

## 管輸送における経済的管径

正員 小川 元\*

**要旨** 前稿<sup>1)</sup>において筆者は、先に求めた砂輸送の濃度に関する式を、すべての管径に適合させるためにはある修正項が必要であることを述べた。本稿ではこの修正項を用いて、円管による、土砂輸送においてその濃度と、管径、流速、沈降速度との間にある函数関係を求め、さらに一般にサンドポンプにおいて、最も高能率の管径を決定する方法を述べたものである。

## 1. 緒 言

管による砂輸送の場合、小管は大管より高濃度の輸送ができるということは、筆者が実験において経験した事実である。この事実を筆者は前稿において、砂輸送に関する円管内の乱流交換係数の平均値が（1）式で示されるという結論に要約し、同時に砂水の濃度を一般に（2）式で示した。

ただし  $R_e = VD/\nu$ ,  $f$ : 摩擦損失係数

$$P = 1.631 \left( 1 + 0.34 \sqrt{\frac{f}{8}} \right) \left\{ e^{-6.73At} + e^{-18.7At} \right\}$$

$$A = 0.00215 R_*^{0.589}$$

ただし  $R_* = u_* r_0 / \nu$ ,  $u_* = V \sqrt{f/8}$ ,  $t = w/u_*$ ,  $w$ : 砂の 50% 粒径の沈降速度

$$\text{また } b = 12.7 \frac{k}{r_0} - 2.5 \frac{r_0}{r_0 - k}, \quad k : \text{相対粗度}$$

この(2)式は、まず濃度分布の一般理論からその形が決定され、ついで実験値に合うようにA項が定められたものである。このA項から(1)式に示す $\bar{e}$ 平均値が導かれたものであるが、逆に(2)式が成立するためには(1)式の成立が必要であり、また(1)式を用いて(2)式が導かれるといえる。ところが今(2)式にP,Aの値を代入して整理すると、結局次のようになる。

$$K = \frac{1.63}{\pi} C_0 \left( 1 + 0.34 \sqrt{\frac{f}{8}} \right)$$

$$k_1 = 0.00215(b - 6.73), \quad k_2 = 0.00215(b - 18.5)$$

$C_0$ : 砂の空隙率を引いた実質率

$$\Phi = t R_*^{0.589} = \frac{w}{u_*^{0.411}} \left( \frac{r_0}{\nu} \right)^{0.589} \dots \dots \dots \quad (3)$$

(2)' 式は (2) 式をさらに要約したもので、今後は (2)' 式を濃度を与える一般式とする。(3) 式にさらに  $u_* = V\sqrt{f/8}$  を代入すると

(2)' 式において  $K$  は砂の空隙率及び管の摩擦損失係数によつて変わるが、一般にあまり大きな変化のない定数であり、 $N$  に対して一義的な影響は持たない。また  $k_1$ 、 $k_2$  はいずれも  $b$  すなわち管壁の粗度のみによつて決まる定数でこれも  $N$  に対しては定数と見なされる。よつて  $N$  を一義的に決定するものは  $\phi$  のみである。今 (3)' 式によつて  $\phi$  を見ると、流速と管径とは  $N$  に対して互に逆の働きをなしていることがわかる。 $k_1$ 、 $k_2$  は負号をとるから、 $r_o$  の増大は  $N$  を小にし、また  $V$  の増大は  $N$  を大にする。このことは小管の方が大管より高濃度を輸送し得るという実験的事実に適合する。一方この場合の  $\epsilon$  平均値は前の(1)式で示されるのであるが、これによると  $\epsilon$  平均値は  $R_o$  数増大によつて増大し、従つて管径の増大によつても増大する。故にこのことは  $R_o$  数増大によつて乱れが増すという水理学上の基本法則を満足するのであるが、しかも乱れが管径増大によつて、増すにもかかわらず濃度は反対に減少することが (3)' 式によつて示される。これも実験値に適合する。これらの互に反対の傾向が、同時に説明できるということは、以上の一連の推理が合理的なものであることを示すものと考えられる。

\* 山口大学助教授、工学部土木工学教室

られる。

(2)' 式から土砂濃度  $N$  を規定する函数は  $\phi$  であることがわかつたので、管内濃度の問題は函数  $\phi$  の性質を究明すればよい。よつて (3)' 式を検討すると管径、流速が砂輸送に対して持つている影響を知ることができ、また合理的あるいは経済的管径はいかなるものであるかも知ることができる。

## 2. 流速及び管径の影響

濃度を決定するものは函数  $\phi$  のみであるから、 $\phi$  の値が一定であれば濃度は管径、流速、沈降速度に關係なく一定である。また  $\phi$  が小になれば濃度は大に、 $\phi$  が大になれば濃度は小になりその関係を図-1 に示す。この曲線は (2)' 式中の  $K, k_1, k_2$  の値によつて多少異なるが、図-1 には洞海湾ケーソン工場 ( $c_0=0.65, f=0.024, r_0/k=250$ ) 及び博多港 ( $c_0=0.015, r_0/k=180$ ) の各々筆者が実測した時の条件及び 1.5 インチ管による実験の場合 ( $c_0=0.61, f=0.022, r_0/k=300$ ) とについて示してある。これによつて多くの場合  $N \sim \phi$  曲線にはあまり変化がないことが推察できる。

図-1 から流速及び管径が濃度に対していかなる影響を持つかを求めることができる。今 (3)' 式において,  $w$ ,  $r_0$  を一定すなわち一定の砂を一定の管に流す場合とすると, 流速との関係は次のようになる。

ただし  $K_1$ : (3)' 式から求められる定数

(4) 式と (2)' 式とを用いて  $N \sim V$  曲線を求めるとき図-2 のようになる。ただし図-2 には筆者の 1.5 インチ及び 2 インチ管の実験の場合について示してある。この曲線は主として管径、沈降速度によって変わり、他の条件 ( $c_0, f, r_0/k$ ) からは大きな影響を受けない。

図-2 から次のようなことが分かる。

(1) 実測限界流速は沈降速度による変化を、(3)'式に示すほどは受けていない。また濃度によつてもあまり変化していない。実測点と曲線とは比較的高濃度において一致する。すなわち 図-2 の曲線はすべての範囲で成立つものではなく比較的高濃度の区域で成立つ。これらの曲線と実測値との相違は、上記の流速分布の不均一、及び粒子相互の干渉による沈降速度の変化が主因であろうと思われる。

(2) かつて筆者は実験において浮流には管に応ずる限界濃度があつて、それ以上には流速を大にしてもなし得ないことを定性的に認めた。これを 図-2 によつて見ると、各曲線は濃度大になるほど水平に近くなつて、その傾向が明かに認められる。

なお砂粒浮遊の条件として、漠然と  $V \geq 3w$  がいわれたこともあるが、この関係を(3)'式に代入して検討した結果は、これは沈降速度と管径によつて異なり、上の条件は細粒でかつ細管の場合しか成立しないことがわかつた。

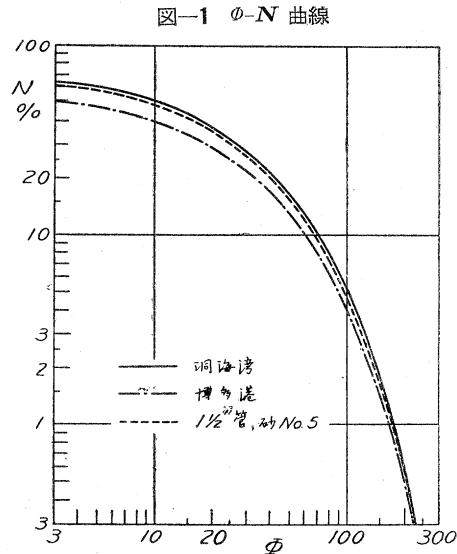
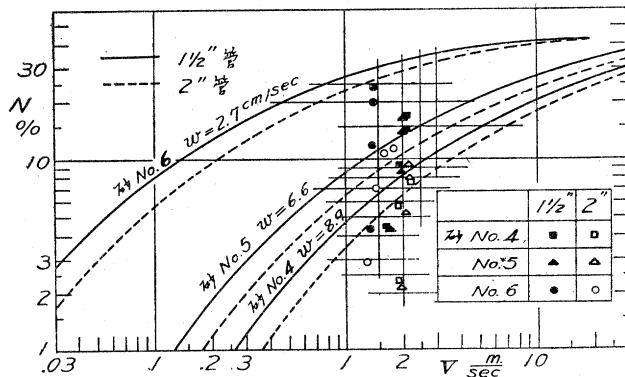


図-2 1.5 インチ及び 2 インチ管における流速—濃度曲線



次に流速の場合と同様にして管径の影響を求めるとき (3)' 式において  $V$ ,  $w$  を一定として

$K_2$  : (3)' 式から求められる定数

となりその濃度との関係は図-3のようである。これも流速及び沈降速度によつて変わるものであつて、図には洞海湾及び博多港の砂及び流速について管径のみを変化させたと仮定した場合を示してある。図-2と図-3から実用の範囲では流速増大よりも管径減少の方が濃度の増加は大きいことがわかる。

次に濃度を一定に保つためには、その限界流速は、沈降速度及び管径と、どのような関係を持たねばならぬかを求めるとき、(3)'式において $\theta$ を一定とすることにより

$$V = K_3 r_0^{1.43} w^{2.43} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

となる。すなわち、この場合限界流速は管径の 1.43 乗に比例し、また沈降速度の 2.43 乗に比例して増大する。管径より沈降速度の方が影響は大で、このことは図-2 の実測値についてもその傾向が見られる。すなわち同種の砂は管が違つても流速は大体等しく、また異種の砂は比較的流速が異つている。また(6)式は濃度を適当に仮定すれば、必要な降界流速を求める式として用いることができる。

### 3. 經濟的管徑

上で求めた管径、流速、濃度間の諸関係は、ある特定の管について濃度が与えられたとき、それに必要な最小流速あるいはその流速がふくみ得る最大濃度が求められるもので、これは基本的に経済観念をふくんでいない。よつてここに経済条件を求めるべき条件を求めるところになる。

ポンプが与えられると、その流速と管径とは互に関連を持ち、管径が決まれば流速は決まる。故に任意の管径に対して、その輸送し得る最大量を上の方法によつて求め、これを曲線に表わせば輸送量の管径による変化がわかる。ポンプの流量は摩擦抵抗のため管径大なる程大であるが、砂濃度は管径大なる程小になり、かつ流速も小になるため濃度はさらに小になる。故に管径増大に従つて濃度は急減する。故に流量と濃度との組合せである輸送量には、ある管径に対して絶対最大の点が現われるはずである。

(1) 流速一管径曲線 一般に任意のポンプに対して流速と管径の関係を求める。ポンプの出力(水馬力)を  $L_t$ , 総揚程を  $H_t$ , 流量を  $Q$ , 砂水の比重を  $\tau$  とすると,

$L_t$  はポンプの効率によつて多少変わるが今簡単のため一定と考える。(7) 式中の  $Q$  及び  $H_t$  は次のように表わされる。

$$Q = \pi r_0^2 V, \quad H_t = H + \frac{V^2}{2g} + f \frac{l}{2r_0} - \frac{V^2}{2g}$$

ここに  $H$ : 実揚程,  $l$ : 管延長

この  $Q$  及び  $H_t$  を (7) 式に代入すると  $V$  に関する 3 次式が得られる。それを整理すると次のようになる。

$$\text{ただし } a = \frac{\pi r_0^2 r}{2q} + \frac{\pi r_0 r f l}{4q}, \quad c = H\pi r_0^2 r, \quad d = -L t$$

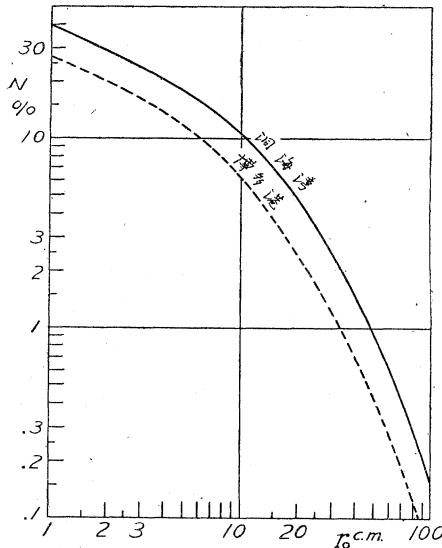
(8) 式を 3 次方程式の一般解法に従つて解き実根をとると次のように  $V$  を  $r_0$  の函数として求めることができます。

$$u = \left\{ -\frac{d}{2a} + \sqrt{\left(\frac{d}{2a}\right)^2 + \left(\frac{c}{3a}\right)^3} \right\}^{1/3}, \quad v = \left\{ -\frac{d}{2a} - \sqrt{\left(\frac{d}{2a}\right)^2 + \left(\frac{c}{3a}\right)^3} \right\}^{1/3}.$$

(9) 式は一般にポンプにおける管径と流速との関係である。これを洞海湾 ( $H=5$  m,  $f=0.024$ ,  $L=550$  m,  $\rho=10^3$  kg/m<sup>3</sup>) に適用する。

図-3 流速一定の場合の管径-濃度曲線

(洞海湾  $V=3.6 \text{ m/sec}$ ,  $w=4.4 \text{ cm/sec}$ )  
 (博多湾  $V=4.2 \text{ m/sec}$ ,  $w=4.6 \text{ cm/sec}$ )



$L_t=850\text{HP}$ ,  $r=1.1$ ) 及び博多港 ( $H=5\text{ m}$ ,  $f=0.015$ ,  $l=280\text{ m}$ ,

$L_t = 500 \text{ HP}$ ,  $r = 1.1$ )について図示すると図-4 のようになる。ただし  $L_t$  は公称馬力そのままをとり効率を考えない。また  $H$  は海底からの砂の吸上げ、管の曲り、管継手からの空気の吸込み、入口損失をふくめたものとする。

(2) 輸送量曲線 (9) 式で求められる  $V$  の値を前の(3)'式及び(2)'式に代入すれば任意管径に対する土砂濃度、さらに土砂輸送量を求めることができる。今  $M$  を土砂の単位時間当たり輸送量(実質容積)とすると、

$$M = NQ = \pi r_0^2 VN \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

(9) 式によつて  $r_0$  に対する  $V$  を求め、この  $r_0$  と  $V$  とを用いて (3)' 式及び (2)' 式によつて  $N$  を求め、これらを (10) 式に代入すると、あるポンプに対する輸送量  $M$  が求められる。図-5は洞海湾及び博多港について上記(1)中に記した条件で、管径に対する濃度の変化を、3種の沈降速度について示したものである。そのときの管径に対する流速の値は図-4で示される。ついで図-6には図-4の流速及び図-5の濃度を用い、(10)式によつて求めた砂輸送量が示してある。これによつて洞海湾 ( $w=4.4 \text{ cm/sec}$ ) の場合には  $r_0=21 \text{ cm}$ 、博多港 ( $w=4.6 \text{ cm/sec}$ ) の場合には  $r_0=17 \text{ cm}$  が輸送量から見た最経済管径であることが分かる。ただしこれは上述のようにポンプの効率を考えていないので実際は多少異なる。なおこれら2港の実地の管径は洞海湾 28 cm、博多港 22.5 cm でいずれも砂輸送量にはさしたる損失はないが、これはその砂質が適当であつたためである。

図-5 ポンプが与えられた場合の  
管径一濃度曲線

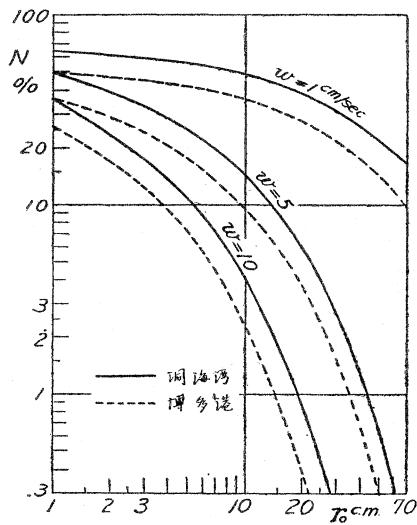
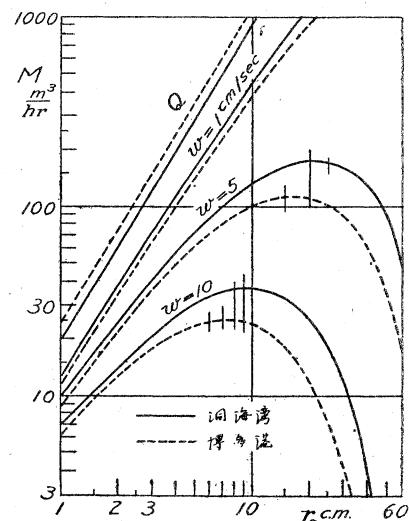


図-6 土砂輸送量曲線



(3) ポンプ船の運転 図-6 中に併記したように、流量は管径増大と共に増加する。これが恐らく今までポンプ船が高馬力になるに従つて大管を採用してきた理由であろうと思われる。しかしながら砂輸送量は管径増大によつては減少することがある。ポンプ船はその与えられた管径によつて、押送圧力がある値を超えて管がつまらないよう、砂の吸込を加減しながら運転する。これはその管が限度までの最大濃度をふくむように、いかかえればその濃度が図-5 の曲線上にあるように運転するもので、そのとき輸送量は図-6 で示される。濃度が図-5 の曲線を超えると沈澱を起して押送圧力があがり、ポンプは砂の吸込をやめて水のみを送ることになる。故に輸送量は図-6 の曲線以上に出ることはなく、従つてある程度以上の大管を用いることはただ水の輸送のために出力を消費する結果となる。

このようにポンプ船の効率はその管径によつて左右される。与えられた管径で輸送量を最大にすることすなわち図-6の曲線上にあらしめるることは、単に運転の技術の問題であつて効率の問題ではない。最経済的条件としては、図-6の $M_{\max}$ を与えるような管径を、その場合について求めることであるが、これは砂質や管長によつて違うので、最も多く起り得る場合を決定することが次の問題となるであろう。

#### 4. 結語

以上は経済的管径決定の理論的取扱を主として述べ、実地への応用については詳述していない。実地に応用するためにはさらに考えなければならない幾つかの2次的問題がある。これらについては別の機会に述べたい。なお式中実験によつて求めた数字は当然今後さらに修正される余地があるであろう。

#### 参考文献

- 1) 内田泰郎・加藤正晴・小川元：ポンプ船排砂管内の土砂濃度及び乱流交換係数について、土木学会誌論文集第35号

(昭. 31. 3. 17)