

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

SECONDARY FLOW AND BED DEFORMATION IN COMPOUND SINUOUS CHANNEL

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)

Over-bank Flow in a straight channel with sinuous main channel is discussed based on experimental results. The main channel is a movable bed. The flow structure is characterized by secondary flow, and the secondary flow deforms the channel bed. Bed configuration was measured by an ultra-sonic level meter, and two components of velocity were measured by an electromagnetic flow meter. Secondary flow in a cross section was visualized by the neutral buoyant tracer method. The results indicate that three distinct eroded regions and two deposited regions on the bed are formed by the secondary flow in the case of overbank deep flow. At the downstream side of the ridge in the deposited region, secondary flow was newly produced.

Key Words : compound channel, sinuous main channel, secondary flow,
bed deformation, visualization

1. はじめに

複断面蛇行流れの2次流構造を解明することは、低水路流れと高水敷上流れの相互干渉による付加抵抗の評価、底面せん断力分布や河床形態の変化予測の基礎となるものであり、これまで著者らは、低水路が蛇行した固定床の複断面開水路流れを対象に、速度計測、底面せん断力計測および流れの可視化法などを用いた検討を行ってきた^{1), 2), 3)}。その結果、相対水深 (Dr =高水敷上水深/低水路水深) が0.25~0.30を境に流れの構造が変化する「構造の水深依存性」が見られること、高水敷上の流れと低水路流れの鉛直シアーにより2次流(らせん流)が形成され、掃流力分布に大きな影響を与えること、低水路の直線部が長い場合にはらせん流が低水路側壁から離脱するために複列のらせん流が発生し、それらに対応する掃流力の大きな部分が複数存在すること、等を指摘した。これらの結果は、2次流構造が低水路河床の形状に支配的な影響を及ぼすことを示している。したがって、低水路を移動床とした場合の2次流構造と河床形状との関係について検討することとした。

低水路を移動床とした複断面蛇行流れに関する研究は、芦田ら⁴⁾、福岡ら⁵⁾によって行われている。芦田ら⁴⁾は、in-bankおよびover-bankの流れを対象に実験を行い、流れの構造や河床変動に相違が認められることを指摘しているものの、over-bankの流れでも相対水深が小さいため、複断面蛇行流れ特有の蛇行頂部の内岸側が洗掘される河床形状とはなっていない。一方、福岡ら⁵⁾は、相対水深を広範囲に変化させ、 $Dr=0.30$ 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を指摘するとともに、実際の河川での調査結果と実験結果が対応することを示している。しかしながら、3次元的な河床上の2次流構造には不明な点が残されている。したがってここでは、低水路のみ流れるbankfull、高水敷上水深が小さい $Dr=0.15$ および水深が大きく複断面的蛇行流れになっている $Dr=0.50$ の3種の条件(定常流量)について、相対水深による河床形状の差異を確認するとともに、形成された河床上の流れを横断面可視化して2次流構造と河床形状の関係について検討する。また、相対水深により流れの構造が変化し、それぞれ異なった河床形状を形成することが推測されるため、流量

表-1 水理条件

Relative depth Dr	Depth H (cm)	Discharge Q (l/sec)	Hydraulic radius R (cm)	Mean velocity Um (cm/s)	Froude number Fr	Reynolds number Re
bankfull	5.00	4.282	3.81	28.1	0.46	10700
0.15	5.95	4.592	2.14	19.2	0.42	4100
0.50	10.07	21.242	5.42	32.6	0.45	17700

SI=1/λ

Height of flood plain: h=5.079cm, Bed slope:I=1/970

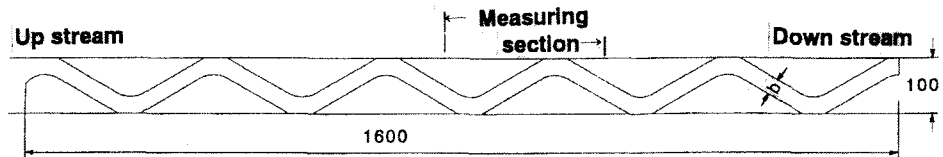
=341.4/306.8

=1.11

b=30cm

1/b=11.38

b/h=6.0



変化に伴って生じる2次流構造の変化が河床形状に及ぼす影響についても検討することとした。

2. 実験方法

実験は、既報¹⁾と同様の幅1m、長さ16mの直線水路を用い、幅30cm、初期深さ5cm（移動床厚さ3cm）で蛇行度SI=1.11の低水路を有する複断面蛇行流れを対象に、河床形状の計測、流速計測および流れの可視化を行った。水理条件および水路の諸元は表-1に示すとおりである。河床材料には、既報²⁾における掃流力分布の可視化法と同じ球形のスラジライトを用いており、比重は1.7、平均粒径は1.6mm（Dr=0.15のケース）および2.4mm（bankfullおよびDr=0.50のケース）である。なお、この材料は、それぞれの水理条件における掃流力と材料の限界掃流力の比が1.0前後となるように選定したものである²⁾。この材料を使用した理由は、粒径が大きいため、砂澱や砂堆が発生せず中規模河床形態が形成されること、および現象変化が比較的早く、実験時間が節約できることなどである。

河床形状計測には超音波河床計を用い、初期の平坦河床から通水中に5分あるいは10分間隔で蛇行頂部（S1：以下ではapexと呼ぶ）から次のapex（S13）までの6測線（S1, S3, S5, S7, S9, S11：測線位置を図-1に表示）で横断面形状計測を行った後、通水停止後に流下方向に4cm間隔で河床横断形状を計測した（以下、この結果を最終河床形状と呼ぶ）。なお、各測線に沿っては、自動トラバース装置を用いて1mm間隔で河床高を計測し、得られた河床形状をモニタリングしながら実験を行った。この結果に基づき、横断面形状計測結果の経時変化が小さくなったと判断される時点で通水を停止した。

速度計測および横断面流況の可視化は、最終河床形状をセメント粉で固定した後に行った。速度計測は、高水敷高さ付近の13測線（S1～S13）に沿い、横断方向に1cm

間隔で2成分電磁流速計（I型、流下方向成分および横断方向成分）を用いて行った。また、横断面流況可視化では、防水型ビデオカメラを水中に設置し、平均粒径0.45mm、比重1.05の中立粒子（ポリスチレン粒子）の挙動を捉え、2次流構造を直接可視化した。なお、流れへの影響を考慮し、ここではDr=0.50の結果のみを用いる。照明には1500Wのハロゲンライトを用い、低水路に沿った約20cmの範囲を照明した。

流量変化に伴う河床形状変化を検討するため、水理条件をbankfullからDr=0.50に変化させた流量増加時と、Dr=0.50からbankfullに変化させた流量減少時について実験を行った。これらの実験では、平坦河床よりそれぞれの初期条件での最終河床となるまで通水し、流量および下流端堰を設定条件に変化させた後、5分あるいは10分ごとに河床形状の経時変化を計測するとともに、通水停止後に最終河床形状を計測した。なお、水理条件を変化させる時間は、堰の昇降に必要な時間と急激な水理条件の変化をさけることを考慮して3分間とし、流量設定にはインバータ制御装置、堰には電動昇降装置を用いた。

3. 河床形状と2次流構造

（1）河床形状

図-1は、低水路のみ流れるBankfullのケース、相対水深Dr=0.15および0.50のケースにおける最終河床形状の計測結果と速度計測結果を示したものである。Bankfullのケースでは、流れはapexから下流側の外岸に向かっており、それに沿って洗掘域が、その下流側で堆積域が形成されている。これに対し、高水敷上に流れが及ぶDr=0.15の場合には、cross-over部（低水路流れと高水敷上流れが交差する水路中央付近）の低水路中央部に洗掘域が形成され、Bankfullの結果とは大きく異なっている。さらに、高水敷上流れの水深と速度が大きなDr=0.50の場合には、低水路中央の洗掘域は大きく、深くなるとともに、低水路蛇行頂部（apex）付近にも洗掘

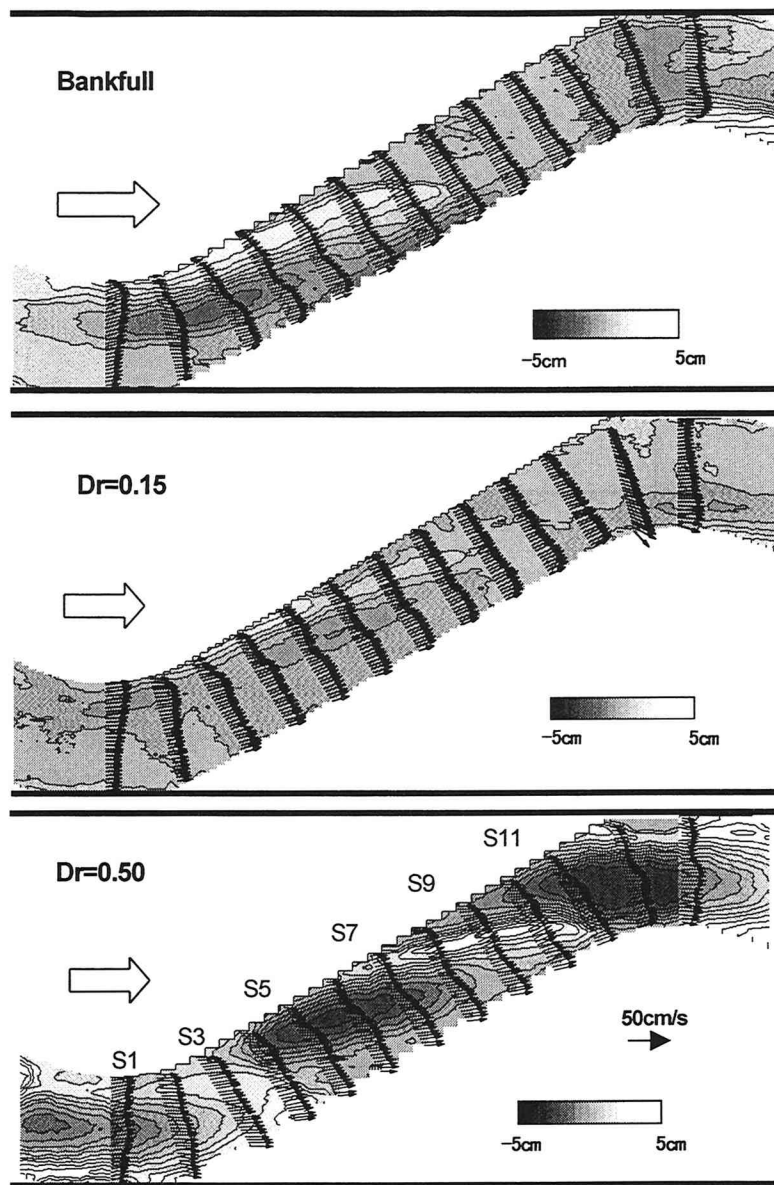


図-1 最終河床形状計測結果

域が形成されている。また、これらの洗掘域は、堆積域で分断されている。この現象について、固定床実験で得られた流れの構造に関する知見^{1)・2)}に基づいて考察すると、低水路を移動床とした場合には、複列のらせん流によって形成された堆積域が、それぞれの構造を分断するという結論が得られる。

つぎに、河床形状の発達状況について、 $Dr=0.50$ の結果を用いて検討する。図-1に示した6断面(S1, S3, S5, S7, S9, S11)において計測した河床高データを用い、初期平坦河床からの高さ y' 、および河床材料の比重と球形として求めた空隙率から堆積量と洗掘量を算定し、その差を各断面について整理したものが図-2である。図より、S3とS9断面で堆積が卓越、S5とS11断面では洗掘が卓越域、その間は堆積と洗掘がバランスする区間となっている。S5とS9の結果がバランスしていることより、S5で洗掘されたものがS9に運ばれて堆積していることが分かる。

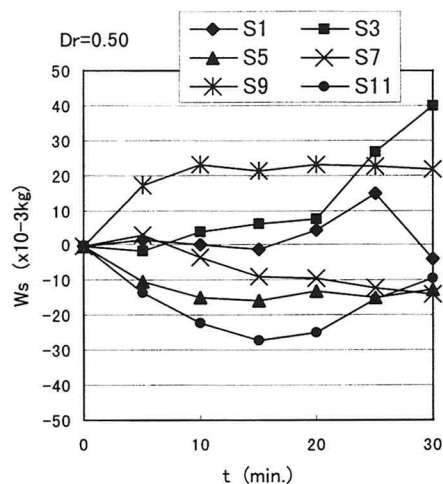


図-2 (堆積量+洗掘量)の経時変化
($Dr=0.50$)

(2) 2次流構造

ここでは、2次流構造を、 $Dr=0.50$ の可視化結果を用いて検討する。図-3および図-4は、それぞれ、cross-over部(S5~S7)およびapex付近(S1)の横断面流況を下流側から可視化した結果であり、図の左が右岸、右が左岸である。また図中に、横断面形状を併示した。

図-3のcross-over部では、図の右側から中央に向かって洗掘域が存在し、その両側に堆積域が形成されている。ここには、右図と中図の黒矢印で示される反時計回りの強いらせん流が存在し、それは、洗掘域を水路中央に向かって形成しながら発達して行く。また、上層の流れは、らせん流の発達を促しながら低水路底面に向かい(右図左矢印)、その後、堆積域の斜面に沿って上昇して高水敷に乗り上げている(中図左矢印)。なお、左図の破線で示した矢印は、上流側のapex付近の洗掘域から高水敷に乗り上げる流れを示す。

図-4のapex付近には、上流側で形成された時計回りに

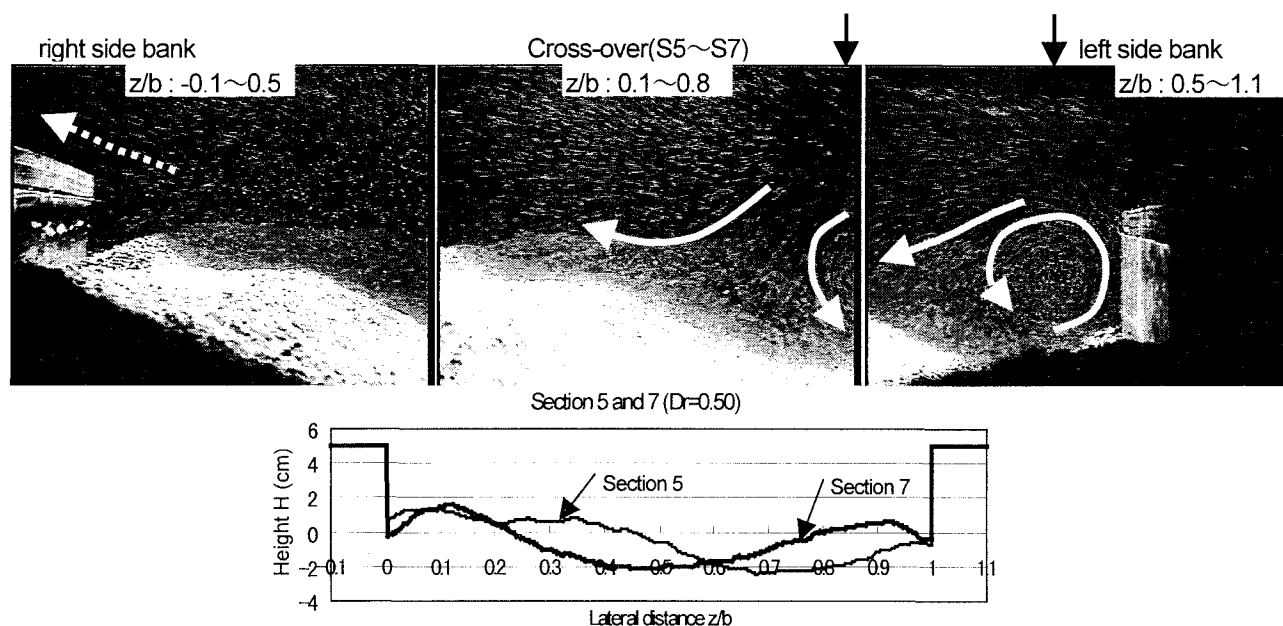


図-3 Cross-over部(S5~S7)の横断面内で可視化された2次流と河床横断形状

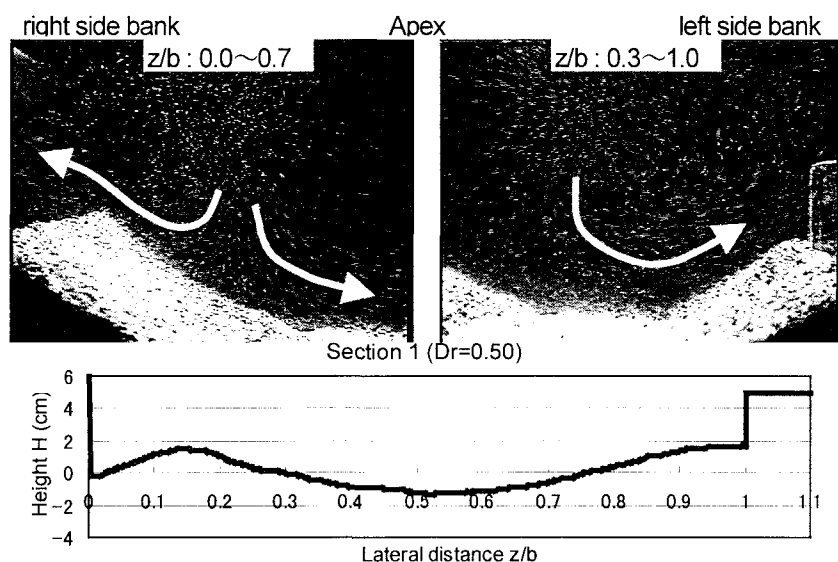


図-4 Apexの横断面内で可視化された2次流と河床横断形状

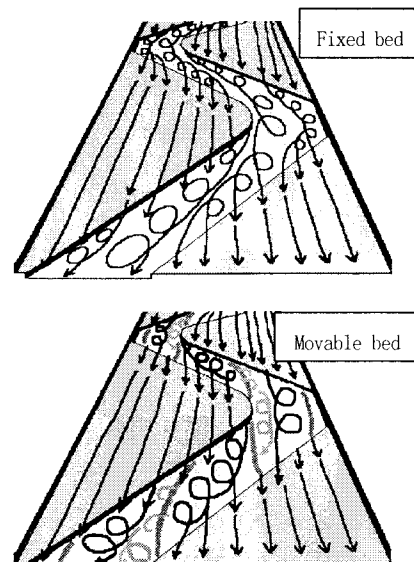


図-5 低水路が固定床の場合と移動床の場合の2次流構造

回転するらせん流によって形成された洗掘域と堆積域（図の左側）が存在している。このらせん流は、堆積域の斜面に沿って上昇しながら下流側の高水敷に乗り上げ、減衰して行く（左図左矢印）。また、そのカウンターとして反時計回りに回転する強いらせん流が右側の斜面に沿って形成されている（右図矢印）。目視によると、このらせん流は、apex上流側の堆積域を超えて再付着する低水路内の流れと、上流の高水敷上から低水路に乗り入れた流れが作る右岸側のらせん流のカウンターとしての流れが重ね合わさって形成されているのが観察された。

以上のように、低水路を固定床とした場合の流れと移動床とした場合の流れの構造は異なっており、その差異を図化したものが図-5である。なお、図中、低水路内の矢印付き実線はらせん流を、薄い矢印付きはそのカウン

ターとして形成されるらせん流を、高水敷に乗り上げた流れを矢印付きの破線で表している。

4. 流量変化時の河床形状

前章までの結果より、低水路を移動床とした場合も相対水深により構造が変化することが分かった。ここでは、流量変化に伴う河床形状の変化について検討する。流量増加時のケースとして、bankfullの状態初期の平坦河床より1時間通水し、その後3分の間に、 $Dr=0.50$ の条件に変化させ、25分後に通水を停止する実験を行った。また、流量減少時のケースとして、平坦河床から $Dr=0.50$ の条件で22分間通水した後、3分の間に

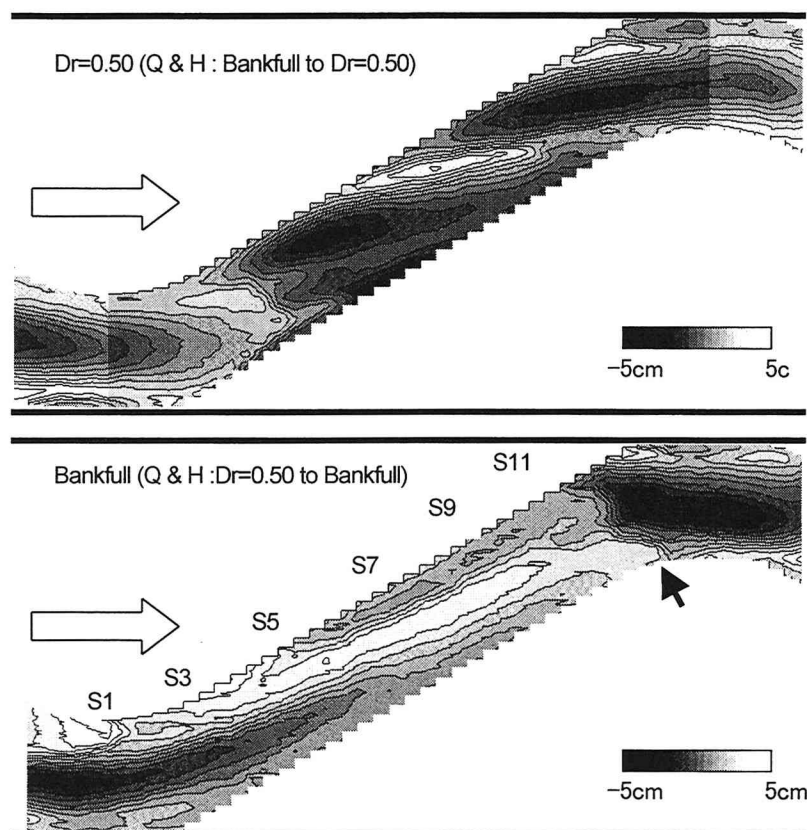


図-6 流量増加時（上段）および流量減少時（下段）の最終河床形状

bankfullの条件に変化させ、44分後に通水を停止させる実験を行った。いずれの実験においても、5分あるいは10分間隔で河床の横断形状を測定し、変化状況を把握するとともに、通水停止時期の判断材料とした。

図-6は、通水停止後に流下方向測線間隔4cmで計測した結果を等高線表示した最終河床形状である。上段が流量増加時(Bankfull to Dr=0.50)、下段が流量減少時(Dr=0.50 to Bankfull)の結果である。流量増加時の結果と図-1（下段：Dr=0.50）に示した流量一定時の結果を比較すると、両者に顕著な差異は見られない。また、経時変化の比較からも差異は見られず、流量変化後の5分～10分間にはほぼ最終形状に近い河床形状となった。一方、下段の流量減少時の結果と図-1（上段：Bankfull）を比較すると、定性的には同様の特性を示しているものの、apex付近の洗掘形状や深さおよびapexから下流に発達する堆積域の広がりなどに差異が見られる。特に、apex近傍の洗掘形状の差異が顕著であり、その上流端は断落部となっており（図中矢印）、洗掘深も流量一定時の結果より大きくなっている。これは、流れの構造に起因するものであり、観察結果と前章の2次流構造から、つぎのような説明ができる。すなわち、断落部で剥離した流れは、bankfull状態で生じる遠心力に起因する2次流と重なり、より強い2次流となって洗掘深を増加させるとともに洗掘範囲を下流方向に拡大させる。

図-6の2つの図を比較して見ると、Dr=0.50の河床形状（上段の結果を参照）からbankfullの河床形状への変

化を説明するためには、cross-over部での埋め戻し状況などを検討することが必要と考えられる。図-7は、流量を変化させた時点をと0として10分毎の横断面形状計測結果を整理したものである。図より、apex（S1断面）では内岸側の堆積域が発達、洗掘域がその深さを大きくしながら外岸側に移動しつつ下流のS3断面まで拡大して行く状況が捉えられており、流量変化に伴う流れの構造変化に河床形状が追従して行く様子が伺える。一方、cross-over部（S5～S11）の結果より、流量減少後にS5～S9に向けてapex付近から発達する堆積域によって上流側から順次に埋め戻されて行くこと、S9～S11では河床が平坦化することなどが分かる。

以上の結果より、流量増加時にはそれぞれの流量に対応した河床形状に移行して行くが、流量減少時には、流量が大きな場合の影響が残る、洗掘範囲や深さの大きくなることが指摘される。

5. おわりに

本研究で得られた主な結果を列挙すると以下のようである。

- 1) 福岡ら⁵⁾の結果と同様、相対水深による河床形状の差異が認められた。これは、流れの構造の水深依存性で説明される。また、2次流構造が河床形状を形成するとともに、形成された河床形状により2次流構造が

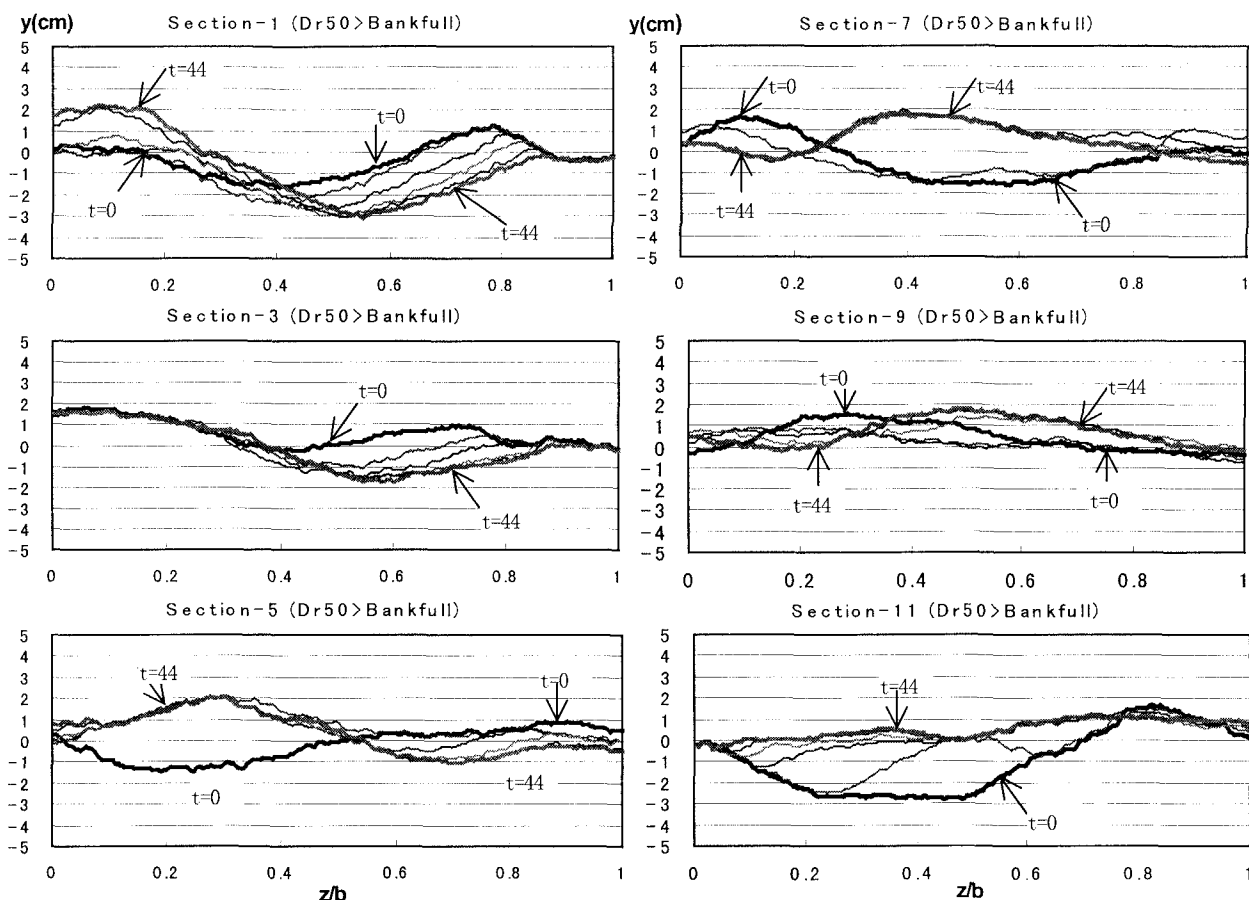


図-7 河床形状の経時変化 (流量減少時: $Dr=0.50 > \text{Bankfull}$)

変化し、両者が相互に影響することが確認された。

- 2) 水深の大きな場合 (複断面的蛇行流れになる場合) には、洗掘域および堆積域が対岸にまで発達し、流れの構造が分断される。この場合、低水路内では、堆積域を越える流れが新たな2次流を形成する。
- 3) Bankfullから $Dr=0.50$ への流量増加時における河床形状は変化が早く、河床形状が福岡ら⁵⁾の言う単断面的蛇行流れによる形状から複断面的蛇行流れによる形状に移行する。
- 4) $Dr=0.50$ からBankfullへの流量減少時における河床変化は緩やかである。この場合、最終河床形状には複断面的蛇行流れによる河床形状の影響が残る、蛇行頂部付近での洗掘深や範囲が大きくなる。ここでは、2) で述べた堆積域を越える流れが作る2次流と、遠心力に起因する2次流とが合わさった強い2次流が洗掘を促進するためである。また、cross-over部の洗掘域は、apexから下流に発達する堆積域により埋め戻され、時間の経過とともに消滅するため、洪水の痕跡として残らない可能性が高い。

本研究で対象とした低水路のみが蛇行する複断面流れの2次流構造および河床形状は、低水路の蛇行度やアスペクト比などが影響すると考えられるため、今後は、蛇

行度の異なる水路および低水路のアスペクト比が大きな水路における検討を行っていく予定である。

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, 土木学会, 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) Shiono, K., Ishigaki, T., Muto, Y. and Imamoto, H.: Bed shear stress in meandering channels for overbank flows, Proc. of 28th IAHR Congress, p. 262, 1999 (on CD-ROM).
- 4) 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れ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.
- 5) 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.

(1999. 9. 30受付)