

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

		氏名 (ふりがな)	所属	役職	
①研究代表者		大本 照憲 (おおもと てるのり)	熊本大学	教授	
②技術研究 開発テーマ	名称	開口部を有する斜め堰が河床変動、流砂および乱流構造に与える影響に関する研究			
③研究経費 (単位: 万円)		平成 30年度	平成 31年度	平成 年度	総合計
※端数切り捨て。		294 万円	196 万円	万円	490 万円
④研究者氏名		(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名		所属機関・役職 (※平成 年3月31日現在)			
石田 桂		熊本大学・助教			
宇根 拓孝		熊本大学・博士後期課程2年生			
⑤研究の目的・目標		(様式地河-1、地河-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>本研究では、開口部を有する斜め固定堰が流れ、河床変動に与える影響について明らかにするため以下の課題について検討する。</p> <p>課題1：一級河川・白川における斜め堰の上流域および下流域における河床変動および流れの調査 課題2：斜め堰の開口部が河床変動および流れの構造に与える影響 課題3：斜め堰における開口部の大きさおよび形状が土砂の輸送特性に与える影響</p> <p>(調査・研究内容及び成果)</p> <p>1) 堰上流域に長年に亘って堆積した土砂を出水時に下流に流すことで浚渫費用を削減でき、2) 堰下流側の河床低下が解消され、固定堰自体の安定性が高まり、堰の維持管理が容易となる。さらに3) 上流側の土砂堆積を軽減することで出水時の水位低下に繋がり治水安全度の向上が期待できる。4) 堰上流からの土砂供給により、下流側では物理・生物環境の回復、自然攪乱の増大から環境機能の改善が期待できる。</p> <p>(研究成果の河川整備・管理への反映)</p> <p>河川横断構造物を撤去することなく部分改修に止め、堰に開口部を設けることにより洪水時には水位低下と併せて堰上流に堆積した河床材料を下流に流送させることで堰の上・下流における土砂バランスの改善に繋がることが期待出来る。</p> <p>堰撤去が計画されている場合には、堰上流に堆積した大量の土砂礫を一挙に流下させる全面撤去ではなくまた、堰の段階的撤去の方が環境上は望ましい。本研究で得られた開口部を有する堰の知見が参考になることが期待出来る。</p>					

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

1. 研究の背景・目的

土砂の輸送機能を低下させる固定堰においては、i)堰上流側に土砂を堆積させ、本来の目的である利水機能を低下、ii)洪水時には堰上流側の水位を高め、治水安全度を低下させ、iii)固定堰の下流側では、生物の生息環境を消失させ、自然かく乱を抑制する傾向を持つ。さらには、iv)土砂の移動を遮断するために、下流域では河床低下や河床材料の粗粒化を生じさせ、固定堰本体を保護する根固工や本体の損傷・劣化を引き起こしている。平成29年熊本地震で山腹崩壊に伴い約100万 m^3 の土砂が白川に流入にした結果、下流域では顕著な河床上昇を引き起こした。特に、大規模出水時に斜め堰においてはその直下流側の河岸侵食が懸念される。本研究では、開口部を有する斜め固定堰が流れ、河床変動に与える影響について明らかにするため以下の課題について検討する。

課題1：一級河川・白川における斜め堰の上流域および下流域における河床変動および流れの調査/課題2：斜め堰の開口部が河床変動および流れの構造に与える影響/課題3：斜め堰における開口部の大きさおよび形状が土砂の輸送特性に与える影響【2019年度】なお、課題3については白川下流域の井樋山堰、十八口堰、三本松堰は撤去されることが計画されている。そのため、より一般的な、堰開口部を矩形状に取り、潜り堰上下流における静的平衡河床および動的平衡河床における河床形態および流れの構造について検討した。

(調査・研究内容及び成果)

1) 堰上流域に長年に亘って堆積した土砂を出水時に下流に流すことで浚渫費用を削減でき、2) 堰下流側の河床低下が解消され、固定堰自体の安定性が高まり、堰の維持管理が容易となる。さらに3) 上流側の土砂堆積を軽減することで出水時の水位低下に繋がり治水安全度の向上が期待できる。4) 堰上流からの土砂供給により、下流側では物理・生物環境の回復、自然攪乱の増大から環境機能の改善が期待できる。

(研究成果の河川整備・管理への反映)

河川横断構造物を撤去することなく部分改修に止め、堰に開口部を設けることにより洪水時には水位低下と併せて堰上流に堆積した河床材料を下流に流送させることで堰の上・下流における土砂バランスの改善に繋がることを期待出来る。また、堰撤去が計画されている場合には、堰上流に堆積した大量の土砂礫を一挙に流下させる全面撤去ではなく、堰の段階的撤去の方が環境上は望ましい。本研究で得られた開口部を有する堰の知見が参考になる。

2. 研究成果

2.1 白川と緑川における斜め堰の文献調査

文献調査および現地踏査から熊本県の白川及び緑川において過去に設置されていた堰と既存の堰の実態を明らかにし、過去から現在において白川及び緑川の堰がどのように変化してきたのかを明らかにすることを目的とする。そのためには、過去と現在でどこにどのような堰がどのような経緯で設置されたかを明らかにする必要がある。また、ここで示す過去に設置されていた堰とは築造当時のもの又は絵図に記載されていた当時のものとする。

本調査においては、過去に白川に設置されていた堰に関しては新熊本市史、菊陽町史、白川水系農業水利実態調査、熊本県土地改良史、及び白川の絵図(年不詳)を用いて調査を行った。また、過去に緑川に設置されていた堰に関しては甲佐町史、熊本県土地改良史及び緑川絵図(天保6~11年)を用いて調査を行った。

現在白川及び緑川に設置されている堰に関しては、それぞれGoogle Earth2018による航空写真及び国土地理院発行の1/25000の地形図を用いて調査を行った。白川と緑川における堰の築造年、過去と現在における堰の平面形状をまとめたものがそれぞれ表-1、表-2である。堰の平面形状の分類に関しては、岩屋による堰の分類を参考にした。なお過去に設置されていた堰の平面形状に関しては、文章として詳細に記載されているものがほとんどなかったため、絵図から判断することにした。緑川絵図は堰の形状が詳細に記載されていたため斜め堰の種類まで分類した。斜め堰の種類としては、直線的な形状の斜め堰である直線斜め堰、堰の一部分または堰全体が湾曲している形状の湾曲斜め堰、堰の一部分が屈折している形状の屈折斜め堰の3種類で分類した。白川の絵図からは直角堰か斜め堰かの判断はできたものの、絵図上での堰の記し方から斜め堰の種類までは判断することが困難であった。そのため、白川の絵図に記載されている堰は直角堰と斜め堰の2種類で分類した。現在設置されている堰の平面形状に関しては、航空写真から判断した。

(1) まとめ

文献調査および現地踏査から、以下の結果が得られた。

- 1) 白川においては過去設置されていた堰のうち上井手堰、下井出堰、津久礼堰、馬場楠堰、渡鹿堰の5堰が斜め堰でありその割合としては85%。現存する堰は井樋山堰、十八口堰、三本松堰、渡鹿堰、畑井出堰の5堰が斜め堰でありその割合としては50%であった。
- 2) 緑川においては過去設置されていた堰のうち鶴の瀬堰、麻生原堰、糸田堰、築地堰の4堰が斜め堰であり

表-1 白川の堰

堰の名称	河口からの距離	築造年	堰の平面形状 ²⁾	
			絵図	2018. 11
井樋山堰 (旧中島堰)	4k475m	藩政時代以降(明治31年には存在を確認)	—	直線斜め堰
十八口堰	7k130m	藩政時代(1600~1868)	—	屈折斜め堰
三本松堰	8k125m	加藤時代(1588~1611)	—	直線斜め堰
渡鹿堰	16k415m	慶長年間(1596~1614)	斜め堰	屈折斜め堰
馬場楠堰	32k985m	慶長13年(1608)	斜め堰	直角堰
津久礼堰	34k215m	天和3年(1683)	斜め堰	直角堰
玉岡堰	37k265m	享保11年(1726)	直角堰	直角堰
下井出堰	41k505m	元和4年(1618)	斜め堰	直角堰
上井出堰	43k065m	寛永14年(1637)	斜め堰	直角堰
畑井出堰	44k515m	延宝3年(1675)	—	直線斜め堰

表-2 緑川の堰

堰の名称	河口からの距離	築造年	堰の平面形状 ²⁾	
			絵図	2018. 11
杉島堰	8k15m	明治以降	—	直角堰
丹生宮堰	11k370m	明治以降	—	直角堰
高田堰	14k180m	明治以降	—	直角堰
築地堰	16k920m	慶長年間(1596~1614)	湾曲斜め堰	直角堰
糸田堰	21k885m	慶長12年(1607)	直線斜め堰	直角堰
麻生原堰	23k300m	慶長13年(1608)	湾曲斜め堰	屈折斜め堰
鶉の瀬堰	29k80m	慶長12年(1607)	湾曲斜め堰	湾曲斜め堰

その割合は100%現存する堰は鶉の瀬堰、麻生原堰のみが斜め堰でありその割合としては30%であった。

- 3) 白川、緑川共に過去設置されていた堰は斜め堰が多く、これは、平水時に効率的に取水し、洪水時は堰が受ける流体力を軽減させ、堰上流における水位上昇を抑制し治水安全度を高めるためだと考えられる。

2.2 開口部を有する斜め越流堰が河床変動および流れの構造に与える影響

実験は全長10m、幅40cm、高さ20cmの亚克力樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。水路の上流端から下流5mに堰を設置し、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一樣な大きさ(3cmから10.5cmの範囲)で平均粒径1.7mm、均等係数1.50の珪砂を敷き均した。なお、相対越流水深は、越流水深を堰高で除した値である。移動床実験および流速の検討は、開口部のない斜め堰(以下斜め非開口堰)および水路中央部に幅10cmの開口部を有する堰(以下斜め開口堰)の2種において行った。なお堰の角度は、いずれの堰も側岸の法線を基準にして上流に $\theta=30^\circ$ とした。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-3に移動床実験の条件を示す。本研究では、静的平衡河床を対象としているために堰の影響が及ばない上流域および下流域で平均粒径の河床材料が掃流されない限界掃流力以下の流速に設定した。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($Q=4.31/s$)および水路勾配($I=1/500$)の下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20cm/sおよび堰下流の水深 $h=6.5$ cmにおいて相対越流水深を系統的に変化させた。

表中の U_m は堰より上流3m位置における断面平均流速、 H は堰中央における越流水深、 DW は堰高、 H/DW は相対越流水深である。 K_1 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 Melville, B. W.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。本実験の非開口堰頂部における限界水深 hc は2.1cmであり、越流形態はすべての実験条件において、もぐり越流である。座標系は堰の中心上の水面を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直下方向に z 軸をとり、右手系とする。

また、それぞれの流速成分を、時間平均成分を、変動成分をと表す。主流速 U および横断方向成分 V の合成流速 $|u|$ とする。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-3のCaseN2およびCase04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。PIV法による流速の計測においては水路真上から表面流の撮影を行い、流速の計測時間は20秒、トレーサーとして粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.02のナイロン粒子を使用した。

可視化画像はフレームレイト59.94fps(frame per second), 1920×1080 (pixel) のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録し、PIV法によって処理された。電磁流速計のプロープの直径は先端部 $\phi 4\text{mm}\sim 8\text{mm}$ である。電磁流速計の出力信号は100Hzで、AD変換した後1測点4,096個(計測時間は40.96秒)のデータに関して統計処理が施された。

表-3 実験条件

開口部の有無	Case	$U_m(\text{cm/s})$	K_1	$H(\text{cm})$	$D_w(\text{cm})$	H/D_w
開口なし	N1	18.1	0.38	2.1	3.5	0.60
	N2			2.5	3	0.83
	N3			2.8	2.8	1.0
	N4			3	2.5	1.2
開口あり	O1	20.0	0.47	1	4.5	0.22
	O2			1.5	4	0.38
	O3			2	3.5	0.57
	O4			2.5	3	0.83
	O5			2.8	2.8	1.0
	O6			3	2.5	1.2

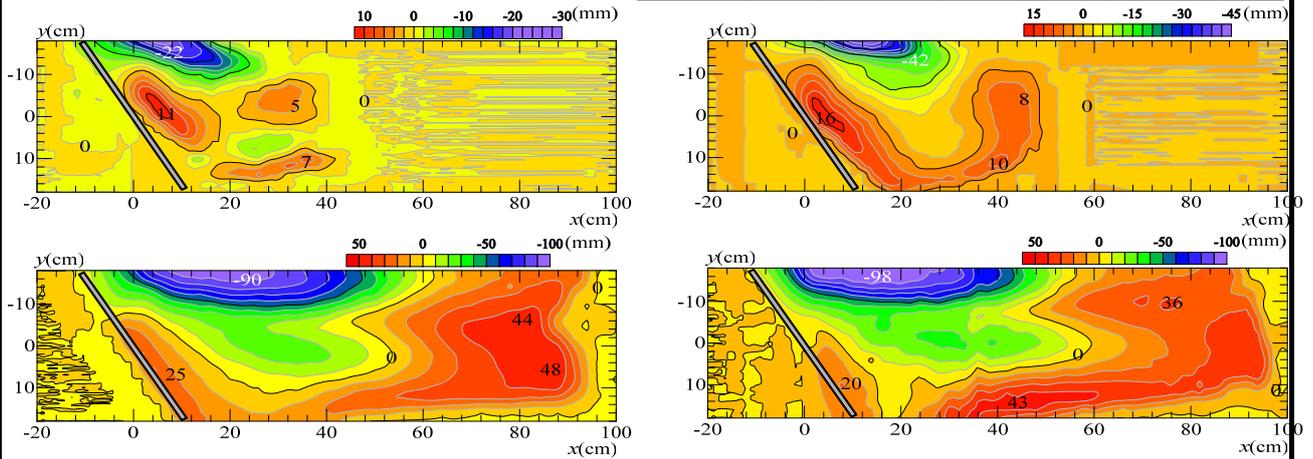


図-1 河床形状 (斜め非開口堰)

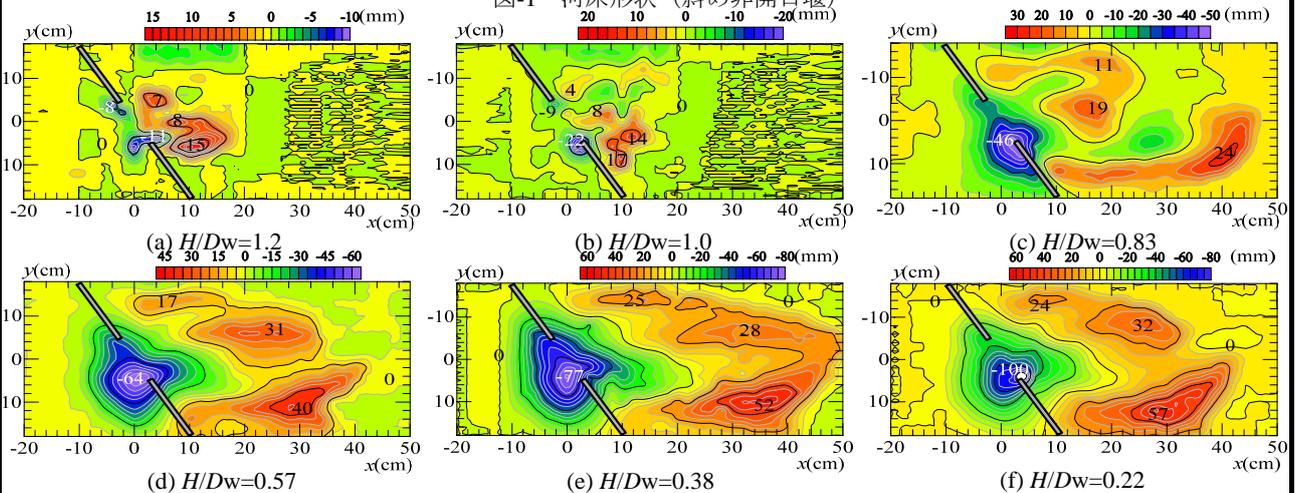


図-2 河床形状 (斜め開口堰)

実験結果

(1) 斜め非開口堰

図-1は、それぞれ、断面平均流速が 20cm/s における斜め非開口堰の河床洗掘・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。

斜め非開口堰は直角堰に較べ横断方向の非対称性が強く現れ、その洗掘は左岸近傍に沿って集中し、洗掘の面的広がりおよび深さは相対越流水深 H/D_w の減少に従って大きくなる。これは、流れは堰に直交するように流下するが、相対越流水深 H/D_w の増加に伴い堰頂部を越流

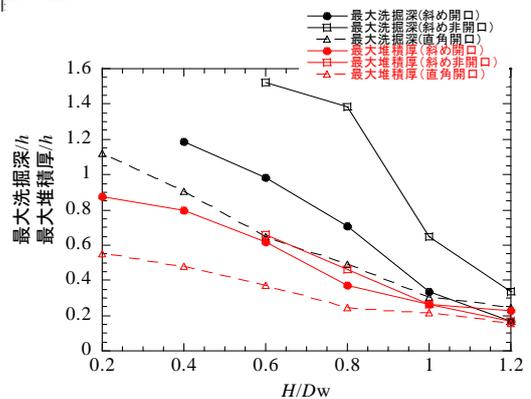


図-3 最大洗掘深・最大堆積厚と相対越流水深

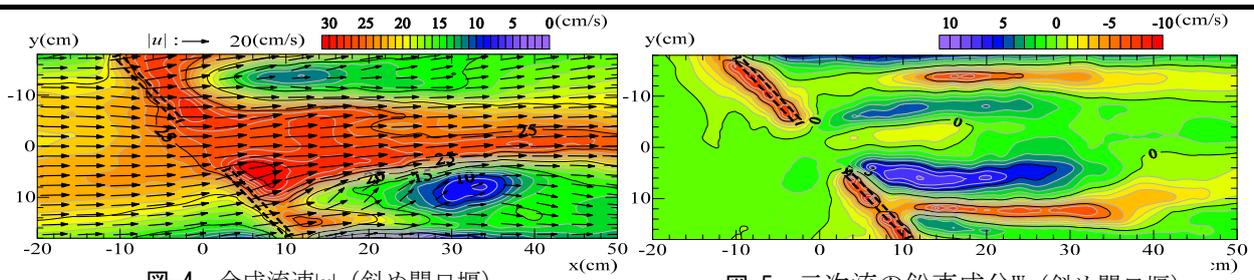
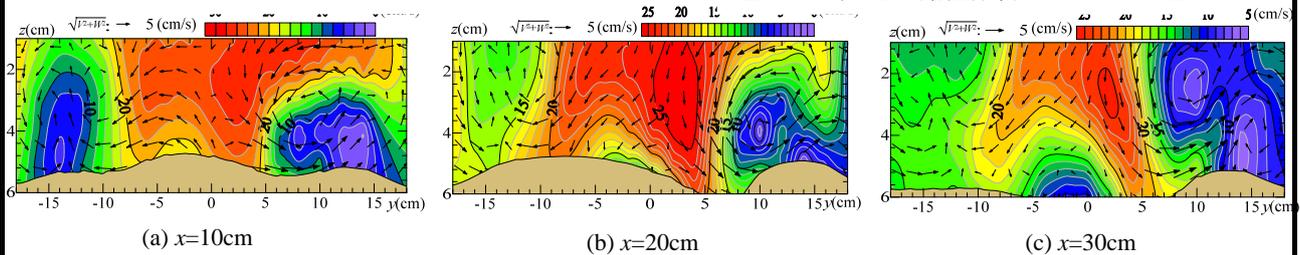


図-4 合成流速 $|u|$ (斜め開口堰)

図-5 二次流の鉛直成分 W (斜め開口堰)



(a) $x=10\text{cm}$

(b) $x=20\text{cm}$

(c) $x=30\text{cm}$

図-6 合成流速 $|u|$ および二次流ベクトル (斜め開口堰)

する断面積が増加するため、流速が減少したためである。最大洗掘深は、相対越流水深の減少と共に大きくなり、 $H/D_w=0.60$ および $H/D_w=0.83$ では水深 h の約2倍程度にまで達していることが分かる。また、洗掘の流下距離は堰長の2倍以内であり、相対越流水深 H/D_w の減少に従って大きくなる。斜め非開口堰における土砂の堆積は、斜め堰に沿った直下流、右岸近傍および左岸洗掘孔の下流に現れ、左岸に発達した洗掘に比べ広範囲に分布していることが見て取れる。

最大堆積厚は、最大洗掘深のおよそ半分の高さであり、相対越流水深 H/D_w の減少に従って大きくなる。

(2) 斜め開口堰

a) 河床形状

図-2は、それぞれ、断面平均流速が 20cm/s における斜め開口堰の河床洗掘・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。斜め開口堰は、斜め非開口堰に比べ非対称性が弱くなり、斜め非開口堰において堰下流左岸近傍に生じた局所洗掘は、堰に開口部を設けることによって洗掘位置が河岸から河道中央部に遷移し、洗掘の面的広がりおよび深さは相対越流水深 H/D_w の減少に従って大きくなる。最大洗掘深の位置は、右岸側の堰先端部に現れることが見て取れる。堰前面において形成された馬蹄形渦に伴う下降流が、流れ場の非対称性により左側の堰先端部に比べ右側の堰先端部において強く、局所洗掘が大きくなることが推察される。

斜め開口堰における顕著な砂州は、堰下流の水路中央およびその左右岸に沿って3箇所が発生し、いずれの相対越流水深においても類似している。全般的には右岸の砂州の高さが最も大きく、水路中央および左岸の順で小さいことが分かる。

図-3に相対越流水深 H/D_w に対する最大洗掘深および最大堆積厚の変化を示す。図中には参考として直角開口堰の最大洗掘深および最大堆積厚をプロットし、各最大洗掘深および最大堆積厚は堰から下流 3m 位置における水深 h で無次元化された。

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、斜め非開口および開口堰の両者において相対越流水深 H/D_w の増大に伴って一様に減少する。最大洗掘深は、斜め非開口堰で最も大きく、斜め開口堰および直角開口堰の順で小さくなる。斜め開口堰における最大洗掘深は、斜め非開口堰に比べ約 $1/2$ 程度となる。斜め開口堰における最大堆積厚は、斜め非開口に比べ若干小さいことが分かる。

b) 斜め開口堰下流の局所流

図-4および5は、Case04におけるそれぞれ、水面下 2cm で計測された合成流速 $|u|$ および二次流の鉛直成分 W の平面流況を示す。図中には、主流速 U および二次流の横断方向成分 V の合成ベクトルを示している。なお、堰頂部は基準水面下 2.5cm 位置にある。斜め開口堰の $z=2\text{cm}$ における合成流速 $|u|$ は、堰頂部付近および水路中央部で相対的に高速域が形成される。堰下流側では断面平均流速 21.5cm/s より大きい $|u|>20\text{cm/s}$ の高速域が水路中央部で流下方向に漸縮する傾向を有する。堰下流域の左右岸近傍で断面平均流速のおよそ $1/2$ 程度の低速域が形成されている。特に右岸側での低速域は、左岸側のそれに比べて顕著である。

二次流の鉛直方向成分 W の空間分布は、堰下流域において上昇流および下降流が横断方向に交互に現れている。上昇流および下降流の極大は、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。また、右岸側の堰背後に発生した上昇流および下降流は左岸のそれらに比べ大きいことが分かる。

図-6は、それぞれ斜め開口堰の堰下流域の(a) $x=10\text{cm}$ 、(b) $x=20\text{cm}$ および(c) $x=30\text{cm}$ における鉛直面内の合

成流速 u のコンター図を示す。なお図中には、二次流の横断方向成分 V および鉛直成分 W の合成ベクトルを示す。斜め開口堰における二次流ベクトルは、(a) $x=10\text{cm}$ において堰背後に当たる $y=-18\text{cm}\sim-5\text{cm}$ および $y=5\text{cm}\sim18\text{cm}$ の範囲において二次流セルが確認できる。堰前面で発生した横断方向に軸を持つ馬蹄形渦は堰開口部を流下するに従って流下方向に軸を持つ縦渦に向きを変え、その外側には逆回転の縦渦が形成されたことが認められる。二次流の大きさは左岸に比べ右岸で大きいことが分かる。また、二次流セルの上昇流は砂州の峰部に当たる $y=2\text{cm}$ 、 $y=-13\text{cm}$ および $y=-11\text{cm}$ 付近で、下降流は砂州間の谷部に位置する $y=-10\text{cm}\sim-6\text{cm}$ および $y=4\text{cm}\sim8\text{cm}$ の区間で発生していることが認められる。一方で、斜め開口堰においても斜め非開口堰と同様に左岸近傍の下降流が生じているが、その大きさは、 $x=10\text{cm}$ において約 5cm/s であるのに対し、斜め非開口堰において約 15cm/s であり、 $1/3$ 程度まで減少していることが分かる。

合成流速 u は、(a) $x=10\text{cm}$ においては堰開口部 $y=-5\text{cm}\sim5\text{cm}$ の間では相対的に高速域を形成され、非対称性により最大流速は、右岸側に現れる。最大流速は流下に伴い減少傾向を示す。堰背後にあたる $y<-5\text{cm}$ および $y>5\text{cm}$ の間では鉛直方向に強いシアが認められる。(b) $x=20\text{cm}$ および(c) 30cm においては合成流速 u の等値線が水路中央 $y=0\text{cm}$ の底面付近で上に凸、 $y=\pm 5\text{cm}$ 付近では高速域が見られ、水路中央で上昇流および $y=\pm 5\text{cm}$ 付近の下降流の影響を受けたことが推察される。堰頂部を越流した $y=-18\text{cm}\sim-5\text{cm}$ および $y=5\text{cm}\sim18\text{cm}$ の区間の合成流速 u は、相対的に低速域に当たり、(a) $x=10\text{cm}$ においては堰の影響を受けて鉛直方向に合成流速 u の空間変化は大きく強いせん断層が形成されているが、流下と共に鉛直方向の変化は小さくなり横断方向の流速変化が顕著となっている。特に、 $y<-10\text{cm}$ および $y>10\text{cm}$ の間では水面近傍で流速が流下に従って低下傾向を示す。これは、左右岸の強い上昇流により底面付近の低速流体塊が水面付近まで移流されたことが推察される。また、 $y=\pm 10\text{cm}$ 付近では流下に従って水面付近では減速傾向、底面付近では若干加速傾向にあり、(c) $x=30\text{cm}$ においては僅かではあるが水面に比べ底面付近で流速が大きくなっていることが注目される。この点についても、らせん流に伴う二次流による運動量輸送によって説明出来る。

(3) まとめ

本章では、静的平衡河床を対象に斜め非開口堰および斜め開口堰の比較の基に、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。得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) 斜め非開口堰は直角堰に比べ横断方向の非対称性が強く現れ、その洗掘は左岸近傍に沿って集中し、土砂の堆積は斜め堰に沿った直下流、右岸近傍および左岸洗掘孔の下流に現れ、左岸に発達した洗掘に比べ広範囲に分布する。
- 2) 斜め開口堰は、斜め非開口堰に比べ非対称性が弱まり、斜め非開口堰において堰下流左岸近傍に生じた局所洗掘は、堰に開口部を設けることによって洗掘位置が河岸から河道中央部に遷移する。
- 3) 最大洗掘深は、斜め非開口堰で最も大きく、斜め開口堰および直角開口堰の順で小さくなる。斜め開口堰における最大洗掘深は、斜め非開口堰に比べ約 $1/2$ 程度となる。斜め開口堰における最大堆積厚は、斜め非開口に比べ若干小さい。
- 4) 斜め非開口堰および開口堰の両者における二次流は、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た。
- 5) 斜め開口堰においても斜め非開口堰と同様に左岸近傍の下降流が生じているが、その大きさは斜め非開口堰と比べ、 $1/3$ 程度まで減少していることが分かる。

2.3 開口部が動的平衡河床下の河床変動および流れに与える影響

実験は全長 10m 、幅 40cm 、高さ 20cm の亚克力樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。上流端から下流 5m に図-2に示す堰を設置し、堰上流 4.5m 区間および下流側 4.5m 区間には平均粒径 0.77mm 、均等係数 1.29 の珪砂を敷き均した。実験は静的平衡状態から動的平衡状態までの範囲で連続的に行い、移動床の初期河床高は堰の上下流ともに堰開口部頂部の高さと同じ高さである 12cm の厚さで敷きならした。

表-4に移動床実験の条件を示す。

本研究では土砂の移動を容易にするため、水路勾配 ($I=1/300$) および流量 ($Q=3.3\sim15.431\text{/s}$ の範囲) の下で変化させ実験を行った。ただし水位は下流端の堰で調整した。表中の U_m および h はそれぞれ堰より上流 3m 位置における断面平均流速および水深、 u_* は摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度、 τ_* は無次元掃流力、 Fr はフルード数である。限界摩擦速度 u_{*c} は河床材料の中央粒径から算出され、また摩擦速度は対数則より求めた。なお等価砂粗度 $k_s=2d_{50}$ を用いた。堰上流における河床材料の移動は、Case1~4において静的、Case5~7において動的となる条件である。

本研究では、各ケースにおける水位、河床形状および流れの三次元構造について検討した。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Case3およびCase6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

表-4 実験条件

Case	Discharge $Q(l/s)$	Flow depth $h(cm)$	Mean velocity $U(m/cm/s)$	Friction velocity $u^*(cm/s)$	Dimensionless tractive force τ^*	u^*/u^*c	τ^*/τ^*c	Froude number Fr
1	3.3	5.5	15.4	1.07	0.009	0.52	0.26	0.21
2	4.4	5.5	20.5	1.43	0.016	0.7	0.47	0.27
3	5.5	5.5	24.6	1.72	0.024	0.84	0.71	0.34
4	6.4	5.6	29.1	2.03	0.033	0.99	0.97	0.39
5	8.5	6.3	34.7	2.38	0.046	1.16	1.35	0.44
6	10.5	6.7	40.2	2.74	0.06	1.33	1.76	0.5
7	15.4	7.5	52.8	3.54	0.101	1.72	2.97	0.61

びL型の電磁流速計を用いた。PIV法による流速の計測においては水路真上から表面流の撮影を行い、流速の計測時間は20秒、トレーサーとして粒径 $100\mu m$ 、比重1.02のナイロン粒子を使用した。可視化画像はフレームレート59.94fps(frame per second)、 1920×1080 (pixel) のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録し、PIV法によって処理された。また、電磁流速計の出力信号は100Hzで、AD変換した後1測点4,096個のデータに関して統計処理が施された。

座標系は堰の中心上の水面を原点とし、流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直下方向にz軸をとり、右手系とする。また、それぞれの流速成分を、時間平均成分を、変動成分をと表す。

(1) 河床形状

図-4に上流側の土砂の移動が確認されたCase4~7における堰上流における河床高のコンターを示す。なお、コンターの数値は初期平坦河床からの変化量をmm単位で表示した。Case4において堰上流の土砂は移動し始め、堰より上流200cmで砂州が形成された。さらに掃流力を増加させると、砂州は堰直上流まで伝搬し、土砂は開口部を通して下流へ輸送されることが確認された。堰上流の砂州の最大堆積厚はCase4およびCase5において開口部上流の $y=0cm$ において発生し、Case6およびCase7においてそれぞれ $y=-11cm$ および $y=11cm$ に生じていることが分かる。

図-5に堰直上流および下流の河床高のコンターを示す。なお、コンターの数値は初期平坦河床からの変化量をmm単位で表示した。Case2~Case4は静的平衡河床、Case5~Case8は動的平衡河床である。堰の上流および下流において顕著な洗掘が生じていることが確認できる。堰上流の局所洗掘は、Case2では開口部に近い $y=-8cm\sim -10cm$ の範囲に発生しているが、Case3~7では $y=-18cm\sim -5cm$ および $y=5cm\sim 18cm$ の範囲において生じており、その深さは掃流力の増加するにしたがって大きくなる事が分かる。堰上流の局所洗掘は、堰に衝突した流れによって横断方向に軸を持つ渦が形成され、その渦が土砂を巻き上げ開口部を通して堰の下流へ輸送したことが考えられる。

静的平衡河床における堰下流の極大洗掘は、開口部下流に生じていることが分かる。一方、開口部下流の極大洗掘は横断方向に $y=-10\sim 10cm$ での範囲で生じていることが分かる。Case2, Case3およびCase4における堰下流の水路中央部の最大水深が、それぞれ107.8mm, 108.0mmおよび117.6mmであり、開口部下流の極大洗掘は堰下流の最大水深の約2倍程度の空間スケールを持つ。また開口部下流の極大洗掘は流下方向に堰から $\tau^*/\tau^*c=0.47$ において $x=58cm$ 、 $\tau^*/\tau^*c=0.71$ では $x=96cm$ 、 $\tau^*/\tau^*c=0.97$ では $x=130cm$ であり、掃流力の増大に伴って流下方向に拡大していることが分かる。これは掃流力の増大とともに開口部を通過する流速が増加するため、より下流の土砂が掃流されたことが考えられる。

動的平衡河床となる $\tau^*/\tau^*c=1.35\sim 2.97$ では、開口部下流の洗掘の平面的な広がり静的平衡河床に比べ大きくなっていることが分かる。 $\tau^*/\tau^*c=1.35\sim 2.97$ における開口部下流の極大洗掘の横断方向スケールは、最も大きいところで $\tau^*/\tau^*c=1.35$ では $y=-14\sim 14cm$ 、 $\tau^*/\tau^*c=1.76$ では $y=-12\sim 12cm$ および $\tau^*/\tau^*c=1.76$ では $y=-12\sim 13cm$ であり、Case5, Case6およびCase7における堰下流の水路中央部の最大水深が、それぞれ143mm, 127mmおよび122mmで堰下流の最大水深の約2倍程度の空間スケールを持つ。本実験において、最大洗掘深の大きさは $\tau^*/\tau^*c=1.35$ で最も大きく、それよりも掃流力を増加させた $\tau^*/\tau^*c=1.76$ および $\tau^*/\tau^*c=2.97$ の場合、最大洗掘深は $\tau^*/\tau^*c=1.35$ に比べ減少する傾向が認められる。

一方、堰下流の堆積は洗掘孔の下流で発生し、堆積の空間分布は掃流力の増大に伴って下流へ広がっていることが分かる。また本実験結果において最大堆積厚は $\tau^*/\tau^*c=0.71$ の35mmで最大となり、さらに掃流力が増加するにしたがって減少傾向を示すことが分かる。動的平衡河床条件となる $\tau^*/\tau^*c=1.35\sim 2.97$ において堰下流の顕著な堆積は見られない。

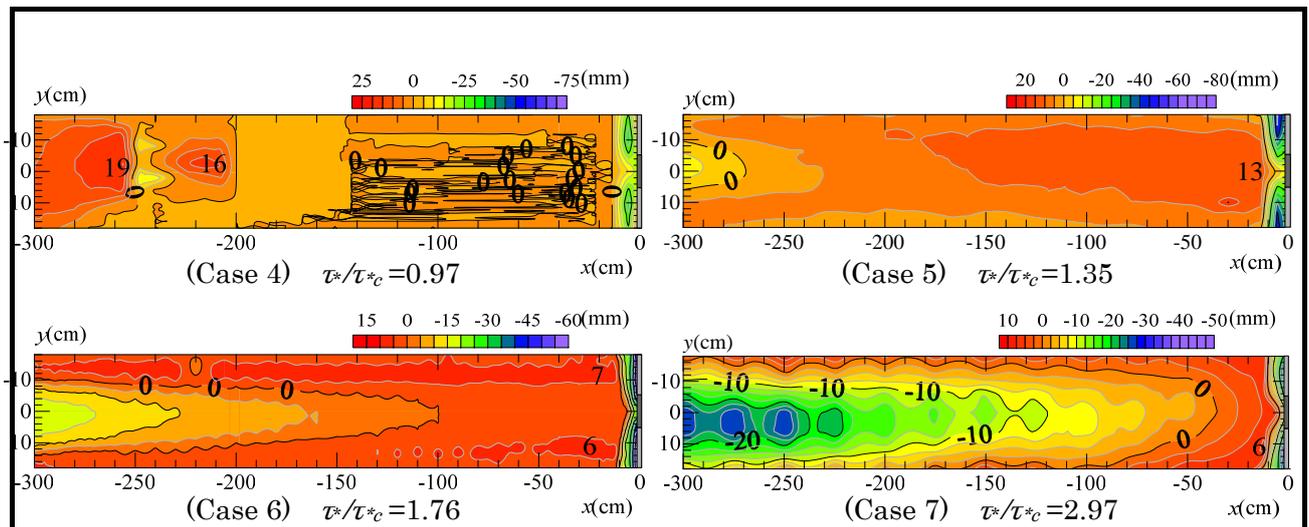


図-4.4 堰上流における河床形状のコンター

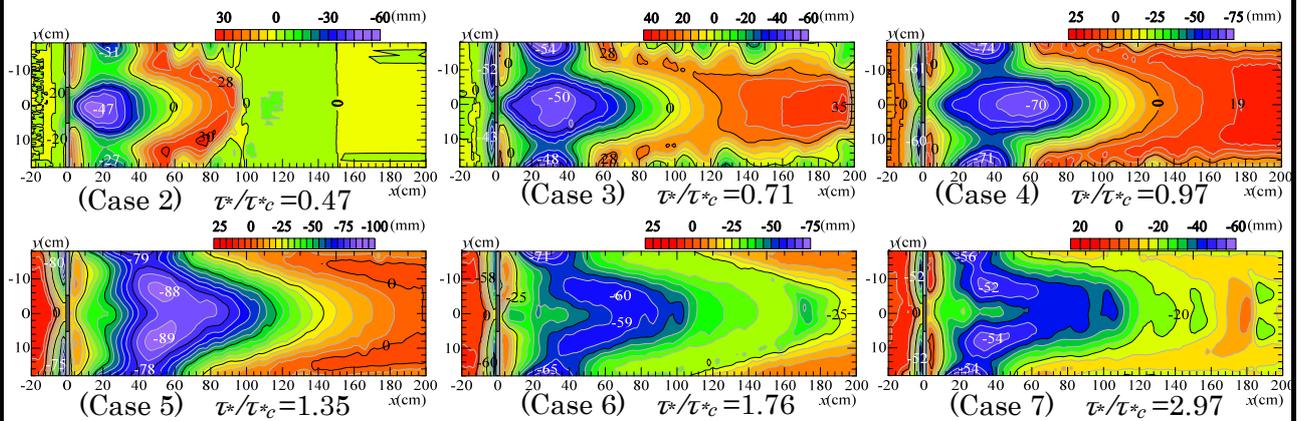


図-4.5 河床形状のコンター

3. まとめ

本章では、堰開口部を矩形形状に取り、潜り堰上下流における静的平衡河床および動的平衡河床における河床形態および流れの構造について検討した。得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) 開口部を有する堰下流の洗掘は、開口部直下流に集中し、洗掘の面的広がりや掃流力の増加に伴って大きくなる。
- 2) 堰上流の洗掘の縦断形状および横断形状は、掃流力に対して相似形が認められた。さらに、堰下流の洗掘の縦断形状および横断形状は、静的平衡河床においてM形状で相似形が認められ、動的平衡河床においてW形状で類似の傾向を示す。
- 3) 掃流力に対する上流および下流の最大洗掘深の変化は、掃流力 $\tau^*/\tau^*c = 0.26 \sim 1.35$ の範囲でほぼ線形的に増加し、掃流力 $\tau^*/\tau^*c = 1.76$ および 2.97 における最大洗掘深の大きさは、掃流力 $\tau^*/\tau^*c = 1.35$ におけるそれに比べ減少することが認められる。
- 4) 堰下流の水路中央部における上流側の斜面角度および下流側の斜面角度は、掃流力の増大に伴って指数関数的に減少する。
- 5) 堰上流域では堰開口部近傍において強い下降流が現れ、堰下流域では河床形状との相関が認められ、河床の峰部では上昇流、谷部において収束する下降流が認められた。

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等

主な発表論文 (査読付き論文)

- 1) 大本照憲・安達幹治・平川隆一：荒瀬ダムの撤去が直下流域の土砂動態および流れに与えた影響，河川技術論文集，第24巻， pp. 315-320， 2018. 6
- 2) Terunori OHMOTO and Hirotaka UNE: Effects of Weir with an Opening on Bed Morphology and Flow Patterns, 7th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS2018), 2018, Aachen University of Applied Sciences, Germany, doi:10.15142/T3ND24(978-0-692-13277-7)
- 3) TERUNORI OHMOTO, KANJI ADACHI, SHAKILA KAYUM and RYUICHI HIRAKAWA: EFFECTS OF A PARTIAL DAM REMOVAL ON RIVER BED TOPOGRAPHY AND FLOW FIELD S, 12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE) 2018, August 20th, Tokyo, Japan
- 4) HIROTAKA UNE and TERUNORI OHMOTO: EFFECTS OF UPWARD WEIR WITH AN OPENING ON RIVER BED AND FLOW STRUCTURE, 12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE) 2018, August 20th, Tokyo, Japan
- 5) 宇根拓孝・大本照憲：開口部を有する斜め越流堰が河床変動および流れの構造に与える影響，土木学会論文集B1(水工学) Vol. 74, No. 5, I_829-I_834,
- 6) Terunori Ohmoto and Hirotaka Une: EFFECTS OF WEIR WITH AN OPENING ON BED CONFIGURATION AND FLOW STRUCTURE, 38th IAHR World Congress, doi:10.3850/38WC092019-0740, September, 2019
- 7) Hirotaka Une, Terunori Ohmoto, Kazuki Kuranaga: the 22nd IAHR-APD Congress. EFFECTS OF SUBMERGED WEIR WITH AN OPENING ON BEDFORM AND FLOW STRUCTURE UNDER LIVE-BED CONDITIONS, the 22nd IAHR-APD Congress, 2020 (in print)

口頭発表

- 1) Hirotaka Une Terunori Ohmoto Kanji Adachi and Hiroto Kondo: Effects of Upward Weir with an Opening on Bed Deformation and Flow Structure, Proceedings of Japan- Korea-Taiwan 2018 Joint Conference on Civil Engineering, 2018.8.27
- 2) Hirotaka Une, Terunori Ohmoto, Kanji Adachi and Hiroto Kondo: Effects of Oblique Weir with An Opening on Bed Deformation and Flow Structure, 2018 ENGINEERING WORKSHOP in Kumamoto, 2018.8.23

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

該当無し

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

該当無し

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

(1年目終了時点)

現在、動的平衡河床において堰開口部が河床形状および流れに与える影響について検討している。また、熊本県を流れる一級河川の白川および緑川に存在する斜め堰に関する古文書および絵図を収集し、その背景について調べている。さらに、白川最下流に存在する斜め堰の井樋山堰の現地調査および出水時(2018.7.8)にドローンを用いた流れの調査を実施したが、流量が少なかったために越流が弱く、堰下流の流れは十分に把握出来なかった。今後の出水時に流況を把握出来る体制を整えている。2019年度は、斜め堰における開口部の大きさおよび形状が土砂の輸送特性に与える影響を検討し、堰の開口幅および位置、開口部深さ等を検討し、既存の堰に対して最適な開口部の設計法を提案したいと考えている。

(2年目終了時点)

熊本河川国道事務所では白川下流域における井樋山堰(旧中島堰)十八口堰三本松堰については統廃合され斜め堰は全て撤去する方向で検討されている。

本研究では、このためより一般的な開口部を矩形断面形状で静的および動的平衡状態における河床形状および流れの三次元構造について議論した。

今後、撤去前に斜め堰に堆積した土砂礫を人工浚渫ではなく、自然流下で段階的に下流に流下させる方法について検討している。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

室内実験から、最大洗掘深および最大堆積厚は静的平衡河床において斜め堰は直角堰と同様に相対越流水深の増大に伴って指数関数的に減少すること、さらに、斜め堰に開口部を設けることによって洗掘位置が河岸から河道中央部に遷移すること、また高速域および下降流も河岸から河道中央部に移動することが見出された。

堰に開口部を設けることによって1) 堰上流域に長年に亘って堆積した土砂を出水時に下流に流すことで浚渫費用を削減でき、2) 堰下流側の河床低下が解消され、固定堰自体の安定が高まり、堰の維持管理が容易となる。さらに3) 上流側の土砂堆積が軽減することで出水時の水位低下に繋がり治水安全度の向上が期待できる。4) 上流からの土砂供給により、下流側では物理・生物環境の回復、自然攪乱の増大から環境機能の改善が期待できることが認められた。横断構造物が持つ治水・環境上の課題が緩和出来るものと考えている。