

京都大学防災研究所
京都大学 大学院

正員 芦田和男
学生員 水山高久

1. 緒言 山地河川は、その水路こう配が急であることおよび河床砂礫が巨礫を含む広い粒度分布を有することによって特徴づけられる。しかし急こう配で相対水深の小さな流れにおける抵抗や流砂、特に混合砂礫の流砂量に関する研究は未だ十分でない。著者らはこのような急こう配で相対水深の小さな流れに着目し、流水抵抗や一様砂礫および混合砂礫の限界掃流力と掃流砂量について研究を進めてきた。本報告は、先の研究⁽¹⁾で表現が不十分であった急こう配流れの流砂量について検討を加え、またさらに広い粒度分布を有する材料を用いて混合砂礫の流砂量および混合砂礫の流送特性について研究したものである。

2. 実験材料および実験の概要 実験に用いた水路は幅50cm深さ40cm長さ17mの可変勾配水路で、実験材料は比重 $\gamma_s=2.60$ の図1のような粒度分布をもつ砂礫である。特に③は最大粒径 38.1mm 、 $d_{84}/d_{10}=4.83$ という広い粒度分布を有する混合砂礫である。実験は砂礫を厚さ約10cmに敷き並べ、こう配を0.0125~0.15 (③では0.0125, 0.025, 0.05のみ)の間に变化させて流量、水位、河床高、流砂量を測定した。同時にピトー管と傾斜マノメーターを用いて水路中央で流速分布を測定した。また着色砂礫をトレーサーとして掃流砂の移動速度の測定を行った。なお流砂実験においては水路下流端で水と砂礫を分離し砂礫はベルトコンベヤーで上流端に給砂されるようにし、長時間の通水に対して動的平衡状態を保つようにした。

3. 急こう配水路における一様砂礫の掃流砂量 先の資料⁽¹⁾に今回(④)のやや掃流力の大きな範囲の実験結果を加えて図2に示す。急こう配浅水深流れにおいては抵抗係数は自由表面の影響等により相対粗度および掃流力の増加とともに急激に増加する(図3)しかし図2において流砂量の実験値は芦田道上の流砂量式
$$Q_s = \frac{80}{(\tau_* - 1)g d_*^{3/2}} = 17 \tau_{*c}^{3/2} (1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) (1 - \frac{U_{*c}}{U_*}) \quad (1)$$
 (ここに τ_{*c} は有効掃流力)において $\tau_{*c}/\tau_* = 1.0$ とした計算値よりも小さくなっており全掃流力が流砂に寄与していないことがわかる。そこで有効摩擦速度の算定式⁽²⁾

$$\frac{U_*}{U_{*c}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d_* (1 + 2\tau_*)} \quad (2)$$

を用いて平均流速 U_* が等しくなるような U_{*c} を求め、 τ_{*c}/τ_* をパラメータにして(1)式の計算値と図2において比較するとほぼ一致することがわかった。また一部小さい掃流力の部分で実験値が下方にはずれるがこれは相対粗度の大きな場合の実験値で、限界掃流力が相対粗度とともに増加することによって考えられる。図2には、こう配(④) 0.10 に対する $\tau_{*c} = 0.07$ 、 $\tau_{*c}/\tau_* = 0.6$ の場合の計算値も示しておく。結局急こう配で相対水深の小さな流れにおいても流水抵抗がわかれば(2)式により τ_{*c}/τ_* が求められ、各こう配の限界掃流力を用いて(1)式で掃流砂量が十分算定できることがわかった。ここで急こう配水路における抵抗の算定が必要となるが従来ほとんど研究されておらず、図3においてもその実験結果はかなりのバラツキをもっており、さらに多くの実験資料の集積が必要である。なお河床形態は全実験について Upper regime であった。

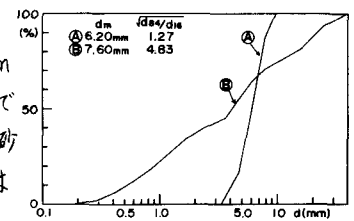


図1 粒度分布

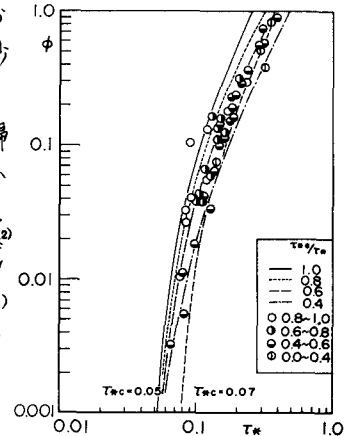


図2 掃流砂量

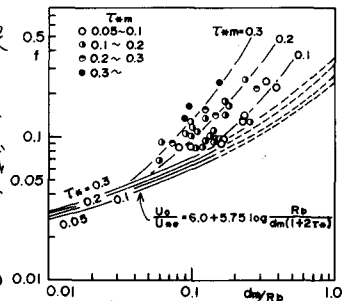


図3 抵抗係数

4.混合砂礫の粒径別流砂量 従来粒径別流砂量式としては、一様砂礫の流砂量式に対してEgiazaroffの粒径別限界掃流力を代入したものがあるが、混合効果は移動限界のみでなく移動中の粒子に対しても存在すると考えられる。そこでこれを材料⑥を用いて調べることにする。粒径別流砂量式としては芦田道上の次式を用いることにする。

$$E_i = \frac{q_{B10}}{d_i(d_i)} \left\{ \frac{q_p}{(1-q_p)} \right\}^{1/2} = 17 T_{*ci}^{3/2} \left(1 - \frac{T_{*ci}}{T_{*cm}} \right) \left(1 - \frac{U_{*ci}}{U_{*c}} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで $d_i(d_i)$ は、河床において粒径 d_i の粒子の占める割合である。実験によって求められた流砂量を q_{B10} 、同じ水理条件について(3)式で計算される流砂量を q_{B10cal} とし補正係数を、 $\epsilon_i = \sqrt[3]{q_{B10}/q_{B10cal}} = U_{*ci}/U_{*c}$ のように定義する。この ϵ_i を d_i/d_m に対して $T_{*cm}(=U_{*cm}/(1-q_p)gd_m)$ をパラメータにして表わすと図4のようになる。ここで T_{*ci} は本流砂量実験で求めた値を用いている。これはすでに着着うによって研究されているように、混合砂礫の平均粒径の限界掃流力は、粒度分布によって変化し粒度分布が広くなると T_{*cm} もより大きな粒子のしゃへい効果を受けて大きくなることによる。本実験でも $T_{*cm} \approx 0.06$ となっている。また急こう配水路では相対粗度が増加とともに T_{*ci}/T_{*cm} もEgiazaroffのそれとは若干相違するのでさらに検討を要する。(3)式が粒径別流砂量を十分記述しているとするとき図4で ϵ_i は d_i/d_m に無関係に $\epsilon_i \approx 1.0$ になるはずである。しかし図4からわかるように $d_i/d_m < 1$ では掃流力の小さい時に ϵ_i は小さく、掃流力の増加にもなって増加し1.0に近づく傾向がある。また $d_i/d_m > 1$ では、 ϵ_i は掃流力の増加とともに増加し $\epsilon_i > 1$ となっている。これから混合砂礫の粒径別流砂量は限界掃流力のみでは説明できず、移動中の粒子に対しても混合効果が存在することがわかる。すなわち平均粒径より小さな粒子はより大きな粒子によってしゃへいされるが、掃流力の増加とともにそのしゃへい効果は急激に減少する。また平均粒径以上の粒子については、流れに対する露出度の大きいことや動摩擦係数の減少により移動が一様砂の場合よりも促進される。この効果は粒度分布によって変化すると考えられるのでさらに検討を要する。

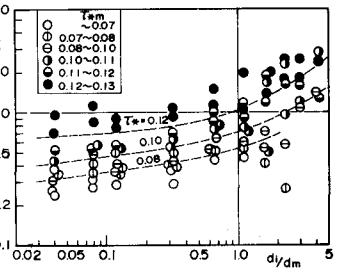


図4 粒径別流砂量の補正係数

5.混合砂礫の流送特性 上述の混合効果を詳しくみるために着色砂礫をトレーサーとしてその移動を追跡することにした。まず比較のために一様砂礫床上で単一粒子を追跡してその平均移動速度 U_{*ci} を求めると図5のようになり矢野らの実験と類似した傾向を示している。これより単一粒子の追跡実験によっても河床砂礫全体の運動を知ることができ、平坦河床では移動層厚を1粒径として流砂量が求められる。次に材料⑥の混合砂礫床上で粒径毎に着色した砂礫を用いてその移動速度を調べた。これと一様砂の場合とを比較してみる。一様砂および混合砂礫床上で流砂がある場合の流速分布の測定結果によると、河床近傍(2dm程度の高さ)で変曲点を持ち上層はほぼ $K=0.4$ の対数則に従い下層では流速が一様化する傾向がある。そこで下層の流速分布を、 $U/U_{*c} = A + \psi \ln \frac{y}{2d_m} \quad \dots\dots\dots (4)$ と表わす。Aは8.5より相対粗度とともに減少し、 ψ は固定床上の0.87より少し大きくなる傾向があるが、ここでは $A=8.5$ 、 $\psi=0.87$ とする。粒子に働く有効な流速を $y=0.5d_i$ の高さとするとき、一様砂の場合に相当する U_{*ci} は、 $U_{*ci}/U_{*c} = (8.5 + 0.87 \ln \frac{0.5d_i}{2d_m})^{2.27}$ より求められる。図5にこうして求めた U_{*ci} を用いて移動速度を示すが、こうした補正を行っても大きな粒径は一様砂のそれよりも動きやすく、また小さな粒子については動きにくくなっている。この混合効果の程度を説明するためには、さらに研究を進める必要があり今後の課題としたい。

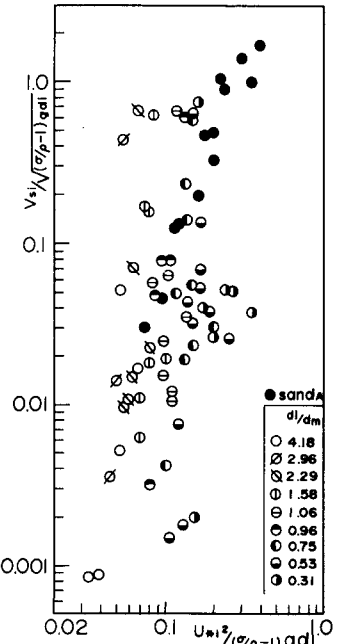


図5 粒径別平均移動速度

<参考文献> (1) 芦田, 高橋, 水山, 数田 急こう配水路における流砂に関する研究 土木学会関西支部年講概要集, 昭和49年5月
(2) 芦田, 道上 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究 土木学会論文報告集, 第206号, 1972年10月