

9.1 河床材料の粒度構成に着目した土砂移動機構に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：箱石憲昭、石神孝之、坂野章、櫻井寿之

【要旨】

河川横断構造物の建設や砂利採取などをきっかけとした河床低下によって、樹林化や露岩化等の河川環境の劣化、床止め・橋脚等の河川構造物の安定性の低下、砂浜の減少などの問題が顕在化している。このための水系一貫した土砂管理の必要性が十分に認識され、それを実現する具体的施策が求められている。本研究は 幅広い粒径集団を持つ山地河道および石礫河川を対象として、個々の粒径集団が持つ役割を明確にするとともに、ダムからの排砂もしくは置土について下流河道にとって必要とされる量と質を決定する方法を提案することを目的としたものである。平成 24 年度は、深掘れの規模や流砂量等の空間分布に対する河床材料粒度分布の影響について、平成 23 年度に引き続き水理実験により検討した。これによって、中央粒径が同一であっても河床材料の粒度分布が異なれば、深掘れの規模、流砂量や流砂の粒度分布も大きく異なることを確認した。また、粒径集団の役割を表現する河床変動モデルの開発に着手し、既存の平面 2 次元河床変動モデルにより水理実験の再現計算を行い、河床変動計算モデルの課題を明らかにした。

キーワード：河床材料、粒度分布、水理模型実験、河床変動モデル

1. はじめに

河川横断構造物の建設や砂利採取などをきっかけとした河床低下によって、樹林化や露岩化等の河川環境の劣化、床止め・橋脚等の河川構造物の安定性の低下、砂浜の減少などの問題が顕在化している。このための水系一貫した土砂管理の必要性が十分に認識され、それを実現する具体的施策が求められている。本研究は 幅広い粒径集団を持つ山地河道および石礫河川を対象として、(1)河道特性と河床変動および河床形態に関する個々の粒径集団が持つ役割を明確にする。(2)ダムからの排砂もしくは置土について、総合土砂管理の視点から下流河道にとって必要とされる量と質を決定する方法を提案することを目的としたものである。平成 24 年度は、深掘れの規模や流砂量等の空間分布に対する河床材料粒度分布の影響について、平成 23 年度に引き続き水理実験により検討した。また、粒径集団の役割を表現する河床変動モデルの開発に着手し、既存の平面 2 次元河床変動計算モデルにより水理実験の再現計算を行った。

2. 水理実験

2.1 検討方法

平成 24 年度は、礫や細粒分の役割をより明確に把握するため、平成 23 年度に使用した河床材料（単一

粒径若しくは混合粒径 2）に礫及び砂（細粒分）を追加して混合し、中央粒径はほぼ同一として礫及び細粒分の配合を大きく変化させた 3 種類の粒度分布を有する河床材料を使用して実施した。河床材料の混合割合は表 2.1 に示すとおりであり、混合後の粒度分布は図 2.1 に示すとおりである。なお、本報告では比較のため平成 23 年度に実施した結果も一部合わせて報告する。

実験は、長さ 60m、幅 2m のコンクリート水路の中

表 2.1 河床材料の混合割合

河床材料	使用材料の割合			
	単一粒径 ($d_m=5.6\text{mm}$)	混合粒径 2 ($d_m=9.3\text{mm}$)	礫 ($d_m=39\text{mm}$)	砂 ($d_m=0.7\text{mm}$)
混合粒径 3	—	80%	10%	10%
混合粒径 4	70%	—	15%	15%
混合粒径 5	20%	—	40%	40%

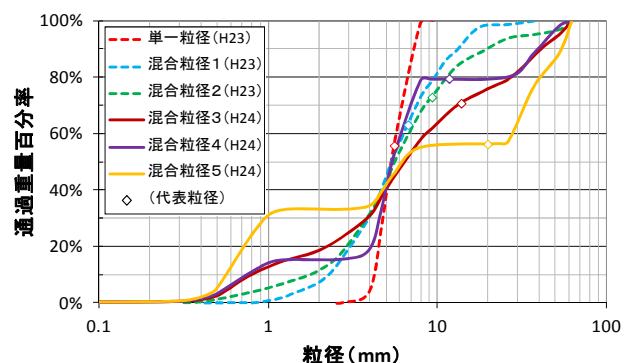


図 2.1 河床材料粒度分布（粒径加積曲線）

表 2.2 実験ケース一覧

実験ケース			河床材料				流量	通水時間
年度	区分			$d_{50}(\text{mm})$	$d_m(\text{mm})$	d_{84}/d_{16}	(m^3/s)	(分)
H23	ケース1	(1)	単一粒径	5.4	5.6	1.6	0.127	150
		(2)					0.186	120
	ケース2	(1)	混合粒径1	5.4	6.7	3.9	0.127	168
		(2)					0.186	127
	ケース3	(1)	混合粒径2	5.6	9.3	5.3	0.127	159
		(2)					0.186	117
H24	ケース4	(1)	混合粒径3	6.5	13.9	22.3	0.186	108
		(2)					0.300	100
	ケース5	(1)	混合粒径4	5.5	11.8	10.4	0.186	100
		(2)					0.300	100
	ケース6	(1)	混合粒径5	6.6	19.9	70.7	0.186	100
		(2)					0.300	100

に、河床材料を縦断勾配 1/100 で平坦に整形し、各材料において 2 種類の一定流量を重ねて通水した(表 2.2 参照)。通水中に、水位・流砂量・表面流速、通水後に、河床形状・粒度分布・流出土砂をそれぞれ測定した。通水中には、任意地点で流砂が採取できるように、写真 2.1 に示すような流水抵抗の極力小さくした採取器を作り、この中央三角の尖った部分を河床に押込んで採取器を水平にし、一定量の掃流砂を捕捉するまでこの状態を保持した。粒度分布については、(1)通水中の流砂 (2)通水後の河床表面の試料(幅 10cm×長さ 15cm×厚さ約 2cm) (3)通水後河床の $\Phi 19.5\text{cm}$ ×厚さ 10cm の試料 の各々を同一箇所にて採取してふるい分け試験を行った。なお、水路上流部河床を砂の供給部分としており、河床材料の供給は行っていない。

2.2 検討結果

2.2.1 河床形状

図 2.2 は、各ケースの空中写真・河床横断面図について比較したものである。空中写真は、それぞれ流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ に流量 $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ を重ねて通水した後の状況であり、白色の部分が水深の大きいところとなる。平成 24 年度に実施したケースでは礫州の形成が

ほとんど見られず、河床横断形状の偏りも極端に小さいことが確認できる。なお、平成 23 年度に実施した単一粒径と混合粒径 1 のケースで

写真 2.1 掃流砂採取器
(採取幅 20cm)

は礫州が形成され、特に単一粒径のケースでは深掘れが顕著であった。したがって、河床材料の粒度分布が幅広いほど河床の変化が小さい(深掘れなどが形成されにくい)ことが明らかとなった。

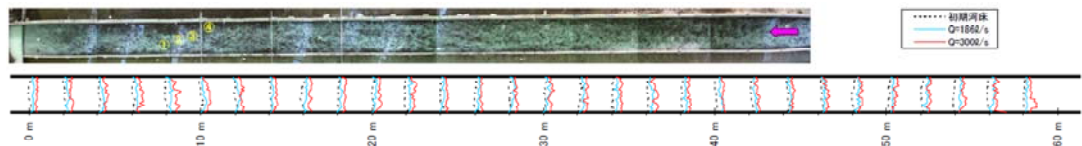
2.2.2 掃流砂量と粒度分布

図 2.3 は、下流端の沈砂池で捕捉した流砂の単位時間当りの掃流砂量について材料別と流量別に比較したものである(平成 23 年度に実施した結果も掲載)。これによると、河床材料の粒度分布が幅広いもののほど流砂量が少なくなる傾向が見られる。

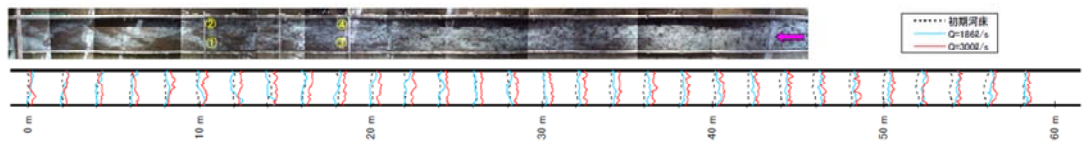
図 2.4 は、流量別に各ケースにおける河床材料(通水前及び通水後)と流砂の粒度(d_{50}, d_m 及び $d_{16} \sim d_{84}$ の範囲を明示)について比較したものである(棒グラフの棒の長さが d_{50} (薄色)、 d_m (濃色)を示す)。通水前と通水後の河床の粒度分布については、どの河床材料のケースでもあまり大きく変化していないが、混合粒径 3～混合粒径 5 のケースでは、粒度分布幅が狭く若しくは粒径が細くなる傾向が見られる。なお、河床材料の中央粒径(d_{50})に着目すると、通水前後ではほとんど変化が無かった。流砂の粒度分布については、単一粒径や混合粒径 1 のケースでは河床材料とほ

※写真は $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の通水後で、番号は粒度分布及び空隙率測定箇所(流砂、表面、厚さ10cm)

混合粒径3



混合粒径4



混合粒径5

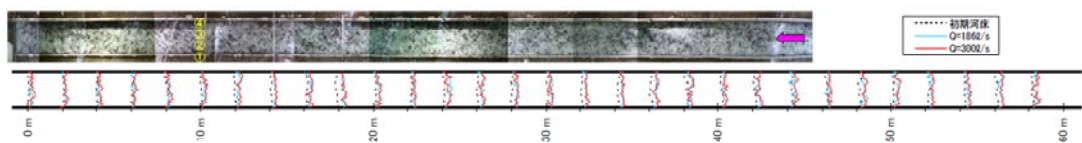


図 2.2 河床の平面形・横断面形

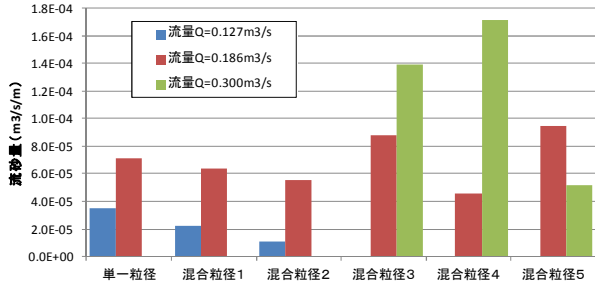


図 2.3 流砂量（下流端沈砂池）

とんど変わらないが、混合粒径 2～混合粒径 5 の粒度分布が幅広いケースでは、河床材料に比べて流砂の粒度分布幅は狭くかつ粒径も細かくなっており、特に混合粒径 5 については、粒径が非常に細かくなっている。以上の結果を整理すると、河床材料の粒度分布が幅広いほど流砂量が少なくなる傾向が明らかとなった。また、通水後の河床表面の粒度分布は通水前とは大きく変化しないが、流砂の粒度分布については、河床材料の大きな粒径の含まれる割合が大きいほど、流砂の粒径は小さくなる傾向が明らかとなった。

3. 河床変動モデルによる検証

平成 24 年度は、新たな河床変動モデルの開発に着手し、既存の平面 2 次元河床変動モデルを用いて前述の水理実験の再現計算を行い、実験結果と計算結果の比較・検証を行った。

3.1 平面 2 次元河床変動モデルの概要

今回使用した河床変動の計算モデルは、重点プロジェクト研究「貯水池および貯水池下流の流れと土砂移動モデルに関する研究（H18～H22 年度）」で開発した平面 2 次元河床変動モデルで、混合粒径も扱えるものである。本研究で開発する新たな河床変動モデルは、この河床変動モデルをベースとして新たに粒径集団の役割を考慮した流砂量算定式等を取り込む予定にしているものである。今回使用した計算モデルの流砂量の算定方法について概要を示す。

掃流砂量の算定式には河床変動計算でよく使用される芦田・道上の流砂量式³⁾を採用している。

粒径別単位幅掃流砂量 q_{Bk} は芦田・道上によれば次式で表される。

$$u_* > u_{*ck} : \frac{q_{Bk}}{P_{sek} u_{*e} d_k} = 17 \tau_{*ek} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \quad (3.1)$$

$$u_* \leq u_{*ck} : q_{Bk} = 0$$

ここに、 u_{*e} ：有効摩擦速度 (m/s)、 d_k ： k 番目の代表粒径 (m)、 τ_{*ek} ：無次元有効掃流力、 τ_{*ck} ：無次元限界掃流力、 u_{*ck} ：限界摩擦速度 (m/s)、 u_* ：摩擦速度 (m/s)、 τ_{*k} ：無次元掃流力を表す。 τ_{*ek} 、 τ_{*ck} 、 τ_{*k} は次式で与えられる。

$$\tau_{*ek} = \frac{u_{*e}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_k} \quad (3.2)$$

$$\tau_{*ck} = \frac{u_{*ck}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_k} \quad (3.3)$$

$$\tau_{*k} = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_k} \quad (3.4)$$

ここに、 σ ：土粒子密度 (kg/m³) を表す。

(3.1) 式を計算するためには u_* 、 u_{*e} および u_{*ck} を求める必要がある。

u_* は次式により求められる。

$$u_* = \sqrt{gR I_e} \quad (3.5)$$

ここに、 R ：径深、 I_e ：エネルギー勾配を表す。

u_{*e} は芦田・道上³⁾の提案した次式から求められる。

$$\frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{R}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right\} \quad (3.6)$$

ここに、 d_m ：交換層の平均粒径 (m)、 τ_{*m} ：平均粒径に関する無次元掃流力を表す。 τ_{*m} は次式で与えられる。

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_m} \quad (3.7)$$

u_{*ck} は混合砂礫床における粒径別限界摩擦力であり、ここでは Egiazaroff によって提案された式を芦田・道上³⁾が一部修正した修正 Egiazaroff 式を用いた。

$$\frac{d_k}{d_m} \geq 0.4 : \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19 d_k / d_m)} \right\}^2$$

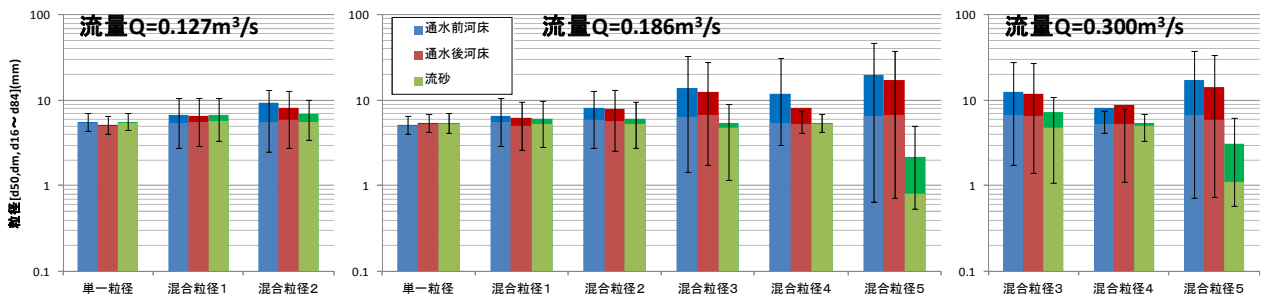


図 2.4 通水前後の河床及び流砂の粒度

$$d_k/d_m < 0.4 : \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = 0.85 \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \quad (3.8)$$

ここに、 τ_{*cm} ：粒径 d_m の無次元限界掃流力を表し、
以下に示す岩垣による一様粒径の実験式⁴⁾から求めた。

$$\left. \begin{aligned} 671.0 \leq R_* & ; \tau_{*cm} = 0.05 \\ 162.7 \leq R_* \leq 671.0 & ; \tau_{*cm} = 0.00849 R_*^{3/11} \\ 54.2 \leq R_* \leq 162.7 & ; \tau_{*cm} = 0.034 \\ 2.14 \leq R_* \leq 54.2 & ; \tau_{*cm} = 0.195 R_*^{-7/16} \\ R_* \leq 2.14 & ; \tau_{*cm} = 0.14 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

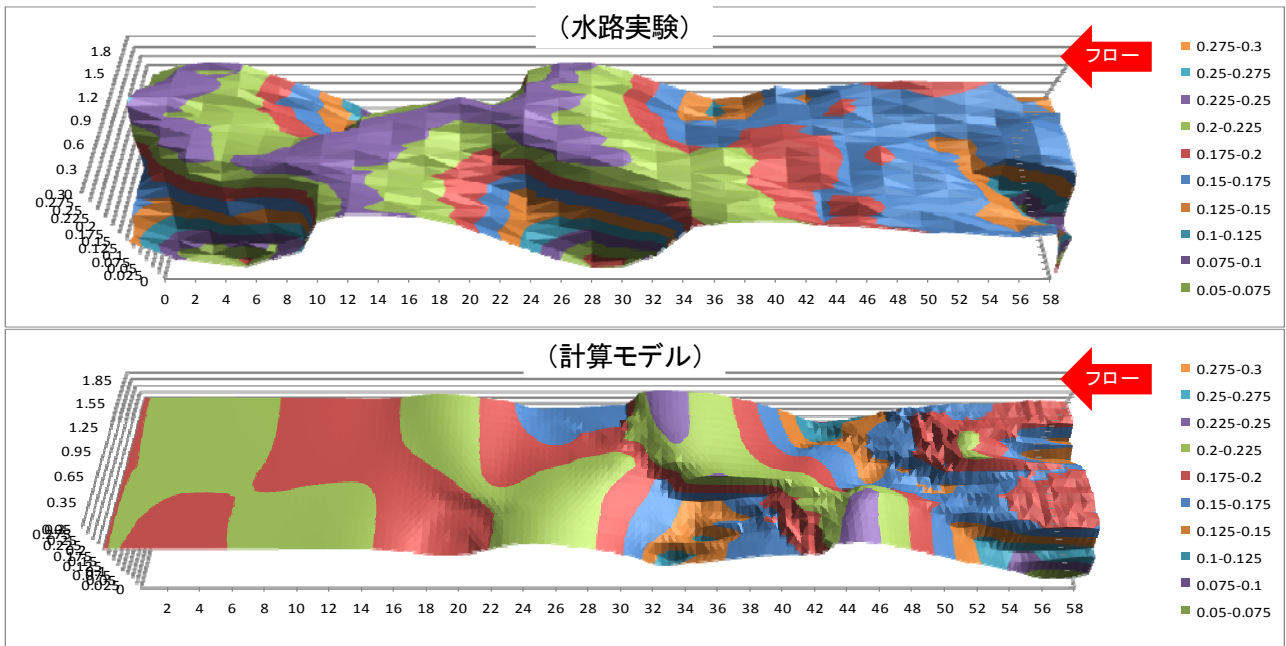
ここに、

$$R_* = \frac{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_m^3}}{\nu} \quad (3.10)$$

である。

本モデルは直交格子を用いて計算を行うもので、プログラムの制約上（最大格子数 200×200 個）から、計算格子は流下方向に $0.4\text{m} \times 150$ 個（延長 60m ）、横断方向に $0.1\text{m} \times 20$ 個（幅 2m ）で実験水路を再現し、流入流量、通水時間は、実験とほぼ同じとし、水理量（水深等）が実験値にほぼ合うように粗度係数、下流

単一粒径（流量 $Q=186\text{m}^3/\text{s}$ ）



混合粒径5（流量 $Q=186\text{m}^3/\text{s}$ ）

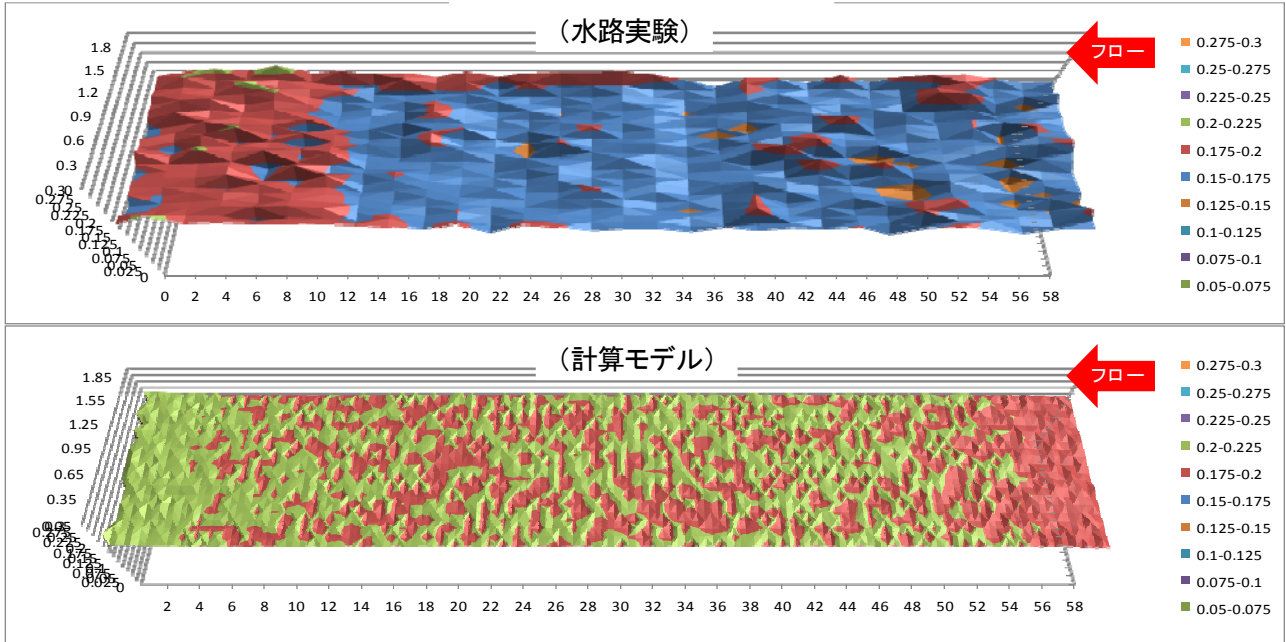


図 3.1 通水後の河床土砂堆積厚(単位:m) [初期河床堆積厚:0.2m]

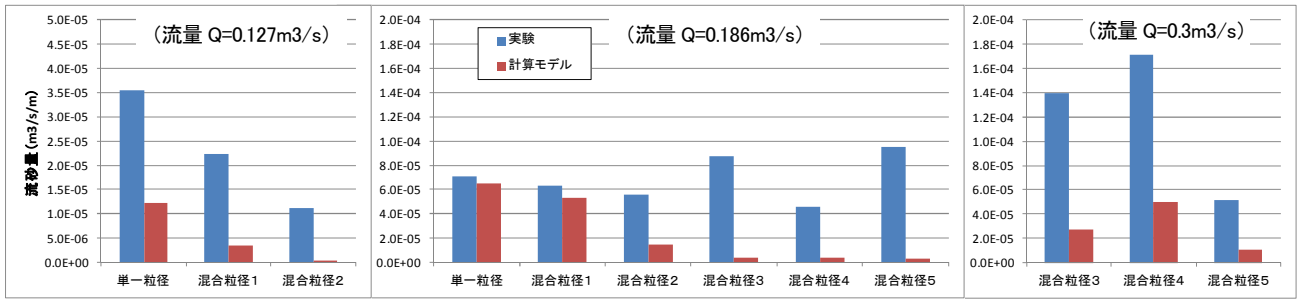


図 3.2 流砂量(全流砂量:下流端)

端水位等のパラメータを一部調整して計算を行った。

3.2 計算結果

3.2.1 河床形状

図 3.1 に実験及び計算での通水後の河床土砂堆積厚について代表的な結果を示す。単一材料のケースは、実験では水路の中央付近から下流端に非常に大きな深掘れが生じたが、計算では上流側から中央付近に深掘れが生じるものの、中央付近から下流端に向かって深掘れが小さくなっており、下流端はほぼ平坦な形状となった。河床材料の粒度分布が幅広になるにつれて、河床形状が変化しにくい傾向は、計算でも同様であったが、混合粒径 5 の計算結果で示すように、初期河床の形状とほとんど変わらない結果となった。実験では河床材料の粒度分布の幅が広い場合でも全体的に河床が低下していたが、混合粒径 5 の計算の場合では、河床低下もほとんど生じていない結果となった。以上の結果、既存の計算モデルでは河床形状の変化を十分に表せないことが明らかとなった。

3.2.2 掃流砂量と粒度分布

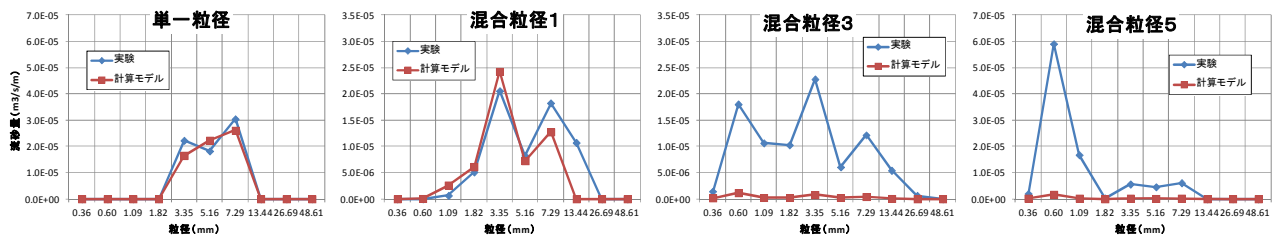
図 3.2 は、下流端の沈砂池で捕捉した流砂の単位時間当たりの掃流砂量について実験と計算結果を比較したものである。全体的に既存の計算モデルでは流砂量が過小であることが読み取れる。流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ で、河床材料が単一粒径、混合粒径 1 の場合は、計算での流砂量が実験値とかなり近い値であるが、流量が小さい ($Q=0.127\text{m}^3/\text{s}$) 場合や粒度分布が幅広の場合は、実験結果の 1/2 以下 (もっと小さく) の流砂量しか流れていない。このことは、前述の計算モデルの河床形状の変化が十分に表せていないことに対する最

も大きな要因とも考えられるところである。

次に、計算での流砂量が少ないことの要因分析のため、粒径別流砂量についても着目した。図 3.3 に粒径別流砂量について、実験と計算の代表的な結果を示す。全流砂量がほぼ一致していた流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ での単一粒径及び混合粒径 1 の場合は、粒径別に比較しても計算結果が実験とほぼ同じであった。しかしながら、他の全流砂量が過小なケースでは、粒径別に見ても各粒径の流砂量が小さく、混合粒径 3 や混合粒径 5 のケースでは、どの粒径も流砂量がほとんどゼロであった。また、混合粒径 1 の粒径別流砂量を詳細に比較すると、粒径 13.44mm の材料は、実験ではある程度流れていたが、計算ではほとんどゼロとなっており、計算では比較的に粒径が大きなものが流れにくいことも明らかとなった。以上の結果から、流砂量について、既存の計算モデルでは、単一粒径や混合粒径 1 のように粒度分布幅の狭いものは流量がある一定以上あれば、粒度分布も含めて実験を概ね再現できるが、流量が小さい場合や粒度分布幅が広い場合は、流砂量がかなり過小になることが明らかとなった。

3.2.3 流砂量の分析

新たな河床変動モデルの開発にとって、まずは流砂量の再現性を改善することが必要不可欠であり、既存の計算モデルで流砂量が過小になる要因の分析を行った。本計算モデルの粒径別の掃流砂量は、前述の式 (3.1) に示すように河床材料の粒度分布から求められる粒径別の限界摩擦速度 (u_{*ck}) と水理量から求められる摩擦速度 (u_*) の比により算定しており、特にこの比が 1 以上の場合 ($u_{*ck} \geq u_*$: 限界摩擦速度が摩擦速度以上)

図 3.3 粒径別流砂量(流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$)

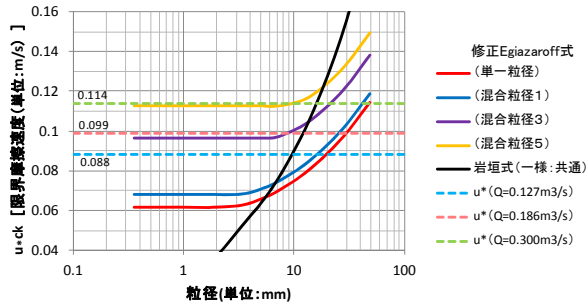


図 3.4 粒径別限界摩擦速度

は、その粒径の流砂量はゼロとなる。限界摩擦速度は式(3.8)の修正 Egiazaroff 式により求めており、図 3.4 に実験に使用した河床材料の粒径別限界摩擦速度 (u_{*ck}) を示す (黒色以外の実線)。合わせて実験流量での摩擦速度を示す (破線)。また、参考として式(3.9)から求められる一様粒径における限界摩擦速度も示す (黒色実線)。河床材料の粒度分布の幅が広い混合粒径 3、混合粒径 5 の限界摩擦速度 (u_{*ck}) の値は大きく、粒度分布幅の狭い単一粒径、混合粒径 1 の限界摩擦速度 (u_{*ck}) の値が小さいことが分かる。特に混合粒径 5 は、流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ の場合において、すべての粒径での限界摩擦速度 (u_{*ck}) が摩擦速度 (u_*) に比べて大きく、単純計算では掃流砂がゼロとなる。しかしながら、実験では掃流砂はゼロではなく、全流砂量は単一粒径の場合よりも多く流れている。計算上の各粒径の限界摩擦速度 (u_{*ck}) の算定にあたっては、まず河床材料の粒度分布から求まる平均粒径 (d_m) を算定し、この d_m から式(3.9)を用いて平均粒径の限界摩擦速度 (u_{*cm}) を求めている。この平均粒径の限界摩擦速度 (u_{*cm}) が大きくなると各粒径の限界摩擦速度 (u_{*ck}) も大きくなり、混合粒径 5 の場合は河床材料全体での平均粒径 (d_m) が約 20mm で、この平均粒径の限界摩擦速度 (u_{*cm}) は約 0.12m/s となり、各粒径の限界摩擦速度 (u_{*ck}) を大きくしている。したがって、計算モデルでの流砂量がかなり過小となる要因としては、適用している平均粒径 (d_m) の値が大きすぎると考えた。

ここで、河床材料の粒度分布と実験での流砂の粒度分布の比較を行った。図 3.5 は、前述の図 2.4 と同様

には、流量別に各ケースにおける河床材料 (通水前のみ) と流砂の粒度 (d_{50}, d_m 及び $d_{10} \sim d_{90}$ (図 2.4 の $d_{16} \sim d_{84}$ より幅広) の範囲を明示) について比較したものである (棒グラフの棒の長さが d_{50} (薄色)、 d_m (濃色) を示す)。図 3.5 は図 2.4 よりも幅広の範囲を示しているが、流砂の粒径範囲 (特に上限側の d_{90}) に着目すると、河床材料の粒度分布幅が広がっても、一定の粒径 (10mm~20mm 程度) 以下の材料が流下していることが分かる。また流量が大きくなると、流砂の粒径範囲が若干ではあるが大きな粒径側に広がる傾向も見受けられる。このことは、河床材料の粒度分布にほぼ関係なく、水理量に応じて、ある一定の粒径範囲の材料が流下することが示唆されるものである。そこで、実験の各流量での摩擦速度 (u_*) と式(3.9)の一様粒径における限界摩擦速度が同じとなる粒径 (移動限界粒径) を式(3.9)から逆算 (図 3.4 において各流量の摩擦速度 (破線) と黒色実線の交点) し図 3.5 に示した (赤色破線)。流量 $Q=0.127\text{m}^3/\text{s}$ の場合は流砂の粒径範囲が移動限界粒径を上回っているが、流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ 及び $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は何れの河床材料のケースでも流砂の粒径範囲は移動限界粒径以下に収まっている。したがって、今後の課題解決の方向性としては、粒径分布が幅広の河床材料の掃流砂を扱う場合は、水理量に応じて考慮する粒径の範囲の見直し (たとえば、移動限界粒径以下の材料のみを扱う等) を行うことが考えられる。

4. おわりに

本検討の水理実験によって、河床材料の粒度分布の幅が中規模河床形態の形状や流砂特性 (流砂量、流砂の粒度分布等) 等に大きな影響を与えることがわかった。また、既存の河床変動モデルによる水理実験の再現計算により、既存のモデルでは河床形状だけではなく流砂量等の再現も困難であるという課題並びに課題解決の方向性を明らかにした。

今後は、水理実験の継続及び河床変動モデルの開発

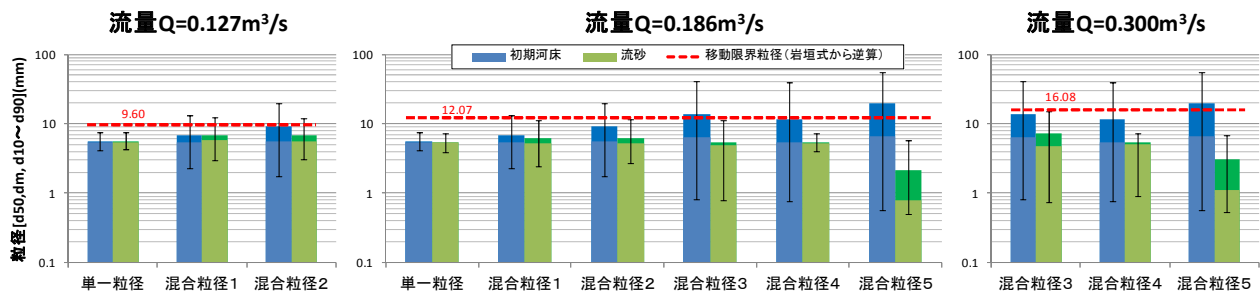


図 3.5 河床材料の粒度分布範囲と流砂の粒度分布範囲

と合わせて、現地河川での河床材料調査、河床形状変化等の観測データや他の類似実験等の計測データ等による検証を行いながら検討を進め、粒径集団の役割をより明確にするとともに、河床変動モデルの開発並びに土砂供給・置き土計画立案技術の提案につなげていく予定である。

謝辞

本課題の実施にあたって、実験水路は国土交通省国土技術政策総合研究所の所有する河川水理実験施設に設置させていただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 長田健吾ほか：石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた安部川網状流路の数値解析、水工学論文集、第 54 巻、2010.2.
- 2) 藤田光一ほか：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的検討、水工学論文集、第 52 巻、2007.2.
- 3) 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.
- 4) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第 41 号，pp.1-21, 1956.

STUDY ON SEDIMENT MOVEMENT MECHANISM THAT PAID ITS ATTENTION THE PERTICLE SIZE CONSTITUTION OF RIVER BED MATERIALS

Budged : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Hydraulic Engineering
Research Group (River
and Dam Hydraulic
Engineering)

Author : HAKOISHI Noriaki
ISHIGAMI Takayuki
SAKANO Akira
SAKURAI Toshiyuki

Abstract : By the bed degradation of a river crossing structure and gravel extraction etc. problems, such as the fall of the stability of river structure things, such as degradation of river environment, such as development of thick growth of trees and naked rock, and ground sill , a bridge pier, and reduction of sands, are actualizing. For this reason, the necessity for the sediment management which carried out river system consistency is fully recognized, and it is asked for the concrete measure which realizes it. This study aims at followings for the river of mountainous district and the gravel bed river with a broad particle-diameter group. (1) Clarify the role which each particle-diameter group about the river characteristics, river bed change, and river bed configurations has. (2) Propose the method of determining the quantity and the quality which are needed for down-stream from the viewpoint of comprehensive sediment management, about discharged sand from dam or method of sediment supply. In FY2012, the hydraulics model experiment examined the influence of the river bed material particle size distribution to the space distribution of the scale of scouring, sediment discharge, etc., such as gravel bars with deep relation of riffles and pools. If with this, if the particle size distributions of river bed materials were different even if central particle size was the same, sediment discharge and scale of riffles and pools were clear difference. In addition, the problems of river bed movable model were clarified by simulation of hydraulic experiment.

Key words: river bed materials, particle size distribution, hydraulics model experiment, river bed movable model