

複断面蛇行流路における流砂量、河床変動の実験的研究

Study of rate of bed load and bed topography in a Meandering Compound Channel

福岡捷二*・渡辺明英**・加村大輔***・岡田将治****

By Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Daisuke KAMURA and Shoji OKADA

Bed topography during flood is very important problem for river planning. In this research, we paid attention to the amount of sediment transported and bed variations in the meandering compound channel with movable bed and examined them by changing flow rate, that is, water depth of flood channel. It is clarified by this experiment that a compound meandering flow and a simple meandering flow can exist in a compound meandering channel. Bed change mechanism of real river is considered using the result of the present laboratory experiment.

Keywords: meandering compound channel, bed topography, rate of bed load, flood channel depth

1. 序論

複断面蛇行流路において、高水敷上にもある水深以上で洪水が流れる場合には、低水路内の最大流速は内岸から内岸の最短経路に現れ、低水路内の二次流のセルは単断面蛇行流れの場合とは逆になること、河床の内岸側が洗掘され外岸河床はほとんど洗掘されないこと、最大洗掘深が単断面蛇行流れに比較して減少するなど単断面蛇行流路と複断面蛇行流路では河床変動特性は大きく異なることが示された。しかし、このような複断面蛇行流路の河床変動特性は、まだ十分理解されていない。洪水時における河床変動は河道計画、河道維持にとって重要な問題であり、十分検討されなければならない。本研究では与えられた平面形を有する複断面蛇行流路における流量すなわち相対水深の変化による流砂量、河床形状の変化を検討する。



図－1 実験水路平面図

* 正会員 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類（建設系）（〒739 広島県東広島市鏡山 1-4-1）

** 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類（建設系）

*** 学生員 広島大学大学院工学研究科 博士課程前期

**** 学生員 広島大学工学部第四類（建設系）

2. 実験方法

実験で用いた水路を写真-1に、その平面図、測定区間及び測定断面をそれぞれ図-1、2に示す。水路の諸元を表-1に示す。実験水路は幅4mの直線的な堤防の間に幅0.8mのSine Generated-Curveを描いた蛇行低水路があり、高水敷には人工芝を貼り付けている。低水路内には粒径0.8mmのほぼ様な砂を敷いている。通水時間は河床がほぼ動的平衡になる9時間である。実験条件を表-2を示す。流量の設定は実河川における洪水ハイドログラフを考慮し、ケース1は低水路内のみを流れる単断面流れで、洪水時でも低水路内のみを流れている状態を想定している。ケース2からケース5までは高水敷上に異なる水深で水が流れている状態に相当する。ケース5までは給砂は行っておらず、ケース6は、ケース1と同じ流量で、給砂を行っている場合である。給砂量は、ケース1の実験での流砂量を求め、この量に相当する毎秒2.2ccを通水3時間後から給砂している。流砂量、河床形状、水位高は通水開始後、3、5、7、9時間後に測定した。

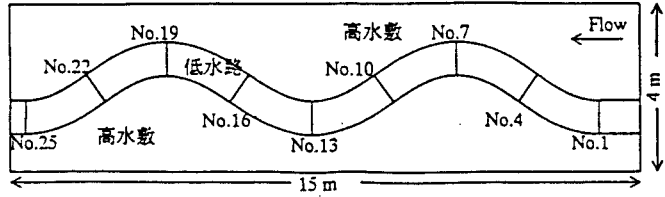


図-1 実験水路平面図

表-1 蛇行水路諸元

水路長	15.0m
水路勾配	1/600
水路幅	4.0m
低水路幅	0.8m
蛇行波長	7.5m
蛇行長	15.0m
最大偏角	35°
蛇行度	1.10

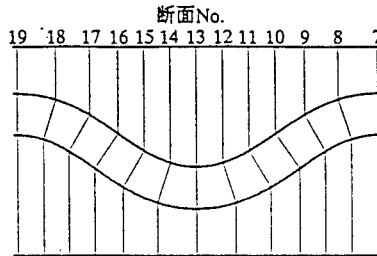


図-2 実験水路の測定断面

3. 流れと流砂量及び河床変動

3-1. 縦断水位・河床勾配

図-3はケース4の低水路の初期河床高、通水9時間後における平均水面高、平均河床高の縦断分布図を示す。蛇行流れでは厳密な意味で等流は存在しないが、下流端に設置された可動堰を調節し、全体的に等流状態に近い流れを作り実験を行った。図の2つの流れは、水深の縦断分布から判断してほぼ等流状態が実現していることがわかる。河床高は、蛇行流路のために縦断的には変動がみられるが、平均的には初期河床高に保たれていると考えてよい。

3-2. 河床形状

図-4は各実験ケースの通水9時間後における初期河床高からの変動のコンター図である。ケース1、ケース6の低水路満杯流量(bankfull flow)では、単断面蛇行流れの特性である外岸側に大きな洗掘が発生している。ケース6はケース1の条件に給砂を行った場合で、洗掘は全く同じ場所に生じている。ケース1は給砂を行っていないために、やや河床低

表-2 実験条件

実験ケース	1	2	3	4	5	6
流量 (l/sec)	14.4	24.9	35.9	54.1	63.7	14.4
低水路平均水深 (cm)	5.5	7.4	8.0	9.9	10.6	5.5
高水敷平均水深 (cm)	0	1.9	2.5	4.4	5.3	0
相対水深	0	0.26	0.31	0.44	0.49	0
給砂量 (cc/sec)				なし		2.2

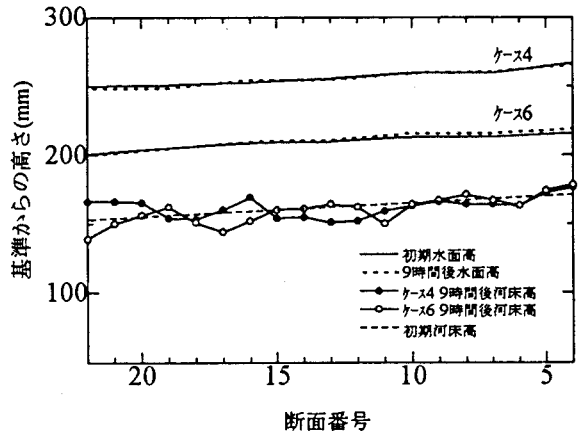


図-3 ケ-ス4、ケ-ス6における平均水面高、河床高の縦断図

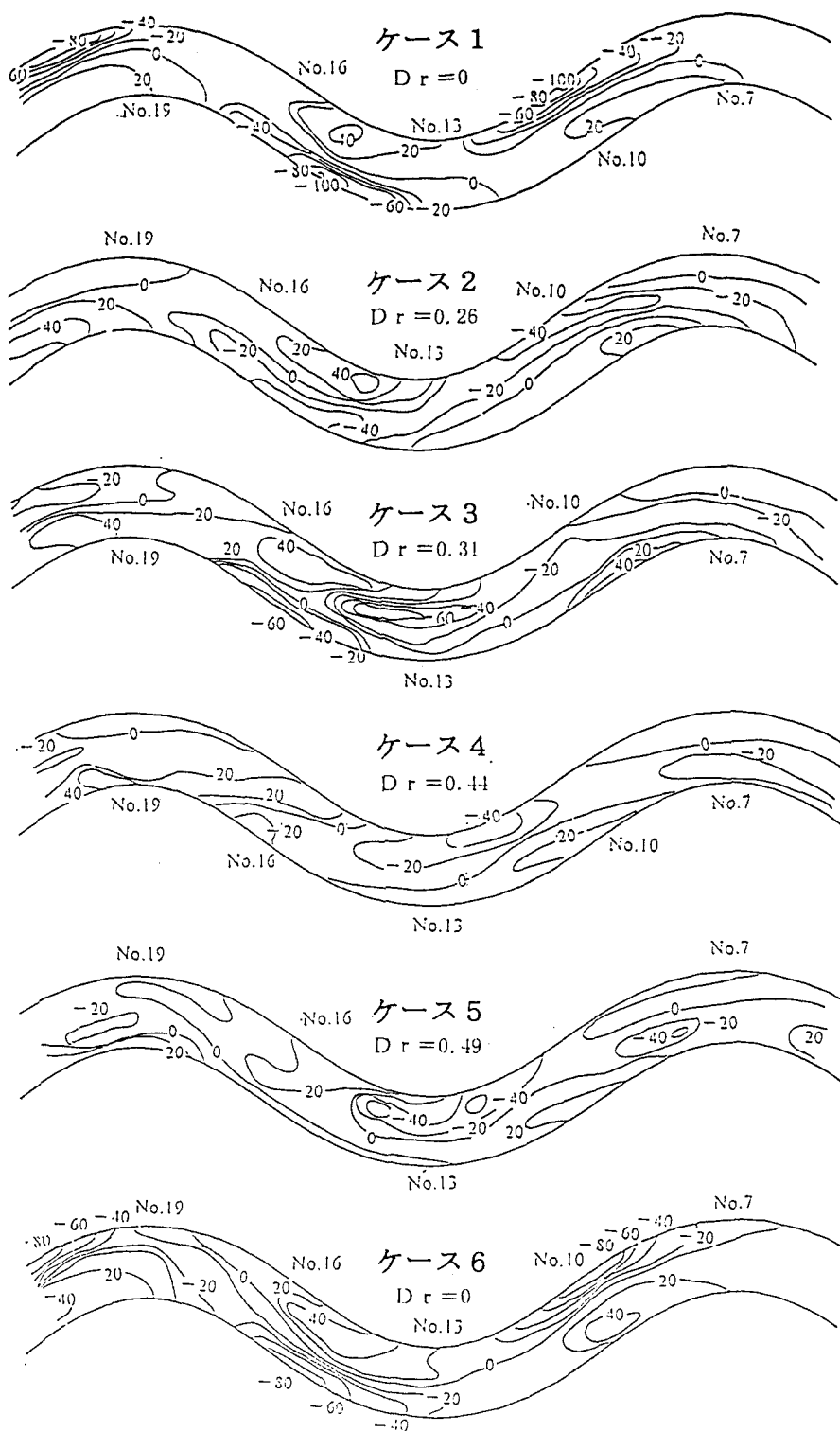


図-4 河床変動コンター図 単位 (mm)

下が生じているが、両者の河床形状にはほとんど差はない。ケース 2 からケース 5 は bankfull flow の状態から流量を増大させ高水敷にも水が流れる複断面流れ (overbank flow) の場合である。ケース 2 は $Dr=0.26$ であるが、ケース 1 のように外岸側に洗掘を生じ、今なお単断面的な流れの特性を顕わしている。このことは、高水敷に水が冠水してもすぐには複断面流れの特性が顕れるのではなく、冠水位が小さければ低水路流れの遠心力に起因する二次流が卓越しており外岸側に深掘れが発生する。しかし、洗掘深はケース 1 に比べてかなり小さくなっている。これは、高水敷上の遅い流れが低水路内の早い流れと混合することによって低水路流速が減少し、掃流力が減少したためである。ケース 3 はケース 1、ケース 2 と異なる流れの状況が現れている。高水敷上の流れと低水路内の流れの強い混合によって、洗掘箇所が外岸側から内岸側にシフトしており複断面蛇行流れの特性が顕れている。与えられた複断面蛇行水路では、ケース 2 ～ケース 3 の水理条件の間で洗掘箇所が外岸から内岸に移行している。したがって、この場合には、ケース 2 とケース 3 の間で、単断面的な流れと複断面的な流れとが重畳している流れが生じていると考えられる。ケース 4、ケース 5 ではケース 3 と同様に内岸側に洗掘が見られるが、洗掘深はケース 3 に比べて減少している。これは、高水敷上の流れの直進性が増大し、これが低水路内の流れと混合することによって、低水路内の流速がかなりの程度均一化され、河床の掃流力が減少したためと考えられる。

3-3. 高水敷高さより下の低水路流量

福岡、平生²⁾らは蛇行度 1.17 の固定床複断面蛇行水路を用いた実験において、複断面蛇行流路の流れ特性を示す指標として高水敷高さより下の低水路流量に着目し、検討している。彼らの実験では、高水敷高さより下の低水路内を流れる流量は、低水路満杯で流れているときに最も大きい。高水敷上に水が乗り始め、高水敷と低水路の間の流れの交換が起こると減じ、水深の増大とともに徐々に回復していく。しかし、これは、固定床で低水路内の高水敷高さより下の断面積が一定である場合についての議論であった。ここでは、流れの断面積が変化する移動床について同様の検討を行う。このため、I 型電磁流速計を用いてケース 1、2、3 について断面 13 (最大曲率断面)、断面 16 (変曲断面) で通水 9 時間後における流速の測定を行った。測定から得られた平均流速に断面積を乗じて、その断面の流量とした。両断面の低水路内の平均流速、流量を表-3、4 に示す。ケース 1 とケース 2 を比較すると、固定床の場合と同じくケース 2 の流量は減少する。ケース 3 では流量はやや増加し、固定床の結果と異なっている。移動床では固定床と異なり、流れの状況に応じて河床が変動し、流れやすい形状になったためと考えられる。流速測定は、通水中に行われたもので、その間に河床変動が起こっており信頼度がやや低下している可能性があるが、今後この点についてさらに精度を高めた測定を行う予定である。

表－3 断面 13 の高水敷高さより下の低水路流量

	平均流速 (cm/sec)	流量 (l/sec)
ケース 1	32.44	14.22
ケース 2	24.90	12.56
ケース 3	28.86	15.01

表－4 断面 16 の高水敷高さより下の低水路流量

	平均流速 (cm/sec)	流量 (l/sec)
ケース 1	26.46	14.44
ケース 2	36.86	13.27
ケース 3	27.89	14.50

3-4. 流砂量

図-5 は各通水 3、5、7、9 時間後の下流端の砂ためにたまった砂の量を時間的に測定し、その累積量の経時変化を示したものである。どのケースにおいても、それぞれ通水 3 時間後から時間あたりの流砂量はほぼ一定となっている。それぞれの値は表－5 に示されている。流砂量が最も多いのはケース 6 (bankfull flow、給砂あり) で、その次がケース 1 (bankfull flow、給砂なし)、ケース 2、ケース 3、ケース 5、ケース 4 の順となる。高水敷上に水が流れる複断面流れで、高水敷上の粗度が大きい場合には、低水路と高水敷の間に位相差に応じた流れの出入りがあり、この流体の混合によって高水敷上の遅い流れが低水路内へ輸送され

て低水路内の平均流速が減少する。これにより、掃流力が減少し、これに伴って流砂量が少なくなると考えられる。したがって、これらの実験条件では流砂量は単断面流れであるケース1、ケース6が多くなったと考えられる。他のケースの給砂と無給砂の流砂量の比較については今後、さらに検討する予定である。ケース2は、高水敷上に水が流れるケースではあるが、さきに述べたように外岸側の流速が早く、単断面的蛇行流れであることからケース1に続いて他のケースよりも流砂量が多くなっている。さらに、相対水深が大きくなるにつれて流砂量が徐々に少なくなる傾向にある。ケース4とケース5を比較すると流量の多いケース5の流砂量の方が少し多くなっている。これは、ケース1の状態から高水敷水深が増大するにつれて、低水路内の流体と高水敷上の遅い流体との間の流れの混合に伴う運動量交換によって、流砂量は徐々に減少するが、ある大きさ以上の水深になると高水敷上の流速が大きくなり、低水路流れへの影響が少なくなって再び流砂量が増加したと考えられる。この点については、今後河床を固定し、詳細な流速分布の測定によって給砂量、流量を含め検討する必要がある。

3-5. 流砂量式との比較

今回行った実験流砂量を参考のため、(1) 佐藤・吉川・芦田の式(土研公式)、(2) 芦田・道上の式、(3) Kalinskeの式と比較した。図-6に3-3. で得られた実験流砂量の値をプロットした。摩擦速度 U_* は $U_*^2 = gRI$ から推定した。ここで、 I は蛇行に沿った水面勾配であり、 R は低水路の径深である。高水敷上に冠水した場合には低水路と高水敷上の流れの混合により付加的せん断力が働くが、計測していないのでここでは考慮していない。高水敷上の流れが遅い場合、一般的には低水路の流れは減速されるので、ここで示した摩擦速度よりは小さくなると思われる。ケース1、ケース6の単断面流れの場合では、流砂量式から算定される値よりも多くなり、逆にケース2～ケース5の複断面流れでは少なくなっている。蛇行水路では、断面内の最大流速線の発生位置の縦断変化により土砂の洗掘・堆積が生じ、みお筋が顕れる。このみお筋内では縦断的に流速の大きい箇所と小さい箇所ができる。その流速が大きく、掃流力の大きい箇所では砂が活発に移動することになる。

4. 実河川の洪水時における河床変動の推定

図-7に実河川の洪水期間中の河床変動の推定図を示す。実河川では、先行した洪水の履歴で初期の河床は外岸側が洗掘されている。そこに新しい洪水が起こったとき、

表-5. 掃流砂量の実測値

	流砂量 (cc/sec)
ケース1 (給砂なし)	1.9
ケース2 (")	1.9
ケース3 (")	1.1
ケース4 (")	0.8
ケース5 (")	0.9
ケース6 (給砂あり)	2.9

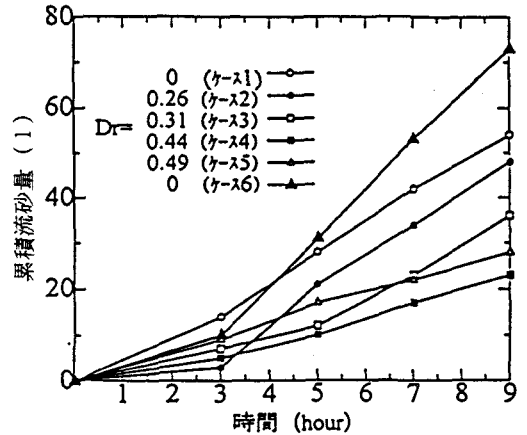


図-5 相対水深の違いによる流砂量の経時変化

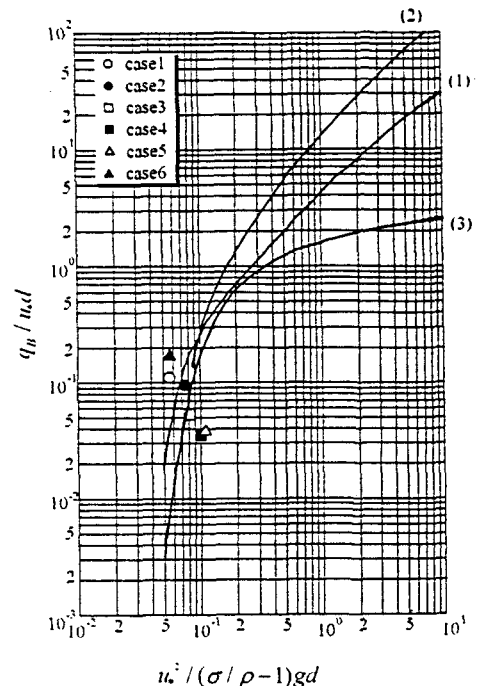


図-6 各種流砂量式と実測流砂量の比較

高水敷に十分高く水が乗った場合には、複断面的蛇行流れが生じ、内岸側の流速が早くなり、内岸側の河床が掘れ始め（過程①）、外岸側の河床の深掘れを埋めていく（過程②）ものと考えられる。洪水ハイドログラフとの関係で、高水敷に水が乗っている時間が十分長ければ、図-7(a)のように内岸側に堆積していた河床砂が移動し始め、これが二次流によって徐々に外岸が埋まると、内岸に深掘れが生じ始める（過程③）。高水敷に水が乗っている時間が十分長くない場合には、内岸側で流速の早い複断面蛇行流れとなっても、外岸側の深掘れは十分埋め戻されずに残る（図(b)）。また、高水敷に水がほとんど乗らない場合には前述のように単断面的流れとなり、外岸流速が早いまま外岸河床の洗掘が生じる（図(c)）。我が国の実河川について検討した結果、江の川では過程③の状態が見られたが、多くの河川では図(a)よりも図(b)や図(c)の方が、むしろ一般的であると考えてよい。³⁾ 複断面蛇行河道において洪水ハイドログラフと河床の砂の特性との関係で河床の変動がどのようなプロセスを経て変化していくのかを明らかにすることが次の重要な課題である。

5. 結論

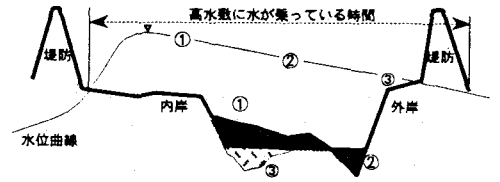
ある定まった蛇行度を持つ複断面蛇行流路において、bankfull flow の状態から種々の相対水深で高水敷上に水が流れる場合の流れ、河床形状、流砂量について実験的に検討した。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 複断面蛇行河道では、水深の大きさによって外岸側の流速が早くなる単断面的蛇行流れと内岸側の流速が早くなる複断面的蛇行流れが現れることを示した。高水敷上に水が流れてもその水深が小さい時には蛇行低水路の流れが卓越し、外岸側の流速の大きい単断面的蛇行流れの特性を持つ状態が存在する。水深が増大すると、単断面的流れと複断面的流れ特性を重畳している段階がある。それよりさらに水深が増大すると内岸側の流速と洗掘深が大きい典型的な複断面蛇行流れが生ずる。
- (2) 複断面蛇行流路における河床形状と流砂量は相対水深によって変化する。本実験条件では、低水路満杯流の単断面流れの場合が流砂量は最も大きく河床変動も著しい。高水敷上に水が流れるようになると、高水敷流れと低水路流れの混合により、ある水深までは流砂量は減少して行くが、その水深を越えると流砂量は再び増加し始めるようである。
- (3) 移動床流れの場合、高水敷高さよりも下の低水路内を流れる流量の大きさは、低水路内の流れの特性と河床変動に密接に関係しており、固定床の場合のように一義的には決まらないようである。
- (4) 実河川の洪水期間中の河床変動機構を、本実験の結果に基づいて推定した。

参考文献

- 1) 福岡捷二・宮崎節夫・高橋宏尚・加村大輔：堤防法線と低水路法線の間に位相差がある流れの水利、河道の水利と河川環境シンポジウム論文集、pp.89～94、1995
- 2) 福岡捷二・大串弘哉・加村大輔・平生昭二：複面蛇行流路における洪水流の水利、土木学会論文集投稿中
- 3) 福岡捷二・高橋宏尚・加村大輔：複断面蛇行河道の洪水流に現れる複断面蛇行流れと短断面蛇行流れ—洪水流航空写真を用いた分析—水工学論文集 No.41、1997

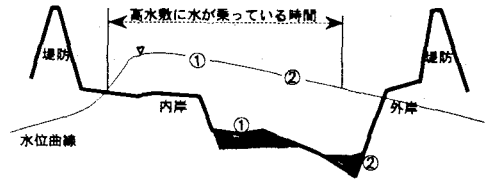


過程① 早い流速により内岸が掘れ始める

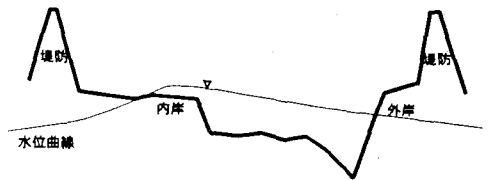
過程② ①で洗掘された砂が外岸を埋める

過程③ 内岸が深掘れされる

(a) 水深が大きく高水敷に長い時間水が乗っている場合



(b) 高水敷に水が乗っている時間が(a)程長くない場合



(c) ほぼ単断面的蛇行流れの場合

図-7 洪水時における河床変動の推定図