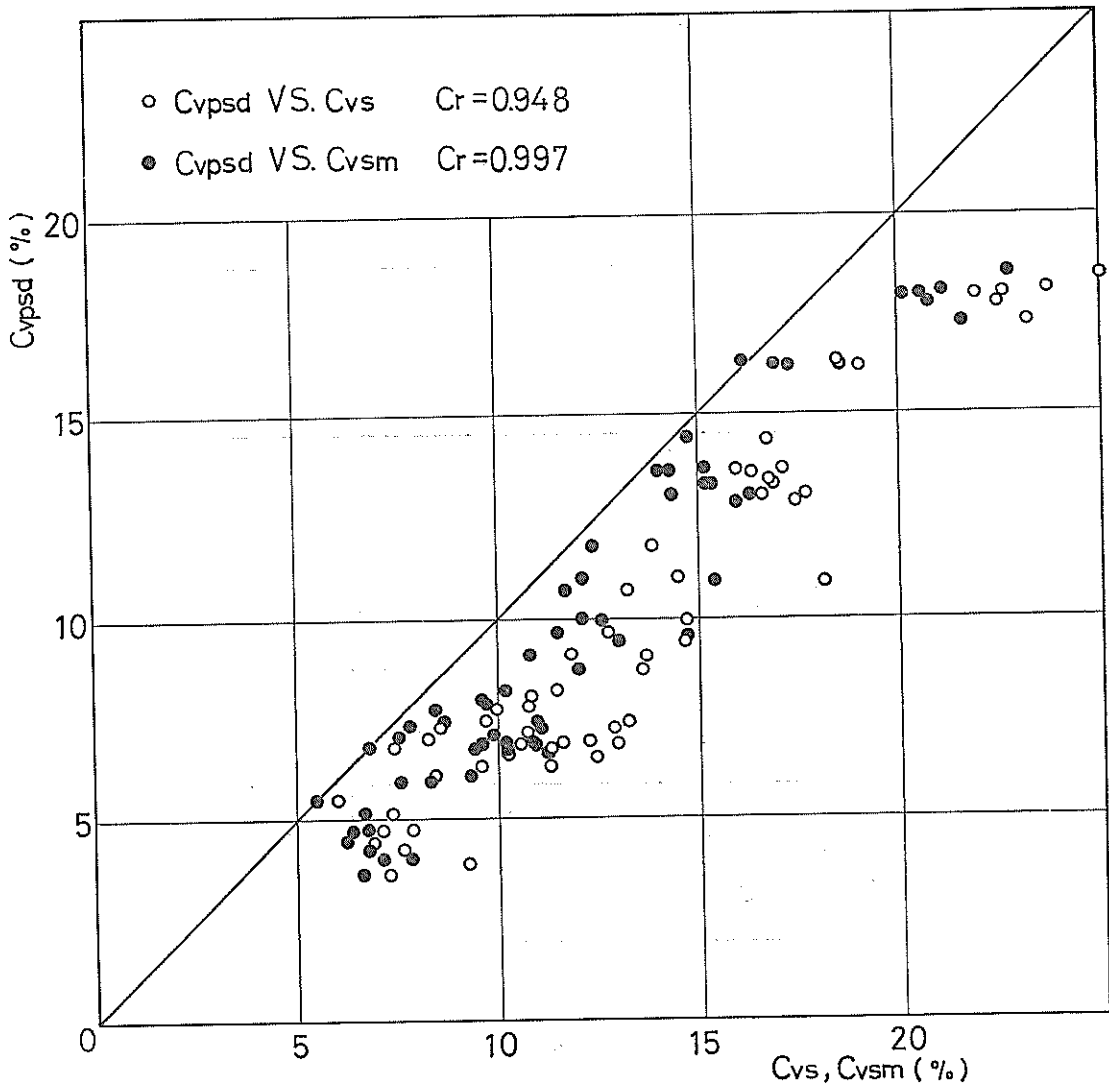


図-14 (2) 差圧含泥率と補正管内含泥率との関係 (下降流)

と計測されることになる。したがって上昇管流と下降管流の差圧の和から計算される平均流速 V は V_0 とはならず、(38), (39) 式より

$$V = \left(\frac{i_{w0} + i_d}{2a} \right)^{1/b} = \left[\frac{1}{a} \{ f(V_0) + \frac{\Delta C_v}{2} (\rho_s - 1) \} \right]^{1/b} \quad (41)$$

と計算されることになる。一方、下降管流も安定した定常流であれば、その差圧は (39) 式で表わされ、したがって V も正しく計算され

$$V = \left(\frac{i_{w0} + i_{d0}}{2a} \right)^{1/b} = \left\{ \frac{1}{a} f(V_0) \right\}^{1/b} = V_0 \quad (42)$$

となる。(41), (42) 式より

$$V/V_0 = \left[1 + \frac{\Delta C_v (\rho_s - 1)}{2f(V_0)} \right]^{1/b} (>1) \quad (43)$$

となる。 V, V_0 はそれぞれ前出 V_{dp}, V_d に対応し、上式より $V_{dp} > V_d$ となり、図-15(1)~図-15(3) の傾向を示すことになる。本実験における ΔC_v は図-9から推定すると、細砂、粗砂に対して最大1%、中れきに対して最大6%程度と考えられる。そこでこれら ΔC_v の値と (43)

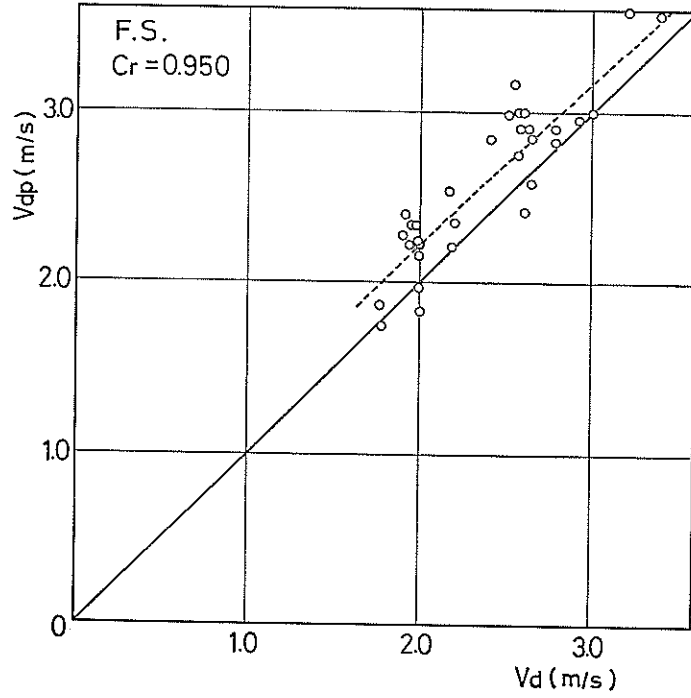


図-15 (1) 差圧流速と吐出流速の関係(細砂時)

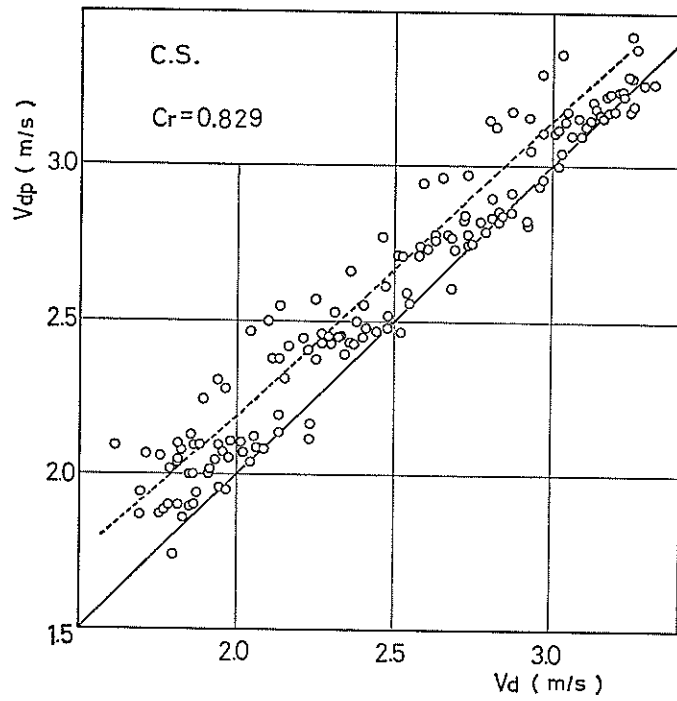


図-15 (2) 差圧流速と吐出流速の関係(粗砂時)

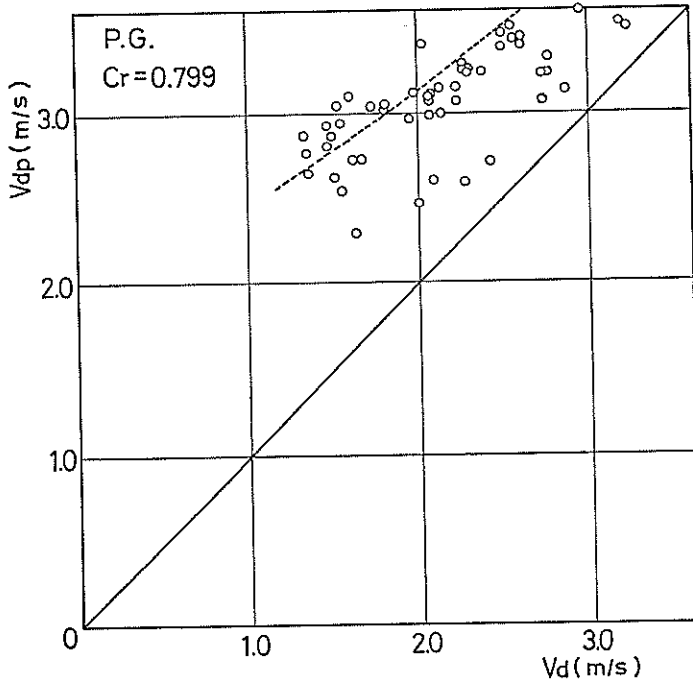


図-15 (3) 差圧流速と吐出流速の関係(中れき時)

式を用いて V_{dp} を推定してみると図-15(1)～図-15(3)に併記した点線のようになる。計測結果の大部分はこれら点線以下になり、この傾向は中れきに対して顕著である。したがって、 $V_{dp} > V_d$ となる傾向の主たる要因の一つは、下降管流の不安定性によって計測差圧が過大に評価されたことによるものと考えられる。

また、図-15(1)～図-15(3) およびこれらの相関係数からわかるように、本実験における V_{dp} と V_d の相関関係は、含泥率の場合に比べて低下している。これは(3)式から理解されるように、差圧流速の精度は、下降流の不安定性に起因する ΔC_v のみならず、管路壁面の摩擦に関する $f(V)$ にも影響されることによる。すなわち、本実験においては、平均流速が比較的低いために(3)式の右辺第二項が相対的に大きくなることによるものと判断される。事実、図-15(1)～図-15(3)中の点線は、平均流速の増加とともに ΔC_v が一定の場合には45度の線に近づき、したがって下降管流の不安定性の影響は減少する。

さてここで、下降管流の不安定性の、U字管方式による差圧含泥率への影響についても検討してみよう。上記差圧流速の場合と同様に、上昇管流および下降管流がともに安定で理想的な場合には、(3)、(9)式による差圧含泥率 C_{v1} は

$$C_{v1} = \frac{i_{v0} - i_{d0}}{2(\rho_s - 1)} = C_{v0} \quad (6)'$$

となる。しかるに下降管流の不安定性により、その差圧が(9)'式で表わされた場合には、計算上の差圧含泥率 C_{v1}' は

$$C_{v1}' = \frac{i_{v0} - i_d}{2(\rho_s - 1)} = C_{v0} - \frac{\Delta C_v}{2} \quad (74)$$

となり、下降流の影響の半分が計算結果に現れ

$$C_{v1}' / C_{v1} = 1 - \Delta C_v / 2C_{v0} \quad (45)$$

より、 $-\Delta C_v / 2C_{v0}$ が誤差となる。これはまた平均流速の影響を受けない。

以上より、下降流が不安定な場合には、差圧による含泥率測定は平均流速の影響を考慮する必要はないが、差圧から平均流速を求める場合には、適用する平均流速の範囲も考慮しなければならないことになる。

9. まとめ

差圧方式による管内含泥率および流速測定について、本実験より得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 垂直上昇流と垂直下降流による差圧含泥率(U字管方式)、および垂直上昇流または垂直下降流による差圧含泥率(単管方式)と吐出含泥率の差は、土粒子が細

砂，粗砂の場合には含泥率で1%程度以内である。また差圧含泥率と吐出含泥率の相関係数は約0.99である。したがって，U字管方式と単管方式は，細砂，粗砂については十分実用可能である。

(2) 180°の円弧形ベンド管の差圧による含泥率（ベンド管3点方式）と吐出含泥率の差は，細砂，中れきに対して含泥率にして4～5%程度以内であり，また両含泥率の相関係数は約0.89となり，U字管方式，単管方式と比べると精度が低下する。これは流れの遠心力，二次流れ等の影響が大きいと考えられる。

(3) 土粒子の粒径干渉沈降速度が管内平均流速に比べて無視できない場合には，管内含泥率と吐出含泥率は一般には異なる。しかしながら，単管方式による差圧含泥率は，土粒子粒径にほとんど無関係に管内含泥率によく追随しており，特に上昇流の場合は精度が高い。

(4) 一般的に，垂直下降流は垂直上昇流に比べて不安定であり，計測差圧の誤差要因となった。不安定となる原因として，土粒子の沈降加速度，粒子周囲の二次流れの影響が考えられる。

(5) 垂直上昇流と垂直下降流の差圧の和より求めた管内平均流速は，概して吐出流速よりも大きかった。これは上記(4)の理由により，下降管流の差圧が過大に評価されたことが主たる原因と考えられる。したがって実用化する場合には，下降管流の差圧測定区間の設定には十分な配慮が必要である。

7. あとがき

現在使用されているフロート式含泥率計，放射線式含泥率計等は，その保守，管理等に問題があり，これらに換わる含泥率計が望まれている。

この要望に答え得るものとして差圧式含泥率測定法を取り上げ，基本的な3方式について室内実験を行なった。その結果，U字管方式と単管方式については十分実用可能である。さらに流量計，積算計などの組み合わせにより浚渫管理システムを構成することも可能である。ただし，実用化に際しては，差圧検出部および差圧測定区間の選定には適切な配慮が必要である。

なお，本実験の一部，差圧測定用管路Iを用いて粗砂について行なった実験は，日本作業船協会の委託により当研究室にて実施したものである¹⁰⁾ことを付記しておく。

参考文献

- 1) John E. Wells: Production Meter Helps Increase Dredge Production, WORLD DREDGING & MARINE CONSTRUCTION: AUGUST, 1974.
- 2) Hans A. Einstein, Walter H. Graf: LOOP SYS-

TEM FOR MEASURING SAND-WATER MIXTURES, Journal of the HYDRAULIC DIVISION Proceedings of the the American Society of Civil Engineers, January 1966.

- 3) К. ДИМНСКИЙ: ПРИВОРЫ КОНТРОЛЯ И УЦЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗЕМЛЕСОСА, peyhoй mpahчoпm, 1973.
- 4) 寺田 進: 固液混合体の管路輸送, 理工図書: 昭和48年。
- 5) 都田昌之他: 水平, 垂直固液混相流動について, 化学工学, Vol. 33第1号, 1969年。
- 6) W. H. Graf, R. N. Weisman: CONTINUOUS MEASUREMENT OF WATER-SAND MIXTURES, Proc. of 22th PIANC, 1969, S. II-2, pp. 17~26.
- 7) 渡辺慶輝: 水力採炭, 技術書院, 昭和37年。
- 8) 太田英一: 水力学および流体力学演習, 学献社, 1972年。
- 9) スラリー輸送研究会資料編集委員会: スラリー輸送システム実用化技術資料集, 日本技術経済センター出版部, 昭和49年。
- 10) 日本作業船協会: 差圧式含泥率計開発に関する調査研究報告書, 日本作業船協会, 昭和51年。

記号一覧表

A : 管路断面積	[m ²]
C_r : 相関係数	[—]
C_v : 真容積含泥率の総称	[—]
C_{vd} : 下降管内含泥率	[—]
C_{vp} : 差圧による含泥率の総称	[—]
C_{vpsu} : 単管方式のうち上昇管流の差圧による含泥率	[—]
C_{vpsd} : 単管方式のうち下降管流の差圧による含泥率	[—]
C_{vpm} : 粒径干渉沈降速度により補正した管内含泥率	[—]
C_{vpr} : ベンド管点方式による含泥率	[—]
C_{vpu} : U字管方式による含泥率	[—]
D : 管路内径	[m]
d_{50} : 供試土砂の50%粒径	[mm]
g : 重力加速度	[ms ⁻²]
h_{AB} : ベンド管上昇流部の差圧	[m]
h_{BC} : ベンド管下降流部の差圧	[m]
h_d : 垂直管下降流部の差圧	[m]
h_u : 垂直管上昇流部の差圧	[m]
i_w : 送水時の管路単位長さ当たりの摩擦損失水頭	[m/m]
Δi_h : 水平管における土砂混入時の単位長さ当たりの付加損失水頭	[m/m]
L : 垂直管の差圧測定区間長	[m]
R : ベンド管曲率半径	[m]
R_c : 管内流れのレイノルズ数	[—]
R_{cp} : 粒子レイノルズ数	[—]
V : 管内平均流速	[m/s]
V_w : 水の平均流速	[m/s]

V_s : 土粒子の平均流速	[m/s]
V_d : 吐出流速	[m/s]
V_f : 土粒子の自由沈降速度	[m/s]
V_{fg} : 粒群干渉沈降速度	[m/s]
ρ_m : スラリーの混合比重	[-]
ρ_{md} : 下降管内スラリー混合比重	[-]
ρ_{mu} : 上昇管内スラリー混合比重	[-]
ρ_s : 土粒子真比重	[-]
λ : 管路内壁の抵抗係数	[-]

..., (x_n, y_n) のように2つの数の組として得られる場合, x_i の増減と y_i の増減の関係, すなわち両者の相関関係を調べることは重要である。この関係の度合いを表わす量の一つに相関係数がある。そこで今,

n : データ個数, \bar{x} : x_i の平均値, \bar{y} : y_i の平均値,

$$S_x : x_i \text{ の標準偏差 } (\equiv \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}),$$

$$S_y : y_i \text{ の標準偏差 } (\equiv \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2})$$

とすると相関係数 C_r は次式で定義される

$$C_r = \frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right) \quad (\text{B. 1.})$$

C_r は, x, y の原点および尺度の取り方に無関係で, $-1 \leq C_r \leq 1$ である。 x, y の増加, 減少が完全に一致すれば $C_r = 1$, 無関係の時 $C_r = 0$, 完全に逆の関係の時に $C_r = -1$ である。

付 録

A. 真容積含泥率と見掛け含泥率について

浚渫等において一般に使用されている容積含泥率には2種類ある。すなわち真容積含泥率と見掛け容積含泥率(慣例的に見掛け含泥率と呼ばれる)である。

真容積含泥率とは, 固液混合体に含まれる固体部分の絶対的評価であり, 正味体積割合を意味する。したがって固液混合に含有される固体の真比重を用いて算出される。一方, 見掛け含泥率は, ある固液混合体の状態を見掛け含泥率100%とし, 別の状態の固液混合体中に含まれる固体部分の体積割合を相対的に評価したものである。したがって元になる状態の見掛け比重を用いて算出される。そこで今

ρ_s : 土砂の真比重, ρ_w : 水の真比重

ρ_m : 固液混合体の混合比重, ρ_a : 土砂の見掛け比重
とすると, 真容積含泥率 C_v , および見掛け含泥率 C_a はそれぞれ

$$C_v = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \times 100 [\%] \quad (\text{A. 1})$$

$$C_a = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_a - \rho_w} \times 100 [\%] \quad (\text{A. 2})$$

と表わされる。そして C_a と C_v の間には

$$C_a = C_v \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_a - \rho_w} \quad (\text{A. 3})$$

の関係がある。

浚渫関係においては, 土砂の海底状態を基準とした見掛け含泥率がよく用いられる。この場合の見掛け含泥率は次のように考えるとわかり易い。すなわち, 海底状態における土砂の真容積含泥率を C_{vb} , 浚渫された固液混合体の真容積含泥率を C_v とすると, 見掛け含泥率は両者の比として

$$C_a = \frac{C_v}{C_{vb}} \times 100 [\%] \quad (\text{A. 4})$$

と表わされる。

B. 相関係数について

実験, 計測等において, その結果が $(x_1, y_1), (x_2, y_2),$

港湾技術研究所報告 第17巻 索引

論文名・著者名

巻号 頁

水工部

徳島空港延長に関する漂砂模型実験.....佐藤昭二・小笹博昭・永井紀彦...17	1	3~ 53
砕波帯内諸現象の総合観測システムと観測例.....田中則男・小笹博昭・加藤一正 柳島慎一・小笠原昭・小山内英雄...17	1	57~ 87
沿岸波浪推算法についての考察——港湾における実施上の問題点—— .....高橋智晴・広瀬宗一・佐々木徹也...17	1	89~118
水平版に働く揚圧力に関する研究.....谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和...17	2	3~ 47
規則波理論による不規則波中の水粒子速度の算定.....小舟浩治...17	4	3~ 58
浮体残留における粘性抵抗力および拘束条件の影響について.....小舟浩治...17	4	59~ 87

海洋水理部

海水の A. G. P. 試験法とその適用.....堀江毅・細川恭史・三好英一...17	2	49~ 80
直立式円筒浮体の波浪中の動揺振幅に関する研究.....合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉...17	4	89~120

土質部

港湾地域における土の工学的諸係数の相関性について (第2報) .....小川富美子・松本一明...17	3	3~ 88
地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究.....高橋邦夫・沢口正俊...17	4	121~167
ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装評価とかさ上げ厚設計.....佐藤勝久・福手勤・佐藤峰夫・山崎英男...17	4	169~192

構造部

集中荷重をうける鉄筋コンクリートスラブの設計法に関する研究.....関博...17	2	81~170
繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質.....大即信明...17	4	193~263

設計基準部

海上航行船舶挙動に関する研究(第3報)——広域水域における実態調査手法——

.....奥山育英・早藤能伸・吉田行秀・中 辻 隆...17 1 119~133

車止めの塗装の標準化について

.....伊藤隆夫・阿部正美・久保清志・石塚修次...17 2 171~192

船舶の主要寸法に関する解析

.....寺内 潔・吉田行秀・奥山育英...17 4 265~327

機 材 部

有限要素法と最適分割法について.....東海林秀幸...17 2 193~206

高圧水ジェットによる珊瑚礁岩の掘削性について

.....中島忠男・小岩苔生・岩崎峯夫

.....石塚浩次・東海林秀幸.....17 3 89~118

差圧式含泥率測定法の実用性について

.....浜田賢二・八木得次・斉藤 勝・是石昭夫...17 4 329~353

Index of Report of P.H.R.I. Vol. 17

Vol. No. pp.

Hydraulic Engineering Division

Model Experiment on Branch Profile Change due to the Runway Extension of Tokushima Airport.....			
.....Shoji SATO, Hiroaki OZASA and Toshihiko NAGAI.....	17	1	3~ 53
Methods and the System of Field Observation of Phenomena in Surf Zone and some Aspect of the Surf Zone			
.....Norio TANAKA, Hiroaki OZASA, Kazumasa KATO, Shin-ichi YANAGISHIMA, Akira OGASAWARA and Hideo OSANAI.....	17	1	57~ 87
Consideration on the Coastal Wave Hindcasts—Problems in Excuting Wave Hindcasting—			
.....Tomoharu TAKAHASHI, Munekazu HIROSE and Tetsuya SASAKI.....	17	1	89~118
A Calculation Method of Uplift Forces on a Horizontal Platform			
.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI, Yoshikazu IZUMIDA.....	17	2	3~ 47
Random Wave Velocity Field From Periodic Wave Theory			
.....Koji KOBUNE.....	17	4	3~ 57
On the Effect of Viscous resistance and Non-linear Mooring System on the Mooring Force of a Floating Body			
.....Koji KOBUNE.....	17	4	59~ 87

Marine Hidrodynamics Division

A. G. P. (Algal Growth Potential) Test and its Adplication to Seawater			
.....Takeshi HORIE, Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI.....	17	2	49~ 80
Prediction of the Oscillation Amplitude of a Bottom-hinged, Vertical Buoyant Cylinder in Sea Waves			
.....Yoshimi GODA, Yasumasa SUZUKI, and Kazuyoshi HACHISUKA.....	17	4	89~120

Soils Division

The Correlation of the Mechanical and Index Properties of Soils in Harbour Districts			
.....Fumiko OGAWA, Kazuaki MATSUMOTO.....	17	3	3~ 88
Experimental Study on the Bending of Battered Piles due to Ground Settlement			
.....Kunio TAKAHASHI, Masatoshi SAWAGUCHI.....	17	4	121~167

The Evaluation and Overlay Thickness Design of Airport Asphalt Pavements by Dynaflect DeflectionsKatsuhisa SATO, Tsutomu FUKUTE, Mineo SATO and Hideo YAMAZAKI.....	17	4	169~192
---	--	----	---	---------

Structures Division

Ultimate Strength of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Concentrated Loads	..... Hiroshi SEKI.....	17	2	81~170
Strength and Deformation Characteristics of Pressed Concrete Piles Subjected to Repeated Loading	..... Nobuaki OTSUKI.....	17	4	193~263

Design Standard Division

A Study on Marine Traffic Behaviors (3rd Report) —Marine Traffic Survey in the Broad Expanse of Water Area—	..... Yasuhide OKUYAMA, Yoshinobu HAYAFUJI, Yukihide YOSHIDA and Takashi NAKATSUJI.....	17	1	119~133
Standardization of Painting System Applied on Steel Curbing	..... Takao ITO, Masami ABE, Kiyoshi KUBO, Shuji ISHIZUKA.....	17	2	171~192
Analysis on the Interrelations among the Several Dimensions of Ships	..... Kiyoshi TERAUCHI, Yukihide YOSHIDA and Yasuhide OKUYAMA.....	17	4	256~327

Machinery Division

On the Finite Element Method and Optimum Mesh Grid	..... Hideyuki SHOJI.....	17	2	193~206
Coral Rock Excavation by High Pressure Water Jets	..... Tadao NAKAJIMA, Taisei KOIWA, Mineo IWASAKI, Koji ISHIZUKA and Hideyuki SHOJI.....	17	3	89~118
On Practical Characteristics of Solid Concentration Measurement by Differential Pressure in Pipes	..... Kenji HAMADA, Tokuji YAGI, Masaru SAITO and Akio KOREISHI.....	17	4	329~353