

# 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響

## Effect of Fine Sand on Mobility of Coarse Sand

池田 宏\*・伊勢屋ふじこ\*

Hiroshi IKEDA and Fujiko ISEYA

### I はじめに

水流中では、一般に、礫は砂より運ばれにくい。すなわち、礫を運搬するには、同量の砂を運搬するより大きなパワーが必要である。したがって、砂に礫が混じれば混じるほど、その混合物は運ばれにくくなると考えられてきた。ところが、このことは全ての場合について必ずしも真ではなく、砂に礫が混じった混合砂礫のほうが砂だけの時よりもかえって容易に運搬される場合があることが明らかにされた(池田, 1984; Ikeda, 1984)。本報告は、同様の事実を、細砂と粗砂の混合物について検討したものである。この結果、礫と砂の場合と同様に、細砂とともに運搬される粗砂の粒子は細砂の粒子よりも運ばれやすくなりうること、その結果、細砂混じりの粗砂のほうが細砂だけの時より運ばれやすい場合のあることが確かめられた。

### II 実験方法

実験には中央粒径 0.2 mm の細砂(豊浦標準砂)と中央粒径 1 mm の粗砂(日本原料 K K の濾過砂、有効径 0.8 mm、均等係数 1.3)を使用した(第 1 表)。

実験装置と実験方法は前報(池田, 1984)と同様である。幅 10 cm、長さ 4 m の木製水路に毎秒 100 cm<sup>3</sup> の水を流し、2 台の給砂装置によって細砂

第 1 表 実験用砂の粒度組成と比重

	d <sub>16</sub> mm	d <sub>50</sub> mm	d <sub>84</sub> mm	σ/ρ
fine sand	0.16	0.20	0.24	2.65
coarse sand	0.84	1.0	1.2	2.65

と粗砂を別々に水路に供給して、その混合物を運搬するのに必要な勾配を求めた。

実験結果を第 2 表に示す。Run 1~4 は細砂について、Run 6~9 は粗砂について給砂率を段階的に増して、それを運搬するのに必要な勾配がどのように変化するかを調べた結果である。Run 10~15 が今回主目的とした実験で、細砂と粗砂の給砂量の合計を毎秒 8 g に保ち、細砂と粗砂の混合比率のみを段階的に変えた結果である。

各 Run とも、水路を空にしておいて給水・給砂を開始し、アグラデーションが進行して、勾配が安定するのを待った。水路下流端からの流出砂率とその砂の質が水路起点で給砂したものと等しくなる状態、すなわち動的平衡状態に達するまでの時間は給砂率によって異なるが、今回の実験では 30 分程度を要した。その状態で水面の縦断勾配と砂粒子の移動速度および水路下流端からの流出砂率を測定した。

水面勾配は、水面高をポイント・ゲージで 25 cm 間隔で測定して、その縦断変化から求めた。

砂粒子の平均移動速度は、給砂している砂と同

\* 筑波大学水理実験センター

(1985年7月8日受理)

第2表 実験結果

Run No.	Dis-charge, cm <sup>3</sup> /s	Temperature, °C	Bed load feed rate, g/s			Bed load discharge rate, g/s			Water surface slope, %	Mean bed load velocity, cm/s	
			Total	Coarse sand	Fine sand	Total	Coarse sand	Fine sand		Coarse sand	Fine sand
1	92	20	1.3	0	1.3	1.1	0	1.1	2.9		2.0
2	102	20	2.8	0	2.8	2.6	0	2.6	4.3		0.6
3	100	19	5.0	0	5.0	4.0	0	4.0	5.2		3.0
4	100	—	9.4	0	9.4	8.9	0	8.9	7.6		11.8
6	100	20	1.4	1.4	0	1.7	1.7	0	4.3	2.9	
7	100	18	4.3	4.3	0	4.5	4.5	0	6.3	4.5	
8	100	—	6.5	6.5	0	6.1	6.1	0	7.1	6.7	
9	100	—	10.9	10.9	0	8.8	8.8	0	9.0	4.6	
10	100	19	8.1	2.1	6.0	7.8	2.8	5.0	6.5	17.1	5.4
11	100	—	8.0	3.7	4.3	7.6	4.3	3.3	6.3	10.6	2.6
12	100	—	8.1	4.6	3.5	7.5	4.5	3.0	6.1	5.7	1.6
14	100	18	8.1	5.8	2.3	7.1	5.1	2.0	6.4	20.0	3.0
15	100	19	8.3	6.8	1.5	7.3	6.0	1.3	7.0	8.7	1.3

流砂率は乾燥重量。

じ砂を蛍光塗料で着色して作ったトレーサー粒子（一回につき1～2g）を水路に投入して、水路下流端から流出する砂を投入時以降10～30秒間隔で継続的に（水路内にトレーサー粒子が殆ど無くなるまで、4～7分間）捕らえ、その中に含まれるトレーサー粒子の個数を紫外線ランプを使用して数えた。その結果から、流出したトレーサー粒子の50%が流出するのに要した時間を求め、トレーサー粒子投入点から水路下流端までの距離を所要時間で除して、粒子の平均移動速度とした。河床形は平坦床か交互砂礫堆であり、各Runとも、全体に流砂はスムーズであったので、粒子の移動速度の測定は比較的容易であったが、測定を一回しか行わなかったこと、またトレーサー粒子の投入方法に難点があったことから、得られた移動速度はその概略値を示していると見なすべきと考える。

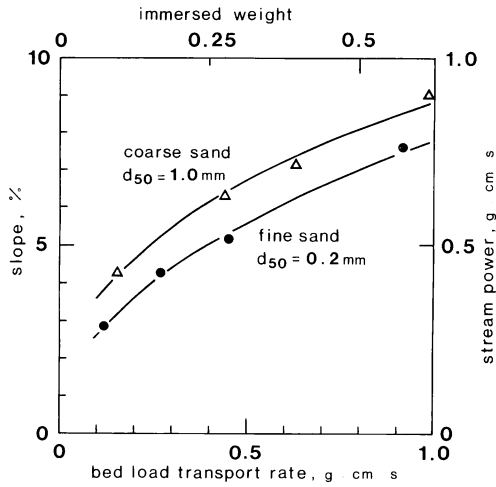
流砂率は給砂率と水路下流端からの流出砂率の平均値とした。動的平衡状態では流出砂率と水路起点での給砂率とは長時間平均すれば等しくなっているはずであるが、第2表では両者の間にかなりの開きがあるものも認められる。これは、水路

内で生ずる縦断的分級（池田，1984）によって流出砂率が時間的に変動し、短時間の捕砂による流出砂率は給砂率とは必ずしも等しくならないためと、しかも、給砂率も給砂装置の不完全さのゆえに5～10%変動するためである。

### III 実験結果と考察

給砂率と勾配の関係を細砂と粗砂について第1図に示す。細砂を運搬するのに必要な勾配は同量の粗砂を運搬するのに必要な勾配より1%（ストリーム・パワーに換算して0.1gf/cm/s）小さい。また、勾配（ストリーム・パワー）の等しい水流を比較すると、細砂は粗砂より50%ほど多く運ばれている。すなわち細砂は粗砂より確かに運ばれやすい。

問題は細砂と粗砂を混合させた時にどうなるかである。第2図は、細砂と粗砂を混合させた場合に、給砂量が毎秒8gの一定の条件下で、混合比率によって勾配がどのように変化するかを示したものである。図中の実線は、混合物中の粗砂と細砂がそれぞれ別々に運搬された場合に必要な勾配をRun 1～9の結果（第1図）にもとづいて描い

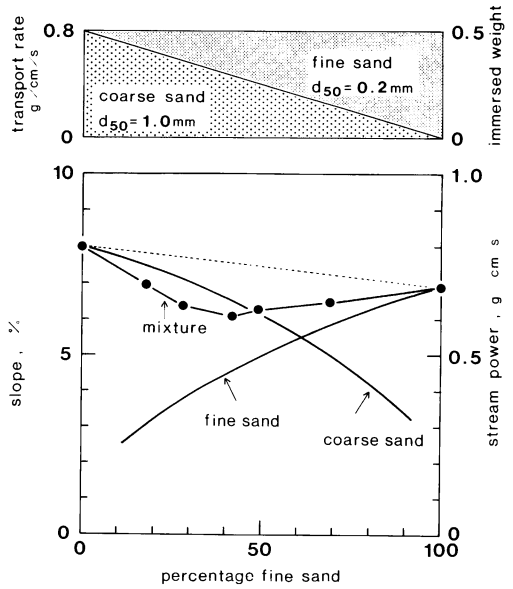


第1図 粗砂と細砂の流砂率と勾配の関係——粗砂は細砂より運ばれにくい

たものである。もしも混合物の運ばれやすさが細砂と粗砂の混合比率に比例して単純に決まるとすれば、混合比率の変化に対して勾配は図中の破線のように、毎秒8gの粗砂を運ぶのに必要な勾配の8%（左端）と細砂のみの場合の約7%（右端）とを直線で結んだようになるはずである。たとえば、中央粒径1mmの粗砂と中央粒径0.2mmの細砂を半々に混ぜた平均粒径0.6mmの混合物を毎秒8g運ぶためには、7.5%の勾配が必要ということになる。ところが実際にはそうならない。

第2図に明示されるように、混合物中に細砂が20%以上含まれれば、その混合物を運搬するのに必要な勾配は7%以下となり、同量の細砂（すなわち細砂率が100%の場合）を運搬するのに必要な勾配より小さくて済む。また、細砂の混合比率が50%以下の混合物は、その中に含まれる粗砂のみを運搬するのに必要な勾配よりもかえって小さい勾配で運搬されていることに注目される。すなわち、ある量の粗砂を運搬している状態に細砂を追加すると、流砂率が増すにもかかわらず、より小さい勾配で運搬可能となるということである。

これらの事実は、細砂が混じることによって粗砂が大変運ばれ易くなること、混合物中の粗砂は、見掛け上、細砂よりも運ばれやすいことを示



第2図 混合砂の運ばれやすさ——細砂と粗砂の混合物は細砂だけよりも運ばれやすい

している。

Bagnold (1966) は、水流を砂礫の輸送機械とみなし、次式を提案した。

$$i_b \cdot \tan \phi = e_b \cdot \omega \quad (1)$$

ここで、 $i_b$  = 単位幅流砂率（水中重量）、 $\tan \phi$  = 移動粒子群と底面との動摩擦係数、 $e_b$  = 効率、 $\omega$  = ストリーム・パワー（ $= \gamma q S$ ）である。 $\gamma$  = 水の単位重量、 $q$  = 単位幅流量、 $S$  = 勾配。

(1)式は

$$i_b / \omega = e_b / \tan \phi \quad (2)$$

と変形することができる。

本実験の結果、粗砂と細砂を混合させると、流砂率（ $i_b$ ）が等しいにもかかわらずそれを運搬するのに必要な勾配—ストリーム・パワー（ $\omega$ ）が小さくなること（第2図）が判明した。すなわち、(2)式の右辺の値が大きくなるわけである。この原因は、粗砂に細砂を混合させると輸送機械の効率が増し、逆に移動粒子と底面との動摩擦係数（ $\tan \phi$ ）は減少するためと考えられる。今回の実験の範囲では、同一の水路に同量の水を流しており、外見上、輸送機械は類似の形態をもってい

る。それにもかかわらず、輸送機械の効率は Run によって異なるのである。そのわけは、水流による輸送機械の効率は機械の形態のほかに輸送する物質の性質や量によっても変わるためである。すなわち水流のエネルギーが移動粒子へ伝達される際のされやすさが、移動粒子の性質や底面上での分布密度によって変化するからである。この点が水流による輸送機械の特徴で、ベルト・コンベアーなどと大きく違う点である。

一方、移動粒子と底面との動摩擦係数も Run によって異なる。すなわち粗砂に細砂が混じると移動しない粗砂粒子間の間隙を細砂が埋めることによって底面は粗砂のみの場合と比較して平滑になり、減摩効果 (Smoothing effect) が生じて、移動する粗砂粒子と底面との間の動摩擦係数は小さくなる。粗砂の移動速度が細砂の混じった場合に粗砂のみの場合と比較して数倍大きくなっている (第2表) のはその証拠である。また、粗砂は平滑な底面上に突出し、突出効果 (Effect of exposure) によって水流からより多くの運動エネルギーを受けることになり、輸送機械の効率は高まることになろう。なお、細砂は、より速く動く粗砂の衝突によって粗砂から運動エネルギーを受けるはずであるが、今回の実験条件の範囲内では細砂の移動速度は粗砂混じりの場合も細砂のみの場合も大差なかったことから、粗砂による連行効果 (Effect of collision) はあまり効果的ではなかったと見なされる。結局、粗砂と細砂の混合物が細砂よりも運ばれやすくなる最大の原因は、細砂の混合による減摩効果と突出効果という混合効果 (Effect of mixing) によって、粗砂が細砂より運ばれ易くなるためであると考えられる。

減摩効果による動摩擦係数の減少と突出効果による輸送効率の増加は共働していて、それを定量的に分離することは困難である。そこで、ここでは  $i_b/\omega = e_b/\tan \phi$  を砂礫の運ばれ易さ (mobility) の指標とみなし、粗砂と細砂の混合物は、給砂比率で粗砂：細砂=60：40くらいの時に最も運ばれやすかったということのみを指摘するに止めたい。もっとも、粗砂の移動速度は細砂より4～6

倍大きい (第2表) から、底面上における存在比率 (必ずしも河床材料としての構成比率にはならないが) としては、細砂の比率がかなり高い状態、単純に計算すれば、粗砂：細砂=1：3程度の時に、最も運ばれやすいということになる。

今回の実験で、細砂とともに運搬される粗砂が細砂よりかえって運ばれやすかった理由を感覚的に理解するために、底面上での細砂と粗砂粒子の状態をみてみよう。粗砂と細砂の粒子をその中径を持つ球と見なせば、単位面積当たりの移動粒子の個数は次式で表される。

$$N = 6W/\pi (\sigma - \rho)gd^3 \quad (3)$$

$$W = i_b / U_b \quad (4)$$

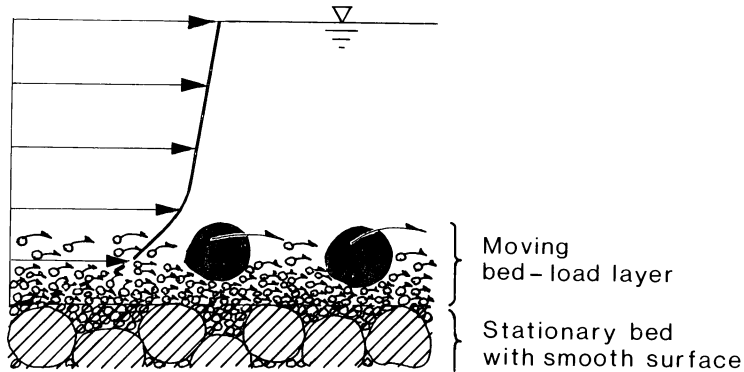
ここで、 $N$  = 単位面積当たりの移動粒子の個数、 $W$  = 単位面積当たりの移動粒子の重量、 $\sigma$ 、 $\rho$  = 粒子および水の密度、 $g$  = 重力の加速度、 $d$  = 粒径、 $i_b$  = 単位幅流砂率 (水中重量)、 $U_b$  = 粒子の平均移動速度。

Run 10～15について移動粒子の個数を (3)式から求めると、第3表に示すように、粗砂は1cm<sup>2</sup>当たり10～65粒、細砂は6,500～18,000粒となる。径

第3表 底面単位面積当たりの移動粒子の個数 (N)

Run No.	fine sand		coarse sand	
	W, g/s	N/cm <sup>2</sup>	W, g/s	N/cm <sup>2</sup>
10	0.064	9.200	0.009	10
11	0.091	13.000	0.023	27
12	0.125	18.000	0.050	58
14	0.045	6.500	0.017	20
11	0.069	9.900	0.056	65

1mmの粗砂は互いに接して格子型に配列したとすると底面1cm<sup>2</sup>に100粒/1層入る。また、径0.2mmの細砂は同様にして2,500粒となる。このことから見ると、粗砂は渋滞せずにスムーズに移動 (転動・躍動) していること、細砂は3～7層分が重なりあって移動していることになる。以上の結果は、観察事実と矛盾しない。すなわち細砂は雲のように掃流層を形成して流送され、粗砂はその上に突出してより高速で転動する。第3図はその状



第3図 二粒径混合砂の流送様式概念図

態を模式的に描いたものである。粗砂粒子は細砂面上を、あたかもローラー・コンベヤーの上をスムーズに転動するボールのように流送されるのである。

#### IV おわりに

粗砂と細砂を混合させた二粒径混合砂の給砂実験によって、混合砂がほぼ平坦床をなして運搬される場合には、粗砂と細砂の混合物は同量の細砂を運搬するよりも小さな勾配で運搬されることが確かめられた。粗砂に細砂が混じると、減摩効果と突出効果が働いて、粗砂は細砂よりかえって運ばれやすくなるためであると結論される。

今回の実験では、礫と砂を混合させた実験（池田、1984）の場合に見られたような流砂現象の急変—ある混合比率を境にして粒子の移動様式や移動速度が急変し、混合物を運搬するのに必要な勾配もそこで急変するという事は起こらなかった。これは粗砂粒子の移動が、今回の実験条件の範囲内ではどの Run でも渋滞せず、すなわち粗砂粒子どうしが噛み合わず、スムーズであったためである。今回と同様な実験を、給砂率や給水率を変えてさらに行うことによって、混合効果につ

いての理解を一層深めることが望まれる。

今回の実験は小型の水路を用いて、ほぼ平坦床に近い条件で行われた。河川における現象に外挿するためには、ここに指摘したことに加えて、河床形の効果（Einstein and Barbarossa, 1952）を考慮しなければならない。

#### 引用文献

- 池田 宏 (1984) : 二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験. 筑波大学水理実験センター報告, 8号, 1~15.
- Bagnold, R. A. (1966) : An approach to sediment transport problem from general physics. *United States Geological Survey Professional Paper*, 422-I, 37 p.
- Einstein, H. A. and Barbarossa, N. L. (1952) : River channel roughness. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 117, 1121~1146.
- Ikedda, H. (1984) : Flume experiments on the causes of superior mobility of sediment mixtures. *Annual Report of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, 10, 53~56.