

複断面蛇行水路における底面せん断応力分布

BED SHEAR STRESS DISTRIBUTIONS IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL FLOW

渡邊明英¹・福岡捷二²・坂本 博紀³

Akhide WATANABE, Shoji FUKUOKA and Hiroki SAKAMOTO

¹正会員 博(工) 広島大学大学院 助教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²フェロー会員 Ph. D 広島大学大学院 教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 修(工) 水資源開発機構徳山ダム建設所第一調査設計課(〒501-0603 揖斐郡揖斐川町上南方631-1)

As the bed shape depends on the distribution of the bed shear stress, it is important to evaluate the accurate that. However, the bed shear stress in a compound meandering channel has not been cleared yet. In order to clarify the characteristic of flow turbulence structure and bed shear stress, a measurement device is developed by means of LDV. In this paper, the measured three-dimensional flow turbulence and shear stress are explained in detail and flow structure are cleared. A three-dimensional numerical analysis is performed to reproduced flow and shear stress, and numerical results are compared with experimental results. It was shown that measured bed shear stress distribution is different from that in numerical results though the time averaged flow in numerical results can explain that in experiments.

Key Words: compound meandering channels, shear stress distribution, Reynolds' stress, LDV, numerical analysis

1. はじめに

我が国では治水安全度や平常時利用の観点から複断面形状を持つ河川が多く、このような複断面河川は一般に低水路と堤防が共に蛇行している複雑な平面形状を持つ。このように低水路が蛇行している流路は複断面蛇行流路と呼ばれる。複断面蛇行流路に関して、多くの研究が実験的・解析的に行われている¹⁾⁶⁾。現在では、福岡らの開発した3次元数値解析モデル⁷⁾⁸⁾が、実験結果の流れ場⁵⁾を再現し、河床変動機構⁶⁾について言及できるものとなっており、洗掘・堆積位置などは再現可能である。しかしながら、河床変動解析における河床高の変動量や流砂量等の定量的な評価には問題が残されている。

この原因の一つに、加速・減速流れ場における底面せん断応力の算定方法並びに、流砂量公式の適用性が挙げられる。従来の方法では、平均流速場から得られる底面せん断応力を用いて、平衡流砂量を算定し、河床変動量が計算される。しかしながら、平均流速場と底面せん断応力の関係、平衡流砂量との関係は、等流に近い状態においてしか成立できない。このため、せん断応力が大きく場所的に変化する場合には流砂量公式の適用性が低い。複断面蛇行流れは、加速・減速が繰り返す流れ場であり、

これによる乱れや底面せん断応力の場所的な変化は大きい。しかし、このような影響を十分に取り込んでいないモデルを用いても、平均流れ場の構造が得られしまう⁷⁾⁸⁾。これは、乱れ構造やせん断応力の場所的な変化よりも流れの慣性効果が卓越しているため、平均的な流れ場の構造は地形形状に伴う移流の効果で大局的に決定されていると考えられる。したがって、複断面蛇行流れにおける流砂量や河床変動予測を十分な精度で行うためには、平均流れ場だけでなく、加速・減速流れ場における流れ場とせん断応力、流砂量との関係を明確にする必要がある。

石垣・武藤⁹⁾はフィルムセンサーを用いて蛇行度の大きな複断面蛇行水路におけるせん断応力分布の測定を行い、相対水深の違いによって応力最大位置が変化し、福岡らの実験結果⁶⁾と概ね一致する事を示した。しかし、石垣らの研究では、せん断応力分布と流れ場の関係を定量的に評価するには至っていない。杉山ら¹⁰⁾は実験データに対して3次元乱流解析を行い、時間平均流れ場については比較的よく表し得るが、乱流統計量については定量的に十分な評価を行えるまでには至っていない。

したがって、複断面蛇行流路における平均流れ場と乱れ強度、せん断応力分布等の関係を明らかにし、3次元乱流構造とせん断応力分布についての知見を得る必要がある。

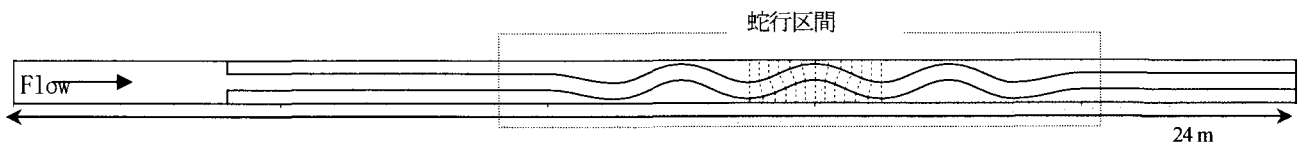


図-1 実験水路平面図

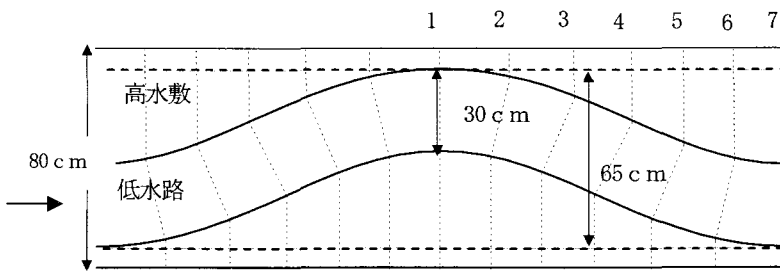


図-2 水路諸元及び測定断面

表-1 水蛇行部緒元

蛇行度	1.06
蛇行波長	2.50 m
蛇行長	2.68 m
最大偏角	27.1°
全水路幅	80 cm
低水路幅	30 cm
高水敷高さ	4.3 cm

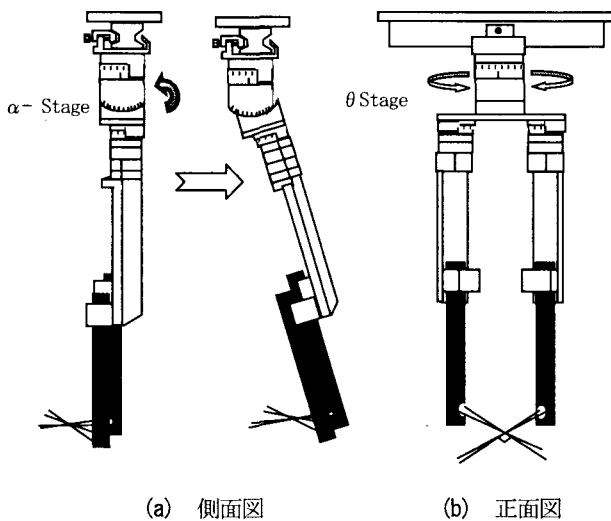
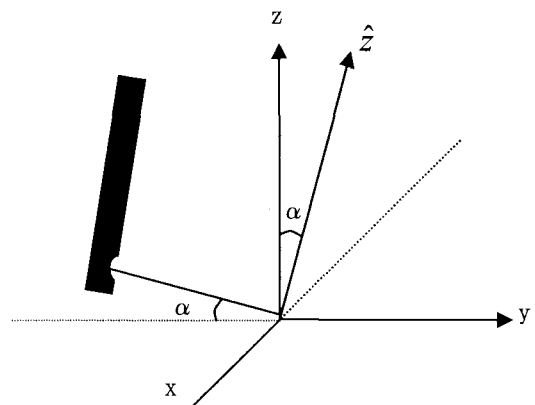


図-3 LDV測定用トラバース



$$\begin{aligned}
 \hat{w}_r &= w \cos \alpha + v \sin \alpha, & \hat{w}_l &= w \cos \alpha - v \sin \alpha \\
 \overline{u' \hat{w}'_r} &= \overline{u'(w' \cos \alpha + v' \sin \alpha)} & \overline{u' \hat{w}'_l} &= \overline{u'(w' \cos \alpha - v' \sin \alpha)} \\
 &= \overline{u' w' \cos \alpha + u' v' \sin \alpha} & &= \overline{u' w' \cos \alpha - u' v' \sin \alpha}
 \end{aligned}$$

図-4 仰角 α と $\overline{u' w'}$, $\overline{u' v'}$, $\overline{u' \hat{w}'}$ の関係

本研究では、レーザー流速計 (LDV) による Reynolds 応力分布から複断面蛇行流路におけるせん断応力分布を実験的に明らかにし、福岡らの数値解析モデルによるせん断応力分布と比較することで底面せん断応力算定に関する問題点を明確にする。

2. 実験方法

実験水路の平面形状を図-1, 2に示す。水路全長は24 mで、上流端から4 mの断面から複断面直線水路に遷移し、上流端から11 mの地点から遷移区間を含めた4波長の蛇行区間を経て再び直線部に遷移する。表-1に示す様に低水路蛇行度 1.06, 蛇行波長 250 cm, 蛇行長 268 cm, 最大偏角 27.1°, 低水路幅 30 cm, 高水敷高さ 4.3 cm, 低水路アスペクト比(低水路幅/高水敷高) 7.0である。相対水深(高水敷水深/低水路水深) $Dr = 0.0$ (bank full), $Dr = 0.25$, $Dr = 0.44$ の3通りの状態で実験を行い、流れ場とせん断応力を計測した。測定区間は蛇行区間中央の1波長とし、水位は1波長、流速は後半の半波長を測定区間

とした。流速測定を行った断面を上流側から断面1, 2, ...とする。測定断面は図-2に示すように1波長を12等分した13断面である。水位はポイントゲージとレベルで測定した。時間平均流速はI型電磁流速計及びレーザー流速計 (LDV) を用いて測定し、流速の乱れ変動量はLDVを用いて測定した。サンプリング時間は共に30秒で、LDVの平均サンプリング周波数は120Hzであった。

LDVを用いて底面付近の測定を行うために、図-3のようなトラバースを製作した。仰角調整機能 (α -stage) と水平回転機能 (θ -stage) によって、底面付近や壁面付近の測定を可能にしている。本実験では二次元同時計測を行っている。3成分計測ではテンソルの回転で任意方向のせん断応力が容易に得られるが、2成分で計測を行ったため、以下の方法で応力成分を変換した。

図-4に示す様な鉛直方向に対する角度 α とReynolds 応力の関係があることから、測定点1つにつき、仰角 α を変えて統計量が等しくなる十分な時間で2回以上測定することで統計量である鉛直面応力 $\overline{u' w'}$ を逆算できる。水路中央では θ を、壁面付近では α を変えて測定を行い、せん断応力を算出した。

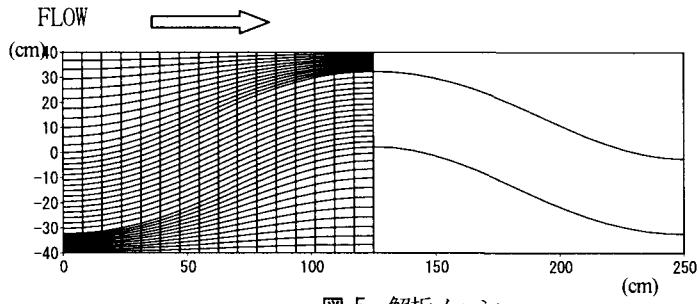
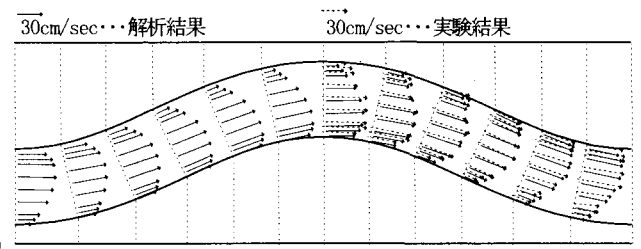
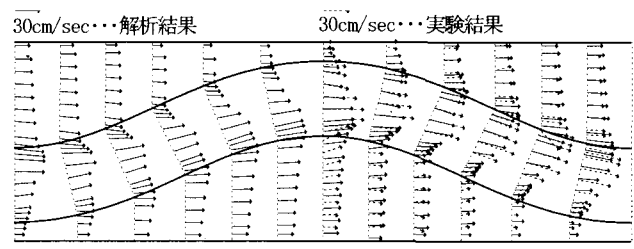


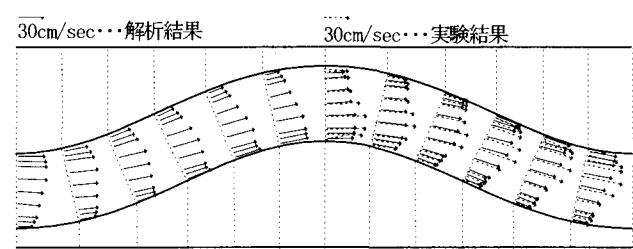
図-5 解析メッシュ



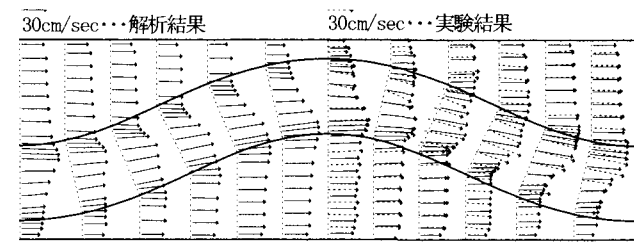
(a) case 1 bankfull



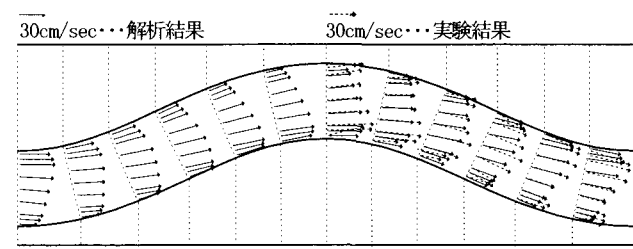
(b) case 2 $Dr=0.25$ (上層)



(c) case 2 $Dr=0.25$ (下層)



(d) case 3 $Dr=0.44$ (上層)



(e) case 3 $Dr=0.44$ (下層)

図-6 鉛直平均流速ベクトル

3. 解析方法

流れ場の解析に用いた三次元モデルについては既報³⁾⁴⁾で述べられているので、ここでは要点のみを記す。前述の複断面蛇行流路に対する解析は、低水路蛇行の1波長区間を対象とする。測定区間における水路境界形状が周期的であることから、この区間の縦断方向には周期境界条件を適用し、境界形状と流れ場に対してスペクトル展開を行う。図-5に示される様に蛇行低水路に沿った一般曲線座標系を導入し、用いたスペクトル選点の計算メッシュは縦断方向に32分割、横断方向に39分割、鉛直方向に9分割(高水敷高さ以下5分割)している。流れ場の解析には運動方程式、連続式が用いられ、SMACスキームにより圧力場を求め、2次精度の時間積分法の1つであるHeun法で流速と水位変動のスペクトルを時間積分している。また、渦動粘性係数には摩擦速度と底面からの距離にカルマン定数を掛けたものを与えている。壁面及び底面の摩擦速度は壁面及び底面付近の流速を流速係数で除して求めている。

4. 複断面蛇行流路の流れ構造とせん断応力分布

(1) 実験・解析における水位及び流速の平面分布

図-6, 7に時間平均流速ベクトル及び水位コンターの実験結果と解析結果を示す。流速は鉛直平均値であり、複断面蛇行流れである case 2, 3 では高水敷高さより上層, 下層の平均値である。実線が解析結果、点線が実験結果を示す。流速ベクトルから全ケースを通じて、蛇行頂部の内岸から内岸を繋ぐように最大流速が発生している。低水路蛇行度が小さいため case 1の単断面蛇行でも二次流が発達せず、最大主流速は内岸に現れる。複断面蛇行流れとなる case 2, 3 では、高水敷からの流入に伴い、低水路内岸側から低水路中央より低水路外岸側の流れが減速される。特に case 2 では高水敷流れと低水路流れの流速差が大きいため、主流速の横断勾配は最も大きくなる。水位については全ケース共に、低水路では遠心力の作用によって流れが外岸に集まるため、蛇行部外岸側から内岸に向けて大きな水面勾配が生じている。この勾配は複断面流れになると、遠心力の影響を受けない高水敷

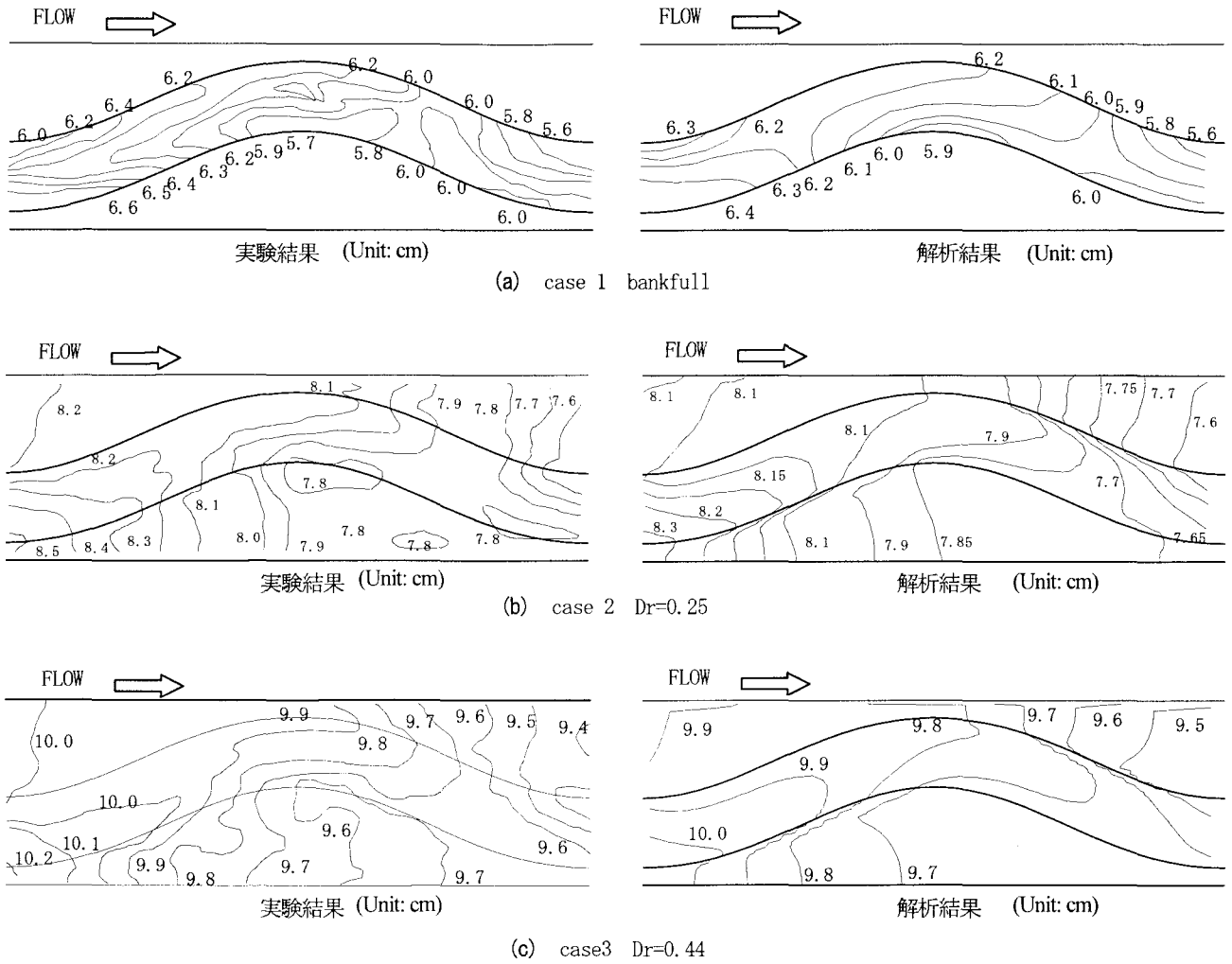


図-7 水位コンター

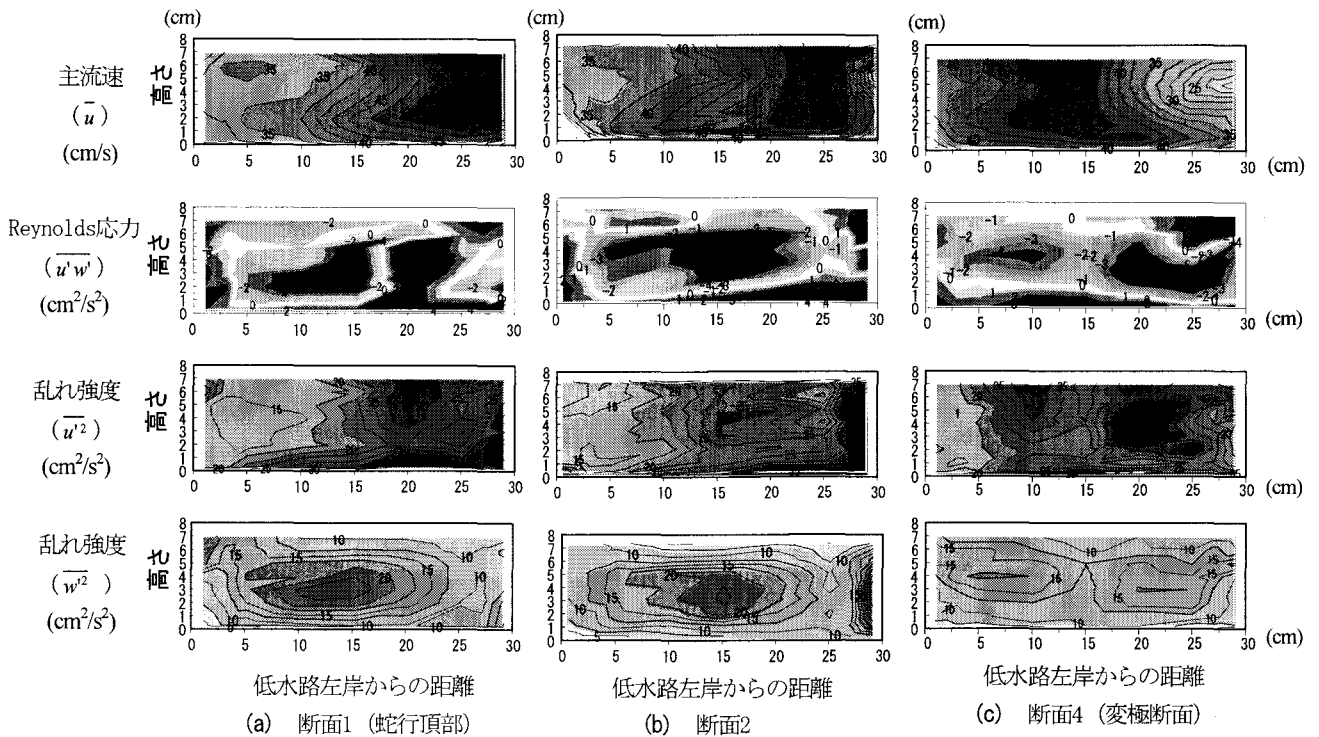


図-8 低水路断面別各種コンター(case 3)

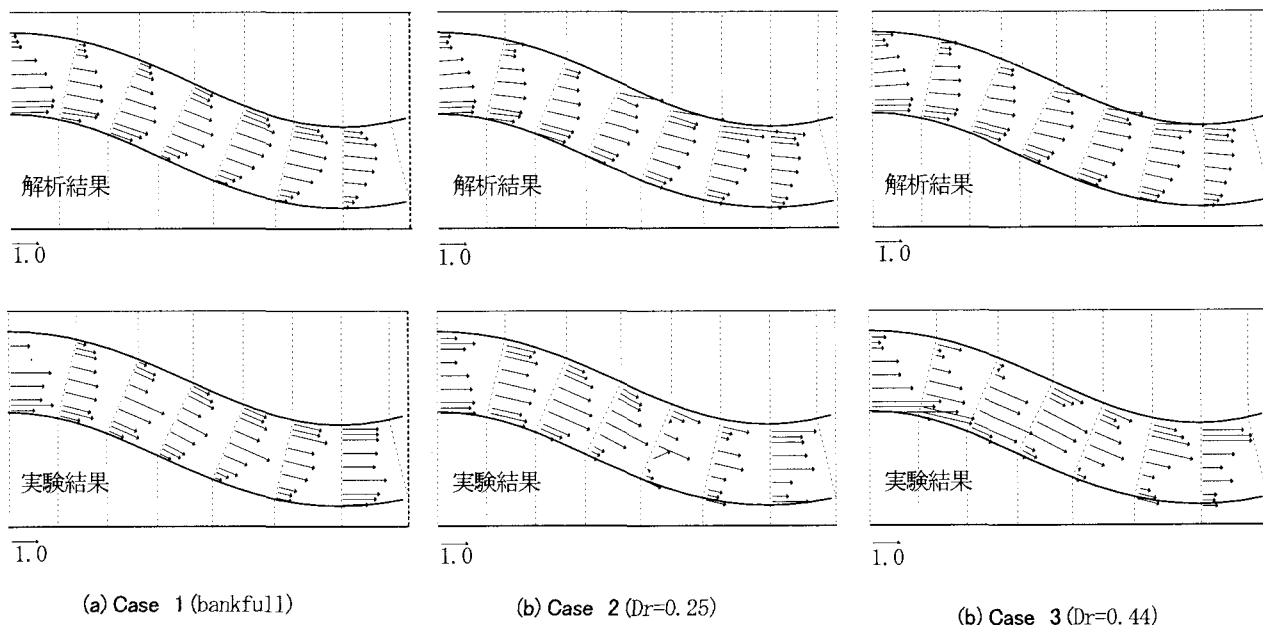


図-9 底面せん断応力分布

上の側壁に沿う直進的な流れによって修正されるため、相対水深の増加に従い小さくなる。case 2, 3 では蛇行頂部下流の外岸側で、高水敷向きにコンター線が密になり、この領域で高速流体が低水路から高水敷へ流出する事を示している。流速分布及び水位分布ともに、解析は実験における流れ場の特徴を良く説明できており、これまで述べて来た様に本数値解析モデルは、平均的な流れ場の構造について高い再現性を持っている。

(2) 複断面蛇行流れの鉛直断面内構造

図-8に相対水深が大きい case 3 における低水路内の時間平均主流速、Reynolds応力（鉛直面）、乱れ強度の断面コンターを示す。蛇行頂部である断面1では、主流は右岸近傍で最大値を持つ。図-6に示される様に、左岸側では高水敷からの流入によって流速は減速されている。その影響は高水敷高上で大きく、範囲は水路中央にまで及び、横断方向に大きな流速勾配を生じさせている。その結果、下層側流速の方が速くなっている。Reynolds応力の分布は、速度の鉛直勾配に対応し、高水敷高付近から下側で大きな値をとる。その絶対値は底面付近の値よりも大きく、この領域での鉛直方向の運動量交換が活発である事を示す。主流の乱れは、横断勾配の大きい場所、並びに底面近傍で大きな値となっている。

断面2では、低速な高水敷流れが右岸から流入し、大きな流速横断勾配が生じると共に、右岸近傍で乱れ強度が大きくなっている。この影響は、上層だけでなく底面付近まで及んでいる。この高水敷からの流入による影響は流下に従い弱まり、横断方向に広がっていく。

(3) 底面せん断応力分布

本解析では底面摩擦速度は、底面近傍流速を流速係数

で除すことによって得ている。このため、解析におけるせん断応力分布は流速分布に完全に依存する。流速係数の値は、壁法則（対数則）から算出されている。対数則は、本来一様な流れ場に適用されるものであり、この仮定が成立しない場合には、実験値と解析値には差が生じる。複断面蛇行流れは複雑な構造を持つ加速・減速流れ場であり、この条件には適合しないと考えられるため、対数則の適合性について検討を行った。

図-9にせん断応力分布の実験結果と解析結果を示す。ここでは分布形に注目した検討を行うため、低水路に働く底面せん断応力の平均値で無次元化している。図より bankfull状態の流れについては数値解析によって概ね再現出来ているが、相対水深の増加に伴って実験結果と解析結果の対応は悪くなる。Case 2, 3 では断面3～6の右岸近傍で実験結果は解析結果に比べて小さい。この領域は高水敷からの流入によって減速され、横断混合が生じる領域である。

図-8より、横断方向の速度勾配が大きく、主流の乱れ強度も大きい領域で高水敷高付近のせん断応力は大きくなっても、右岸近傍では低速であるため底面せん断応力は小さい。底面せん断応力が大きい場所は高速流体が沈み込んでいる場所であり、実験結果の方が横断的な変化が大きい。水路全体でせん断応力の分布形の特徴を比べると、相対水深の増加にしたがって、解析結果よりも実験結果の方がせん断応力の縦横断変化が大きくなるのが分かる。

実験と解析におけるせん断応力分布形状の違いを明確にするため、最も違いの大きい case 3 について、実験値と解析値の差をとり、図-10 に示した。図の黒線は各断面におけるせん断応力の実験値と解析値の差であり、流下方向が（実験値－解析値）の正の向きである。

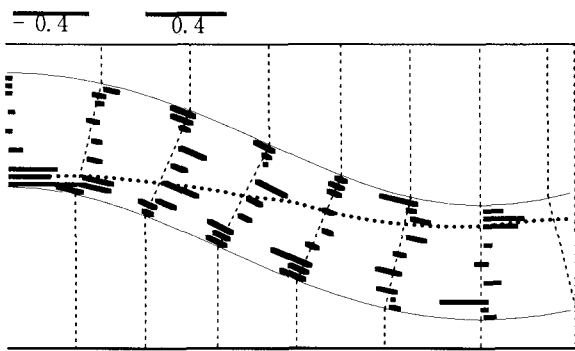


図-10 $\tau'_{exe} - \tau'_{ava}$ の縦断変化

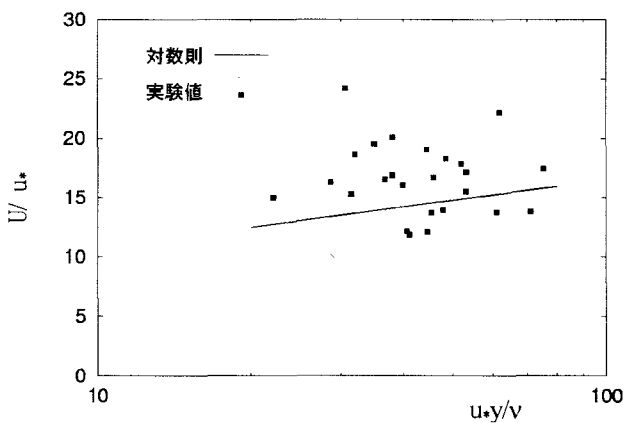


図-11 流速係数の実測値と対数則の比較

各断面において正の大きな値となっている箇所を点線で結ぶと、これは最大主流速線上に生じている。最大主流速線上の底面せん断応力は解析・実験共に他の場所と比べて大きく、実験においてより顕著に現れている。図-8で示された様に、最大主流速が生じている位置は上層・下層共にほぼ等しい。これは上層部で集中した主流速が下層に向かって潜り込むためである。一方、主流の乱れ強度は主流速最大部周辺で大きく、鉛直流速の乱れ強度は主流速乱れ強度が大きい場所の外側で大きい。その結果、鉛直面レイノルズ応力は鉛直流速の乱れ強度と主流速の乱れ強度が大きい場所で大きい。鉛直流速の乱れ強度が大きい範囲は高水敷高におけるせん断応力を生じさせている範囲である。底面せん断応力は、主流の乱れ強度が強い範囲で大きく、その周辺では非常に小さい。

図-11に、底面近傍 ($z=0.2 - 0.3\text{cm}$) におけるせん断応力 (レイノルズ応力+粘性応力) から求めた底面流速係数 (流速/摩擦速度) の実測値と滑面乱流における対数則による理論値を共に示す。実験値は理論値の周囲の集団と明らかに理論値を大きく越える集団がある。特に高流速部の低せん断応力部において流速係数の値が大きく、低速流部においてばらつきが大きい。

以上のことから、上層からの高速流体の沈込みが、大きな乱れやせん断応力の発生に寄与していることは明らかであるが、底面せん断応力について壁法則が成立して

いないことになる。低速流部では土砂移動量が少ないことから、工学的には高速流部における流れとせん断応力の関係を定量的に評価する必要がある。滑面の場合には原理的には直接数値シミュレーションも可能であるが現実的ではない。平均流れ場と乱れ統計量、せん断応力の関係を求めるためには、より詳細な3次元流れ場を実験的に明らかにする必要がある。

5. 結論

本研究では平坦固定床の複断面蛇行水路において、LDV流速測定により断面内の乱れ構造を明らかにした。福岡らの3次元数値解析モデルを実験に適用し、底面せん断応力について検討した。以下に主要な結論を示す。

- (1) 数値解析は平均的な流れ場については精度良く再現できるが、底面せん断応力の再現性は良いとはいえない。相対水深の増加に伴い、実験における底面せん断力分布の縦横断変化が大きくなり、底面せん断応力と底面流速の関係が壁法則からずれる。
- (2) 低速な高水敷流れの流入に伴う横断面内における乱れ構造の特徴を実験的により定量的に示した。

数値解析における問題点を改善するためには、乱れの生成や輸送等の解析精度の向上も図る必要があるが、まず境界条件である底面せん断応力と平均流及び流れ場の特性量との関係を実験的に明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構, 京都大学防災研究所年報第32号B-2, pp.527-551, 1989.
- 2) Willetts, B.B. and Hardwick, R.I.: Stage dependency for overbank flow in meandering channels, *Proc. Instn Civ. Engrs. Wat., Marit. and Energy*, 101, pp.45-54, 1993.
- 3) Sellin, R.H.I., Ervine, D.A. and Willetts, B.B.: Behaviour of meandering two-stage channels, *Proc. Instn Civ. Engrs. Wat., Marit. and Energy*, 101, pp.99-111, 1993.
- 4) 武藤裕則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集第40巻, pp.711-716, 1996.
- 5) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集No.579/II-41, pp.83-92, 1997.
- 6) 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.
- 7) 福岡捷二, 渡辺明英: 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.
- 8) 渡辺明英, 福岡捷二: 複断面蛇行流路における流れと河床変動の3次元解析, 水工学論文集第43巻, pp.665-670, 1999.
- 9) 石垣泰輔, 武藤裕則: 複断面蛇行開水路流れの構造と底面せん断力分布について, 水工学論文集第42巻, pp.901-906, 1998.
- 10) 杉山均, 齊藤卓也: 複断面蛇行開水路流れの3次元乱流構造解析に関する研究, 土木学会論文集II-60号, pp.25-2002.

(2003. 9. 30受付)