

堰の位置及び構造の違いによる 堰上流, 下流の河道水理量の変化

THE EFFECT OF WEIR POSITION AND ITS SHAPE
ON THE FLOW AND BED TOPOGRAPHY

福岡捷二¹・三代俊一²・荒谷昌志³・中須賀淳⁴・岡田将治⁵・田中正敏⁶

Shoji FUKUOKA, Shunichi MISHIRO, Shoji ARATANI,
Jun NAKASUKA, Shoji OKADA and Masatoshi Tanaka

¹フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント 関西支社 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原3-5-36)

³正会員 セントラルコンサルタント(株) 西日本支社 (〒732-0052 広島市東区光町1-7-11)

⁴学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期

⁵学生会員 工修 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程後期

⁶正会員 建設省中国技術事務所 所長 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)

In the presence of a fixed weir, flow and bed topography in river is not only affected by the weir but also by horizontal and cross sectional channel shape around the fixed weir.

In this paper, we studied influence of a fixed weir upon flow and bed topography. At first, the fundamental influence of fixed weirs on flow was investigated by experiments of a single straight channel and a compound meandering channel with rigid bed. Secondly, the influence of a fixed weir on flow and bed topography of compound meandering channel with movable bed through experiment was discussed. Special attention was placed on the change comparison in the flow and bed topography caused by the weir position and plane shape such as perpendicular and oblique weirs.

*Key Words: oblique weir, perpendicular weir, the rise of water surface,
compound meandering channel flow, bed topography*

1. 序論

堰は取水や塩害の防止等を目的として造られた河川構造物であるが、河道を横断して設置するため、流れや河床変動へ与える影響は大きい。さらに古くから利用されている堰には、固定堰が多い。固定堰は流水断面を減じ、堰上流での水位上昇、堰下流での河床や河岸の洗掘を引き起こすなど、治水に検討すべき課題が多い。

また堰や橋脚などの構造物による流れや河床変動には、構造物自体によるものだけでなく、これらの設置位置の上流、下流の河道平面形、横断面形に起因する影響が複合して作用していると考えられる^{1),2)}。

堰が流れや河床の変動に及ぼす影響については、これまでそれぞれの堰固有の問題として扱われる傾向が強く、一般的な水理現象として扱われることが少なかったよう

にみえる。このことは、堰の存在がもたらす種々の水理現象を堰の構造や河道の特性との関係で力学的に検討する技術的情報が不足する原因となってきた。

本研究は、堰の水理現象の理解を深めるために、最初に固定床水路において堰を設置した実験を行い、堰上流の水位上昇、堰天端上及び堰下流の流れの集中について基本的な特性を調べる。次に、一般性の高い平面形、横断面形をもつ移動床水路において堰を設置した実験を行い、河道の形状と堰の位置及び構造が、流れと河床変動に及ぼす水理的影響を把握することを目的としている。

2. 固定床水路を用いた実験

(1) 実験概要

実験水路は水路長15m, 水路幅0.8m, 水路勾配1/600の

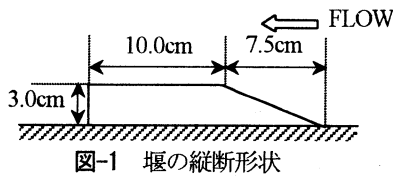


図-1 堰の縦断形状

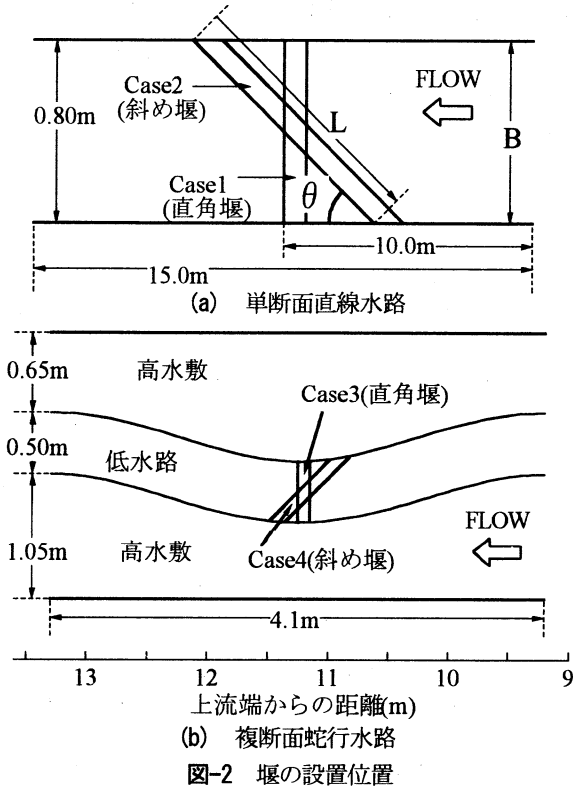


図-2 堰の設置位置

単断面直線水路と水路長22.5m, 水路幅2.2m, 水路勾配1/600, 低水路が一定の蛇行度(1.02)をもつ連続した5波z長からなる複断面蛇行水路を用いた。複断面水路の横断面形状は、高水敷高さ4.5cm, 低水路幅0.5mの平坦固定床矩形断面である。堰の平面形状は低水路に対して90度の直角堰と、45度の斜め堰を用い、その縦断形状を図-1に示す。堰は、単断面直線水路では図-2(a)に示すように上流から10mの位置に、低水路が規則的に蛇行している複断面蛇行水路では、図-2(b)に示すように水路中央の蛇行頂部に設置される。複断面蛇行水路を用いた場合の実験流量は、堰がない場合に低水路水深と高水敷水深の比で表される相対水深が0.4となるように設定した。流速は電磁流速計により測定を行った。実験条件を表-1に示す。

(2) 単断面直線水路での実験結果

図-3は同一流量に対する水路中央での縦断水位分布を示す。この図より、固定床単断面直線水路では直角堰の方が、斜め堰よりも堰上流の水位上昇量が大きいことがわかる。

図-4はCase2(斜め堰)の実験の水深平均流速ベクトルである。堰天端上で流れが堰に直交するように曲げられていることがわかる。その結果、堰下流で、左岸側に流れが集中し、左岸の存在により流速が大きくなる。一方、

表-1 固定床水路実験条件

実験ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
水路形状	単断面直線		複断面蛇行	
流量	20l/s		19.9l/s	
堰構造	直角堰	斜め堰	直角堰	斜め堰
堰設置位置	—		蛇行頂部	
相対水深	—		0.4	

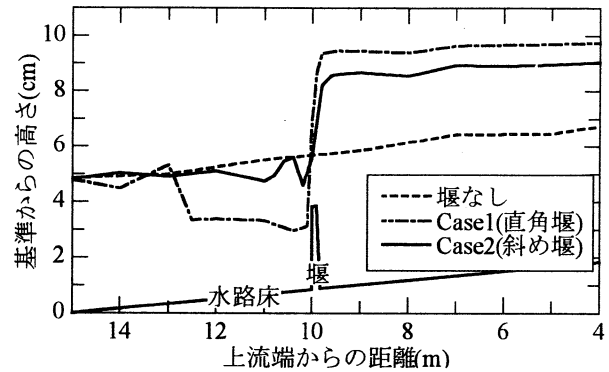


図-3 単断面直線水路の水路中央の縦断水位

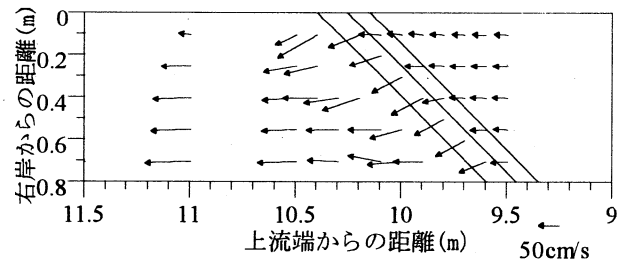


図-4 Case2(斜め堰)の水深平均流速ベクトル

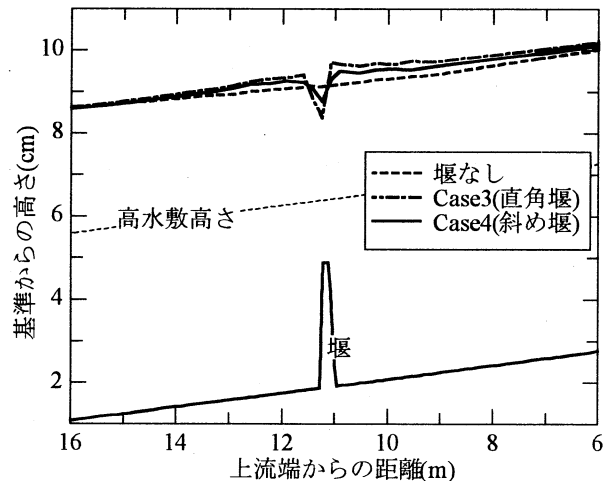
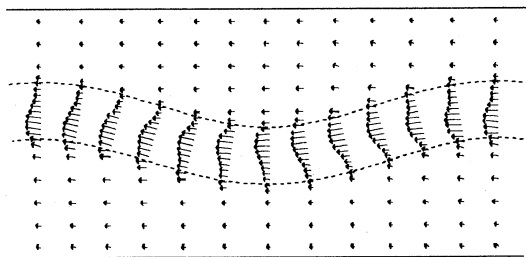


図-5 複断面蛇行水路の低水路中央縦断水位

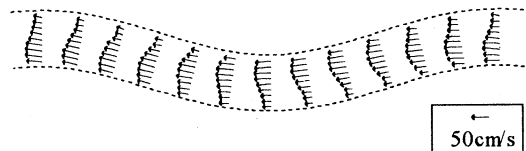
右岸側は流速が小さく、剥離域が生じる。

水位上昇量が直角堰のほうが大きくなる理由を以下に示す。本実験条件では、直角堰、斜め堰ともに完全越流し、堰天端上で限界水深が現れている。越流は堰軸に対して直交方向に生ずるため、越流幅は堰の横断長さで表される。このとき限界水深 h_c は式(1)で表される。

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gL^2}} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g(B/\sin \theta)^2}} \quad (1)$$

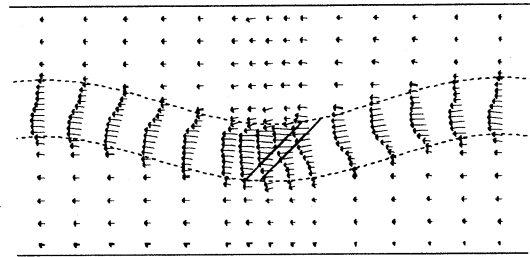


(a) 高水敷高さより上層

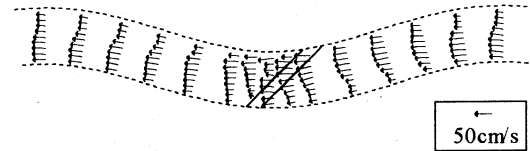


(b) 高水敷高さより下層

図-6 堰なしの水深平均流速ベクトル



(a) 高水敷高さより上層



(b) 高水敷高さより下層

図-7 Case4(斜め堰)の水深平均流速ベクトル

表-2 移動床水路実験条件

実験ケース	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
流量	30.0l/s				16.0l/s	
堰構造	なし	直角堰	斜め堰	直角堰	直角堰	斜め堰
堰設置位置	—	頂部	変曲部	変曲部	頂部	頂部
相対水深	0.4				0.25	

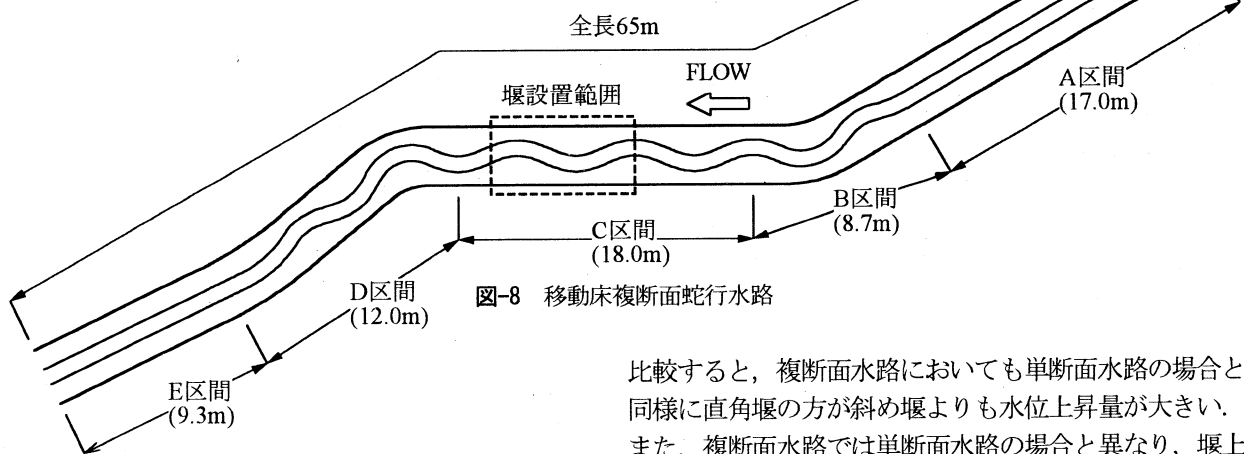


図-8 移動床複断面蛇行水路

ここに、 Q :全流量、図-2(a)に示すように L :堰の横断長さ、 B :水路幅、 θ :堰の水路に対する角度である。

斜め堰の場合、越流幅が広がることによって単位幅流量が小さくなり、そのため直角堰に比べて堰上の限界水深が小さくなる。45度の斜め堰では、堰の越流幅は90度の直角堰の約1.4倍になり、越流水深は約0.8倍になる。堰上流の水位はこの限界水深によって決まるため、直角堰上流の水位上昇量は斜め堰に比べて大きくなる。しかし、堰天端上の水位が高くなるにつれて、堰軸に直交していた流れが徐々に直進方向に変えられるようになる。

(3) 複断面蛇行水路での実験結果

図-5は低水路中央の縦断水位である。堰上流の水位を

比較すると、複断面水路においても単断面水路の場合と同様に直角堰の方が斜め堰よりも水位上昇量大きい。また、複断面水路では単断面水路の場合と異なり、堰上流だけでなく、堰下流においても水位が上昇している。これは、堰上流部で水位が上昇し、高水敷を流下する流れが、堰下流で低水路に徐々に流入するためである。

図-6は堰がない場合、図-7はCase4の蛇行頂部に斜め堰を設置した場合の、高水敷高さより上層、下層に分けた水深平均流速分布である。堰直上、天端上、直下流を除いた部分の流れは、堰がない場合の流れと同様に、最大流速は低水路の内岸側に現れている。本実験条件は相対水深が0.4と大きいためにCase2の単断面流れほど顕著ではないが、流れは堰天端上で堰軸に直交する方向に曲げられている。斜め堰直下流の右岸側では、低水路の水位は高水敷よりも低いため、高水敷から低水路に水が流れ込む。

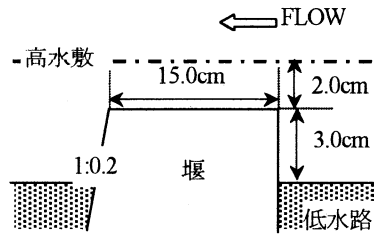


図-9 移動床実験における堰の縦断形状

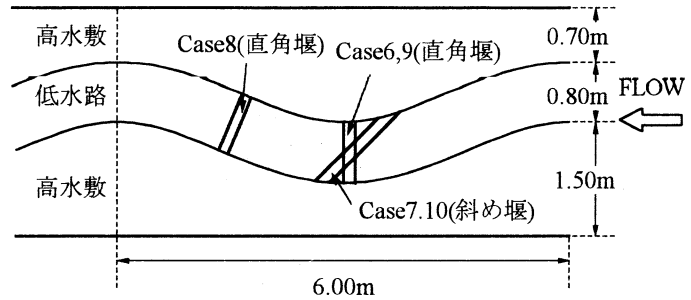


図-10 堰の設置位置

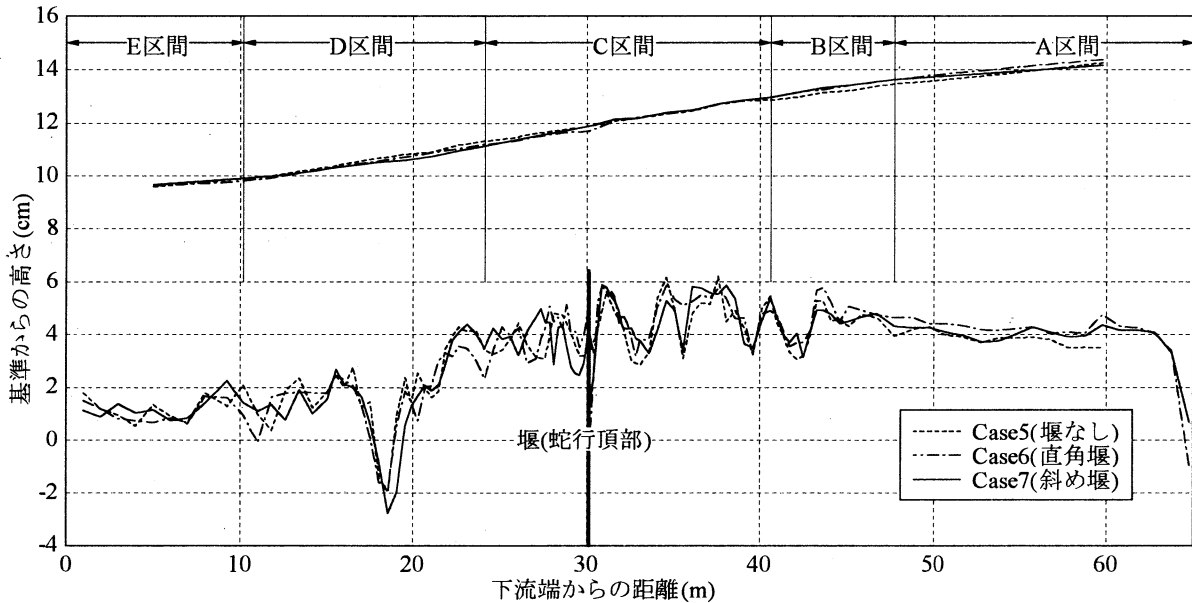


図-11 平均水位・河床高

3. 移動床水路を用いた実験

堰が流れに及ぼす基本的な影響についての前節の検討は、固定床水路で行われたものである。堰が流れに及ぼす影響を把握するには良いが、堰の設置に伴う河床変動や水位については検討されていない。そこで、移動床複断面蛇行水路に堰を設置した実験を行い、それが流れと河床形状に及ぼす影響について検討した。

(1) 実験概要

実験水路は、図-8に示すような水路長65m、全水路幅3.0m、低水路幅0.8m、水路勾配1/1000、初期高水敷高5.0cmの複断面形状の水路であり、低水路部分が移動床となっている。河床材料には石炭粉(平均粒径 $d_m=0.1\text{cm}$ 、水中比重 $s=0.48$)を用いている。

この水路は水路中央に十分な長さを有する蛇行区間、その上下流には直線区間を連続して配置しており、また蛇行区間の上下流には堤防が湾曲している区間がある。湾曲部では堤防法線と低水路法線が同位相となっている。このような水路形状を選んだ理由は次のとおりである。河道の横断面形は一般的に複断面形で、直線部、蛇行部など異なる平面形の河道が連続している。平面形や横断

面形が異なる各部分では流れと流砂量が異なるため、河床の洗掘、堆積が生じ河道の横断面形状は縦断的に変化することになる。特に平面形状の変化する部分の直上下流では大きな変化を示す。このような河道に堰等の河川構造物を設置すると変化が助長されることも考えられる。従来は、直線河道、湾曲河道、蛇行河道などそれぞれが単独で存在する平面形の場合についての流れや河床変動について検討されてきたが、平面形が連続的に変化する河道における流れと河床変動については十分明らかにされておらず、これを明らかにすることは重要である。水路はその平面形状の特徴から図-8のようにA, B, C, D, Eの5区間に分けて、実験結果を整理している。

堰の平面形状と設置位置に関しては、図-8に示すように、一様な蛇行区間(C区間)の中央よりやや下流部に設置し、その縦断形状は図-9に、平面形状は図-10に示すように低水路中心に対して90度に設置した直角堰と、45度傾けた斜め堰を用いた。

複断面蛇行流れは、相対水深 $Dr=0.3$ 付近を境界に単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れが現れることがわかっている²⁾。そこで、蛇行区間で複断面的蛇行流れとなる相対水深 $Dr=0.4$ と、蛇行頂部に堰を設置した場合は単断面的蛇行流れとなる $Dr=0.25$ の水利条件で実験を行った。これらの実験条件を表-2に示す。

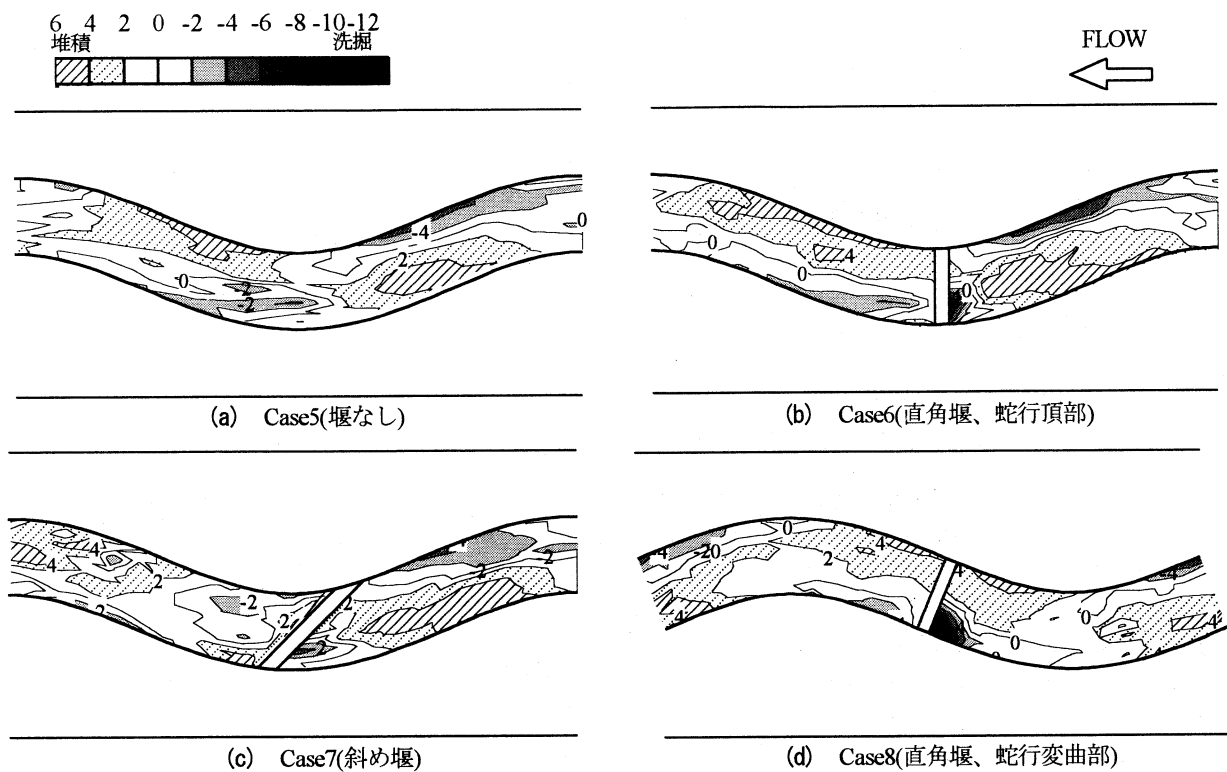


図-12 堰周辺河床変動コンター(相対水深 $Dr=0.4$)

(2) 水路平面形の変化が流れと河床変動に及ぼす影響

堰がない条件での実験結果について検討し、本実験水路の流れと流砂特性を明らかにする。

図-11の破線はCase5(堰なし, $Dr=0.4$)の平衡状態に達した通水12時間後の縦断水位・河床高分布である。水位及び河床高は断面毎の横断平均値である。A区間(上流直線区間)の河床高は低下しているが、これは無給砂で行ったためであり、A区間は給砂区間に相当する。

A区間は直線区間であり、蛇行区間であるB, C区間に比して流砂量を輸送する能力が大きい²⁾。そのため、A区間からの流入流砂量が、D区間への流出流砂量より多くなるために、B, C区間では堆積傾向を示す。

一方、D区間の湾曲部において図-8に示す位置で河床が大きく低下している。これは上流のC区間が複断面蛇行区間であるため流砂量がD区間で流し得る流砂量より少ない²⁾。そのためD区間への流入流砂量が減じ、洗掘が大きくなったことに加えて、堤防法線と低水路法線が同位相となるため、低水路の流れが低水路外岸寄りに集中し、大きな洗掘を発生させたためである。

B区間はD区間と同様に堤防法線と低水路法線が同位相であるが、河床はあまり低下していない。これはD区間と異なり、上流の直線A区間からの流入流砂量が多いためである。

(3) 堰構造の違いが水位と河床形状に及ぼす影響

図-11は、相対水深 $Dr=0.4$ のCase5, 6, 7について、蛇行頂部に堰を設置した場合の縦断水位・河床高分布を比較したものである。Case6, 7を比べると、堰下流におい

て河床形状の違いが多少あるが、堰が相対的に低い構造であったために堰による影響は小さく、堰周辺以外は水路線形に規定された流れが支配的といえる。

図-11の堰周辺の水位を比較すると、固定床の実験結果と異なり、堰構造の違いによる水位の違いは見られない。相対水深 $Dr=0.25$ のCase9, Case10の水位を比較しても、水位の違いは見られなかった。また、堰がない場合とある場合の違いもほとんど見られない。これは、本実験条件の堰高が相対的に低いことと、低水路が移動床のため、堰の設置に伴う流れの変化により堰周辺の河床形状が変化したことが原因と考えられる。そのため、今後高水敷高さを上げることにより堰が流れに及ぼす影響を大きくし、さらに検討する必要がある。

図-12は相対水深 $Dr=0.4$ の堰周辺の河床変動コンターで、(a)はCase5で堰がない場合、(b)はCase6で直角堰を設置した場合、(c)はCase7で斜め堰を設置した場合のものである。(b)をみると、堰直上左岸側の局所洗掘を除いて、(a)と河床形状はよく似ている。これは、主に水路の法線形に規定された流れが河床形状を支配しており、直角堰は流れを整流する役割を果たしているためである。一方、(c)は、(a), (b)と異なり、堰直下より少し下流の蛇行の内岸側に洗掘が発生している。これは、固定床実験で明らかになったように、堰を越える流れが堰軸に対して直交して流れ、堰下流の内岸側に流れが集中するためである。しかし、その洗掘規模はそれほど大きくない。これは複断面的蛇行流れでは最大流速線は蛇行の内岸側に現れるため、石炭粉の多くは内岸側から堰を越え、堰下流内岸側に十分な量が供給され、洗掘を大きくしな

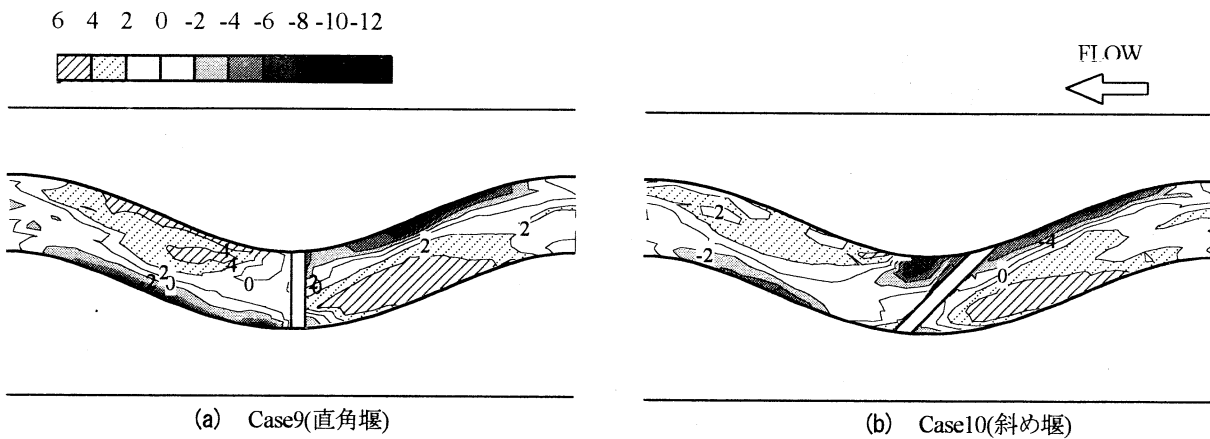


図-13 堰周辺河床変動コンター(相対水深 $Dr=0.25$)

かったと考えられる。(b)、(c)の堰直上の局所洗掘に関しても同様の理由で、左岸側に石炭粉があまり供給されなかったためと考えられる。

(4) 堰位置の違いが河床形状に及ぼす影響

図-12(d)はCase8の蛇行変曲部に直角堰を設置した場合の河床変動コンターである。(a)の堰がない場合と比較すると、河床形状はよく似ており、蛇行頂部に設置したCase6と同様に直角堰は水路形状に起因する流れの構造をあまり変化させないことがわかる。しかし、堰直上の左岸側に大きな局所洗掘が発生している。これは、水路形状に起因する流れがつくる水衝部に堰を設置したことにより、洗掘深が大きくなったと考えられる。

(5) 相対水深の違いが河床形状に及ぼす影響

図-13は相対水深 $Dr=0.25$ の堰周辺の河床変動コンターで、(a)はCase9の直角堰、(b)はCase10の斜め堰を設置した場合のものである。図-12(b)の相対水深 $Dr=0.4$ の場合の直角堰と図-13(a)の相対水深 $Dr=0.25$ の場合の直角堰を比較すると、相対水深 $Dr=0.25$ の場合、堰下流で洗掘深が大きくなっている。これは、本実験条件では単断面的蛇行流れのCase9のほうが複断面的蛇行流れのCase6よりも土砂輸送能力が大きいためである。図-12(c)の相対水深 $Dr=0.4$ の場合の斜め堰と図-13(b)の相対水深 $Dr=0.25$ の場合の斜め堰を比較すると、相対水深 $Dr=0.25$ の場合、堰直下流内岸側に洗掘が発生し、その規模は大きくなっている。洗掘の原因は、相対水深が小さくなったため堰の影響が大きくなり、堰による流れの集中がより大きくなったためである。さらに、単断面的蛇行流れでは最大流速線は蛇行の外岸寄りに現れるため、石炭粉が堰の中央部を越えることにより、堰下流内岸側の洗掘位置に石炭粉が十分に供給されず、洗掘深を大きくしている。また、洗掘位置の堰直下流への移動も堰上流から供給される石炭粉の量の違いが影響していると考えられる。相対水深 $Dr=0.25$ のCase9、Case10ともに、相対水深 $Dr=0.4$ の場合と異なり、堰直上において大きな洗掘は見

られない。このことも同様に、石炭粉の堰を越える位置が変化した結果、左岸側に十分な石炭粉が供給されたためと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ・堰天端上の流れは堰に直交するように流れる。このため斜め堰では越流幅が広くなり、斜め堰の上流の水位上昇量は直角堰と比べて小さくなる。しかし、移動床の場合には、河床変動や流れに応じて河床抵抗が変化するなど、固定床の場合に比して現象が複雑なることから、さらに検討が必要である。
- ・直角堰は、整流効果があるため斜め堰に比して河道の平面形、横断面形に起因する流れと河床形状の構造をあまり変化させない。しかし蛇行変曲部のような水衝部に堰を設置すると局所洗掘を助長する。
- ・蛇行頂部に斜め堰を設置した場合、堰による流れの集中によって堰下流内岸側に洗掘を発生させる。また単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの最大流速線の現れる位置の違いが、堰を越える流砂量の分布を変化させ、堰下流の洗掘の大きさ、位置に影響を与える。
- ・ $Dr=0.25$ の単断面的蛇行流れの方が、 $Dr=0.4$ の複断面的蛇行流れよりも土砂輸送能力が高いため、相対水深の小さい前者のほうが堰周辺の河床変動量を大きくする。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 岡田将治, 藤原邦洋, 宮川朝浩: 橋脚まわりの局所洗掘に及ぼす低水路線形の影響, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集Vol. 4, pp. 7-12, 1998.
- 2) 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.

(2000. 10. 2受付)