

異なる平面形が連なる複断面流路の 流砂量分布に関する研究

STUDY ON SEDIMENT DISCHARGE DISTRIBUTIONS IN A COMPOUND CHANNEL WITH DIFFERENT PLAN FORMS

福岡捷二¹・柴田高²・田村浩敏³・田端幸輔²・山形勝巳⁴

Shoji FUKUOKA, Takashi SHIBATA, Hirotoishi TAMURA,
Kosuke TABATA and Katsumi YAMAGATA

¹フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²学生会員 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期 社会環境システム専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 博(工) (株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11第9中央ビル)

⁴正会員 国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)

It is important to evaluate properly sediment discharge distribution of the meandering compound channel, because the plan shape of many rivers in Japan has a meandering compound change. We use conventional bed-load equation derived for a simple channel. An applicability of conventional bed-load equation should be examined for compound channels.

In this paper, at first we investigate sediment discharge characteristics in the compound channel whose plan form changes longitudinally. In the second, we compare analytical sediment discharge rate obtained from our 3D-flow model and experimental result. Problems are raised to sediment discharge rate and distribution of compound channels with different plan forms.

Key Words : *sediment discharge distribution, compound channel, 3D flow model, bed-load equation, plan form*

1. 序論

複断面流路の流れは、低水路内の流れと高水敷上の流れとの混合が生じるため、単断面流路の流れと大きく異なり、それに伴い河床変動特性も異なることが明らかにされている^{1), 2)}。

既往の研究では、一様な蛇行低水路をもつ複断面流路における流砂量は、低水路満杯流程度で最大となり、さらに相対水深が大きくなると、低水路と高水敷間の流れの混合による抵抗増加によって、ある大きさの相対水深まで掃流力が減少することが明らかにされている³⁾。しかし、実河川では平面形が縦断的に変化しており、最大流速や最大洗掘が生じる位置は、その上流側の河道線形の影響を大きく受け、流砂量も流路線形に応じて変化する。すなわち、平面形が縦断的に変化する場合、掃流力と流砂量が縦断的に変化するため、平均河床高の縦断変化が生じる。複断面流路において、河床変動を支配する

流砂量を適切に評価することは課題であるが、流れの構造が複雑であるため十分な知見は得られていない。また、流砂量式には、単断面直線水路で導かれた流砂量式が準用されており、複断面流路に対しこれら流砂量式の適用性は明らかにされていない。

本研究では、異なる平面形を持ち、連続的に連なる複断面水路⁴⁾を用い、相対水深の異なるケースの移動床実験を行い、複断面流路における流砂量特性を検討する。さらに、静水圧を仮定した三次元数値解析^{5), 6)}で得られた流砂量と実験で得られた流砂量を比較し、複断面流路における数値解析法を持つ意義、流砂量式の適用性及び課題を検討する。

2. 検討方法

異なる平面形を有する複断面流路の流砂量特性を明らかにするための移動床実験と流砂量解析法を示す。

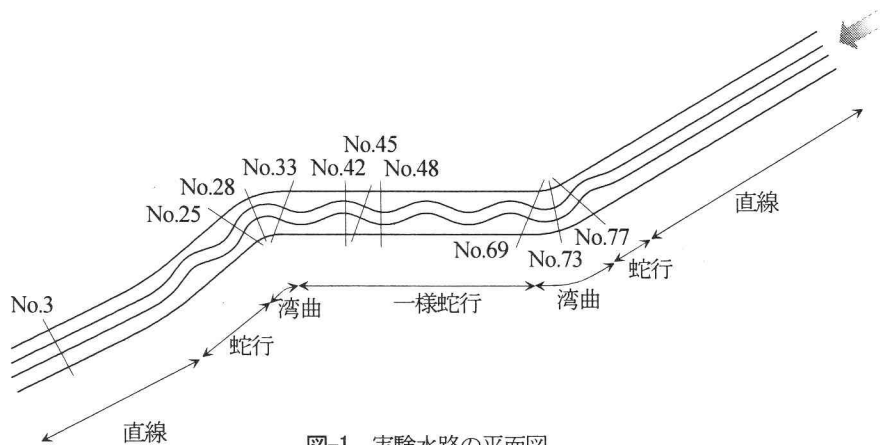


図-1 実験水路の平面図

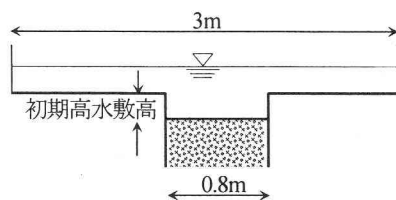


図-2 実験水路の横断面図

表-1 実験条件

	ケース1	ケース2
相対水深 Dr	0 (単断面的流れ)	0.4 (複断面的流れ)
流量 (m^3/s)	0.0106	0.030
初期高水敷高 (m)	0.050	0.050
通水時間	20時間	20時間
流砂量測定断面	No. 3 (直線部) No. 25 (下流湾曲部) No. 45 (一樣蛇行部) No. 69 (上流湾曲部)	



写真-1 流砂量測定箱

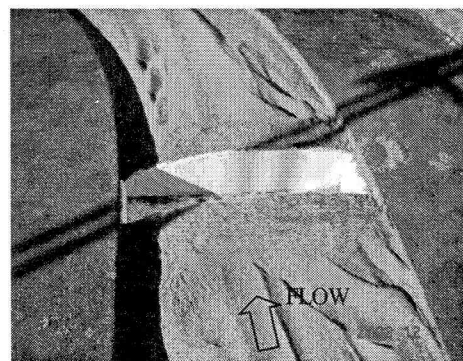


写真-2 流砂量測定箱の設置状況

(1) 実験概要

図-1、図-2に実験水路の平面形状および横断面形状を、表-1に実験条件を示す。

実験水路は、全長65m、全水路幅3m、低水路幅0.8m、水路床勾配が1/1,000であり、低水路の直線区間、蛇行区間および湾曲区間が図-1のように連なっている。一樣蛇行区間にはSine-generated curveで蛇行する低水路が2.5波長あり、最大偏角 $\theta_{max}=22.5^\circ$ 、低水路の蛇行度 S (=低水路蛇行長/低水路蛇行波長)は $S=1.04$ である。河床材料には比重2.59、粒径0.8mmの一樣砂を用いている。また、高水敷には粗度付けのために人工芝を貼り付けてある。

実験は2ケース行っている。複断面蛇行流路における流れと河床変動は、相対水深と蛇行度によって単断面的の蛇行流れと複断面的の蛇行流れに分類されることから⁵⁾、それぞれの流れを代表する相対水深 $Dr=0$ と $Dr=0.4$ に対して検討している。通水は平坦初期河床から概ね平衡状態と

なるまで、20時間行っている。なお、実験水路の上流直線区間は十分長いことから給砂区間と考え、付加的な給砂は行っていない。

(2) 流砂量の測定

流砂量の測定は、初期平坦河床から河床形状が全体的に安定するまで通水した後、流砂量測定箱を設置し、その後の通水により箱に流入した砂の量を測定している。流砂量測定箱は、流れに対する影響ができるだけ小さくなるように測定断面の横断河床形状に合わせた形状に製作し、河床に埋め込まれている(写真-1、写真-2)。流砂量の横断分布を把握するために、横断方向に分割した網を箱の中に設置し、流砂量を測定している(写真-1)。本実験では浮遊砂はほとんど認められず、流砂量箱には全ての流砂が捕捉されていると考えてよい。

ケース1、2では、直線部、湾曲部、蛇行部それぞれの

代表断面に流砂量測定箱を設置している。各平面形における流砂量の測定断面は、その平面形の特徴が顕著に現われる断面として、洗掘の大きくなるNo.25（下流湾曲部）、No.45（一様蛇行部）、No.69（上流湾曲部）とNo.3（直線部）としている（図-1）。流砂量は、通水30分毎の測定を5回繰り返し、総流砂量を単位時間あたりに換算している。

(3) 解析方法

流れの解析には、静水压を仮定した一般座標系三次元運動方程式^{5), 6)}を用い、鉛直方向には河床形状に応じた計算メッシュを形成できる σ 座標系を採用している。計算は河床形状が概ね平衡状態になるまで行っている。

ξ, η 方向の運動方程式、連続式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \frac{\tilde{u}}{d\xi} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} + \frac{\tilde{v}}{d\eta} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \\ & - \frac{\tilde{u}}{d\xi} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \xi} (d\xi \cdot \xi_x) + v \frac{\partial}{\partial \xi} (d\xi \cdot \xi_y) \right\} \\ & - \frac{\tilde{v}}{d\eta} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \eta} (d\xi \cdot \xi_x) + v \frac{\partial}{\partial \eta} (d\xi \cdot \xi_y) \right\} \\ & = gI_\xi - gd\xi \left(\alpha \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \beta \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \\ & + \frac{d\xi}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \xi} (JJ' \tau_{\xi\xi}) + \frac{d\xi}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \eta} (JJ' \tau_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{\xi z}) \\ & + \frac{d\xi}{J'} \left(-y_{\eta\xi} \tau_{\xi x} + x_{\eta\xi} \tau_{\xi y} - y_{\eta\eta} \tau_{\eta x} + x_{\eta\eta} \tau_{\eta y} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \frac{\tilde{u}}{d\xi} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\tilde{v}}{d\eta} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta} + \tilde{w} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z} \\ & - \frac{\tilde{u}}{d\xi} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \xi} (d\eta \cdot \eta_x) + v \frac{\partial}{\partial \xi} (d\eta \cdot \eta_y) \right\} \\ & - \frac{\tilde{v}}{d\eta} \left\{ u \frac{\partial}{\partial \eta} (d\eta \cdot \eta_x) + v \frac{\partial}{\partial \eta} (d\eta \cdot \eta_y) \right\} \\ & = gI_\eta - gd\eta \left(\beta \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \\ & + \frac{d\eta}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \xi} (JJ' \tau_{\xi\eta}) + \frac{d\eta}{JJ'} \frac{\partial}{\partial \eta} (JJ' \tau_{\eta\eta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{\eta z}) \\ & + \frac{d\eta}{J'} \left(-y_{\xi\xi} \tau_{\xi x} + x_{\xi\xi} \tau_{\xi y} - y_{\xi\eta} \tau_{\eta x} + x_{\xi\eta} \tau_{\eta y} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\tilde{J}\tilde{u}/d\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\tilde{J}\tilde{v}/d\eta)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\tilde{J}\tilde{w})}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

ここで、座標に関する下付き文字は微分、応力に関する下付き文字は成分を表す。 (u, v, w) 及び $(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$ はそれぞれ (x, y, z) 及び (ξ, η, σ) 方向の反変物理流速成分である。 $d\xi, d\eta$ は反変ベクトルの長さを表し、 J は三次元座標変換ヤコビアン、 J' は平面座標変換ヤコビアンである。渦動粘性項には0方程式モデルを用いている。河床の抵抗には流速係数 ϕ を与え、摩擦速度 u_* を求めている。流速係数は、低水路 $\phi=8.5$ 、高水路 $\phi=4.5$ を与えている。

河床変動は掃流砂を対象としており、河床の縦横断勾配を考慮した流砂量ベクトルを用い、流砂の連続式(4)により算出される。流砂量式は河床の勾配に伴う付加的な掃流力と限界掃流力の変化を取り込んだ芦田・道上式⁷⁾を用いている。

$$J \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial J \tilde{q}_{B\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial J \tilde{q}_{B\eta}}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 z_b は河床高、 λ は間隙率(=0.45)、 $\tilde{q}_{B\xi}, \tilde{q}_{B\eta}$ は反変流砂量ベクトルである。

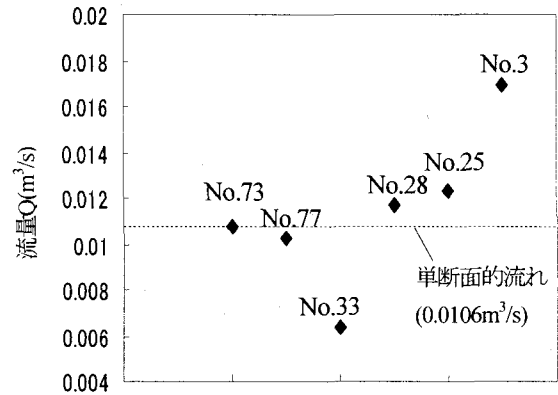


図-3 複断面的流れにおける低水路内流量

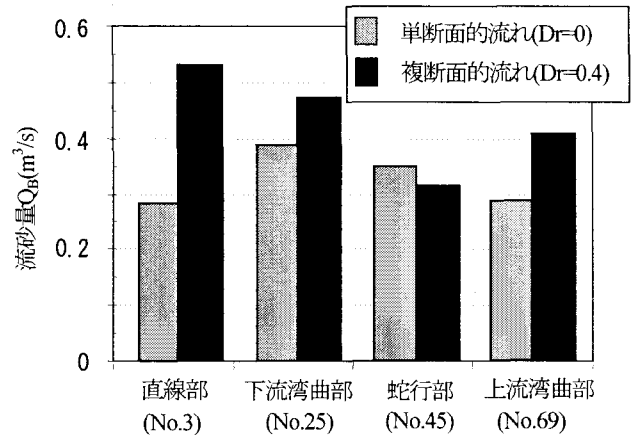


図-4 全断面流砂量

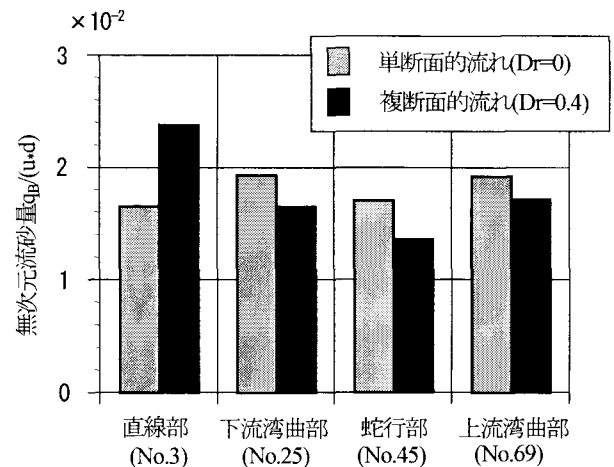


図-5 無次元表示した全断面流砂量

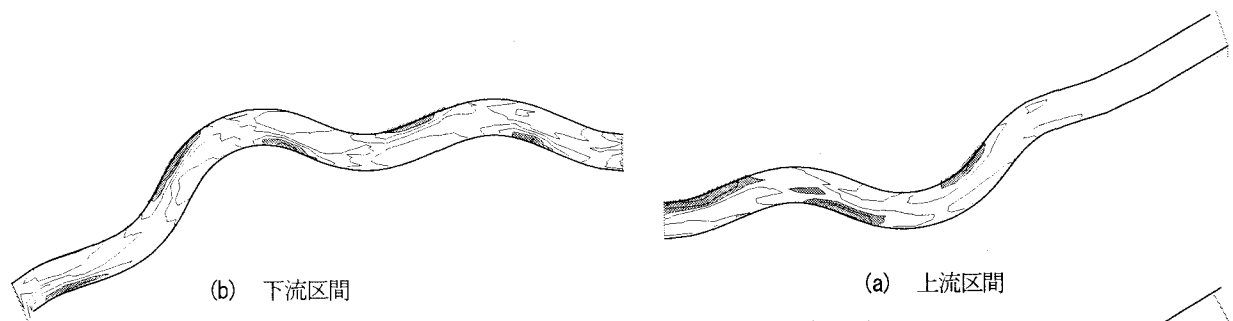


図-6 河床変動高コンター(単断面の流れ, 実験値)

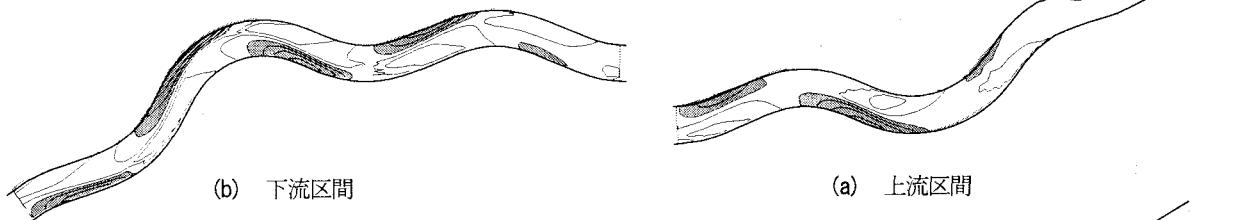


図-7 河床変動高コンター(単断面の流れ, 解析値)

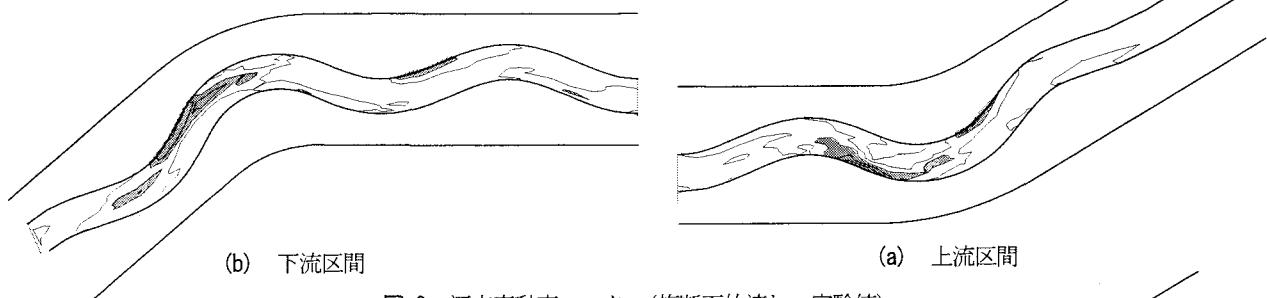


図-8 河床変動高コンター(複断面の流れ, 実験値)

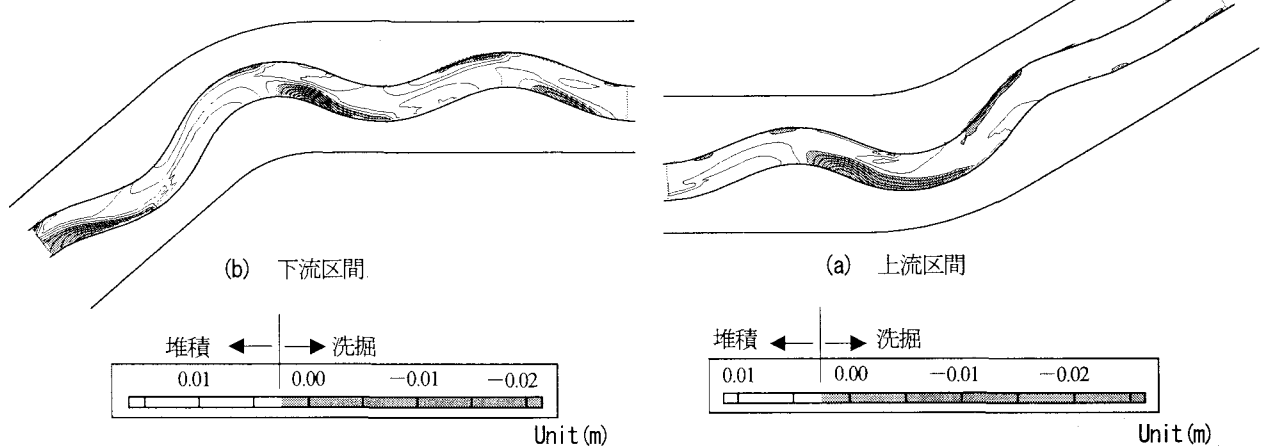


図-9 河床変動高コンター(複断面の流れ, 解析値)

3. 複断面河道における流砂量特性

(1) 流量規模の違いによる流砂量

図-3は、複断面的流れの場合の上流湾曲部(No.73, No.77), 蛇行部(No.33), 下流湾曲部(No.28, No.25), 直線部(No.3)で測定した主流の横断面内分布から求めた低水路内流量を示している。ここで低水路内流量とは、高水敷より下部の低水路内の流量である。複断面的流れの場合、単断面的流れの場合に比べ、一様蛇行区間の下流に位置するNo.33の低水路内流量は非常に小さく、直線

部の断面No.3では大きくなっている。複断面的流れの場合における平面形の違いによる低水路内流量の差は、流砂量の大小に密接に関係する。

図-4は全断面流砂量を示している。蛇行部では単断面的流れの場合に比べ複断面的流れの場合の方が断面全体の流量が大きい(表-1)にもかかわらず、流砂量が小さくなっている。この理由は、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合による低水路内流速の低下である。また、単断面的流れに対する複断面的流れの流砂量の増大率は、直線部において最も大きく、次いで上流湾曲部、下流湾曲部、そして蛇行部において最小となる。高水敷上の流

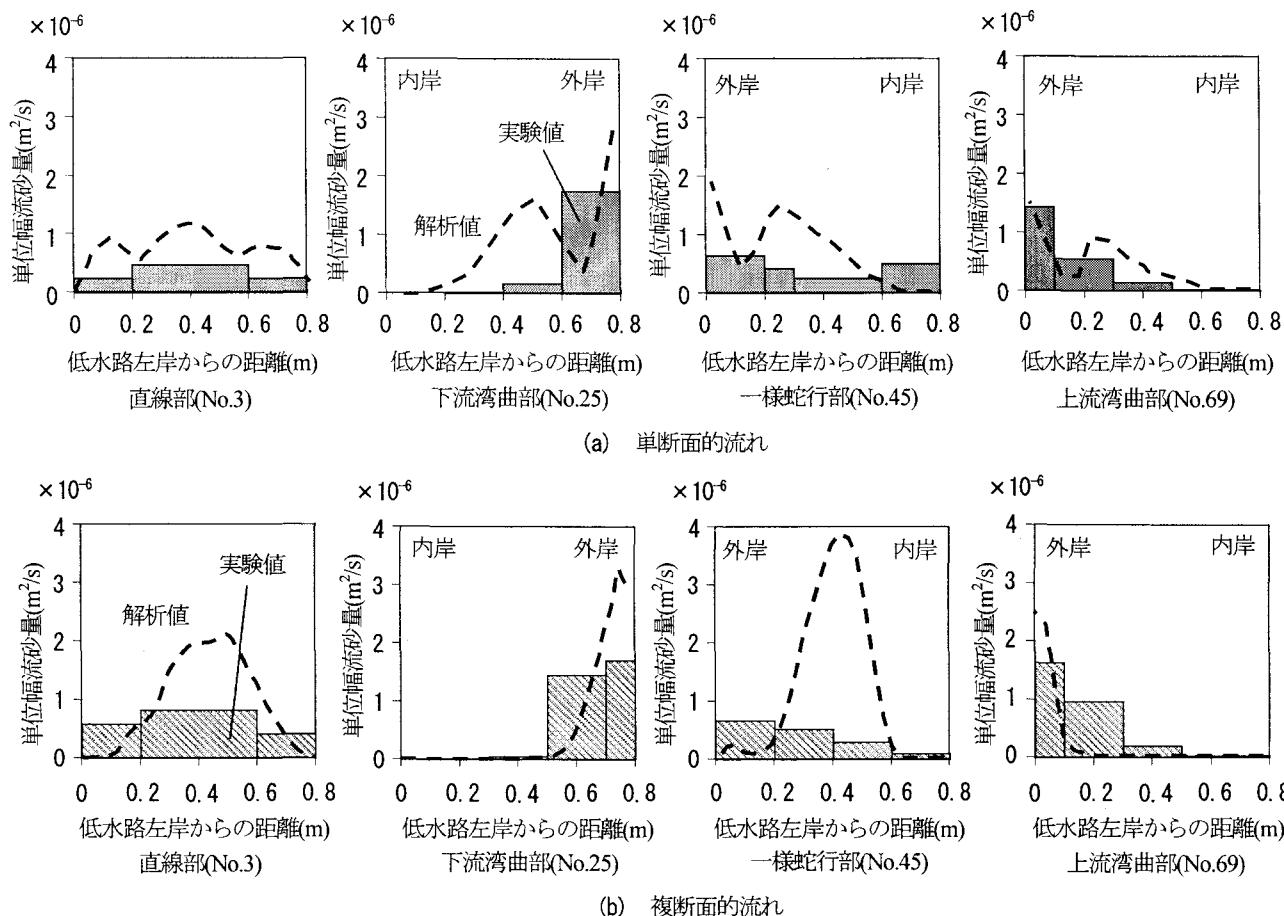


図-10 代表断面における流砂量の横断分布(実験値, 解析値)

れと低水路内の流れの混合の度合は、小さい順に直線部、湾曲部、蛇行部となる。下流湾曲部はその上流に一樣な蛇行部を有することから、上流湾曲部に比べて高水敷上の流れの影響が大きいと考えられる。したがって、各平面形について、相対水深の変化に対する流砂量の増大率は、高水敷上の流れと低水路内の流れの混合の程度の大きさと関係づけられる。

図-5は、全断面流砂量を低水路摩擦速度 u_* 、河床材料粒径 d で除した無次元流砂量を示している。ここで、 u_* は低水路部分の平均水深と水面勾配から求めており、低水路全体の平均的な値としている。単断面的流れに対する複断面的流れの無次元流砂量は、直線部では大きくなっているが、下流湾曲部、上流湾曲部、一樣蛇行部では小さくなっている。すなわち、複断面的流れの場合、高水敷上の流れが低水路内へ及ぼす付加的な抵抗により、断面全体の流量の増大に対して流砂量の増大率は小さくなる。

(2) 単断面的流れにおける流砂量と河床変動

単断面的流れにおける、河床が平衡状態となる通水20時間での河床変動コンターの実験値と解析値を図-6、図-7、各測定断面での単位幅流砂量の横断分布の実験値と解析値を図-10(a)、一樣蛇行部No.33での底面流速ベクトルの実験値と解析値を図-11(a)に示す。

図-6、図-7より、上流湾曲部、下流湾曲部、一樣蛇行部

において、解析値の洗掘範囲は実験値に比べ大きい、解析値の洗掘位置、洗掘深は実験値を概ね再現している。

図-10(a)より、上流湾曲部、下流湾曲部ともに、低水路外岸側に流砂量が大きく、水深の小さい低水路内岸側の流砂量はほとんどない。湾曲部の流砂量の横断分布は、上流湾曲部に比べ下流湾曲部の方が低水路外岸側に集中していることがわかる。一樣蛇行部では流砂量の横断分布は湾曲部に比べ変化が小さい。数値解析による流砂量と実験による流砂量の比較から、解析値は各平面形の横断分布の傾向をある程度は説明できることが分かる。

また、図-11(a)より、底面流速の解析値と実験値が対応していることが分かる。これより、単断面的流れの場合、三次元数値解析により河床変動や流砂量を求めることは可能である。

(3) 複断面的流れにおける流砂量と河床変動

複断面的流れにおける、通水20時間での河床変動コンターの実験値と解析値を図-8、図-9、各測定断面での単位幅流砂量の横断分布の実験値と解析値を図-10(b)、一樣蛇行部No.33での底面流速ベクトルの実験値と解析値を図-11(b)に示す。

図-8、図-9より、上流湾曲部では、単断面的流れと同様に、解析値の洗掘範囲は実験値に比べ大きい、洗掘位置や洗掘深は概ね再現されている。一方、一樣蛇行部、下流湾曲部では、解析値の洗掘位置、洗掘範囲は実験値

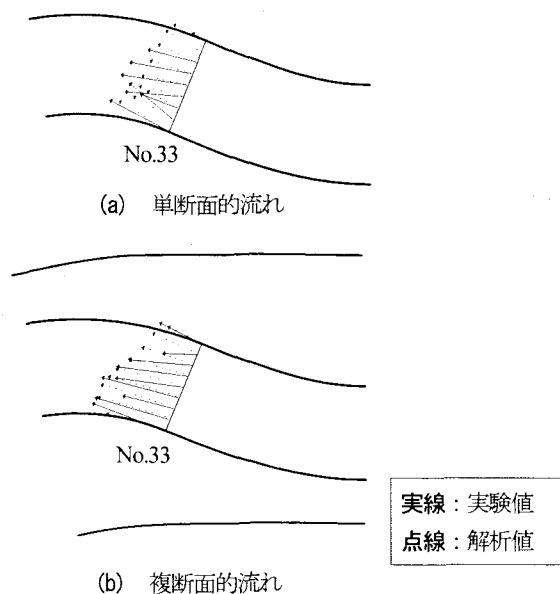


図-11 蛇行部No.33の底面流速ベクトル(実験値, 解析値)

と大きく異なっている。すなわち、一樣蛇行部、下流湾曲部では、解析値の流砂量の縦横断分布が実験値と異なるために、解析値は実験値の河床変動特性を表すことができない。

図-10(b)より、流砂量の横断分布は、単断面的流れの場合と同様に、直線部では横断方向の変化は小さく、湾曲部では深掘れ箇所である低水路外岸側で流砂量が大きく、堆積部である低水路内岸側で流砂量は小さい。一樣蛇行部では、水深の大きい低水路外岸側で流砂量が大きくなっているが、その変化の大きさは湾曲部に比べ小さい。これは、一樣蛇行部では高水敷上の流れが低水路内の流れに及ぼす付加的な抵抗が大きいためである。数値解析による流砂量と実験による流砂量の比較から、上流湾曲部、下流湾曲部ともに、解析値は流砂量の横断分布の傾向を概ね再現しているが、一樣蛇行部では解析値は実験値と大きく異なっていることが分かる。

また、図-11(b)より、底面流速の解析値と実験値が対応していることが分かる。これより、複断面的流れの場合、三次元数値解析において流れ場から掃流力への変換と、掃流力から流砂量への変換に課題があると考えられる。

さらに、次の点が課題として残されている。①流砂量の場所的变化が大きく、代表断面の測定値だけでは、各平面形に対応する流砂量分布を表し得ていない。②数値解析では、一樣蛇行部における高水敷上の流れの低水路内の流れへの影響、特に低水路の掃流力の場所的变化が十分に再現されていない⁸⁾。

このような特性を持つ複断面的流れにおいて、流砂量解析の再現性を検証するには、代表断面のみの検討では不十分であり、各平面形の流砂量を縦横断的に測定し、流砂量と流れ場との関係を明らかにすることが今後の課題である。

4. 結論

本文における主な結論と課題を整理すると以下のとおりである。

- (1) 採砂箱による流砂量の観測から、異なる平面形を有する複断面流路における流路平面形と相対水深の違いによる流砂量特性を明らかにした。
- (2) 実験から得られた流砂量と三次元数値解析から得られた流砂量を比較した結果、単断面的流れの場合、流砂量の解析値は実験値を概ね再現している。一方、複断面的流れの場合、流砂量の解析値は実験値を十分に再現できていない。これは、数値解析における流れ場から掃流力への変換と、掃流力から流砂量への変換に課題があるためである。
- (3) 複断面流路において、流砂量解析法の再現性を向上させるためには、流砂量の縦横断分布と流れ場の関係を実験によって詳細に検討する必要がある。そして、実験から得られた知見をもとに、流砂量解析法を改善し、異なる平面形を有する移動床流れの流砂量評価につなげていくことが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 小俣篤, 加村大輔, 平生昭二, 岡田将治: 複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp.11-22, 1999.
- 2) 岡田将治, 福岡捷二: 複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究, 土木学会論文集, No. 754/II-66, pp.19-31, 2004.
- 3) Ishigaki, T., Shiono, K., Rameshweran, P., Scott, C.M., Muto, Y.: Impact of secondary flow on bed form and sediment transport in a meandering channel for overbank flow, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, pp.849-854, 2000.
- 4) 岡田将治, JULIO MASIS JIMENEZ, 福岡捷二, 田村浩敏, 重松良: 平面形が縦断的に変化する複断面河道における流れと河床変動, 水工学論文集, 第47巻, pp.655~660, 2003.
- 5) 渡邊明英, 福岡捷二, 岡田将治: 静水圧近似3次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集, 第42巻, pp.1015-1020, 1998.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No. 586/II-42, pp.39-50, 1998.
- 7) 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.
- 8) 渡邊明英, 福岡捷二, 坂本博紀: 複断面蛇行水路における底面せん断応力分布, 水工学論文集, 第48巻(1), pp.553~558, 2004.

(2004.9.30 受付)