

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

FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN A COMPOUND CHANNEL
CONSISTING OF DIFFERENT PLAN SHAPES

岡田将治¹・JULIO MASIS JIMENEZ²・福岡捷二³・田村浩敏⁴・重松 良⁵

Shoji OKADA, Julio MASIS JIMENEZ, Shoji FUKUOKA,
Hirotoshi Tamura and Ryo SHIGEMATSU

¹正会員 博士(工) 広島大学大学院 助手 工学研究科 社会環境システム専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²学生会員 修士(工) 広島大学大学院 工学研究科 博士課程後期 環境工学専攻 (同上)

³フェロー 工博, Ph.D. 広島大学大学院 教授 工学研究科 社会環境システム専攻 (同上)

⁴正会員 修士(工) 広島大学大学院 助手 工学研究科 社会環境システム専攻 (同上)

⁵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 (同上)

In the previous studies on compound channel flows, experimental channels of simplified plan shape, straight or uniform sinuosity have been used. However, rivers generally consist of reaches of different plan shapes continuously. Therefore, it is important to clarify as a whole effect of channel shape and hydraulic condition on flow and bed formation. In this paper, effects of plan shape and relative depth on sediment discharge were examined. And characteristics of flow and bed topography were investigated in a compound channel consisting of different plan shape (straight, curved and meandering). As the results, sediment discharge in compound straight and meandering channel showed a different manner with relative depth variation. And flow and bed topography were affected mainly by the upstream channel shape. Especially, at transition section from straight to meandering maximum scouring occurred due to non-equilibrium of sediment discharge with large relative depth.

Key Words: compound river, relative depth, maximum velocity filament, maximum scouring depth, sediment discharge

1. 序論

複断面流路では、低水路内の流れと高水敷上の流れとの混合によって、流れの構造が低水路のみを流れる単断面流路と大きく異なる。すなわち、低水路の蛇行度 S や相対水深 Dr (=高水敷水深/低水路全水深)によって、最大流速が外岸寄りに現れる単断面的蛇行流れと低水路中央寄り現れる複断面的蛇行流れが生じ、それに伴い河床変動特性が異なることが明らかにされている¹⁾。渡邊ら²⁾は、非静水圧 3次元解析モデルを用いることにより、これらの流れや河床変動特性を概ね説明している。岡田・福岡ら³⁾は、複断面蛇行水路で得られた実験結果と実河川の洪水流を統一的に説明するために、蛇行度 S と相対水深 Dr を用いて、最大流速線および最大洗掘の発生位置に基づいた洪水流の特性区分図を提案し、この2つの指標を用いて、洪水流の特性を簡易的に把握できることを示した。また、一様な蛇行低水路をもつ複断面流路における流砂量は、低水路満杯程度で最大となり、相対水深が大きくなると、低水路と高水敷間で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⁴⁾⁵⁾。既往の研究では、主に低水路幅が一定で、一様に蛇行する単純化された複断面流路を対象としてきた。しかし、実河川では異なる平面形が縦断的に連なっている場合が一般的である。最大流速線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、一様に蛇行する場合に比して、流砂量の非平衡性が強まり、河床高の縦横断変化が大きくなると考えられる。複断面流路における洪水流および河床変動に関する知見は、河道の平面形や横断面形を計画したり、河川構造物の設計を行ううえで重要である。本研究では、はじめに、複断面直線流路と複断面蛇行流路において、相対水深の増大に伴う流砂量特性を実験的に明らかにする。つぎに、直線、湾曲および蛇行等の平面形が縦断的に変化する、より実河川の平面形状に近い複断面流路において相対水深を変化させた実験を行うことによって、流れ場や河床変動の機構を明らかにする。

表-1 複断面水路の諸元および実験条件

水路	全水路長(m)	全水路幅(m)	蛇行度 $S(=L_m/L)$	最大偏角 $\theta_{max} (^{\circ})$	蛇行長 $L_m(m)$	蛇行波長 $L(m)$	低水路幅 $b_{nc}(m)$	初期河床勾配 I	高水敷高 $h(m)$	相対水深 $Dr(=(H-h)/H)$
直線	27.5	1.5	1.00	0.0	—	—	0.9	1/350	0.06	0.0, 0.33, 0.45
蛇行 A	15.0	4.0	1.028	19.0	4.73	4.6	0.4	1/600	0.055	0, 0.27, 0.40
蛇行 B			1.10	35.0	7.50	6.0	0.8			0, 0.26, 0.31, 0.44, 0.49

2. 複断面直線流路および複断面蛇行流路における平衡流砂量

表-1 に各水路の諸元および実験条件を示す。蛇行水路は堤防法線形が直線で、その中に *Sine-generated curve* で一樣に蛇行する低水路を有している。本実験では、蛇行長 L_m 、最大偏角 θ_{max} および低水路幅を変化させた 3 種類の水路を用いている。河床材料には、粒径 0.8mm の一様砂を用い、高水敷には粗度付けのために人工芝 ($n_{fp}=0.018$) を貼っている。水理条件は、相対水深 Dr (高水敷水深/低水路全水深) を変化させ、単断面蛇行流れ ($Dr=0$)、単断面的蛇行流れから複断面的蛇行流れに遷移する流れ ($Dr=0.30$) および複断面的蛇行流れ ($Dr=0.40$) を想定した、全 11 ケースの定常流実験を行っている。各ケースについて、水位、河床高および下流端における流砂量の経時変化を測定し、平衡状態に達したと考えられる 7~20 時間程度まで通水を行っている。また、直線水路では下流端の流砂量に応じて上流端から付加的な給砂を行っているが、蛇行水路では上流部の一波長を給砂区間と考え、付加的な給砂を行っていない。

図-1 は、各実験ケースについて水路下流端で測定された無次元平衡流砂量を無次元掃流力に対してプロットしたものを示す。ここに、摩擦速度 u_* は近似的に低水路の平均水深 H と平均勾配 I を用いて $u_* = \sqrt{gHI}$ から求めている。複断面直線流路では、相対水深が大きくなるほど掃流力は大きくなり、それに伴い流砂量は増加している。一方、複断面蛇行流路の水路 A ($S=1.028$) および水路 B ($S=1.10$) では、流砂量は共に低水路満杯流の $Dr=0$ の場合で最大となっている。相対水深の増大とともに高水敷流れの流入による混合によって、低水路内の流速が小さくなり、流砂量が減少する傾向が見られる。蛇行水路 A と蛇行水路 B の無次元流砂量を比較すると、同程度の相対水深に対して、水路 B の方が大きくなっている。両者の差は、相対水深が小さく、遠心力に起因する二次流が卓越する単断面的な蛇行流れ特性を示す条件で特に顕著に見られる。

これらの実験結果と芦田・道上の流砂量式⁹⁾を比較すると、単断面流れ ($Dr=0$) では流砂量式を用いて概ね説明することができるが、複断面流れでは同じ無次元掃流力に対して無次元流砂量は小さくなっている。これは、複断面直線流路では低水路と高水敷の境界部に生じる大規模平面渦の影響により、低水路河岸際の河床波の波高が大きくなり、水路全体の抵抗が増加したためと考えられ

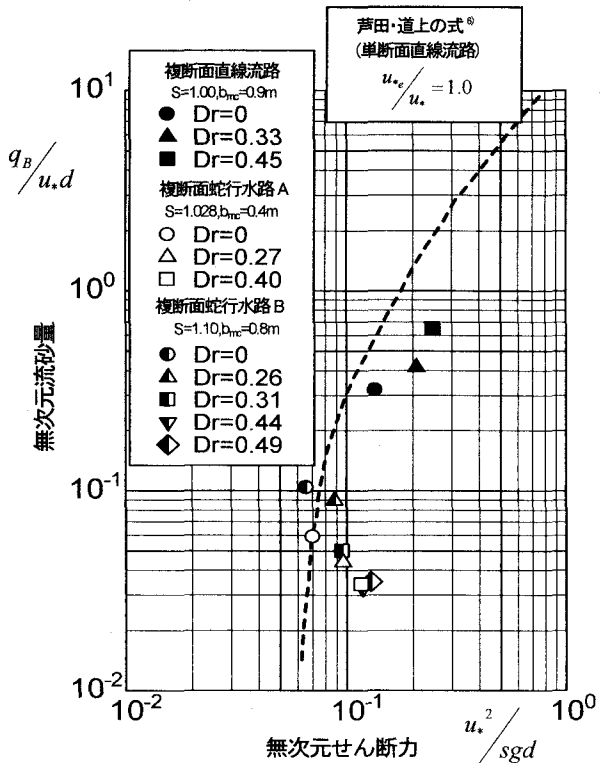


図-1 複断面流路における無次元せん断力と無次元流砂量の関係

る。複断面蛇行流路の流れにおいても、高水敷流れの流入による付加的な抵抗増加の機構が無次元掃流力に反映していないことが原因と考えられる。複断面蛇行流れの低水路底面に働くせん断力分布は、複雑な特性を持つことが河床付近のレイノルズ応力分布からも示されている。複断面蛇行流路における流砂量の正しい評価のためには、低水路底面に働くせん断力と流砂量の評価方法の確立が今後の重要な課題である。

3. 平面形が縦断的に変化する複断面流路の流れと河床変動

2 章において、一樣な複断面流路では低水路の平面形状によって相対水深の増大に伴う流砂量特性は大きく異なることを示した。このことは、異なる平面形が連続する複断面河道の河床変動を考える際には当該平面形状区間だけでなく、その上下流区間の影響も合わせて検討することが重要であることを示している。3 章では、直線や湾曲、蛇行流路が組み合わされた、より実河川に近い複断面流路⁹⁾を用いて流れと河床変動を明らかにする。

表-2 実験条件

	Case1	Case2	Case3
相対水深 Dr	0	0.25	0.40
流量(l/sec)	10.6	16.0	30.0

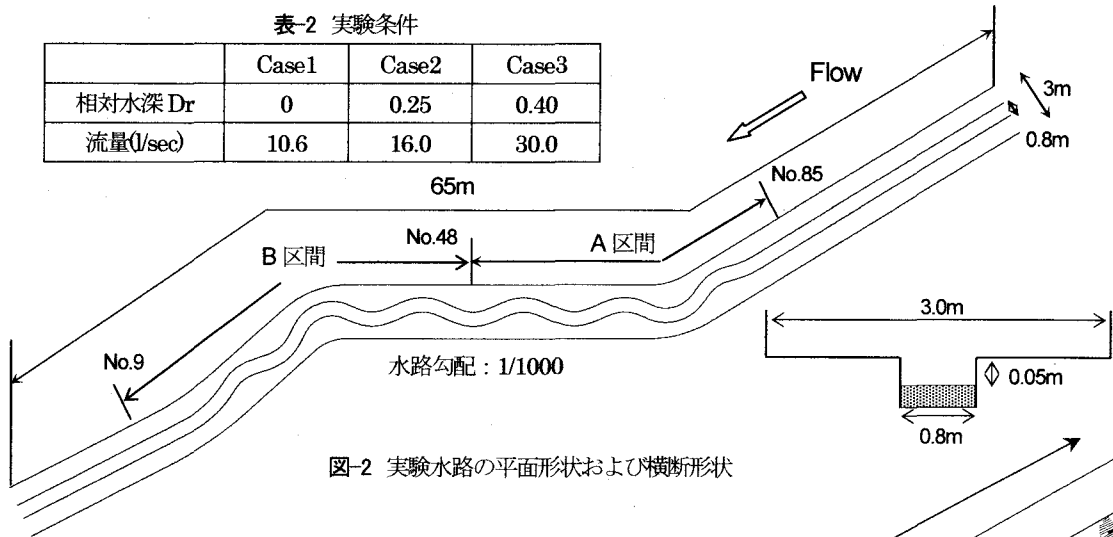


図-2 実験水路の平面形状および横断形状

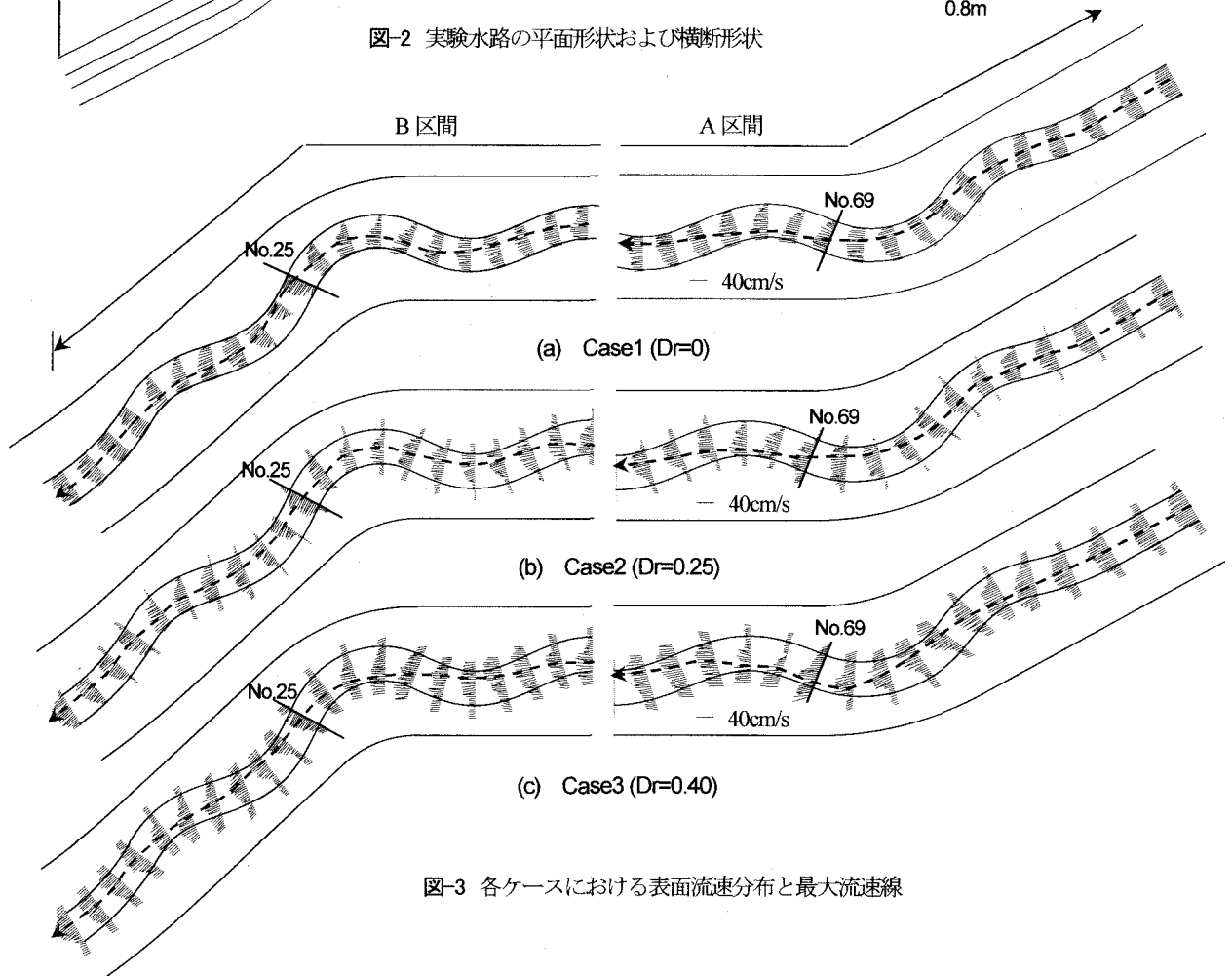


図-3 各ケースにおける表面流速分布と最大流速線

(1) 実験概要

図-2 に実験水路の平面形状および横断面形状を、表-2 に実験条件を示す。全長 65m、水路幅 3m、低水路幅 0.8m、水路床勾配が 1/1000 であり、上下流部に直線区間、中流部に蛇行区間およびこれらを接続する湾曲区間がある。一様蛇行区間には *Sine-generated curve* で蛇行する低水路が 2.5 波長あり、最大偏角 $\theta_{max}=22.5^\circ$ 、低水路蛇行度は $S=1.04$ である。初期高水敷高を 0.05m とし、河床材料には比重 2.59、粒径 0.8mm の一様砂を用いている。また、水路最上流の直線部(長さ 15m)は給砂区間と考え、

上流端からの付加的な給砂は行っていない。水理条件として相対水深 Dr (=高水敷水深/低水路全水深)を変化させ、低水路満杯流れ $Dr=0$ (Case1)、一様な複断面蛇行流れにおいて単断面的蛇行流れが現れる $Dr=0.25$ (Case2) および複断面的蛇行流れが現れる $Dr=0.40$ (Case3)の3ケースを行った。それぞれのケースについて、平坦河床の状態から、水位、河床高を経時的に測定し、ほぼ平衡状態となったと考えられる 20 時間まで通水を行っている。

(2) 平面形状、相対水深の違いが流れ場に及ぼす影響

図-3 にトレーサー(釣り用ウキ、直径 10mm)を用い

て測定した各ケースの表面流速分布と最大流速線を示す。上流側の流路線形が流れ場に及ぼす影響を調べるために、①直線複断面から湾曲複断面さらに蛇行複断面に変化する河道 A 区間と②蛇行複断面から湾曲複断面さらに直線複断面へと変化する河道 B 区間に着目した。

A 区間の最大流速線の発生位置は、Case1($Dr=0$)とCase2($Dr=0.25$)では、ほぼ同じ位置に生じており、相対水深の増大による影響は見られない。しかし、Case3($Dr=0.40$)では、湾曲部 No.69 付近の左岸高水敷上において、堤防に向かう流れが生じている。これは上流側の流路線形および相対水深の増大に伴う流れの直進性が強まることによる。B 区間では、Case1($Dr=0$)の場合、遠心力的作用によって最大流速線が若干外岸寄りに生じている。複断面流れになる Case2($Dr=0.25$)および Case3($Dr=0.40$)では、上流側蛇行部の最大流速線が水路中央から内岸寄りに現れ、No.25 右岸では、No.69 左岸で見られた流れに比べて水あたりの大きさは弱くなっている。

これは B 区間湾曲部の上流側にある一様複断面蛇行水路においては、高水敷上の遅い流れが低水路内に流入することにより、流れの抵抗が大きくなり、複断面湾曲部低水路外岸への影響が A 区間に比して小さくなることによる。このことは、当該区間の上流側にある水路平面形状の違いが流れ場に影響を及ぼしていることを示している。特に、A 区間のように直線部から湾曲部に移行する平面形状をしている河道では、流れが外岸に集中し、低水路河岸際に深掘れが生じやすいために、堤防が低水路に接近しているところでは、河川管理上のネック部になる可能性が高い。

(3) 平面形状、相対水深の違いが河床変動に及ぼす影響

a) 平衡状態に達するまでの河床高変動

A 区間では、低水路線形が直線から湾曲部を挟んで一様蛇行部に移行しているため、それぞれの区間の土砂の輸送力は縦断的に大きく変化し、河床高は時空間的に変動することになる。図-4 に各ケースの通水開始から 20 時間後までの横断平均水位と最深河床高の縦断分布を示す。縦軸は下流端に設けた基準点からの高さを示している。これらの図から、相対水深が大きくなるほど、断面 No.69 付近において、時間とともに洗掘深は大きくなり、縦断河床高の変動幅が大きくなっている。Case1($Dr=0$)の低水路満杯流れでは、他のケースに比して洗掘深は小さくなく、縦断方向の河床高の変動幅も小さい。相対水深が、Case2($Dr=0.25$)、Case3($Dr=0.40$)と大きくなるほど、直線部から水当たりが強く、掃流力も大きくなるため、湾曲部外岸の洗掘深も徐々に増大している。河床高の経時変化をみると、Case2($Dr=0.25$)では通水 3 時間後ではほぼ安定しているのに対し、Case3($Dr=0.40$)では縦断的に大きく変化している。図-5(c)の通水 20 時間後の河床変動コンターに示すように、最大洗掘が生じた No.69 の直下流部では、上流の直線部から運ばれてきた大量の土

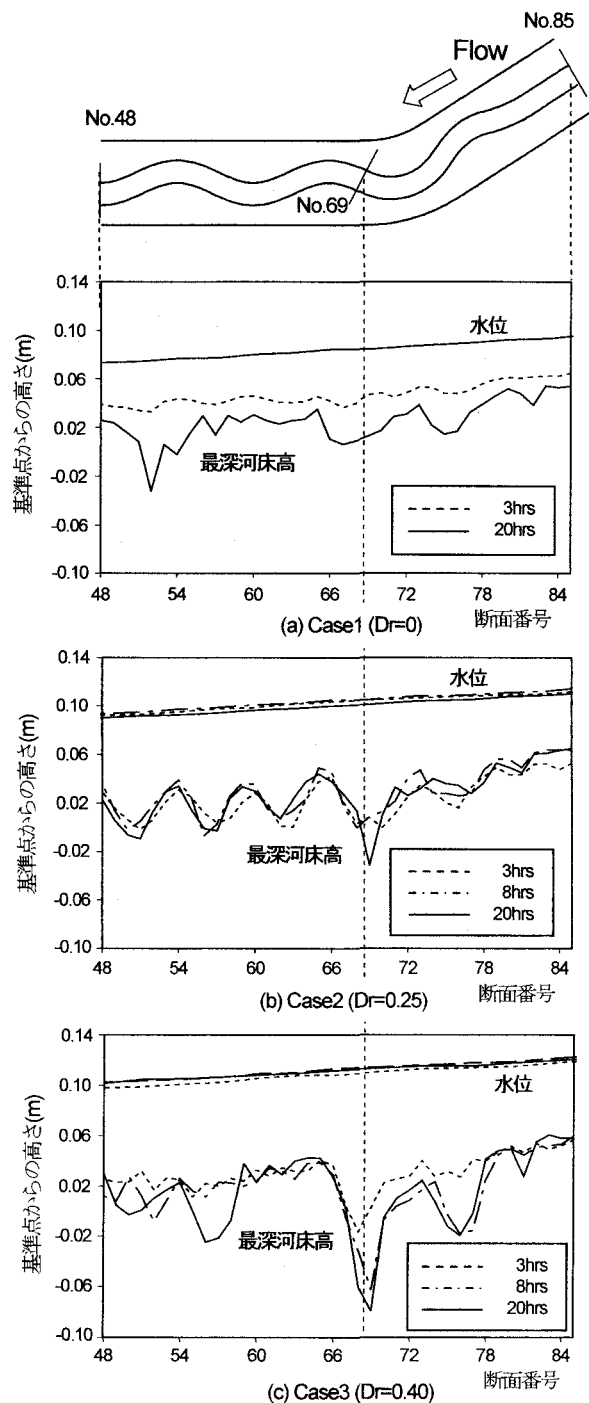


図-4 各ケースにおける水位と最深河床高の縦断分布の経時変化(通水 20 時間後まで)

砂が広範囲に渡って堆積するため、洗掘深が減少している。その堆積によって上流側からの土砂の流入量が当該部からの流出量に比して少なくなるため、下流側に新たな洗掘が生じている。以上より、2 章の実験結果と併せてまとめると、低水路平面形が直線から蛇行に変化する複断面流路において、相対水深 Dr が 0.25 程度の水理条件では、直線部と蛇行部における流砂量の差が小さいため、比較的短時間で流れに応じた安定河床を形成する。しかし、相対水深がさらに大きい $Dr=0.40$ では、掃流力が直線部で増加、蛇行部で減少するために、流砂量の非平衡

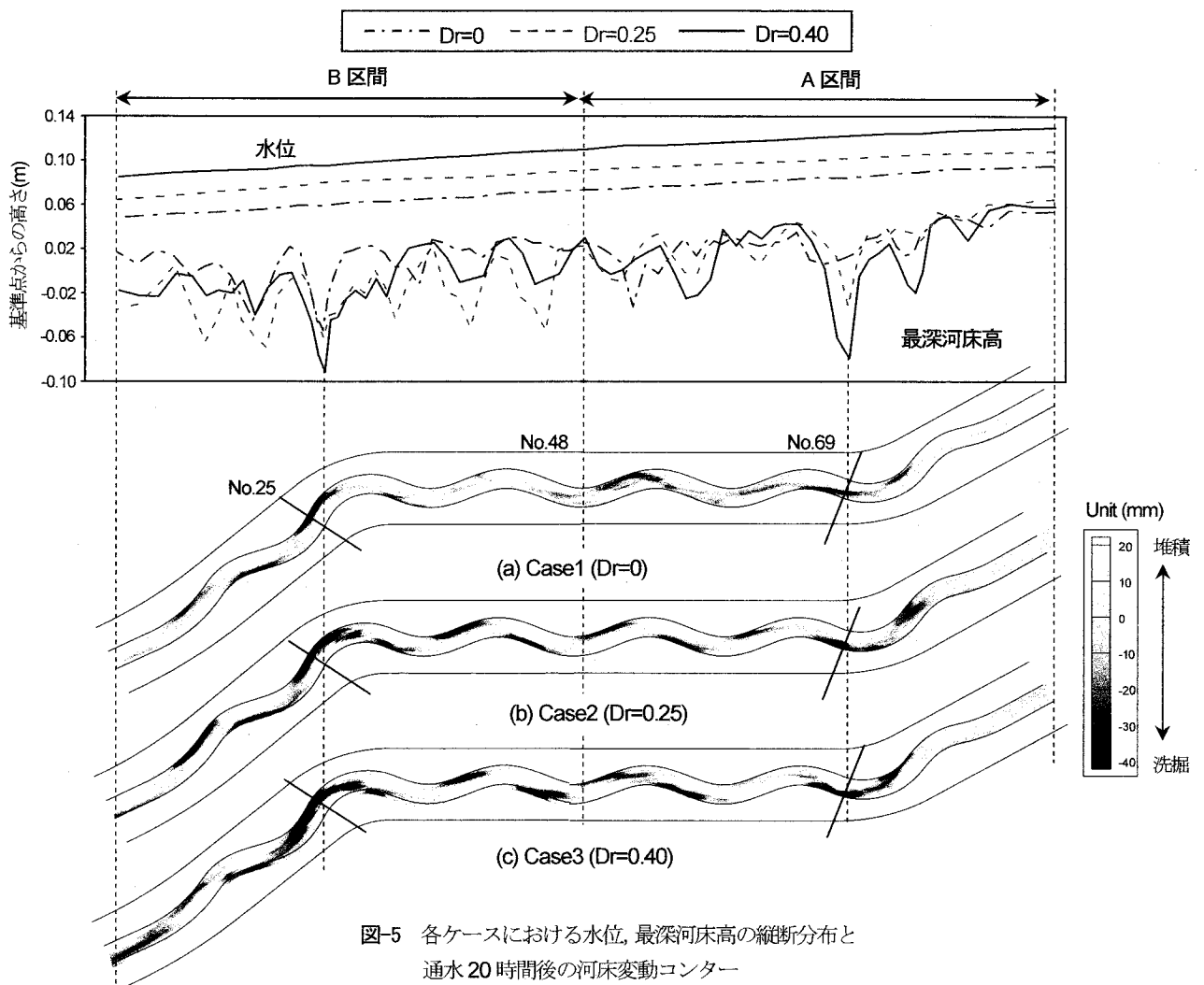


図-5 各ケースにおける水位、最深河床高の縦断分布と
通水 20 時間後の河床変動カウンター

性が強まり、河床高の変動幅が大きくなる。また、掃流力の小さい蛇行部に上流の直線部から過剰な土砂が供給されるために、安定河床を形成するまでに時間を要する。

b) 各相対水深における平衡河床形状

図-5 に平坦河床から、ほぼ平衡状態に達した通水 20 時間後の河床変動カウンターおよび水位と最深河床高の縦断分布を示す。湾曲部(No.25, No.69)付近の河床形状を比較すると、Case3(Dr=0.40)では、流れの集中が顕著に見られた No.69 において、最大洗掘深が若干大きくなっているが、洗掘範囲は No.25 が大きい。また、Case1(Dr=0), Case2(Dr=0.25)では、最大洗掘深、洗掘範囲ともに No.25 の方が No.69 に比して大きい。これらの理由は、同一流量の条件では、複断面直線水路に比べ複断面蛇行水路の方が土砂の移動量が少ないため、B 区間では A 区間に比べ上流からの当該区間への土砂の流入量が流出量に比して少なくなったためと考えられる。

相対水深の違いによる平衡河床形状を比較すると、最大洗掘深は Case1(Dr=0) が他のケースに比して小さくなっている。上流側の A 区間では、a)で示したように上流側の水路平面形状の影響を受けた河床形状となり、相

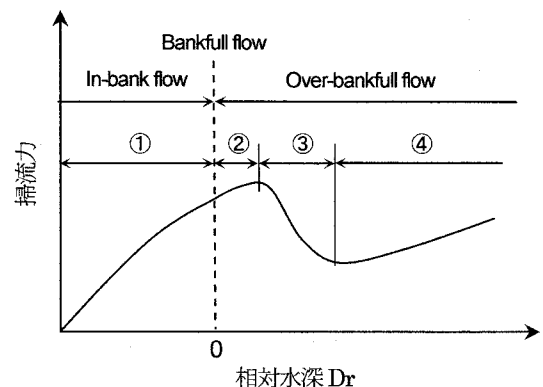


図-6 複断面蛇行流路における相対水深と掃流力の関係
(概念図)

対水深が大きくなるほど、水当たりが強くなり、洗掘深も大きくなっている。一方、B 区間の一樣な蛇行区間では Case1(Dr=0)の低水路満杯流れよりも Case2(Dr=0.25)において洗掘深が大きく、Case3(Dr=0.40)では高水敷からの流入による影響によって掃流力が減少し、洗掘深が小さくなっている。このことから、水路のほぼ中央の断面 No.48 の上下流区間で異なる河床変動が生じているのがわかる。

c) 複断面蛇行流路の洗掘深に及ぼす平面形状、横断面形状および水理条件の影響

既往の実験的研究において、一様な蛇行低水路をもつ複断面蛇行流路では、低水路満杯流、またはそれをやや超える単断面的蛇行流れで掃流力が最大となり、最大洗掘が生じることが多いと報告されている。本実験の一樣蛇行区間のB区間では、Case2(Dr=0.25)の相対水深がやや大きい単断面的蛇行流れの場合がより大きな洗掘が生じている。そこで、複断面蛇行流路の掃流力、洗掘深に及ぼす平面形状、横断面形状および相対水深Drの影響を考察する。

図-6に複断面蛇行流路における相対水深Drと掃流力の関係(概念図)を示す。複断面流れの掃流力は、低水路内の流量(特に高水敷高さより下層の流量)に関係する。単断面流れでは、遠心力に起因する二次流の発達が生じ、洗掘深に影響を及ぼすため、高水敷高さや低水路線形が重要な諸元となる。したがって、掃流力は水深が大きいほど増大し、低水路蛇行度が大きいほど、洗掘深は大きくなる(図-6①)。しかし、蛇行度が大きい流路であっても、低水路幅と蛇行帯幅の比(b_m/B_m)が0.5を超える場合には、水路中央部に直線的に流れる部分が現れ、二次流が発達しにくくなるのが著者らの複断面蛇行河道の平面形状特性を調べた結果⁹⁾から示されている。3章で用いた水路中央部の b_m/B_m は、0.51であり、二次流の発達しにくい条件であったことから、Case1(Dr=0)における洗掘深が複断面流れのケースに比して小さくなったと考えられる。複断面流れになると、高水敷から低水路への流入が、低水路内流量にどの程度影響を及ぼすかによって掃流力が変化する。すなわち、高水敷からの流入による影響よりも、水路全体の流量増加によって低水路内流量が増加すれば、低水路満杯流れよりも相対水深が大きいケースで流砂量が最大となる(図-6②、③)。このことは、低水路満杯流から流量を徐々に増加させると、高水敷上の流れは粗度の影響によって冠水してもすぐには流速を持たず、ある相対水深まで、流量の増加分が主に低水路内流量に寄与するという実験結果からも確認されている。さらに高水敷水深が大きくなる図-6④では、低水路線形の影響が小さくなって、掃流力は再び増加する。高水敷からの流入に影響する諸元としては、高水敷粗度、高水敷幅、流れの混合が生じる蛇行帯幅(蛇行振幅)と低水路幅(和)等がある。高水敷粗度が大きいほど遅い流れが低水路に流入し、蛇行度が大きいほど低水路流れと高水敷流れの交差角が大きくなるため、流れの混合が強まり掃流力は減少する。このように、複断面蛇行流路では、低水路の平面形状、横断面形状および高水敷の粗度等の河道条件と水理条件が組み合わさることにより、低水路内の流れと洗掘深が決まる。本研究の2章で用いた実験水路の諸元が、わが国の複断面河道の平面形状特性⁹⁾および横断面形状特性¹⁰⁾の範囲内であることを考慮すれば、わが国の多くの複断面蛇行河川では、工学的には相対水深が

Dr=0より少し大きいところで最大流砂量、最大洗掘深が生ずると考えてよい。

5. 結論

- (1) 複断面流路では、同じ水理条件であっても低水路の平面形状によって異なる流砂量特性を示す。流路平面形が大きく変化する区間では、流砂量の非平衡性が強まり、河床高の縦横断変化が大きくなる。
- (2) 平面形状が縦断的に変化する複断面流路では、当該区間の上流側にある水路平面形状の違いが流れと河床変動に影響を及ぼす。特に、直線部から湾曲部に移行する平面形状をなす流路では、流れが集中しやすく、最大洗掘深が大きくなる。このような箇所では、堤防と低水路が接近している場合には、河川管理上、ネック部になる可能性が高い。
- (3) 単断面的蛇行流れが現れる相対水深Dr=0.25では、平面形状が縦断的に変化することによる掃流力の変化は小さく、比較的短時間で流れに応じた安定河床を形成する。しかし、相対水深がさらに大きくなるDr=0.40の場合には、掃流力の縦断的な変化が大きくなるために、縦断河床高の変動幅が大きくなる。また、掃流力が減少する蛇行区間に過剰な土砂が供給されるために、安定河床を形成するまでに時間を要する。
- (4) 複断面蛇行流路における掃流力や洗掘深に及ぼす平面形状、横断面形状および高水敷粗度等の河道条件と水理条件の影響を本研究の実験結果と併せて考察し、実験に用いた水路諸元がわが国の複断面蛇行河道の平面形状および横断面形状特性をほぼ満たしていることから、わが国の多くの複断面蛇行河川では、相対水深がDr=0より少し大きいところで最大流砂量、最大洗掘深が生ずると考えてよいことを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二、小俣篤ら：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) 渡邊明英、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.
- 3) 岡田将治、福岡捷二ら：複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度、相対水深を用いた洪水流の領域区分、水工学論文集第46巻, pp.761-766, 2002.
- 4) 福岡捷二、渡邊明英ら：複断面蛇行流路における流砂量、河床変動の実験的研究、水工学論文集第41巻, pp.883~888, 1997.
- 5) T. Ishigaki, K. Shiono et al: 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.
- 6) 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.
- 7) 渡邊明英、福岡捷二ら：複断面蛇行水路における底面せん断応力分布、土木学会第57回年次講演会論文集, II-82, 2002.
- 8) 福岡捷二、川口広司ら：複断面直線流路に設置された不透水管制の機能と抵抗、水工学論文集第46巻, pp.481~486, 1997.
- 9) 福岡捷二ら：異なる平面形が連なる複断面河道の流れと河床変動、土木学会第57回年次学術講演会論文集, II-222, 2002.
- 10) 福岡捷二、藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用、土木学会論文集, No.411/II, 1983.

(2002. 9. 30受付)