

混合砂礫河床における増水・減水時の平衡流砂量

SEDIMENT DISCHARGE OF NONUNIFORM SAND BED DURING
INCREASE AND DECREASE PERIODS OF FLOOD DISCHARGE

道上正規*・鈴木幸一**

By Masanori MICHIE and Koichi SUZUKI

Sediment discharge in alluvial channels with coarse and nonuniform bed materials depends strongly on the bed surface grain size condition. Sediment discharge is very small when the bed surface is covered with armor coat, while it increases sharply when the armor coat is destroyed during flood. In this paper sediment discharge characteristics of nonuniform sand bed during the increase and decrease periods of flood discharge are discussed experimentally in connection with the grain size distribution of bed surface materials, through which the sediment discharge formula of nonuniform sand and the process of armor coat formation are also discussed.

Keywords : sediment discharge, sand mixture, armoring

1. まえがき

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かなり異なっていることは、Kellerhalsら¹⁾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。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で粗砂が移動しなくなった状態での河床表層の粗粒化(armoring)に関しては、Gessler²⁾、芦田ら³⁾、平野⁴⁾、中川ら⁵⁾が詳細な検討を加えているが、最近 Parkerら^{6),7)}は、最大粒径砂も移動しているような動的平衡河床においても河床表層が粗粒化(動的粗粒化-pavement)している可能性を指摘している。本研究では、粗砂が停止するような掃流力での河床表層砂の粗粒化(静的粗粒化-armoring)について述べている。すなわち、境界条件の影響を強く受ける非平衡流砂現象に伴う混合砂河床の粒度分布の変化とは別に、無限に長い河川を想定したしかも粗砂が移動しないような平衡状態においても、掃流力の変化に対応した河床砂粒度の変

化があることを示し、河床表層の粒度分布と流砂量について論じている。

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、また減水していくと再び armor coat が形成されるはずである。この場合、armor coat が形成されているときと、破壊された後では流砂量が著しく異なることが予測される。というのは、従来提案されている流砂量式で示されるように各粒径別流砂量は河床表面の粒度分布に強く規定されるからである。

Einstein⁸⁾に始まる遮蔽係数の考えを導入した粒径別流砂量式や、Egiazaroff⁹⁾による混合砂の粒径別限界掃流力を修正して提案した芦田・道上¹⁰⁾の粒径別流砂量式などによって混合砂の流砂量は一応推定されるが、これらの式は河床表層砂の粒度分布が与えられてはじめて用いることができる。また、細砂が粗砂の背後で動きにくくなったり、粗砂が流れに突出して均一砂の場合より動きやすくなる現象に関連する粒径別限界掃流力の評価も、最近だけでも White・Day¹¹⁾、Shen・Lu ら^{12),13)}、Wiberg・Smith¹⁴⁾など多くの論議があり、必ずしも定まっているわけではない。

静的平衡状態のみならず、動的平衡状態でも河床面の粒度分布が変化しているとしたら、この粒度分布を推定

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木工学科
(〒790 松山市文京町3)

しない限り流砂量は求まらないことになる。最近, Borah ら¹⁵⁾ や Lee ら¹⁶⁾ は平野⁴⁾ によって導入された armor coat となる交換層の概念を混合層という名で用いて、粒径別流砂の連続式から河床表層の粗粒化の時間的変化を検討し、時間の概念が欠如している Gessler²⁾ による armor coat の粒度分布推定法を修正しているが、いずれも基本的には平野の理論式以上のものではないようである。

本研究は、混合砂礫河床において、流量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が、その過程で粒径別限界掃流力や粒径別流砂量について検討し、armor coat の形成機構についての仮説を提示している。

2. 実験の概要

実験は、混合砂河床において低水時に形成された河床表層の armor coat が洪水の増水期に破壊され、減水期に再び形成されるような状況を想定して、その現象を実験水路で再現する目的でなされたものである。

実験に用いた水路は長さ 8 m、幅 40 cm の可変勾配鋼製水路であるが側壁は透明ガラスでできており、流砂の動きがみれるようになっている。水路をまたいだ台車上に、電気抵抗式砂面測定器および水面測定器が載せてあり、台車が水路縦断方向に自走することによって、河床および水面の縦断形状は連続的に測定できる。水路上流端から下流端までの測定に要する時間は約 3 分である。

実験の方法は、まず水路下流端に砂止め用の堰を設け図-1 に示す粒径加積曲線を有する平均粒径 d_{m0} が 4.15 mm、最大粒径 d_{100} が約 10 mm で標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ が 2.74 の混合砂を敷きつめて移動床とする。実験は上流からの給砂は行わない状態で行う。水路勾配を調節して所定の河床勾配のもとに所定の流量を原則として 10 分程度通水して止水する。止水直前に河床と水面の縦断形状を測定し、止水前の 5 分間水路下流端からの流出砂を採取する。河床表層が変化しないように排水した後、河床表層の砂を幅約 5 cm、厚さ約 1 cm（最大砂粒径）で水路横断方向全幅にわたってへらで削り取る。水路縦断方向には 1 m 間隔で 7 か所で採砂する。上流から給砂をしない状態での実験があるので、厳密な意味で平衡状態の流砂量を捉えることはできないが、通水時間が比較的短いので、上流での給砂のないことによる非平衡現象が下流に伝播しないまでの下流での平衡状態の問題として扱えるはずである。各実験（約 10 分）の通水後では河床勾配は元の河床勾配より若干小さくなっているので河床縦断形状の記録を用いて、河床勾配が所定の元の勾配になるように水路勾配を調節し、採砂した場

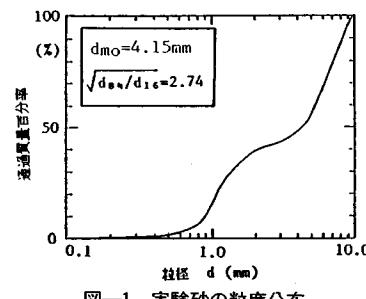


図-1 実験砂の粒度分布

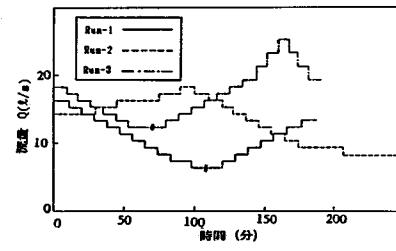


図-2 流量と通水時間

所の洗掘部を元河床砂で埋め戻した後、流量を変化させて次の実験に移る。実験条件は図-2 に示すように河床勾配 I を 1/80 (Run1), 1/100 (Run2) および 1/115 (Run3) の 3 通りについて、各勾配で流量 Q を 6 l/s～25 l/s の間で 15～20 段階変化させることによって、armor coat が形成されたり、破壊されたりするような条件である。

また、初期河床勾配 I を 1/87 とし、流量 $Q = 12.3 \text{ l/s}$ を流し続けた実験 (Run A) を河床表層砂の粒度分布の場所的変化のみを調べるために追加している。

3. Armor coat の形成・破壊に関する考察

(1) 河床表層砂の粗粒化に関する仮説

図-2 に示す実験条件では、各 Run とも河床勾配を一定として流量を変化させているが、上流から給砂を行っていないので、河床勾配の変化の影響がないように原則として 10 分間だけ通水し、通水後毎回水路勾配を調整して河床勾配を一定に保って次の流量に移っている。Run1 および Run 3 は河床砂の移動が活発な状態から河床に armor coat が形成される状態まで流量を下げ、その後 armor coat が破壊されて砂の移動が活発になるまで流量を増している。Run 2 は armor coat が形成されている状態から出発して、それが破壊され再び形成されるように流量を変化させている。図-3 は図-2 のように流量変化させたときの各段階における流量に対応する平衡状態（とみなす）の全流砂量 q_b と流量 Q の実測による関係を示したものである。

この図から、明らかに同じ流量・河床勾配であっても

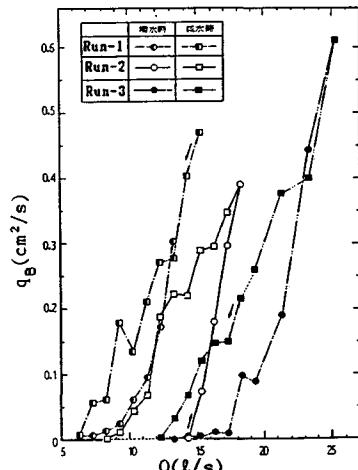


図-3 流量と流砂量

流砂量が大きく異なる領域が存在し全流砂量と流量の関係にはループを描く領域が認められる。本実験では各Runで河床勾配を一定に保っており、全実験を通じて河床はほぼ平坦であったことから、同一流量に対しては摩擦速度がほぼ同じであるので、全流砂量が大きく異なるということは、河床表層砂の粒度構成 i_b が変化しないなければならないことになる。

すなわち、同一流量で流砂量が少ないとときは河床表層砂は粗粒化しており、armor coat が河床を覆っていることが予想される。後に述べるように事実河床表層砂の粒度分布は変化しているが、流砂量が計算できるのはあくまで河床表層砂の粒度分布がわかっている場合であって、洪水時に河床表層がどのような状態になっているかを推定しない限り流砂量は計算できない。すなわち、河床表層砂の粒度分布と水理量との関係を明らかにしなければならない。河床表層砂の粗粒化現象すなわち armor coat の形成については、従来 Gessler²⁾ や平野ら⁴⁾ にみられるようにダム下流部の静的平衡に近い水理条件下で現われる現象として論じられてきた。すなわち、armor coat の形成は、比較的大きな砂粒子が停止するような水理条件になると、細かい砂のみが河床表層から抜け出るので、もし上流から細かい砂の補給がなければ粗砂のみが河床面に残るために生じる現象と考えられてきた。河床表層砂の粗粒化機構がそれのみであるとしたら、礫床河川や本実験のように平衡状態とみなせる場合で上流から細砂が流れているときにはどんなに掃流力が小さくても河床表層は粗粒化しないことになり、本実験の結果と矛盾する。また、armor coat の形成は上流の給砂がない場所から下流へ伝播していく現象となるから、その伝播速度が小さい場合には、細砂もわずかしか流れていないので、河床表層砂の粒度分布は場所的に

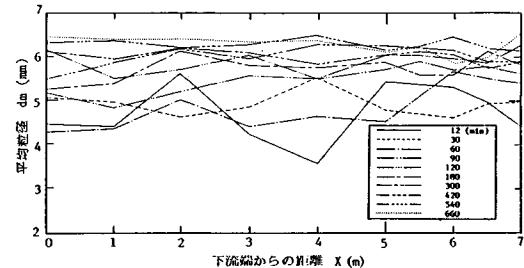


図-4 河床表層砂の平均径の場所的変化

大きく異なっているはずである。図-4は、河床表層砂の粒度が場所的に変化するかどうかを知るために、初期河床勾配 1/87、単位幅流量 q が 308 cm²/s で上流から給砂をしないで通水し続けた実験 (Run A) を行った結果を示している。なお、ここでの追加実験は静的粗粒化についてのものではなく、河床が大きく低下している状態のものであって、粗粒化が時間的に進行するのは掃流力が時間的に減少し、その掃流力に対応して起こる現象だと考えている。実験砂は図-1に示すものと同一で河床勾配は 660 分後は 1/115 となっていた。データにばらつきが大きいので断定することは難しいが、河床表層砂の粒径が場所的に変化しているとは認められない。初期河床の平均粒径が 4.5 mm 程度で最終的には 6 mm 以上となっているから、もし粗粒化が上流から下流へ伝播するものなら、水路縦断方向に河床砂の粒度が明らかに変化しないなければならないはずである。

平野⁴⁾のダム下流域の河床低下を想定した実験でも、砂粒度の流下方向の変化は明確ではなく、実験データはむしろ、粗粒化は河床面全体でほぼ同時に生じる現象を示しているようでもある。もしそうだとしたら、粗粒化現象の本質的な機構は従来考えられているものとは異

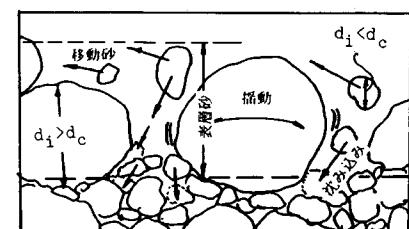


図-5 停止砂の揺動と細砂の沈み込みの模式図

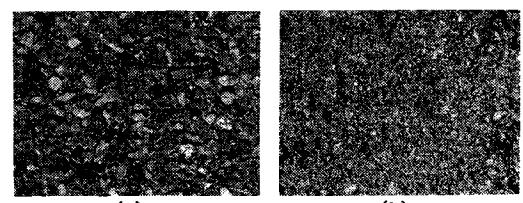


写真-1 armor coat とその下層砂

なっているのではなかろうか。1つの仮説であるが、粗粒化現象は細砂が河床表層から抜け出す現象というより、図-5の模式図に示すように、停止・揺動している粗砂の下部の空隙を埋めるように細砂が粗砂の底部に沈み込む現象が支配的なのではなかろうか。事実、写真-1(a)にみられる armor coat を最大砂粒径程度の厚さ取り除くと写真-1(b)にみられるように、元河床の砂よりかなり細かいと判断される砂が認められる。Parker¹⁷⁾は「動的粗粒化機構として粗砂が移動した後の空隙を細砂が埋める」という Milhous がいい出した鉛直分級説を紹介しているが、本論文で示した仮説は静的粗粒化を対象としていて必ずしも同じではないが、考え方は共通している。この仮説を認めるるとすると、粗粒化現象を支配すると考えられる要素は、各砂間の空隙特性を表わす元河床砂の粒度分布 i_{bb} 、どの程度の大きさの砂が停止しているのかを示す掃流力 τ および各粒径の限界掃流力 τ_{ct} が主なものであると考えられる。

また、一部の粗砂が停止を開始した後、細砂がその粗砂の底部に落ち込むのに長時間は要しないであろうから河床砂特性 i_{eo} および τ_{ci} が与えられたら掃流力 τ だけで決まる粒度分布を有する armor coat が、短時間に河道全体にわたって形成されることになる。

このことは本実験での armor coat 形成特性を非常によく説明している。

(2) 河床表層砂の粒度分布の推定

上記の仮説に基づいて河床表層砂の粒度分布の推定を試みる。いま、 d_c 以上の粒径の砂が停止するような掃流力 τ が作用していると、 d_c 以上の粒径の砂の下に d_c 以下粒径の砂の一部がその存在割合に比例して沈み込むものと考える。停止している砂がその下に作り得る空間 V_s (図-6 の斜線部) は砂粒径 d_i によって異なるが、それを図-6 のように一辺 d_i の立方体から直径 d_i の球の体積を引いた体積に比例すると仮定すると、 α をその比例定数として、

であるから、この V_s を粒子の体積 $(\pi/6)d_i^3$ で割れば 1 つの粒子 d_i がその底部につくる空間の粒子体積に対する割合が求まる。この割合に粒径 d_i の砂の元河床での存在率 i_{so} をかけたものが、粒径 d_i の停止している砂全体についての空間率 P_{vi} となる。すなわち、

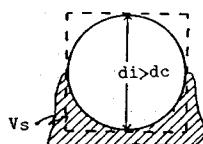


図-6 停止砂の作る下部空間

したがって、 d_c より大きい粒径の砂全体についての空間率 P_V は、

$$P_V = \sum_{\alpha}^{\alpha_L} P_{V\alpha} = \sum_{\alpha}^{\alpha_L} \{ \alpha (6/\pi - 1) i_{bo} \}, \dots \dots \dots \quad (3)$$

である。ここに、 d_L は元河床砂の最大粒径である。

このような空間に、粒径 d_c 以下の粒径 d_t の砂が元河床に存在する割合 i_{so} に比例した量だけ沈み込むものと考える。粒径 d_t の砂で粒径 d_c より小さい粒径の砂だけでの割合 P_{mt} は、 d_s を元河床砂の最小粒径とするとき、

であるから、粒径 d_i の砂の沈み込む割合 P_{si} は、

$$P_{st} = P_{mt} \cdot P_V \\ = \left(i_{bo} / \sum_{ds}^{dc} i_{bo} \right) \cdot \sum_{dc}^{di} \{ \alpha (6/\pi - 1) i_{bo} \} \dots \dots \dots (5)$$

(ただし, $d_i \leq d_c$)
で表わされる。したがって、河床表面に移動しながら残っている粒径 d_i の砂の割合 i_b は、 $i_b = i_{b0} - P_{Si}$ であるから、 $d_i \leq d_c$ に対して、

$$\begin{aligned} \dot{i}_b' &= i_{b0} \{1 - \wedge_{ci}\} \quad (\wedge_{ci} < 1) \\ \dot{i}_b' &= 0 \quad \quad \quad (\wedge_{ci} \geq 1) \end{aligned} \dots \dots \dots \quad (6)$$

である。ここに、

$$\wedge_{ci} = \alpha (6/\pi - 1) \left(\sum_{d_c}^{d_t} i_{b0} / \sum_{d_s}^{d_c} i_{b0} \right) \dots \dots \dots \quad (7)$$

一方、停止している砂の割合は、変わっていないから、
 $d_i > d_c$ に対しては、

とする。したがって、粗粒化後の河床表層の各粒径 d_i 砂の存在率は、

として求めることができる。なお、掃流力 τ に対する停止砂の最小粒径 d_c は、砂の移動限界掃流力から算定すべきものであるから、ここでは便宜的に芦田・道上³⁾によって修正された Egiazaroff 式⁴⁾、

$$\tau_{ci}/\tau_{cm} = |\log 19 / \log 19 (d_i/d_m)|^2 (d_i/d_m) \\ (d_i/d_m > 0.4)$$

を用いて計算する。ここに、 τ_{cl} は混合砂中の粒径 d_i 砂の限界掃流力で、 τ_{cm} は平均粒径 d_m と等しい径の均一砂の限界掃流力である。

図-7は、最大粒径が10cmで最小粒径が0.01cmであって粒度分布が全く異なるA砂、B砂およびC砂について上記の方法によって計算したarmor coatの粒度分布を示している。A砂の平均粒径 d_{m0} と標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ はそれぞれ0.57cmおよび7.84であり、B砂では、1.78cm、5.66また、C砂では4.44cm、2.61である。計算では、 $\tau_{*cm} = (u_{*cm}^2 / sgd_m)$ を0.05、式(1)

の a を 0.7 と仮にしている。ここに、 u_{*cm} は平均粒径砂の限界摩擦速度 ($=\sqrt{\tau_{cm}/\rho}$)、 $s = \sigma/\rho - 1$ 、 σ と ρ はそれぞれ砂および水の密度、 g は重力加速度である。各混合砂で、河床表層が最も粗粒化するときの摩擦速度 u_* を u_{*A} とするとき、A 砂では $u_{*A} = 6.3 \text{ cm/s}$ (Egiazaroff の式で径 0.3 cm, 元河床砂の 75 % 粒径の砂の限界掃流力に相当)、B 砂では 11.5 cm/s (同じく、1.3 cm, 70 % 粒径) また C 砂では 18.0 cm/s (同じく、3.1 cm, 45 % 粒径) であった。図からわかるように armor coat の粒度分布は、元の混合砂の粒度分布によつて大きく異なる。すなわち、A 砂のように細砂を多く含む砂では粗粒化はごくわずかである。一方、C 砂のように粗砂の多い砂では armor coat には細砂が全く残らない。図-8 は d_m/d_{m0} と u_*/u_{*A} との関係を示している。ただし、 d_m は分級後の河床表層砂の平均粒径である。

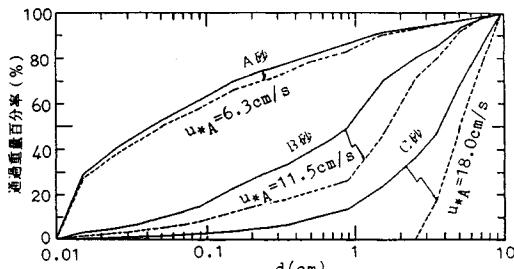


図-7 種々の粒径砂の粗粒化の計算例

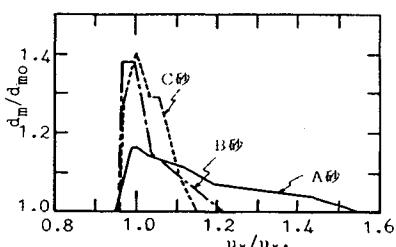


図-8 磨擦速度による平均粒径変化

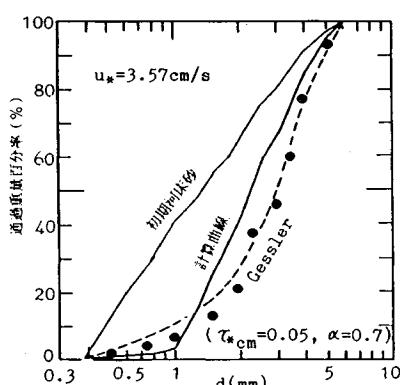


図-9 Gessler のデータと計算による粒度分布

る。 d_m は $u_* = u_{*A}$ でピークをもち、 u_* の狭い範囲で急激に変化している。たとえば、A 砂の場合、 u_* の減少に対して u_*/u_{*A} が約 1.55 で粗粒化が始まり、 $u_* = u_{*A}$ で最も大きくなるが、さらに u_* が小さいと粗粒化の程度が減じ、 u_*/u_{*A} が約 0.94 より小さいと、元の混合砂と同じようになっている。このような特性は B 砂および C 砂についても同様に認められる。

図-9は、Gesslerによるarmor coatの粒度分布と上記“沈み込みモデル”で計算した結果を示している。図中●はGesslerの実験データ、破線はGesslerの方法による計算曲線である。計算では $\tau_{*cm}=0.05$ 、 $\alpha=0.7$ としているが、計算による粒度分布は実測のものがある程度説明していることが認められる。

(3) 流量の連続的変化に対する粒度分布の変化

(2) では元河床の状態からある掃流力に対応する河床表層砂の粒度変化について検討したが、本実験の図-2のように段階的にしかも連続して流量を変化させる場合は、前段階での河床表層砂の粒度分布が次の段階での粒度分布に影響を与えるから、式(6)～式(9)は次のように修正しなければならない。

ここに、 $d_i \leq d_{cn}$ に対して

$$i_{b,n}'=0 \quad (\wedge_{c_i,n} \geq 1)$$

$$\wedge_{ct,n} = a(6/\pi - 1) \left(\frac{d_{c,n-1}}{\sum d_{c,n}} i_{b,n} / \sum_{d_{c,n}} i_{b,n} \right) \dots \dots \dots \quad (13)$$

$$(d_{c,n-1} > d_{c,n})$$

また、 $d_i > d_{cap}$ に対しては

である。添字 n は第 n 段階での量を示し、 $n-1$ より $n+1$ はそれぞれその前後の段階での量を示している。式 (11) は $d_{c,n-1} > d_{c,n}$ すなわち、基本的には流量が減少していく段階で、前段階での停止砂の空隙は詰まっており今段階で新たに停止した砂の作る空間のみを考慮して導かれている。

以上の議論は、減水時の河床表層砂の粗粒化過程についてのものであるが、一度 armor coat が完全に形成されると、若干の増水に対しては遮蔽された細砂は動けないから河床表層砂の粒度はほとんど変化しない。大きく増水し armor coat が破壊されると同時に河床表層砂の粒度は元河床砂のものに近いものとなる。

armor coat の破壊は、流れの掃流力が armor coat の平均粒径砂の限界掃流力を越える程度になると一時に生じる。図-10 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 とそのときの河床表層砂の平均粒径と等しい径の均一秒の限界掃流力 τ_{cm} の比 τ/τ_{cm} を横軸にとって、

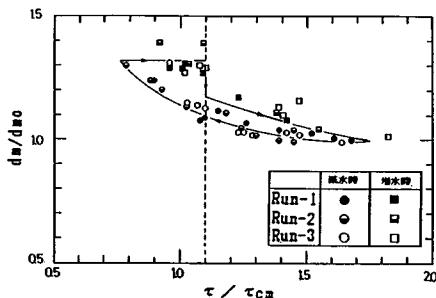


図-10 河床表層砂の平均粒径と掃流力の関係

掃流力の変化に対する粗粒化の変化を示したものである。図中の実線は実験データの傾向と実験の方向（減水か増水か）を示した概線である。減水時には τ/τ_{cm} が小さくなるに従って連続的に d_m/d_{mo} 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いく場合 τ/τ_{cm} が 1.1 になるまでは粒度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、河床表層の平均粒径が急に小さくなり armor coat が急激に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になっているが、極端な差はない。以上のことより、armor coat の破壊限界条件は、次式 (15) である。

ただし、 τ_{cm} は armor coat の平均粒径砂の限界掃流力である。armor coat が破壊された後は、沈み込んでいた細砂が出てくるので、瞬間に河床表層砂は元河床のものに近くなると考えられるから、 $i_{bo}=i_{b0}$ として式(6)～(9)を用いて i_b を計算できる。

図-11は、流量の変化に伴う河床表層砂の平均粒径 d_m の変化を示したものであって、●印が図-2の各ステップにおける実測値で、○印が式(11)～式(14)によって計算されたものである。最上図に示すRun 1については、流量の多い(u_* の大きい)方から段階的に流量を減らしているが、 u_* が6.8 cm/s程度までは d_m はほとんど変化しないが、6.6 cm/sより小さくなると急激に d_m が大きくなり河床表層が粗粒化していることがわかる。次に流量を増しても粒径は変化せず、 u_* が7.5 cm/s以上では、急激に d_m が小さくなりarmor coatが破壊されていることがわかる。図中に式(15)で示されるarmor coatの破壊点も示している。このような河床表層砂の平均粒径の変化特性、特にarmor coatの形成過程は、実測値と計算値とはよく一致していることがわかる。中図および最下図で示されるそれぞれRun 2およびRun 3についてもほぼ同様である。ただ、流量が増加しarmor coatが破壊した直後の粒度分布は、Run 3

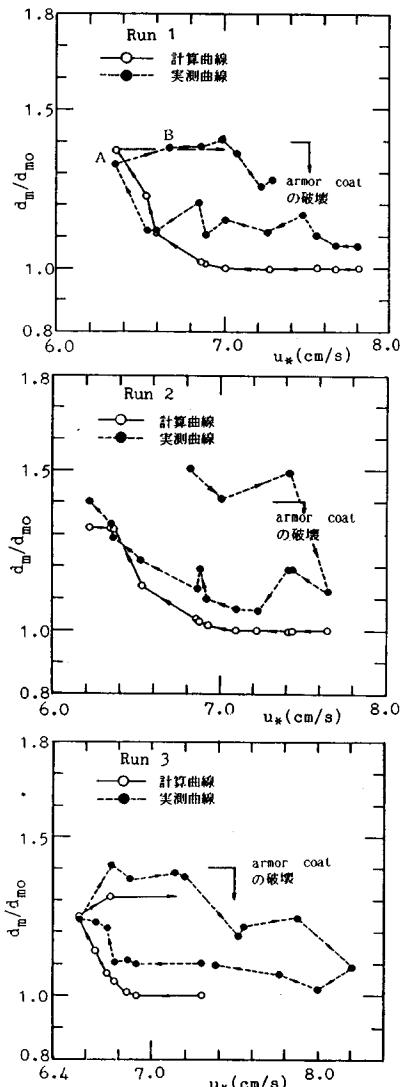


図-11 各流量段階における河床砂の平均粒径

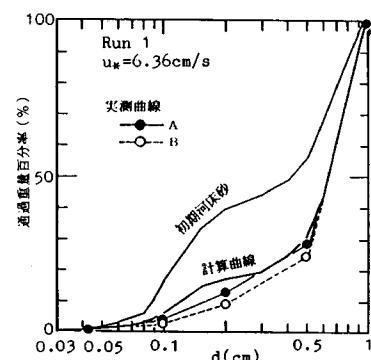


図-12 計算と実測による armor coat の粒度分布

にみられるように元河床のものよりもやや大きく、依然として粗粒化の影響が残っており、*armor coat* の破壊の定義の難しいことがわかる。図-12は図-11 Run 1の点 A における河床表層砂の粒度分布の計算曲線（実線）とそれに対する点 A の実測値（●印）と点 B の実測値（○印）を示している。実測の粒度分布と計算による粒度分布はかなりよく一致していることがわかる。なお、これらの計算に必要である式(10)の τ_{cm} は $\tau_{*cm} = 0.055$ として求め式(2)に導入された α は 0.7 としている。 τ_{*cm} や α の値は、式(10)を用いたときに粒度分布の計算結果が実測結果に合うように試行錯誤で求めたものであり、用いる式によっては変化する可能性がある。

4. 粒径別流砂量に関する検討

(1) 遮蔽係数

河床表層砂の粒度分布がわかれば、混合砂中の粒径別流砂量は、通常均一砂の流砂量式を遮蔽係数で補正した式を用いて計算される。その修正方法には、均一砂の流砂量式の中で掃流力 τ を τ/ϵ_1 のように修正する方法と限界掃流力 τ_c を $\epsilon_2 \tau_c$ のように粒径別の限界掃流力に補正する方法がある。ここに、 ϵ_1 および ϵ_2 は遮蔽係数である。Einstein によって導入された ϵ_1 は、多くの研究者によって扱われてきたが、 d_i/d_m だけではなく τ_{*m} の関数でもあることが知られている (Lu & Shen¹³⁾)。 ϵ_2 については、Ashida & Michiue によって修正された Egiazaroff の式 (10) があり、 d_i/d_m のみの関数である。 ϵ_1 と ϵ_2 の関係をみるために、最も単純な形をしている Meyer-Peter & Müller の式¹⁸⁾ を修正してみる。すなわち、

$$q_{Bi} = 8(\tau_{*i}/\varepsilon_i - C)^{3/2} : \tau \text{ の修正} \\ = 8(\tau_{*i} - \varepsilon_2 C)^{3/2} : \tau_c \text{ の修正} \dots \dots \dots (16)$$

ここに、 $q_{Bi} = i_B q_B / i_b \sqrt{sgd_i^3}$ で C は均一砂の無次元限界掃流力である。式(16)から、 ϵ_1 について

が得られる。ここに、 $C = \tau_{*cm}$ とかけるとすると $C/\tau_{*m} = \tau_{cm}/\tau$ であり、 ε_2 は修正 Egiazaroff 式 (10) あるいは後に述べる式 (19) で与えられる。したがって ε_1 は d_i/d_m および τ_{cm}/τ の関数であって、 ε_1 と d_i/d_m の関係を τ_{cm}/τ をパラメーターで表わせば、図-13 のようになる。 ε_1 は τ が τ_{cm} よりずっと大きい ($\tau_{cm}/\tau \ll 1$) ときには 1 に近づき、逆に流れが弱く τ が τ_{cm} に近いときは ε_1 は ε_2 に等しくなる。 τ を補正する ε_1 については、 τ が τ_{cm} に近いときは停止している粗砂の遮蔽効果があるので合理的であるが、 τ が τ_{cm} よりずっと大きい場合は粗砂も動いているから遮蔽効果はなくなるので必然的

に ε_1 は τ_{cm}/τ の関数として表わさなければならない。遮蔽効果は限界に近い状態 ($\tau_{cm}/\tau \approx 1$) のときに主として現われると考えると、 τ_c を補正する d_i/d_m のみの関数である ε_2 を用いることの方がより簡便である。

(2) 流砂量界限掃流力

図-14 は本実験で得られた粒径別無次元流砂量 $i_B q_B / i_b u_* d_i (\equiv q_{*i})$ と無次元掃流力 $u_*^2 / s g d_i (\equiv \tau_{*i})$ の関係を示したものである。ここに、 q_B ：全流砂量、 d_i ：各砂粒径、 i_B 、 i_b ：それぞれ流砂および河床表層砂に占める粒径 d_i の砂の割合、 $s = \sigma/\rho - 1$ 、 σ 、 ρ ：それぞれ砂および水の密度、 g ：重力加速度、 u_* ：摩擦速度である。図で、パラメーターとして d_i と河床表層砂の平均粒径 d_m の比 d_i/d_m が用いられているが、実測データは同一の d_i/d_m ごとによくまとまっていることがわかる。

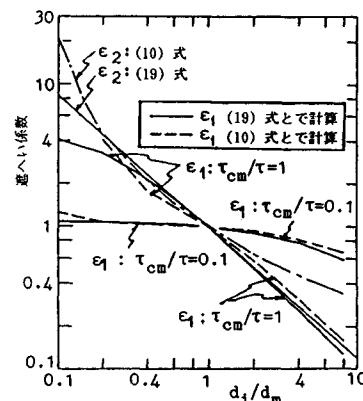


図-13 遮蔽係数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ と d_i/d_m の関係

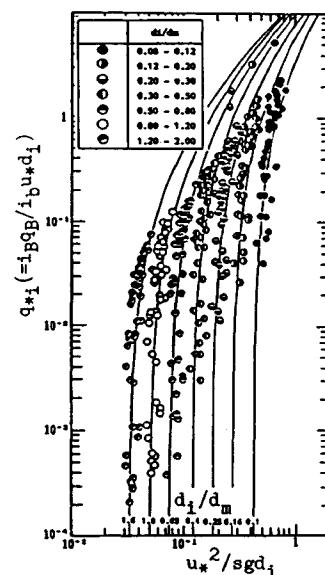


図-14 粒径別流砂量と掃流力の関係

均一砂の流砂量式を混合砂用に修正する手法は、すでに芦田・道上³⁾ や平野⁴⁾ 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おり、 d_i/d_m が大きいところで実測値より計算の流砂量がかなり小さいという問題がある。砂の限界掃流力としては、停止している砂を動かすのに必要な最小限の掃流力という移動限界掃流力と、動いている砂を停止させるのに必要な最小限の掃流力という停止限界掃流力とが考えられることを指摘した芦田ら¹⁰⁾ は両者に差異があることを実験的に示している。また、流れや砂の運動が確率的性格をもつために限界掃流力の状態の定義に主観が入りやすく明確ではない。したがって、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、図-14において、 q_{*i} が 10^{-3} となる τ_{*i} を無次元限界掃流力 τ_{*ci} とする。ただし、この q_{*i} の基準値に物理的な意味はない。なお、 q_{*i} が 10^{-3} の近くにデータとしてない場合は、規準化された流砂量と掃流力の関係が、各粒径の砂に対して相似性を保つということを想定し、外挿して決めた。こうして求めた τ_{*ci} と d_i/d_m との関係は両対数紙上ではほぼ直線関係があることが認められたので、これらのデータを回帰分析すると、

の関係が得られた。式(18)は、平均粒径より小さい砂($d_i/d_m < 1$)の場合、均一砂のときよりはるかに動きにくく、平均粒径より大きい砂($d_i/d_m > 1$)の場合は均一砂のときより動きやすくなっていることを意味しているが、限界掃流力 τ_{ci} で比較すると依然としてわずかであるが粗砂の方が動きにくい。いま、式(18)を掃流力の比で表わせば、

となり、図示すれば図-15 のようになる。 $\tau_{ci}/\tau_{cm}=1$ の実線は、すべ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、式(19)はこの等移動性よりわずかに異なっているのみで、 $d_i/d_m > 1$ の砂は平均粒径の砂よりほんのわずか動きにくく、 $d_i/d_m < 1$ の砂は逆にわずかに動きやすくなっているに過ぎない。すなわち、

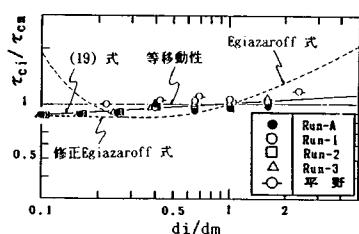


図-15 τ_{ci}/τ_{cm} と d_i/d_m の関係

細砂が動き出せばほとんど同じ掃流力で粗砂も動き出し、粗砂が停止すれば同時に細砂も停止する。また、最大粒径砂も移動するような状態では、流出砂の粒度が河床砂の粒度とあまり変わらない（pavement 効果を除けば）ことを考えれば、混合砂の場合、各粒径の砂はお互いにほとんど同じ動きをするように強く干渉し合っており、各粒径に特有の動きはできにくくなっている。なお、Parker ら⁶ は Oak Creek の観測で式 (18) の指数 -0.93 が -0.9067 であるという結果を得ている。図中に修正 Egiazaroff 式 (10) も示しているが、これは個々の砂の移動限界について得られたもので、流砂量の限界状態から求めた式 (19) とは必ずしも同じものではない。

(3) 粒径別流砂量

修正すべき均一砂の流砂量式として、いま、芦田・道上の式を用いるものとすれば、粒径別流砂量 q_{*i} は、

$$q_{*i} = 17 \tau_{*i} (1 - \tau_{*ci}/\tau_{*i}) (1 - \sqrt{\tau_{*ci}/\tau_{*i}}) \dots \dots \dots \quad (20)$$

で計算される。ここに、 τ_{*ci} は式 (18) によって与えられる。図-14 の曲線は式 (20) を示しており、粒径別流砂量の実測値とよく一致していることがわかる。

すなわち、河床表層砂の粒度分布がわかれば、式(18)から求められる τ_{*ci} を用いて式(20)によって粒径別流砂量は計算できる。

5. 流砂量変化のシミュレーション

最後に、混合砂河床における図-3にみられるような増水・減水時における流砂量特性をこれまでの議論に基づいて以下の仮定のもとでシミュレートしてみる。すなわち、①粒径別流砂量は、河床表層砂の粒度分布 i_b やび各粒径の砂の限界掃流力を式(19)で与えて、式(20)で計算される。②河床表層砂の粒度分布 i_b は、増水期で armor coat が形成されている場合を除いて、式(11)～式(14)によって計算される。増水期で armor coat が形成されている場合の i_b は、armor coat の粒度分布で与えられる。③armor coat の破壊限界条件は式(15)である。④増水時、armor coat が破壊された後の i_b は式(6)～式(9)で計算される。計算結果と実測値の比較を図-16に示している。実験の性質上、データにはばらつきがあるものの減水時の流砂量特性は、計算値と実測値とで比較的よく一致している。増水時については、計算では armor coat が破壊されると減水時とほぼ同じ曲線に不連続に移ることになるが、実測では流砂量は急激に変化するものの連続的である。

これは、armor coat の破壊限界条件式（15）が図-10 にみられるように必ずしも厳密でないことに基づくものであろう。しかし、上記の手法によって、混合砂礫河床での洪水の増水・減水に伴う流砂量の変化をある程度推定できるものと考える。

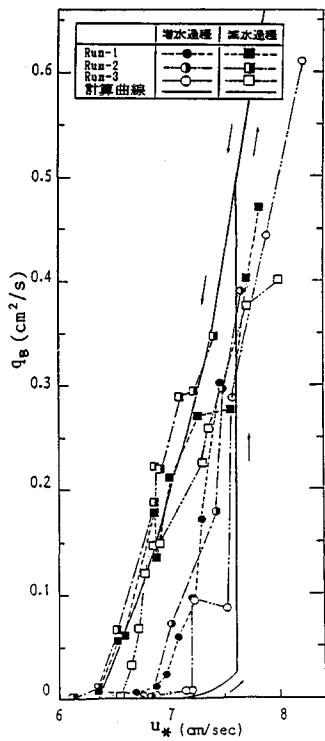


図-16 増水・減水時の流砂量の変化

6. あとがき

本研究は混合砂礫河床における洪水時の増水・減水期での流砂量を推定することを目的とし、実験水路での混合砂移動床に流量を段階的に変化させて通水し armor coat の形成・破壊と関連した流砂量の変化特性を実験的に検討したものである。その過程で流砂量をもとにした混合砂の粒径別限界掃流力を検討し從来の粒径別流砂量式に若干の修正を加えるとともに、armor coat の形成機構および破壊条件についても考察した。得られた主な結果は以下のようである。

(1) 混合砂礫河床の表層砂の粒度分布は、元河床の粒度分布と掃流力の大きさによって変化し、粗粒化現象は停止している粗砂の底部へ細砂が沈み込む現象であるとの仮説のもとに、河床表層砂の粒度分布の推定法を示した。

(2) armor coat の破壊限界条件は、 $\tau/\tau_{cm}=1.1$ である。ここに、 τ は流れの掃流力、 τ_{cm} は armor coat の平均粒径砂に対応する限界掃流力である。

(3) 粒径別流砂量と無次元掃流力との関係は、各粒径砂間で相似性を保っており、式(19)の τ_{ci} を限界掃流力として用いるという修正をすれば、従来の均一砂の流砂量式を用いて式(20)で示される。

(4) 混合砂礫水路では、同一の流量に対しても河床

が粗粒化しているかいないかで流砂量が大きく異なり、洪水の減水時には armor coat が河床に形成されている増水初期に比して流砂量が格段に多い。すなわち、掃流力と流砂量はループを描く関係があるが、上記(1)～(3)の結果に基づいて河床表層砂の粒度分布を計算し流砂量を推定することによってこのループ関係を計算で示し、実測のものとかなりよく一致することを示した。

最後に、本研究の実験・資料整理に際し、当時鳥取大学学生の勝部浩志氏および宮本善和氏に多大な援助を受けたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- Kellerhals, R. and Bray, D.R.: Sampling procedures for coarse fluvial sediments, Proc. ASCE, Vol. 97, HY 8, pp. 1165～1180, 1971.
- Gessler, J.: Self-stabilizing tendencies of alluvial channels, Proc. ASCE, Vol. 96, WW 2, pp. 235～249, 1970.
- Ashida, K. and Michiue, M.: An investigation of river bed degradation downstream of a dam, Proc. IAHR, 14th Congress, Vol. 3, pp. 247～255, 1971.
- 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp. 55～65, 1971.
- 中川博次・辻本哲郎・原 稔明: 混合砂れき床面の粗粒化過程について, 京大防災研究所年報, 第 20 号 B-2, pp. 355～370, 1977.
- Parker, G., Klingeman, P.C. and McLean, D.G.: Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams, Proc. ASCE, Vol. 108, HY 4, pp. 544～571, 1982.
- パーカー・ゲーリー: 粗粒化について, 土木学会論文集, 第 375 号, II-6, pp. 17～21, 1986.
- Einstein, H.A.: The bed-load function for sediment transport in open channel flows, Tech. Bull. No. 1026, USDA, pp. 1～71, 1950.
- Egiazaroff, I.V.: Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. ASCE, Vol. 91, HY 4, pp. 225～247, 1965.
- 芦田和男・道上正規: 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, pp. 59～69, 1972.
- White, W.R. and Day, T.J.: Transport of graded gravel bed material, Gravel-bed Rivers edited by R.D. Hey, J.C. Bathurst & C.R. Thorne, John Wiley & Sons Ltd., pp. 181～223, 1982.
- Shen, H.W. and Lu, J.Y.: Development and prediction of bed armoring, Proc. ASCE, Vol. 109, HY 4, pp. 611～629, 1983.
- Lu, J.Y. and Shen, W.H.: Evaluation of H.A. Einstein's hiding factor for transport of nonuniform sediment sizes, Proc. IAHR, 21st Congress, Vol. 3, pp. 562～564, 1985.
- Wiberg, P.L. and Smith, J.D.: Calculation of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments, Water Resources Research,

- Vol. 23, No. 8, pp. 1471~1480, 1987.
- 15) Borah, D. K., Alongo, C. V. and Prasad, S. N. : Routing graded sediments in streams: formulations, Proc. ASCE, Vol. 108, HY 12, pp. 1486~1503, 1982.
- 16) Lee, H. Y. and Odgaard, A. J. : Simulation of bed armoring in alluvial channels, Proc. ASCE, Vol. 112, HY 9, pp. 798~801, 1986.
- 17) Parker, G. and Klingeman, P. C. : On why gravel bed streams are paved, Water Resources Research, Vol. 18, No. 5, pp. 1409~1423, 1982.
- 18) Meyer-Peter, E. and Müller, R. : Formulas for bedload transport, Proc. IAHR, 2nd Congress, pp. 61~62, 1974.
- 19) 芦田和男・高橋 保・水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究, 新砂防, 107, pp. 9~17, 1978.

(1988.5.6・受付)