

論 說 報 告

第 29 卷 第 6 號 昭和 18 年 6 月

ポンプ浚渫船に於ける流速の選定と摩擦損失の算定 及び土砂含有量の測定法

正會員 河 野 正 吉*

要 旨 ポンプ浚渫船に於て、吸排砂管内流速の選定と摩擦損失の算定は、設計の根本をなすものであるが、我國に於ては之に關する研究が非常に少く、設計に據るべき處がない。筆者は手近にある内外の文献若干を調べた結果、問題全般の解決には不充分であるが、種々の資料を統合、整理、歸納する事により、問題の解決に若干の手懸りを得たから、その資料を紹介すると共に之を利用した筆者の研究を述べる。尚排砂管内土砂含有量の瞬間測定法は知られてゐないが、之亦上の問題と不可分な關聯に於て必要な事である。筆者はその簡単な測定法を考案したのでそれを紹介する。

目	次
緒 言	第 1 節 管徑相違の影響
第 1 章 垂直管内の流速と摩擦損失	第 2 節 土砂粒塊の大き相違の影響
第 2 章 水平管内の流速と摩擦損失の實驗	第 3 節 濃度の影響及び管と粒塊の寸法比の影響
第 1 節 概 説	第 4 節 摩擦損失
第 2 節 水平輸送管の特性曲線	第 5 節 計算例
第 3 節 我國に於ける實驗	第 4 章 傾斜管内の流速と摩擦損失
第 4 節 フランスに於ける實驗	第 5 章 排砂管に於ける土砂含有量の測定法
第 5 節 アメリカに於ける實驗	結 言
第 3 章 水平管に於ける實驗結果の實際排砂管への應用	

緒 言

浚渫船中最も大規模なものはポンプ浚渫船である。世界一大きな自航ポンプ船は米國の Goethals で、推進汽機が 2 臺で 4500 馬力、ポンプ汽機が 2 臺で 2600 馬力、泥艙の容積 3800 m³ に及ぶ。これはトレーリングサクションと言つて吸入管を兩舷に 1 本づゝ下げ、推進機の力で船を進めながら吸入管を引摺つて泥を吸ふ型である。埋立用のポンプ船では、米國の Fort Peck ダムに使つた一つの船内に 2500 馬力のポンプを 2 臺備へ、更に吐口までの途中に壓力を高めるため 2500 馬力の仲繼ポンプ 2 臺を有するものがある。斯くポンプ船が特に大きいのは、ポンプが小柄で大馬力を吸収し得ること及び、他の浚渫船の様に土運船や艁航といふ様なお伴の船がいらぬから、他の制肘を受けず自分だけでいくらでも大きくなり得るからである。大東亞戰爭を契機としてあらゆるものゝ規模が大きくならねばならぬ。土木も大量土木でなければならぬ。大量土木第一の選手はポンプ船に指を屈する。だから吾々はポンプ船の發達に力を入れなければならぬ。ポンプ船を發達せしむべき對象となるものは、埋立用ポンプ船を例にとれば、主として (1) カッター、(2) ポンプ、(3) 材質でいづれも甚だ研究不充

* 海軍技師 海軍省施設本部第二部

分である。(2)のポンプと言ふのは廣い意味で排砂管をも含む。即ち流速の問題や摩擦損失の問題を含む。本論に於ては主として流速の選定と摩擦損失の算定及び土砂含有量の測定につき、内外の實驗及び筆者の研究を述べる。

ポンプ船に於て、吸排砂管内流速の選定と摩擦水頭の算定は、設計の根本をなすものである。然るに我國に於ては之に關する資料の乏しいこと及び、ポンプ船の大部分を占むる埋立船は多く變化する土質、變化する管長で使用されるので、判然たる設計の規準がなく、斯る場合は慣例的な設計で足りる等の理由により、流速の選定、摩擦水頭に關する研究はあまり行はれてゐない。

然しほゞ一定の土質及びほゞ一定の管長で、尨大な土量を處理せねばならぬことも起り、其の場合は流速及び摩擦に關してはつきりした計算が必要である。又浚渫深度が非常に深い場合は、吸入管内の摩擦のみならず、吸入管内に水よりも比重の大きな土砂を支へるのに高い真空度を必要とするが、一方ポンプの吸入側に生ぜしめ得る真空度には制限があるので、相當濃い混合物を吸ふには、土砂が停滞せぬ範圍で流速を出来るだけ小にしなければならぬ。例へば關門海峡部堵沖に於けるヘドロの浚渫の如し。この部堵沖の浚渫はドラッグサクシヨン式のポンプ船を使ふので目下建造中であるが、その設計の必要上この問題をもつとはつきり掴み度いと考へ、手許で利用し得る文獻を調べて見た處、問題全般の解決には未だ甚だ不充分であるが、文獻にあらはれた種々の資料を統合、整理、歸納した處、問題の解決にやゝ曙光を認め、又解決の手懸りが示される様であるから其資料を紹介すると共に、之を利用した筆者の研究を述べる。又管中に於ける土砂の含有量を瞬間的に知ることも、上の問題との關聯に於て必要な事であるが、何等合理的な方法が知られてゐない。よつて筆者はその一つの方法を考案し之を提供せんとするものである。

第1章 垂直管内の流速と摩擦損失

上向きに洗れる垂直管内に於て必要な水の速度（混合物の速度に非ず水のみ速度なり）は、被輸送物の沈降速度以上でなければならぬこと及び、被輸送物は兩速度の差で輸送されることは明らかである。一定の輸送量に對してこの輸送速度を何程に選ぶかと言ふことは、管の大き、從つてその價格、摩擦從つて動力費、勞力費、償却費其他種々の經濟的因子を考察して定めらるゝのであるが、本論に於て「流速の選定」といふ意味は斯る事情を考慮せず、單に「物體が停滞せずして輸送せらるゝ様な流速の選定」と言ふ意味に限定する。茲で種々の大きさの砂粒や石塊の沈降速度を計算してみる。

沈降速度はレイノールド數の低い場合はストークスの式で、レイノールド數の高い場合はニュートンの式で計算されるが、レイノールド數に應じ係數を適當に選べば、ニュートンの式だけで計算出来る。ニュートンの球の抵抗の式は次の通りである。

$$D = C w_0 \frac{u^2}{2g} \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right)$$

但し D : 抵抗, w_0 : 水の單位容積の重量,
 u : 球の速度, g : 地球の加速度,
 d : 球の直徑, C : 係數

この値が球の重量から浮力を減じた次の値と均合つたときの球の速度が沈降速度である。

$$G = (w - w_0) \frac{\pi}{6} d^3$$

但し G : 球の重量と浮力の差, w : 球の単位容積の重量
 D と G とを等しく置いて沈降速度 u を見出せば次の如し。

$$u = \sqrt{\frac{4gd(w-w_0)}{3Cw_0}} = \sqrt{\frac{4gr(S-1)}{3C}}$$

但し S : 球の比重

此式中の係数 C がレイノールド数 R によって變る有様を、對數方眼紙にプロットすれば、圖-1⁽¹⁾ の如し。
 沈降速度を計算するには、先づ u を假定し $R=ul/v$ (但し v = 水の運動粘り係数) を計算し、圖-1 から C を見出し、これから u を計算し、 u が確定するまでこの計算を繰返すのである。

圖-1.

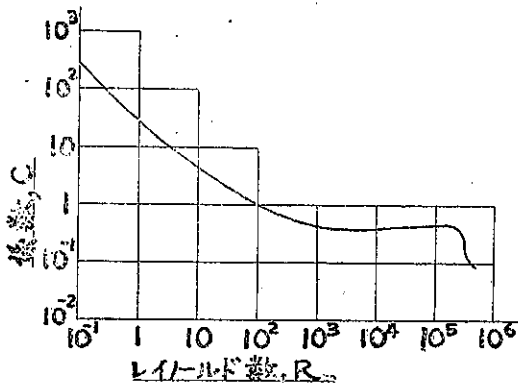
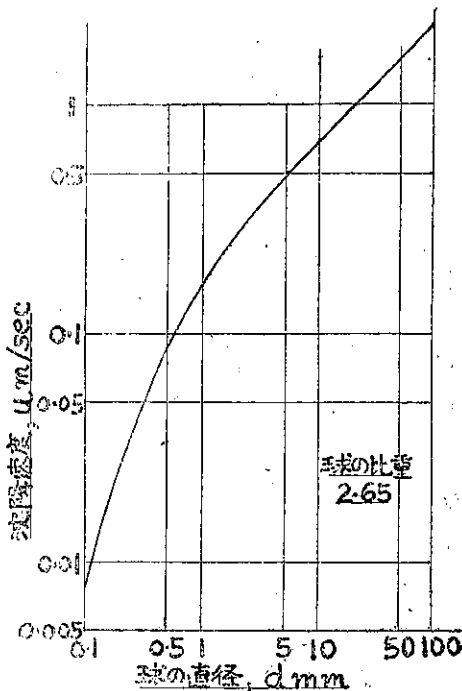


圖-2.



砂や石の場合を考へ比重を 2.65 とし、 R の計算に必要な運動粘り係数を $1 \text{ mm}^2/\text{sec}$ とし (以下常にこの値を用ふる) 種々の大きさの球に對し沈降速度を計算し、對數方眼紙にプロットすれば圖-2 の如し。但し圖-1 の曲線のほとり水平な部分では $C=0.44$ 常數と見做した。圖-2 から 2, 3 の點を拾つて摘記すれば表-1 の如し。

浚渫すべき土砂の粒や塊は勿論球形でなく、その體積は粒塊の通過する篩の目を直径とする球の體積と異り、又滑かな

表-1.

球の直径 (mm)	0.1	1.0	10	100
沈降速度 (m/sec)	0.008	0.165	0.698	2.210

球に比し表面が著しく粗いから、實際の沈降速度は上の速度と異なるが、後に述べる様に、流速は沈降速度の何倍と言ふ様にきめるから、球と實際の土砂との差異はあまり詮索しないで、この計算上の沈降速度を單なる一つの目安とする。

水の速度が被輸送物の沈降速度に等しければ、物體は單に浮游したまゝ動かず、輸送の目的は全然達せられぬ。

(1) 藤本武助: 應用流體力學. p. 329.

又流速が沈降速度を超しても充分大きくなければ、下の計算に示す様に、管中に於て土砂の占むる断面積が、管の断面積に比しあまり大きくなり、流體輸送が完全に行はれなくなると思はれるから、相當に流速を大にせねばならぬ。今次の如く符號をきめる。

i : 水と土砂との混合物の輸送容積中土砂の輸送容積の割合 (ポンプ船で普通言ふ土砂含有量の割合)

a_w : 管中に於て水の占むる断面積

a_m : 管中に於て土砂の占むる断面積

j : 管の断面積中土砂の占むる断面積の割合

v_w : 管中に於ける水の流速

v_m : 管中に於ける土砂の流速

但し a_m と云ふのは、管中で水と土砂を分離し、土砂を管壁の一方に押付けたときの三日月形の面積中、土砂粒塊間の空隙を差引いたもので、 a_w は管の面積から a_m を引いたものである。

然らば

$$\frac{a_m v_m}{a_w v_w + a_m v_m} = i \quad \frac{a_m}{a_w + a_m} = j$$

初めの式から a_w を出し次の式に代入すれば a_m も消えて次式を得る。

$$j = \frac{1}{1 + \frac{1-i}{i} \frac{v_m}{v_w}} \dots \dots \dots (2)$$

垂直上向き流れて、水の流速を土砂の沈降速度の N 倍とすれば、土砂の流速は沈降速度の $(N-1)$ 倍で、(2) 式の v_m/v_w は $(N-1)/N$ に等しいから次の式を得る。

$$j = \frac{1}{1 + \frac{1-i}{i} \left(1 - \frac{1}{N}\right)} \dots \dots \dots (2')$$

例へば i が 15% で N が 3 ならば j は 21%、 N が 2 ならば 26% となる。

j を粗砂程度の土砂で最大 30% まで位許されるとすれば、 i が 15% のとき N は 1.4 以上、 i が 20% ならば 2.4 以上でなければならぬ。土砂粒が細くなるほど N は小さくてよく、粗くなるほど大きくならなければならぬ。

次に摩擦損失であるが、次の水平管の處で述べる様に、土砂が浮游状態にあれば、水と土砂から成る混合物の水頭であらした管の摩擦損失は、水の場合と同じである。換言すればある管にある流速で水を流した場合の摩擦損失を H とし、混合物の比重を s とすれば、同じ管に同じ流速で混合物を流したときの摩擦損失を、水の水頭であらせば sH である。垂直管で土砂は常に浮游状態にあるから、水の摩擦損失さへわかつてゐれば、混合物の摩擦損失は上のことから簡単に計算される。

第 2 章 水平管内の流速と摩擦損失の實驗

第 1 節 概 説

水平管内に於ける固形物の浮游の機構は仲々むづかしいが、近來有力な説では、浮游の主な原因は、亂れ流れに於ては管の中心線に垂直の方向に分速度があり、その上向きに分速度が固形物を支へるものと考へらるゝに至つた。その上向き分速度の大きさは、管底より少し離れた處で最大で管内平均流速の 15~20% 位らしい⁽²⁾⁽³⁾。

(2) 藤本武助： 應用流體力學。p. 397.

(3) H. Chatley: The Pumping of Granular Solids in Fluid Suspension, Engineering, March 1, 1940.

假りに 20% とすれば、平均流速を沈降速度の 5 倍に選べば、固形體は浮游状態で輸送される理窟であるが、これは粒塊が管の斷面積に比し可成り小で、且つ單一な粒塊の場合であつて、排砂管の場合に當嵌まらないのは勿論である。又粒塊は浮游状態でなく管底を轉動することによつても輸送され得るし（殊に大塊の場合はその沈降速度が非常に大なるに鑑み、浮游輸送は實際上不可能である）問題が複雑になつて來て、全面的解決は至難である。又この問題を解くには種々の異つた角度からなされた非常に多くの實驗を必要とする。現在それ程多くの實驗が存在しないばかりでなく、手許に於て利用し得る實驗結果は更に少數である。その少數の實驗結果から種々の問題をカバーする法則を見出すといふ事は、無謀に近い事は筆者も充分承知してゐるが、手を拱いてその實驗結果を眺めてゐても更につまらぬから、少數の實驗結果から大膽な類推歸納により種々の法則を導くことを敢て試みた。その法則は定性的には大體正しいと考へられるが、定量的には甚だ疑問がある。筆者はこの小論が、この困難な問題の解決に多少の手懸りを與へ、又は讀者の今後行はるべき實驗に若干の指針を與ふれば満足である。

第 2 節 水平輸送管の特性曲線

水平管中に物體の粒子を水で輸送するとき、摩擦損失を水と粒子との混合物の水頭であらせば、流速と摩擦損失との關係は一般に圖-3 の様な形の圖で示される⁽⁴⁾。

横軸 v は流速、縦軸 h_f は摩擦損失である。點線は水に對するもので大體拋物線になる。實線は土砂の含有量一定なる混合物に對するもので、極小點 I を有し、この點では土砂は若干管底を撓動又は轉動しながら流れ、それ以下の流速では土砂は急激に停滯をはじめる。C 點から先では兩曲線は一致する。換言すれば、混合物の比重を ρ とし、混合物の摩擦損失を水の水頭であらせば、その値は水の摩擦損失の ρ 倍になる。

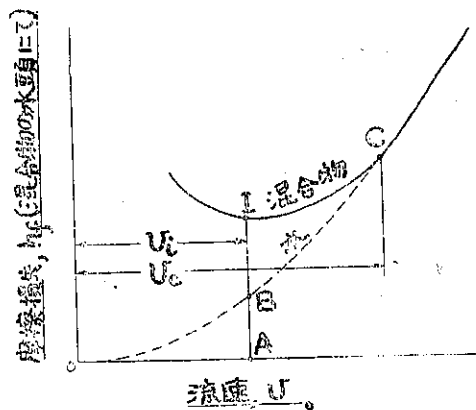
この事を證明する實驗結果は後に述べるが、この曲線を假りに水平輸送管の特性曲線と稱する。土砂が極めて微細で所謂ヘドロの類であれば、輸送に採用される流速 (1 m/sec 以下といふ様なことは殆ど無いであらうから) では常に C 點以上の状態があらはれ、土砂が粗くなれば IC 間の状態があらはれる。

ある大さの粒子のある混合割合に於て、I に相當する流速 v_i (以下最小速度と稱する) 及び C に相當する流速 v_c (以下限界速度と稱する) が何程であるか、又 AI と AB の比が何程であるかなど知り度い事である。

第 3 節 我國に於ける實驗

我が國で今の問題に關する實驗は、京都帝大⁽⁵⁾と日立製作所⁽⁶⁾とで行はれたゞけの様である。何れの場合も微粒子に對し C 點以上の状態 (以下 C 點を限界點、C 點以上を完全浮游の状態と稱する) が例外なく實現されることが證明された。しかし粒子が微細であるため IC 間の状態は實驗されなかつた。換言すれば實驗は粒の浮游

圖-3.



(4) P. Durepaire: Dredging Research in France. The Dock and Harbour Authority. July, 1939.

(5) 三雲英之助外 2 名: 微粒鑽石の水力輸送に就て. 日本機械學會誌, 昭. 8. 12.

(6) 堀田正雄: サンドポンプの研究. 日立評論, 昭. 14. 7.

状態のみに於てなされた。以下具体的に紹介する。

京大の實驗では、被輸送物は黄鐵礦の粉末で比重 3.5, 平均寸法 0.1 mm である。管の直径は 42 mm であり、實驗したレイノールド数 R の範圍は 26 000~159 000 である。但し第 1 章で $R=ud/\nu$ の u は粒の速度を、 d は粒の寸法をあらはしたのに対し、今の場合 $R=vD/\nu$ の v は管内の流速を、 D は管の寸法をあらはすこと勿論で、以下すべてさうである。

混合物の最大濃度は 31% (混合物比重 1.28) で、それに對しなされた實驗中最低速度は 1.11 m/sec, 又濃度 27% (比重 1.24) に於ける最低速度は 0.95 m/sec である。故に次の事が言へる。

「平均 0.1 mm 程度の粒子は濃度 30% 位まで、流速 1 m/sec 以上で完全浮游が實現される。1 m/sec 以下でも實現されるかも知れぬが、實驗の範圍外で不明である」上の 1 m/sec を粒子の沈降速度 (比重が 2.65 でなく圖-2 からはわからぬから別に計算した) と比較すれば表-2 の如し。

表-2.

濃度 (%)	沈降速度 (m/sec) v_0	限界速度 (m/sec) v_c	v_0 に対するレイノールド数	比 v_c/v_0
30	0.012	<1.00	< 42 000	< 84.3

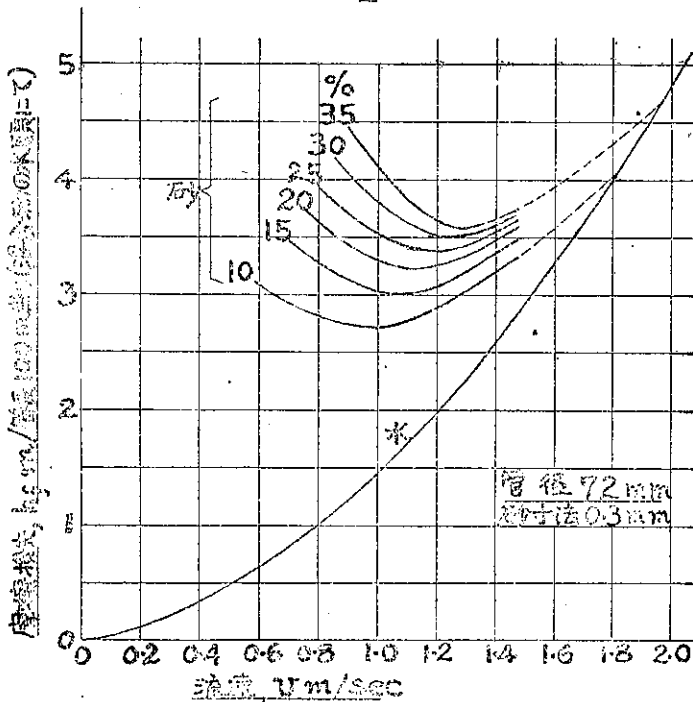
これ以下の比でも完全浮游が實現されると思はれるが、實驗の範圍外で不明である。日立の實驗では粒が更に微細で、實驗の範圍は限界點より更に遠いと思はれるから、これは省略する。

第 4 節 フランスに於ける實驗

普通濃液に起る土砂に對する實驗は、多く限界點以下即ち圖-3 の IC 間で行はれてゐて、その代表的なものはフランスに於ける實驗のである。この結果は對數方眼紙にプロットされてあるが、それを普通方眼紙にプロットすれば圖-4 の通りである。この原圖の曲線群はあまり綺麗で、多分に修飾されたものゝ様に思はれるが、これをそのまま利用し概要を紹介する。

管の内径は 72 mm で、砂粒の寸法は 0.3 mm, 比重 (見掛け) は 1.945 である。濃度 10% 及び 30% に對する最小摩擦損失を與ふる流速、即ち最小速度、並に限界點に於ける流速、即ち

圖-4.



限界流速、及び之等と沈降速度との比を掲ぐれば表-3 の如し。

表-3.

濃度 (%)	沈降速度 (m/sec) u	最小速度 (m/sec) v_L	v_L に対するレイノールド数	比 v_L/u	限界速度 (m/sec) v_c	v_c に対するレイノールド数	比 v_c/u
10	0.045	1.00	73 000	22.2	1.80	130 000	40.0
30	0.045	1.28	92 000	28.4	2.00	144 000	44.5

この砂の寸法 0.3 mm といふのは、ほどそれ位に篩ひ揃へたのか、平均がそれ位なのか不明であるが假りに後者として、表-2 と比較する。表-2 から限界速度は沈降速度の 84.3 倍以下であることがわかる。この数値は表-3 30% の場合の 44.5 とあまり懸け離れた数字でもない。最小速度の點に於ける混合物の摩擦損失と水の夫との比は表-4 の如し。

表-4.

濃度 (%)	比
10	1.93
30	1.58

第 5 節 アメリカに於ける實驗

この問題に關し、アメリカでは相當多數の實驗が行はれてゐる。しかし手許で利用し得る實驗結果は Howard の實驗⁽⁸⁾ だけである。之は砂利と砂につ

て行はれたが、先づ砂の場合を紹介する。管徑 100 mm, 砂の平均寸法 0.38 mm で實驗結果は圖-5 の通りである。但し原本には摩擦損失を水の水頭であらしてあるのを、圖-5 では混合物の水頭であらし、且つ尺度呎を米に直した。圖-5 は圖-4 の様に綺麗でないから、最小速度及び限界速度が明らかでないが、砂の濃度 10% 及び 30% に對し、最小速度及び限界速度を推定し、沈降速度との比をとれば表-5 の如し。

最小速度の點に於ける混合物の摩擦損失と水の夫との比は表-6 の如し。

砂利の試験では砂利の平均寸法 2.6 mm で、實驗結果は圖-5 にある。之によれば、最小速度は濃度 15% に對してはつきりしてゐて表-7 の通りであるが、限界點は實驗の範圍からあまり遠いので推測出来ぬ。

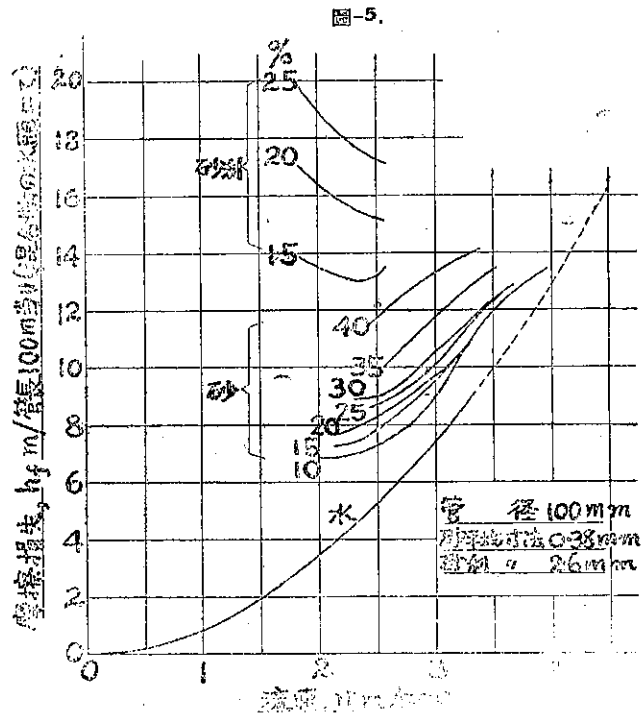


圖-5.

(8) G. W. Howard: Transportation of Sand and Gravel in a Four Inch Pipe. Proceedings of the A. S. C. E. Sept., 1938.

之に關する討論は同誌の下記各號にあり。Dec. 1938, Jan. 1938, Feb. 1939, March. 1939. これ等に從來アメリカで行はれた幾多の實驗が斷片的に引用してある。

表-5.

濃度 (%)	沈降速度 (m/sec) u	最小速度 (m/sec) v_i	v_i に対するレイノールド数	比 v_i/u	限界速度 (m/sec) v_c	v_c に対するレイノールド数	比 v_c/u
10	0.06	1.80	180 000	30.0	4.20	420 000	70
30	0.06	2.30	230 000	38.3	4.80	480 000	80

表-6.

濃度 (%)	比
10	2.2
30	2.0

表-7.

濃度 (%)	沈降速度 (m/sec) u	最小速度 (m/sec) v_i	v_i に対するレイノールド数	比 v_i/u
15	0.53	2.30	230 000	7

この比は砂の場合に比し非常に小であるが、元來最小摩擦水頭の點では、相當部分の粒子、殊に大粒のものは管底を轉動又は摺動するものであるから、最小摩擦損失を與ふる流速即ち最小速度と沈降速度を關係づけるのは“沈降”といふ字義の關する限り妥當でない。しかし管中の水の速度と、管底を轉動又は摺動する粒子の速度の差を Δv とすれば、

$$\Delta v = K \sqrt{\mu d (s-1)^{0.9}}$$

但し K : 常數 μ : 摩擦係數
 d : 粒の直徑 s : 粒の比重

となり、これは d, s に関しては (1) の沈降速度の式と同じである。即ち Δv の式と沈降速度の式とは、ディメンション的に同じであるから、沈降速度を以て轉動又は摺動の目安としてもよろしい。たゞ最小速度の點では、砂と砂利とで流動の状態が異なるから、 v_i/u にこんな差異が起るのであつて、一定の管徑に對し、砂利の場合この比が小であることは、管底にある砂利の頭部が流速の大きい部分に突出し、衝撃を受け轉動することにより輸送されるものと想像される。限界點に於ては粒子は全部浮游状態にあるのであるから、これに對する流速と沈降速度を關係づけることはそのまま正しく、京大の 0.1 mm の粒でなされた實驗結果と、フランス及びアメリカで 0.3 及び 0.38 mm の粒でなされた實驗結果が、非常に懸け離れてもゐないから、限界點に於ては粒の大小に拘らず、比較的一様な比になるのではないかと考へられる（後に述べる流速と管徑に關するレイノールド数の相連を度外視すれば）。

表-8.

濃度 (%)	比
15	2.7

この最小速度に於ける混合物の摩擦損失と水の夫との比は表-8 の通りである。

第 3 章 水平管に於ける實驗結果の實際の排砂管への應用

第 1 節 管徑相違の影響

以上の實驗の結果を、實際の排砂管に如何にして適用するかを考へる。これを考へる基礎となることに次の様な事實がある。

(1) アメリカの Blatch の實驗⁽¹⁰⁾によれば、徑 25 mm の管で平均寸法 0.68 mm の砂を送るに 1.5 m/sec の

(9) 荒木 道: Pump Dredgers. 日本機械學會誌, 大正 5 年 10 月

(10) Proceedings of the A. S. C. E. Dec., 1938. p, 2088 に引用

流速で充分である。

(2) 同実験で、径 75 mm の管で平均寸法 0.65 mm の砂を送るに 2.55 m/sec の流速で充分である。

(3) アメリカの D.L. Neuman の意見⁽¹¹⁾によれば、径 300 mm の管で砂を普通の濃度で送る場合、流速が 4.5 m/sec になれば砂がほぼ浮游状態で流れる。

(4) 同人の意見で、径 600 mm の管では上記の流速は 5.7 m/sec に達する必要がある。

これ等に於て濃度がわからず、(3)、(4)に於ては粒度も不明であるから、厳密に同一条件の下の事實でないが、管が大になるに従ひ、必要な流速が増すことが窺へる。この原因が何であるか、これを解明した記事を文献に見出し得ないが、次のことは考へられる。

即ち管が大となるほどレイノールド数 $R = vC/\nu$ (但し v = 流速, D = 管径, ν = 水の運送粘り係数) が大となり R が増す程流れの亂れが大となる。故に同じ流速でも R が小であれば、速度分布が圖-6 の様に拋物線形となり R が増せば圖-7 の様に直線に近づく。圖-6 の如くであれば、粒子の上と下で流速が違ふから粒子は右廻りの回轉を受け、揚力を與へられ浮揚し易くなるといふ事が考へられる。よつて試みに上の 4 例のレイノールド数と流速を對數方眼紙にプロットすれば圖-8 の如くなり、偶然ではあらうが 4 點が不思議なほど同一直線上に乗る(上

圖-6.

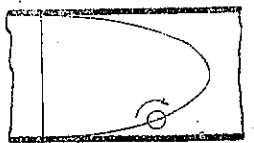


圖-7.

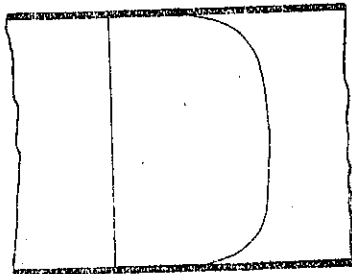
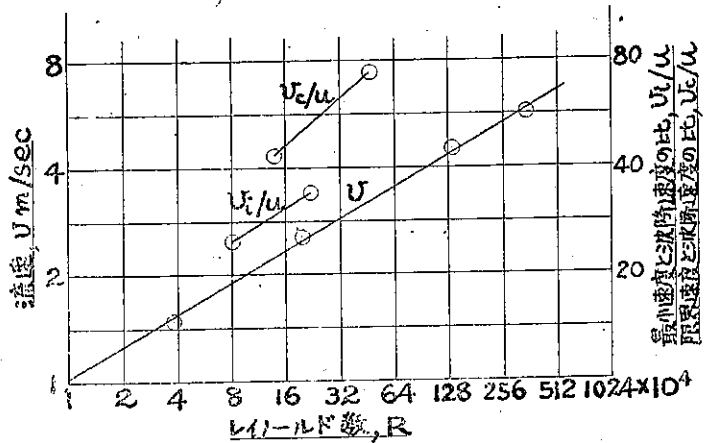


圖-8.



方の短線 2 本は別なもので後に述べる)。故に或る R に相當した適當な流速を v とすれば次の關係を得る。

$$v = aR^m \quad a, m \text{ は常數であるが、これを圖-8 から求めると次の式を得る。}$$

$$v = 0.059 R^{0.308}$$

以下この式を使ふのに、係數値の必要は起らぬからこれを省き、指數値の 0.308 はあまり詳しすぎるからこれを 0.3 とし、土砂の粒度一定の場合次の式を得る。

$$v_{\text{粒度一定}} \propto R^{0.3} \dots \dots \dots (3)$$

斯く R と v が關係づけられたが、上に言つた速度分布と粒の回轉の問題は、 R と v に或る規則的な關係があるのではないかと思付く迄の道程に過ぎぬから、速度分布と同轉に關する上の想像の正否は、もはや問ふ必要

(11) Proceedings of the A. S. C. E., Dec. 1938, p. 2089

はない。

扱てこの式によれば、 R が小なるほど v が小にてよい事になる。 R の小さくなる原因が管径の減少にあればこれは當然と考へられるが、速度の減少にありとすれば不合理であるが、そんな事は起り得ない。

即ち (3) 式の R にこれが構成因子を入れば、

$$v = a \left(\frac{vD}{\nu} \right)^{0.3}$$

となり、 D が與へらるれば v がきまり、一定の管に對しては唯一の流速があり得るのみである（これは勿論圖-8の基礎となつた Blatch の實驗及び Neuman の説の根柢をなす、或る狭い範圍の土質及び粒度に於てのみ成立つ事であるが）。

扱て第 2 章に紹介した實驗結果を綜合すれば表-9 の通りである。

表-9.

實驗源	管径 (mm)	被輸送物	粒の平均寸法 (mm)	濃度 (%)	沈降速度 (m/sec) v_s	最小速度 (m/sec) v_i	v_i に對するレイノールド数	比 v_i/u	限界速度 (m/sec) v_c	v_c に對するレイノールド数	比 v_c/u
京大	42	鑽石粉	0.1	30	0.012	—	—	—	< 1.00	< 42 000	< 84.3
フランス	72	砂	0.3	10	0.045	1.00	72 000	22.2	1.80	180 000	40.0
"	"	"	"	30	"	1.28	92 000	28.4	2.00	144 000	44.5
アメリカ	100	"	0.38	10	0.060	1.80	180 000	30.0	4.20	420 000	70.0
"	"	"	"	30	"	2.30	230 000	38.3	4.80	480 000	80.0
"	"	砂利	2.6	15	0.330	2.30	230 000	7.0	—	—	—

表-10.

管径 (mm)	最小速度		限界速度	
	レイノールド数	比 v_i/u	レイノールド数	比 v_c/u
72	82 000	25.3	187 000	42.2
100	205 000	34.1	450 000	75.0

この内フランス及びアメリカの實驗に於て、夫々砂の 10% と 30% との平均を求むれば表-10 の通りとなる。これによれば、最小速度及び限界速度共、流速と沈降速度の比が、明かに 72 mm 管より 100 mm 管の方が大きくなつてゐる。

このことは上述の R と v の關係が正しいとすれば當然である。 R と v_i/u 及び R と v_c/u の關係を圖-8 上方にプロットし、2本の短線で結んである。この短線の傾きを見出すに、比 $= aR^m$ とおき、 v_i/u の線に對しては $m=0.326$ 、 v_c/u の線に對しては $m=0.482$ である。これ等は夫々わづか 2 點から計算した値で、數値的にはあまり當てに出來ぬが、圖-8 長線に對する $m=0.308$ と比較すれば、傾向的一致を示すのみでなく、數値的にも甚しい違ひとは言へぬ。

この意味に於て、二つの實驗及び本節のはじめに擧げた四つの事實は、互に他を裏書きする様な關係にあり、夫々信用が増して来る。兩實驗では粒の大きさを γ 異にし、嚴密に言へば、次節に述ぶる様な風にこれを考慮せねばならぬが、茲では省略した。

さて (3) 式は、最小速度及び限界速度の何れに對し適用されるかを明言しなかつたが、この式の基礎となつた四つの事實の γ 漠然たる、從つてそれだけに比較的一般的な性質に鑑み、又圖-8 の 2本の短線の比較により、

最小速度も限界速度も管径の変化により同じ傾向の変化をなすことが察せられ、更にその変化の指數たる m が甚しく相違せぬ様であるから、茲に (3) 式は最小速度及び限界速度の兩者に適用せらるゝものとする。

茲に斷つて置かねばならぬ事があるが、上に言つたことは後に本章第 3 節に述べる理由により、粒塊が管に對して比較的小さい時、例へば直徑比が 1/10 以下といふ様な場合にのみ適用されるのであつて、この寸法比が増せば適用されぬ。

上の法則により、一つの管徑に對する實驗の結果を、實際の排砂管に應用し得る事になつたが、その基準となる實驗の結果としては、フランスの實驗の結果が最もはつきりしてゐるから之を採用することとし、表-9 の 2 行と 3 行の平均値の内、今後の計算の基準として必要な數値のみを表-11 に掲げる。但し速度比は小數點以下を切捨てる。

表-11.

沈降速度 (m/sec)	最小速度に對する レイノールド數	最小速度と沈降速度 の 比	限界速度に對する レイノールド數	限界速度と沈降速度 の 比
0.045	82 000	25	137 000	42

第 2 節 土砂粒塊の大きさ相違の影響

表-9 を見るに、砂利の場合最小速度が案外小さいことが目を惹く。即ち平均寸法 2.6 mm の砂利で濃度 15 % のとき最小速度 2.3 m/sec であり、濃度 15 % の砂の約 1.8 m/sec と大差なく、又最小速度は沈降速度の 7 倍に過ぎぬ。之は主として第 2 章第 5 節砂利の處で述べた理由によるものと思ふが、兎に角最小速度は沈降速度の割合では増さぬ。換言すれば、 α を 1 より小なる或る數とする時、 $v \propto u^\alpha$ (v は最小速度、 u は沈降速度) である。之を $v \propto u^{\alpha-1}u$, $v/u \propto u^{\alpha-1}$ と書き換へると $\alpha-1$ は負であるから、 v/u は u が大なる程小となる。 $\alpha-1=n$ 即ち $v/u \propto u^n$ と置き實驗結果から n を求める。 u が大なるほど v/u が小になる原因が單に粒塊の轉動にあるとすれば、 v/u は粒塊の管底からの出張り、即ち粒塊の寸法 d の函數 (管徑一定として) と考へた方が合理的の様であるが、最小速度に於ける粒塊の運動は轉動のみでなく浮游もあり、解折し難い複雑なものであるから、茲では上の $v \propto u^\alpha$ の意味に於て v/u を u の函數と考へることとする。然し勿論 u は d の函數であるから、間接には v/u は d に關係してゐる譯である。即ち濃度 15 % の砂に對する最小速度は表-9 に無いが、上に言つた通り約 1.8 m/sec で $v/u = 1.8/0.06 = 30$ であるから次の式を得る。但し最小速度がはつきり實驗に出てゐないから不正確である。

$$\frac{7}{30} = \left(\frac{0.88}{0.06}\right)^n$$

これから $n = -0.852$ を得る。

上の實驗の結果は不明確だから、フランスの實驗を利用してみる。表-9 を参照し、之では管徑 72 mm、砂の寸法 0.3 mm、沈降速度 0.045 m/sec、圖-4 から 15 % 濃度に對する最小速度 1.1 m/sec である。本章第 1 節の (3) 式を應用し、この最小速度をアメリカの實驗に用ひた管徑 100 mm に引直して見る。引直した最小速度を v_1 とすれば次の式及び之を解いて v_1 の値を得る。

$$\frac{v_1}{1.1} = \left(\frac{0.1 v_1}{0.072 \times 1.1}\right)^{0.3}$$

$$v_1 = 1.27 \text{ m/sec}$$

$$v/u = 1.27/0.045 = 28.2$$

これから n を求めると、

$$7/28.2 = (0.33/0.045)^n$$

$$n = -0.699$$

前の -0.852 との平均は -0.775 となる。元來こんな少數の資料から n を求めるのは無理であるが、他に資料も無いので止むを得ず暫定的に上の値を切上げて $n = -0.8$ とする。然らば一定の管徑に對して次の式を得る。但し v は最小速度、 u は沈降速度である。

$$(v/u)_{\text{管徑一定}} \propto u^{-0.8} \dots\dots\dots (4)$$

この式を書き換へると次の様になる。

$$v/u = 1/u^{0.8} \quad r_2 \propto u^{0.2} \propto \left[\left(\frac{d}{C} \right)^{0.5} \right]^{0.2} = \left(\frac{d}{C} \right)^{0.1}$$

但し C は第 1 章 (1) 式の C である。即ち C の變化を度外視すれば、 d が増すに従ひ v は極く僅か増すことになる。 C の變化を考ふるに第 1 章圖-1 及び圖-2 からわかる様に、 d が 5 mm 以上では (比重 2.65 の場合) C は常數であり、5 mm 以下では d が小さい程 C が大きい。だから 5 mm 以上では d と共に v は極く僅か増すが、5 mm 以下ではその増し方がやゝ大きいといふ事になる。内務省土木試験所の實驗⁽¹²⁾によれば $d=2.5 \sim 10$ mm の石炭粒を開水路に於て掃流輸送 (浮游せず轉動又は招動させて流すこと) をせしむる時、輸送量は粒の大きさに無關係、換言すれば $v \propto d^{0.0}$ なる結果を得た。之は上の指數 0.1 であるのとあまり差異が無いのは意を強うする處である。この實驗から推し、砂利のみに對しては r_2 を d に無關係とした方がよいと思ふが、(開水路と管との相違も考へねばならぬが)、今は砂利、砂、泥のすべてをカバーする式を作らうとするのであり、微粒子は最小速度に於ても若干浮游すると考へられるから (4) 式は先づ妥當な式と思ふ。

限界點に於ては土砂は完全に浮游状態にあるから、限界速度は沈降速度に比例すべきである。即ち限界速度を見出す場合は (4) 式に類することは考慮の必要が無い。

第 3 節 濃度の影響及び管と粒塊の寸法比の影響

濃度が變化すれば、最小速度及び限界速度が如何に變化するかといふ事も研究すべき問題であるが、實際に於ては、設計に當り種々の濃度に對し計算する事も起らず、又ポンプ船の使用に當り、設計以上の濃度は動力の制限 (設計以上の濃度を維持するには流速従つて動力を増すを要す) から實現困難だから (管長が設計より減じた場合は濃度が増し得るが、この時は“維持し得る最大の濃度”に自然落付く) この問題は比較的重要なでない様に思はれるし、又資料も少いから濃度の増加による必要流速増加の模様は、圖-4 及び圖-5 から窺ふに止め、この問題を法則化しやうとは試みぬ事にする。そして今まで導いた事柄は、粒度一定の實驗では濃度 10 及び 30 % の結果の平均を、又變る粒度の實驗では濃度 15 % の結果を基礎としたものであるから、大體ポンプ船に於て普通起る濃度を目標としたものである。

次に粒塊の寸法と管の寸法との比の問題がある。例へば直徑 100 mm の塊は直徑 300 mm の管では實用上の濃度に於て送り得ないが、600 mm の管では容易に送り得る。即ち一定の管に對し實用上送り得る粒塊の寸法に最大限があるわけである。

(12) 佐藤清一氏外 1 名：開水路に於ける石炭粒の掃流運搬に關する實驗報告。内務省土木試験所報告、昭 17. 2.

本章第 1 節で、一定の粒塊を送るに、大きい管ほど大きい流速を必要とする事を述べたが、之は管に對する粒塊の寸法比が、上の限界より大分小さい時の事で、寸法比がこの限界に近づけば、一定の寸法の粒塊に對し、小さい管程大きい流速を必要とする事が想像される。即ち限界比附近では第 1 節に述べたと逆の事が起る。この事と第 1 節とを綜合してはじめて任意の粒塊、任意の管徑に對する流速がわかる譯であるが、今は資料が無いから之以上の點に觸れぬこととする。

第 4 節 摩擦損失

最小摩擦損失を與ふる流速、即ち上に言ふ最小速度に於て、混合物の水頭であらした混合物の摩擦損失と、水の摩擦損失との比は、表-4, 6, 8 にある。表-4 及び表-6 に於て夫々濃度 10% と 30% の平均を探り、濃度 15% に對する表-8 と共に纏むれば表-12 の如し。

即ち普通の濃度では粒が大きいほどこの比が大となつてゐる。實際の大きな管に對しこの比がどうなるかを調べるに、手許にある唯一の資料⁽¹³⁾によれば、ポンプ船 Alpha 號に於て 760 mm 管で排砂管の特性曲線は圖-9 の通りである。

圖-9 では最小速度の點は明瞭でないが、濃度 20% に對しては、この比が 10 以上に上る様である。本船は唯 Mississippi 河で用ひられたといふ事が判るだけで、土砂の粒度が不明であるから、直ちに上の表と比較は出来ぬ

表-12.

管 徑 (mm)	粒の寸法 (mm)	比
72	0.3	1.75
100	0.38	2.1
100	2.6	2.7

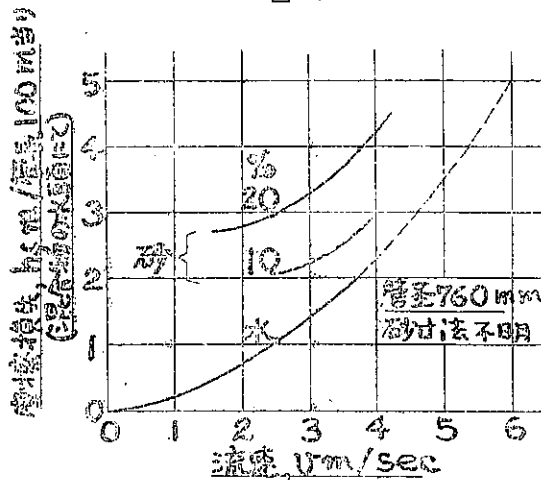
が、兎に角表の値に比し非常に大きい。この相違の原因が管の大きさの相違にあるか、粒度の相違にあるかわからぬが、前者ではないかと考へられる。即ち管徑が違へばこの比が大いに違つて來ると考へられるが、資料が無いのでこの比の變遷を窺ふを得ぬのは残念である。

然し元來最小速度の點は極めて不安定で、流速が之より一寸でも落ちれば管は閉塞するので、實際の浚渫船でこの速度を用ひることは出来ず、之より相當高い流速で運轉する。換言すれば、流速が一定ならば、それを最小速度とする濃度より低い濃度で運轉する。即ちヘドロ又は微細砂以外の土質では、圖-3 の I と C の中間で運轉する。I 點でこの比が如何に違つても、C 點に於て比は 1 になるのであるから、IC の中間に於てこの比はあまり違はなくなる。

故に圖-4, 5, 9 から判斷して、ヘドロ及び微細砂以外の土質及び普通の濃度で、混合物の水頭であらした摩擦損失は、水のみ摩擦損失の 3 割増し位と考へて大過あるまい。

以上は土砂が完全浮游の状態にない場合の事であるが、ヘドロ又は微細砂などで相當の流速があり、又は普通

圖-9.



(13) Proceedings of the A. S. C. E., Dec., 1938. p. 2080 に引用しあり。

の土砂でも流速が非常に大であり、土砂が完全浮遊の状態にあれば、混合物の摩擦水頭は水のそれに全く等しい。即ち上記の比が 1 になることは本章第 3 節で述べた通りである。そして実際の土砂及び排砂管に於て、この限界速度が何程であるかを見出すには、表-11 と (3) 式を用ひて計算するのであるが、その方法は次に述べる。

第 5 節 計 算 例

表-11 の実験結果を基準とし、(3) 及び (4) 式を用ひ、実際の土砂及び実際の排砂管に對する最小速度及び限界速度を見出す方法を、計算例に示す。

例 1. 砂の平均寸法 0.4 mm, 沈降速度 6.5 mm/sec, 管徑 500 mm に對する最小速度及び限界速度を求む。

先づ最小速度であるが、表-11 では沈降速度 45 mm/sec, レイノールド數 82 000 に對し、最小速度と沈降速度の比が 25 である。必要な最小速度を v_i とすれば $R = v_i D / \nu$ であるが、 v_i を mm/sec, D を mm, ν を mm^2/sec であらはせば ν は約 1.0 であるから $R = v_i D$ である。故に (3) 及び (4) 式から次の式を得る。

$$\begin{aligned} v_i &= 65 \left[25 \left(\frac{65}{45} \right)^{-0.6} \right] \left(\frac{500 v_i}{82\,000} \right)^{0.3} \\ &= 65 \times 18.6 \left(\frac{500 v_i}{82\,000} \right)^{0.3} = 1\,210 \left(\frac{500 v_i}{82\,000} \right)^{0.3} \end{aligned}$$

先づ右邊の v_i に 1 210 を代入し、これから出した v_i の値を又右邊に代入し、結局代入した値と算出した値が一致するまで之を繰返し次の値を得る。

$$v_i = 2.85 \text{ m/sec}$$

次に限界速度 v_c であるが、限界點に於ては、本章第 2 節末尾に述べた様に (4) 式は考慮の必要がない。よつて表-11 と (3) 式とから次の式を得る。

$$v_c = 65 \times 42 \left(\frac{500 v_c}{137\,000} \right)^{0.3} = 2\,730 \left(\frac{500 v_c}{137\,000} \right)^{0.3}$$

前と同様の計算方法により次の値を得る。

$$v_c = 7.30 \text{ m/sec}$$

上に得た二つの値は大體あり相な値であるが、本章第 4 節に言つた事により最小速度 2.85 m/sec は不安定な流速であり、又限界速度 7.3 m/sec は摩擦損失の関係から過大と思はれるから、他の條件を考慮して兩者の中間に適當な流速を選ぶべきである。

例 2. 粘土塊平均寸法 100 mm, 比重 2.2 として沈降速度 1.88 m/sec なり、管徑 500 mm に對する最小速度及び限界速度を求む。

先づ最小速度は次の如し。

$$\begin{aligned} v_i &= 1\,880 \left[25 \left(\frac{1\,880}{45} \right)^{-0.6} \right] \left(\frac{500 v_i}{82\,000} \right)^{0.3} = 1\,880 \times 1.26 \left(\frac{500 v_i}{82\,000} \right)^{0.3} \\ v_i &= 7.47 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

次に限界速度は次の如し。

$$\begin{aligned} v_c &= 1\,880 \times 42 \left(\frac{500 v_c}{137\,000} \right)^{0.3} = 79\,000 \left(\frac{500 v_c}{137\,000} \right)^{0.3} \\ v_c &= \text{約 } 900 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

かゝる突飛な數字が正しいとは考へられないが、兎に角非常に大きな流速を必要とすることはわかり、そんな流

速は勿論實現出来ない。即ちかゝる大きな粘土塊を、相當の濃度で完全に浮遊せしめて輸送することは不可能である。

例 3. 砂の平均寸法 0.2 mm, 沈降速度 36 mm/sec, 管徑 500 mm に對する最小速度及び限界速度を求む。先づ最小速度は次の如し。

$$\begin{aligned} v_i &= 26 \left[25 \left(\frac{26}{45} \right)^{-0.8} \right] \left(\frac{500 v_i}{82000} \right)^{0.3} \\ &= 26 \times 38.3 \left(\frac{500 v_i}{82000} \right)^{0.3} = 1010 \left(\frac{500 v_i}{82000} \right)^{0.3} \\ v_i &= 3.19 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

次に限界速度は次の如し。

$$\begin{aligned} v_c &= 26 \times 42 \left(\frac{500 v_c}{137000} \right)^{0.3} = 1090 \left(\frac{500 v_c}{137000} \right)^{0.3} \\ v_c &= 1.96 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

これを上の最小速度と比べると、最小速度の方が限界速度よりも大きく不合理である。これは比較的大きな粒の例から (4) 式を導いた爲、(1) 式は今の例の様な小さな粒には適用されぬ爲である。限界速度の方は (3) 式だけで計算され、比較的正確な (4) 式に無関係だから、最小速度よりも信頼し得る。然らば 1.96 即ち約 2 m/sec といふ様な流速は普通以下の流速であり、かゝる微粒子では普通の流速で既に限界速度に達するから、最小速度を見出す必要は起らず、従つて上の矛盾もあまり害はない。

第 4 章 傾斜管内の流速と摩擦損失

傾斜管は垂直管と水平管の中間であるから、その特性も兩者の中間にある。上向き垂直管では、水平管に於ける最小速度と限界速度が一致し、圖-3 の I 點と C 點が重なる。しかしてこの速度は、水平管に於ける限界速度は勿論最小速度より遙かに低い(後に述ぶる様に塊が非常に大きい場合は別である)。従つて傾斜管でも水平管に比し流速は低くてよしい。而して矢張り最小速度と限界速度があり、水平管に近づくほど兩速度は離れて来る。

傾斜管に於て流速を如何に選ぶかといふに、後に述ぶる如く土質によつて異なるが、傾斜流の垂直分速度が、被輸送物の沈降速度の 2~3 倍位でいふだらう。この考へを傾斜管の特別な場合たる水平管に推し進めると、水平管では物を送り得ないといふ事になり不合理であるが、この點に關する考への省略は、傾斜管の流速の選定に對し、セーフサイドに働かから 差支へないだらう。尤も傾斜管の水平となす角度が 10 度とか 5 度とかいふ様に小になり、極く水平管に近づけば上の省略は許されなくなるが、ポンプ船に於て傾斜管の問題は吸入管の問題であり、吸入管は一般に水平と 30~45 度傾き、傾斜流れの垂直分速度が相當大きいから上の様に考へてよしい。

例へば傾斜角を 35 度とし、前章第 5 節の例 1 の砂に對する限界速度を計算すれば、

$$v_c = \frac{0.045 \text{ m/sec}}{\sin 35^\circ} = 0.078 \text{ m/sec}$$

であるから、普通の流速で砂は浮遊状態で流れ、従つて混合物の水頭であらした摩擦損失も水の夫れと同じである。同節例 2 の粘土塊に對する限界速度は

$$v_c = \frac{1.88 \text{ m/sec}}{\sin 35^\circ} = 3.26 \text{ m/sec}$$

で、大體粘土塊に對する普通の流速以内であるから、完全浮游が成立つ。

この例から見て、吸入管に於ては大抵の土砂塊に對し完全浮游が成立つことがわかる。然し第 1 章の終りの方で言つた様に、管内で占める土砂の斷面積を考慮せねばならぬ。同章の符號を用ひるに粘土塊では i は 10% 以下、 j は 20% 以下でなければならぬとすれば、(2) 式より $v_m/v_w=0.444$ 、之は傾斜管に沿ふての主流の速度に就てであるが、垂直分速度についても同じであるから、 $(N-1)/N=0.444$ 、之から $N=1.8$ 、即ち水の上向き分速度は $1.88 \times 1.8=3.38$ m/sec、從つて主流の水の速度 v_w は $3.38/\sin 35^\circ=5.9$ m/sec 以上でなければならぬことがわかる。上に垂直分速度を沈降速度の 2~3 倍にすると言つたのはこの邊の考へからである。この 5.9 m/sec といふ流速は、直徑 100 mm 程度の粘土塊に對しては、水平管に於て當然必要とせらるゝ値であるが、實際に於ては動力の制限から、之程高速でない事が多い。例へば v_w を 5 m/sec とすれば垂直分速度は $5 \cdot \sin 35^\circ=2.88$ m/sec、土砂の垂直分速度は $2.88-1.88=1$ m/sec、土砂の主流速度 v_m は $1/\sin 35^\circ=1.74$ m/sec、從つて (2) 式から j は 24% となる。以上は管底に於ける土塊の轉動を考へぬ場合であるが、實際は轉動により輸送が若干助けられるから、 $v_w=5$ m/sec でも j は 20% 位ではないかと想像される。若し傾斜が 45 度にもなれば、上の 5.9 m/sec が 4.8 m/sec となり、之位の流速は粘土塊に對しては、排砂管に於て最小限度に必要なから吸入管に於ても實現され、土塊停滯の心配はない。

塊が非常に大きくなると、之を浮游状態で流すことが困難となり、轉動させねばならぬ事になる。然るに傾斜管が垂直に近づく程轉動は出來難くなり、垂直管では全然浮游状態で流すより外ない事になる。斯く傾斜管では水平管に比し轉動に頼り得る度合が減るので、塊が非常に大きくなると、水平管より却つて大きな流速を必要とし、管徑を小さくせねばならぬ。

餘り大塊でない限り、傾斜管の流速は水平管より小さくて宜しいから、一般に吸込みの真空を下げる爲、吸入管は排砂管より大きくする方が宜しい。

流速のみから考へると、吸入管は垂直に近い程宜しい譯であるが、あまり立つて來ると、水底の地盤に及ぼすカッターの壓力が減り、且つ波浪の際ラダーで船體を突上げる力が増すから、45 度以内位に止めるのである。

吸入管に於ては大抵の場合に完全浮游が成り立つから、混合物の水頭であらした摩擦損失は水の夫れに等しい。計算の結果完全浮游が成立たぬ特殊の場合は、流速の垂直分速度と沈降速度の比が小さい度合に應じ、水の摩擦損失に若干の割増しをしたらよいだらう。

第 5 章 排砂管に於ける土砂含有量の測定法

ポンプ浚渫船に於て、各瞬間に於ける排砂管中の土砂含有量を測定する方法は知られてゐない。運轉手は吸入管の真空度を目安として船の操縦をする。然し真空度は吸入口閉塞の度合により多く左右されるもので、含有量に影響するゝ事は少い。例へば含有量零でも吸入口が閉塞せらるれば真空は上昇する。勿論熟練した運轉手は、吸入口の閉塞度を適當に選ぶことにより、含有量を最大ならしむる様努むるも、如何なる閉塞度即ち真空度が最高含有量を與へるかは、土質、水深、流速等の狀況により一様でなく的確な判斷は困難である。今若し各瞬間に於ける含有量を直接知り得るならば、何等複雑な判斷を要せずして、常に含有量を最大ならしむる様に船の操縦をなすことが出來て、能率の向上に資する處絶大であらう。又ポンプ船の設計に當り、排砂管の摩擦水頭を豫知することは最も重要な事であるが、實際の運轉に於て土砂の含有量がわからぬから、何%の含有量の時摩擦が何程といふ様な實驗結果の利用し得るもの無く、摩擦水頭の豫知は不可能である。若し各瞬間に於ける含有量を知

ることが出来るなら、この點が解決され、ポンプ船の設計が完全に近づく。

かゝる要求に應ずる爲、筆者は含有量の瞬間測定法を得べく考案を重ね、種々の迂餘曲折を経た後、之を可能ならしむる極めて簡単な理論に到達した。圖-10 につき之を説明する。圖-10 は自動秤の上に水を入れた圓筒を載せ、水中を石塊が落下する處を示す。この時秤の針は、圓筒と水と石塊の合計重量を示すのである。石が筒の底に達してからなら、この事は自明の理であるが、石が途中にあつても同じだといふ事には説明を要する。先づはじめから考へるに、石を水に入れた瞬間には石の重さは秤にあらはれぬ。石が落下速度を増すに従つて針が少しづつ動き、速度が沈降速度に達したら、その後は石の重さが全部秤にあらはれる。之は次の様に推理せられる。

(1) 石は等速運動をなすから、之に働く力は平衡してゐる。即ち石の重さは水の抵抗に等しい。

(2) 一方水は、石に押除けられて局部的には動くが全體的には動かぬ(等速度で動いてゐても同じで、要するに速度の變化がなければ同じである)から、之に働く力も平衡してゐる。

(3) 水に力を及ぼすものは、重力と筒と石の三者だけである(外に大氣壓もあるが之は筒底の大氣壓と打消し合ふから考へぬ)。

(4) 故に筒が水に及ぼす力、換言すればその反力たる水が筒に及ぼす力は、他の二つの力、即ち水の重さと石の重さの和に等しい。だから石の重さも秤にあらはれる譯である。

筆者はこの事を確むる爲、直徑 60 mm、高さ 1200 mm の圓筒を作り、種々の寸法、種々の比重、種々の數量(大きいものは 1 個又は數個、砂等は數百瓦)の粒塊につき實驗した。秤が敏感でなく且つ特別の觀測装置を用ひなかつたので、粒塊の重さが段々秤にあらはれて來る經過は、よく見れなかつたが、粒塊が筒の途中にある時、既にその重さが全部秤にあらはれることは充分確めた。

水が筒に力を及ぼし得るのは、筒底に對する壓力と、筒壁に對する剪力の形に於てだけである。水は全體としては動かぬが、粒塊に押除けられて局部的に上昇して筒壁との間に剪力を生じ、水は筒に上向きの力を及ぼす。但し粒塊が筒の斷面積に比し小であれば、之は極めて微小だから省略しても差支ない。故に今筒底の壓力を測りそれに筒の斷面積を乗ずれば、秤を用ひずとも水と粒塊の重さを知り得る。又水と粒塊の混合物全體としての比重は、全體の重さ即ち壓力と筒斷面積との積を全體の體積で除したものであるから、結局混合物の比重を求むるには、單に壓力を混合物の高さで除すればよい事になる。この事は、粒が極めて微細で、混合物が均質な液體と見做し得る時當然なる事であるが、上の平衡の理論から、粒塊の大きさに無關係に眞である事がわかつた。

以上の理論をポンプ船に應用して、排砂管内の土砂の含有量を測らうとするのであるが、それを圖-11 に就て説明する。ポンプ船には圖-11 の如くポンプ直上及び船尾に、排砂管の垂直な部分 AB 及び CD があるので A, B 2 點又は C, D 2 點間の壓力差を測り、その部分の土砂含有量を知らうといふのである。然るに茲に新しい問題が起る。即ち圖-10 の場合は水が全體として動いてゐなかつたが今度は動いて居る。従つて粒塊の押除けによる水の局部的流れは水の主流に併合される。AB の如き上昇管の場合は粒塊は水より遅く動くから、局部的流れと主流は同方向で重なり合ひ CD の如き下降管では反對だから、二つの流れが差引かれる。然し押退けによる局部的流れは、主流に比し極めて微小だから以下之を省略する。主流による管壁と水との間の剪力は摩擦水頭に等しい。だから AB の壓力差は、AB 間の混合物の重さによる壓力差と、AB 間の摩擦水頭の和であり、CD

圖-10.

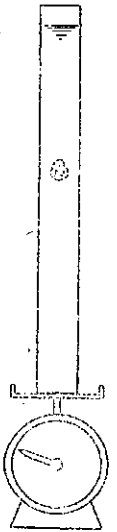
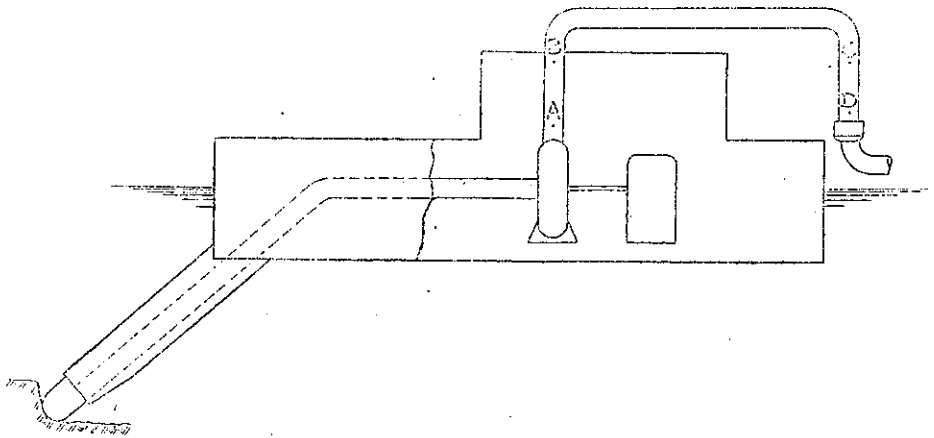


圖-11.



の壓力差は兩者の差である。故に混合物の重さによる壓力差を知るには、測つた壓力差を摩擦水頭によつて補正しなければならぬがその事は後に述べる。斯くて得た壓力差を AB 又は CD の高さで除すれば、AB 又は CD の部に於ける混合物の比重を知る事が出来る。但し之には次の條件を必要とする。即ち AB 又は CD 間に於て、土砂の速度と水の速度の差は、土砂の沈降速度に等しいことである。換言すれば AB 間に於ては、土砂は水の速度より沈降速度だけ遅い均一速度で上昇し、CD 間に於ては沈降速度だけ遅い均一速度で下降するを要する。だから速度差が沈降速度に達した後の處に A 點又は C 點を定めねばならぬ。ポンプ羽根の出口では、水と土砂は等速と思はれる。又 C 點の上方にも等速となる處がある管である。この等速の點から速度差が沈降速度に達する迄の距離を計算するに、上昇管に於ては下降管に比し大分短い。だから測點として上昇管を利用するのが便宜である。

斯くて AB 又は CD 間に包含せらるゝ混合物全體としての比重がわかり、一方土砂粒塊の比重がわかつてゐれば、混合物中の土砂の容積は直ちに知れる。土砂の含有量から或る時間内の土量を知るには、混合物全體の流量を知らねばならぬ。然るに之が仲々困難な問題である。淡水水域でポンプ船を使ふ場合は、排砂管に鹽を流し、電氣的に流量を測るといふ比較的確實な方法もあるが、海では使へない。だから着色液や識別に容易な異物を流すとか、排出流の拋物線を測るとかいふ不確實な方法によらねばならぬ。今まで使はれぬ方法ではあるが、豫め種々の水頭に對するポンプの効率を調べておき、ある瞬間に於ける電動機出力と水頭とから、混合物の流量を定むる方法は、瞬間的測定を可能ならしむる良い方法であり、發達せしむべきものと思ふ。假りに混合物の流量の測定に困難がある爲、混合物の流量が測れぬとしても、土砂含有の割合だけは知り得るものであるから、これにより運轉上の指針を得られる。單に運轉の便宜から言へば土砂の全量は問題でなく、土砂含有の割合さへわかればよいのであつて、これにより常に最高含有量を保持する様に船の操縦をやれば、それだけで非常に大きな實用的効果がある。

扱て摩擦水頭に對する補正の問題を考ふるに、水のみを通した場合の 2 測點間の摩擦水頭を測り、之に混合物の比重を乗ずれば混合物の摩擦水頭がわかる。土砂が浮游状態にある時、摩擦水頭は比重に比例する事は、第 2 章以下屢々述べた通りである。この摩擦水頭は、混合物の重さによる壓力差に比し小さいから、多少の誤差は大して問題とならぬ。

今まで全然觸れなかつた事であるが、最後に厄介な問題が残つてゐる。それは上昇管又は下降管内の含有量は眞の含有量を示さぬといふ事である。AB 間では土砂は水よりも遅く動くから、兩者等速な場合よりも土砂は“密集”し CD 間に於ては速く動くから“疎散”する。即ち AB と CD を同じ高さとするに、AB 間に在る混合物の重量は CD 間のそれよりも大きい。だから摩擦損失を度外視し AB の壓力差は CD の夫れより大きい。一つのポンプ船の土砂含有量は何處で測つても同じでなければならぬの上昇管と下降管とで違つた結果を與へる事になる。だから眞の含有量を知るには、土砂の“疎密度”を考へに入れそれによる補正をしなければならぬ。

この問題を解く爲、第 1 章 (2) 式の處に戻る。(2) 式を導いた i, j の式から次式を得ることが出来る。

$$i = \frac{1}{1 + \frac{1-j}{j} \frac{v_m}{v_w}}$$

v を土砂粒塊の沈降速度とすれば、直立管では

$$v_m = v_w \pm v$$

である。但し上昇管の場合は $-$ 、下降管の場合は $+$ を採る。之を上式に代入し且つ v_w を v と書けば次式を得る。

$$i = \frac{1}{1 + \frac{1-j}{j} \left(1 \pm \frac{v}{v_w}\right)} \dots \dots \dots (5)$$

2 測點の壓力差から混合物の比重を知り、それと土砂塊の比重とから j を知る事が出来るから、水の速度と土砂の沈降速度がわかつて居れば、(5) 式から眞の土砂含有の割合 i を知る事が出来る。

然るに浚渫せらるべき土砂粒塊の大きさは一定でなく、従つて沈降速度も一定でないから、實際の場合 v を如何にしてきめるか問題である。強ひてきめるとすれば、實際の土砂を粒の大きさの順に等容積の數階級に分け、各階級の平均寸法(細かく言へば、沈降速度は粒の大きさの平方根に比例するから、單純な平均ではいけないのである)からその階級の沈降速度を出し、各階級の沈降速度を平均して v をきめるべきである。

以上の摩擦水頭及び疎密度に関する二つの補正を個々に施す事をしないで、あるポンプ船の貨物に就て適當な實驗をやれば、そのポンプ船に對し二つの補正を自然に包含した最終的結果を得ることも出来る。即ち 2 測點間の壓力差を自記装置により記録し置き、前に述べた様な方法で時々混合物の全流量を測り、數日間の浚渫土量を測量し、この 3 者を比較する事により、壓力差と土砂含有量の關係を示す曲線を得たならば、摩擦水頭の問題も疎密度の問題もすべて包含した實驗曲線を得られるわけである。但し勿論土質は一定でなければならぬ。又 (5) 式により得られる i は、土砂粒塊間の空隙を含まぬ含有量であり、測量された土量は空隙を含むものであるから、計算の途中でその點の補正を必要とする。

最後に附言するが、この問題の研究は、獨りポンプ船に於て必要なばかりでなく、ニューマチック・グレン・エレベーター其他、洗艦による固體輸送全般の問題に寄與する處も相當あるであらう。

結 言

以上ポンプ船の流速の選定及び、摩擦損失に關係ある若干の實驗を紹介し、少數の實驗結果から大膽な類推歸納により、實際の排砂管への適用法の法則を試み、又之に關する種々の問題につき筆者自身の研究の結果を述べた。尙最後に取扱つた土砂含有量測定法は、全く筆者の創意になるものである。

ヘドロ又はそれに類する微粒子の輸送に關し、紹介又は解明した事は全面的に正しく、之等の土質に對する流速の選定及び摩擦損失の算定は、本論文によりはゞ正確に出来る事になつたと思ふ。砂、砂利、土石塊等に關し本論文に述べた事柄や法則は、定性的には正しいが、資料不足の爲定量的には正しいと言へぬ。又之等の土質に對する摩擦損失の研究も不充分である。土砂含有量測定法に就き述べた事は、理論的には正しいがまだ實驗されてゐない（近く實驗の見込である）。

要するに以上の研究は、問題解決の不完全な骨組に過ぎぬ。骨組を正し、肉を付け血を通はせるには、更に多くの實驗と考察を必要とする。今この不完全な研究を取て發表したのは、我國に於て此種の研究が殆んど無く、ポンプ船の仕事に携る人も、問題を解析する手懸りを持たず、研究に踏出し兼ね、又恐らく諸所で斷片的に行はれるであらう諸實驗も、その目標が明確でないのではないかと思はれるので、將來の實驗及び研究の手引きとして發表したのである。著者は自己の實驗を以て本研究を大成し度いと考へたが、當分その見込が無いから、遺憾ながら差當り机上の研究のみを紹介するのである。ポンプ船の實際に當らるゝ讀者が、その實驗により筆者の提案する諸法則を、定量的に矯して行かれん事を切望して已まない。（昭. 18. 2. 27. 受付）