

河床材料の空隙率および交換層厚変化を考慮した河床変動モデルの開発

DEVELOPMENT OF RIVER BED VARIATION MODEL CONSIDERING POROSITY AND EXCHANGE LAYER VARIATION OF BED MATERIALS

石神孝之¹・坂野章²・中西哲³・箱石憲昭⁴

Takayuki ISHIGAMI, Akira SAKANO, Satoru NAKANISHI and Noriaki HAKOISHI

¹正会員 土木研究所 水工研究グループ 水理チーム 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 土木研究所 水工研究グループ水理チーム 総括主任研究員 (同上)

³正会員 土木研究所 水環境研究グループ河川生態チーム 研究員 (同上)

⁴正会員 ダム技術センター 首席研究員 (〒110-0008 台東区池之端2-9-7)

Recently, to solve the sediment problems in dam reservoir and to carry out comprehensive sediment management, many sediment supply measures have been examined (sediment discharge, placed sediment method at the lower reach of a dam, etc.). In these circumstances, it is required to develop the decision method of the quantity and quality of sediment supply for suitable lower reach condition. Therefore, we paid attention to the river comprised of the wide grain size distribution river bed materials. In this paper, we conducted the large scale hydraulic experiments and developed the river bed variation model based on the knowledge of the hydraulic experiments. We also improved the model considering porosity and exchange layer variation of bed materials. As a result, we confirmed the role of each grain size in river bed variation and river bed configurations by the hydraulic experiments. Furthermore we confirmed the high reproducibility of the river bed variation model.

Key Words : bed variation model, bed materials, grain size distribution, porosity, exchange layer

1. はじめに

近年, ダム貯水池の堆砂問題や総合土砂管理の視点からダムからの排砂, 置土等の土砂供給が多く実施されているが, どのような粒径の材料がどこまで流下するのかなどが十分に明らかとなっておらず, この土砂供給に対し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が求められている. このため, 筆者ら¹⁾はダム周辺の粒度分布幅の広い多様な河床材料で構成されている河川を対象として, 水理実験により河床変動および河床形態に関して個々の粒径集団が持つ役割を明確にするとともに, 粒径集団の役割を考慮する河床変動モデルを開発し, 水理実験の再現計算を行った結果, 流砂量については良好な再現性が得られた. しかしながら粗粒化を考慮できないなど河床高の河床変動等の再現性については良好な結果が得られなかった. このため本検討では, 河床材料の粒度分布変化と合わせた空隙率の変化および水理量の変化に合わせて交換層厚の変化も考慮した河床変動モデルを開発することを目的として実施したものである.

2. 水理実験

(1) 実験方法

水理実験は, 長さ60m, 幅2m, 勾配1/100の直線実験水路を使用し, 図-1に示すとおり中央粒径をほぼ同一とし粒度分布幅等を変化させた6種類の粒度分布を有する河床材料のケースでそれぞれ1回目に小流量で平坦河床の初期河床に通水し, 2回目に大流量で1回目の通水後の河床形状を初期河床として通水した. 通水中および通水後に水位・流速・流砂量・河床形状・流砂および表層河床材料の粒度分布・空隙率等を測定し, 河床材料の粒度分布等の違いによる河床変動特性の相違を検討した. 表-1に実験ケース一覧を示すとともに河床材料の特性値を示す.

河床材料の粒度分布変化については, 各ケースで4~5地点を選定し, (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)通水後河床の円柱形 (ϕ 19.5cm×厚さ約10cm) の試料を同一箇所採取するとともに, 水路下流端から流出した流砂

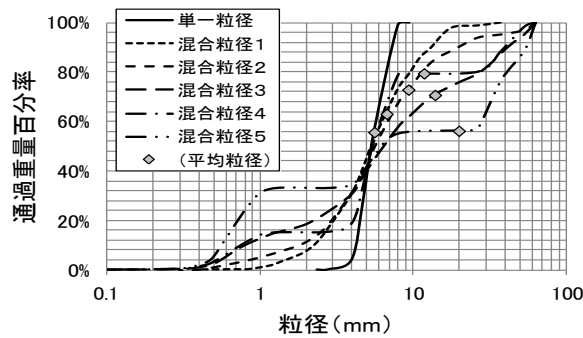


図-1 河床材料粒度分布

表-1 実験ケース一覧

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

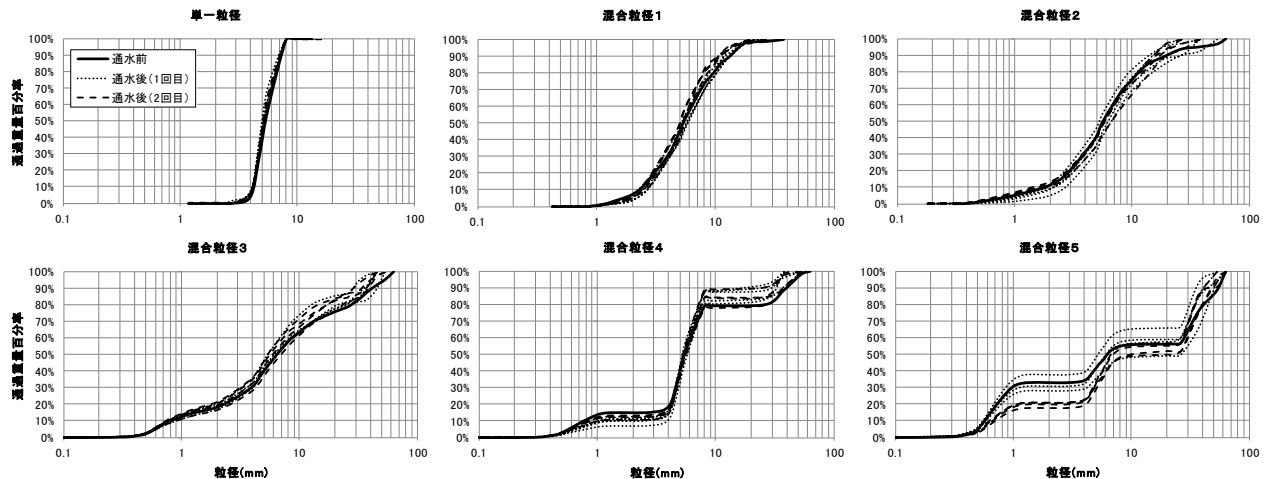


図-2 通水後の河床材料粒度分布

についてふるい分け試験を行った。なお、通水中の水路
上流端での河床材料の供給は行っていない。

また、通水後の河床材料の採取について、前述の(3)の
円柱形での採取では、内径 $\phi 19.5\text{cm}$ の円筒のサンプラー
(アクリル製)を使用し、採取厚さを計測して空隙を含
んだ体積を算定した。採取した材料のふるい分け試験に
よる粒度分布と合わせて採取した試料全体の重量を計測
し空隙率を算定した。

(2) 実験結果（河床材料の粒度分布と空隙率）

図-2は、各ケースの通水前後の河床材料の粒度分布に
ついて比較したものである。河床材料の採取は実験水路
の上流側を給砂部分と見なしていたことから下流側（下
流端から概ね10～20mの範囲）から各ケースで4～5地点
で採取したものである。単一粒径のケースでは粒度分布
の変化がほとんど無く、混合粒径1、2のケースでは採
取地点毎に粒度分布がやや異なる程度である。混合粒径
3のケースでは粒径1～10mm程度の材料が多くなってい
る。混合粒径4のケースでは粒径5mm程度（4～8mm）
の材料が多くなっている。一方、混合粒径5のケースで
は流量でやや異なる傾向が見られる。流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$
を通水した後は粒度分布がほとんど変わらない地点や、
粒径1mm以下の材料の割合がやや大きくなった地点があ
る。流量 $Q=0.300\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後は粒径1mm以下の
材料の割合が小さくなり相対的に粒径5mm程度以上の材
料の割合が大きくなっている。

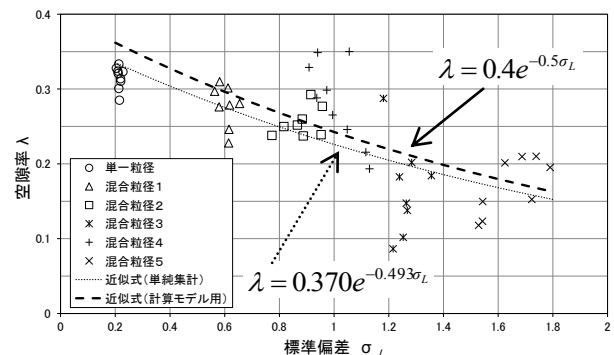


図-3 河床材料の標準偏差と空隙率

ここで、河床材料の粒度分布と空隙率について幾つか
の計測データが得られたため、粒度分布と空隙率の関
係について検討を行った。河床材料の粒度分布と空隙率
の関係については、藤田ら²⁾により検討された事例があり、
代表的な粒度分布型として対数正規分布があるもののタ
ルボット分布などの多様な分布型があり、異なる粒度分
布型の河床材料は異なる空隙率を有し、また、同じ粒度
分布型でもパラメータによっても空隙率が異なると考え
られるものである。しかしながら河床材料の粒度分布
データから空隙率を算定するにあたり、最適な分布型や
パラメータの特定等を行いつつ算定することが実用的に
はやや煩雑であると考えられる。Sulaimanら³⁾は対数正
規分布型の粒度分布を持つ混合砂礫の空隙率について、
対数正規分布の標準偏差 σ_L との関係を求めており、本検
討においても水理実験の結果から対数正規分布型での標

標準偏差 σ_L と空隙率 λ の関係について図-3のとおり整理した。図-2に示したように河床材料の粒度分布型としては対数正規分布型とはいえないケースのものがあるが、図-3に示すとおり全体的には標準偏差 σ_L の値が大きいほど空隙率 λ が小さくなっている傾向が見られる。一方、各ケースの地点毎の標準偏差 σ_L と空隙率 λ との関係を見ると、単一粒径のケースでは標準偏差 σ_L がほとんど変化していないが空隙率 λ が変化している。また、混合粒径2, 3, 5のケースでは標準偏差 σ_L が大きくなると空隙率 λ が大きくなる傾向も見られる。これは今回使用した河床材料は粒径50mm程度のものを含んでおり、採取時にサンプラーの先端部にぶつかった材料の移動等による体積変化、採取厚さの計測で表層に粒径の大きな材料の有無等の影響などが考えられ、空隙率 λ にはある程度の誤差が含まれていることも考えられるものである。また、空隙率 λ の変化を考慮する目的の一つとしては、河床材料が粗粒化する（粒度分布幅が小さくなる）場合に空隙率 λ が大きくなり、逆に粗粒化した状態に細粒分が流入する（粒度分布幅が大きくなる）場合は空隙率 λ が小さくなり、河床高が大きく変化しない状態を河床変動モデルに考慮させることである。したがって、本検討では、図-3に示すとおり全体的には標準偏差 σ_L の値が大きいほど空隙率 λ が小さくなっている傾向が見られることから、この全体的な傾向を近似する式を検討した。空隙率 λ については、単一粒径（一様砂）の場合は0.4を使用する場合が多く、この標準偏差 $\sigma_L=0$ の場合が最大値となり、粒度分布幅が広がる（標準偏差 σ_L の値が大きくなる）とともに空隙率 λ の値は小さくなるが0になることは無いと考えられることから指数関数での近似式を検討した。個々の計測した標準偏差 σ_L と空隙率 λ の値との相関は良くないところであるが、最小二乗法により求めた式を以下に示す。

$$\lambda = 0.370e^{-0.493\sigma_L} \quad (1)$$

ここに、 σ_L ：対数正規分布型での標準偏差を表す。

なお、計測データの誤差もある程度存在することから、以後の河床変動モデルに適用する際には、有効数字1桁として次式を使用した。

$$\lambda = 0.4e^{-0.5\sigma_L} \quad (1')$$

3. 河床変動モデル

(1) 平面2次元河床変動モデルの概要

河床変動モデルは、櫻井ら⁴⁾が開発した直交格子の平面2次元河床変動モデルを元に、筆者ら¹⁾が水理実験等の結果を考慮して流砂量式の見直し等の改良（以降、文献1)において改良した部分を「2014改良版」と表記する。）を行ったモデルを更に改良を行ったものである。

改良前のモデルにおいて流砂量算定に使用している基礎式の内、主なものを以下に示す。

掃流砂量の算定式には混合粒径の河床変動計算でよく

使用される芦田・道上の流砂量式⁵⁾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。

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

$$u_* \leq u_{*ck} : q_{Bk} = 0 \quad (2)$$

ここに、 u_{*e} ：有効摩擦速度(m/s)、 d_k ：k番目の代表粒径(m)、 P_{sek} ：粒径 d_k の材料の占める割合、 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_{*k} は次式で与えられる。

$$\tau_{*ek} = \frac{u_{*e}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_k} \quad (3)$$

$$\tau_{*k} = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_k} \quad (4)$$

ここに、 σ ：土粒子密度(kg/m³)、 ρ ：水の密度(kg/m³)、 g ：重力加速度(m/s²)を表す。

式(2)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_* はマニング則を用いて次式により求められる。

$$u_* = \sqrt{\frac{gn^2 u^2}{R^{1/3}}} \quad (5)$$

ここに、 n ：マニングの粗度係数(m^{-1/3}s)、 u ：流速(m/s)、 R ：径深(m)を表す。

u_{*e} は芦田・道上⁵⁾の提案した次式から求められる。

$$\frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{R}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right\} \quad (6)$$

ここに、 d_m ：交換層に存在する河床材料の平均粒径(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。

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_m} \quad (7)$$

u_{*ck} は次式により求められる。

$$u_{*ck} = \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_k \tau_{*ck}} \quad (8)$$

τ_{*ck} は無次元限界掃流力であり、混合砂礫床における粒径別の限界掃流力はEgiazaroffによって提案された式を芦田・道上⁶⁾が一部修正した修正Egiazaroff式を用いた。

$$\begin{aligned} d_k/d_m \geq 0.4 : \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} &= \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_k/d_m)} \right\}^2 \\ d_k/d_m < 0.4 : \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} &= 0.85 \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

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⁶⁾から求めた。

$$\left. \begin{aligned} 671.0 \leq R_* & ; \tau_{*cm} = 0.05 \\ 162.7 \leq R_* \leq 671.0 & ; \tau_{*cm} = 0.00849 R_*^{3/11} \\ 54.2 \leq R_* \leq 162.7 & ; \tau_{*cm} = 0.034 \\ 2.14 \leq R_* \leq 54.2 & ; \tau_{*cm} = 0.195 R_*^{-7/16} \\ R_* \leq 2.14 & ; \tau_{*cm} = 0.14 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{ここに、} R_* = \frac{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_m^3}}{v} \quad (11)$$

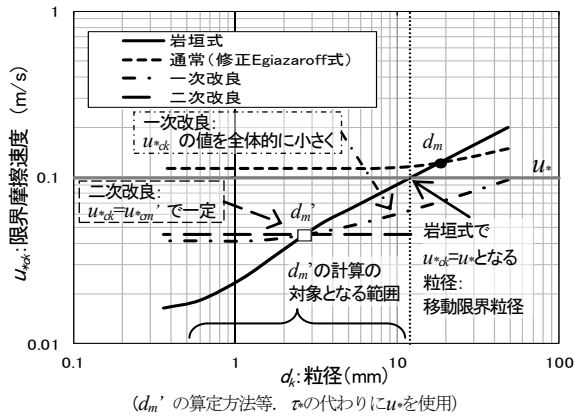


図-4 モデル改良イメージ (限界摩擦速度等の算定)

ν : 水の動粘性係数(m^2/s)である。

2014改良版のモデルについて、以下に示す。

水理実験の結果を踏まえ、河床材料の各粒径区分内の代表粒径 d_k に対する一様粒径の無次元限界掃流力 τ_{*cik} を式(10)の岩垣式により求める。ここで τ_{*cik} が無次元掃流力 τ_{*k} 以下となる粒径集団の平均粒径 d_m' を次式により与える。(図-4を参照)

$$d_m' = \frac{\sum p_{sek} d_k}{\sum p_{sek}} \quad (\tau_{*cik} \leq \tau_{*k} \text{となる粒径} d_k \text{を集計}) \quad (12)$$

一次改良として、この式(12)で算定された平均粒径 d_m' を通常平均粒径 d_m に変えて($d_m = d_m'$ として)式(2)～(11)に適用し、流砂量を算定するものとした。

さらに二次改良として、水理実験での流砂の観察において粒径集団が一体的に移動する状況を踏まえ、一次改良での式(12)で算定された d_m' の使用と合わせて、 d_m' の算定の際に対象となった各粒径 d_k の材料に対して、 $d_k = d_m'$ (一定値)、 $d_m = d_m'$ として式(2)～(11)に適用($u_{*ck} = u_{*cm}'$, $\tau_{*ck} = \tau_{*cm}'$ 等となる。図-4を参照。ただし、式(1)の P_{sek} については粒径 d_k の値を使用)して流砂量を算定するものとした。

本検討で新たに改良した部分について以下に示す。

前述の2014改良版の二次改良まで行ったモデルに対して、河床材料の交換層厚および空隙率の変化を考慮できるものとした。

交換層厚については、水理実験での流砂状況を考慮して流速、水深等の水理量の変化に合わせて層厚が変化し、その層厚も移動する河床材料の粒径の最大値とすることが妥当と考え、図-4に示すように式(7)および式(10)を使用し、 $\tau_{*cik} = \tau_{*k}$ となる粒径(d_c : 移動限界粒径)を求め、

この粒径の大きさを交換層厚と設定した。移動限界粒径 d_c の算定式を次式に示す。

$$d_c = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)g\tau_{*c}} \quad (13)$$

ここに、 τ_{*c} : 式(10)の岩垣式から求められる粒径 d_c の無次元限界掃流力である。

空隙率 λ が変化することを考慮すると流砂の連続式は次式ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1-\lambda)y_b\} + \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bz}}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

ここに、 (x, y, z) : 空間座標(x : 流下方向, y : 鉛直上向き方向, z : 横断方向), y_b : 河床の y 座標, t : 時間, (q_{Bx}, q_{Bz}) : x 方向, z 方向の単位幅当たり掃流砂量(m^2/s)を表す。

交換層内における粒径別土砂収支式を考えると次式のようにになる。

$$q_{syk} = p_{sek}(1-\lambda)y_s - \left(\frac{\partial q_{Bxk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Bzk}}{\partial z} \right) \Delta t \quad (15)$$

ここに、 q_{syk} : Δt 後の河床単位面積当たりの交換層内粒径別土砂量(m), p_{sek} : 交換層内の粒径別割合, y_s : 交換層厚(m), (q_{Bxk}, q_{Bzk}) : x 方向, z 方向の粒径別単位幅掃流砂量(m^2/s)を表す。

この式(15)で求められる Δt 後の交換層内粒径別土砂量 q_{syk} により Δt 後の交換層内の粒径別割合 p_{sek} が求められ、さらに空隙率 λ も、前述の式(1')により求められる。

本モデルでの計算について、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)で実験水路の状態を再現し、流入流量、通水時間は実験とほぼ同じとし、粗度係数は水位等から逆算した全実験ケースの平均値($0.023\text{m}^{-1/3}\text{s}$)を使用するなど、各ケースの計算条件がほぼ同一となるように一部パラメータを調整した。

(2) 計算結果

a) 流砂量

水理実験での結果と2014改良版(二次改良)による計算および今回改良した手法による計算の2種類の計算結果との比較により検証を行った。図-5に下流端から流下した全流砂量の実験値と両計算手法による計算値との比較を示す。また、図-6に粒径別流砂量について、幾つかのケースにおける流砂量の比較を示す。(図中では2014改良版の結果を「計算(2014)」, 今回改良した手法の結果を「計算(2015)」と示す。)

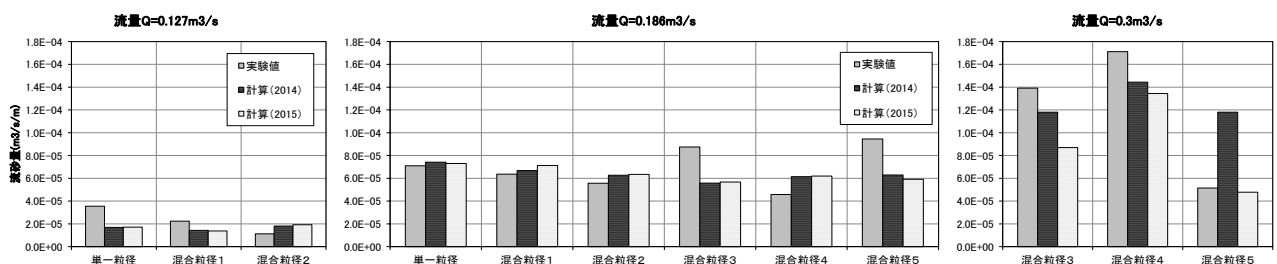


図-5 流砂量(下流端)の実験値と計算値との比較

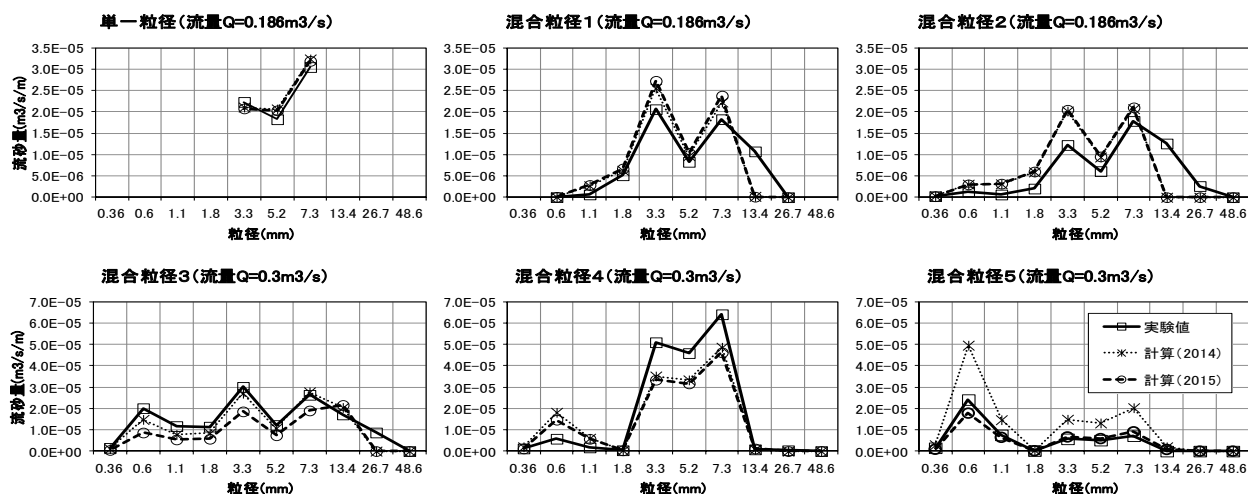


図-6 粒径別流砂量（下流端）の実験値と計算値との比較

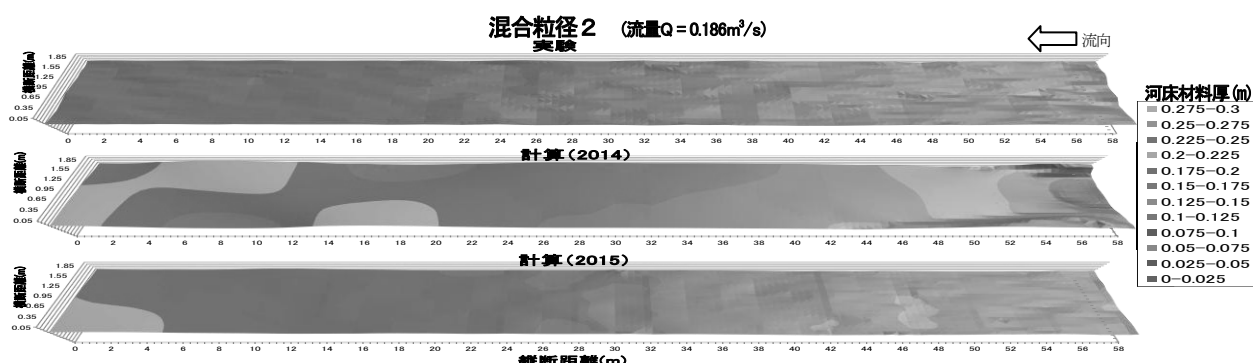


図-7 通水後の河床形状（河床材料厚）

全流砂量については、図-5に示すように、全体的に2014改良版の計算モデルにおいてかなり実験値に近くになっており、かなり改善されたと考えられるところである。今回改良した手法での結果も2014改良版の結果とほぼ近い値となっているが、多くのケースでは、やや流砂量が多くなっている。一方、混合粒径5のケースや混合粒径3、4の流量が多い($Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$)場合は流砂量が小さくなっている。特に混合粒径5の流量 $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、2014改良版の結果は実験結果に比べてかなり過大な流砂量であったが、今回の改良版ではほぼ実験結果と同程度の流砂量となっている。

次に、粒径別流砂量については、図-6に示すように、全体的に2014改良版の計算モデルにおいてかなり実験値に近くになっており、かなり改善されたと考えられるところである。今回改良した手法での結果も2014改良版の結果とほぼ近い値となっている。全流砂量と同様に混合粒径3の流量 $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、2014改良版の結果は実験結果にかなり近い値であったが、今回の改良版では逆に流砂量が少なくなっており実験結果ともやや乖離する結果となった。一方、混合粒径5の流量 $Q=0.3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、2014改良版の結果は実験結果に比べてかなり過大な流砂量であったが、今回の改良版ではほぼ実験結果と同程度の流砂量となっている。

b) 河床形状

図-7に通水後の河床土砂堆積厚について実験及び計算

での混合粒径2の結果を示す。図-8に通水前後の平均河床高および最深河床高の変化量について実験及び計算での単一粒径、混合粒径2および混合粒径3の結果を示す。

混合粒径2のケースでは、図-7および図-8に示すように、2014改良版では上流端付近の河床低下が大きく、下流側は河床がやや高くなるなど実験結果とかなり乖離している結果となった。一方、今回改良の手法では上流端付近の河床低下があまり小さくなく、また、下流側の河床高も実験結果に近いものとなり、河床形状の空間的な変化についてかなり改善が図られ、高い再現性が得られたと考えられる。2014改良版での課題として河床変動の再現性が良くなかった部分として以下の点を考えていた。実験では上流端で土砂供給を行っておらず上流側の細かい粒径の河床材料が下流に流下した際に、大粒径の河床材料が残っていることにより、あまり河床低下が進まないと考えられる。すなわち、河床の粗粒化において河床が大きく低下しないことは、空隙率が大きくなることで説明ができると考えた。一方、計算モデルでは空隙率を一定としていたため、細かい材料が下流に流下した分だけ体積が減少して河床低下が進むことなどによるものと考えていた。この点については、今回改良の手法で河床材料の粒度分布変化に合わせて空隙率の変化を考慮することにより、かなり改善されたと考えられる。

他のケースについては、図-8に示すように、単一粒径のケースでは、2014改良版でも平均河床高の変化はかな

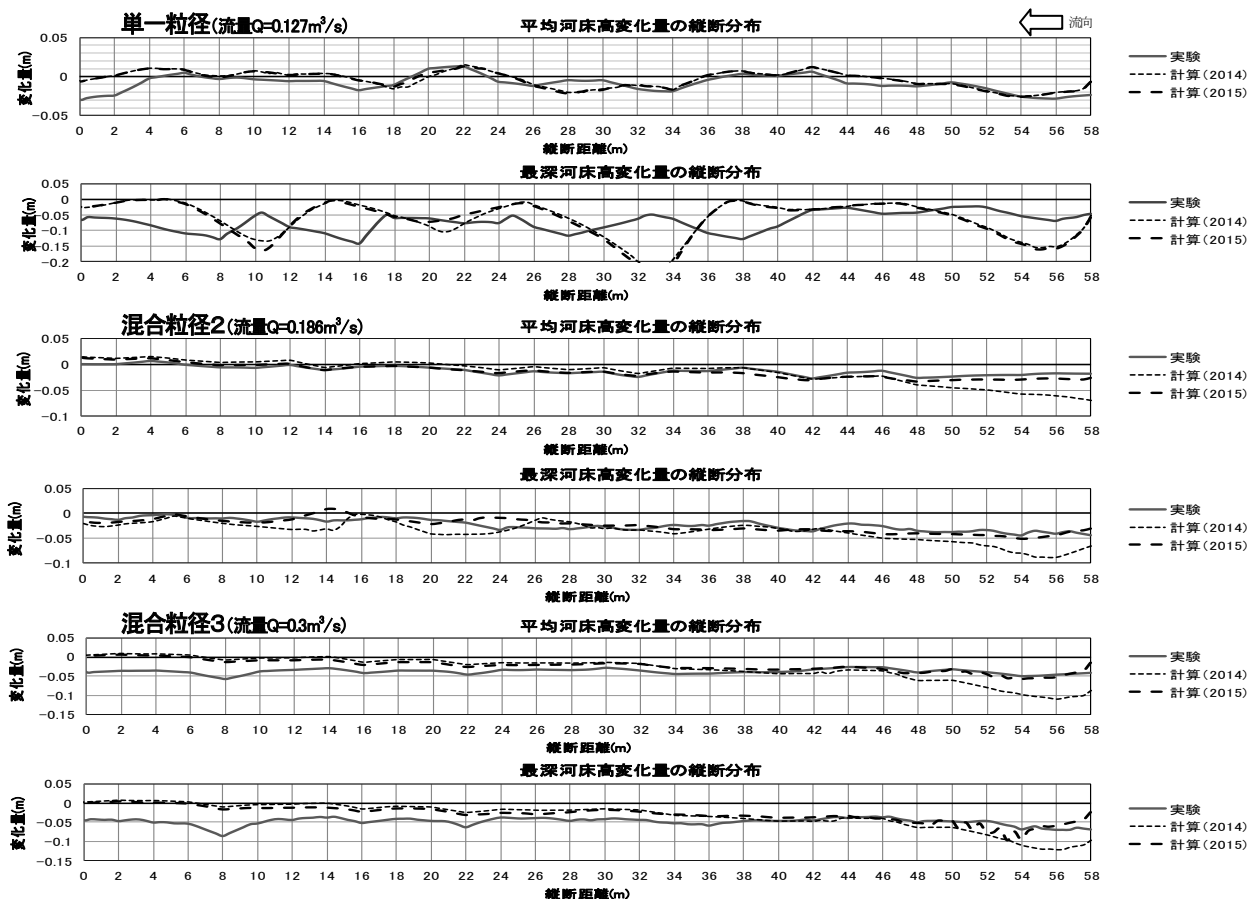


図-8 通水前後の河床高変化量（通水前の各横断面での平均河床高を基準）

り実験に近い結果となっており、今回改良の手法でも2014改良版と同様の結果となっている。一方、混合粒径3の粒度分布幅が広いケースでは、混合粒径2のケースと同様に2014改良版では特に上流側の河床低下が大きく、今回改良の手法では実験結果に近いものとなった。しかしながら下流側の河床高変化は2014改良版の結果に比べて今回改良の手法では平均河床高がわずかに小さくなった程度で2014改良版と同程度の変化量となっており大きな改善とはならなかった。

以上のように、河床形状については若干再現性の悪いケースもあるが、概ね良好な結果が得られたと考えられる。

4. おわりに

水理実験により、河床材料の粒度分布幅が広がると空隙率が小さくなり粒度分布幅が狭くなると空隙率が大きくなることを確認し、河床材料の粒度分布幅を示す指標としての対数正規分布型での標準偏差を用いて空隙率変化を推定する簡易式を導いた。

河床変動モデルについては、前述の空隙率変化の簡易式を導入するとともに、移動限界粒径の大きさを河床材料の移動する交換層厚にも適用する手法を導入した河床変動モデルを開発し、水理実験の再現計算を行った結果、流砂量および流砂の粒度分布については概ね実験結果と

合致するとともに、上流側の河床低下についても実験結果と同程度になるなど再現性を改善することができた。

謝辞：本研究の実施にあたって、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) 石神孝之ほか：河床材料の粒度分布幅の広い河川における河床変動特性の実験的検討および河床変動モデルの開発，河川技術論文集，第20巻，pp.265-270，2014
- 2) 藤田正治ほか：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集，第14巻，pp.13-18，2008
- 3) Muhakmmad Sulaiman, Daizo Tsutsumi and Masaharu Fujita : Porosity of sediment mixtures with different type of grain size distribution, AJHE, JSCE, Vol.51, 23, 2007
- 4) T. Sakurai & N. Hakoishi : Numerical simulation of sediment supply from dam reservoirs to downstream by the placed sediment, Advances in River Sediment Research- Fukuoka et al. (eds), pp.1193-1199, 2013
- 5) 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.
- 6) 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.

(2015. 4. 3受付)