開水路側岸凹部の流れ構造に及ぼす対岸水制の影響

Effects of an Opposite-side Spur Dike on Flow Structures in a Side Concavity Zone in an Open Channel

富永 晃宏¹・小島 直也²・市川 亜也佳²

Akihiro TOMINAGA, Naoya KOJIMA and Ayaka ICHIKAWA

¹工博 名古屋工業大学院教授 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²名古屋工業大学大学院博士前期課程 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Spur dikes are sometimes used to control main flow and they may affect opposite-side flow structures. In this study, effects of spur dike on flow structures in a side concavity zone on opposite side were investigated. The velocity was measured by using PIV method in a laboratory flume. Location of the spur dike relative to concavity zone was changed and its effects were considered. The magnitude of recirculation velocity and water exchange velocity in the concavity zone was enhanced by setting a spur dike on opposite side. This is mainly caused by acceleration of interfacial main flow due to contraction effect of spur dike. This acceleration process is changed with emerged or submerged condition of spur dike. Whereas separation zone behind emerged spur dike is elongated far downstream, that is shortened behind submerged spur dike. Other effects of spur dike such as flow deflection and three-dimensionality also have some effects on water exchange process between concavity zone and main flow.

Key Words : side concavity, spur dike, separation, recirculation, PIV, flow structure

1. 序論

近年、環境への意識の高まりから河川管理においても自然環境保全、復元の取り組みとして多自然川づくりが注目されるようになり、わんどのような河岸凹部は水辺の生物の生息域として保全されたり人工的に設置されたりしている。また、船着き場や親水のための入り江等により、川幅の流下方向変化が発生する場合がある。このような河岸凹部の存在は、河道の急拡という現象をもたらす、流速の低下や循環渦の発生によって土砂の堆積が顕著になったり、死水域の形成により水質の悪化を招いたりすることが問題となっている。

2008年3月に名古屋市内を流れる矢田川に施工された人工わんどにおいては、開口部に流向制御のための置き石工を設置したこともあって、施工直後から著しい土砂堆積が見られ、2008年8月の大規模な出水により、開口部は下流側の一部を残して閉塞に至った¹⁾。また、埋没する以前においても河岸死水域の存在は外来魚の定着を促し、流水環境の消失が悪影響を及ぼす場合が指摘されている²⁾。

わんどの機能維持のために、わんどの開口部境界への構造物設置による流れの制御に関して様々な研究が行われている^{3), 4), 5), 6)}。これらは直接的に凹部内への主流部からの流入を制御するものであり、主流と凹部内

の水交換の抑制によって凹部内への土砂輸送を減少させようとするものである。一方、凹部開口部上流端に水制のような突起を設けることで、凹部内の水交換が活発化することが示されている⁷⁾。開口部下流端に設置した場合は返って水交換を抑制する結果となった。これらは、凹部に接近する主流の流れを変化させることで凹部内の水交換を制御しようとするものと言える。前述の矢田川わんどにおいては、水質及び生態環境の面から、わんど内への流入の確保が必要とされ、対岸への水制の設置が検討された。また、感潮都市河川である名古屋市の堀川では中流部に大きな凹部が存在し、潮汐流によって発生する循環流の特性や浮遊ゴミの挙動が観測された^{8), 9)}。このような循環流はゴミの集積やSSの堆積に影響していると考えられ、これを制御することで水質改善の一方策となる可能性がある。

本研究では、このように主流域の流れを水制によって制御する場合を想定し、凹部内の流れと水交換に及ぼす影響について検討するために、基礎的な実験的検討を行った。実際には水制の設置によって河床変動が発生し、固定床とは異なる流れ場が形成されることが知られているが¹⁰⁾、今回はこのような影響は考えずに固定床のみについて検討する。凹部は単純な長方形とし、対岸の水制の流下方向位置を系統的に変化させるとともに、相対水深を変化させて水制が非越流となる

場合と越流になる場合について検討した。流速計測には PIV 法を用いて、主流域から凹部域内での流れ構造を詳細に計測した。この対岸水制を設置することの影響は、縮流効果により凹部境界部に発生するせん断層の代表流速を加速することと、水はねにより流向を変化させること、また越流型では主流域で 3 次元性的な流れ構造を発生させていることが考えられる。このような観点から、水制の設置が凹部近傍の主流に与える変化と凹部内の流れ構造に及ぼす影響を見ていくこととする。

2. 実験方法

実験水路は、長さ 7.5m、全幅 0.3m の勾配可変開水路を用いた。側面はガラス張り、レーザー光の反射を防ぐために、全水路底に黒く塗装した塩化ビニル板を敷いている。左岸側に幅 0.1m、高さ 6.3cm の塩ビ板を設置し、水路上流端から 3m の位置に開口部長さ $B_c = 0.2\text{m}$ 、奥行き $L_c = 0.1\text{m}$ の凹部を設けた。この凹部のアスペクト比は 2.0 となる。また、主水路の幅 $B_m = 0.2\text{m}$ となる。水制モデルは、長さ $l = 5.0\text{cm}$ 、高さ $d = 4.0\text{cm}$ 、幅 $b = 1.0\text{cm}$ のアクリル直方体を用いた。座標系として、流下方向 x の原点を凹部上流端とし、横断方向 y の原点を凹部側壁にとり主水路に向かって正とし、鉛直方向は z としている。水制は凹部の上流端から $x = -5\text{cm}$ 、 -15cm 、 -25cm の凹部と反対側の側壁に設置した。この水制の上流面と凹部上流端との距離を水制距離 L_s とする。水路勾配は 1/2000 とし、水深 h が水制高さ以下の非越流時に 3.5cm、水制高さを越える越流時に 6.0cm となるように、流量 Q をインバータモーターにより調節した。実験条件を表-1 に示す。ここに U_o は主水路の断面平均流速である。可視化画像撮影のために水制周辺で大きな水面変化が起きないようにフルード数を 0.2 程度に設定した。したがって今回は水深分布や変動については計測していない。水制の配置と凹部の位置関係を図-1 に示す。水制の設置位置については、 $x = 0\text{cm}$ や凹部域内についても予備実験を行ったが、凹部内の流れ構造に大きな影響が見られなかった。したがって、水制の影響が対岸に現れるにはある程度の助走距離が必要であることから、今回の条件が設定された。Case-1 および Case-5 は水制を設置しないケースである。

PIV 計測の流れの可視化には、直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面および鉛直縦断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面は $h = 3.5\text{cm}$ では 5mm 間隔で 6 断面

表-1 実験条件

	discharge Q (lit/s)	flow depth h (cm)	mean velocity U_o (cm/s)	spur-dike distance L_s (cm)	Froude Number Fr	Reynolds number $Re(=U_o h/\nu)$
Case-1	0.82	3.5	11.7	-	0.20	3410
Case-2				5		
Case-3				15		
Case-4				25		
Case-5	2.10	6.0	17.5	-	0.23	8750
Case-6				5		
Case-7				15		
Case-8				25

図-1 凹部と水制の位置関係

($z = 0.5 \sim 3.0\text{cm}$)、 $h = 6.0\text{cm}$ では 0.5cm 間隔で 11 断面 ($z = 0.5 \sim 5.5\text{cm}$)、鉛直断面として 10 断面 (右岸から 4.0, 7.0, 11.0, 14.0, 17.0, 22.0, 26.0, 28.0cm) を設定した。この可視化画像は高速度カメラ (ライブラリー) を用いて 1/200s で撮影した。画像計測には FlowExpert (カトウ光研株式会社) PIV 解析ソフトを用いて相互相関法により流速計測を行い、16 秒間 3200 の流速ベクトルデータを得た。

3. 実験結果とその考察

水制を越流しない $h = 3.5\text{cm}$ のケースでは、凹部内の流れ構造は鉛直方向にほとんど変化せず、ほぼ 2 次元性であった。ただし、水制背後のはく離域では縦渦の存在を示す 3 次元性的な流れ構造が見られた。一方、水制を越流する $h = 6.0\text{cm}$ のケースでは、主流域の 3 次元性が強まるとともに、凹部内でも底面側と水面側で流れ構造の変化が見られた。この場合においても凹部内の渦構造は大きく変化しなかった。

3.1 平面流速ベクトル

図-2 に水制高さを越流しないケースの水平断面 $z = 1.5\text{cm}$ における時間平均平面流速ベクトルを示す。水制がない場合 (Case-1) の凹部内の渦構造については、凹部の下流壁に沿って凹部内に流入して再循環渦を形成している。その中心位置は x 方向には凹部長さの約 65% 下流側で y 方向には凹部幅のちょうど中心にあり、

図-2 平面流速ベクトル（水制非越流ケース， $z=1.5\text{cm}$ ）

この再循環渦より上流の凹部内では淀んだ領域となっている。水制を設置したケースは凹部内の流速が明らかに大きくなっていることがわかる。この大きさの違いについては後述する。凹部内の再循環渦の形状は水制がある場合と無い場合で大きな違いは見られず、渦の縦長さスケールと上流の淀み域の大きさが異なるのみである。

Case-2 においては、再循環渦は凹部幅の 1.5 倍程度の縦長さスケールを持ち、上流側は下流側の流入域より幅広く流出する流れが見られる。非越流水制の背後にはく離域が長く形成されており、水制直後の水制長さの 2 倍程度の領域では凹部に向かう横断流速成分が見られ、4 倍程度下流から再び対岸側への戻り流れが見られる。Case-3 では主流域の流向がほぼ直線的になっている点異なるが、凹部内の流れ構造にはほとんど変化が見られない。Case-4 では水制が撮影範囲外にあり、凹部上流の接近流はほぼ x 方向に平行な流れとなっている。凹部内の流れ構造は Case-2, 3 と全く同様である。凹部対岸では主流が右岸へ向かう流れとなっており、水制背後で縦長の循環流が形成されている。なお、Case-4 および Case-8 では上流の水制部分の PIV 解析も行っており、合成された流れ構造が得られてい

るが、ここでは凹部付近の流れ構造を比較することに重点を置いたため、上流側は示していない。

図-3に水制を越流する $h=6\text{cm}$ のケースの $z=1.5\text{cm}$ における時間平均平面流速ベクトルを示す。ここでは流量を増加させており、水深の増加とともに平均流速も増加している。そのため、水制のないCase-5でも凹部内の流速は主流域の平均流速程度の増大が見られるが、再循環流の形状はCase-1とほとんど変化がない。

Case-6では、越流水制の背後で水制を越流する流れによる横断方向軸を持つ渦が発生し、これと平面渦との相互作用によりはく離域は大幅に縮小し、流下方向長さスケールが水制長の3～4倍程度のはく離渦が形成されている。再付着点は凹部の中間点位置にあたり、この渦の下流では水制側側壁への急激な回り込みが見られる¹¹⁾。Case-7では再付着点位置が凹部の上流端位置にあたり、凹部対岸で右岸側壁へ向かう流れが支配的となっている。Case-8では再付着点が凹部より上流になり、凹部対岸での偏流は弱まっている。3次元の流れを把握するために、図-4にCase-6とCase-7の $z=5.5\text{cm}$ における時間平均平面流速ベクトルを示す。水制高さより上の平面では、水制を越流する際に水制とは反対側への偏流が発生しているのがわかる。また、

図-3 平面流速ベクトル(水制越流ケース, $z=1.5\text{cm}$)

図-4 平面流速ベクトル(水制越流ケース, $z=5.5\text{cm}$)

底層のはく離渦の終端付近から側壁から離れる流れが顕著となり、これより下流では淀みが発生し大きく減速している。これは底層で側壁側へ回り込んだ流れが側壁に沿って上昇する縦渦構造を示しているものと考えられる。したがって、越流水制背後のある程度下流では上層の減速が発達し、下層よりも流速が遅くなる現象が発生している。Case-7ではこの淀み部の下流に再び側壁から離れる流れが発生しており、縦渦構造は流下方向に一樣でないことが示唆される。

凹部内の流れ構造に着目すると、Case-6においては、再循環渦の縦長さスケールが増大し、凹部上流側から

幅広い範囲での流出が見られる。その結果上流の淀み域は縮小している。Case-7では凹部内上流の淀み域が若干増大しているように見え、Case-8では明らかに凹部内渦の縦長さスケールが減少している。Case-6およびCase-7の水面近傍の平面 $z=5.5\text{cm}$ では、凹部内の渦構造は大きく変化していないが、凹部境界での流出が底面近傍に比べて小さくなっていることが認められる。

このような渦構造の微妙な変化については、計測断面ごとに種々のパターンが見られたが、系統的な3次元構造を示すまでには至らなかった。非定常な大規模な構造の変化が含まれていると考えられ、今回の16秒と

図-5 瞬間流速の例 (Case-2)

いう平均時間ではばらつきの範囲である可能性がある。そこで、瞬間的な流速変動の例として、Case-2の $z=0.5\text{cm}$ の凹部境界の中央付近 ($y=9.75\text{cm}$, $x=10.5\text{cm}$) における u と v の瞬間流速を図-5に示す。凹部と主流域の境界付近ではせん断不安定に伴う周期的な流速変動が見られることがわかる。横断方向流速は特に規則的な振動を示し、その周期は約1秒である。したがって、このような周期を含む流速変動については16秒間の計測も十分な平均時間であると言える。ただし、さらに長周期の変動が発生している可能性もあり、これについては長時間計測も視野に入れて今後の課題としたい。

3.2 凹部内流れの定量的評価

再循環渦の構造はほぼ普遍的で変化しないことから、この凹部内流速強度を平均の合成流速で代表させることとする。凹部内で体積平均した合成流速を U_a とし、 U_o で無次元化した値と水制距離 L_s を主水路幅 B_m で除した無次元水制距離との関係を図-6 に示す。ここに、 U_a は次式で表される。

$$U_a = \frac{1}{L_c B_c h} \int_0^{L_c} \int_0^{B_c} \int_0^h U dx dy dz \quad (1)$$

また、図の原点である $L_s/B_m = 0$ は水制が無い場合の値を示していることに注意する。水制を越流しない場合は、水制設置により凹部内流速強度は約2倍となり、水制距離が大きくなるにつれて漸増している。水制を越流する場合は、水制距離5cmで約1.7倍となり、水制距離が大きくなるにつれて減少している。また、主流と凹部内の水交換という観点から、凹部境界の $y = 9.75\text{cm}$ における横断方向流速の水深平均値 V_m の縦断分布を図-7 に示す。マイナスが凹部への流入をプラスが凹部からの流出を示す。水深が水制高さ以下のケースにおいて、Case2 では水制無しの場合に比べて流入が若干増加し、流出位置が上流へ移動している。Case-3 では流入／流出ともに大きく増加し、Case-4 で最大となる。一方、水深が水制高さ以上のケースでは、

図-6 凹部内流速強度 ($L_s/B_m=0$ は水制なしの値)

図-7 凹部境界における横断方向流速分布

流出入の分布については下流側に偏って流入があり、上流側で広く流出する傾向はほぼ同様で、その大きさはCase-6, Case-7と順に大きくなり最大値をとった後、Case-8で再び減少している。Vの絶対値を境界面全体で平均した値を水交換流速 V_e とし、水制距離との関係を図-8 に示す。水交換流速は、水制距離 $L_s = 5\text{cm}$ のとき、水制非越流のケースではあまり増加しないのに対し、水制越流のケースでは大きく増加する。 $L_s = 25\text{cm}$ ではこの逆で、水制越流時に大きく減少してしまう。凹部内流速との関連でみると、 $L_s = 5\text{cm}$ では水交換速度が小さいのに凹部内流速は大きく上がっていることが

図-8 水交換流速 V_e ($L_s/B_m=0$ は水制無の値)

図-10 凹部境界流速 ($L_s/B_m=0$ は水制無の値)

図-9 水深平均主流速横断分布

わかる。

これらの水制の設置により凹部内の再循環渦が強化されるという特性は、一つには水制によって主流域が縮流状態となり加速されることにより、凹部の再循環流を引き起こす境界流速が増大したことが原因と考えられる。そこで、図-9 に凹部上流付近 $x/B_c = 0.15$ における水深平均主流速 U_m の横断分布を示す。水制非越流のケースでは水制距離の増大とともに凹部側の流速が増大している。これに対し、水制越流のケースでは水制側の流速が、水制距離が短いほど大きくなるが、

図-11 主流速コンター ($z=2\text{cm}$)

凹部側ではほとんど同じ流速となっている。このような水制高さを越流か非越流かによって非常に対照的な分布となっている。ここで、再循環流の引き金となる境界の代表流速として、 $x = 0\text{cm}$ における $12\text{cm} < y < 20\text{cm}$ の範囲の断面平均主流速 U_s を定義する。これは図-8 において凹部境界のせん断層部分と水制によるせん断層部分を除くコア領域として選択したものである。これを図-10 に示す。これからわかるように、凹部内流速強度は、水制の設置による縮流効果により増大した主流速と相関が高いことがわかる。水制非越流のケースと水制越流のケースでこのような主流速の違

図-12 U_a および V_g と U_0 の関係

いが発生したのは、図-2, 3 から水制背後のはく離域の違いによるものと考えられる。すなわち、水制非越流のケースでは、はく離域が流下方向に非常に長く、計測範囲内では再付着点が捉えられていないのに対し、水制越流のケースでは、再付着点が水制長さ l の3倍程度下流の位置に現れ、これより下流では凹部対岸へ向かう流れが卓越している。このような水制の影響の違いにより主流速の縮流による加速過程が異なったものと考えられる。図-11にCase-4とCase-8の $z=2.0\text{cm}$ における主流速 U の平面コンターを示す。水制非越流のCase-4では水制によって形成されたはく離せん断層が乱流拡散により流下方向にゆっくりと発達していく様子がわかる。このせん断層の発達に伴い主流のコア領域が減少していき、加速が徐々に進行する。主流速は水制長さ l の5倍程度下流でピークに達する。一方、水深が大きいCase-8では、主流の水制背後への回り込みが大きく、この移流効果によってせん断層は側壁に押しやられてしまい、主流のコア領域の縮小が起こらない。そのため、主流速が最大値に達する位置は水制近傍では水制長さの1倍程度下流、凹部側の近傍では約2倍下流に現れる。このような主流速の発達過程の差異が図-10の境界流速の差をもたらしたものと考えられる。

次に、 U_a と U_0 および V_g と U_0 の関係を図-12に示す。これによると凹部内の流速および境界における水交換速度は大まかに言って境界部の主流速の大きさに比例しているとみることができる。ただし、水制非越流のケースでは境界流速が大きくなっても凹部内流速があまり増大しない。水制越流のケースでは境界流速があまり変化していないのに凹部内流速が大きく変化している。また、先に述べたように、水制距離 $L_3=5\text{cm}$ ($U_0=1.49$)

図-13 横断方向流速コンター ($z=2\text{cm}$)

のときの両者の間に特に大きな差異が見られる。これらのことは横断方向流速の分布や鉛直方向の変化を含む流れの3次元構造が凹部内の流速の生成に関係していると推測される。

横断方向流速の非越流水制と越流水制の違いを見るために、横断方向流速 V の $z=2\text{cm}$ におけるコンターを図-13に示す。水制の水はねの影響が凹部に直接及ぶと考えられる水制距離が凹部に最も近いケースでの比較である。横断方向流速は凹部へ向かう負の値が水制先端を中心に同心円状の分布を示している。水制先端におけるピークの値はむしろ越流型の方が大きい。負の値の範囲は非越流型の方が大きい。その結果、同じ水制距離でも非越流水制では凹部からの流出域に対して逆向きの流れが接することになる。越流水制では負の値の流下方向範囲が小さいために、凹部からの流出域では正の方向の流れが接続する。このような違いが図-5に示される水交換速度の差を生じさせたものと考えられる。

3.3 凹部境界面の3次元構造

次に、流れの3次元構造を検討するために、凹部境界面における横断流速 V のコンターを図-14に示す。ここで、マイナスが凹部への流入、プラスが凹部からの流出を示す。境界面における流入形態は基本的に下流側の35～40%の領域から流入があり、そのピークは下流壁近くに寄っている。上流部は流出になっているがピークは流出領域のほぼ中心にある。また、ケースによって鉛直方向の分布に偏りが見られる。水制のない Case-1 では下流の底面付近からの流入が支配的である。Case-2 から Case-4 までいずれも下流側底面付近で卓越した流入が認められる点は同様であるが、水制距離の最も短い Case-2 では凹部中央から上流にかけての水面側からの流入も見られ、流出は上流側の底面付近に集中している。Case-3 では流出も上流側底面付近に偏っているが、Case-4 ではむしろ鉛直方向に一様化して2次元的な構造に近づいている。一方、水制越流のケースでも水制非越流のケースと類似した水制距離による影響が認められる。水制がない Case-5 では2次元的な分布になってきているが、水制距離が最も短い Case-6 では Case-2 と同様に水面近くで幅広い流入が認められ、底面側からの流出が卓越している。Case-7 ではこの水面側からの流入が見られなくなり、Case-8 ではむしろ底面からの流入と水面近くの上層部で流出が大きくなるものの、2次元的な分布に近づいている。

3.4 乱れ特性による考察

次に、乱れ特性から凹部内と主流域の混合を考えてみる。 $z=2\text{cm}$ の水平面のせん断レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンターを図-15に示す。主流部断面平均流速 U_o の2乗で無次元化している。水制のない Case-1 では、凹部と主流部の境界部に沿って直線上に負の値が分布している。これはせん断層において流速勾配に起因する乱れの発生を示し、通常の側岸凹部流れの特徴である¹²⁾。このケースは他のケースに比べて値が小さかったため、凡例の基準値が他と異なっていることに注意されたい。Case-2では、水制背後の水制に起因するせん断層に沿ってレイノルズ応力の大きな正の値が分布している。凹部境界では Case-1 と同様に境界に沿って負の値が現れるが、その値はかなり大きくなり、分布範囲が凹部内に入り込んでいる。さらに、Case-1 では凹部境界の下流側にピークがあったのに対して、Case-2 では上流側にピークがある。水制距離が最も離れた Case-4 では、負の領域が下流に行くにつれて凹部より外に分布して

図-14 凹部境界面における横断流速コンター

いる。またその値も Case-1 に比べて大きく Case-2 と同程度の値を示す。Case-2 と同じ最も短い水制距離で水制越流となる Case-6 では、水制非越流のケースとは異なる分布を示し、Case-4 と同様に凹部の外側に負の分布域が現れる。このようなレイノルズ応力の分布形態から凹部境界でのせん断混合の変化が推察される。これについてはさらに瞬間的な流れ場や組織的な大規模渦の挙動を解析することが必要であり、このような差異が水交換や物質輸送にどのような影響を及ぼすかについては今後の検討課題である。

4. 結論

本研究では、水制が対岸に対してどのような影響を及ぼすかという点に着目し、開水路の側岸凹部の流れ構造の変化を実験的に検討した。水制の効果は主流域の縮流による加速と横断方向流速の発生、さらに3次元な流れ構造の生成などがあげられる。水制の凹部に対する流下方向の位置関係と流量の変化に伴う水制高さに対する相対水深を変化させてその影響を調べた。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 基本的特性として、水制設置により凹部内の再循環流の構造はほとんど変化せず、その流速が大きくなり、境界の水交換速度が増大した。この原因として、水制の縮流効果により凹部境界流速が加速される効果が最も大きいことがわかった。

(2) 水制の凹部からの距離の影響については、流れが水制を越流するかないかで異なることが示された。これは、非越流水制と越流水制では水制背後のはく離域の特性が大きく異なり、その結果縮流された主流域の発達過程が異なることによる。水制非越流の場合は水制が凹部に近い場合より、上流にある程度離れた方が凹部内速度および水交換速度が増大した。一方、水制を越流する場合は水制を凹部近くに置いた方が凹部内の再循環流が強くなり、離れた場合は水交換速度が減少した。

(3) 河川において出水の過程を考えると、平水時と出水時でその影響が異なることが示唆され、平水時に水交換が活発化し、出水時に抑制するという意味では、今回の実験の範囲では水路幅の1.25倍程度上流に設置する方が効果があるといえる。

これらの結果は、凹部のアスペクト比が2と小さい場合についてであり、アスペクト比が大きい場合は主流との干渉形態が変化する可能性がある。また、流れの3次元構造や横断方向流速も水交換に影響していることが認められた。今後は、組織的な乱れ構造の検討

図-15 レイノルズ応力 $-\overline{uv}/U_0^2$ コンター ($z=2\text{cm}$)

や異なる凹部形状に対する影響を明らかにするとともに、凹部への土砂堆積への影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 榊 卓也, 砂礫床河川に設置された人工わんど周辺の河床変動, 水工学論文集, 第 54 巻, 793-798, 2010.
- 2) 佐川志朗, 萱場祐一, 相川隆生: ワンドの造成は水生生物によい結果をもたらすのでしょうか? 自然共生研究センター活動レポート, 4-5, 2008.
- 3) 禰津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 乙志和孝: 開水路側壁凹部流れの水面・流速変動特性と開口部形状の効果, 土木学会論文集 II, 712巻, II-60号, pp.1-10, 2002.
- 4) 富永晃宏, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構に与えるわんど形状と植生の影響に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.517-522, 2003.
- 5) 富永晃宏, 北村福太郎: わんどの水交換に及ぼす連絡水路形状の影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.727-732, 2007.
- 6) 富永晃宏, 堀部扶実, 榊卓也: わんどの開口部遮蔽による土砂堆積抑制効果, 土木学会論文集 B1, Vol. 67, No. 4, I_1057-I_1062, 2011.
- 7) 富永晃宏, 谷川幸男, 久田陽史: 人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, 571-576, 2002.
- 8) 富永晃宏, 佐々木高士, 郭 緯: 堀川の潮汐流動に伴う流量特性と河岸凹部の流れ構造の現地観測, 水工学論文集, vol.52, 781-786, 2008.
- 9) 武田 誠, 原田守博, 富永晃宏, 石黒鏖三, 近藤貴之, 中島佳郎, 吉田 均: 堀川における浮遊ゴミの移動特性に関する研究, 水工学論文集, vol.52, 1111-1116, 2008.
- 10) 松本大三, 富永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, Vol.50, 1009-1014, 2006.
- 11) 鄭 載勲, 富永晃宏: 高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造, 水工学論文集, vol.53, pp.913-918, 2009.
- 12) Nezu, I., and Onitsuka, K., LDA Measurements of side cavity open channel flows; Wando models in rivers, Advances in fluid modeling & Turbulence Measurements, Proc. of 8th International Symposium on flow modeling and turbulence measurements, World Scientific, 169-176, 2001.

(2013 年 3 月 18 日 受付)