

高水敷上に帯状粗度を設置した 複断面蛇行流れの構造と河床形状

FLOW STRUCTURE AND BED FORM IN COMPOUND SINUOUS CHANNEL WITH ROUGHENED FLOOD PLAIN

石垣泰輔¹・武藤裕則²

Taisuke ISHIGAKI and Yasunori MUTO

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

²正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

Structure of overbank flow and bed form in compound sinuous channel with roughness on the flood plain are discussed based on experimental results. Visualization and measurements of velocity and bed form were conducted. The roughness is set on the bases of the flow structure. Secondary flow is most important in this flow. Effect of roughness on the bed form is significant, but not on the flow pattern on the water surface and velocity distribution. Roughness on the flood plain reduces the surrounding velocity and this reduction causes the local modification of bed. The effect can be observed more clearly in the shallower case.

Key Words : compound sinuous channel, secondary flow, bed form, roughness

1. はじめに

複断面蛇行流れは複雑であり, その構造に影響を及ぼす要素は, 河道, 低水路および高水敷に関するもので多種多様である. 河道に関する要素は, 蛇行度で表される平面形状, 水路幅・水深比や法面勾配で規定される断面形状であり, 低水路では, 平面形状に関する蛇行度と堤防法線との位相差, 断面形状および河床形状である. さらに, 高水敷の形態に関連し, その平面形状と断面形状, そして粗度高や粗度配置といった粗度の条件も流れに影響を与える. 著者らは, 低水路が緩やかに蛇行する複断面蛇行流れについて実験的検討を行って来た^{1), 2) 3)}. これらの一連の研究では, 河道および低水路の平面形状を一定(直線水路内に蛇行度 1.11 の低水路を設置)とし, 流れの構造およびそれが低水路河床形状に与える影響についての知見が得られているが, 高水敷の粗度に関する検討が残されていた. 本論文では, 高水敷に様な粗度を設置するのではなく, 流れの構造に関して得られている知見に基づいた粗度配置を行い, その条件下における流れの構造と河床形状について検討した結果を示す.

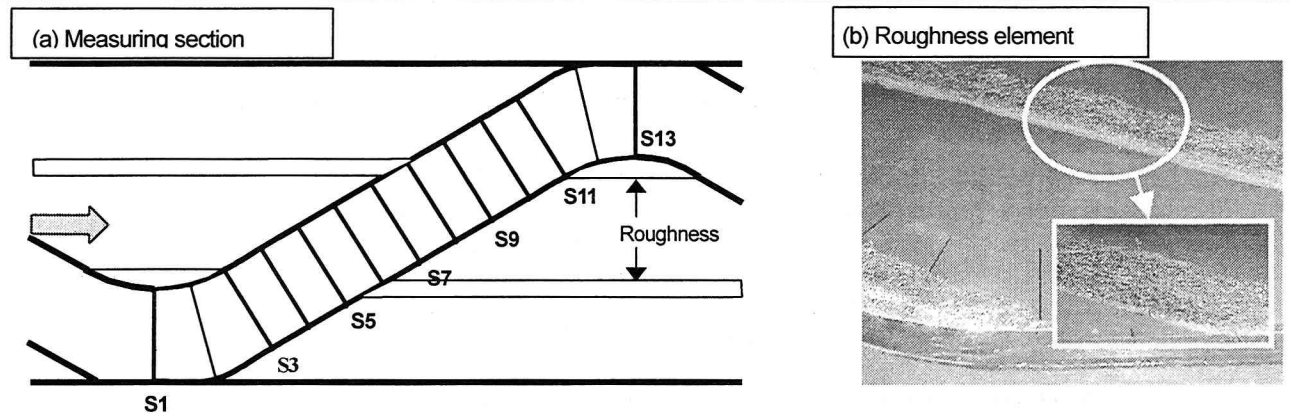
ここに挙げた要素の選び方は研究者により異なるが, 本研究で対象としている直線水路内に蛇行低水路を設置した場合の流れに関する研究で得られている知見をまとめると以下のとおりである. 流れの構造に関する研究では, 相対水深により構造が変化すること, 流れの構造に

支配的な現象が2次流であること, などが固定床水路における実験結果より指摘され, その構造図が示されている^{2), 4), 5), 6)}. 多少の違いはあるものの, 共通している知見はつぎの3点である. すなわち, 1) 低水路が蛇行する複断面開水路流れには, 遠心力が成因の2次流と, 高水敷上の流れと低水路内の流れの鉛直シアーが成因の2次流が存在する, 2) 低水路蛇行頂部(apex)付近で発生したらせん流が高水敷上から低水路に向かう流れに加速されながら発達し, その後下流側の高水敷へ乗り上げる, 3) これらの構造が水路の幾何形状や粗度分布に大きく影響される⁶⁾. 一方, 低水路を移動床とした研究では, 福岡ら⁷⁾によって, $Dr=0.30$ 以下では蛇行頂部の外岸側が洗掘される単断面的蛇行流れ, それより大きな水深では内岸側が洗掘される複断面的蛇行流れになることが指摘され, 実際の河川での調査結果と実験結果が対応することが示されている. また, 著者ら³⁾は2次流構造と河床形状との関係について検討し, 2次流が堆積域と洗掘域を形成し, その形成された堆積域を越える流れが新たな2次流を形成することなどを指摘している. しかしながら, 高水敷に粗度を設置した研究は少なく, 本研究のように流れの構造を考慮した粗度配置を用いたものはあまり見られない. なお, 著者ら⁸⁾は, 相対水深 $Dr=0.50$ ($Dr=$ 高水敷水深/低水路水深) の流れを対象に, 低水路が固定床の場合, 低水路が移動床の場合, および低水路が移動床で高水敷上に粗度を設置した場合の境界

表－１ 実験条件

Case	Hydraulic conditions		Channel
Case M (Movable bed & smooth flood plain)	Bankfull	H=5cm, H-h=0cm, Q=4.28 l/s, V=28cm/s, Fr=0.46, Re=10700	Width: B=1m, Length: 16m Bed slope: I=1/970 Width of main channel: b=30cm Height of flood plain: h=5cm Main channel depth: H=5-10cm Sinuosity of main channel: s=1.11 (s=l/λ, Length: l=3.41m, Wave length: λ =3.07m)
	Dr=0.15	H=6.0, H-h=1cm, Q=4.59 l/s, V=19cm/s, Fr=0.42, Re=4100	
Case R (Movable bed & Roughed flood plain)	Dr=0.50	H=10cm, H-h=5cm, Q=21.24 l/s, V=33cm/s, Fr=0.45, Re=17700	

Dr: Relative depth(=H-h/H), Q: Discharge, V: Mean velocity, Fr: Froude number, Re: Reynolds number
Bed material in Case M and Case R : dm=1.6mm(Dr=0.15), 2.4mm(Bankfull, Dr=0.50), specific gravity=1.7
Roughness element in Case R : width=5cm, height=2cm



条件のみを変化させた3種の実験結果を用いて行った河床形状と高水敷粗度が流れの構造に及ぼす影響の検討を行っている⁸⁾。したがって、ここでは、それらの結果に、粗度の影響が顕著と考えられる相対水深が小さな場合および流量を変化させた場合の結果を加え、高水敷上に帯状粗度を設置した複断面蛇行流れの構造と河床形状について検討する。

2. 実験方法

実験方法の詳細は既報^{3), 8)}に示したとおりであり、ここでは概略を述べる。実験に用いた水路は、表－1に示すように、幅1m、長さ16m、勾配1/970の直線水路内に、幅30cmで蛇行度(=蛇行長/蛇行波長)1.11の低水路を有する複断面蛇行水路である¹⁾。用いた条件は、低水路が移動床で高水敷が固定床滑面のCase M、および低水路が移動床で高水敷に帯状粗度を設置したCase Rである。用いた河床材料は、粒径1.6mmおよび2.4mm、比重1.7のスラジライトであり、初期厚3cmで給砂なしとした。これは、通水時間が30分～1時間程度であり、上流端の河床低下も小さく、給砂不要と判断したことによる。

Case Rで用いた粗度要素は、表－1の付図(b)に示した厚み2cmのステラシートを幅5cmの短冊型にしたものであり、1mの水路幅を3等分するように水路の両側壁より30～35cmに帯状の粗度を配置した。前章で述べたように、粗度については粗度高と粗度配置を考慮する必要がある。

本研究では、一様粗度の場合は低水路内流れと高水敷上流れの速度差が増大するのみで、流れの構造に与える影響は推定可能であることから、粗度配置を考慮することとした。本実験条件における流れの構造、すなわち、高速部と低速部が横断方向に交互に並ぶ構造を考慮すると、洪水流下後に掃流されにくい樹木等の高粗度が低速部に残存する可能性が高いと考え、付図に示したように低速部に帯状で透過性の粗度を配置した。また、粗度の高さは、複断面蛇行流れの特長を大きく変えるような高さではなく、低水路蛇行の影響が残る相対水深(Dr=0.25～0.30)以下とした。

実験は、アルミ粉末を塗布したおが屑を用いた水面流況の可視化、超音波河床計による河床形状計測、2成分電磁流速計(流下方向速度成分uおよび横断方向速度成分w)による速度計測、防水型ビデオカメラを用いた横断面流況の可視化²⁾である。流速計測および横断面流況の可視化は河床をモルタルで固定した後に行った。可視化には粒径0.45mm、比重1.05のポリスチレン粒子を用い、表－1の付図(a)に示した計測断面を対象に、1500Wのハロゲンライトを用いて蛇行軸に沿った約20cm幅を照明した領域の流況を、下流側約40cmの水中に設置したカメラで撮影した。

3. 流れの構造に関する検討

相対水深が小さなDr=0.15と大きなDr=0.50の場合の

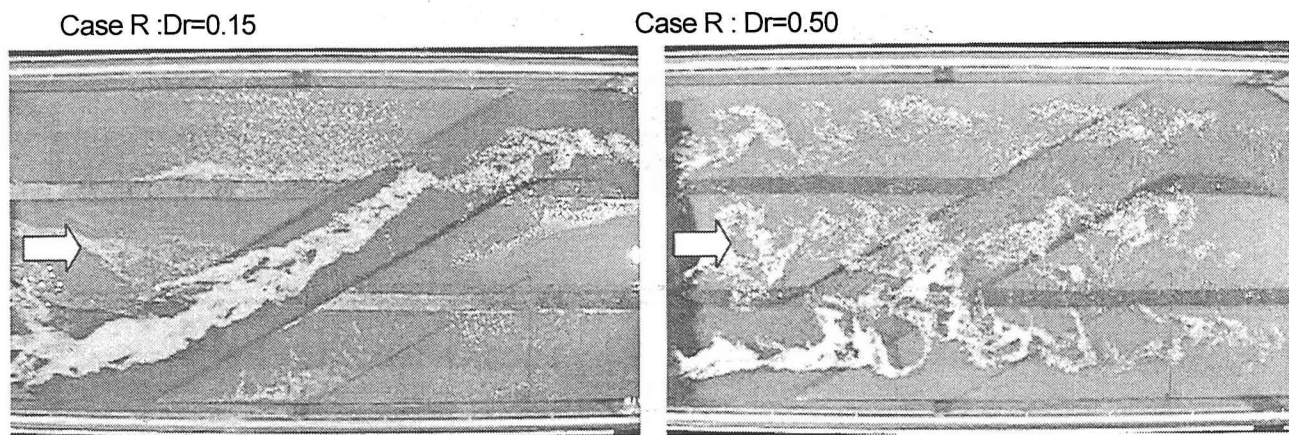


図-1 水面流況の可視化結果

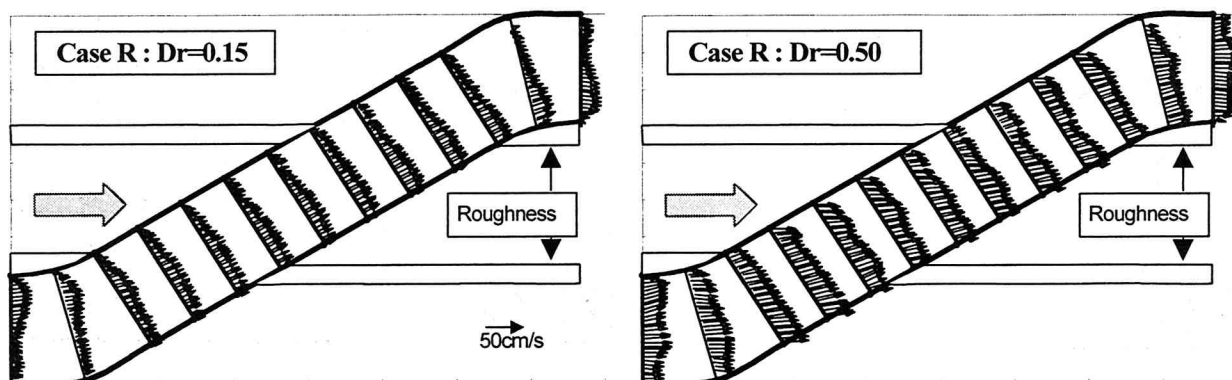


図-2 高水敷高さレベルの速度分布

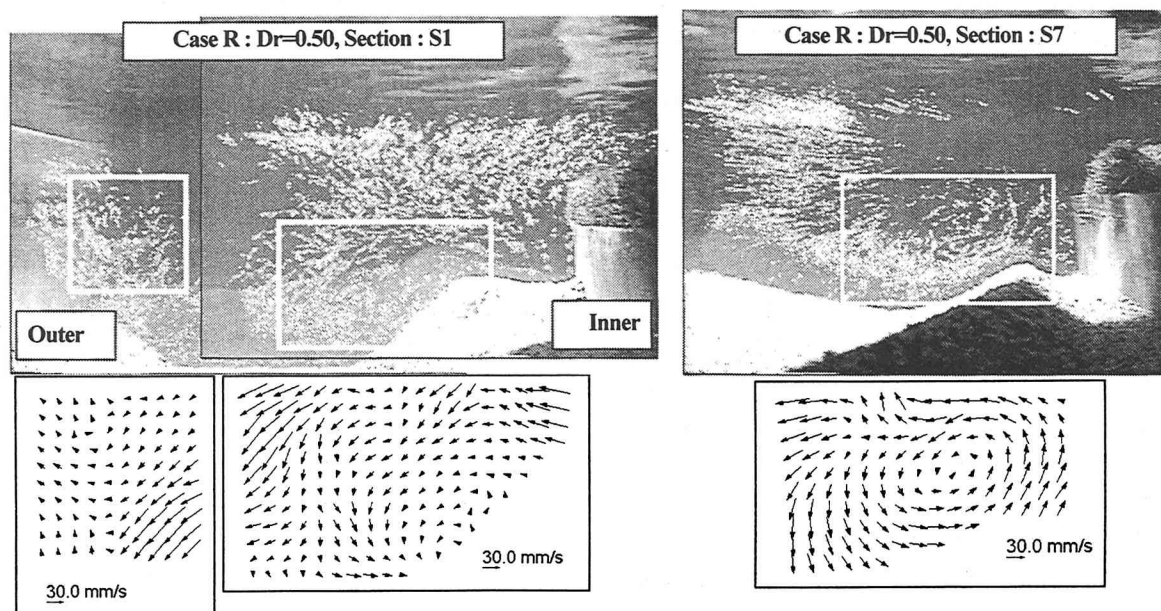


図-3 Apex(S1)および Crossover(S7)付近の横断面流況 (2次流セルの可視化結果)

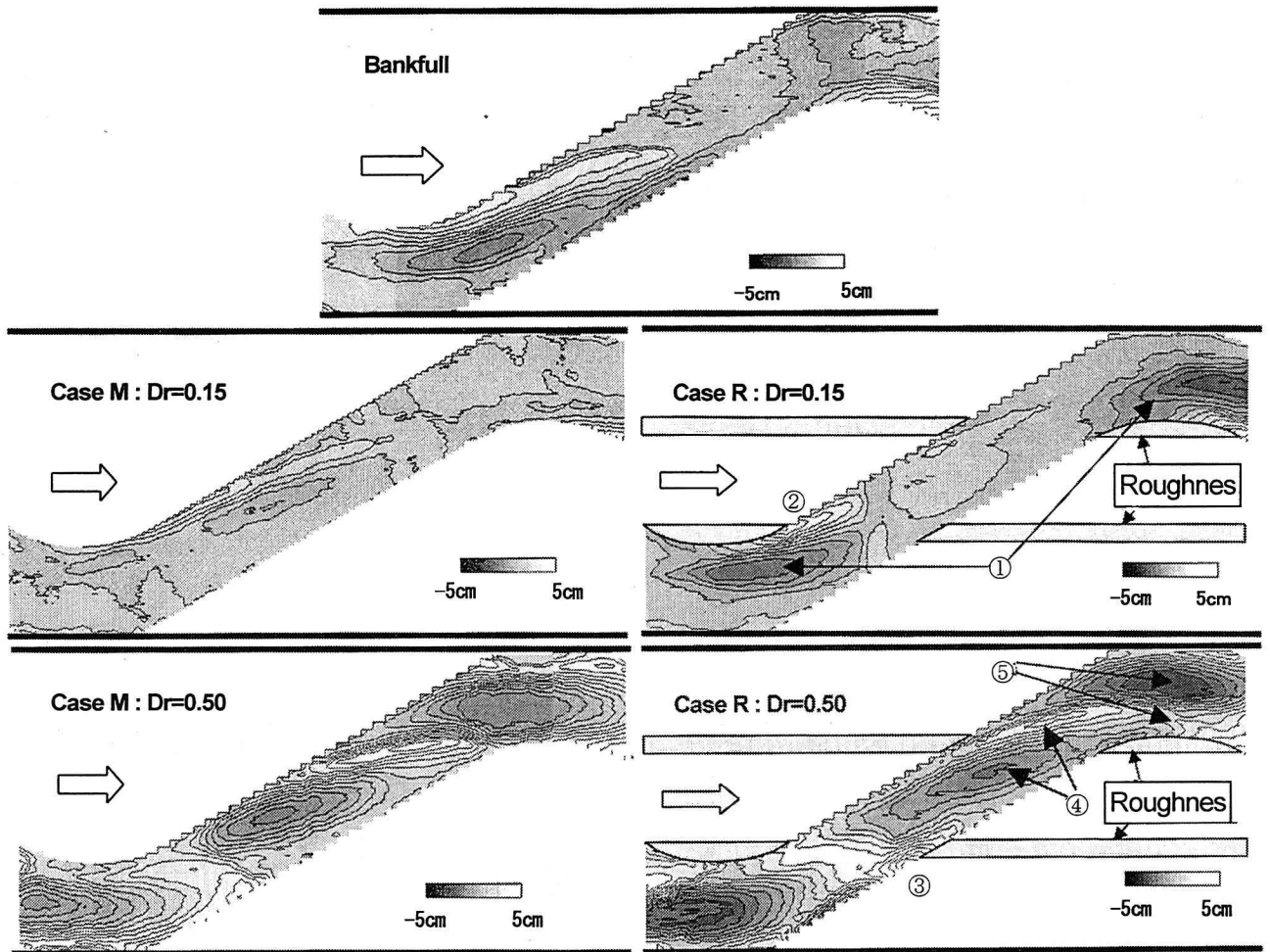


図-4 河床形状計測結果

水面流況可視化結果を図-1に、高水敷高さレベルの速度ベクトル計測結果を図-2に示す。Dr=0.15の水面流況可視化結果を見ると分かるように、トレーサが集中する高速部は低水路に沿って存在しており、低水路蛇行の影響が残っている。一方、水深の大きなDr=0.50の場合には、トレーサの集中している領域が3列存在しており、その間に2列の帯状粗度が見られる。この結果は、粗度を有しない場合と同様である⁶⁾。図-2に示したDr=0.15の場合の速度計測結果からも、水面流況と同様に高速部が蛇行頂部(以下、apexと呼ぶ)から交差部(以下、crossoverと呼ぶ)を通り、次のapexへと続いている。これに対し、Dr=0.50のケースにおける速度ベクトルは水路にほぼ平行となっており、水面流況と同様の結果を示している。なお、速度計測結果を詳細に見ると、粗度の下流側に速度欠損部分が認められ、粗度周辺に局所的な影響があることが分かるが、粗度なしの場合と比較した既報⁸⁾の結果では、粗度の影響はあまり顕著ではない。

図-3は、apex(Section S1)およびcrossover部(Section S7)における横断面可視化結果と、図中の白枠内の画像を用い、PIV法で計算した2次流ベクトルの分布である⁸⁾。apexの結果(左側の図)では、洗掘部分の内岸側に反時

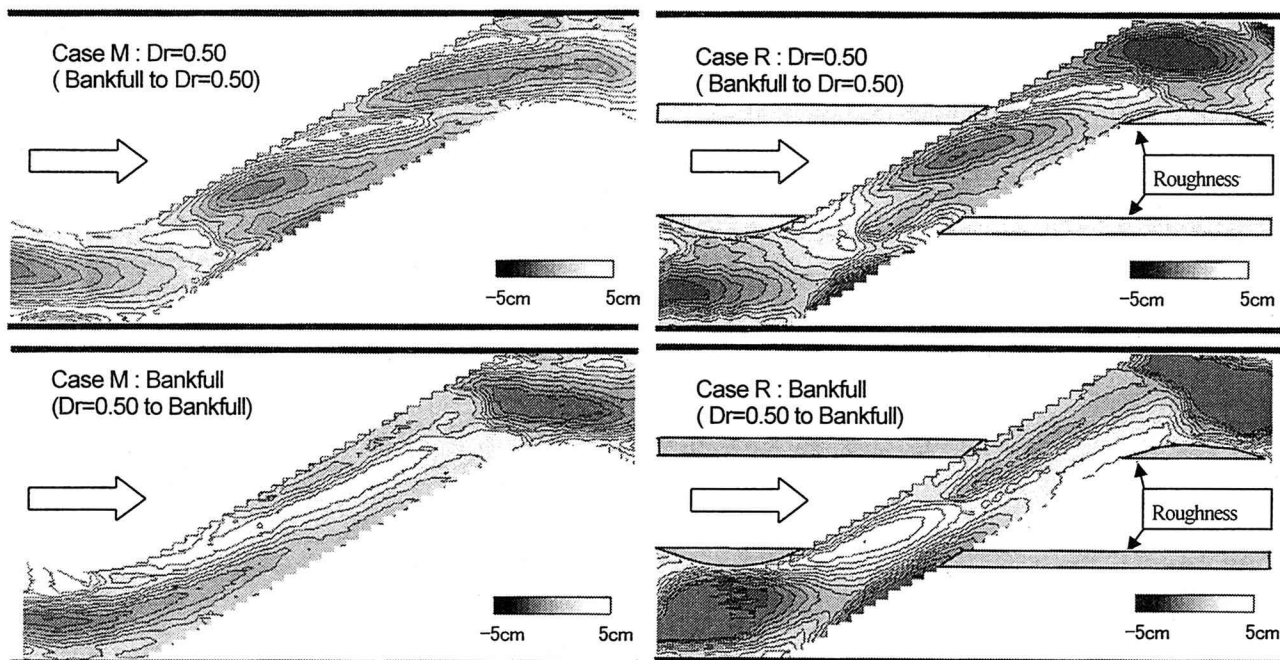
計回りの2次流セル、外岸側に時計回りの2次流セルの存在が確認できる。一方、crossoverの結果(右側の図)では、反時計回りの2次流セルが見られる。これらの2次流セルの存在は、粗度を設置しない場合と同様であるが、その生起位置が高水敷端から離れた位置となっている。これは、図に見られるように高水敷側(各図の右端)に堆積域が形成されているためである。この堆積域の形成は、粗度の存在により周辺の流速が低減したことが原因と考えられる⁸⁾。

以上の結果は、水面流況可視化結果や速度計測結果では粗度の影響を捉えることが難しい場合でも、河床形状にはその影響が顕著に現れることを示している。

4. 河床形状に関する検討

河床形状と流れの構造は相互に影響を及ぼすことが分かっており、帯状粗度が流れの構造を変化させ、その結果、河床形状に影響するが⁸⁾、以下では、帯状粗度が河床形状に及ぼす影響に着目した検討を行うこととする。

帯状粗度を設置した場合の河床形状計測結果を設置しない場合と比較して示したものが図-4である。なお、



図－5 流量増加時（上段）および流量減少時（下段）の河床形状

ここに示した河床形状は、一定流量で通水を開始し、5分から10分毎に河床横断形状の計測を続け、形状の時間変化が小さくなった時点で通水を停止した後に計測した結果である。また、流れが高水敷に及ばない Bankfull のケースは粗度の影響がないため、粗度なしの結果を示している。水位が粗度天端より低い $Dr=0.15$ の結果を比較すると、①粗度ありの場合の洗掘深が大きい、②apex に設置した粗度の下流側に堆積域が形成される、といった違いが見られる。これは、低水路内の流速が増加したことを示しており、高水敷上の流速が粗度の影響を受けた小さくなったことを意味している。

$Dr=0.50$ の結果⁸⁾を比較して見ると、洗掘域および堆積域の形成は同様であるが、いくつかの相違点がみられる。すなわち、带状粗度がある場合、③右岸側高水敷上の粗度带上流端では、その上流側の低水路右岸の洗掘域から供給された河床材料が停止して堆積する、④crossover 部の低水路左岸側から発達する洗掘域と堆積域が下流側にシフトする、⑤その結果、apex 付近ではテラス状の堆積域が形成され、洗掘域は湾曲外岸部へと移動する（各説明文の番号は図中の○付番号で示した位置を参照している）。これらの現象は、带状粗度周辺およびその上・下流側の速度が低減して掃流力が小さくなるために起こるものと考えられる。

次に、図－5に示した Bankfull の状態から $Dr=0.50$ へと水理条件を変化させた場合（流量増加時）と、 $Dr=0.50$ から Bankfull へと条件を変化させた場合（流量減少時）の河床形状計測結果を用い、带状粗度の影響について検討する。これらの結果は、初期の条件で河床を形成させた

後、約3分間で条件を変化させ、形状の時間変化が小さくなった時点で通水を停止した後に計測したものである。流量増加時では、いずれのケースの結果も図－4に示した結果、すなわち、一定流量の条件で得られた結果とほぼ一致する。これに対し、流量減少時では、いずれのケースでも図－4に示した Bankfull の結果とは異なり、apex 付近の洗掘深が大きくなる、粗度の影響である apex の粗度下流側の堆積域は残存している、などの大流量時（ $Dr=0.50$ ）の履歴が残されている。しかしながら、小流量時（Bankfull）の影響も見られ、図－4の結果（図中③）で指摘した带状粗度を設置した場合の特長である粗度上流端付近の堆積域が消滅する。これは、小流量になると、粗度下流に形成された堆積域をまわるように、apex から外岸に流れが集中し、大流量時にあった堆積域の河床材料を下流へと掃流するためであり、この流れによって洗掘域が下流側に広がるとともに、apex 付近の洗掘域も粗度なしの場合よりも広がるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、高水敷上に流れの構造を考慮して配置した带状粗度のある複断面蛇行流れの構造と河床形状について検討した。ここで得られた主な結果を列挙すると以下のようである。

1) 带状粗度の影響は、水面流況の可視化結果および流速計測結果では顕著に認められず、河床形状に見られる。これは、带状粗度周辺の局所的な速度低減が河床形成に影響を及ぼすことによる。

2) 带状粗度が河床形状に与える影響は、相対水深が小さな $Dr=0.15$ のケースで流れが低水路に集中するために洗掘深が大きくなる、 $Dr=0.50$ の場合の洗掘堆積位置変化や粗度上流端の堆積現象に見られる、などである。

3) 流量を時間的に変化させた場合の河床形状計測結果より、Bankfull から $Dr=0.50$ に変化させた場合には大流量時の形状特性が卓越した河床形状を示すが、 $Dr=0.50$ から Bankfull に変化させた場合には大流量時 ($Dr=0.50$) の履歴と小流量時 (Bankfull) の影響が共存した形状となる。このことは、洪水流下後の河床形状から洪水時の河床形状を推定する際には大流量時の河床形状の履歴と小流量時の河床形状の両者を考慮する必要があることを示している。

1 章で述べたように、複断面蛇行流れに影響を及ぼす要素は多種多様であり、今後、多くの条件の組み合わせから重要な要素を抽出して検討を行う予定である。

参考文献

1) 石垣泰輔、武藤裕則：緩やかに蛇行する低水路を持つ複断面開水路流れに関する実験的検討、水工学論文集、第 42 巻、pp.943-948,1998.

2) 石垣泰輔、武藤裕則、澤井健二：複断面蛇行開水路流れの 2 次流構造と掃流力分布に関する実験的検討、土木学会、水工学論文集、第 43 巻、pp.329-334, 1999.

3) 石垣泰輔、武藤裕則：複断面蛇行開水路流れの 2 次流構造と河床形状に関する実験的検討、水工学論文集、第 44 巻、pp.855-860,2000.

4) Willets,B.B. and Hardwick,R.I. : Stage dependency for overbank flow in meandering channel, Int. Conference on River Flood Hydraulics, pp.45-54, 1993.

5) Ervine, DA, Willets, BB, Sellin, RHJ and Lorena, M. : Factors affecting on conveyance in meandering compound flows, J. Hydraulic Eng., Vol.19, No.12, pp.1383-1399, 1993.

6) 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理、土木学会論文集、No.579、II-41、pp.83-92、1997.

7) 福岡捷二、小俣篤、加村大輔、平生昭二、岡田昭治：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.

8) 石垣泰輔、武藤裕則：河床形状と高水敷粗度が複断面蛇行流れの構造に及ぼす影響について、応用力学論文集、Vol.3, pp.821-828, 2000.

(2000. 10. 2 受付)