

排砂管の摩耗量

小川 元*

1. はしがき

ポンプ船の排砂管その他一般に送泥あるいは送砂管の摩耗量について、その定量的な表わしかたを述べたものである。これについての従来の実験は主として管材質の耐久性、あるいは砂利と砂の摩耗量の相違というような点に観点がおかれていて、水理学的見地から管径、流速、砂粒の沈降速度などとの関連において解明したものは見られない。この小論は過去の実験結果を参考にして、摩耗量を水理学的に検討したものである。

2. 摩耗の発生

管内壁の摩耗がどういう機構によって生ずるかを考えると、まず摩耗とは流水中の土砂粒子が管壁に衝突したり、しゅう動したりして生ずる管壁の損耗であるということができよう。そこで摩耗量は衝突する土砂粒子の量すなわち土砂濃度と、一定粒子の衝突回数すなわち浮遊あるいは乱れの程度、また、しゅう動する土砂群の管底接触面積に支配されることになる。ところで、これら濃度や浮遊の状態は総合的にいって土砂粒子と流れとの平衡によって決まる。もちろん、管の材質、土砂粒子の比重と硬さ、水の密度と動粘性係数に関係することは明らかであるが、これらはいま別の問題とする。

経験によると浮流と掃流とは明らかに掃流の方が摩耗量が多い。浮流するか掃流するかは土砂粒子の沈降速度と、これを浮かべようとする力との相対関係によることであり、上述の土砂濃度と浮遊の程度も、またこれによって定まる。さらに同じ掃流であっても浮流に近い状態であれば完全な掃流の場合より摩耗は少なくなるであろう。これらを考えると摩耗量は、土砂粒子の沈降速度と、管径によって決まる流れの浮流能力との相対関係によって決まり、特に経験上からいって、掃流か浮流かによって著しい差がでることができよう。砂利の場合に摩耗量はがなはだしいということも、砂利であるた

めというより掃流であることが真の原因であるということができ、必ずしも粒子の大きさだけでは摩耗量は定まらない。なお、浮流の場合には摩耗は管内壁全面に及ぶので管厚の減少はわずかであるが、掃流の場合には底面だけに摩耗が集中し、この点からも管の損傷が早い。

3. 摩耗量の表現

実地の場合に摩耗が問題になるのは摩耗によって管壁に穴があく場合である。この点からすると、摩耗量は管厚の減少を用いて表現するのが実際的である。しかし、掃流土砂が多い場合には、総摩耗量としては少ない場合でも管底に穴があき、よく浮流している場合には、総摩耗量は多い場合でも管壁の減少は比較的小さい。そして摩耗が管底に集中するか分散するかは、流れの浮流能力と土砂の沈降速度との相対関係によるもので、一般には浮流から掃流まで、あらゆる段階が存在して明確な区別はつけにくい。したがって、比較対象としては、部分的な管厚の減少より総摩耗量をとるよりほかはない。

次に、何に対して摩耗量をとるかを考えると、単位時間あたりと単位輸送土量あたりが考えられる。しかし、単位時間あたりをとっても、摩耗量は原則的にその時間内の輸送土量に比例すべきものであるから、単位輸送土量あたりをとる方が合理的であろう。さらに、次に管径の問題がある。大きい管では単位時間あたり輸送土量が多いが、同時に摩耗にさらされる周壁面積が大きい。小さい管では単位時間あたり輸送土量が小さく、一定土量の輸送時間が長くかかり、このため周壁面積は小さいが摩耗時間が長くなる。したがって、一定土量に対する摩耗量は必ずしも周壁面積に比例するものではなく、これからして周壁単位面積あたり摩耗量をとることは適当ではない。この問題は、管断面積と周壁長の比、すなわち径深に関係し、大管は周壁長に対して断面積が大きいので、周壁にふれずに内部を流れる土砂量が多くなり、この点からすれば、同一輸送土量に対して摩耗量が少なくなる。これらを考えると、摩耗量は管径の大小にかか

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部交通工学科

わらず管の単位長さについて考えるのが適当であると思われる。以上によって、摩耗量の単位として管単位長あたり単位輸送土量あたりの摩耗重量をとり、これを k とおく。すなわち

$$k = \frac{W_f}{V_s} \quad W_f = k V_s \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 W_f ：単位管長あたり摩耗重量、 V_s ：輸送土砂量

式(1)が示すように、 k は摩耗重量と輸送土砂量との間の比例定数であるが、これは砂の流れ状態、すなわち管径、流速、土砂の粒度の相対関係によって変化する。なお、 V_s を重量で表わすと k は無次元になるが、実用上では土砂量は見かけ容積を用いるのでそれに従うことにする。すると、 k は F/L^3 の次元を持つことになる。

4. 摩耗量に対する管径の影響

管材質や土砂粒子の硬度などを別とすれば、上述のように摩耗量は浮流と掃流および管径の大小によって異なることになる。そして、浮流するか掃流するかについても管径が影響するので、管径は二重に摩耗に対して影響を持つことになり、管径が摩耗に対する基本的な要素となる。これらの影響は、上述の k の値の変化として表わすことができる。

いま、同じ浮流状態で流れている大小2管の摩耗量を考える。管径 r と土砂粒径とが異なる場合に、浮流状態が同じであるということは、流速 v と濃度 C とが、おのおの異なっていることを意味する。そこでいま、浮流状態が同じであれば、単位時間あたり、壁面の単位面積に衝突する粒子の数は、ほぼ濃度と流速に比例すると考えられるから(粒子の大きさの差異を無視する)、したがって、摩耗量も近似的に、これらに比例すると考えられ、よって全周壁あたり単位時間あたりの摩耗量は $2\pi r v C$ に比例する。一方、同一土量を流送するに要する時間は単位時間あたり流送土量 $\pi r^2 v C$ に逆比例し、摩耗量は流送時間に比例するといえるから、結局、単位土量あたり摩耗量 k は、単位時間あたり摩耗量と流送時間との積となり、比例定数を α とすれば次のようにおくことができる。

$$k = \alpha \frac{2\pi r v C}{\pi r^2 v C} = \alpha \frac{2}{r} \dots \dots \dots (2)$$

半径 r を直径 D でおきかえるとともに、定数 α を改めて α_1 として

$$k = \alpha_1 D^{-1} \dots \dots \dots (3)$$

次に掃流の場合を考えると、この場合は摩耗が全周壁に及ばず、管底部のみに集中される。したがって、摩耗量は周壁長には比例しないわけで、式(2)の分子の $2\pi r$ は除かれる。いまかりに、摩耗帯の幅を管断面に含まれる掃流砂量の割合 C に比例するものとみなすと、摩耗量は掃流流速 v と C とに比例することになり、他は浮流の

場合と同様にして次式がえられる。

$$k = \alpha' \frac{v C}{\pi r^2 v C} = \frac{\alpha'}{\pi r^2} \dots \dots \dots (4)$$

r を D でおきかえ、定数を改めて α_2 とおいて

$$k = \alpha_2 D^{-2} \dots \dots \dots (5)$$

上記の比例定数 α_1, α_2 は、それぞれ浮流と掃流の場合の摩耗量に関する定数である。ただし、次元を持つ。

ところで、ある管に土砂を流した場合にそれが浮流になるか掃流になるかは、管径と流速および土砂の粒度と濃度の間の相対関係によって定まるものであって、これについては、昭和34年に筆者が理論ならびに実験によって求めた次式がある¹⁾。

$$v_c = \frac{r^{1.5} \omega^{2.5}}{\phi^{2.5} f^{0.5} \nu^{1.5}} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 v_c ：浮流限界流速、 ω ：土砂粒子の沈降速度、 ϕ ：濃度によって決まる定数、 f ：摩擦損失係数、 ν ：動粘性係数

式(6)はその後いくつかの実験実測に適用した結果、適用限界を適当にとれば、かなり実用性があるものと考えられる。そこで、これを用いることにすると、現在の流速が式(6)の v_c 以上であれば浮流となり、 v_c 以下であれば掃流となって、流速が低いほど掃流の程度が著しくなる。それによって式(3)を用いるか、あるいは式(5)を用いるかが決まるわけである。

次に、いま大小2管において、土砂が同じ状態で流れているとすれば、その両管の流速は、それぞれ式(6)で示される v_c に対して同じ比率にあるものと考えられる。したがって、両管の流速の比は両管の v_c の比に等しくなり、 f, ν の値を両管相等しいと仮定すれば、両管の記号にそれぞれ添字 1, 2 をつけて

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_{c1}}{v_{c2}} = \frac{r_1^{1.5} \omega_1^{2.5} \phi_2^{2.5}}{r_2^{1.5} \omega_2^{2.5} \phi_1^{2.5}} \dots \dots \dots (7)$$

すなわち、両管内の流速が式(7)の比率にあれば土砂の流れ状態は同じになり、したがって、摩耗の傾向も同じになって、両方とも式(3)あるいは式(5)に従う。

5. 実測値への適用

(1) 実験

実測値として、運輸省港湾技術研究所 宮崎氏の実験ならびに実測値を用いることにする²⁾。実験は室内実験と実船実験とに分かれ、両者おのおの砂利または粗砂と細砂とが流された。管材質は室内実験では4種、実船試験では3種が用いられ、室内実験では1本の長さ92.5cm、実船試験では同3.6mの管が、それぞれ直列につないで用いられた。測定は管断面各部の厚さの減少と管総重量の減少とが実測され、管壁単位面積単位土量あたりの摩耗量と、底部とその他の部分との厚さ減少の比が計算

されている。これら実験の要点を整理摘記し、再計算した結果を示すと表-1~5 のようである。

表-3 の全周平均摩耗厚とは、1本の供試管の両端と中央部計3断面で1断面あたり8ヵ所の肉厚を測定して全部を平均した値で、表-4 はそのうち底部3ヵ所の摩耗厚平均値と、その他の場所5ヵ所の摩耗厚平均値との比を示したものである。これによると、室内第1回は砂利であるため底部摩耗がその他の部分の4倍前後とな

表-1 実験の要目

実験種別	室内実験		実船試験	
	第1回	第2回	第1回	第2回
期間	昭.37.10 —38.8	昭.38.8 —40.4	昭.37.10 —38.8	昭.38.8 —40.4
場所	—	—	大阪堺地区	千葉県姉ヶ崎
管材質	4種	4種	3種	3種
管径 (cm)	15	15	58	58
砂種	砂利	砂	れき混り砂	シルト混り細砂
粒径 (mm)	20~30 40~50	0.5~1.5	0.01~1.8	0.01~0.25
平均流速 (m/sec)	3.5~4.5	1.7~2.7	—	—
流送時間 (h)	12	16	897	3366
流送土量 (m³)	372	403	303 348	2 264 511
実測平均濃度 (%)	6.5	12.9	—	—

表-2 管1本あたり摩耗重量 (kg)

管材質		SS41	FTW52	FTW58	コルテン鋼	改良コルテン鋼
		室内実験	第1回 0.36	0.34	0.32	0.33
	第2回	0.11	0.10	0.08	0.08	—
実船試験	第1回	49	—	—	44	41
	第2回	120	—	—	100	98

表-3 全周平均摩耗厚 (mm)

管材質		SS41	FTW52	FTW58	コルテン鋼	改良コルテン鋼
		室内実験	第1回 0.137	0.120	0.120	0.125
	第2回	—	—	—	—	—
実船試験	第1回	0.77	—	—	0.74	0.60
	第2回	2.23	—	—	1.92	1.85

表-4 底部とその他の場所の摩耗厚の比

管材質		SS41	FTW52	FTW58	コルテン鋼	改良コルテン鋼
		室内実験	第1回 4.1	3.3	3.6	4.5
	第2回	—	—	—	—	—
実船試験	第1回	—	—	—	—	—
	第2回	1.3	—	—	1.3	1.2

表-5 単位輸送土量あたり摩耗重量 (kg/m³)

管材質		SS41	FTW52	FTW58	コルテン鋼	改良コルテン鋼
		室内実験	第1回 1.02	0.963	0.905	0.935
	第2回	0.288	0.250	0.208	0.208	—
	第1回/第2回	3.5	3.9	4.4	4.5	—
実船試験	第1回	0.0455	—	—	0.0400	0.0382
	第2回	0.0146	—	—	0.0127	0.0127
	第1回/第2回	3.1	—	—	3.1	3.0
室内/実船	第1回	22.4	—	—	23.4	—
	第2回	19.7	—	—	16.4	—

り、また実船第2回は細砂であるため摩耗が全周平均している。実船第1回は砂利混じり砂で底部摩耗がはなはだしく、そのため実験途中で管を上下回転したので底部摩耗の大きさは不明である。

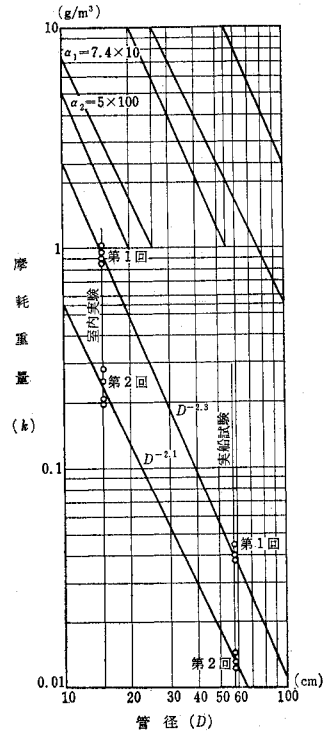
表-5 にはそれぞれの場合の k の値と、室内と実船との k の比が示してある。同表において、室内と実船の第1回と第2回の比の項は、それらの場合の k の比を表わし、室内と実船との比の第1回とは、両者第1回どうしの k の平均値の比を示している。第2回どうしについても同様である。これらによると、まず室内実験の場合、砂利のほうが砂より約4倍 k の値が大きくなり、また実船試験の場合にも、れき混じり砂のほうが細砂より約3倍 k の値が大きくなっている。この結果と表-4 の室内第1回の底部摩耗の比率4とをあわせ考えると、掃流の場合には k の絶対値が大きくなるとともに、その摩耗が管底に集中して短期間に管に穴があくことがわかる。次に表-5 の最下欄によれば、粗砂および細砂の場合ごとに、室内と実船との k の比が示してあり、これによれば粗砂の場合も細砂の場合もとも室内実験のほうが20倍前後 k の値が大きくなっている。これは、管径の差によるものであると考えられる。

(2) 理論式の適用

式(3)あるいは式(5)と比較するために、表-1の

k の値を管径に対して対数目盛りにより図示すると図-1のようになる。室内と実船の第1回どうし(粗砂)、第2回どうし(細砂)を直線で結ぶと図のようになり、これは粗砂および細砂の場合について k と管径との関係を示す直線となる。このうち第1回は表-5の室内第1回と実船第1回の k の比 22.4 および 23.4 に相当する直線であり、これに近い値を与えるように、 $D_1=15\text{ cm}$ 、 $D_2=58\text{ cm}$ を用いて $(D_2/D_1)^x$ の指数 x を求めると、 $x=2.3$ となる。すなわち、この場合 $(k_1/k_2) = (D_1/D_2)^{-2.3}$ 同様に第2回どうしの場合は

図-1 単位輸送土量あたり摩耗重量と管径との関係



19.7 および 16.4 を用いて $x=2.1$ となり、図-1 の 2 本の直線は、おのおのこれに従って描かれたものである。2 本の直線が $D=1$ の線と交わる点の縦距として α の値を求めると、 $\alpha=74$ (砂) および $\alpha=500$ (砂利) となる。これらによって、実測結果を式 (3) または (5) の形で表わすと次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{砂利の場合} \quad k=500 D^{-2.3} \\ \text{砂の場合} \quad k=74 D^{-2.1} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただしこの場合、 k は輸送土量 1 m^3 あたりの摩擦重量 g で与えられているので、式 (8) は単位のある実験式となり、 D は cm である。

式 (8) において、砂利の場合は、ほぼ完全な掃流と考えてよいが、砂の場合は必ずしも完全な浮流であったかどうか疑問である。ただ、この場合のほうが浮流に近かったということ是可以する。そこで、 D の指数が両者近似しているのは、両者の流れの状態があまり違わなかったためとも考えられるが、また一方、摩擦に対する管径の影響が、土砂粒子の大きさによってあまり変わらないのではないか、ということも考えられる。しかし、 α の値は両者かなり異っており、その比をとると $500/74=6.8$ 、これは浮流に近い場合と掃流の場合との差によって生じたものと考えられ、これから掃流と浮流とでは、管径が同じである場合、掃流のほうが 6.8 倍以上の摩擦があるということが出来る。これにさらに、表-4 の実測結果に従って、底部摩擦厚がその他の部分の 4 倍になると仮定すると、代数計算の結果は掃流摩擦の場合の底部の摩擦厚は、浮流の場合の 15 倍以上になることが知られる。

なお、上記のように式 (8) は、実用的表現をとって摩擦重量を輸送土量あたりの重量で示したものであるが、いま輸送土量を重量で表わすと k は無次元となり、これに管半径を次のような方法で無次元表示して組み合わせると、 k が無次元表示される。すなわち、式 (6) を次のように書き直すと、これは土砂流に関連した要素で表わした管半径の無次元表示であると考えることが出来る。

$$\phi^{5/3} = \frac{w^{5/3} r}{f^{1/3} v^2} \dots\dots\dots (9)$$

一方、式 (9) の各要素の組合せに対応する浮流砂の濃度 C は、同式によって求められる ϕ に対応する値として、式 (6) とともに筆者が示した次式によって求めることができる¹⁾。

$$C = \frac{1}{1.9} \{ \exp(-0.027 \phi) + \exp(-0.063 \phi) \} \dots (10)$$

そこで、各実験における式 (9) 右辺の値と、それに対応する ϕ の値から式 (10) で求められる濃度 C を用いた k/C との関係を探ると、室内および実船の各実験結果が一つの関係で示されるものと思われる。

しかしながら、本実験では土砂の粒度が明確でなく、また流速も明らかでないので式 (9) 右辺の値が確定せ

ず、これを確かめることはできない。

6. 摩擦を考慮した経済的な管径

5. (1) で述べたように、単位輸送土量あたり摩擦重量 k は浮流と掃流とでかなり異なり、さらに、掃流の場合には摩擦が底部に集中して管の損傷が早い。今回の実験では、掃流の場合は底部摩擦が浮流に対して 15 倍の大きくなるということが認められた。したがって、土砂はなるべく浮流で流すほうがよいのであるが、浮流させるためには管は細いほうがよいので、この点からすると管は細いほうが有利であることになる。ところが、一方式 (8) に示すように、 k の値は管径のほぼ自乗に逆比例して細い管のほうが大きくなる。したがって、摩擦の点からいって、経済的な管径は、土砂が浮流する限度において、なるべく太い管径であるということになる。これは、土砂が浮流限界状態になるような管径で、流速との組合せによって決まり、このような管径は、土砂流の摩擦損失の点からいっても最も効率的な管径であって、式 (9)、(10) を用いて、かつて筆者が提出した効率的管径である¹⁾。

7. 結 論

排砂管の摩擦量は土砂が浮流している場合と掃流している場合とでかなり異なり、掃流の場合は断面総摩擦量において浮流の場合の 6.8 倍以上の摩擦がある。さらに、掃流の場合には、この摩擦が底部に集中するので底部の損傷はさらに早く、底部摩擦だけについていえば 15 倍以上になると思われる。したがって、土砂はなるべく浮流で流すのがよいのであるが、そのためには、管は細いほうがよい。しかるに、一方同一輸送土砂量に対する摩擦量は、管径のほぼ自乗に逆比例して細い管のほうが大きくなるので、結局、摩擦の点から見た経済的な管径は浮流する限りでなるべく大きな管径、すなわち浮流限界流速に相当する管径であって、筆者がかつて土砂の輸送効率の点から求めた効率的管径と一致する。

この論文は、過去 2 回にわたって他誌^{3),4)} に投稿したものを、さらに検討を加え要約したものである。

参 考 文 献

- 1) 小川元：ポンプ船排砂管の 経済的管径 およびその他の諸問題，土木学会誌，第 44 巻第 5 号，昭和 34 年 5 月，pp. 23-29.
- 2) 宮崎昭児：排砂管の摩擦調査，作業船，第 38 号，昭和 40 年 3 月，pp. 53-64，同第 42 号，昭和 40 年 11 月，pp. 43-52.
- 3) 小川元：管摩擦における管径の影響，作業船，第 47 号，昭和 41 年 10 月，pp. 38-42.
- 4) 小川元：送泥管の設計 (6)，配管技術，第 11 巻第 4 号，昭和 44 年 4 月，pp. 174-180.

(1969.11.1・受付)