

II-139

混合砂礫河床における増水・減水時の流砂量特性

鳥取大学工学部 正員 ○鈴木幸一
鳥取大学工学部 正員 道上正規

1. まえがき 従来、河床表層砂の粗粒化はダム下流部のように上流から給砂がなく河床低下がほぼ停止した河床の静的平衡に近い非平衡状態で生じる現象であるとして、Gessler、芦田ら、平野、中川らのように多くの研究者によって取り扱われてきた。この立場に立つと、低水時に細砂のみがわずかに流れているような砂礫河床でも流砂が平衡状態であれば粗粒化は生じないことになる。しかし、ほとんどの砂礫床河川では、細かい砂のみが動いているような低水時の河床表層は粗粒化していて、表層下の砂の粒度とは大きく異なっていることはKellerhalsらの報告でも明らかであるし経験的にもよく知られている。粗粒化現象が、例えば、掃流力が小さく粗砂の移動が停止すると細砂が粗砂の低部に落ち込むために生じるというように全く別の機構で生じるとすれば、細砂のみの動的平衡状態でも河床表層の粗粒化は生じることになる。いずれにしても、実河川において、低水時に河床面にいわゆるarmor coatが形成されているとしたら、それは洪水時には破壊されるであろうし、減水していくと再び形成されるはずである。本研究では、混合砂礫河床において、流れが変化するに伴って、河床表層砂の粒度分布および粒径別流砂量がどのように変化するかについて実験的考察を加えたものである。

2. 実験の概要 実験に用いた水路は長さ8m、幅40cmの変勾配水路であって、実験に用いた砂は図-1に示すような粒径加積曲線を有する平均粒径 d_m が0.415mm、最大粒径 d が約10mm、標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ が、2.74の混合砂である。実験は上流からの給砂がない状態で行なうため、上流端の非平衡状態の影響が下流部に及ばないように各実験段階では10分間の通水した。流量は図-2に示すように段階的に変化させ、各段階で約10分の通水後、水路下流端からの流出砂および河床表層砂の粒度分布を測定した。実験ケースは河床勾配が1/80(RUN1)、1/100(RUN2)、および1/115(RUN3)の3つのケースで、armor coatの形成・破壊が生じるような条件で行なった。その他に、RUN Aとして初期河床勾配が1/87で、12.3 l/sの一定流量下での河床低下の実験も行なった。

3. 粒径別流砂量 粒径別流砂量式を検討する際、限界掃流力の概念を認める立場から、均一砂に対する従来の流砂量式 $q_* = f(\tau_*, \tau_{*c})$ (1) の τ_{*c} を τ_{*ci} で置き換えることによって混合砂に適用できるように修正する。ここに、 $q_* = q_b / u_* d$ 、 $\tau_* = u_*^2 / sgd$ 、 $\tau_{*c} = u_{*c}^2 / sgd$ 、 $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / sgd$ 、 q_b ：単位幅流砂量、 d 、 d_i ：砂粒径、 u_* ：摩擦速度、 u_{*c} ：粒径 d の砂の限界摩擦速度である。(1)式の関数 f は例えば芦田・道上式では $f = 17 \tau_* (1 - \tau_{*c} / \tau_*) (1 - \sqrt{\tau_{*c} / \tau_*})$ (2) である。均一砂の流砂量式を混合砂用に修正する上記の手法は、芦田・道上や平野らによって用いられたものであるが、その際最も重要な各粒径別無次元掃流力 τ_{*ci} の評価に若干の考察すべき点が残されている。ここでは、流砂量と掃流力の関係において、有意な流砂量がなくなるときの掃流力を限界掃流力とするいわば“流砂量限界掃流力”を考える。すなわち実測の $q_{*ci} (= i_b q_b / i_b u_* d_i)$

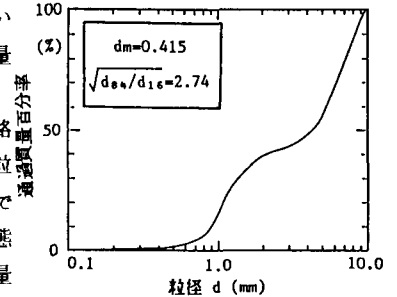


図-1 実験砂の粒度分布

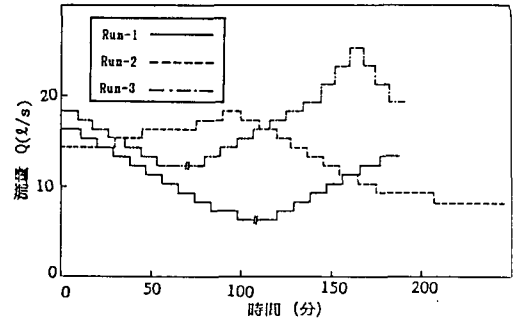


図-2 流量と通水時間

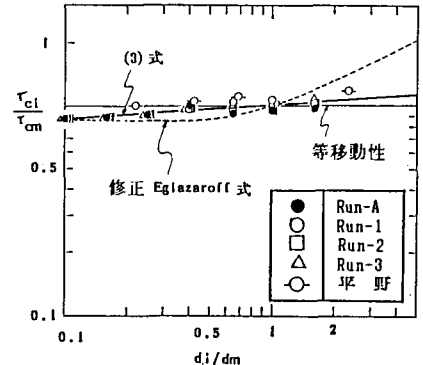


図-3 τ_{ci} / τ_{cm} と d_i / d_m の関係

と τ_{*i} ($=u_*^2/sgdi$) の関係図において $q_{*i} = 10^{-3}$ となる τ_{*i} を τ_{*ci} と定義すると、 τ_{ci}/τ_{cm} と di/dm の関係は実験的には $\tau_{ci}/\tau_{cm} = (di/dm)^{0.07}$ (3) であり図-3のようになる。ここに $\tau_{ci} = \rho u_{*ci}^2$ 、 $\tau_{cm} = \rho u_{*cm}^2$ 、 ρ : 水の密度、 u_{*cm} 平均粒径砂の限界摩擦速度である。 $\tau_{ci}/\tau_{cm} = 1$ の線は、全ての粒径の砂が同じ限界掃流力である等移動性を示しており、(3) 式はこの等移動性よりわずかに異なっているのみで、 $di/dm > 1$ の砂は平均粒径よりほんのわずかに動きにくく、 $di/dm < 1$ の砂は逆にわずかに動きやすくなっているに過ぎない。

(3) 式から求まる τ_{ci} を (1) 式に代入して得られる無次元粒径別流砂量 q_{*i} は、 $q_{*i} = f(\tau_{*i}, \tau_{*ci})$ (4) となり、実測値とともに図示すれば図-4のように実測と計算値とは比較的一致している。ここに、 i_g および i_b はそれぞれ流出砂および河床表層砂中で粒径 di の占める割合である。

4. **Armor coatの形成・破壊に伴う流砂量の変化** 図-5は図-2のように流量を変化させた時の各段階における流量に対応する平衡状態（とみなす）の流砂量 q_b と摩擦速度 u_* との実測による関係を示したものである。この図から、明らかに同じ摩擦速度であっても流砂量が大きく異なる領域が存在し q_* と u_* の関係にはループを描く領域が認められる。摩擦速度が同じで流砂量が異なるということは、(4) 式からわかるように河床表層砂の粒度構成が変化していなければならないことになる。すなわち、同一摩擦速度で流砂量が極端に少ないときは河床が粗粒化しており、armor coatが河床表層を覆っていることが予想される。図-6は、河床表層砂の平均粒径 d_m と元河床の平均粒径 d_{m0} の比 d_m/d_{m0} を縦軸にとり、各段階での掃流力 τ とその時の河床表層砂の平均粒径の限界掃流力 τ_{cm} の比 τ/τ_{cm} を横軸にとって、掃流力の変化に対する河床表層砂の平均粒径の変化を示したものである。減水時には τ/τ_{cm} が小さくなるに従って、 d_m/d_{m0} が大きくなるようであるが、armor coatが形成された後増水して行く場合は τ/τ_{cm} が ~ 1.1 になるまでは平均粒径の変化が全くないことがわかる。しかし、 τ/τ_{cm} が約1.1を越したところで、河床表層砂の平均粒径が急に小さくなり armor coatが破壊されたことがわかる。 τ/τ_{cm} が大きく armor coatが破壊された以降の平均粒径は減水時のものよりやや大きめとなっているが極端には異なっていない。以上のことより、armor coatの破壊限界条件は、 $\tau/\tau_{cm} = 1.1$ (5) である。ただし、 τ_{cm} としては、armor coatの平均粒径砂の限界掃流力である。

5. あとがき

粒径別流砂量式が与えられたとしても図-5に示す流砂量を計算するためには i_b がわかっていなければならないので洪水の各段階での河床表層砂の粒度分布を推定する必要があり、そのためには armor coatの形成機構についての考察が必要となる。

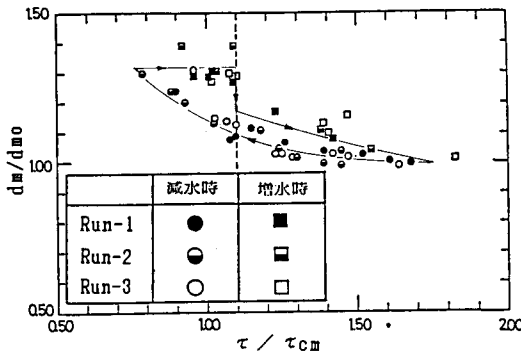


図-6 河床表層砂の平均粒径と掃流力

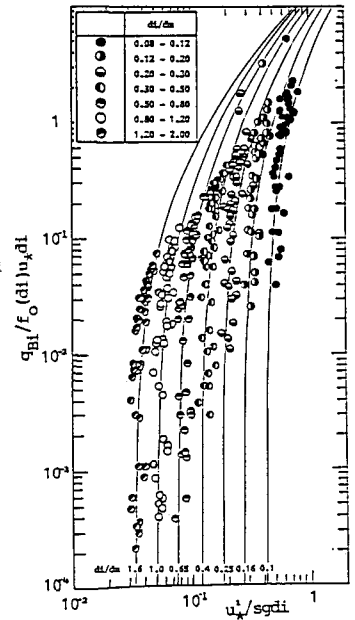


図-4 粒径別流砂量

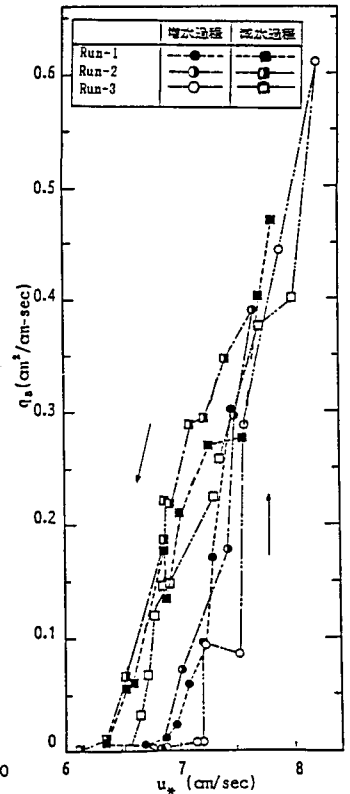


図-5 増水時・減水時の流砂量