

1. はじめに

水制とは河岸付近の流速を低減したり、流れの方向を変えたりすることにより河岸を浸食から守る構造物である。多自然川づくりの考えが導入され、自然環境の保全など水制の設置目的は多様化している。

水制は内部を水が通過できるか否かにより透過水制と不透過水制に分けられ、それぞれの用途に合った利用をされている。そこで、利用目的に合わせ不透過部と透過部の特徴を併せ持つハイブリッド水制の利用が期待される。本研究では、多様化する目的に合ったより合理的な水制の設置についての指針を得ることを研究の目的とし、左右で透過部と不透過部を有するハイブリッド水制の模型実験と数値計算を行った。

2. 実験条件

実験には図-1に示す水制模型を用いた。水制模型はすべて長さ7.5cm、幅3.5cm、高さ5.1cmである。不透過水制のcase1は直方体で、透過水制のcase2は直径0.5cmの円柱杭を0.5cm間隔で配置し作成した。case3の平行配置のハイブリッド水制は不透過部を縦横3.5cmの直方体で、透過部を透過水制と同様な配置として0.5cm離して設置した。ハイブリッド水制はcase4のように透過部の杭を千鳥配置にしたものと、case5からcase7のようにcase3とcase4の杭を連続壁としたものも作成した。case3-rとcase4-rはそれぞれcase3とcase4の透過部と不透過部を反転させたものである。実験は同一形状の水制模型5つを図-2に示すように15cm間隔で左岸側に設置し9ケース行った。なお、水制模型は図-1中で右側の部分が左岸に接するように設置した。x軸、y軸は図-2のとおり、z軸は水路底面から鉛直上向きに定める。水理条件はPIV計測では表-1、固定床土砂堆積実験では表-2のとおりを設定し、非越流条件下で実験を行った。

PIV計測には長さ7.5m、幅0.3mの長方形断面可変勾配開水路を用いた。流れの可視化には直径100 μ m、比重1.02のナイロン樹脂を用い、厚さ約3mmのシート状にしたグリーンレーザー光を開水路水平断面に照射した。照射位置は、水平断面に0.5cm間隔でz=0.5~3.5cmの7断面を設定した。可視化画像は高速度カメラ(Ditect HAS-U1)を用いて1/200sで撮影した。PIV解析ソフトFlowExpert(カトウ光研)を用いて相互相関法により撮影画素数1024 \times 1024ピクセルの画像を検査領域24 \times 24ピクセルで解析し、16秒間で3200データの流速ベクトルを得て統計処理を行った。

固定床土砂堆積実験には長さ6m、幅0.3mの亚克力製長方形断面開水路を使用した。貯水槽に水250L

表-1 PIV計測水理条件

流量 Q (L/s)	下流端水深 h (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 U_m (cm/s)	Froude数 Fr	水路勾配 I
2.1	4.0	30	17.4	0.28	1/1000

表-2 固定床土砂堆積実験水理条件

流量 Q (L/s)	下流端水深 h (cm)	水路幅 B (cm)	平均流速 U_m (cm/s)	Froude数 Fr	水路勾配 I
3.8	4.0	30	31.7	0.51	1/1000

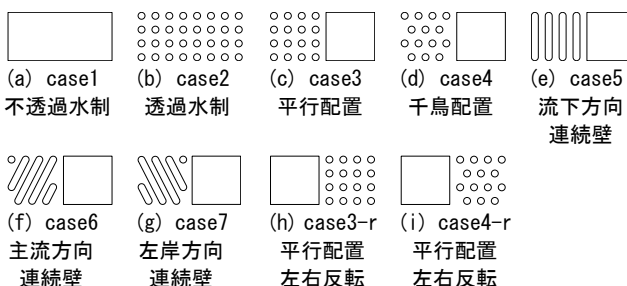


図-1 水制模型(平面図)

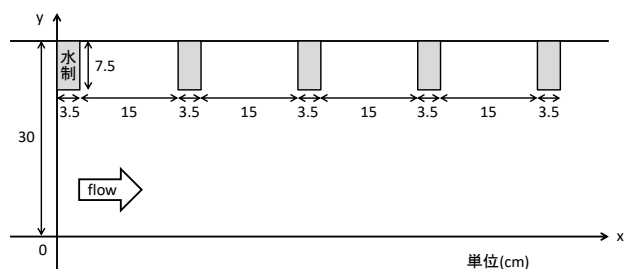


図-2 水制設置位置と座標軸

と珪砂8号砂(平均粒形0.13mm)8kgを入れ攪拌した状態でポンプにより3時間循環させた後、レーザー距離計を用いて流下方向、横断方向ともに0.5cmごとに堆積高の計測を行った。

3. PIV計測結果

3. 1. 水深平均した時間平均流速

図-3に主流速コンターを示す。いずれのケースについても第2、第3水制間以降の水制間の流速分布は概ね似た傾向を示し、第1、第2水制間とは異なる。そこで、第3、第4水制間を平衡領域とみなし注目する。

(1)ハイブリッド水制と不透過、透過水制の比較

図-4(a)に主流域における主流速の平均値を示す。case1では第1水制によって大きく水はねされ、主流が加速し、その後は減少していく。一方、水はね効果の小さいcase2では主流の加速が小さく、下流側に向かって徐々に増加する。case3からcase7のハイブリッド水制ではいずれのケースにおいても第4水制より上流側でcase1より主流の加速を緩和している。

図-4(b)に不透過部間における主流速の平均値を示す。case1とcase3からcase6では第1、第2水制間で逆流する流速が最大となり、以降の水制間での流速の变

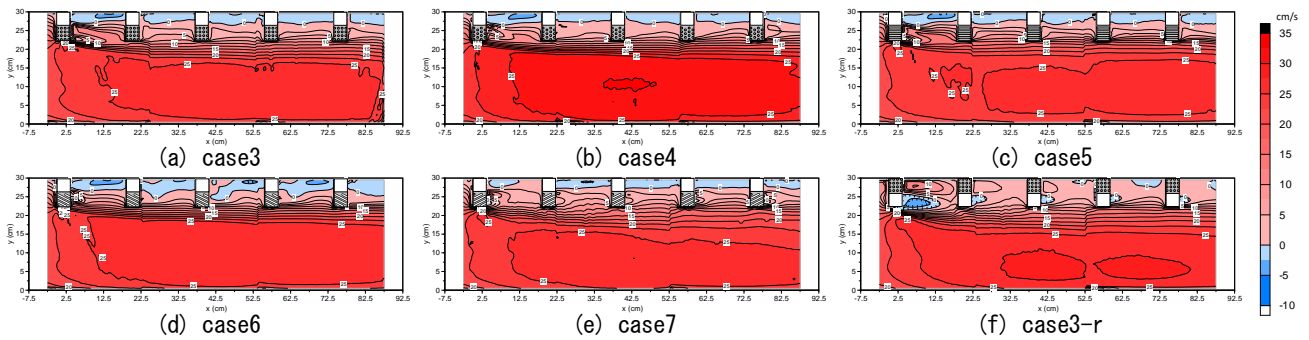


図-3 主流速コンター

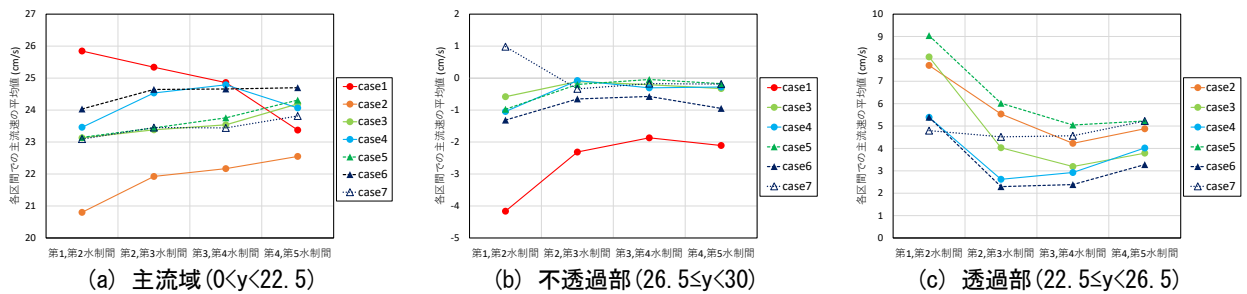


図-4 各区間における主流速の平均値

化は小さく、平衡状態となっている。その絶対値は不透過水制よりハイブリッド水制のほうが小さい。図-5に第3、第4水制間の主流速コンターにベクトルを重ねた図を示す。いずれのハイブリッド水制においても不透過水制より第4水制前方で左岸に向かう流れが小さくなり、渦が弱くなる。このためハイブリッド水制では側岸の逆流域の流速を低減することができる。

図-4(c)に透過部間における主流速の平均値を示す。case2, case3ともに、水制を通過する毎に徐々に流速が減少し、第4、第5水制間で少し増加するという似た傾向を示している。第1、第2水制間ではcase3は不透過部の水はねにより透過部を通過する流速が大きくなるためcase2より流速が大きくなる。しかし、第2、第3水制間以降ではcase3はcase2を下回る。図-5のベクトルを見るとcase3では不透過部の水はねの影響を受け、上流側水制後方の流れの主流域へ向かう成分がcase2より大きくなっている。これにより第2水制より下流側ではcase3の透過部間の主流速はcase2より小さくなったと考えられる。また、下流側水制前方に注目すると、case2では主流域へ向かう流れとなっているが、case3からcase7では不透過部間の渦を形成するために左岸方向へ向かい、透過部間の流れに不透過部の存在が影響していることがわかる。

(2) 杭の配置の比較

図-4(c)から千鳥配置のcase4は平行配置のcase3より透過部間の主流速が小さくなり、千鳥配置にすることで流速を低減できることがわかる。case3では第4水制まで水制を通過するたびに透過部間の流速が減少する傾向が見られるが、case4では第3水制以降を通過する毎に流速が徐々に増加している。図-6に第3、第4水制間の透過部間における主流速縦断分布を示す。

case3は第3水制直後から第4水制直前まではほぼ一定の値となるのに対し、case4は第3水制直後で流速が大きく減少し、第4水制に向かって流速が増加している。

(3) 杭と連続壁の比較

図-3や図-5を見ると平行配置のcase3とその杭を連続壁としたcase5はかかなり似た分布傾向を示していることがわかる。図-4(c)では透過部間の主流速はcase5がcase3を常に上回る。これはcase3では杭間を横断方向にも流れることができるが、連続壁としたcase5では透過部を流下方向にしか流ることができないためだと考えられる。

主流域へ流向を向けた連続壁のcase6では第2水制より下流側で透過部間にまでわずかに逆流域が拡大している箇所が存在している。また、図-4(b)から他のハイブリッド水制より逆流域の流速が大きいことがわかる。図-5のベクトルを見るとcase6では水制間での反時計回りの渦がcase4より強くなり、その上流側に時計回りの渦が形成されている。case6では透過部を主流域へのみ流れ、この流れにより水制間の渦が大きくなったと考えられる。図-4(c)からcase6では不透過部間を流下方向にも通過することができるcase4より透過部間の主流速が小さくなっていることが確認できる。

case7では第1水制の透過部後方で左岸方向の流れが生じ左岸に再付着するため、第1、第2水制間の逆流域が縮小する。図-4(c)からcase7は各透過部間での流速の変動が小さく、第1、第2水制間ではcase4やcase6を下回るが、第2水制以降ではそれらのケースを上回ることがわかる。図-5では上流側水制の透過部と不透過部の間の直後での流速が大きく、流向が主流へ向いている。このため第2、第3水制間以降ではcase4やcase6より透過部間の流速が大きくなったと考えられる。

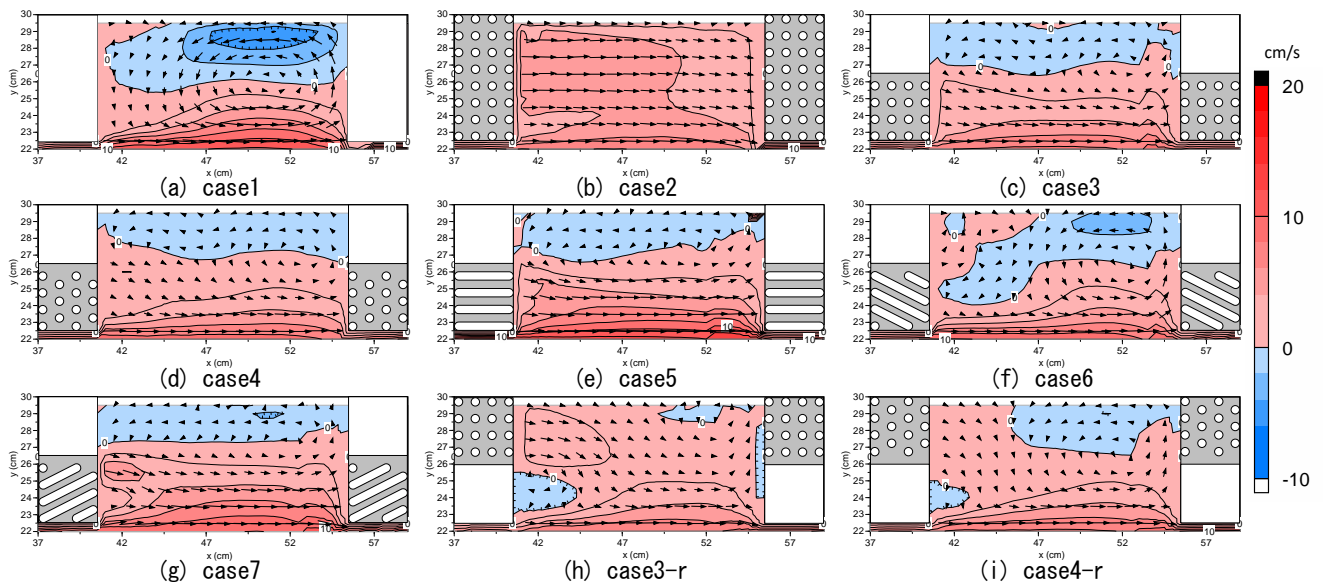


図-5 第3, 第4水制間における主流速コンターとベクトル図

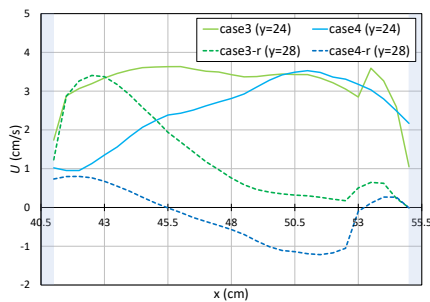


図-6 第3, 第4水制間における透過部の主流速縦断分布

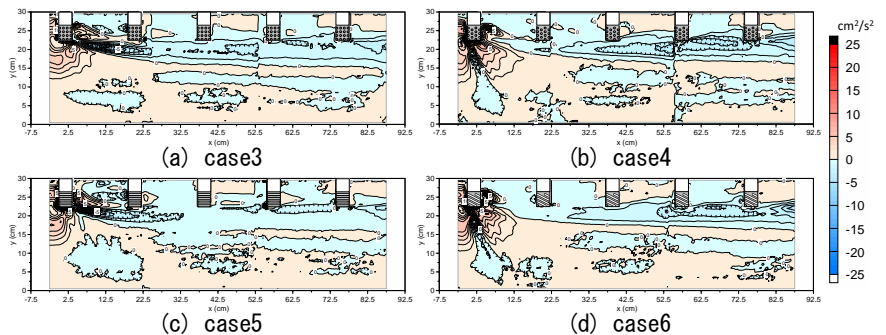


図-7 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ コンター

(4)透過部と不透過部を入れ替えた場合

透過部が左岸に接する case3-r と case4-r では各水制の不透過部直後に逆流域が形成され、第1水制後方で最も大きくなる。また、平衡領域では case3-r, case4-r ともに透過部間にも逆流域が生じる。これは図-5のベクトルから上流側水制の透過部を通し主流域へ向かう流れと下流側水制の不透過部により透過部へ向けられる流れの間に形成される渦によるものと考えられる。千鳥配置の case4-r では平行配置の case3-r より透過部を主流域へ流れるため不透過部直後の逆流域は縮小し、透過部間の逆流域は拡大する。図-6の主流速縦断分布では両ケースとも上流側水制直後で主流速が最大となり、その後下流側水制に向かって減少していくという分布であり、case3 や case4 の透過部での流速の縦断方向の変化とは異なっている。流下方向に向かう流れは常に case3-r のほうが大きくなるが、逆流する流れは透過部間の渦が強くなる case4-r のほうが大きい。

3. 2. レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$

図-7 にレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ コンターを示す。多くのケースで第1, 第2水制間の主流域と水制域の境界のせん断層で乱れが大きくなった。しかし、千鳥配置の杭の case4 と主流域へ流向を向けた連続壁の case6 ではこの地点での乱れが小さくなり、第1水制の先端から水路中央に向かって乱れが大きくなる箇所が見られ

た。連続壁の case5 と case6 ではそれぞれ杭の case3 と case4 より下流側のせん断層での乱れを緩和している。

4. 固定床土砂堆積実験結果

(1)不透過, 透過水制とハイブリッド水制の比較

図-8, 図-9 にそれぞれ第3, 第4水制間における堆積高コンターと堆積量を示す。堆積量は水制間を横断方向に2区間に区分して示している。case1 では第1, 第2水制間の渦の中心以外にはほとんど堆積しなかった。一方, case2 では各水制間に多く堆積が見られ、堆積形状は横断方向に比較的一様となる。case3 は第1, 第2水制間では不透過部間の渦の中心に堆積が集中するが、平衡領域では主に透過部間に堆積している。これは平衡領域では不透過部間の渦が弱くなり、左岸側へ供給される土砂量が減少するためだと考えられる。また、いずれのハイブリッド水制に関しても平衡領域では case1 より堆積量が多いが、case2 よりは少ない。

(2)杭の配置の比較

case4 では不透過部間の渦の中心となる下流側水制の前方に堆積が集中する傾向が見られ、平衡領域における左岸側の堆積量は case3 より多くなる。しかし、水制間全体で見ると case3 より堆積量が減少する。これは case4 では case3 より透過部を横断方向に流れ、透過部から水制間に供給される土砂量が減少するためだと考えられる。

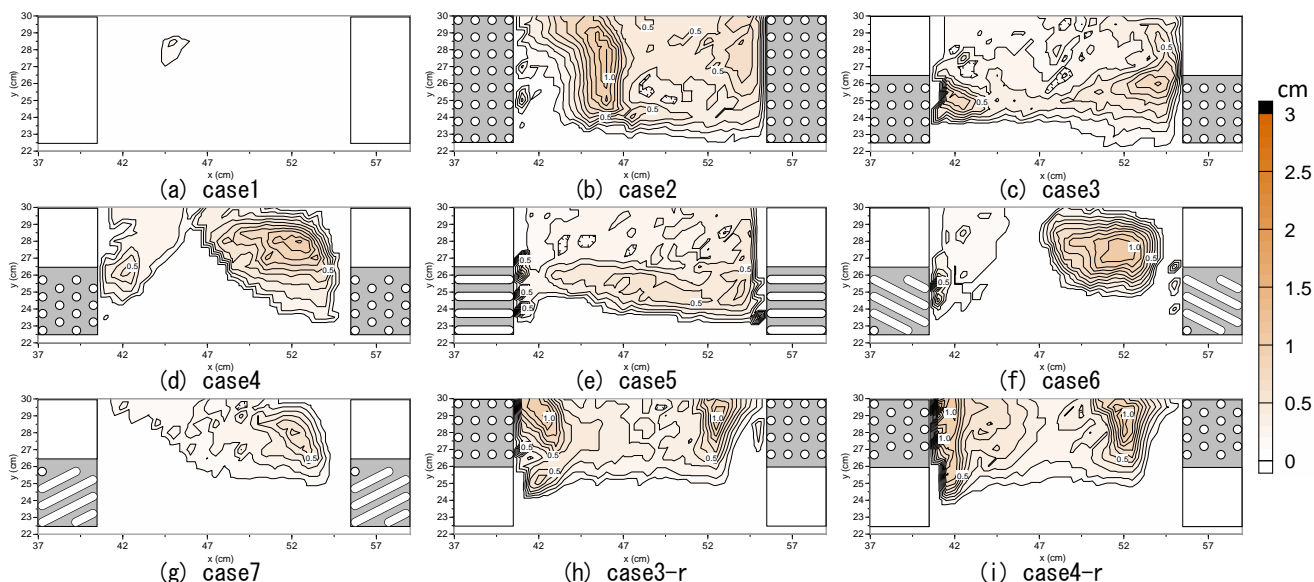


図-8 第3, 第4水制間における堆積高コンター

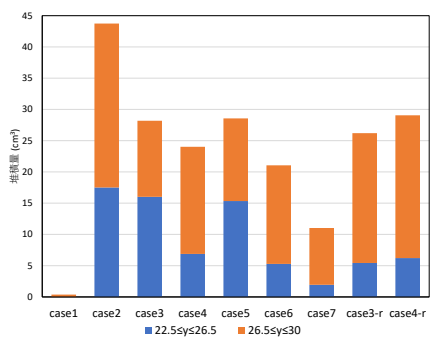


図-9 第3, 第4水制間における堆積

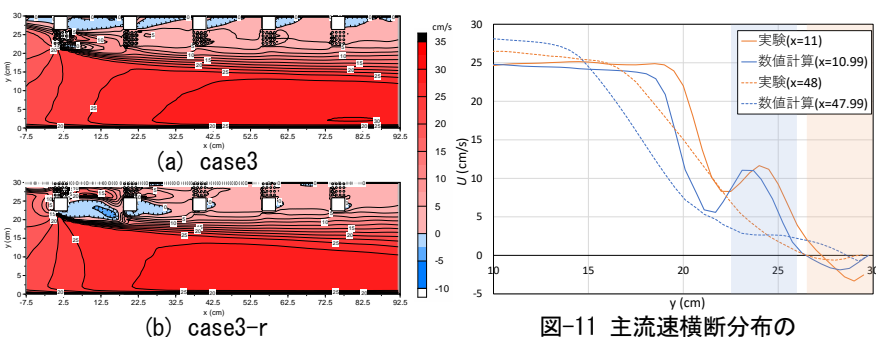


図-10 数値計算による主流速コンター

図-11 主流速横断分布の実験と数値計算の比較 (case3)

(3) 杭と連続壁の比較

case5 は case3 と平衡領域における堆積が似ている。case6 は case4 と比べると透過部からの土砂の供給量が減ると考えられ、水制間の堆積量が減少する。また、case6 では不透過部間の渦が強く、堆積が不透過部に集中している。case7 では不透過部と透過部間の流れが主流域へ向いており土砂が水制域から出ていくため堆積量が他のハイブリッド水制より少ない。

(4) 透過部と不透過部を入れ替えた場合

case3-r, case4-r の両ケースは平衡領域では上流側水制後方と下流側水制前方に主だって堆積し、似たような堆積形状となる。また、平衡領域における堆積量は千鳥配置の case4-r のほうが平行配置の case3-r より多く、不透過部が左岸に接する場合は逆になった。

5. 数値計算

PIV 計測と同じ水理条件に設定し、ここでは個々の円柱杭を格子で遮蔽領域として与え粘性底層領域まで再現できる水深平均の低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルの Launder-Sharma モデルを採用した数値計算を行った。計算格子は流下方向に第1水制の 7.5cm 前方から第5水制の 15cm 後方までの 100cm, 横断方向に左岸から 10cm の区間を 0.02cm 四方で、そこから離れるにつれて徐々に粗くなるように設定した。なお、円の形に近くなるように複数の長方形を配置し円柱杭を正方形の

格子で表現した。

図-10 に数値計算による主流速コンターを、図-11 に case3 の主流速横断分布の実験と数値計算の比較を示す。第1, 第2水制間は数値計算により比較的よく再現することができた。第2水制以降は不透過部が側岸に接するケースでは水制間の渦の中心が実験より上流側水制に寄り、逆流域が縮小した。透過部が側岸に接する場合には不透過部間の流れは実験に近い結果を得ることができた。しかし、実験より透過部間を流下方向に流れ、透過部間に逆流域は形成されなかった。全体として数値計算では主流域と水制域の境界のせん断層が主流域側へ移動しており、水制域の抵抗を過大評価していると考えられる。この点については格子の設定や移流項の高精度化について検討する必要がある。

6. おわりに

ハイブリッド水制では不透過水制より主流の加速を抑え、側岸の逆流域の流速を低減する。透過部が杭の場合、透過部間に関しても平衡領域では透過水制より流速を減少させる。透過部が側岸に接する場合には平衡領域では透過部間にも逆流域が生じ、不透過部が側岸に接する場合は異なる流れを創出できる。また、適切な透過部を持つハイブリッド水制では不透過水制より水制間に多くの土砂堆積を期待でき、堆積形状は透過水制とは異なる。