

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第 6 卷 6 号

Vol. 6 No. 6

(通巻第 43 号)

ポンプ浚渫船の噴流式吸込管助勢装置について

..... 松田 任・近藤 基・八木得次・岩田尚生

土砂の水力輸送に関する研究

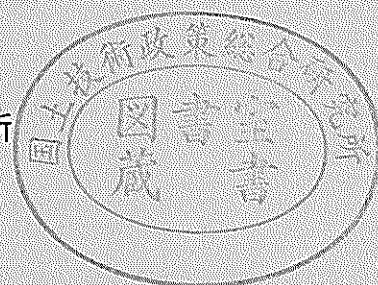
——水平管流における限界流速について——..... 八木得次・入江義次・青木幸男

水平管における単粒子の初動流速について..... 八木得次・入江義次・青木幸男

排土板の地均し抵抗に関する研究 早乙女保二・石塚浩次

1967年4月

運輸省港湾技術研究所



総 目 次

ポンプ浚渫船の噴流式吸込管助勢装置について

.....松田 任・近藤 基・八木得次・岩田尚生..... 3

土砂の水力輸送に関する研究

——水平管流における限界流速について——

..... 八木得次・入江義次・青木幸男.....17

水平管における単粒子の初動流速について

..... 八木得次・入江義次・青木幸男.....35

排土板の地均し抵抗に関する研究早乙女保二・石塚浩次.....49

土砂の水力輸送に関する研究

——水平管流における限界流速について——

八木得次・入江義次・青木幸男

土砂の水力輸送に関する研究

——水平管流における限界流速について——

目 次

概 要	21
1. ま え が き	21
2. 限界流速についての一般的考察	22
2.1. 摺動限界流速	23
2.2. 浮遊限界流速	24
3. 実験装置, 実験方法および供試材料	26
3.1. 実験装置	26
3.2. 実験方法	27
3.3. 供試材料	27
4. 実験結果	28
4.1. 送水時の管路抵抗	28
4.2. 摺動限界流速	29
4.3. 浮遊限界流速	31
5. 結 論	33
6. あとがき	33
参考文献	
記号表	
付 録	

On the Critical Velocity of the Flow of Solid-Liquid Mixtures in Horizontal Pipes

Tokuji Yagi*
Yoshitugu Irie**
Yukio Aoki**

Synopsis

For the efficient hydraulic transportation of solids in pipelines, mud and sand with water through pipes it is necessary for us to observe and analyse the state of flow of them according to each velocity of flow. So we experimented in the laboratory on the sliding limit velocity and floating limit velocity of mud and sand in the horizontal pipe.

The experimental equipment we used is made of pipes, diameter of which is 100 mm and length 70 m, and exchangeable observation pipes made of acrylic resin or steel, each inside diameter of which is 50 mm, 75 mm, 100 mm, are set on the pipe route.

And we used sand as model materials, average diameter of which is 0.25 mm, 0.81 mm, 1.28 mm and gravel, diameter of which is 7 mm. For the measurement, we used following measuring apparatus.

Pressure was measured by the strain-gauge type pressure gauge, flux by electro-magnetic flux meter, densimetry by density meter.

The states of flow of sand and mud were observed with eyes and also photographed by 8 mm motion picture camera and analysed.

Through the analysis of experimental results, we concluded the limit velocity of flow (V_{cd}) for the sliding transportation of sand, diameter of which is more than 2 mm, can be expressed as follow

$$V_{cd} = \xi \{g \cdot (\sigma - 1) \cdot D\}^{0.5} \cdot x_d^{0.345}$$

where ξ : experimental coefficient

g : gravitational acceleration

σ : specific gravity of sand

D : diameter of pipe

x_d : real density of discharged sand and mud mixed water

Floating limit velocity (V_{cf}) was also found to be expressed as follow

$$V_{cf} = K_2 \cdot D^{0.14} \cdot (\sigma - 1)^{0.5} \cdot d^{0.36} \cdot x_d^{0.089}$$

where K_2 : experimental coefficient

d : diameter of mud and sand

By use of these results, we can presume the velocity and state of flow for the transportation of sand and mud mixed water through horizontal pipe.

* Chief of Fluid Transportation Laboratory

** Research Engineer, Fluid Transportation Laboratory

土砂の水力輸送に関する研究

—水平管流における限界流速について—

八 木 得 次*
入 江 義 次**
青 木 幸 男**

概 要

土砂の管路輸送を能率的に行なうには、流速に応じて、土砂の流動状態がどのように変化するかを知る必要がある。このような事から、摺動限界流速および浮遊限界流速を求めるための室内実験を行なった。

この実験装置は、管径、100mm、全長約70mで、管路の途中に8mの交換可能な内径50, 75, 100mmの測定管を設けている。測定は、長さ3mの継目なしの鋼管、アクリル樹脂製の透明管部で行なった。供試材料は、平均粒径0.25, 0.81, 1.28, 7mmのものを使用した。計測には、差圧計、電磁流量計、含泥率計、計量バケツ等を使用した。土砂の管内での流動状態は、透明管部分で、8mm映写機および直接目で観察した。

実験の解析および実験結果から、粗砂以上の粒径の土砂を摺動状態で輸送する場合の限界流速 (V_{OD}) は

$$V_{OD} = \xi \{g \cdot (\sigma - 1) \cdot D\}^{0.5} \cdot x_d^{0.345}$$

ここで ξ : 実験により求めた係数

g : 重力の加速度

σ : 土砂の比重

D : 管 径

x_d : 吐出真含泥率

で表わされた。一方浮遊限界流速 (V_{OF}) は

$$V_{OF} = K_2 \cdot D^{0.14} (\sigma - 1)^{0.5} \cdot d^{0.36} \cdot x_d^{0.089}$$

ここで K_2 : 実験によって求めた係数

d : 土砂粒子と等体積の球の直径

で表わされる。この結果を利用することによって、土砂輸送を行なう場合、流速に対する流動状態が推定できるものと思われる。

1. ま え が き

昭和39年の浚渫船保有統計によると、作業船のうち、ポンプ浚渫船の占める割合は、隻数にして46%に達し、更に最近では、隻数も増加し、その総馬力数は、大型化の影響もあって、急速に伸び50万馬力にも達している。これは、ポンプ浚渫船が臨海工業地帯の造成のため大量の土砂を限られた時間内に浚渫輸送するのに最も適していることによるのはいうまでもないが、一般に、浚渫可能な条件さえ整っていれば、他の作業船に比べ作業能率

が良く、浚渫単価も安いのである。このようなことから、港湾工事はもちろんのこと、一般の土木工事にも用いられる機会が多くなっている。

ポンプ浚渫船を港湾工事に使用するようになってからの歴史は古く、今までに、能率向上を目差して、幾多の貴重な実験や研究が続けられてきた。

ポンプ浚渫船の作業状況をみると、一個所で何年も作業を継続することはまれで、各地を転々と移動しているものが多い。このようなことから、能率向上のアプローチの一つの方法として、与えられたポンプ浚渫船で、如何に能率よく作業を行わせるかが先決問題になる。このために今まで考えられた方法は、含泥率を安定した状態で保ち、管路内で土砂が沈澱しない限界の流速付近を目安

* 機材部、流体輸送研究室長

** 機材部、流体輸送研究室

にして使用することが良いとされ、運転者は、真空計によって、土砂の吸込状態や含泥率を推定し、圧力計によって、排砂管内の土砂が沈澱して異常に圧力上昇をしていないかを監視しながら作業を行なっているのが普通である。しかしながら、土砂の管路輸送の状態は、対象土質、管形状、管長等によって変化するため、適当な流速を求めることは困難で、流速を小さく見積ると、土砂輸送中に沈澱を生じ、沈澱物を一掃するための送水運転を行なわねばならず、そのために時間当りの輸送能率は著しく低下する。一方閉塞を起こさないための配慮から、流速を過大に取り過ぎるとポンプ駆動馬力が著しく増大し不経済となる。

最近のポンプ浚渫船は、能率向上のために、真空計、圧力計の他に、流量計、含泥率計、さらには、浚渫土量計等を完備したのもあり、運転技術が非常に楽になったと思われる。しかしながら管路の輸送状態は、目で見る訳にゆかず各種計器の指示を総合的に判断するなんらかの手懸りが必要である。

これらの点から、今回の実験は、水平管路における、摺動限界流速、浮遊限界流速について調べ、それが、管径、含泥率等によって、どのように変わるか、どのような輸送状態のときに最も効率がよいか等について考察を進めてみた。

実験は、昭和41年3月から7月にかけて、室内に設けられた水平管流実験装置で行なったもので、供試材料は、平均粒径 0.25, 0.81, 1.28 mm の砂および 7.00 mm の砂利の4種類を使用した。測定管路は、内径 50, 75, 100 mm の3種類で、特に流動状態を外から観察できるように、管路の一部にアクリル透明管を用いて行なった。また、実験結果が妥当であるかどうか判断するために、参考文献に記載している実験例についても調べてみることにした。

2. 限界流速についての一般的考察

限界流速の一般的考察に入る前に、管路による、土砂輸送の流動状態や、圧力損失の傾向を考えてみよう。圧力損失の傾向は、粒径 (d_s) によって異なり、従来より、混合液を次の4種類に区分している者が多い。

- ① d_s が 50μ 以下の微粒子を含む混合液。
- ② d_s が 50μ 以上 $0.15\sim 0.2\text{mm}$ の粒子を含む混合液。
- ③ d_s が $0.15\sim 0.2\text{mm}$ 以上 $1.5\sim 2\text{mm}$ の粒子を含む混合液。
- ④ d_s が $1.5\sim 2\text{mm}$ 以上の粒子を含む混合液。

図-1 は、上記区分による一般的な圧力降下の比較であ

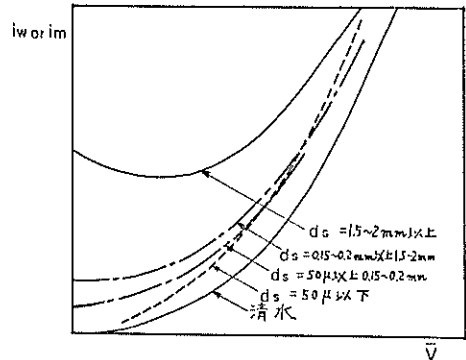


図-1 圧力降下傾向の比較

る。図において、通号 iw, im は、それぞれ単位長さ送水あるいは土砂輸送するための圧力降下、 \bar{V} は管内平均流速である。

いま、水の動粘性係数を ν 、粒子径を d_s 、沈降速度を u_s とすると、粒子のまわりの Re_s 数は、 $Re_s = \frac{u_s \cdot d_s}{\nu}$ で表わされる。これを基に、上記区分と、土質、沈降速度、抗力との関係調べてみると、区分①は、シルト、粘土、コロイドであって、 u_s は 0.2cm/s 以上、 $Re_s = 0.02$ 程度で STOKES の抗力を受ける。圧力降下の傾向は、比重の大きい均質の液体と見做すことができる。区分②は、細砂で u_s が 3cm/s 以下、 Re_s は、5 以下であって、圧力降下の傾向は、区分①と次に述べる区分③の中間的性質を現わす。常温では、ほぼ STOKES の抗力を受ける範囲にある。区分③の大部分は、粗砂であって、 u_s が 3cm/s から 27cm/s の範囲にあり、ほぼ ALLEN の抗力を受ける。さらに、区分④は、砂利以上の大きい粒子であって、 u_s は 27cm/s 以上である。そのうち、粒径 6mm 程度までは、 u_s が 48cm/s 以下 $Re_s < 2,500$ であって ALLEN の抗力を受けるが、粒径がそれ以上大きくなると、NEWTON の抗力を受ける範囲に入る。区分③、④は、流速にもよるが、一般には、摺動状態で輸送される場合が多く、図-1 で分るように、損失水頭最小の点が表われる。

このように、普通の輸送状態でも、粒径によって流動状態や、損失水頭の傾向は、複雑に変化し、状態的確な把握を困難にしている。そこでこの章では、状態変化の最も著しい摺動限界流速、浮遊限界流速について、一般的な考察を行なってみる。

ここでいう、摺動限界流速とは、粒子が摺動状態から静止に至る限界の流速とする。銅管においては、直接観察を行なうことができないので、管内に堆積を生じると、管路断面積が減少すること、堆積物のため流路の粗

度が増大することが考えられることから、摺動限界流速は、同じ吐出含泥率では、抵抗最小の点に相当する流速とした。また浮遊限界流速とは、粒子が揚力のため浮上し、転動または、摺動をしない限界の流速とする。

2.1. 摺動限界流速

管径 D の水平管路内を土砂が摺動流れをしている場合管長 l 当りの土砂群が管底におよぼす重力を W_s とすると

$$W_s = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l \cdot x_p \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 x_p は、管内の真容積含泥率

γ_s, γ_w は、それぞれ土砂あるいは、水の比重量である。

で表わされる。土砂群と、管壁との摩擦係数を f とすると、粒子を移動させるに要する力 (pf_1) は

$$pf_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l \cdot x_p \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot f \quad \dots\dots(2)$$

一方、 l 間の圧力降下は、送水時の圧力降下 p_w よりも大きい p_m となる。ここで、土砂輸送を行なうために付加された力 (pf_2) は

$$pf_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot (P_m - p_w) = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot (i_m - i_w) \cdot \gamma_w \cdot l \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 i_m, i_w は、土砂を単位長さ輸送するための圧力降下 (m-Aq/m) および送水時の圧力降下である。

当然のことであるが、 $pf_1 = pf_2$ であるから、式 (2), (3) より、

$$i_m - i_w = x_p \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \cdot f \quad \dots\dots(4)$$

が得られる。

次に、単位時間に管路内を輸送される土砂重量は、輸送が定常状態の下に行なわれれば、吐出される重量に等しく、その関係は、次式で表わされる。

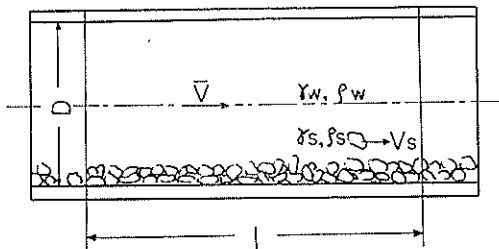


図-2 摺動流れの図

$$\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot V_s \cdot x_p \cdot \gamma_s = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \bar{V} \cdot x_a \cdot \gamma_s$$

ただし、 \bar{V} は管内平均流速、 V_s は粒子の移動速度 x_a は吐出真含泥率である。

これより、 $x_p = x_a \cdot \frac{\bar{V}}{V_s}$ が得られる。これを (4) 式に代入すると、

$$i_m - i_w = x_a \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \cdot f \cdot \frac{\bar{V}}{V_s} \quad \dots\dots(5)$$

を得る。土砂輸送を行なったと同じ平均流速で送水した場合の i_w は、 $\lambda \cdot \frac{\bar{V}^2}{2gD}$ であるから

$$F = \frac{\bar{V}^2}{g \cdot D \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right)} = \frac{\bar{V}^2}{g \cdot D \cdot (\sigma - 1)}$$

ここで λ は送水時の管摩擦係数、 $\sigma = \frac{\gamma_m}{\gamma_w}$

とすると、

$$\frac{i_m - i_w}{i_w \cdot x_a} = 2 \cdot \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{\bar{V}}{V_s} \quad \dots\dots(6)$$

となる。1.5~2mm 以上の粒子を流した場合の平均流速と、圧力降下の一般的な関係の一例を図-3 に示す。

土砂混合時の単位長さ当りの圧力降下 (i_m) 曲線は、平均流速が低くなるにつれて下がるが、ある流速で沈澱を始め、それ以後は、流速が低下するにもかかわらず、再び圧力降下が大きくなってくる。

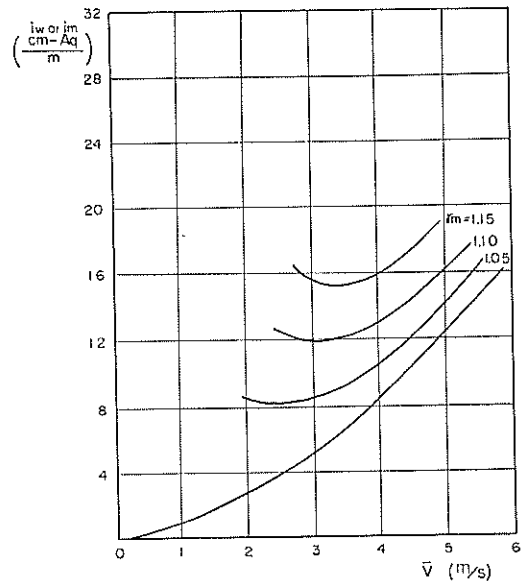


図-3 土砂輸送時の圧力降下の一例

圧力降下 i_m は(6)式より,

$$i_m = i_w \left(1 + \frac{2 \cdot f}{\lambda} \cdot \frac{x_d}{F} \cdot \frac{\bar{V}}{V_s} \right)$$

となり, 流速の関数で表わされるから, $\frac{di_m}{d\bar{V}} = 0$ とおけば, 圧力降下最小の流速, すなわち, 摺動限界流速 (V_{OD}) が求まる。

次に, 輸送効率最大の点は, 単位時間内に, 単位長さを輸送する土砂量 (G_p) に対する動力消費 (E) が最小の値となる点である。

$$\frac{G_p}{E} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^3 \cdot \bar{V} \cdot x_d}{\frac{\pi}{4} \cdot D^3 \cdot P_m / l \cdot \bar{V}} = \frac{x_d}{i_m \cdot \gamma_m} \quad \dots\dots (7)$$

$\frac{G_p}{E}$ は(7)式で表わされ, 同じ含泥率では, P_m または i_m が最小なることで, 限界流速と一致する。この理由からも, V_{OD} の値を見出すことは, 土砂の管路輸送を経済的に行なうに当って, 重要な意味がある。

2.2. 浮遊限界流速

管路の中に置かれた粒子は, 流速を増すことにより, 摺動または転動から, 浮遊に移る。ここでは, 流線にさらされる粒子に働く多くの力のうち, 垂直方向の力, つまり揚力と重力のバランスから, 浮遊限界流速を求めてみる。

乱流における速度分布は, 一般に次式で表わされる。

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

平均流速 \bar{V} を, 最大速 V_{\max} , 管底から y の位置の流速 V , 管半径 R および定数 n を使用して書き表わすと,

$$\bar{V} = \frac{\int_0^R 2 \cdot \pi \cdot (R-y) \cdot V_{\max} \cdot \left(\frac{y}{R} \right)^{1/n} \cdot dy}{\pi \cdot R^2}$$

$$= \frac{\left\{ \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot R^{(n-1)/n} \cdot V_{\max} \cdot y^{1/n} \cdot dy - \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot R^{-1/n} \cdot V_{\max} \cdot y^{(n-1)/n} \cdot dy \right\}}{\pi \cdot R^2}$$

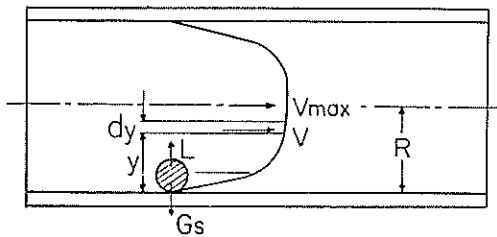


図-4 浮遊限界流れの図

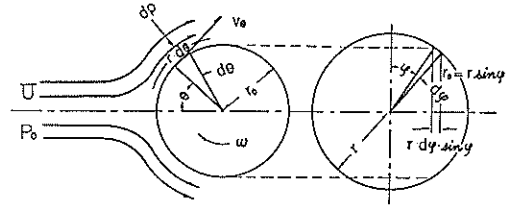


図-5 球体におよぼす力

$$= V_{\max} \frac{2 \cdot n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad \dots\dots (9)$$

また, (8), (9) 式から

$$V = \bar{V} \cdot \frac{(n+1)(2n+1)}{2 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{y}{R} \right)^{1/n} \quad \dots\dots (10)$$

となる。このように, 粒子を包む水の水速度分布が不均一であるために, 物体の周囲には液体の循環 (L) が生じ, 粒子は揚力を受けることになる。球体における揚力 (L) は

$$L = 2 \cdot \int_0^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} -(p-p_0) \cdot r_0 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi$$

$$= -\rho_w \cdot U^2 \int_0^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left\{ 1 - \left(\frac{2 \cdot u \cdot \sin \theta + r \cdot \sin \varphi \cdot \omega}{U} \right)^2 \right\}$$

$$\times r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot \sin^2 \varphi \cdot d\varphi$$

$$= -\rho_w \cdot U^2 \int_0^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left\{ 1 - 4 \cdot \sin^2 \theta - \frac{4 \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{U} \right.$$

$$\left. - \left(\frac{r \cdot \omega \cdot \sin \varphi}{U} \right)^2 \right\} \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot \sin^2 \varphi \cdot d\varphi$$

$$= \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot U \cdot r^3 \cdot \omega = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot U \cdot u \cdot r \cdot d \quad \dots\dots (11)$$

- ここで
- p : 球体表面におよぼす水圧
 - p_0 : 球体に衝突する前の水圧
 - r : 球体の半径
 - r_0 : 球体の任意断面における半径
 - U : 球体に衝突する前の流速
 - u : $u = r \cdot \omega$
 - ρ_w : 水の密度
 - θ, φ : 図-5 に示す球体表面に沿う長さに対する角度
 - ω : 角速度

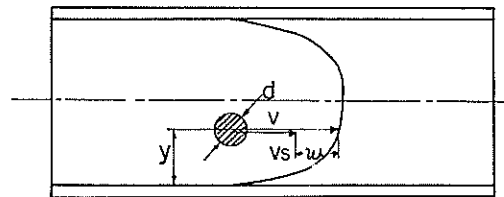


図-6 球体におよぼす力 (2)

一方、粒子のまわりの循環 (Γ) は、

$$\Gamma = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot u \quad \dots\dots(12)$$

(12) 式を (1) 式に代入すると

$$L = \frac{2}{3} \cdot \rho_w \cdot U \cdot \Gamma \cdot d \quad \dots\dots(13)$$

ただし d は、粒子と等体積の球体の直径を得る。いま、粒子は、 V_s の速度で移動しているとしたので u は、この場合、粒子と水との相対速度 w となり、

$$L = \frac{2}{3} \cdot \rho_w \cdot w \cdot \Gamma \cdot d \quad \dots\dots(13)'$$

となる。従って揚力は、次式のようになる。

$$L = \frac{2}{3} \cdot \rho_w \cdot w \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{dw}{dy}\right)_y \cdot d \quad \dots\dots(14)$$

w の値は、池森氏が粒子群の運動方程式より求めた気力輸送の式を水力輸送に適用することによって求まる。

(i) 粒子が NEWTON 抗力を受ける場合

$$w = V - V_s = V \cdot \left\{ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda_s}{2} \cdot F^* \cdot \left(1 - f \cdot \frac{F^*}{F}\right)}}{1 - \frac{\lambda_s}{2} \cdot F^*} \right\} \quad \dots\dots(15)$$

ただし、 $F^* = \frac{w_{s0}^2}{g \cdot D}$ w_{s0} : 球体の沈降速度

λ_s : 飛翔状態における粒子群の摩擦係数

飛翔状態においては、 $f=0$ となり、

$$w = V \left(1 - \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_s}{2} \cdot F^*}} \right) \quad \dots\dots(16)$$

(ii) 粒子が STORKES の抗力を受ける場合

$$w = V \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\frac{F}{F^*}} - \sqrt{\frac{F}{F^*} - 2 \cdot \lambda_s \cdot F \cdot \left(f - \sqrt{\frac{F}{F^*}}\right)}}{\lambda_s \cdot F} \right\} \quad \dots\dots(17)$$

$$f=0 \text{ の場合、 } w = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \lambda_s \cdot F \cdot F^* \quad \dots\dots(18)$$

(iii) 粒子が ALLEN の抗力を受ける場合

$$w = V \cdot \left[1 - \frac{1.4 \cdot (F/F^*)^{1.4}}{\lambda_s \cdot F} \times \left\{ \sqrt{1 + \lambda_s \cdot \left(F^{0.5} \cdot F^{*1.4} - f \cdot \frac{F^{*0.8}}{F^{0.8}}\right)} - 1 \right\} \right] \quad \dots\dots(19)$$

次に、水中の粒子 1 個に働く重力 (G_s) は、

$$G_s = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot (\gamma_m - \gamma_w) \quad \dots\dots(20)$$

従って、飛翔中の粒子は、 $L=G_s$ になる位置まで上昇することになる。

すなわち、

$$\frac{1}{3} \cdot \rho_w \cdot w \cdot d^3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{dw}{dy}\right)_y = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot (\gamma_m - \gamma_w)$$

$$w \cdot \left(\frac{dw}{dy}\right)_y = \frac{1}{2} \cdot (\sigma - 1) \cdot g \quad \dots\dots(21)$$

ただし g は重力の加速度

次に式 (21) を用いて、浮遊限界流速 (V_{cf}) を求めてみよう。粒子の飛跡は SINE CURVE に近似しており、飛翔状態における高さは、流速が遅くなる程低くなり、浮遊限界においては、ほとんど $d/2$ となると考えられる。またこの場合、極限状態においては、水平方向の速度はほとんどないと仮定すれば、 $w = V_{cf}/2$ となる。従って (21) 式は、

$$V_{cf}/2 \cdot \left(\frac{dw}{dy}\right)_{d/2} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma - 1) \cdot g \quad \dots\dots(22)$$

(9) 式から

$$\frac{dw}{dy} = \bar{V} \cdot \frac{(n+1)(2n+1)}{2 \cdot n^2} \cdot \left(\frac{y}{R}\right)^{1/n} \cdot \frac{1}{y} \cdot \frac{1}{n} \quad \dots\dots(23)$$

が得られる。そこで (22) 式に (9) 式および (23) 式を代入すると

$$\bar{V}^2 \cdot \left\{ \frac{(n+1)(2n+1)}{2 \cdot n^2} \right\}^2 \cdot \left(\frac{y}{R}\right)^{2/n} \cdot \frac{1}{y} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma - 1) \cdot g$$

$$\bar{V} = \frac{2 \cdot n^2}{(n+1)(2n+1)} \cdot \left(\frac{R}{y}\right)^{1/n} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot n}{2} \cdot (\sigma - 1) \cdot y}$$

ここで、 $y = \frac{d}{2}$ 、 $R = \frac{D}{2}$ であるから、上式から

$$V_{cf} = \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{1/n} \cdot \sqrt{g \cdot n \cdot (\sigma - 1) \cdot d} \quad \dots\dots(24)$$

(24) 式は、浮遊限界流速を表わす式である。ここで n は、 R_c 数 $\left(R_c = \frac{\bar{V} \cdot D}{\nu}\right)$ 、管壁の粗度によって変化するが、 $n=7$ すなわち $1/7$ 乗則が成立するものとすれば、(24)式は、次のようになる。

$$V_{cf} = K_1 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{1/7} \cdot \sqrt{g \cdot (\sigma - 1) \cdot d} = K_1' \cdot (\sigma - 1)^{0.5} \cdot D^{0.14} \cdot d^{0.36} \quad \dots\dots(25)$$

ただし K_1, K_1' は係数

ここで、 d は、球体の直径であるから、粒径は、次式により換算する必要がある。ある粒子の表面積を A_s 、代

表-1 砂粒の形状と各係数 (水工便覧による)

砂粒の形状	β	α/β	ϕ	d
角のとがったもの	0.64	6.9	0.81	$1.07 d_s$
尖鋭なもの	0.77	6.2	0.85	$1.13 d_s$
すりへったもの	0.86	5.7	0.86	$1.16 d_s$
丸をおびたもの	0.91	5.5	0.91	$1.20 d_s$
球体	0.52	6.0	1.00	d_s

表粒径を d_s とするとき、等体積の球の表面積を A_{s0} 、換算粒径を d とすれば、 ϕ, α, β は、次の関係式で定義される。

$$\phi = \frac{A_{s0}}{A_s} = \frac{\pi \cdot d^2}{\alpha \cdot d_s^2}, \quad \beta \alpha^3 = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \quad \dots\dots(26)$$

α, β は、SHAPE FACTOR である。いま砂粒の形状と各係数および、代表径は、表-1 のようになる。

3. 実験装置、実験方法および供試材料

3.1. 実験装置

実験装置を、図-7 および 写真-1 に示す。装置は、ホップポンプ、管路および計測器類より成っている。

ホップは、縦、横 2.5m、高さ 1.5m で角形の漏斗状をしており、下部には、土砂を均一にポンプに供給するためフィーダとして、電動機により駆動されるゴムロー

ラが付けてある。

ポンプは片側吸込型、揚程 12m、流量 2.4m³/min (1,250 rpm) で電磁接手を介して、15kW 電動機と接続している。(写真-2)。本装置は、電磁力を調整することにより、ポンプ回転数を、500 rpm から 1,350 rpm まで変えることができる。

管路は、100 mm ガス管よりなり、途中に 8m の交換可能な測定管路を設け、その両端に異径管を使用して、ガス管に接続している。測定管は、内径 50, 75, 100 mm で、長さ 3m の継目なしの圧力配管用鋼管およびアクリル透明管を接続し、その両端 1m は、アクリル透明管で、助走区間としている。さらに、圧力タップは、継目なし管路の長さ 2m 間に設けてある。また測定管路に平行にバイパス管路を設け、ポンプで制御できない低流速も安定した状態で流し得るように考慮している。

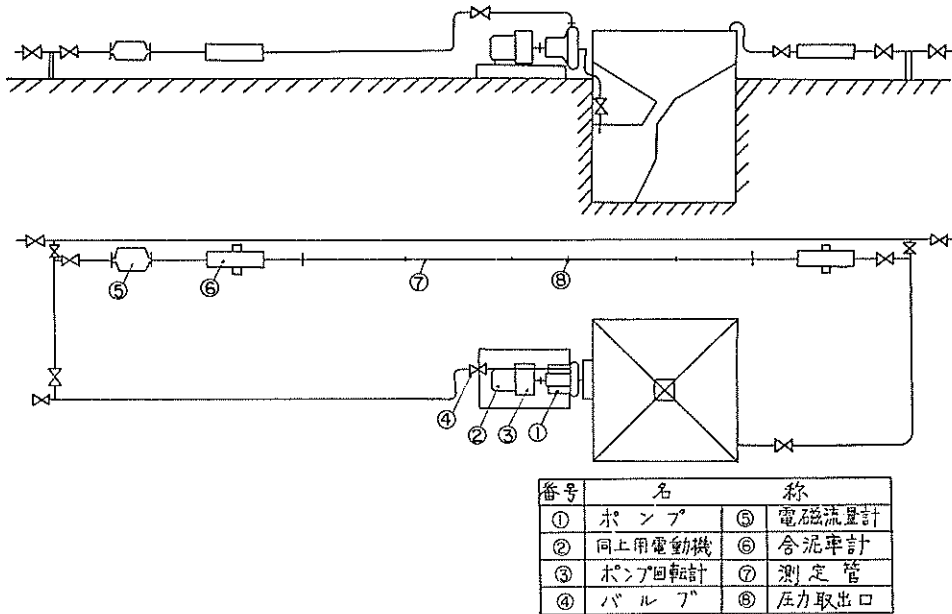


図-7 実験装置

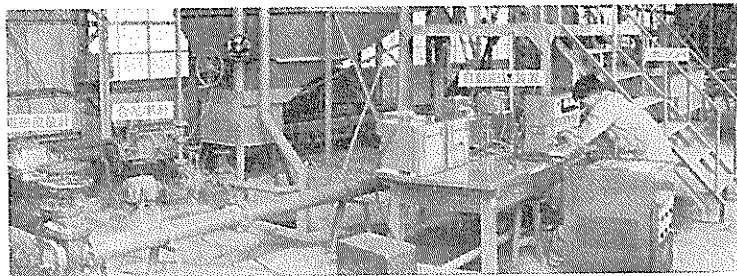


写真-1 実験装置

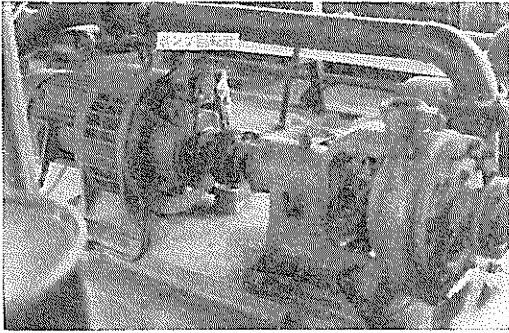


写真-2 ポンプおよび電動機

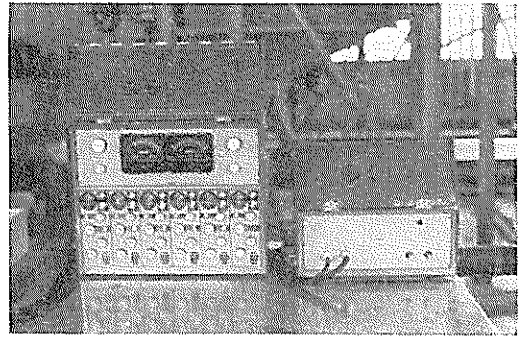


写真-6 動歪測定器

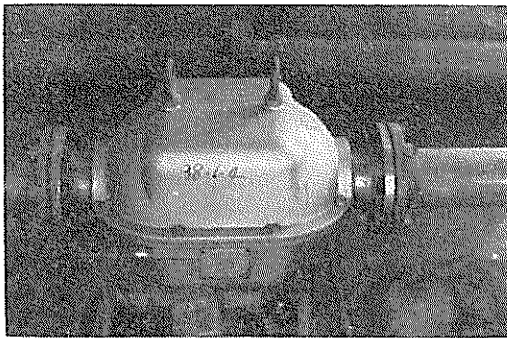


写真-3 電磁流量計発信部

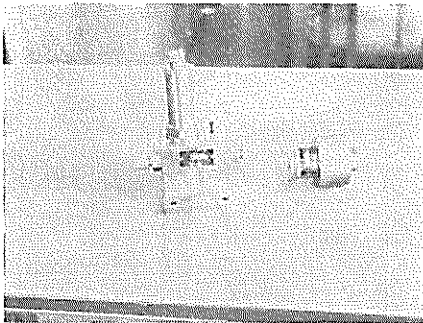


写真-4 圧力ヘッドおよび差圧ヘッド

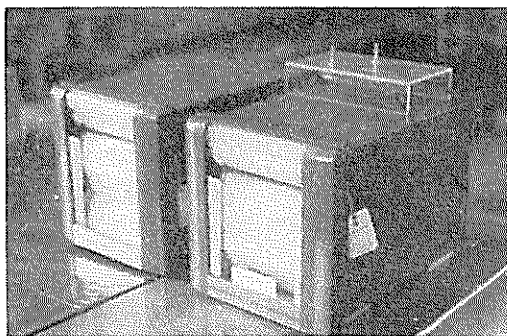


写真-5 電磁流量計記録器

計測路は、図-7、写真-1 に示してある位置にポンプ回転計、電磁流量計（写真-3）、圧力計（写真-4）を取付け、これらは、すべて自動記録できるようにしている。すなわち、流量は電磁流量計記録器（写真-5）に、含泥率計および圧力計は、ストレインゲージタイプのピックアップを使用して、歪量を電流量に変換し、これを動歪測定器（写真-6）を通したのち、電磁オシログラフまたは、ペン書きオシログラフに記録させた。

3.2. 実験方法

実験は、まず清水で計器を調整したのち、送水時の記録を取り、次に、流速を高めておいて、あらかじめ定めた含泥率に相当する土砂をホッパに徐々に投入し、管内含泥率は含泥率計で、吐出含泥率は、吐出口における混合液を計量バケツで汲み取って、含泥率が適当であることを確かめた上で、計測を始める。次にポンプ回転数を徐々に下げて、浮遊限界流速および摺動限界流速と混合液の圧力降下を計測した。もちろん、限界流速は、アクリル透明管を外部より観察し（8ミリ映写機でも撮影した）限界流速に至った時刻に合図し、記録紙上に時刻を記入した。

本装置では、土砂が循環する構造になっているため、計測中に粒子が破損する場合も考えられるので、これには、土砂を交換すること、計測時間を極力短縮することに努力した。その結果、実験前後の粒径加積曲線を比較しても大差はなかった。

上記実験を管径、粒径ともに変え繰り返して行なった。

3.3. 供試材料

実験に使用した材料は、4種類であって、粒径加積曲線を図-8に、主要なる性質を表-2に示す。

供試材料 No. 1~No. 3 は、高萩産の砂であって、平均粒径 0.25, 0.81, 1.25 mm で比較的粒径のバラツキは少ない、粒子の形状は、角のすりへったものが比較的多かった。No. 4 は、木戸海岸産の砂利であって、平均径

表-2 供試材料

供試材料番号	産地	粒径 mm	平均粒径 mm	比重	沈降速度 cm/s
No. 1	茨城県高萩産	0.107~0.42	0.25	2.67	3.4
No. 2	" "	0.5 ~1.5	0.81	2.63	10.5
No. 3	" "	1.0 ~2.0	1.28	2.63	15.0
No. 4	福島県双葉郡木戸海岸産	5 ~10	7.00	2.70	34.9

表-3 小川博士が実験に使用した供試材料

供試材料番号	砂種類	粒径 mm	平均粒径 mm	比重	沈降速度 cm/s
No. 5	海岸砂	0.3 以下	0.16	2.60	2.6
No. 6	"	0.3~0.6	0.33	2.57	5.2
No. 7	"	0.6~1.2	0.61	2.58	7.5
No. 8	"	1.2 以下	0.48	2.58	6.6
No. 9	豊浦標準砂	0.3 以下	0.17	2.59	2.7

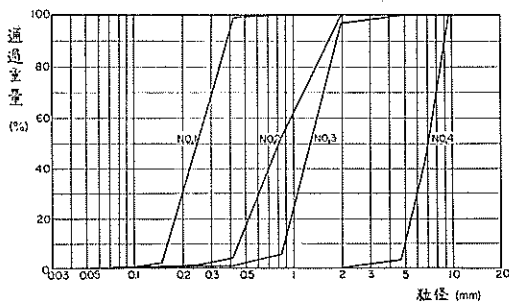


図-8 供試材料の粒径加積曲線

7.00 mm で No. 1~No. 3 と比較すると丸味をおびていた。表-3 は小川博士が実験に使用した供試材料である(浮遊限界流速の測定値を利用して戴いた)。

4. 実験結果

4.1. 送水時の管路抵抗

送水時の測定値を表-4 ならびに図-9 に示す。

アクリル透明管の管路抵抗を指数公式を使って表わせば

$$\bar{V} = 149 \cdot R_0^{0.63} \cdot i_w^{0.56} \dots (27)$$

本実験式を、池田式およびバザンウィリヤム式と比較してみる。

$$\text{池田式} \quad \bar{V} = C_1 \cdot R_0^{0.581} \cdot i_w^{0.507} \dots (28)$$

$$\text{バザンウィリヤム式} \quad \bar{V} = C_2 \cdot R_0^{0.63} \cdot i_w^{0.54} \dots (29)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は係数、 R_0 は径深、 i_w は単位長さ当りの抵抗損失である。(27)式は、バザンウィリヤム式に

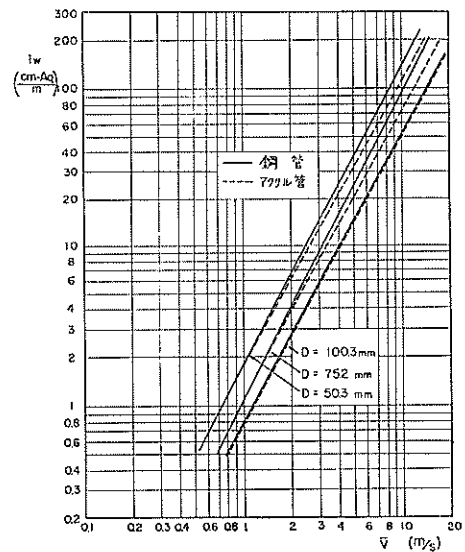


図-9 送水時の抵抗損失水頭

非常に近く、 C_2 として、平滑な例にゴムをあげ、 $C_2 = 140$ を与えていることから、係数もほぼ一致している。鋼管の場合は、管径が小さくなるにつれて、 $i_w^{0.5}$ に近づく、すなわち、損失水頭は、速度の2乗に比例してくるが、径が100 mmに達するとほとんどアクリル管との差はない、これは新管の場合、同じ管壁の粗さ ϵ でも管径が大きくなるにつれて、 ϵ/D の値が小さくなるためであろう。

表-4 送水時の管路抵抗

アクリル管 $D=50.3$ mm, 鋼管 $D=50.2$ mm

\bar{V} (m/s)		i_w (cm-Aq/m)		\bar{V} (m/s)		i_w (cm-Aq/m)	
アクリル管	鋼管	アクリル管	鋼管	アクリル管	鋼管	アクリル管	鋼管
0.63	0.87	1.8	1.4	5.77	5.80	45.5	48.2
1.95	1.55	5.7	3.8	6.60	6.72	55.3	62.3
2.15	2.29	8.6	8.5	7.34	7.33	66.1	76.2
2.78	3.14	14.4	15.9	8.06	8.21	80.3	98.6
3.66	3.63	21.4	20.6	8.80	8.80	93.9	113.9
4.36	4.54	28.6	28.5	9.46	9.79	110.0	144.3
5.14	5.12	37.8	40.1				

アクリル管 $D=75.2$ mm, 鋼管 75.3 mm

0.78	0.78	0.8	0.7	3.98	3.86	13.8	15.0
1.05	1.08	1.1	1.3	4.22	4.24	15.2	17.8
1.31	1.33	2.3	1.9	4.57	4.63	17.8	21.2
1.70	1.71	3.1	3.3	4.92	4.87	20.8	23.3
1.98	2.02	3.9	4.1	5.30	5.27	23.6	27.6
2.35	2.34	5.3	5.3	5.62	5.62	26.1	29.3
2.60	2.61	6.4	6.8	5.95	5.92	29.1	35.3
3.00	2.99	8.9	8.4	6.27	6.13	31.8	38.4
3.30	3.32	9.4	10.8	6.53	6.87	35.4	47.9
3.63	3.64	11.6	12.2	6.87	—	39.3	—

アクリル管 $D=100.3$ mm, 鋼管 99.7 mm

0.38	0.38	—	0.2	2.41	2.43	3.9	3.8
0.61	0.62	—	0.6	2.60	2.63	4.7	4.4
0.72	0.71	0.1	0.6	2.78	2.81	4.9	5.0
0.94	0.95	0.7	0.8	2.97	3.00	5.9	5.6
1.12	1.11	0.8	1.1	3.10	3.14	6.1	6.2
1.30	1.32	1.1	1.3	3.32	3.36	6.9	7.0
1.50	1.52	1.5	2.3	3.52	3.55	7.6	8.1
1.71	1.74	2.0	2.1	3.66	3.70	8.3	8.6
1.86	1.88	2.3	2.4	3.85	3.90	9.4	9.6
2.03	2.05	2.8	2.6	4.08	4.12	9.7	10.1
2.23	2.26	3.3	3.4				

4.2. 摺動限界流速

摺動状態において,

$$\phi = \frac{i_m - i_w}{i_w \cdot x_a}$$

とおけば, (6) 式より,

$$\phi = \frac{i_m - i_w}{i_w \cdot x_a} = 2 \cdot \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{1}{F} \cdot \frac{\bar{V}}{V_s}$$

である。すなわち,

$$\frac{\bar{V}}{V_s} = \frac{\phi \cdot \lambda}{2 \cdot f} \cdot F$$

となり, $\frac{\bar{V}}{V_s}$ は $\phi \cdot \frac{\lambda}{f}$ および F の関数になることがわかる。そこで摺動状態における測定値の一部について, $\phi \cdot \frac{\lambda}{f} \cdot F$ を算出したのが表-5でこれを図表上にプロットしたのが図-10である。

ただし, f の値は, 寺田博士が測定した水中における動

表-5 撈動状態における測定値

D mm	No.	x_a (%)	V_m (m/s)	i_m (cm-Aq/m)	ϕ	$\phi \cdot \frac{\lambda}{f}$	F
99.7	No. 2	5.5	2.5	5.2	4.07	0.831	3.88
	"	5.5	3.0	7.2	4.23	0.894	3.88
	"	7.9	2.0	5.1	11.84	2.364	2.48
	"	12.1	2.0	5.9	9.98	1.993	2.48
	"	12.1	2.5	8.9	8.95	1.826	3.88
	No. 3	9.3	2.0	5.1	10.22	2.041	2.48
	"	9.3	2.5	7.8	8.82	1.799	3.87
	"	13.9	2.0	7.3	13.53	2.702	2.48
	"	21.8	2.5	11.0	7.21	1.471	3.88

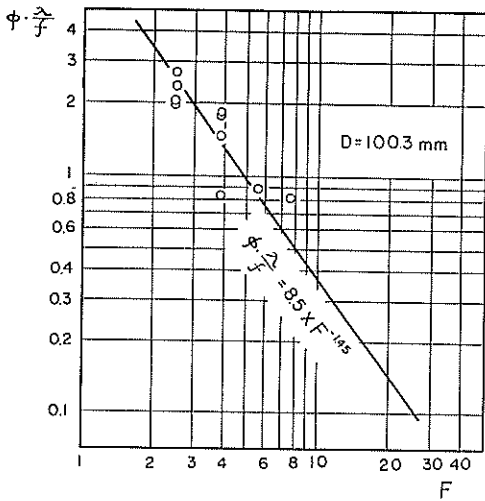


図-10 F と $\phi \cdot \frac{\lambda}{f}$ との関係図

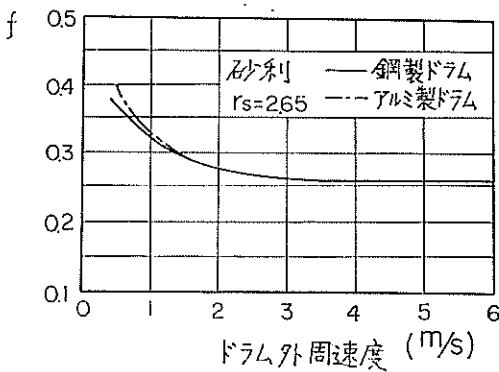


図-11 水中における動摩擦係数

摩擦係数(図-11)を使用した。図-10に寺田博士の研究による(30)式を記入してみると、計算値は、バラツキ

があるにしても、大体一致するようである。

$$\frac{i_m - i_w}{i_w \cdot x_a} \cdot \frac{\lambda}{f} = 8.5 \cdot F^{-1.45} \quad \dots\dots(30)$$

(30)式より

$$i_m = \lambda \cdot \frac{\bar{V}^2}{2 \cdot g \cdot D} \cdot \left[1 + 8.5 \frac{(g \cdot (\sigma - 1) \cdot D)^{1.45} \cdot x_a \cdot f}{\bar{V}^{2.9} \cdot \lambda} \right] \quad \dots\dots(31)$$

i_m を \bar{V} の函数として表わすことができたので、 $\lambda, f = \text{CONST}$ として、 $\frac{di_m}{d\bar{V}}$ を求めると、

$$\frac{di_m}{d\bar{V}} = \frac{\lambda \cdot \bar{V}}{D \cdot g} \cdot \left[1 - \frac{3.825 \cdot f \cdot x_a \cdot (g \cdot (\sigma - 1) \cdot D)^{1.45}}{\lambda \cdot \bar{V}^{2.9}} \right] \quad \dots\dots(32)$$

従って、撈動限界流速 V_{CD} は、(32)式を零とおくことにより求まる。

$$V_{CD} = \xi \cdot (g \cdot (\sigma - 1) \cdot D)^{0.5} \cdot x_a^{0.345}$$

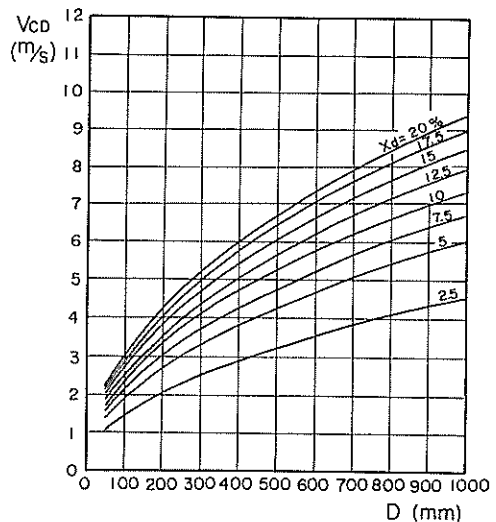


図-12 管含泥率と撈動限界流速

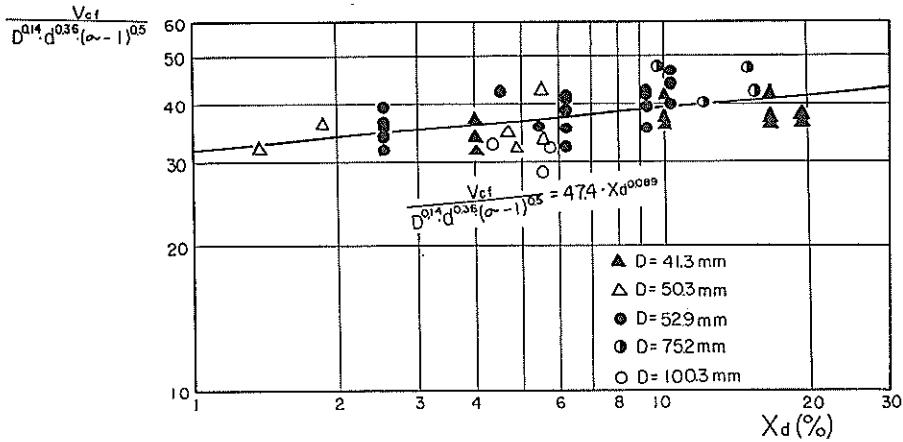


図-13 浮遊限界流速と含泥率との関係

ここで

$$\xi = 1.59 \cdot \left(\frac{f}{\lambda}\right)^{0.345}, \quad f=0.26, \quad \lambda=0.016$$

とすると

$$\xi = 4.17$$

となる。

さらに、 $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\sigma=2.63$ とすると

$$V_{OD} = 16.6 \cdot D^{0.5} \cdot x_a^{0.345} \dots\dots\dots (33)$$

図 12 は式 (33) を基に、管径、含泥率と、撓動限界流速の関係を図表化したものである。

(33) 式により求まる V_{OD} は、水平管路内を、撓動流する場合の限界流速そのものであって、実際には、管路の状態の良否によっても多少異なるであろうし、土砂輸送に当って、含泥率、流量を常に一定に保ち得るものでもないから、常用速度は、 V_{OD} の 20%~30% 増と状態によって速くしなければならないものとする。

4.3. 浮遊限界流速

浮遊限界流速は、 $n=7$ とすると、(25)式が成立する。(25)式は、含泥率が高くなっても、速度分布が変わらないとしたため、含泥率の項がないが、実験中の観察および実験結果からみても、含泥率によって、流動性状が変わっているようである。そこで含泥率の影響を調べるために、各測定値について $\frac{V_{cf}}{D^{0.14} \cdot d^{0.36} \cdot (\sigma - 1)^{0.5}}$ を計算したのが表-6 であり、これを図表化したものが図-13 である。

図中管径 $D=41.3 \text{ mm}$ (▲印) および $D=52.9 \text{ mm}$ (●印) は、小川博士が透明パイプで計測した値である。また、管径 100 mm の測定値が少ないのは、本実験装置では、浮遊限界流速に達しない場合がほとんどであった

ためである。

図から、実用の含泥率範囲で管路輸送を行なう場合、 $\frac{V_{cf}}{D^{0.14} \cdot d^{0.36} \cdot (\sigma - 1)^{0.5}} = 47.4 \cdot x_a$ として差支えない。含泥率を考慮した上での V_{cf} は

$$V_{cf} = K_2 \cdot D^{0.14} \cdot (\sigma - 1)^{0.5} \cdot d^{0.36} \cdot x_a^{0.089} \dots (34)$$

ここで $K_2=47.4$

で表わされる。

V_{cf} の測定は、透明パイプ中を流れる粒子群が浮遊する限界を観察により判定したものであって、判定の個人差や、多少の測定誤差は含んでいると思われる。測定値もバラツキがあるが、含泥率の影響は比較的小さいので、巨視的に $x_a^{0.089}$ の線に乗るものとして取扱った。

図-14 および図-15 は、(34)式を使用し、 $x_a=5\%$ 、 10% について計算した結果を図表にしたものである。

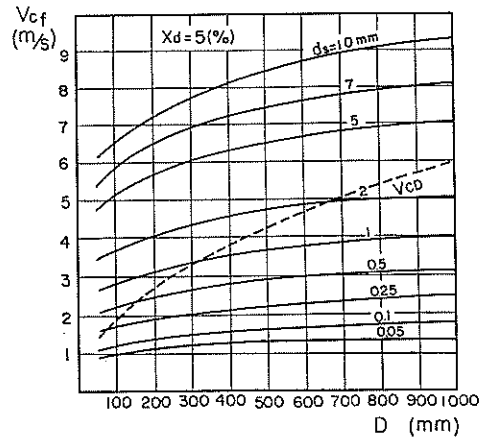


図-14 粒径、管径と浮遊限界流速 ($x_a=5\%$)

表 6 浮遊限界流速

D (mm)	資料 No.	d (mm)	x_d (%)	V_{ef} (m/s)	V_{ef}
					$D^{0.14} \cdot (d-1)^{0.5} \cdot d^{0.36}$
41.3	No. 6	0.38	4.0	1.65	34.9
	"	0.38	10.0	2.00	42.3
	"	0.38	16.7	2.00	42.3
	No. 8	0.56	4.0	1.75	32.4
	"	0.56	10.0	2.00	37.0
	"	0.56	16.7	2.00	37.0
	"	0.56	19.9	2.00	37.0
	No. 9	0.20	4.0	1.35	37.0
	"	0.20	10.0	1.40	37.6
	"	0.20	16.7	1.40	37.6
	"	0.20	19.9	1.40	37.6
50.3	No. 4	8.13	1.9	5.57	36.1
	"	8.13	1.4	4.94	32.1
	"	8.13	5.5	6.64	43.1
	"	8.13	4.7	5.51	35.8
	"	8.13	4.9	5.15	33.4
	"	8.13	5.5	5.29	34.3
52.9	No. 5	0.19	2.5	1.40	36.9
	"	0.19	6.1	1.60	42.1
	No. 6	0.38	2.5	1.95	39.9
	"	0.38	6.1	2.00	40.9
	"	0.38	9.2	2.10	42.9
	"	0.38	10.2	2.15	44.0
	No. 7	0.71	2.5	1.90	31.1
	"	0.71	6.1	2.00	32.7
	"	0.71	9.2	2.20	36.0
	"	0.71	10.2	2.20	36.0
	No. 8	0.56	2.5	2.00	35.8
	"	0.56	6.1	2.10	37.6
	"	0.56	9.2	2.20	39.4
	"	0.56	10.2	2.20	39.4
	No. 9	0.20	2.5	1.30	33.9
"	0.20	6.1	1.45	37.8	
"	0.20	9.2	1.66	41.7	
"	0.20	10.2	1.80	46.9	
75.2	No. 3	1.49	9.9	4.12	48.4
	"	1.49	12.3	3.49	40.9
	"	1.49	15.0	4.15	48.7
	"	1.49	16.1	3.64	42.7
100.3	No. 2	0.94	4.4	2.51	33.4
	"	0.94	5.5	2.22	29.5
	"	0.94	5.6	2.51	33.6

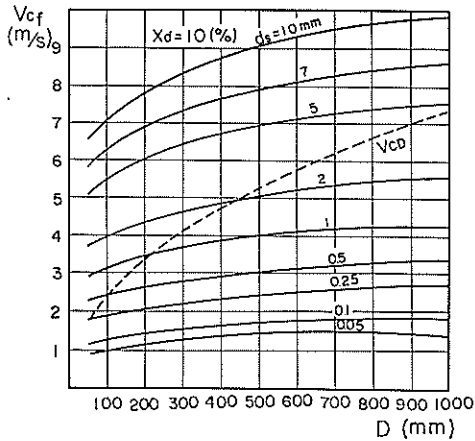


図-15 粒径、管径と浮遊限界流速 ($x_a=10\%$)

図において、粒子の形状は、海岸土砂を対象とした関係で、角のすりへったものを仮定し、 $d=1.16d_s$ を採用し、 σ は、2.63とした。図中破線で示したものは、図-12に示した含泥率5%、10%に相当する摺動限界流速である。図によると、同じ含泥率では、浮遊限界流速は、管径よりも、粒径によって大きく左右されるのに対し、摺動限界流速は、管径によって変化する程度が、浮遊限界流速の場合よりも大きい。

含泥率5%の場合、管径500mm程度では、粒径1.5mm位で、摺動限界流速と浮遊限界流速が一致する。これより大きい粒子例えば、粒径10mmの砂利を輸送する場合5%の含泥率では、浮遊するのに $\bar{V}=8.4\text{m/s}$ を要し、それ以下の流速では、摺動流れとなる。そして $\bar{V}=4.3\text{m/s}$ 程度以下に流速を下げると、一部堆積を起すことになる。1.5mm以下の粒子だけを輸送する場合は、もっと低い流速でも浮遊するので輸送可能なことはもちろんである。

一般に管径が小さいほど、同じ粒径でも、摺動流れをする流速範囲が広い。例えば、 $D=100\text{mm}$ の管路で、 $d_s=7\text{mm}$ の粒子群を5%の含泥率で輸送する場合、 $V_{CD}=1.9\text{m/s}$ 、 $V_{CF}=5.8\text{m/s}$ であり、この間約3.9m/sは、摺動または、一部浮遊の状態で輸送され、管路の閉塞は起らないと思われる。これに対して、 $D=1000\text{mm}$ では、 $V_{CD}=6.0\text{m/s}$ 、 $V_{CF}=8.1\text{m/s}$ でこの間2.1m/sとなり、摺動または、一部浮遊の状態で輸送される流速範囲が狭まる。

また、5m/sの流速で、 $x_a=5\%$ の土砂を輸送する場合、 $D=100\text{mm}$ では、 $d_s=5\text{mm}$ 近くのものまで浮遊させることができるのに対して、 $D=1000\text{mm}$ では、 $d_s=2\text{mm}$ までしか浮遊させる力がない、つまり、同じ流速

では、管径が小さい方が輸送性が良いとも言える。

このように、輸送する土砂の粒子の構成が分れば、流速に対する輸送状態も見当がつき、各種計器を総合的に見る目安になるものと思われる。

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、

- (1) 摺動限界流速は、一般に(33)式で表わされ、管径、含泥率によって変化するが中でも管径の影響が大きい。
- (2) 浮遊限界流速は、式(34)の如く、粒径、含泥率、管径の関係として表わされ、粒径が大きく影響する。
- (3) 摺動限界流速、浮遊限界流速を基にして、各流速における流動状態の推定が可能になる。
- (4) 水平管の、摺動流れにおける損失水頭は、平均流速、管径、含泥率、管摩擦係数、動摩擦係数の関数として(31)式のごとく表わされる。

6. あとがき

今回の実験は、室内実験を基に、机上計算したもので、今後次のような課題が残されている。すなわち、

- (1) 室内実験の解析結果が、実際の浚渫船についても妥当であるかどうか確認する必要がある。
- (2) V_{CD} を求める(33)式は、粒子が完全な摺動状態で輸送されており、粒径が変わっても、管壁との摩擦係数は変わらないとして導いたため、粒径や、沈降速度等のファクターが入っていない。従って、(33)式は一般に粒径が大きくて、ほぼ完全な摺動状態であり、かつ含泥率が高いか、流速が比較的遅くて、摺動している粒子群の表面にある粒子に働く揚力の影響がほとんど無視できる場合である。引き続き、管材質、粒径、粒子形状等の影響について調べる必要がある。
- (3) V_{CD} については、含泥率の影響を数多く調べ浮遊限界点で i_m がどのように変化するかも確かめたい。
- (4) また、今回の実験は、節分けした粒子群について実験したものであるが、粒径が異なるものの混合物についても調べてみたいと思っている。

謝 辞

実験ならびに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. ハイドロリックコンベヤ：寺田進

2. 粗粒群混相液のしゅう動流れに関する研究
一動摩擦係数の実測— (講演会前刷). 寺田進
3. 固体の水力輸送の力学的取扱い (機械学会誌)
池森亀鶴
4. 固体粒子の流体輸送
一風力輸送と水力輸送における圧力損失の相似性—
池森亀鶴
5. К В вопросу Взвешивания и Транспортирования
Зернистого Материала в Горизонтальном
Трубопроводе: М. И. Содров
6. 水力学流体力学: 市川常雄
7. 水工学便覧: 沼知福三郎, 本間仁監修
8. サンドポンプの性能ならびに管抵抗の実験
(運研報告): 長谷川, 八木, 徳永

- p_m : 土砂輸送時における長さ l 間の圧力降下 $\text{kg/cm}^2/\text{m}$
 p_0 : 球体に衝突する前の水圧 kg/m^2
 p_w : 送水時における長さ l 間の圧力降下 $\text{kg/cm}^2/\text{m}$
 R : 排送管半径 m
 Re_s : 粒子のまわりのレイノルズ数
 R_0 : 径深 m
 r : 球体の半径 m
 r_0 : 球体の任意断面における半径 m
 U : 球体に衝突する前の流速 m/s
 u : 球体表面の周速度 m/s
 V : 任意点 (y) の管内流速 m/s
 \bar{V} : 管内平均流速 m/s
 V_{OD} : 招動限界流速 m/s
 V_{cf} : 浮遊限界流速 m/s
 V_{\max} : 管内最大流速 m/s
 V_s : 粒子の移動速度 m/s
 W : 粒子の相対速度 $w = v - v_s$ m/s
 W_s : 粒子の沈降速度 m/s
 W_{s0} : 球体の沈降速度 m/s
 x_a : 吐出真含泥率
 x_p : 管内真含泥率
 y : 管底からの高さ m
 α : (26)式に用いた係数 SHAPE FACTOR
 β : (26)式に用いた係数 SHAPE FACTOR
 Γ : 循環
 γ_s : 土砂の真比重量 kg/m^3
 γ_w : 水の真比重量 kg/m^3
 ξ : 管壁の荒さ m
 θ : 図5に示す球体表面に沿う長さに対する角度
 λ : 送水時の管摩擦係数
 λ_s : 飛翔状態における粒子群の摩擦係数
 ν : 水の動粘性係数
 ξ : (30)式に用いた係数 $\xi = 1.59 \cdot \left(\frac{f}{\lambda}\right)^{0.345}$
 ρ_w : 水の密度
 σ : 土砂の比重 $\sigma = \gamma_s / \gamma_w$
 $\phi = (i_m - i_w) / i_w$
 ϕ : (26)式に用いた係数
 φ : 図5に示す球体表面に沿う長さに対する角度
 ω : 角速度

記号表

- A_s : 粒子の表面積 mm^2
 A_{s0} : 粒子と等体積の球の表面積 mm^2
 c_1 : (28)式に用いた係数
 c_2 : (29)式に用いた係数
 D : 排送管の内径 m
 d : 粒子と等体積の球の直径 m
 d_s : 粒子の代表直径, 粒子群の場合は 50% 粒径 m
 E : 土砂量に対する動力消費量 kg-m/s
 F : フルード数 $F = \frac{\bar{V}^2}{g \cdot (\sigma - 1) \cdot D}$
 F^* : フルード数 $F^* = \frac{W_{s0}^2}{g \cdot D}$
 f : 粒子と排送管壁との動摩擦係数
 G_p : 単位時間内に単位長さを輸送される土量 m^3/s
 G_s : 粒子1個に働く重力 kg
 g : 重力の加速度 m/s^2
 i_m : 土砂を単位長さ輸送するための圧力降下 m-Aq/m
(水柱で表示したもの)
 i_w : 単位長さ送水するための圧力降下 m-Aq/m
 K_1 : (25)式に用いた係数
 K_2 : (33)に用いた係数
 L : 揚力 kg
 l : 排送管長さ m
 n : (8)式に用いた定数
 P : 球体表面に及ぼす水圧 kg/m^2
 pf_1 : 粒子を V_s の速度で移動させるに要する力 kg
 pf_2 : 土砂輸送を行なうために付加された力 kg

(昭和42年3月31日受付)