

## ポンプ船排砂管の経済的管径およびその他の諸問題

小 川 元\*

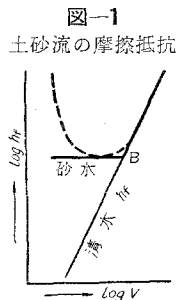
**要 旨** 従来経験的基準によつて行われてきたポンプしゆんせつ作業について、実用面に目的をおきつつ、排砂管内の砂流れの機構を水理学的に解き、それにもとづいて、実地上の種々の問題に経済的解決法を与えたものである。本文中の水理学的の究明は、これまでの発表の要約であり、応用面は新たに発表するものである。

### 1. 緒 言

わが国で主として用いられている、排砂管式ポンプしゆんせつ船は、アメリカで多く用いられているホッパー式ポンプ船にくらべて、一般に、はるかに多くの動力を必要とする。それは長い排砂管によつて土砂を輸送するためであつて、ポンプ出力の大部分は排砂管の摩擦抵抗として消費される。したがつて排砂管の摩擦抵抗を小ならしめることは、排砂管式ポンプ船の、最大の効率上の問題であるといふことができる。しかるにこの摩擦抵抗は派生的現象であつて、基本的には管内の水理学的機構を明らかにしなければならない。

### 2. 管内の砂水流れの基本的性格

管内で、砂粒が十分浮遊するような流速で水が流れている場合には、砂の移動速度と水の流速との間にはあまり差がなく、管内の一断面における砂量と、輸送された砂水の砂濃度とはほぼ等しい。しかしてこのときの摩擦抵抗は、清水の抵抗に砂水の比重を乗じた値に等しいことが実験的に知られている。しかるに流速が小になつて、砂粒が掃流あるいは沈殿を起すようになると、砂の速度と水の流速とは分離し、管断面の濃度と、輸送された砂水の濃度とは異なつてくる。しかしてこのときの抵抗は、断面濃度が一定に保たれるならば、平均流速が減少しても一定であり、もしまた、流水中への砂の投入速度が一定であれば、流速減少とともに抵抗は急激に上昇して管はつまる。その状況は図-1 のようである。すなわちこの場合の摩擦抵抗は、全く管内の流速分布の不均一によつて生ずる。このように砂水流れの摩擦抵抗は、砂の流れる状態から派生するものであるから、基本的には砂流れの機構を究明し



なければならない。

砂粒が掃流あるいは沈殿するときの抵抗は、同じ断面濃度の、砂が浮遊するときの清水の抵抗に等しいのであるから、そのような浮遊限界の流速、すなわち、図-1の点Bにあたる流速が求められればよい。しかるにこの限界流速は、砂粒の粒度によるのはもちろん、管径によつても異なることが実験によつて明らかに認められる<sup>1)</sup>。ゆえにこの限界流速は、実は単なる「流速」の問題ではなく、管径、流速、砂粒の間の相互平衡であることがわかる。この平衡は、移動床開水路における路床の平衡に似たものである。

この平衡は砂流れ状態を規定する基本条件であり、したがつて摩擦抵抗は、この平衡から規定されて、単に流速や管径の大小では決められない。従来抵抗に関する多くの実験的研究が行われたが、たとえ Durand<sup>2)</sup>のごとく、これを無次元表示しても、直接抵抗を求めようとするかぎり、これらは要するに実験式以外のものではありえない。なおかつ、それら実験式によつて、ある管径、流速、砂粒に対して抵抗を与えたとしても、それは仮定的条件に対して抵抗を予測させるだけで、逆にポンプ船排砂管の効率的条件を求める手段とはなりえない。ここに抵抗の問題は、本質的には、上記限界平衡を解くことに移行する。

従来砂輸送の効率的条件としては、観念的に、「限界流速で砂を流す」ことがいわれてきた。これは次のようなことを意味する。平均流速が限界流速以下であれば、水流速が砂流速より大であるから、図-1に示すように抵抗は限界流速時と同様であるのに、輸送された砂量は限界時におけるよりも小である。すなわちこのときには、水を送るために抵抗を生じていることになる。またもし限界流速より大なる流速で砂を送れば、それはその濃度に対して必要な流速以上の流速が用いられていることになり、無用の抵抗を生じていることになる。よつて限界流速で流すことがよいのであるが、これは上記のように単なる流速の問題ではなく、管径との相対的問題であることが従来見落されていた。またこれが、実地の排砂管でどのようにして実現されるかについても、後述(4)のように不明確であつた。

### 2. 砂水流れの平衡条件

限界平衡を規定する要素としてつぎのものが考えられ

\* 正員 工博 山口大学教授，工学部土木工学教室

る。すなわち、すでに記したごとく、管径、平均流速、砂粒の沈降速度および濃度と、さらに管の摩擦損失係数および流体の動粘性係数である。そこで限界平衡を式(1)のように書くことができる。

$$N=f(r_0, V, w, f, \nu) \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $N$  : 土砂の真濃度,  $r_0$  : 管半径,  $V$  : 平均流速,  $w$  : 砂粒の沈降速度,  $f$  : 摩擦損失係数,  $\nu$  : 動粘性係数である。 $N$ は輸送された土砂水の濃度とするが、この場合はほぼ管断面濃度と等しい。また  $V$  は浮遊限界流速である。この式(1)を確定することが砂水流れの平衡条件を解くことになる。

ところで一般に、乱流中で粒子が浮遊するのはその拡散作用による。この拡散作用の表示として拡散係数  $\epsilon$  が用いられ、これを用いて O'Brien は、粒子濃度の平衡を、周知のように式(2)で表わした。

$$wc + \epsilon \frac{dc}{dy} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $c$  : 任意点の濃度,  $y$  : 底面からの高さである。しかして開水路2次元流においては、乱流拡散が理論的に究明され、拡散係数は、Rouseによつて式(3)のように導かれた。

$$\epsilon = \kappa \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \left(1 - \frac{y}{D}\right) y \dots\dots\dots(3)$$

ここに  $\kappa$  : カルマンの普遍定数,  $\sqrt{\tau_0/\rho}$  : 摩擦速度,  $D$  : 水深である。

式(3)は幾人かの研究者によつて、実際の浮遊砂の分布を表わしうるものとして認められている。しかるに式(3)は、 $\epsilon$  の流体内分布を示すものであるが、その平均値は、 $D\sqrt{\tau_0/\rho}$  で与えられる。これを円管に適用すれば、 $D$  を半径  $r_0$  で置きかえて、拡散係数平均値  $\epsilon_{ave}$  は  $r_0\sqrt{\tau_0/\rho}$  に比例することになる。ところがこれでは砂濃度が小径管の場合ほど大になるといふ、前述の実験的事実を説明することができない。そこで改めて、 $\epsilon_{ave}$  はレイノルズ数の関数であると仮定し、これを無次元化して式(4)のようにおく。

$$\frac{\epsilon_{ave}}{\nu} = \alpha R_e^{*\beta} \dots\dots\dots(4)$$

ここに  $\alpha, \beta$  : 定数である。式(4)の左辺は、運動中の液体内部における、乱れ粘性と分子粘性との比の形になっている。しかして、レイノルズ数  $R_e^*$  は、つぎに述べるような理由によつて、式(5)のようにとる。

$$R_e^* = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho} r_0}{\nu} \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、一般に拡散作用が、周壁に密接な関係があることを思えば、小管ほど拡散作用が大であるという実験的事実は、小管ほど、周壁面積が流水断面積に対して持つ比率が大であるということに帰因するのであろうと考えられる。周壁面積と断面積との比率は径深  $r_0/2$  である。また摩擦速度が拡散に影響を持つことは周知である

から、そこで流速の項として摩擦速度を、長さの項として径深をとつて、レイノルズ数を式(5)のようにおく。

そこで式(4)で示される  $\epsilon_{ave}$  を用いて、円管内の砂濃度をつぎに求める。 $\epsilon_{ave}$  を用いるということは、管内の任意点で、砂粒がすべて  $\epsilon_{ave}$  によつて起される相等的な拡散作用を受けると仮定することである。かくして  $\epsilon_{ave}$  を式(2)に代入し、これを積分すると、鉛直方向の濃度分布が式(6)のように求められる。

$$\frac{C}{C_a} = \exp\left\{-\frac{w}{\epsilon_{ave}}(y-a)\right\} \dots\dots\dots(6)$$

ここに  $C_a$  は、ある基準水平面  $y=a$  における濃度である。開水路の場合にはこの  $C_a$  は、流水と路床との相対関係によつて定まり、流砂量全体を象徴する要素である。ゆえにこれを合理的に決めることが重要であるが、管路の浮遊限界状態においては、砂は全部浮遊して移動床ではなく、砂の浮遊は全円周と全砂量との平衡現象であつて、管底部だけの影響ではない。ゆえに円管では  $C_a$  はあまり重要な意味を持たない。そこでいま  $a$  を、相当粗度  $k$  に等しくとり、その点の濃度  $C_k$  を、 $y=0$  の点の濃度  $C_0$  を用いて、式(6)によつて計算する。ただし  $C_0$  は、沈殿した砂の真容積率、 $C_0=1-\text{void}$  とする。かくして任意点の濃度  $C$  を求め、これにその点の流速  $v$  をかければ、その点の砂輸送量が求められる。これを円管断面積について積分すると全輸送量が求められる。ただし任意点の流速  $v$  は、Prandtl-Kármán の流速分布を用いるが、濃度分布が鉛直方向の分布であるから、同式も直角座標に変換して用いる。かくして求められた全輸送量を、流量で割れば平均濃度  $N$  が、式(7)のよう求められる。

$$N = \frac{1}{\pi r_0^2 V} \iint v c \, dx \, dy \dots\dots\dots(7)$$

ここに  $x, y$  は、円管中心を通つて水平および鉛直にとられた座標軸である。

式(7)は、近似的に式(8)のような形に積分される。

$$N = f\left(\frac{w}{\sqrt{\tau_0/\rho}}, R_e^*, \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{V}\right) \dots\dots\dots(8)$$

これらの計算の詳細は、すでに発表した論文<sup>3),4)</sup>にゆずる。

そこで、求められた平均濃度、式(8)の  $N$  に対して、実験室および現場で求められた10個の実測値を代入し<sup>4)</sup>、逆に  $\epsilon_{ave}$  の数値を求め、最小自乗法によつて式(4)の定数を確定すると式(9)のようになった。

$$\frac{\epsilon_{ave}}{\nu} = 52 R_e^{*0.4} \dots\dots\dots(9)$$

式(9)が円管の拡散係数の一般的な形である。これを Rouse の  $\epsilon$ 、式(3)と比較するために、式(10)のように変形すると、

$$\epsilon_{ave} = 26 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} r_0 R_e^{*0.6} \dots\dots\dots(10)$$

式(10)は、Rouse の  $\epsilon$  に対して、さらに  $R_e^{*0.6}$  を

付加したものであることがわかる。 $R_e^{*-0.6}$ は円管の特性を表わす項であつて、これによつて検討すると、円管の $\epsilon_{ave}$ は、細管になるほど Rouse のそれより大となり、大管においては Rouse の値とほぼ等しくなることがわかる。

つぎに式(9)に、円管における一般的関係、 $\sqrt{\tau_0/\rho} = V/\sqrt{f/8}$ を代入すると式(11)となる。

$$\frac{\epsilon_{ave}}{\nu} = 20 f^{0.2} R_e^{0.4} \dots\dots\dots(11)$$

ここに  $f$  : 摩擦損失係数,  $R_e$  : レイノルズ数  $VD/\nu$  である。すなわち、円管の拡散係数は  $R_e^{0.4}$  に比例する。

ここで、式(11)による  $\epsilon_{ave}$  を、平均濃度式(8)に代入すると、平均濃度  $N$  は、近似的に式(12),(13)のように求められる。

$$N = \frac{C_0}{1.9} \{ \exp(-0.027 \phi) + \exp(-0.063 \phi) \} \dots(12)$$

$$\phi = \frac{1}{f^{0.2} \nu^{0.6}} \frac{r_0^{0.6}}{V^{0.4}} w \dots\dots\dots(13)$$

式(12)は厳密には  $k/r_0$  および  $f$  をふくむが、その影響が僅少であるので、 $k/r_0 = 1/300$ ,  $f = 0.024$  と固定して簡易化したものである。 $f$  の上記の値は、排砂管の海上管と陸上管の平均値としてとつたものである。

式(12),(13)は、円管内の砂濃度を与える式であるが、同時に式(1)に相当する砂流れの平衡条件である。砂流れが浮遊限界状態にあれば、常に式(12),(13)が成立している。 $\phi$  は濃度を規定する無次元量で、異なつた管径でも、 $\phi$  が等しくなるように流速を選べば、濃度は等しくなる。ゆえに式(13)は、濃度に関する相似条件でもあり、これらの式は一般に成立つ。

#### 4. ポンプ船排砂管の経済管径

実地のポンプ船においては、排砂管の排砂圧力が、経験で知られるある限度以内で、なるべく高く維持されるように運転が行われる。これは、ポンプ船においては、ポンプと管とがすでに与えられており、したがつて流速は、砂の濃度との関連においておのずから決まる。ここにおいて上記のような運転をすることは、砂の吸込み濃度を加減して、濃度と流速との関係が上述の限界状態にあるようにしていることを意味する。すなわち、実地のポンプ船においては、従来の意味の経済条件は常に実現されているのである。

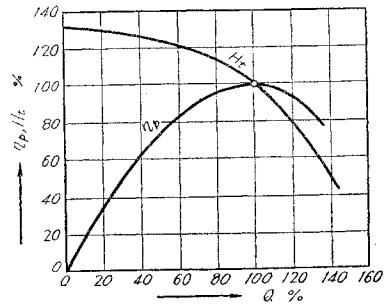
しかるにこの場合、排砂管の管径を変えて、同様な限界状態で砂を流したならば、輸送土量はいかになるであろうか。この場合は濃度も水流速も前とは変り、したがつて砂輸送量が変わる。しかしながら、この両者とも限界状態であり、従来の意味の経済状態である。ここに、砂輸送の経済条件とは、種々な管径でおのの限界状態で砂を流した場合、輸送量が最大になるような「管径」であることがわかる。従来の意味の経済条件とは、単に

運転技術の問題であつて、与えられた管径において、最大濃度を維持するようにすることである。しかし、もし管径を変えたならば、最大濃度の値も変り、しかして土砂輸送量は濃度と流量との積であるから、必ずしも濃度が最大である場合が輸送量が最大であるとは限らない。従来の観念は、ただ濃度だけを対象にしているのである。

そこでここに、輸送量を問題にすることにすれば、これは当然ポンプ出力との比において考えなければ無意味となる。また一定の管径については問題となるのは濃度の変化であるが、濃度は常にその管径での最大濃度をとるものとすれば、後は変化しうるのは管径のみである。ゆえに、ポンプ出力を一定にとれば、経済条件とは、砂輸送量が最大になるような管径を求めることである。ポンプ出力を考えに入れなくては、経済条件はありえない。そこで上記のような経済管径はいかにして求めるか。

ポンプは、たとえば図-2に示すように、その固有の揚

図-2 ポリュート ポンプの揚程曲線と効率曲線



註：効率は標準状態の効率に対する比 100 分比

程曲線に従つて作働する。ゆえに管径と管長とを与えたならば、揚程曲線から、対応する流速が求められる。式(12),(13)は、単に独立の管径と流速とに対して、限界濃度を与えるものであるが、これに揚程曲線からえられるポンプの管径と流速との関係を導入すれば、砂流れの平衡条件にポンプ出力を導入することができて、経済管径を求めることができる。それはつぎのようである。

ポンプの全揚程  $h_t$  は、速度水頭および入口、出口損失などを無視すれば、近似的に式(14)のように書ける。

$$h_t = h_s + h_0 + h_f \dots\dots\dots(14)$$

ここに  $h_s$  : 吸込み揚程,  $h_0$  : 排砂管の実揚程,  $h_f$  : 排砂管の摩擦抵抗で式(15)のようである。

$$h_f = f \frac{L}{2r_0} \frac{V^2}{g} \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $L$  : 排砂管の長さ,  $g$  : 重力加速度である。一方ポンプの流量  $Q$  は、

$$Q = \pi r_0^2 V \dots\dots\dots(16)$$

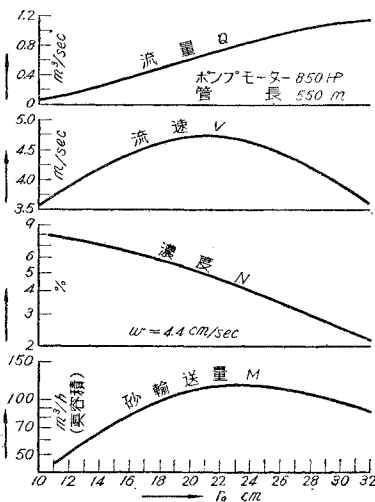
式(15),(16)から  $V$  を消去すれば

$$\left. \begin{aligned} Kr_0^5 &= fL \\ K &= \frac{4g\pi^2 h_f}{Q^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

$h_f$  と  $Q$  との関係は、 $h_s$  と  $h_0$  との値を適当に、た

たとえば  $h_s + h_0 = 10$  m と仮定すれば、ポンプの揚程曲線から与えられる。そこで  $f$  の値を適当にとり、与えられた  $L$  の長さを入れれば、与えられたポンプについて、 $h_f$  と  $Q$  とのいく組かに対して、式(17)を用いて対応する  $r_0$  を求めることができる。それらの  $r_0$  の値を式(16)に代入すれば、対応する  $V$  が求められる。それらの  $r_0$  と  $V$  とを式(13)、(12)に代入すると、おのおのの  $r_0$  に対する土砂濃度、さらにそれから土砂輸送量が求められる。これらの土砂輸送量は、それぞれその管径の場合の最大輸送土量であり、限界状態における輸送量である。それらの各輸送量のうちの最大なるものは、そのポンプがあらゆる管径を通じて、輸送しうる最大土量であり、対応する管径は経済管径である。これらを図示したものが図-3である。濃度は管径が小なる方が大となるが流量は管径大なる方が大であるので、経済管径はその中間となる。

図-3 ポンプの管径と流量・流速・砂濃度・砂輸送量との関係



このような経済管径は、 $f$  と  $\nu$  の影響を無視すれば、ポンプ容量、土砂の沈降速度、管の長さによつて変る。そこでいま 200 HP のポンプ (標準状態の流量は土砂水で  $Q = 720$  m³/h,  $h_s = 35$  m) で、管長  $L = 500$  m の場合をとり、 $f = 0.024$ ,  $\nu = 0.0115$  cm²/sec,  $C_0 = 0.6$  として、種々の砂の沈降速度に対して、上記と同様な輸送量曲線を描くと図-4 のようになる。各曲線の頂点对応する管径は、おのおのの土質に対する経済管径である。註: ポンプモーター 200 HP 管長 500 m

図-4 ポンプの管径と土砂輸送量との関係

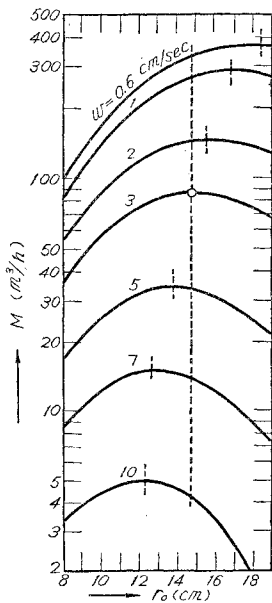
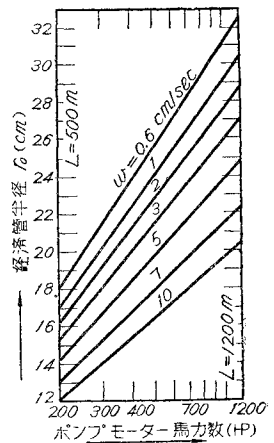


図-5 一般的経済管径図

図-5 は、200 HP と 1200 HP の場合の各値を直線で結んだものであるが、それについては近似的に成立することが検討される。また 200 HP と 1200 HP の中間のポンプは、500 m と 1200 m の中間の管長をとることになるが、その詳細は後述する。図-5 は、現在のわが国の一般的なしゅんせつポンプに対して普通土砂に対する経済管径を示す一般図表である。

図-5 一般的経済管径図



現在わが国で慣用されている管径<sup>5)</sup>を見ると、ほとんどすべて図-5 に示された値より大である。これは歴史的に、水ポンプがしゅんせつポンプに転用されたためであろう。これらの大きすぎる管は、輸送土量の減少をもなう。

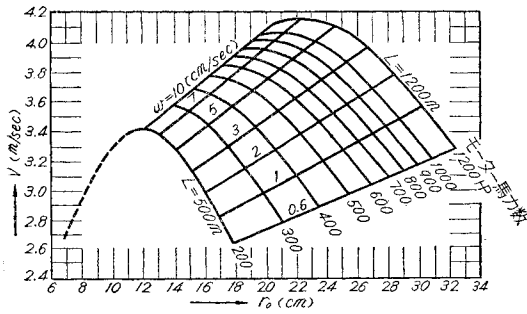
最近欧米においては、一定の管径に対するポンプ馬力数が、過去の値の 2 倍以上になつたという<sup>6), 7)</sup>。これは、粗粒を流すために高流速、したがつて高馬力を採用するようになったためであるが、この事実は、すなわちポンプ馬力数に対する管径が、しだいに小になつたことを示すものである。これは粗粒に対する必要から、上記の経済管径が、経験的に見出されたものであると考えられるが、図-5 はこれを、各土質に対して系統的に示したものである。

5. ポンプしゅんせつ作業上の諸問題

### (1) 流速

管内流速は大なれば大なるほど高濃度を流しうる。しかし同時にそれは、大なるポンプ出力を必要とする。ゆえにポンプ出力を考えに入れなくては、経済流速は論じられない。一方、細管は大管より高濃度を輸送しうる。しかし細管では抵抗が大になる。ゆえに一定のポンプでは、最も効率的な管径と流速との組が存在することになる。図-5 に示された経済管径に対応する流速は、すなわち、そのような経済流速である。これは図-5 を求めるときすでに求められており、これを図-5 の管径と同時に示すようにすると図-6 となる。図-6 では、あるポンプの管径と流速との関係が、たとえば 200 HP のポンプについて点線で補われているように、放物線で示され

図-6 経済流速図



る。そしてあるポンプである砂を流した場合の経済管径と対応流速とが、ポンプ馬力数に対応する放物線と、砂粒沈降速度を示す直線との交点で与えられる。

図-6 からつぎのことが明らかである。砂が粗粒になるにしたがって、大なる流速と細い管径とを用いる方がよい。しかしながら、放物線の頂点では流速は最大値に達し、この付近でそのポンプの土砂浮遊能力も最大限になる。ゆえにこれ以上の粗粒は、掃流によつて送らなければならない。上述の吹米の最近の管径は、このような最大流速を出すように、とられているようである。

ポンプの流量は、いうまでもなく、管径が大なる方が大である。ゆえに、土砂が浮遊するかぎりには、管は大なる方がよい。経済管径は、そのような管径を大にしろる限界を示したものであつて、図-6 によつてそれを理解することができる。

従来いわれてきた標準流速は、管径との相関もなく、ポンプ出力との関連も稀薄で、単に砂が流れるという観点から、流速の数値が示されていただけである。このような流速は、式 (12), (13) だけで求めることができる。

(2) 輸送距離

輸送距離が長くなるにしたがって土砂輸送量は減少する。この関係もやはり、式 (17), (16), (13), (12) を用いて求めることができる。すなわち、式 (17) において、 $r_0, f$  を一定とし、 $L$  を変数として、ポンプの流量と  $L$  との関係を求め、一方その流量によつて輸送される土量を、式 (13), (12) から求めて、輸送距離と土量との関係を図示すると 図-7 となる。図-7 は、200 HP および 1200 HP のポンプについて、 $w=1 \text{ cm/sec}$ ,  $7 \text{ cm/sec}$  の 2 種の砂を流した場合をとつたものである (管径は 図-5 で示されるものを用いる)。いまこれらの曲線によつて、輸送土量が標準輸送距離の場合の 70% に減るような距離をとり、そのような限界距離を、種々のポンプ馬力数、種々の砂粒に対して示すと 図-8 となる。ただし 200 HP のポンプに対して 500 m, 1200 HP のポンプに対して 1200 m, その中間のポンプに対してはその中間の距離を標準距離とする。また管径はおのおの 図-5 の場

図-7 輸送距離と輸送土量との関係

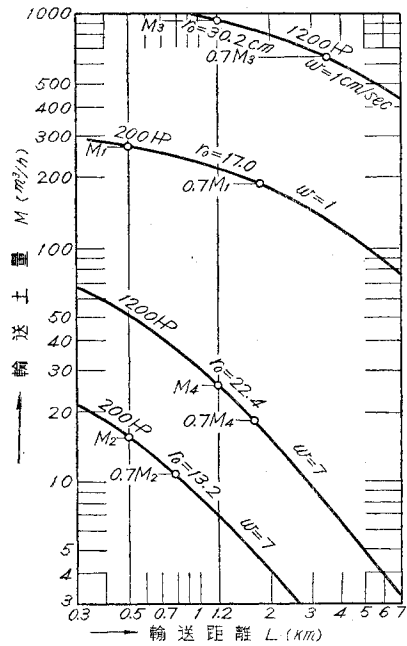
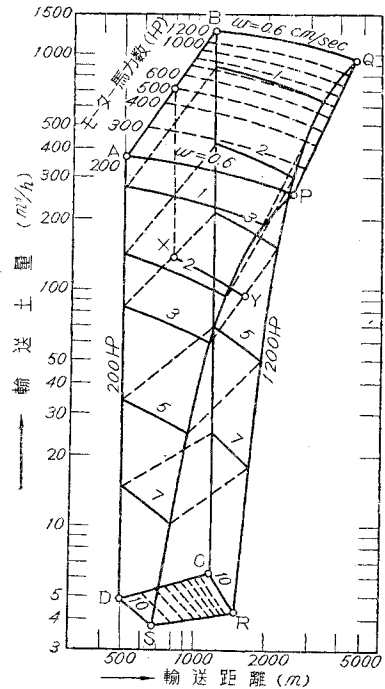


図-8 輸送距離と土量との関係および限界輸送距離



合の管径とする。図-8 において、たとえば点 A は、200 HP のポンプで沈降速度  $w=0.6 \text{ cm/sec}$  の砂を流す場合、輸送距離 500 m のときの輸送土量を示し、点 P は、その土量が 70% に減る距離を示している。点 X, Y は、500 HP のポンプで、沈降速度  $w=3 \text{ cm/sec}$  の砂を流す

場合のそれらを示している。

なお図-5において示されなかつた 200 HP と 1200 HP の中間の馬力数のポンプに対する標準輸送距離は 図-8 において、直線 AB 上の各馬力数の点に対応する距離として示される。

図-8 によつて、輸送距離に関する経済的諸問題を明確にすることができる。

### (3) 輸送土量

従来いわれてきた「公称能力」は、画一的に濃度と流速を仮定して求めたものと思われ、信頼しがたい。比較的沈降速度の小なる土砂については、土砂輸送量は 図-8 または、図-4 で示される。粒度が大になるにしたがつて、掃流部分が多くなるので、これとは合わなくなつてくる。しかし経済管径の値は、相対的な最大輸送量を与えるものであるから、やはり正しい。

なお経済管径以外の管径を用いた場合の輸送量は、たとえば 図-4 の縦の点線と各曲線との交点で示される。これは  $w=3 \text{ cm/sec}$  の砂に対する経済管径を用いた場合に、他の砂を流したときの輸送量を示したものである。これによつてみると、微粒に対する曲線は比較的ゆるやかであるから、そのためポンプは、比較的粗粒に対する経済管径を用いておく方が、すべての土質に対して効率的であるといふことができる。最近のポンプが高流速を用いる傾向にあるのは、この意味からいつても適当である。

### (4) 管の粗度

管径と流速と同じであれば、粗なる管はなめらかな管より高濃度を維持することができる。しかし粗管は当然大なるポンプ出力を必要とする。ゆえに管の粗度も、ポンプ出力との対応において考えられなければならない。問題はポンプの単位出力によつて輸送される土量である。

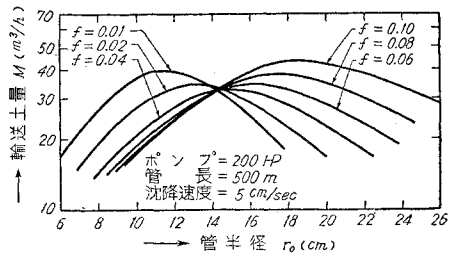
管の相当粗度と半径との比、 $k/r_0$  は、Kármán-Prandtl の抵抗式、式 (18) によつて、摩擦係数  $f$  と関係づけられている。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \frac{r_0}{k} + 1.74 \dots\dots\dots (18)$$

一方、式 (17) は変数として  $f$  をふくむ。ゆえに式 (17)、(18) と、式 (13)、(12) を用いることによつて、管の粗度と輸送土量との関係を知ることができる。

式 (17) において、一定の管長 ( $L$ ) に対して、いくつかの  $f$  の値をとり、おのおのの  $f$  に対して、式 (13)、(12) を用いて管径と輸送土量との関係を求めると 図-9 となる。ただし 図-9 は、ポンプ馬力数 200 HP、管長 500 m、土砂沈降速度  $w=5 \text{ cm/sec}$  の場合をとつてある。図-9 の各曲線の頂点は、おのおのの  $f$  の値の場合に、そのポンプがとりうる最大の輸送土量を示している。そこでそれらの最大土量を比較すれば、これはある  $f$  値で

図-9  $f$  が異なつた場合の管径と輸送土量との関係



最少となり、 $f$  がそれより大でも小でもこれより大となる。しかるにその場合の管径は、小なる  $f$  に対応するものの方が小である。輸送土量が等しければ、管は細い方が経済的であるから、したがつて一般に、管はなるべくなめらかである方がよいことがわかる。アメリカでかつて試用されたライフルが、非効率적であろうことが、以上の検討から推察される。

### (5) 吸込管の管径

鉛直上昇流中で粒子を浮遊させることは、水平流の中で浮遊させるより、はるかに容易であることが実験によつて知られる<sup>8)</sup>。これはつぎのような理由にもとづくものであろう。すなわち、水平流中における浮遊は、乱れ拡散による浮遊作用のみによつて行われるのに対して、鉛直流中におけるそれは、主流の流速そのものがたずさわる。この理由によつて、もし吸込管が、排砂管と同径管すなわち同流速が用いられたならば、吸込管は、排砂管が輸送しうる以上の土砂濃度を吸上げることができる。吸込管は鉛直ではないが、傾斜管であるから、ある程度この現象が起る。これは排砂管の排砂抵抗を急増させ、その結果流速を減少させる。すると吸込管の吸上げ濃度は減少し、流速は再びもとに戻る。この現象をくり返すことによつてポンプの出力は、吸込管と排砂管との間を常に動揺し、吸込管には余分の出力が消費され、土砂は間けつ的に送られる傾向がある。わが国のポンプ船は、吸込管と排砂管に同径管が用いられており、上記の現象を生じていることが、吸込負圧計と排砂圧力計の読みの動揺によつて、明らかに認められる。

これを防ぐためには、吸込管に多少排砂管より大なる管径を用いればよく、吸上げ能力と排砂能力とが釣合えばよい。欧米においては経験的に、吸込管断面積を、排砂管断面積の 1.26~1.56 倍にしたものが用いられている<sup>9)</sup>。これによつて、しゆんせつ効率を上げることができる。

排砂管式ポンプ船においては、ポンプ出力の大部分が消費されるのは排砂管内においてであり、そのため排砂管内の砂の状態が、ポンプの作働を決定し、上記のような出力の動揺現象を起す。したがつて、ポンプ系全体の経済条件は、排砂管を基準として決定されるべきであり、吸込管で消費される吸込み揚程は、はじめに適当に

仮定されなければならない。4. において、吸込み揚程と排砂管実揚程との和を 10 m と仮定したのはそのためである。従来は吸込管と排砂管とは同一視され、摩擦抵抗は、その両管の長さを合計したものに対して考えられてきた。清水ポンプの場合にはこれでよいが、しゅんせつポンプの場合には区別されなければならない。

吸込管の揚程、すなわち吸込み負圧は、いかなる大馬力のポンプでも 1 気圧、実際上は水柱 8 m 前後を超過することはできない。上記のようにして吸込み管径を定めると、吸込み負圧はおのずから決まるが、水深が特別に深くさえないならば（たとえば 40 m 以上のごとき）、負圧がそれを超過することはない。吸込み負圧はなるべく小なる方が、ポンプ効率上有利であるが、吸込み管径を大にすることは、その点からも有利である。

## 6. 結 言

以上の諸計算は、しゅんせつポンプの全系にわたつて、水理学的機構にもとづいた合理的設計法を示したものであつて、これによつて、しゅんせつ作業を経済的に明確にすることができる。ポンプしゅんせつに関する究明はかなり遅れており、その作業は漠然とした水理学的基礎の上に立つて行われていた。その設計の基準は、経験によるものか、あるいは仮定的な計算によつていたものが多い。最近の摩擦抵抗に関する研究も、しゅんせつ作業自体には影響をおよぼすことができず、しゅんせつ作業の経済条件は、いぜんとして漠然としたものであつ

た。この研究は、それらについて究明したものである。最近しゅんせつ工事は非常に増加しているのので、以上の所論が実地上で検討された上、一般の御批判ならびに御教示が頂けるならば幸甚である。

なおこの研究は、浮遊する土砂についてのものであるが、最近しゅんせつポンプが、礫の領域にまで使用される傾向があるので、さらに掃流輸送に関する研究が行われなければならない。

終りに、この研究は終始 京都大学教授 石原博士の御指導を頂いたものであり、ここに深く謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 小川 元：管による砂輸送における管径の影響について、山口大学工学部学報、第 4 巻、第 1 号、昭.28.
- 2) R. Durand: Basic Relationships of The Transportation of Solids in pipes, Experimental Research, International Association for Hydraulic Research, Sept. 1953.
- 3) 小川 元：管内における浮遊流砂の流砂量について、土木学会誌、第 40 巻、第 9 号、昭.30.9, pp.455-458.
- 4) 内田翠郎・加藤正晴・小川 元：ポンプ船排砂管内の土砂濃度および乱流交換係数について、土木学会論文集、第 35 号、昭.31.6, pp.48-54.
- 5) たとえば、岡部三郎：ポンプしゅんせつ船の設計および作業について、港灣、1953, No.10, p.12, ポンプしゅんせつ船の基準性能表
- 6) Ole E. Erickson: The Hydraulic Dredge, Its History, Development and Operation, 1855-1956, Dock & Harbour Authority, Aug. 1956, p.133.
- 7) J.E. Yager: Hydraulic Dredges, National Conference on Industrial Hydraulics, 6th meeting, U.S.A. 1950, pp.191-209.
- 8) 小川 元：鉛直上昇流における粒子沈降に関する実験およびポンプ船吸込管に関する考察、山口大学工学部学報、第 9 巻、第 1 号、昭.33.12.
- 9) The Hopper Dredge, Dock & Harbour Authority, Jan. 1956, p.290, および、上記 (6), p.133.

### 論 文 集 60 号・別冊 (3-1)

B 5 判  
44 ページ

プレストレスト コンクリート道路橋（大阪府金剛大橋）の設計、施工およびこれに関連して行つた実験研究の報告

定価 200 円 (〒10 円)

### 論 文 集 60 号・別冊 (3-2)

B 5 判  
20 ページ

天然色航空写真に関する研究

定価 60 円 (〒10 円)

### 論 文 集 60 号・別冊 (3-3)

B 5 判  
34 ページ

単位図法とその適用に関する基礎的研究

定価 150 円 (〒10 円)

正員 田原 保二・正員 工博 猪股 俊司  
正員 南 俊次・正員 宇野田 修

正員 工博 丸安 隆和・正員 西尾 元充

正員 工博 石原藤次郎・正員 高棹 琢馬



— 世界に誇る Proteックス

空気連行杖

Proteックス

▲御一報次第説明書贈呈

★米国オートレン・ラブリカンツ会社極東総代理店

朝日物産株式会社

東京都中央区京橋3-5 TEL (56) 代 3151-8811  
支店 札幌 大 阪 福 岡

▶本講座は土木学会でも取扱ます◀

(全25巻)

# 最新土木施工法講座

## 編集委員

委員長

前土木学会々長	青木 楠 男
三菱地所 KK	金子源一郎
鹿島建設 KK	高橋嘉一郎
早大 教授	沼田 政 矩
電源開発 KK	永田 年 夫
港湾協会	黒田 静 夫
道路公団	金子 征 夫
港湾局長	中道 峯 夫
国有鉄道	大石 重 成
建設技監	富樫 凱 一
道路局長	佐藤 寛 政
河川局長	山本 三 郎
土木研究所長	秋 草 勳

幹事

土木研究所	山田 順 治
建設省	遠藤 貞 一

◇体裁 A5判・上製堅牢  
各冊平均250頁

◇定価 各冊300円～500円

◇刊行 昭和34年5月中旬～  
35年12月末完結予定

◇予約締切 昭和34年7月末

★特典 全巻予約申込者に  
「一般建設機械材料便  
覧」加藤・小林編を奉  
仕贈呈いたします

★土木学会でも受付ます★

学会員に限り土木学会でも取扱  
いますからご便利の方は前金で  
土木学会宛にお申込み下さい。

配本予定 第2回 6月中旬  
第3回 7月中旬

第2回 8. コンクリートダム  
施工法

第3回 14. 鉄道保線施工法

## 第1回配本発売中!!

### 21・プレストレストコンクリート施工法

工博 猪股俊司著 250頁 ￥420

第一人者が詳述する PC の知識・施工・管理の一切

- |                |   |   |                                    |
|----------------|---|---|------------------------------------|
| 1 路床・路盤施工法     | 谷竹字井谷墳亀高田田多石川宮川佐小望矢谷谷水野深寺清中根仁比佐新比佐新加杉堀伊中磯秋横中高 | 藤下宮上藤原川国原中田井村内村藤林月野口島水鳥来杉田藤妻田藤妻納木松東岡崎草田村田 |                                    |
| 2 道路表装の施工法     |   |   | 正春寿静正文 振一                          |
| 3 橋りょう上部構造施工法  |   |   | 保五安靖満 満                            |
| 4 橋りょう下部構造施工法  |   |   | 丸雄宏雄史泰夫男雄勲雄功雄吉也郎 巖正肇雄正肇雄二郎夫富郎作勲平一信 |
| 5 基礎の施工法       |   |   | 邦義敏 達                              |
| 6 河川施工法 I      |   |   | 重雄誠幸 次                             |
| 7 河川施工法 II     |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 8 コンクリートダム施工法  |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 9 砂防施工法        |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 10 水力発電施工法     |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 11 上水道施工法      |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 12 下水道施工法      |   |   | 幸 幸 幸                              |
| 13 地下鉄道施工法     | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 14 鉄道保線施工法     | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 15 鉄道工作物の設計と施工 | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 16 港湾施工法 I     | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 17 港湾施工法 II    | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 18 トンネル施工法     | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 19 コンクリート施工法   | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 20 鉄筋コンクリート施工法 | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 22 施工用土木機械     | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 23 土木施工特論      | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 24 工事管理とその実際   | 幸 幸 幸   |   |                                    |
| 25 現場における応力の測定 | 幸 幸 幸   |   |                                    |

【詳細内容見本送呈】



### 株式会社 山海堂

東京都新宿区細工町15  
電話 (33) 9019・9058  
振替東京 194982

