

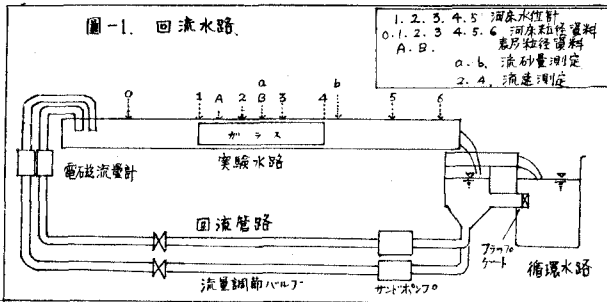
## 回流水路による混合砂礫の流送実験

電力中央研究所 ○ 浅田 宏

石川 晴雄

まえがき

混合砂礫床の流砂量を求めるにはその平均径または50%径を代表径として従来の流砂量式を用いて計算するとが多い。しかしながらこの場合混合特性の影響をどのように導入すればよいか、あるいはその影響を導入し代表径を用いて計算して全流砂量を表わすことが出来るものかどうか必ずしも明らかでない。また粒径別に流砂量を計算して全流砂量を求める Einstein の計算式も細砂に因する選敵係数が大きいため正しい結果を与えないといわれている。本実験はこの問題をしるるため、従来我国でよく用いられている Einstein 式、土研式について主としてその適合性をしるるために行ったものである。



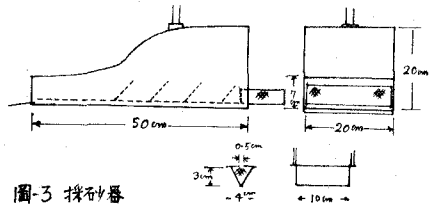
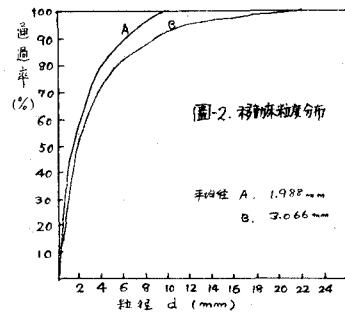
### 1. 実験水路および実験方法

実験に使用した水路は長さ 39m, 巾 1m, 深さ 0.6m の可変勾配水路である。

この水路は下流端に下部水槽とこれに続いて流量 100 l/sec のサニトポンプ 2 台、管径 150mm の回流管路 2 本をまつ回流水路であつて、流

下した砂礫はすべて管路によって水路の上流端にもどされるようになっている。(図-1)

移動床は図-2に示すような粒径分布をもつ粗砂を用い、これを水路の上流端より 6m, 下流端より 1m を除く 32m の範囲に厚さ 10cm に敷いて作った。実験は次のようにして行われた。先づ水路下流端のゲートも閉じ、移動床面を乱さないよう、少量の水を上流から入れ、実験流量を与えるまでに砂が移動することのないよう充分な水深をとる。続いて実験流量を与え、あらかじめ計算された算流水深附近まで水位を上げ、水位が安定した後図-1 に示した測定部で水路中心における流速垂直分布、流砂量、および水位、河床変化の測定した。また実験の前後には移動床の粒度分布をしるるために 6ヶ所の砂を採取した。流速の測定には光電式のアハラ型低流速計、水位河床変化の測定には超音波河床水位計を用いた。実験流量は 30%~200%, 水路勾配は 1/500, 1/1000 の 2ヶスである。



掃流砂の測定は圖-3に示すような採砂器を用いた。流砂が少く、細砂の掃流限界附近では圖中に示すスリット型の採砂器を併用した。流送の初期には水の濁りが少く水路側面(カヌ部)から流送状態を観察出来るから採砂器内に砂が充分捕捉されるまで測定時間をとった(最大10分程度)。流砂量が増加すると水は混濁し採砂状況は観察出来ない。この状態では測定時間を出来る限り短くとり(約10秒)、砂礫が採砂器を通過することのないよう、また採砂器を引上げると、捕捉された砂の流失することのないようにした。なお移動床の砂礫はA、B2種を用いたが、各実験毎の河床の調整は行ななかつた。すなわち各流量の実験はその前の流量で形成された移動床で行なつた。

## 2. 実験結果の検討.

流砂計算に用いる摩擦速度  $U_{*}$  は流速分布の対数則から求めた値  $U_{*g}$  と平均水深、河床平均勾配、および水面勾配から求めた  $U_{*H} = \sqrt{g H I_c}$  を比較して定めた。 $U_{*g}$  では  $K=0.4$  とした。また流量150%~200%では dune (波長約1~1.5m, 波高約3cm) が形成され、また浮遊砂が増加する。この範囲については  $U_{*H}$  を用いた。ただし dune による形状抵抗の補正は行ななかつた。流砂量の測定は1実験について2~4回行ない平均値をとった。dune のあるときはその背面での測定値を用いた。

### 2-1 砂礫の移動限界

実験中の観察と流送砂中の最大粒径の分布から各粒径の砂礫の移動限界をしらべると圖-4の通りである。

これによれば粒径/mm 以上の砂礫の移動限界はいつも一掃砂床における移動限界(岩垣式)よりも小さい値を示している。なお砂礫の移動限界に関する Shields の係数  $f_c$  は粗面の流れの抵抗則  $u_b/u_* = 5.75 \log_{10} 30.2/f_c$  を用いると、 $f_c = 0.07 / (\log_{10} 19 \frac{d_{50}}{a})^2$  であらゆきある。(但し  $k_s = d_n$ ,  $y = ad$ ,  $a \approx 0.63$ , 揚力係数  $C_D \approx 0.4$  とする)。粒径20mm および10mm について上式を用いて限界摩擦速度を求めると大体圖-4の値に近い値をとる。

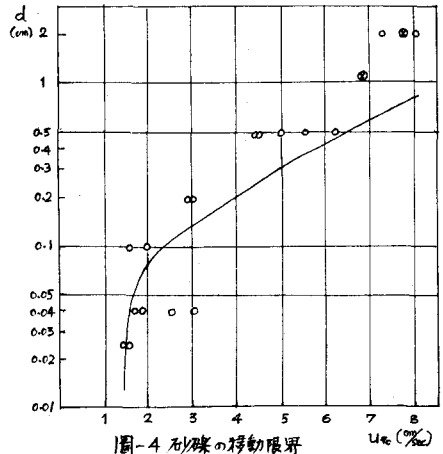


圖-4 砂礫の移動限界

### 2-2 移動床粒径分布と流送砂粒径分布

混合砂礫床では掃流力が小さいときには主として細かい砂が流送され、掃流力の増加とともに流送砂の平均粒径は次第に大きくなる。実験水路では初めに流送された細砂は下流端からの影響で、先づ移動床の下流面に堆積する。回流方式による実験ではその一部は回流されて上流にもどるか、今回の実験では上流6mの区間には移動床がないためにこの部分にも細砂が堆積した。従つて実験の初期には補給砂の全くない状態がある。さらに流量が増加するとこれらの細砂は流送されるようになるが、このときにはこれらの細砂が移動床面からの流送砂に加わるために流送砂の粒度構成が移動床

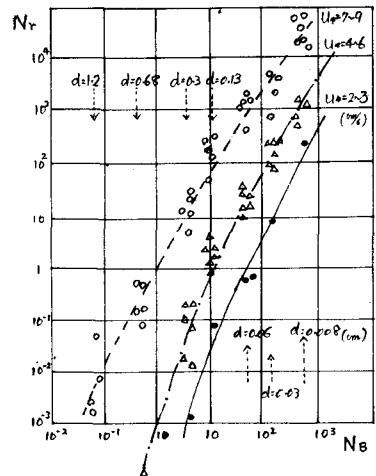


圖 15. 流送砂粒径分布と移動床粒径分布

のそれと関連するものとなるおそれがある。また回流部で砂礫の堆積あるいはその変動がある  
とすればさらにその影響が加わることと考えられる。この関係をしらべるために水路内の平均粒径  
分布と流砂の粒径分布の関係をプロットしたものが図-5である。ここで  $Nr = 800 / (\frac{1}{\psi}) d_{50}^2$ ,  $Nd = f(d) / d_{50}^2$   
である。これによれば流送砂の粒度構成は大体移動床の平均粒度構成に関連して変化しているの  
とみられる。

## 2-3 Einstein の掃流因数

粒径別流砂量  $q_{bi}$  について Einstein の掃流因数  $\Psi^*$   

$$= \frac{q_{bi}}{f(d) \left( \frac{1}{\psi} \right)^2 g d_{50}^3 \Psi^* = \tau_* Y (\frac{\rho}{\rho_s})^2 \Psi^*$$
 の関係をプロット  
 したものが図-6 である。ただしこの図では  $\psi$  の代  
 りの  $\psi = \frac{0.77 d_{50}}{u_*}$  を用いている。なお  $\tau_* Y (\frac{\rho}{\rho_s})^2$   
 はそれそれの大きい砂礫による細砂の遮蔽係数お  
 よび場力に関する補正係数である。また圖中実線は  
 理論値である。この結果によれば本実験では  $\psi$  が  
 大きくなると  $\Psi^*$  は理論値より小さくなり、 $\psi$  が小さい  
 範囲では逆に理論値より大きくなる傾向がみられる。

そこで補正係数  $Y (\frac{\rho}{\rho_s})^2$  に Einstein による値を用  
 いて  $\tau_*$  を求め、 $d_{50}/X$  との関係をしらべた。こ  
 れで  $X$  は  $\frac{0.77 d_{50}}{u_*}$  ( $\frac{d_{50} u_*}{11.6 \nu} > 100$ ) である。その結果を図-6 に示  
 す。Einstein によれば  $\tau_*$  は  $d_{50}/X$  が 15 以上では  $\tau_* = 1$  で  
 あり、 $d_{50}/X$  がこれより小さくなるに従って  $\tau_*$  は大きくな  
 り、 $d_{50}/X = 0.12$  で  $\tau_* = 100$  である。(図-7 実線)。今回の実  
 験では  $d_{50}/X = 1$  以下で  $\tau_*$  の値はこの値より小さくなり、  
 よくいわれているように Einstein の流砂式では細砂に  
 たいして  $\tau_*$  の値が大きすぎる傾向があるということを  
 認めることのできるようである。さらにこの結果で  
 $d_{50}/X$  が 15 より大きくなると  $\tau_*$  は 1 より小さくなっ  
 ている。このことは図-4 に示した混合砂礫床では粒径  
 の大きい砂礫はそれと同じ粒径で構成された一様砂礫  
 床にある場合より移動し易いという傾向に関連するも  
 のと思われる。 $\tau_*$  を各粒径の砂礫の流送量にたいする  
 補正係数とみて、図-7 において破線で示した値を用  
 いれば本実験における流砂量測定値は図-6 において実  
 線で示した  $\Psi^*$  の関係で表わすことが出来る。  
 なお図-6 のプロットを粒径別にみると各粒径につ  
 いて  $\Psi^*$  の関係は大体実線に平行し、しかも比較的好  
 集中している。

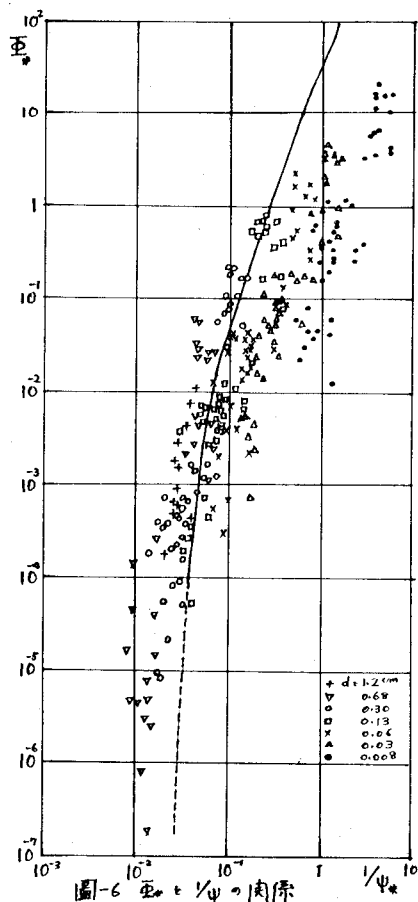


図-6  $\Psi^*$  と  $1/\psi$  の関係

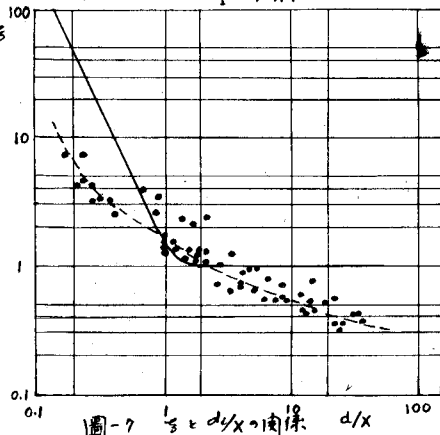


図-7  $1/X$  と  $\tau_*$  の関係

## 2-4 粒径別流砂量と $u_{*b}$ および $\tau \bar{u}$ との関係

佐藤幸川・芦田式(土研式)は全流砂量  $g_{or} = \psi \frac{\rho}{\rho_p} \cdot f(\frac{\tau}{\tau_c}) \cdot \tau \cdot u_{*b}$  である。この式による混合砂の流砂量計算は普通河床平均径を用いる。土研式の関係は粒径別の流砂量にも成立つものとして  $g_{or}/f(d_s)$  と  $u_{*b}$  の関係をプロットしたものが図-8 である。これによれば図-6 の  $u_{*b}$  と  $u_{*c}$  の関係と同程度のバラつきで粒径別流砂量と  $u_{*b}$  は関係づけられるようである。しかしこの関係では粒径別のプロットの分布は図-6、図-10 のようには明らかでない。本実験では各実験流量に對する移動床平均径の限界摩擦速度  $u_{*c}$  は一様床に肉する式で計算した場合に大部分  $u_{*c} > u_{*b}$  となる。

従つて実際には流砂があるにも不拘、この  $u_{*c}$  を流砂計算の規準値として用いると計算流砂量はほとんど 0 となつてしまふ。この関係を示したのが図-9 である。図中  $\bullet$  は移動床平均径による値であるが、参考として流送砂平均径によつて計算した値を  $\circ$  で示した。

Bagnold に示される  $g_{or} = c \tau \bar{u}$ 。  $\bar{u}$  は平均流速、効率  $c = \alpha(1 - \tau/\tau_c)$ 、 $\alpha$  は常数である。前と同じように  $g_{or}/f(d_s)$  と  $\tau \bar{u}$  の関係をしらべると  $u_{*b}$ 、および  $g_{or}/f(d_s)$  へ  $u_{*b}$  の関係にくらべてバラツキは、むしろ大きいか、プロットはほぼ粒径別に分けられる。この傾向を示したのが  $g_{or}/f(d_s) / \tau \bar{u} = c$  と  $\tau \bar{u}$  の関係を粒径別に曲線で記入した図-10 である。これによれば粒径  $0.13\text{mm} \sim 1.2\text{mm}$  の範囲では  $c$  は粒径が小さくなるにつれて大きくなる。しかし  $0.06\text{mm}$  以下の粒径では必ずしもこの関係は成り立たず、また  $\tau \bar{u}$  が増加すれば  $c$  の値は大きくなる。

粒径が砂粒より小さくなつてゐる。全流砂量  $g_{or}$  と  $\tau \bar{u}$  の関係は図-6、図-8 と同程度であるが  $g_{or}$  へ  $u_{*b}$  よりはやい相関を示してゐる。従つて今回の実験に用いた程度の混合砂にたいしては  $g_{or}$  と  $\tau \bar{u}$  の関係において、代表径を用いて全流砂量を求めることは実用上一定可能であると思われる。また  $g_{or}$  と  $u_{*b}$  の関係においても、移動床限界として 2-1 にのべたような混合砂床系にたいする限界値を考慮すれば、やはり全流砂量に因る実用計算は出来るものと思われる。

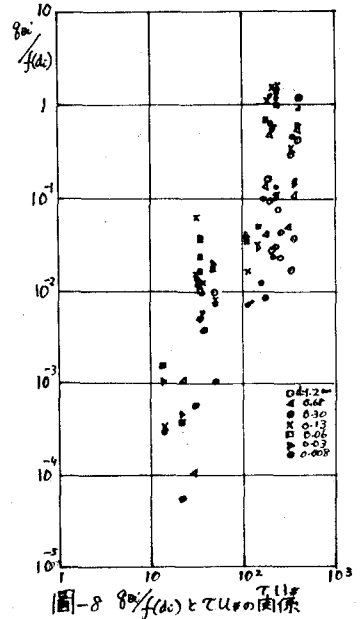


図-8  $g_{or}/f(d_s)$  と  $u_{*b}$  の関係

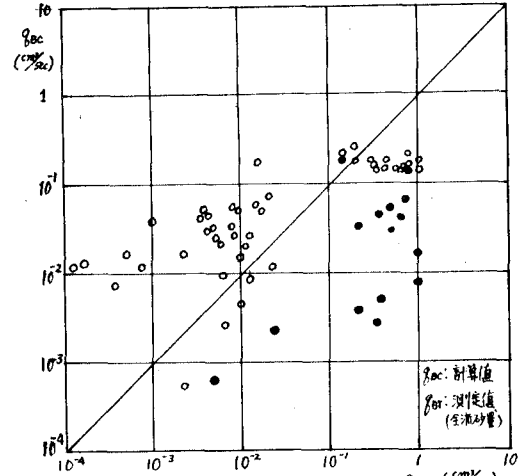


図-9 土研式による計算値と実測値の関係

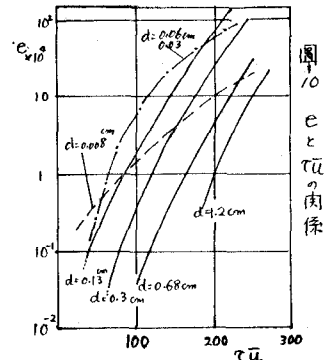


図-10  $c$  と  $\tau \bar{u}$  の関係