開口部を有する上向越流堰が河床変動および平均流場に与える影響

1. はじめに

ダムや堰などの河川横断構造物は川が本来有する 連続性を遮断,物理・生物環境の多様性を消失,さら に自然攪乱を抑制する傾向を持つことが指摘されてい る.米国では堰を含めたダムの老朽化や河川環境の劣 化を改善するために既に 500 以上の堰やダムが撤去さ れている¹⁾.また,側岸浸食の抑制,流砂の促進,魚 類の生息環境改善,河道の安定性,瀬と淵の創出のた めに Cross-Vane,W-Weir あるいは J-Hook Vane の検討 がされている²⁾.

既往研究として Zhang ら³は,粒径や比重の異なる 各種の路床材料を敷きならした水路に開口部を有する 種々の堰を設置し,越流状態における堰上流域におけ る河床の洗掘特性や堰周辺の局所流を検討した.また, 住田ら⁴は,アスペクト比の比較的大きい実験水路を 用い,堰開口部の形状や大きさが堰上流の河床変動に 与える影響,洗掘に伴う流路の形成を検討している. しかし,開口部を有する堰が堰下流域の河床変動に与 える影響については研究例が少なく,部分撤去された 堰下流域の河床の洗掘・堆積特性や流れについての研 究事例は皆無に等しい.

加藤清正の時代に築造されたと言われる球磨川の 遙拝堰や菊池川の白石堰は、その平面形状から八の字 堰と言われ、堰が側岸から上流に向きを取っていた. 開口部は舟運のために開かれたものであり、遙拝堰に おいては堰の長さは200間、開口部は20間であった.

本研究では、開口部を有する上向越流堰において相 対越流水深が堰下流の河床変動に与える影響および堰 下流域に発達した砂州の基本特性および河床上の流れ の三次元構造について直角越流堰との比較を基に検討 した.

2. 実験方法

実験は全長 10m, 幅 B=40cm, 高さ 20cm のアクリル 樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った.

図-1 に示す様に上流端から下流 5m の水路中央部に 幅 10cm の開口部を有する堰を設置し,堰上流 4.5m 区 間および下流側 4.5m 区間には相対越流水深に応じて 移動床厚を 3cm から 10.5cm の範囲で敷き均し、平均 粒径 1.7mm で一様な粒径の珪砂を用いた.堰の向きは 側岸の法線を基準にして側岸に直角(θ=0°),上向き

(θ =10°)および下向き(θ =-10°)の3種である. 開口部の底面は珪砂で構成され洗掘を許容している. なお,堰上流側の河床高は、下流側の河床高に較べて 1cm高く設定した.

表-1 に移動床実験の条件を示す.相対越流水深は,

熊本大学大学院 学生会員 宇根 拓孝 熊本大学大学院 正会員 大本 照憲

越流水深を堰高で除した値である.実験は、相対越流 水深に応じた河床高に砂を敷き均し、一定の流量 (Q=4.3'/s)および水路勾配(I=1/500)の基で下流端の 堰操作を行い、何れのケースにおいても 24 時間以上 通水の後に、河床が平衡状態に達したことを確認の上、 河床高を計測した.なお、堰の局所洗掘の影響が及ば ない地点で断面平均流速が約 10cm/s および 20cm/s に おいて相対越流水深を系統的に変化させた.表中の Uは堰より上流 3m 位置における断面平均流速,Hは越 流水深、 D_W は堰高である. K_I は断面平均流速 U に対 する河床材料の移動限界流速 U_{cr} で Melville⁵)によって 提示されたKファクターの中の流れの強さに相当する.

座標系は開口部がある水路中央底面を原点とし,流 下方向に x 軸,横断方向に y 軸,鉛直下向方向に z 軸 をとり,右手系とする.また,それぞれの流速成分を *u*,*v*,*w*,時間平均成分を*U*,*V*,*W*,変動成分を*u*',*v*',*w*' と表す.水位および河床高の計測には,それぞれ,ポ イントゲージおよび超音波水位計を用いた.

流動機構の検討は,表-1のCaseU2-4において水面 形,流速の点計測および多点同時計測を行った.表面 流の計測には流速の多点同時計測が可能なビデオカメ ラを用いた PIV(Particle Image Velocimetry)法を,流速の 点計測には I 型および L 型の電磁流速計を用いた.

I	500cm 堰			500cm		▶
Flow			y Γ θ			40cm
平面図						
縦断面図						
図−1 実験水路の概要						
堰の向き	Case	U(cm/s)	K ₁	H(cm)	D _w (cm)	H/D _w
上向き	U2-1	20	0.47	1	4.5	0.22
	U2-2			1.5	4	0.38
	U2-3			2	3.5	0.57
	U2-4			2.5	3	0.83
	U2-5			2.8	2.8	1
	U2-6			3	2.5	1.2
下向き	D2-1			1	4.5	0.22
	D2-2			1.5	4	0.38
	D2-3			2	3.5	0.57
	D2-4			2.5	3	0.83
	D2-5			2.8	2.8	1
	D2-6			3	2.5	1.2

3. 実験結果

(1)静的平衡河床形状

図-2 は、それぞれ、断面平均流速が 20cm/s における上向き堰および下向き堰の河床洗掘・堆積形状のコンターを示す. なお、コンターの数値は初期平坦河床から変化量を mm 単位で表示した.

上向き堰および下向き堰における洗掘は,堰開口部 周辺に集中し,洗掘の面的広がりおよび深さは相対越 流水深の増加に従って小さくなる.また,上向き堰と 下向き堰との比較では洗掘の面的広がりは上向き堰の 方が大きい.

相対越流水深 H/Dw に対する最大洗掘深および最大 堆積厚の変化を図-3 に示す.

最大洗掘深および最大堆積厚は,静的平衡河床においては上向き堰,下向き堰および直角堰の三者において相対越流水深の増大に伴って指数関数的に減少する. 三者の比較では極大堆積厚は類似しているが,上向き堰において若干,堆積厚が大きくなる傾向がある.最大洗掘深は,上向き堰,下向き堰および直角堰の順で小さくなる.



図-3 最大洗掘深・最大堆積厚と相対越流水深

(2) 堰開口部下流の局所流



図-4 は、水面下 2.0cm で計測された二次流の鉛直方 向成分 W の平面流況を示す. 上向き堰の下流域では砂州との位置関係が強く,砂 州上では上昇流,砂州間の谷部において収束する下降 流が認められる.



図-5 $-(\partial U/\partial x + \partial V/\partial y)$ (上向き堰)

表面流における連続条件から,

$$\frac{\partial W}{\partial z} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) \tag{1}$$

となる. 水表面で W=0 を仮定すれば,

$$\frac{\partial W}{\partial z} > 0$$
 下降流
 $\frac{\partial W}{\partial z} < 0$ 上昇流 (2)

となる. 図-5 は、各々、上向き堰における表面流速の 主流方向成分Uおよび横断方向成分の空間勾配から得 られる式(1)の右辺を表している.表面流の解析によっ て得られた上昇流位置は朱色で下降流位置は青色で表 現されている.図-5より上昇流および下降流の発生位 置は、図-4に示された水面下 2cm 位置の上昇流およ び下降流の発生位置と類似していることが読み取れる.

4. 結論

本研究では,静的平衡河床を対象に開口部を有する 堰が下流の河床変動に与える影響および堰下流域に発 達した砂州上の流れの三次元性について検討した.

参考文献

- 1)ハインツ科学・経済・環境センター編,青山己織訳:ダム撤 去,岩波書店,2004
- Rosgen, D.: The Cross-Vane, W-Weir and J-Hook Vane Structures...Their Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration., PROCEEDINGS of Wetlands Engineering & River Restoration 2001 Edited by Donald F. Hays,: pp. 1-22. ,doi: 10.1061/40581(2001)72,2001
- Zhang H., Muto, Y., Nakagawa, H and Nakanishi, S.: Weir removal and its influence on hydro-morphological features of upstream channel, Journal of applied mechanics, Vol.15, No2, pp.591-599,2012.
- 4) 住田英之,武藤裕則,田村隆雄:堰の部分撤去に伴い上流側 へ発達する流路の形状について,土木学会論文集 B1(水工 学)Vol. 71, No. 4, 1925-1930, 2015
- 5) Bruce W. Melville:Pier and Abutment Scour: Integrated Approach,
- J. Hydraulic Engineering,, ASCE, Vol.123, No.2,,pp.125-136, 1997