

上流側水制がわんどの流れ構造と土砂堆積に与える影響に関する研究

指導教員 富永 晃宏 教授

小島 直也

1. はじめに 近年、環境に配慮した河川の改修が行われており、わんど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。しかし、人工的に作られたわんどは維持管理についての検討が十分になされているとは言い難く、洪水等の土砂堆積によってわんどが埋没し機能を失うことがしばしば起こる。そこで本研究では、土砂堆積軽減策として本川の上流に水制を置いた場合に水制がわんどの流れ構造と土砂堆積に与える影響を検討する。

2. 実験条件 実験水路は長さ 6m, 幅 30cm, 勾配 1/2000 のアクリル製長方形断面水路を用いた。水路左岸に幅 10.0cm, 高さ 7.5cm の塩ビ板を設置し、上流から 4m の位置に開口部長さ 20cm, 奥行 10cm の開放区を設け、わんど域とした。水深は非越流時が 3.5cm, 越流時が 5.5cm となるよう流量および下流の堰で調節した。実験条件については表-1 に示す。先行研究では流れ構造の把握目的として、 $Fr=0.2$ 程度で実験を行っていたが¹⁾、今回は浮遊砂輸送が十分発生するように $Fr=0.5$ 程度とした。図-1 のように水制距離 a がわんど開口部上流端から上流へそれぞれ 0.0cm, 20.0cm となるよう左岸に設置した。水制モデルのスケールは、非越流時では長さ l , 越流時では長さ l , 高さ h を変化させ、幅は 1cm として実験を行った。表-2 に今回行った実験の実験ケースを示す。

流速計測には I 型電磁流速計 (KENEK) を用い、主流方向流速と横断方向流速に非越流時は底面から 1.5cm, 越流時は水制距離 $a=0$ cm のケースでは底面から 1.5cm と 3.0cm の 2 断面、水制距離 $a=20$ cm では底面から 3.0cm の 1 断面を計測した。サンプリング周波数は 100Hz で 40 秒間計測した。

土砂堆積実験では、平均粒径 0.13mm の珪砂を用い、貯水槽に 250l の水と 6kg の砂を入れ攪拌した状態でポンプにより 2 時間循環させた。全ケースの堆積形状を写真およびレーザー変位計により計測し、わんど内の流砂堆積量を測定した。

3. 実験結果 図-2 に水制を越流するケースである H5.5non, H5.515h4.5a0, H5.512h4.5a0, H5.515h1.5a0, H5.515h4.5a20 の流速ベクトル図を示す。すべてのケースでわんど内に反時計回りの平面渦が発生した。主な流れ構造として、主流域からわんど域内へわんど下流側から流入し、壁面に沿って流れが生じており、わんど上流側から流出している。

H5.5non と H5.515h4.5a0 を比較すると、H5.515h4.5a0 はわんど内の水制先端付近まで平面渦が拡大し、循環流が強くなっている。水制による水はねが見ら

表-1 実験条件

	非越流時	越流時
流量Q(l/s)	2.0	3.9
水深H (cm)	3.5	5.5
勾配I	1/2000	
断面平均流速Um (cm/s)	28.6	35.4
フルード数Fr	0.488	0.482
レイノルズ数Re	8781	17079

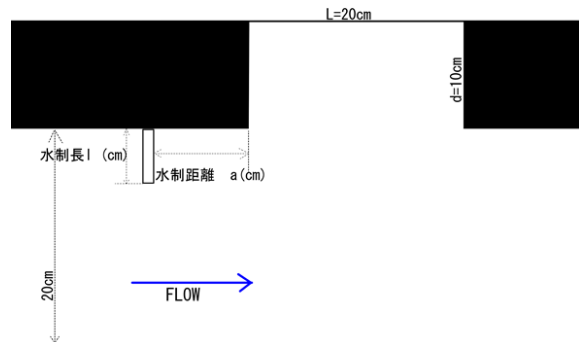


図-1 水制配置図

表-2 実験ケース

Case	水深H(cm)	水制長 l(cm)	水制高 h(cm)	水制距離 a(cm)
H3.5non	-	-	-	-
H3.515h4.5a0	3.5	5.0	4.5	0.0
H3.513h4.5a0		3.0	4.5	0.0
H3.512h4.5a0		2.0	4.5	0.0
H3.515h4.5a20		5.0	4.5	20.0
H3.513h4.5a20		3.0	4.5	20.0
H3.512h4.5a20		2.0	4.5	20.0
H5.5non	-	-	-	-
H5.515h4.5a0	5.5	5.0	4.5	0.0
H5.515h3a0		5.0	3.0	0.0
H5.515h1.5a0		5.0	1.5	0.0
H5.513h4.5a0		3.0	4.5	0.0
H5.513h3a0		3.0	3.0	0.0
H5.513h1.5a0		3.0	1.5	0.0
H5.512h4.5a0		2.0	4.5	0.0
H5.512h3a0		2.0	3.0	0.0
H5.512h1.5a0		2.0	1.5	0.0
H5.515h4.5a20		5.0	4.5	20.0
H5.515h3a20		5.0	3.0	20.0
H5.515h1.5a20		5.0	1.5	20.0
H5.513h4.5a20		3.0	4.5	20.0
H5.513h3a20		3.0	3.0	20.0
H5.513h1.5a20		3.0	1.5	20.0
H5.512h4.5a20		2.0	4.5	20.0
H5.512h3a20		2.0	3.0	20.0
H5.512h1.5a20		2.0	1.5	20.0

れ、主流が加速されているのがわかる。水はねした主流の流れは水制直後から左岸に向かう流れとなる。H5.515h4.5a0 と H5.512h4.5a0 で水制長の影響を比較すると、水制長 l が大きくなるほどわんど内の平面渦は大きくなり、水制が長くなり水はねの偏流角度、主流の加速は大きくなる。この傾向は $Fr=0.2$ の場合

と同様である。

H5.515h4.5a0 と H5.515h1.5a0 で水制高 h の影響を比較すると、水制高が低い場合は水制より高い断面での流れでは水はねの影響が小さく平面渦の横断スケールは小さくなる。

水制距離 $a=20\text{cm}$ の H5.515h4.5a20 では水制背後に剥離域が見られ、水制先端から剥離した流れは、水路の左岸側わんど手前付近で再付着し、逆流が見られる。水制距離 $a=0\text{cm}$ の場合と比べて、平面渦は小さく、循環流も弱くなっている。

図-3, 4 にわんど境界面($y=20.0\text{cm}$)に沿う横断流速分布を示す。水制がない場合は顕著な横断流速が認められないが、水制を置くことにより壁面近くで上流側から流出、下流側から流入が強くなる。水制のスケールが大きいケースほど強くなる傾向が見られる。越流時の水制距離 $a=20\text{cm}$ のケースでは同じスケールの水制の水制距離 $a=0\text{cm}$ のケースと比較すると、流出、流入ともに弱くなる。これは、水制で剥離した流れがわんどよりも上流で再付着するため、流れがわんど内に流れ込まず、わんど内の循環流が強くないためと考えられる。

わんどの水理的課題である「①わんどに堆積する土砂量を最小限にする」、「②わんど内静隠域を確保する」、「③わんど内の水質悪化を防止する」について評価を行っていく。評価指標として①では堆積実験におけるわんど内流砂堆積量、②では式(1)に示すわんど内の合成流速を平均した値 \overline{U}_a 、

$$\overline{U}_a = \sum_{i=1}^n \sqrt{U^2 + V^2} / n \quad (1)$$

③ではわんどの上下流端を結ぶラインを境界面とし、この面における式(2)²⁾ で定義された質量交換率 M を使用した。

$$M = \frac{1}{\rho U_{\max} L} \int_0^L \rho |V| dx \quad (2)$$

ここに ρ : 水の密度 (g/cm^3)、 U_{\max} : 最大主流速 (cm/s)、 L : 開口部長 (cm)、 V : 平均横断流速 (cm/s) となる。値が大きいほど水交換が活発であることを示す。

①の評価のため、図-5 にわんど内に堆積した流砂量を示す。非越流時では H3.512h4.5a0, H3.513h4.5a20 以外のケースで水制なしよりも堆積量が減少している。水制距離 $a=0\text{cm}$ では水制長 l が長いほど堆積量が減少する傾向がみられる。水制距離 $a=20\text{cm}$ では H3.513h4.5a20 で堆積量が多い。このケースではわんどおよび主流で、水面が上下方向に

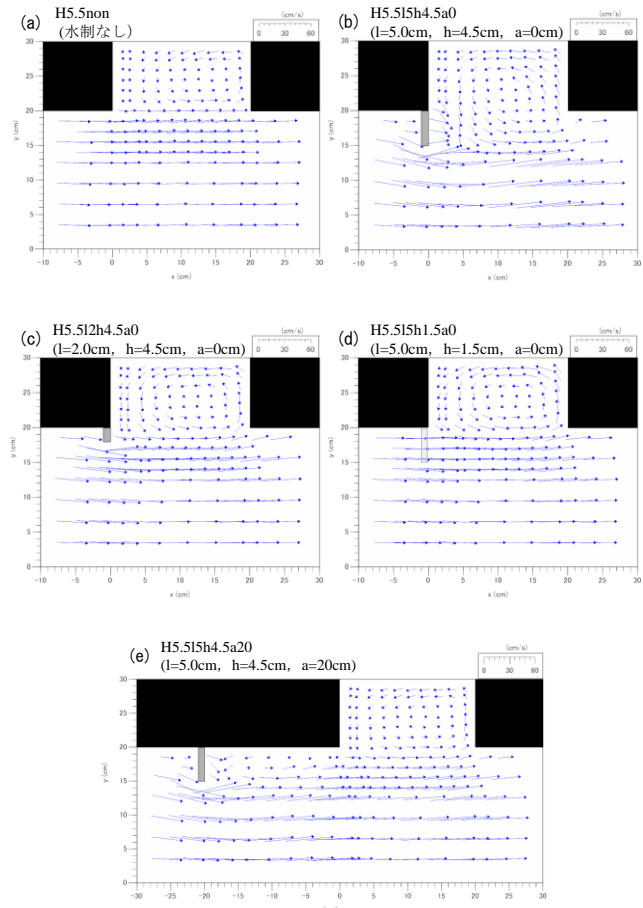


図-2 流速ベクトル（水制越流ケース）

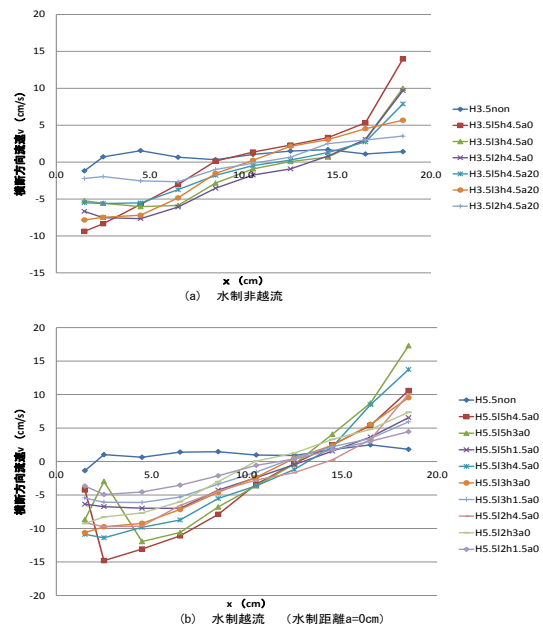


図-3 わんど境界横断方向流速分布

非常に激しい震動を繰り返していた。わんどに流れが流入し壁面に衝突する際に起こるものと思われるが、これが流れと共鳴するように振幅が大きくなった。この運動が原因で H3.513h4.5a20 は堆積量が多くなったのではないと思われる。

越流時ではすべてのケースで、水制のないケースよりも堆積量が減少している。H5.515h3a0 が最も堆積量が小さく土砂堆積抑制効果が高い。

水制を設置したスケール、配置によってわんど内に溜まる砂の形状に違いが見られた。図-6 に H5.5non, H5.515h3a0, H5.515h1.5a0, H5.513h1.5a20 の堆積形状を示す。H5.5non ではわんど全域で堆積し、堆積高は全ケースの中で最も高い 26mm にもなる。流速ベクトルからわかるように流れの向きがわんど下流側に向かっていて、掃流砂もその向きに沿って移動したからだと考えられる。また、主水路を流れる掃流砂がわんどに広がり開口部付近に厚く堆積しているのが見られる。

水制を設置したケースでは、主水路の底面に流れる掃流砂がわんどに直接流れる様子は実験中、目視では確認できなかった。水制を設置したケースでは、水制先端で掃流砂が巻き上がり流下方向に流される。水制を設置したケースではわんど内に浮遊砂が沈降し溜まったものと考えられる。水制距離 $a=0\text{cm}$ のケースではわんどの中央付近に堆積の山を形成する。わんど内に溜まった流砂がわんど内の循環流に沿って砂も循環しながら掃流され、円形に堆積する。堆積量が少ないケースでは、砂の山の頂点は山の中心あたりになる傾向がある。堆積量が多いケースでは砂の山の中心に窪みが見られる傾向がある。水制距離 $a=20\text{cm}$ のケースでは、水制なしの堆積形状と似た形状となる傾向が見られる。わんど内の循環流が弱いため、砂がわんど内で掃流されにくいためと考えられる。

水制設置によるわんど内の堆積量の抑制の要因について考える。まず、水制を置くことで、主水路からの掃流砂のわんど内への侵入が見られなかったため、わんど内の堆積が浮遊砂のみが堆積されるためと考えられる。次に、図-7 に水制距離 $a=0\text{cm}$ のケースのわんど先端部 ($x=-0.5\text{cm}$) の最大横断流速を平均断面流速 U_m でわった無次元横断方向流速とわんど内流砂堆積量の関係を示す。回帰分析を行ったところ、決定係数は 0.845 と強い相関関係があることがわかった。水制先端で主流の掃流砂を巻き上げ、主流の流れが右岸に向かうほど流砂がわんど内に入りにくくなるためと考えられる。また、堆積実験の際の、越流時で水制距離 $a=0\text{cm}$ のケースでわんど内に一度溜まった流砂が循環流の流れにより主流へ流出される様子が確認できた。わんど内の流出方向の横断流速とわんど内流砂堆積量の関係を図-8 に示す。流出方向の横断流速については、流出の大きい横断流速の 5 点のデータを平均した。この 2 つについて回帰分析を行ったところ、決定係数は 0.757 と強い相関関係があることがわかった。水制距離 $a=20\text{cm}$

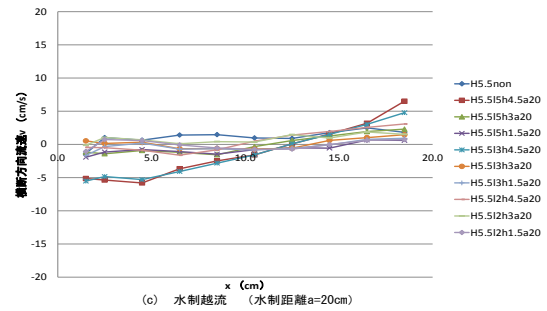


図-4 わんど境界横断方向流速分布

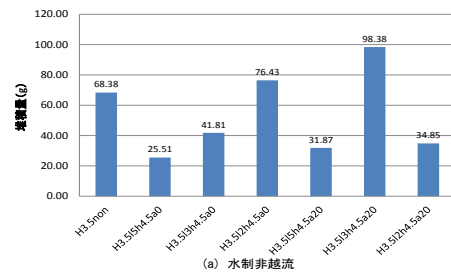


図-5 わんど内流砂堆積量

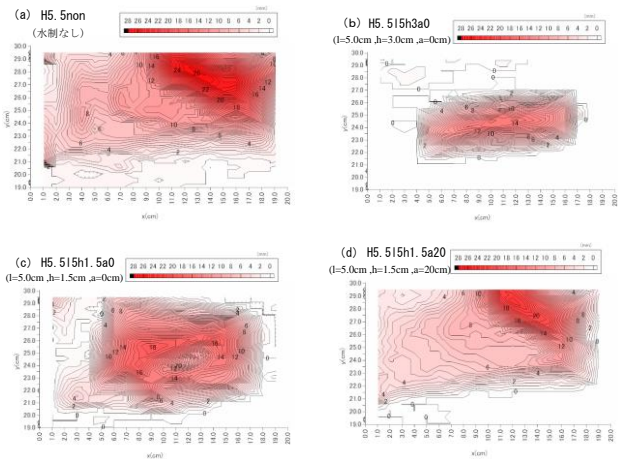


図-6 堆積形状

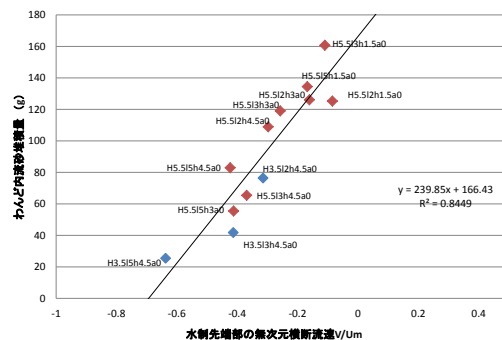


図-7 堆積量と水制先端の無次元横断流速

