

管による掃流輸送砂量について

日本大学教授 工学博士 小 川 元

1. 序 論

管による土砂の輸送を基本的に考えると、管径と流速と砂粒の粒度との関連において、砂粒が完全に浮遊して流れる場合から、しだいに掃流沈澱する場合までが考えられる。完全に浮流していれば、砂粒の流れと水の流れとはほぼ一致していると見なすことができるが、掃流量が多くなるにしたがつて、水の流れの方が土砂の流れに先行し、水の流れのうち、土砂輸送に貢献しない、むだな水流の割合が大になつてくる。したがつて、流水量と土砂輸送量の割合は、砂粒が浮遊している場合が最も大きく、ポンプ出力に対する土砂輸送効率もこの場合が最大である。ただし流速が土砂浮遊の限界以上に大になると、こんどは摩擦による損失が大になつて、そのために輸送効率が落ちるので、理論的には浮遊限界流速で土砂を輸送するのが最も効率的になる。このことは概念的には20年以上前から認められていたが、筆者は先年これを定量的に方式化した。

従来土砂の流送をあつかう場合、流速、砂粒の粒度、濃度の3者が問題にされて、管径は固定されて考えられていることが多かった。しかるに実際によると、明らかに管径によつて浮遊、掃流の限界流速が異つており、管径が基本的な一要素であることが知られる。そこで土砂流送の現象を、管径、流速、土砂の粒度、濃度の4者の間の相對平衡であると考えて解いたものが筆者の方式である。

効率的な輸送状態とは以上のように、浮遊限界状態における流送であり、この意味においては、それ以上の探求の必要がないのであるが、それとは別に、実地の場合にやむをえず掃流で輸送する例が非常に多い。たとえばポンプ船の場合に、泥土や細砂に対して適当であるようなポンプ系列を用いて、粗砂や砂礫を輸送する場合とか、あるいは工場、鉱山などで、鉱滓、石炭、ボタなどを、いわゆる水力輸送する場合などである。またさらに海岸の逡浜においても、現在はまだポンプ船を使用するだけの段階のようであるが、これを河川上流部の適当な地点から、管を用いて自然勾配によつて土砂を掃流輸送することも場合によつて可能であると考えられる。

これらの場合、そのポンプ系列において砂礫の輸送が可能であるが、またその輸送量はどれ位になるか、経済効率はどれ位かというような問題が生じてくる。そこでそのような掃流輸送の場合、どの位の量が輸送されるかを明らかにする目的で本研究を行つたものである。

筆者が先に求めた方式においては、浮遊限界状態を現出せしめるための管径と流速との組合せを与えることが主眼となつており、砂輸送量については、粗粒になつて掃流量が増加するにつれて計算値と実際とは合はなくなつてくる。理論的にいえば、浮遊輸送と掃流輸送をふくめて、土砂流送現象を統一的に解くのが望ましいのであるが、それは困難であるので、いまここには浮遊の場合と掃流の場合とを分けて考える。

2. 実験設備および方法

高さ6mの高水槽を設け、ここから管によつて流下させた水に、図-1のような装置によつて砂礫を混入し、水平部を流送させた後垂直に上昇させ、切換弁によつて計量槽に導いて、ここで容積と重量を測定した後砂溜槽を経

図-1 実験設備

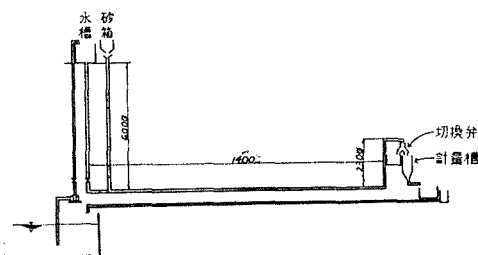


図-2 砂、砂利の粒度加積曲線

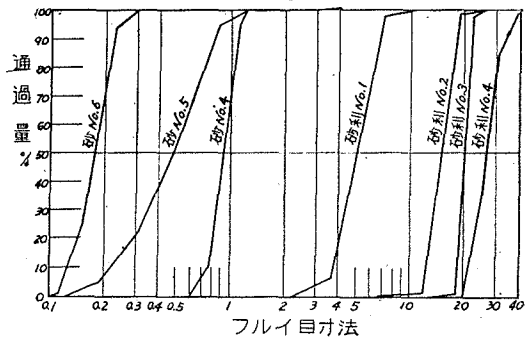


表-1 砂, 砂 利 の 物 理 性 状

試料		粒 径	中 央 粒 径	比 重	平均沈降速度	摘 要		
砂		(mm)	(mm)		(cm/sec)			
	No. 4	1.2 以下	0.91	2.58	8.9	相海 豊	馬岸 浦	砂砂 砂砂
	No. 5	"	0.48	2.58	6.6			
	No. 6	0.3 以下	0.17	2.57	2.7			
砂利	No. 1	3 ~ 6	5	2.57	27	山川	砂砂 " "	利利
	No. 2	10 ~ 15	15	2.63	42			
	No. 3	15 ~ 20	20	2.63	50			
	No. 4	20 ~ 30	26	2.64	56			

て低水槽に放出する。低水槽から管によつて水だけが貯水槽に還流する。水平部および垂直部に挿入した透明部から流れの状態を観察し、計量槽によつて流速、砂輸送割合を求める。

砂および砂利の物理性状、粒度加積曲線はそれぞれ 表-1 および 図-2 のようである。

表-1 のうち、平均沈降速度とは、中央粒径に対応する沈降速度である。

使用した管は内径 41 mm, 53 mm, 75 mm の 3 種である。実験はこれらの管に 表-1 のような資料を、少量からしだいに増量して流し、その間流速を掃流限界状態に近づくように加減し、流れ状態の多数の観察とそのときの濃度とから、おのおのの濃度に対する掃流限界流速を推定した。ただしここに濃度とは、便宜的に砂礫と水との輸送割合をさすことにする。

管径に対して砂礫の粒径が大になるか、あるいはまた粒径はある程度小であつても濃度が大になるかすると、限界掃流流速を僅か下回つてもたちまち管がつまつた。そのため実験は制限を受け、砂利の場合には 表-3 に示す範囲までしか実験を行うことができなかった。

3. 実 験 結 果

掃流輸送の現象も、諸要素間の一つの相対平衡の結果であろう。そしてその平衡は限界掃流状態において定量的にとらえることができるであろう。この見地に基づいて、各管径、各粒度において、種々の濃度に対する掃流限界流速を求めた。その結果は 表-2, 表-3 のようである。

表-2 砂 の 掃 流 限 界 流 速

管 径 (mm)		41		53		75	
試 料		濃 度	限界流速	濃 度	限界流速	濃 度	限界流速
砂	No. 4	(%)	(cm/sec)	(%)	(cm/sec)	(%)	(cm/sec)
		0.5	88	0.5	110	0.5	175
		1.5	170			1.0	190
		4.0	195			2.5	245
		5.0	200			4.0	255
		8.0	210				
	No. 5	0.5	98	1.0	135	0.5	185
		1.5	145	2.0	145	1.0	200
		4.0	180	3.0	160	1.2	210
		5.0	185	5.0	170	2.6	240
		7.0	190	10.0	185	3.0	245
						4.0	250
	No. 6	0.5	98	0.5	70	0.5	150
		1.0	110			1.0	175
		2.0	135			2.0	190
		5.0	155			3.0	200

表-2, 表-3 の掃流限界流速は、砂礫が時間的に連続して流動するほぼ最低の流速で、静止する場合と、安全に掃流輸送される場合との中間にあるものと考えられる。流送の状態は、砂礫量が非常に少ないときには、管に沿つて一様に分布して掃流するが、その量が多くなり、かつ、流速が限界流速以下であると、砂礫は全体として動いては止まる蛇動運動を起し、あるいは局部的なかたまりを生じて、それがめくれるように後端から前端へと個々の砂礫が移動して、全体として緩徐に前進してゆく。この場合さらに僅かに流速が下降すると、砂礫ののし上げの高さが高くなつて、粒径が大なる場合にはここで管が閉塞することになる。このため管を切断して清掃しなければならないことがしばしばあつた。これはもちろん、粒径が大で管径が小なる場合に最も起りやすく、表-3 の砂利

表-3 砂利の掃流限界流速

管 径 (mm)		41		53		75	
試 料		濃 度	限界流速	濃 度	限界流速	濃 度	限界流速
砂	No. 1	(%)	(cm/sec)	(%)	(cm/sec)	(%)	(cm/sec)
		0.5	90	2.5	125	1.0	185
		1.5	110	3.0	130	2.0	210
		3.0	140	5.7	140	2.5	230
		8.0	150	0.0	140	5.0	250
		10.0	155	8.0	150	10.0	270
		15.0	210	10.0	170		
	No. 2	0.5	110	4.0	115	3.0	170
		3.0	135	5.0	130	6.0	180
		4.0	155	6.0	135		
				10.0	150		
利	No. 3	—	—	3.0	110	4.0	145
						6.0	190
	No. 4	—	—	—	—	3.0	165
						5.0	190

表-4 D/d の 値

管 径 D (mm)		41	53	75
砂	No. 4	45	58	82
	No. 5	85	111	156
	No. 6	242	312	440
砂	No. 1	8.2	10.6	15
	No. 2	2.7	3.5	5.0
利	No. 3	2.1	2.7	3.8
	No. 4	1.6	2.0	2.9

No. 3, No. 4 の空欄は、この現象のために実験ができなかつた場合である。そこでこれを定量的に知るために管径と粒径との比を求めると 表-4 のようである。

表-4 のうち d は中央粒径である。表-3 によつて、実験が不可能であつた場合の D/d の値を、表-4 から求めて見ると、それぞれ 2.1, 2.0 であり、また実験が可能であつた D/d の最大値は、同じく 表-3 および 表-4 からそれぞれ 2.7, 2.7, 2.9 であることが知られる。このことから $D/d=3$ がほぼ安全に掃流輸送のできる限界であるといふことができる。砂の場合には閉塞の危険はほとんどなく、特に $D/d>100$ の範囲では安全な感が大である。

4. 考 察

表-2, 表-3 に示された掃流限界流速を見ると、濃度が大になるにしたがつて限界流速が大になるのはもちろんであるが、粒度については必ずしも粗粒になるほど限界流速が大になるとは限らず、砂の場合には粗粒の方が大であり、砂利の場合にはむしろ粗粒の方が限界流速が小であるような傾向がうかがわれる。つぎに管径の影響を見ると、これは明らかに管径が大なる方が限界流速が大である。

浮遊限界に関する実験においても、管径が小なる方が限界流速が小であり、いいかえれば管径小なる方が浮遊力が大であつた。これから見れば、掃流輸送の場合にも、管径小なる方が掃流力大なることが推察されうところで、管径小なる場合には、砂礫は浮遊力を多く受けて掃流しやすくなり、管径大になるにしたがつて開水路の場合に近づいてくるものと思われる。なお垂直上昇の場合には、掃流限界以下の流速でも輸送が行われる。

これらの結果を次のように整理する。掃流限界流速に関与する要素としては式 (1) のようなものが考えられる。

$$v_c = f(D, k, d, \rho, N, \nu) \quad (1)$$

ここに、 v_c : 掃流限界流速 (断面平均流速), D : 管径, k : 粗度, d : 中央粒径, ρ : 砂粒の密度, $N = q_s/q$, q_s : 砂礫輸送量 (真容積), q : 流量 (水, 砂礫混合物), ν : 動粘性係数。

式 (1) の諸要素のうち、 k, ν は砂礫輸送に大きな影響を持たないことが、これまでの研究⁹⁾によつて知ら

れているので、いまこれを見れば、また ρ のかわりに砂粒の平均沈降速度 w を用いて、 v_c/w と D/d との関係求めて見ると 図-3 のようになる。

図-3 によると、 D/d の値に対して v_c/w が密接な相関関係にあることが認められる。また 図-3 は各種の濃度の場合を混合して図示してあるので、これから、濃度にかかわらず D/d の値が大になれば（すなわち、砂粒の粒径が小になるにしたがつて）沈降速度に対する流速の割合は大になり、反対に粒径が大になるにしたがつて、流速の割合は小になることがわかる。このことは、定性的考察でもうかがわれたように、表-2、表-3 において、粒径 1 mm の砂が限界流速が最大であつた事実とあわせ考えると、粒径の小なる場合には流速の作用が大であることを要し、粒径大なる場合にはそうでないことを示すものと考えられる。いまこの傾向を次のように考える。

粒径の大なる場合には砂礫は、粒子周囲の流速の作用を直接受けて流送される。これに対して微流の場合には、掃流の場合にも管の浮遊力すなわち拡散係数の作用を多く受ける。前者の場合には掃流力を示す要素としてレイノ

図-3 v_c/w と D/d との関係

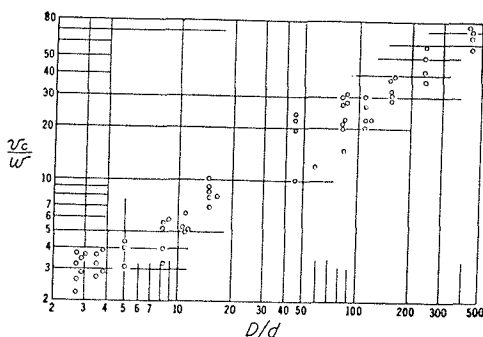
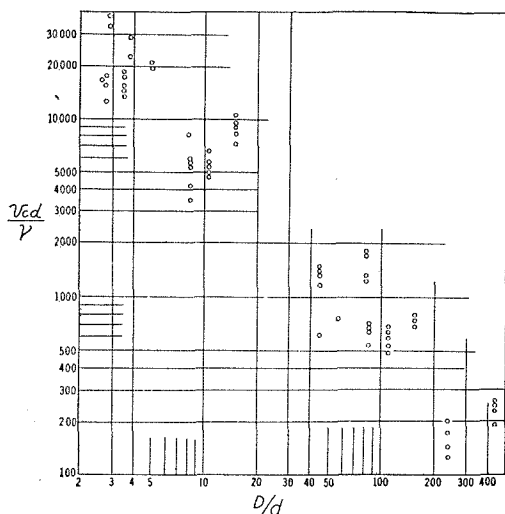


図-4 $v_c d/\nu$ と D/d との関係



ルズ数 $v_c d/\nu$ をとり、後者に対しては、先に浮遊輸送の研究において求められた拡散係数を用いることにして、粒度によつて二者に分けて考えることにする。

まず $v_c d/\nu$ と D/d との関係を見ると 図-4 のようになる。図-4 も各濃度の点を混合して示してあるが、これを見ると、一定濃度の砂礫を輸送する場合に、 D/d の値が小ならば $v_c d/\nu$ 、あるいは v_c を一般に v と書きかえて、 vd/ν の値が大なることを要し D/d が大なる場合には vd/ν は小でよい。これから、粗粒の輸送に対しては vd/ν が主なる作用をなし、微粒輸送に対しては他の要素が主として作用しているものとする。

そこで微粒の場合には、輸送量は主として拡散係数の作用を受けると仮定し、浮遊の場合の研究²⁾に準じて、濃度 N が式(2)のように表わされるものとすれば、

$$N = ke \times p \left(-\frac{w}{\varepsilon} r \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに k : 定数、 ε : 拡散係数、 r : 管半径。

ε を浮遊の場合に準じて式(3)のようにとり、

$$\varepsilon/\nu = k' Re_*^{0.4} \dots \dots \dots (3)$$

ここに Re_* は、

$$Re_* = \frac{r}{2} u_* / \nu \dots \dots \dots (4)$$

さらに式(4)を式(3)に代入して整理すると

$$\varepsilon = k'' u_* r Re_*^{-0.6} \dots \dots \dots (5)$$

ここに k' , k'' は定数、 u_* は摩擦速度で円管の場合には

$$u_* = v\sqrt{f/8} \dots \dots \dots (6)$$

となる。

式(5)を式(2)に代入すると

$$N = ke \times p \left(-\frac{1}{k''} \frac{w}{u_*} Re_*^{0.6} \right) \dots \dots \dots (7)$$

そこでいま

$$\phi = Re_*^{0.8} w/u_*$$

において、 ϕ と D/d の関係を図示すると、図-4 のようになる。

式(7)によると ϕ の値が小なる方が大なる濃度を与えるが、一方図-4によれば、粗粒の場合には ϕ が大であつても、微粒の場合の ϕ が小なるときと同じ濃度を与える。このことは結局粗粒の場合には ϕ 以外の要素が作用していることが示されたものといえよう。

以上のような検討から掃流輸送量を示す関数を見出そうとするのであるが、現在まだそれは成功していない。ただ掃流輸送の場合には、 D/d のある値を境界として、輸送量を示す関数が異なることが推察されるのである。

5. 結 語

以上は掃流輸送の場合の輸送量を求める研究の端緒を示したものであるが、ここで知られたことは、 D/d の値が3以下になると、輸送はほとんど不可能になることと、 D/d のある値(約50)を界として、それ以上の場合には拡散係数、それ以下の場合にはレイノルズ数 vd/ν が卓越して作用すると思われることである。 $D/d=50$ の付近では、この両要素がいずれも有効に作用しないために、輸送が最も困難であるように思われる。

輸送量の表示に関してはさらに検討を要するのであるが、微粒の場合には浮遊作用を大ならしめるように、また粗粒の場合には掃流作用を大ならしめるために、細粗いずれの場合も比較的小管の方が経済的であることが推察される。定量的検討はさらにこんごに行いたい、その結果によつて、これをポンプの特性曲線と結合し、あるいは自然落差の場合には、全水頭が一定であることから流速は管径の平方根に比例する関係があり、これを用いて、最も輸送量の大なる管径を定めることができる。

以上によつて、養浜のための砂輸送だけでなく、ポンプ船によつて砂利を輸送する場合、あるいは石炭輸送などについても、有効な指針を与えることができるであらうと思われる。

付 記

本研究は文部省科学試験研究「養浜の海岸工学的研究」および文部省各個研究の研究費の補助を得て行つた研究の一部である。また実験および計算については、当時の山口大学工学部土木工科学学生会田義彦君の労にまづところが多い。ここに記して謝意を表する。

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、4-1、昭28。
- 2) 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、44-5、昭35.5。

図-5 ϕ と D/d と の 関 係

