

# 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

EXPERIMENTAL EXAMINATION OF RIVER BED VARIATION  
CHARACTERISTICS AND DEVELOPMENT OF RIVER BED VARIATION  
MODEL WITH WIDE IN GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF BED MATERIALS

石神孝之<sup>1</sup>・箱石憲昭<sup>2</sup>・坂野章<sup>3</sup>・宮川仁<sup>4</sup>・櫻井寿之<sup>5</sup>  
Takayuki ISHIGAMIE, Noriaki HAKOISHI, Akira SAKANO, Masashi MIYAKAWA and  
Toshiyuki SAKURAI

- <sup>1</sup>正会員 (独) 土木研究所 水工研究グループ 特命事項担当上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)  
<sup>2</sup>正会員 (独) 土木研究所 水工研究グループ水理チーム 上席研究員 (同上)  
<sup>3</sup>正会員 (独) 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)  
<sup>4</sup>正会員 (独) 土木研究所 水工研究グループ水理チーム 主任研究員 (同上)  
<sup>5</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官  
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

Recently, to solve the sediment problems in reservoir of a dam 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 in grain size distribution of 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. 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 :** river bed materials, grain size distribution, hydraulics model experiment,  
river bed variation model

## 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きているが、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、本検討では、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、河床材料は図-1に示す6種類の粒度分布のケースでそれぞれ1回目に小さな流量で初期河床としてほぼ平坦な河床形状で通水し、2回目に大きな流量で1回目の通水後の河床形状を初期河床として通水し、通水中および通水後に水位・流速・流砂量・河床形状・流砂の粒度分布等を測定し、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、(1)通水中の流砂

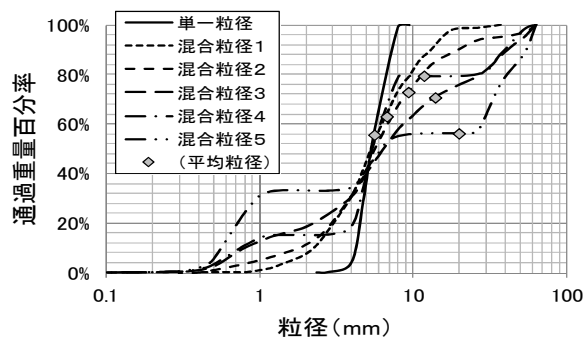


図-1 河床材料粒度分布

表-1 実験ケース一覧

	河床材料			流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	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

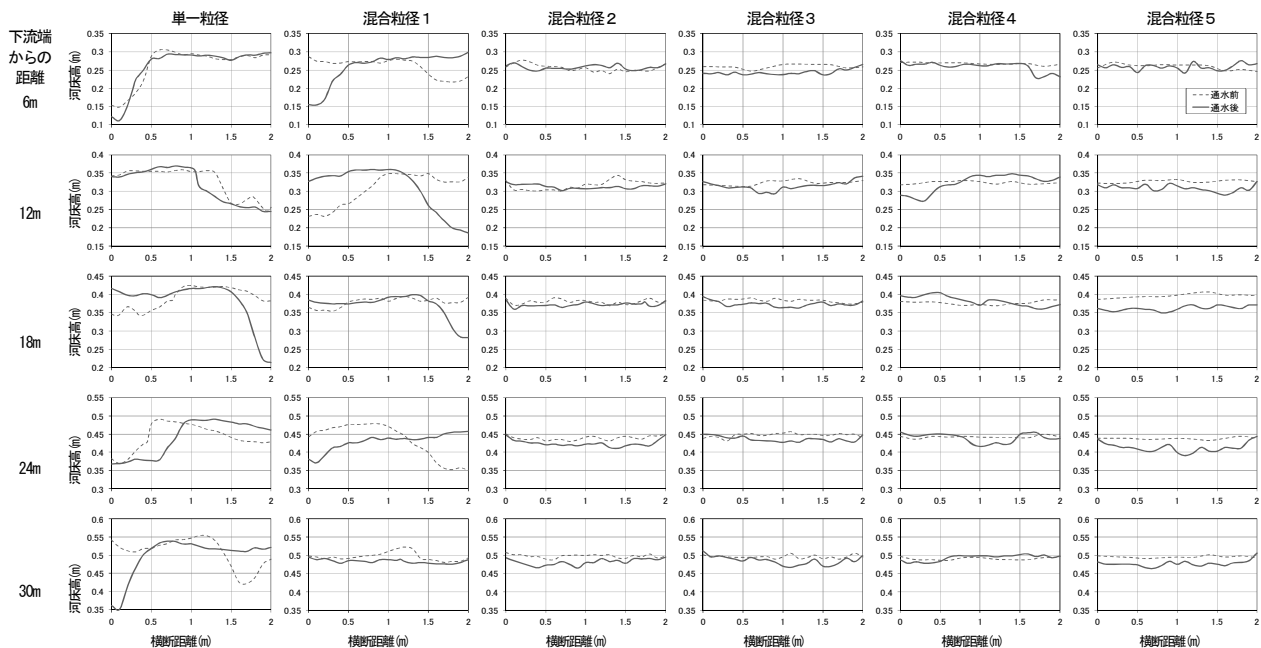


図-2 通水後の河床形状 (河床高)

[流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ の通水後]

(2)通水後の河床表面の試料 (幅 $10\text{cm} \times$ 長さ $15\text{cm} \times$ 厚さ約 $2\text{cm}$ ) (3)通水後河床の円形  $\phi 19.5\text{cm} \times$ 厚さ約 $10\text{cm}$ の試料の各々を同一箇所て採取するとともに、水路下流端から流出し沈砂池で捕捉した流砂につい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) 実験結果

### a) 河床形状

図-2は、各ケースの通水前後の河床横断形状について比較したものである。水路下流側 (6m~30m) の区間を示しており、それぞれ流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ を通水した後の状況である。単一粒径と混合粒径1のケースでは礫州が形成され、特に単一粒径のケースでは深掘れが顕著であった。一方、粒度分布幅の広い混合粒径2~混合粒径5のケースでは、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。したがって、河床材料の粒度分布が幅広な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。

### b) 掃流砂量と粒度分布

図-3は、下流端の沈砂池で捕捉した流砂の単位時間当

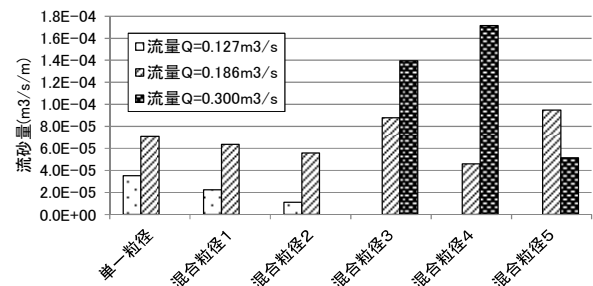


図-3 全流砂量 (沈砂池)

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。これによると、中央粒径 ( $d_{50}$ ) がほぼ同じであっても河床材料の粒度分布が幅広いものほど流砂量が少なくなる傾向が見られる。これは粒度分布幅を広くするために粒径の小さな材料の割合を多くするとともに粒径の大きな材料の割合も多くした結果、粒度分布幅の広いものほど平均粒径が大きくなっている影響も考えられる。なお、流量 $Q=0.186\text{m}^3/\text{s}$ の場合で混合粒径3、5のケースの流砂量が単一粒径~混合粒径2のケースよりもおおきくなっているが、これは単一粒径~混合粒径2のケースは流量 $Q=0.127\text{m}^3/\text{s}$ の通水後の状況を初期河床としたもので流砂量がやや少なくなっていると考えられる。

図-4は、流量別に各ケースにおける河床材料 (通水

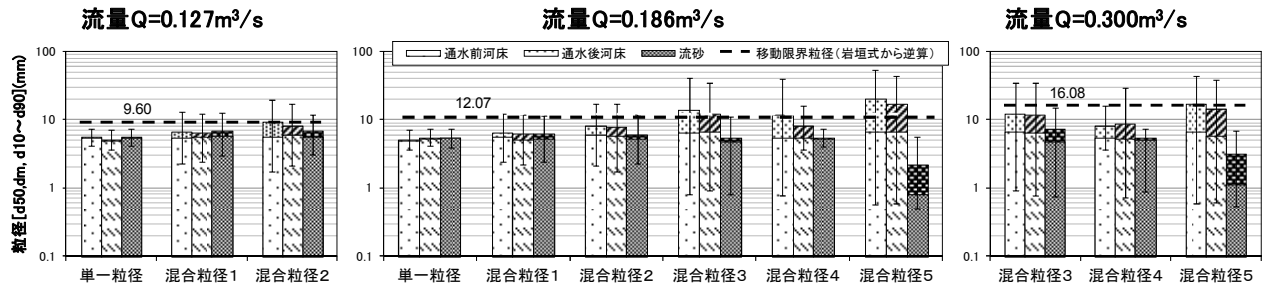


図-4 河床材料と流砂の粒度分布幅の比較

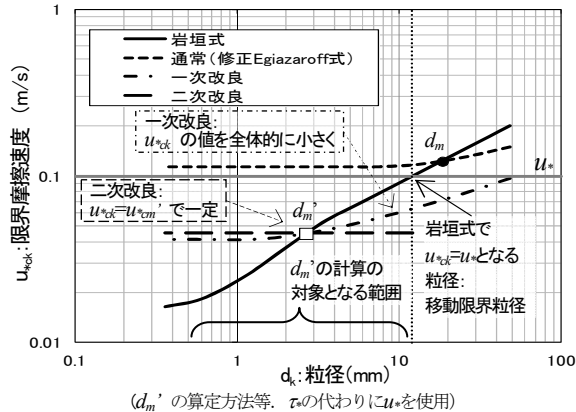


図-5 モデル改良イメージ

前・後)と流砂の粒度( $d_{50}$ ,  $d_m$ 及び $d_{10} \sim d_{90}$ )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 $d_{50}$ (薄いパターン),  $d_m$ (濃いパターン)を示す, 縦方向バーが $d_{10} \sim d_{90}$ の範囲)。通水後の河床材料の粒度分布は下流端から約10m付近における複数地点の表層の粒度分布であるが, 上流側からの流砂の影響もあり通水前の河床材料の粒度分布と大きな変化は無かった。

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の粒度分布が幅広なケースでは, 河床材料に比べて流砂の粒度分布幅は狭かつ平均粒径も細くなっており, 特に混合粒径5については, 平均粒径が非常に細くなっている。

次に流砂の粒径範囲(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, 実験の各流量における粒径別の無次元掃流力について, 岩垣による一様粒径の無次元限界掃流力の実験式から逆算で求める粒径(移動限界粒径: 後述する式(9)から逆算)を図-4に示した(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。

以上の結果を整理すると, 河床材料の粒度分布が幅広

なほど流砂量が少なくなる傾向が明らかとなった。また, 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。さらに, 流砂の最大粒径については, 岩垣による無次元限界掃流力の一様粒径の実験式の逆算から求められる移動限界粒径程度であることが明らかとなった。

### 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<sup>1)</sup>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を行った。

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<sup>2)</sup>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。

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

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

ここに,  $u_{*e}$ :有効摩擦速度(m/s),  $d_k$ :k番目の代表粒径(m),  $P_{sek}$ :粒径 $d_k$ の材料の占める割合,  $\tau_{*ek}$ :無次元有効掃流力,  $\tau_{*ck}$ :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),  $\tau_{*k}$ :無次元掃流力を表す。

$\tau_{*ek}$ ,  $\tau_{*ck}$ ,  $\tau_{*k}$ は次式で与えられる。

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

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

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

ここに,  $\sigma$ :土粒子密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )を表す。

式(1)を計算するためには $u_{*e}$ ,  $u_{*ck}$ および $u_{*k}$ を求める必要がある。

$u_*$ は次式により求められる。

$$u_* = \sqrt{gRI_e} \quad (5)$$

ここに,  $R$ :径深,  $I_e$ :エネルギー勾配を表す。

$u_{*ck}$ は芦田・道上<sup>2)</sup>の提案した次式から求められる。

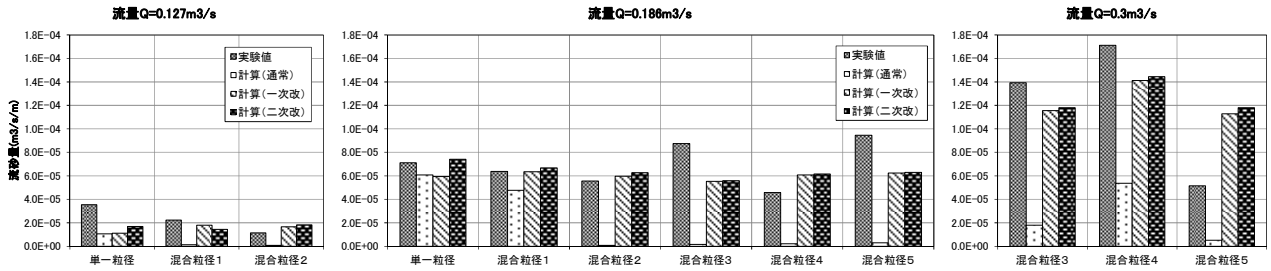


図-6 流砂量（沈砂池）の実験値と計算値との比較

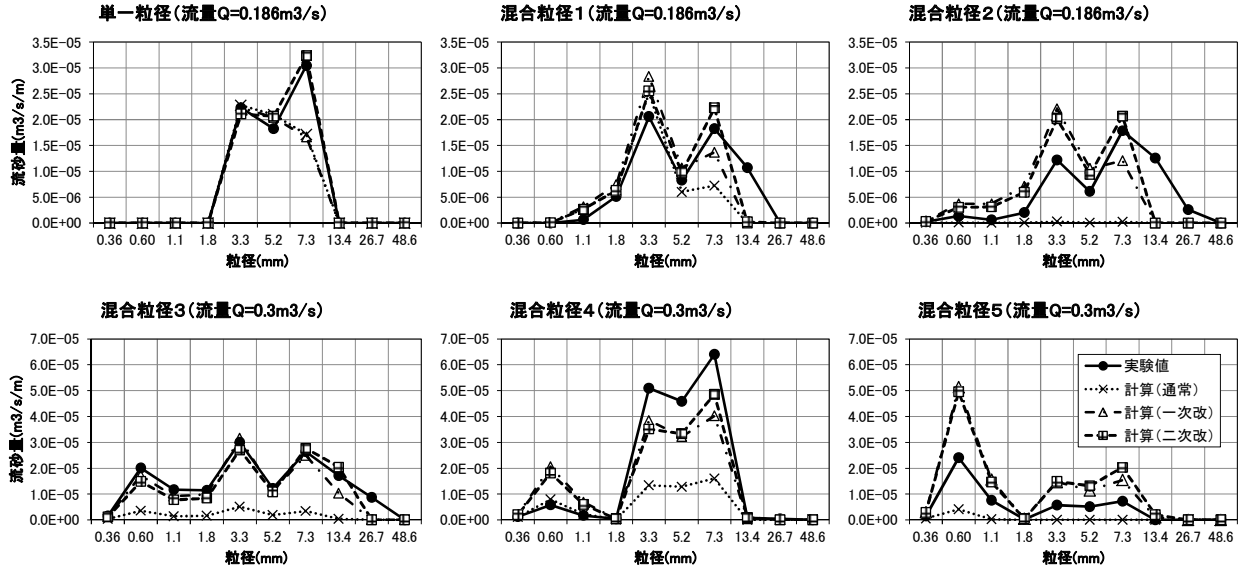


図-7 粒径別流砂量（沈砂池）の実験値と計算値との比較

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

ここに、 $d_m$ ：交換層の平均粒径(m)， $\tau_{*m}$ ：平均粒径に関する無次元掃流力を表す。 $\tau_{*m}$ 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<sup>2)</sup>が一部修正した修正Egiazaroff式を用いた。

$$\begin{aligned} d_k/d_m \geq 0.4 : \quad \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} &= \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_k/d_m)} \right\}^2 \\ d_k/d_m < 0.4 : \quad \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} &= 0.85 \left( \frac{d_m}{d_k} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $\tau_{*cm}$ ：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<sup>3)</sup>から求めた。

$$\left. \begin{aligned} 671.0 \leq R_* & ; \tau_{*cm} = 0.05 \\ 162.7 \leq R_* \leq 671.0 & ; \tau_{*cm} = 0.00849 R_*^{3/11} \\ 54.2 \leq R_* \leq 162.7 & ; \tau_{*cm} = 0.034 \\ 2.14 \leq R_* \leq 54.2 & ; \tau_{*cm} = 0.195 R_*^{-7/16} \\ R_* \leq 2.14 & ; \tau_{*cm} = 0.14 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{ここに、} R_* = \frac{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_m^3}}{v} \quad (10)$$

である。

改良後のモデルについて、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 $\tau_{*ck}$ を式(9)の岩垣式により求める。ここで $\tau_{*ck}$ が無次元掃流力 $\tau_{*k}$ 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-5を参照)

$$d_m' = \frac{\sum p_{sek} d_k}{\sum p_{sek}} \quad (\tau_{*ck} \leq \tau_{*k} \text{となる粒径} d_k \text{を集計}) \quad (11)$$

一次改良として、この式(11)で算定された平均粒径 $d_m'$ を通常の平均粒径 $d_m$ に変えて( $d_m = d_m'$ として)式(1)～(10)に適用し、流砂量を算定するものとした。なお、無次元掃流力 $\tau_{*k}$ が大きくなり、最大粒径の無次元限界掃流力 $\tau_{*ck}$ を上回る場合、すなわち、全粒径が移動する場合は、 $d_m' = d_m$ となり、通常の混合粒径の計算式と同じ結果となるものである。

しかしながら一次改良のみでは、全流砂量の再現性は良くなったが、粒径別流砂量については再現性が良くなかった。ここで二次改良として、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(11)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(1)～(10)に適用

( $u_{*ck} = u_{*cm}'$ 、 $\tau_{*ck} = \tau_{*cm}'$ 等となる。図-5を参照。ただし、

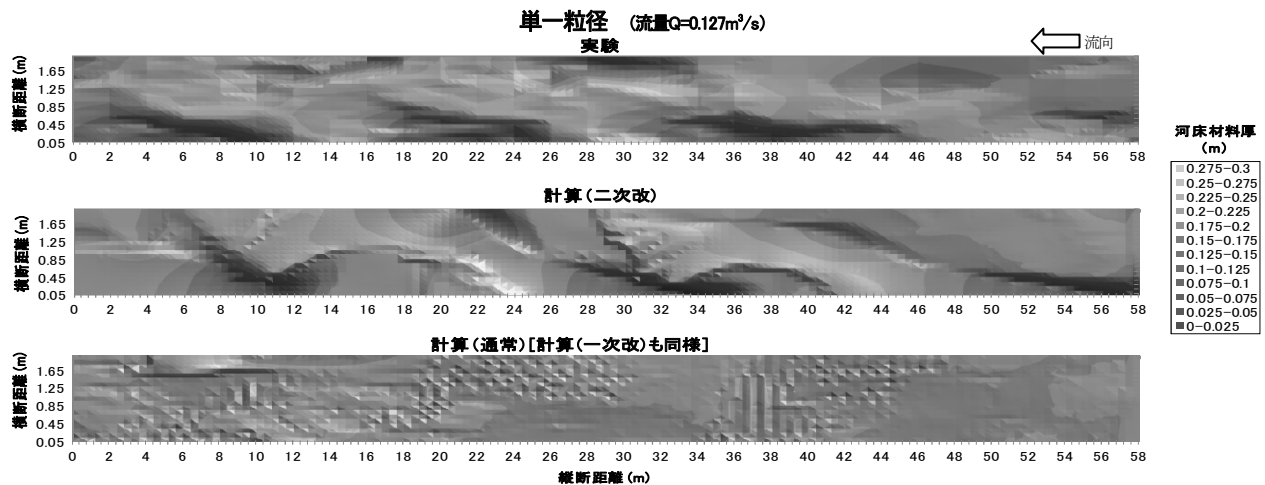


図-8 通水後の河床形状 (河床材料厚)

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。なお、無次元掃流力 $\tau_{*k}$ が大きくなり、最大粒径の無次元限界掃流力 $\tau_{*kik}$ を上回る場合、すなわち、全粒径が移動する場合は、 $d_k=d_m=d_m$ となり、従前の一様粒径の計算式と同じ結果となるものである。

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、下流端水位等のパラメータを一部調整して計算を行った。

## (2) 計算結果

### a) 流砂量

通常の方法による計算、一次改良した手法による計算および二次改良した手法による計算の3種類の計算結果と実験との比較により検証を行った。図-6に沈砂池に流下した全流砂量の実験値と各計算手法による計算値との比較を示す。また、図-7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-6に示すように、全体的に通常の計算モデルでは流砂量が過小であることが容易に読み取れる。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。一方、改良した手法での流砂量の計算値は、通常の計算手法より多くなり、実験値に近くなっている。さらに図-7に示すように、粒径別流砂量について、通常の計算手法によるものは、特に粒径の大きなものの流砂量が実験値とかなり離れていることがわかる。今回の改良した手法によるものも、一次改良の場合は、通常よりは実験値に近くなっているが、粒径が大きなものについては、やや少なくなっている。二次改良の手法の場合は、粒径が大きなものについてもかなり実験値に近くになっており、通常的手法に比べて、かなり改善されたと

考えられる。

### b) 河床形状

図-8に通水後の河床土砂堆積厚について実験及び計算での代表的な結果を示す。図-9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代表的な結果を示す。単一粒径のケースでは、図-8に示すように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ており、通常の計算では深掘れがほとんど生じていないが、二次改良の手法による計算では、深掘れが、かなり良好に再現できた。これは、河床材料の計算上の粒径区分として7.3mm(単一粒径のケースでは最大の粒径区分)の材料が3割以上を占めており、通常計算および一次改良では7.3mmの粒径区分の材料がほとんど移動しなかったが、二次改良では他の小さい粒径区分と同様に多く移動したものによるものと考えられる。

河床材料の粒度分布幅がやや広い混合粒径1のケースでは、平均的な河床高の変化については、通常の計算よりも二次改良の計算の方が良好に再現できたが、図-9に示すように実験では下流側に生じている深掘れ部分が再現できていなかった。

河床材料の粒度分布幅がさらに広い混合粒径3のケースにおいては、実験では上流から下流が全体的に河床低下を生じたのに対して、通常計算では河床低下がほとんど生じておらず、二次改良の場合では上流側が実験よりも大きく河床低下し、下流側はほとんど河床低下が生じなかった。最深河床高を見ると、今回の二次改良の計算結果よりも通常計算の結果の方が実験値に近いものとなった。この河床変動の再現性が良くない要因としては、上流端で土砂供給を行っていないため、上流側の細かい粒径の河床材料が下流に流下した際に、実際の現象としては大粒径の河床材料が残ることにより、あまり河床低下が進まないが、今回の計算においては空隙率を一定としており、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られる。この点については、今後、空隙率等を考慮することなどにより改良を検討しているところである。

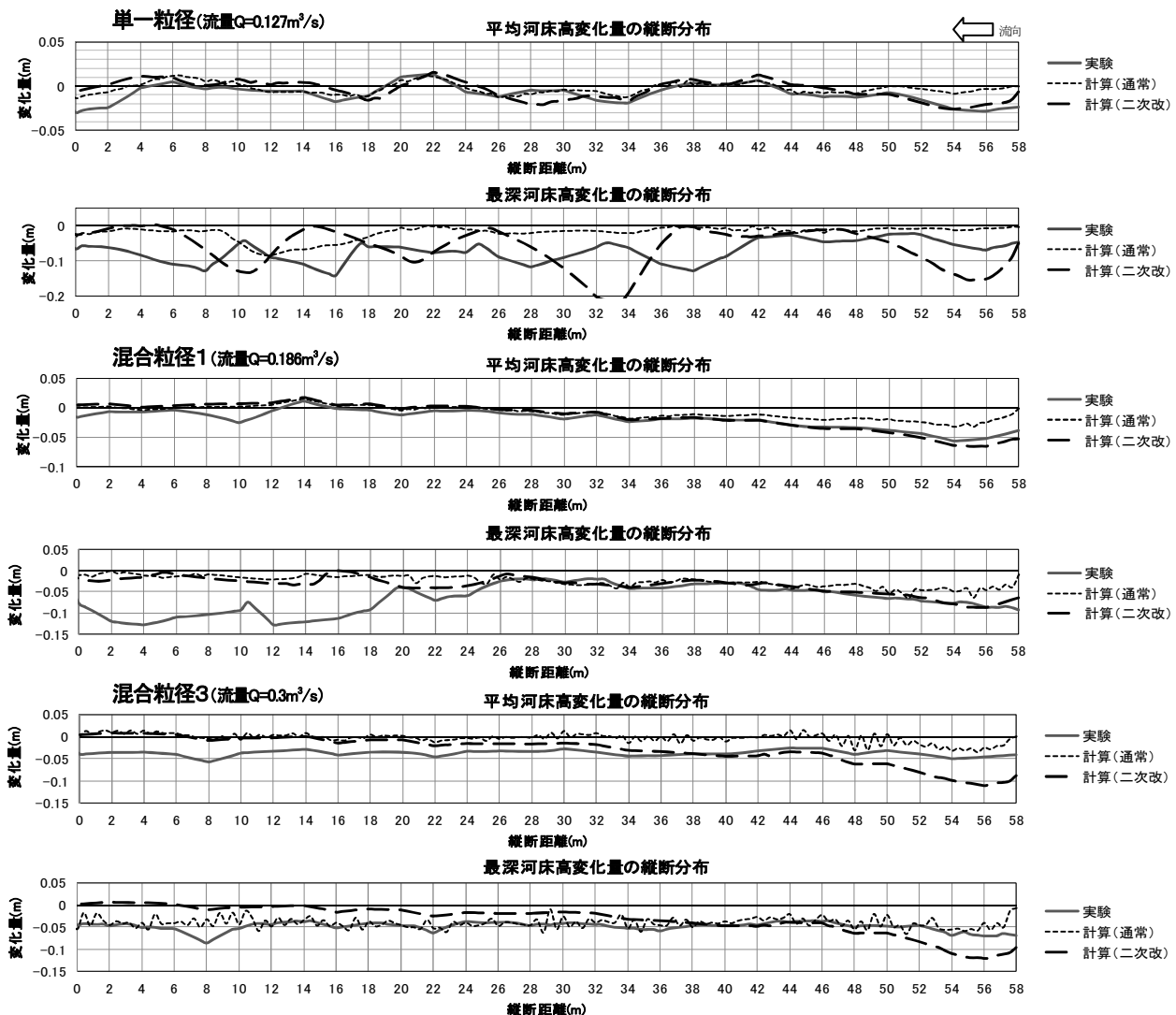


図-9 通水前後の河床高変化量（通水前の各横断面での平均河床高を基準）

るなど高い再現性が得られた。

#### 4. おわりに

水理実験により、中央粒径が同一でも河床材料の粒度分布が異なれば、深掘れの規模、流砂の量や粒度分布も大きく異なることが確認された。また河床材料の粒度分布幅が広い場合でも同一流量の場合は流砂の粒径範囲がほぼ同じであり、流砂の最大粒径は岩垣による無次元限界掃流力の一様粒径の実験式の逆算から求められる移動限界粒径程度であることが確認された。

河床変動モデルについては、流砂量の計算において水理実験の結果を考慮し、河床材料全体の粒度分布から求められる平均粒径( $d_m$ )を、移動限界粒径以下の河床材料の粒度分布から求められる平均粒径( $d_m$ )を考慮して補正した平均粒径を計算上の代表粒径として流砂量式等に適用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、河床形状の時空間的な変化傾向は従来の河床変動モデルに比べて改善が図られ

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) 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*
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 坂野章ほか：河床材料の粒度分布の幅が中規模河床形態に及ぼす影響についての実験的検討, *土木学会第67回年次学術講演会*, II-001, 2012.9

(2014. 4. 3受付)