

第4章 水 制

4-1 水制設計の基本 [河川砂防（設Ⅰ）第1章5.1]

水制は、高水敷等と一体となり、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して堤防を安全に防護できる構造とするよう河川環境の保全・整備に十分留意しつつ、過去の経験・類似河川の実績、あるいは試験施工・模型実験の成果等を基にし、施工性、経済性等を考慮して設計し、必要に応じて施工後の経緯を踏まえて改良するものとする。

【解 説】

水制工は古くから治水・河川利用等を目的に、各河川の特性に合わせ地域ごとに多様な発展を遂げてきた。いわゆる伝統工法といわれるように、木、植物、土、石などの地場の素材を用い、川の自然の営力に逆らわないよう経験的に工夫されてきたものである。また、維持管理についても、地域の生活の中に組み込まれ、地域の風土や文化の形成と密接に関係した工法である。

水制は水が通過し得る構造か否かにより透過水制、不透過水制に分類される。

透過水制は、流水が透過する構造のもので、水制が粗度要素となって流速を減じて洗掘を防いだり、適切に配置すれば土砂を堆積させる効果を持つ（杭出し類、牛杵類、ポスト型等）。

不透過水制は、流水を透過させないもので、越流水制と非越流水制に分けられる。不透過水制は水はね効果が大きい、水制先端部や水制の下流部が特に洗掘されやすいので、水制周辺に根固工を設置する必要があることが多い（出し類、コンクリートブロック積み、沈床等）。

合理的な水制工の設計を行うためには、以下の事項に留意して水制設置場所の種々の特性と水理について「日本の水制」（山本晃一著）などの文献を参考に十分検討し、必要に応じて流況解析、模型実験を行い施工後の経緯を踏まえつつ改良を図るものとする。また、水制の機能（制流）や河川環境を考慮し、出水後の変化や完成後のモニタリングを踏まえて順応的に整備していくことが望ましい。

① 水制回りの局所洗掘

水制回りの洗掘深および洗掘範囲がどの程度であるかを前もって評価しておく必要がある。

② 水制による流速低減効果

水制による流速低減効果は、水制群を①相当粗度として評価する方法、②水制に働く抗力を算定し評価する方法があり、基本的にはこの考え方によって評価する。

③ 水制域内への土砂の堆積条件

水制域内に堆積する材料によって土砂の輸送形式が異なるので土砂の粒径集団ごと（河川砂防（調）第4章河道特性調査参照）にその土砂の堆積・侵食量を評価する必要がある。

④ 水制材料の移動限界流速

水制を構成する材料は、（玉石、割石、コンクリート異型ブロック等）流水に対して移動しないだけの重さ、大きさ、形状であることが必要である。

⑤ 水制工と河岸線

水制の高さが高く、土砂が水制間に堆積し高水敷化した場合、あるいは水制間の河床を人為的に埋め立てて高水敷化した場合には、水制間の河岸線の変化を検討しておく必要がある。

4-2 構造・設計細目

1) 工種の選定 [河川砂防(設I)第1章5.2]

水制工の工種は、河川の平面及び縦横断形状、流量、水位、河床材料、河床変化など河状をよく検討し、目的に応じて選定するものとする。

【解説】

水制工の働きに対応して、次のような構造の水制工が選ばれる。

(1) 流速の減少を主たる目的とするもの

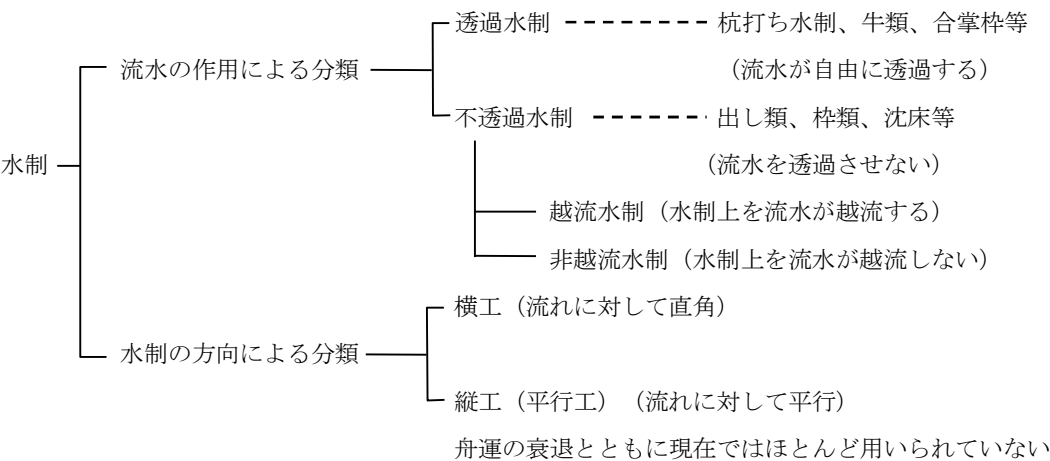
- ① 水制の高さは低い。
- ② 透過性あるいは水深に比し低い不透過性水制である。
- ③ 杭工などが主で軽い工作物になっている。
- ④ 数本ないし数十本が並置され、それが全体として作用する。

(2) 水はねを主たる目的とするもの

- ① 水制の高さは高い。
- ② 半不透過性又は不透過性である。
- ③ 捨石工、コンクリートブロック積みなどが主で容量が大きく、重い構造物になっている。
- ④ 単独あるいは少数並置される。

(3) 構造の分類

水制を構造から分類すると「透過水制」と、「不透過水制」に大別でき、不透過水制はさらに越流水制と非越流水制に分けられる。その透過水制と不透過水制では、治水効果ばかりでなく生態系への影響や、河川利用上の課題等、目的に応じて使い分けるとよい。



※透過水制と不透過水制の組み合わせもある

図 4-2-1 水制の分類

(4) 水制の工種

一般的には、急流河川から緩流河川になるにつれ、表 4-2-1 のように使用されている。

表 4-2-1 川の様相と水制の種類

川の様相	水制の種類
急流河川 ↑ ↓ 緩流河川	コンクリートブロック、四基構、三基構、大聖牛
	三角杵、ポスト、杵出し、竈出し、棚牛、笈牛、菱牛、川倉
	木工沈床、改良沈床、合掌杵、ケレップ、杭打ち上置工、杭出

これらの工種は、杭としての抵抗によるものと水制自体の自重により流水に抵抗するものとに大別されるが、緩流河川では杭出水制が多く用いられ、急流河川では水制の強度面から、また河床材料の粒度が大きくなって杭打が不可能になることから河床上に設置して自重で流水に抵抗するようなブロック水制あるいは聖牛が多く用いられる。

なお、水制の工法選定にあたっては、河状に応じてかつ設置目的を十分考慮し、適切な工法を選定することが大切であり、次の事項も参考にするとよい。

〔河川工事ポケットブック 4.2〕

- ① 河状河道が乱流している河川の常水路の固定には、ある程度長い水制を必要とする。
- ② 河岸（護岸）の保護には、透過性の根固水制がよい。
- ③ 低水路幅が小さい河川や河幅の小さい河川では、一般に水制は設けない。
- ④ 緩流河川では一般に杭出水制など透過水制がよい。

【コラム】中部地方整備局管内の水制工の事例 1

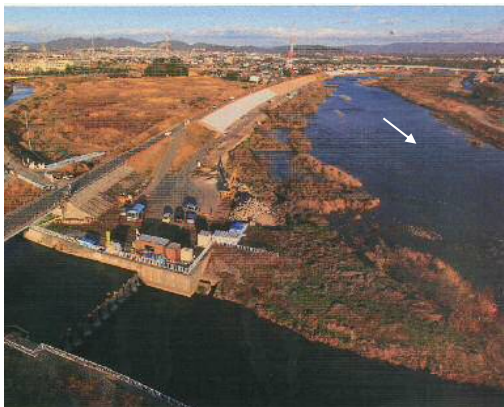
○中部地方整備局管内に設置されている主な水制は下図のとおりであり、洗掘防止や護岸を流水から守るため、流速を減少させる目的のものが多い。一部では、河川環境の向上を目的とした環境水制も見られる。



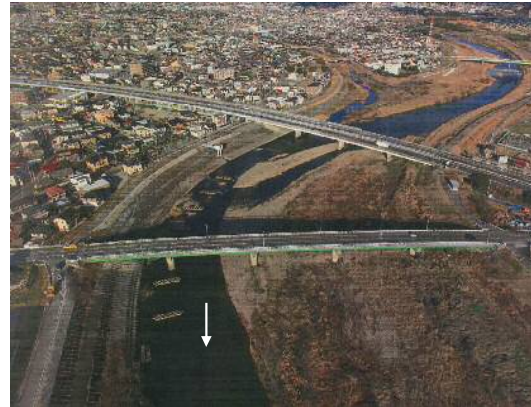
設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：ブロック
向き：直角



設置目的：水はね、洗掘防止
種類：不透過水制
向き：直角



設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：袋状金網・石
向き：上向き



設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：ブロック
向き：上向き



設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：根固マット・ブロック
向き：上向き



設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：石
向き：直角

【コラム】中部地方整備局管内の水制工の事例 2



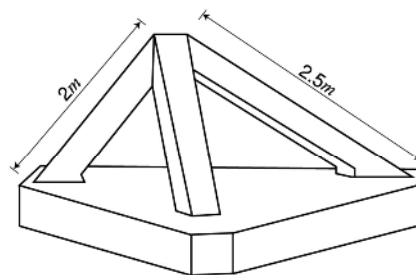
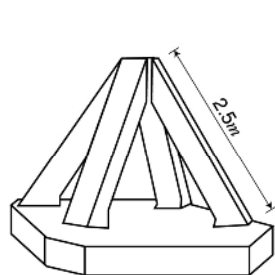
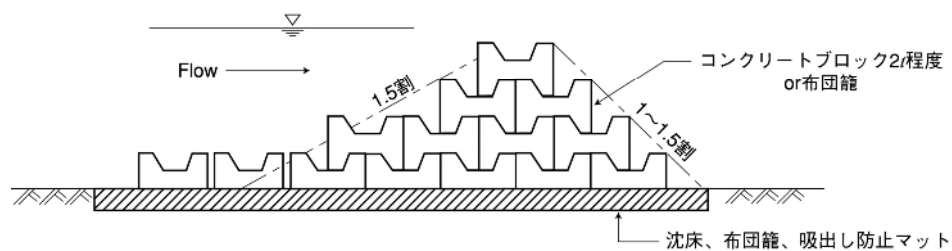
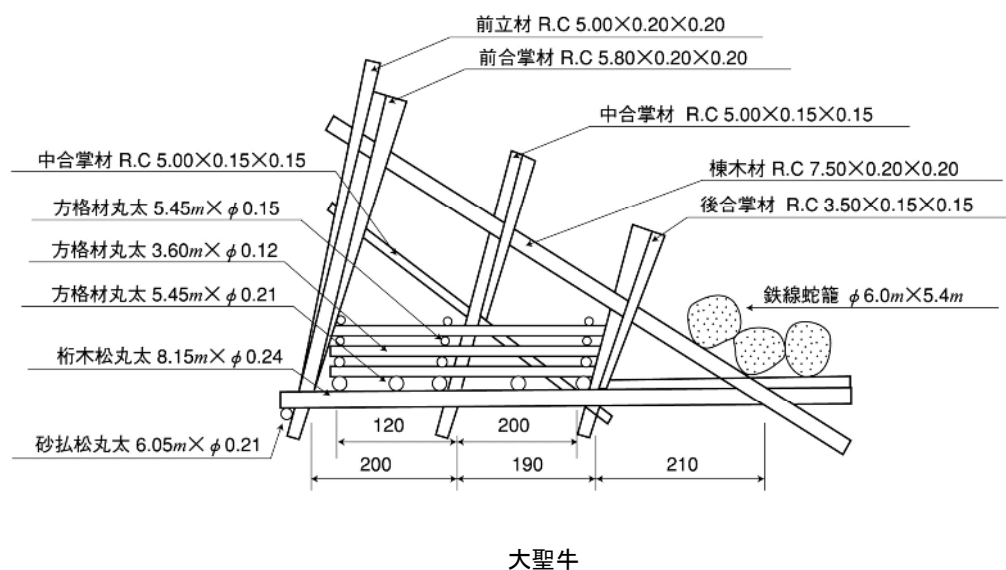
設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：透過水制
材料：ブロック（ポスト）
向き：直角



設置目的：流速減少、洗掘防止
種類：不透過水制
材料：ブロック
向き：直角

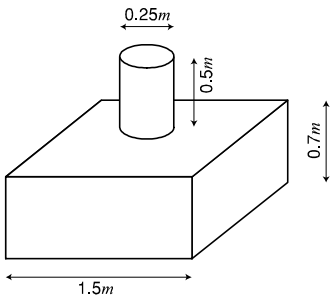


設置目的：環境水制
種類：不透過水制
材料：ブロック
向き：直角

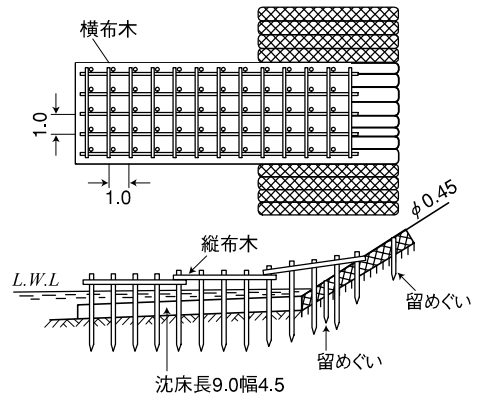


〔日本の水制〕

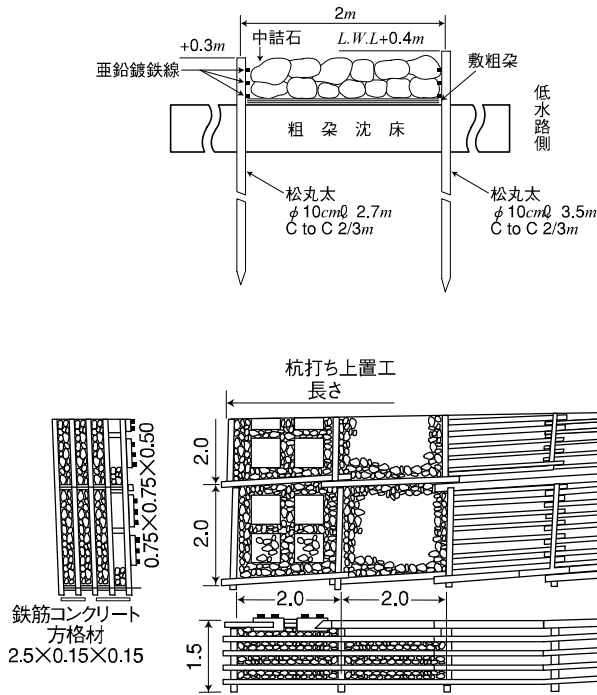
図 4-2-2(1) 水制工の工種 (例)



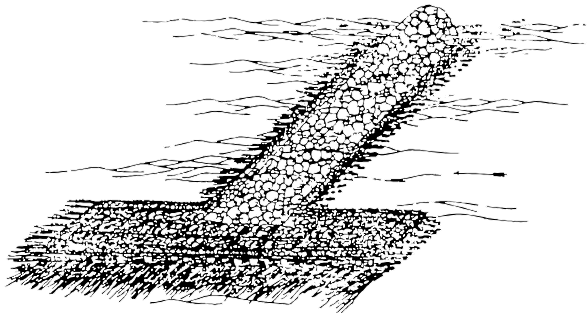
ポスト型コンクリートブロック水制



杭出し水制



木工沈床



ケレップ水制

〔日本の水制〕

図 4-2-2(2) 水制工の工種 (例)

2) 方 向 [河川砂防(設I)第1章5.2]

水制の方向は、一般に流向に対して直角または上向きとするが、その設置目的、河川の状況等により個々に定めるものとする。

【解 説】

- (1) 水制高の低い根固水制あるいは不透過水制については経済性の観点から、また土砂を積極的に堆積させなければならないというものでないので、水制の方向は直角でよいと判断される。
- (2) セグメント1(扇状地河川)で特に急流の河川では、不透過あるいは半透過型の水はね水制を設置し、水衝部を河岸から離す計画がなされることがある。この場合は水制先端部の局所洗掘を軽減するために下向きに水制を設置するのが普通である。

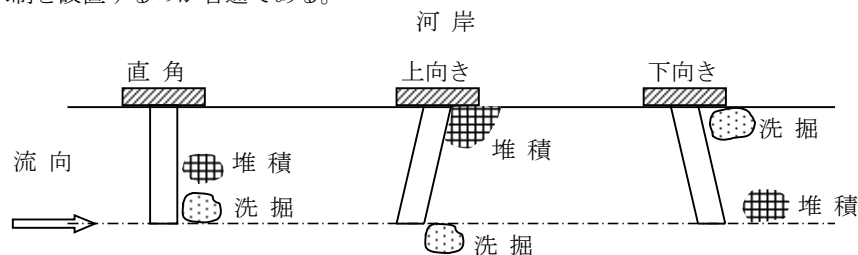
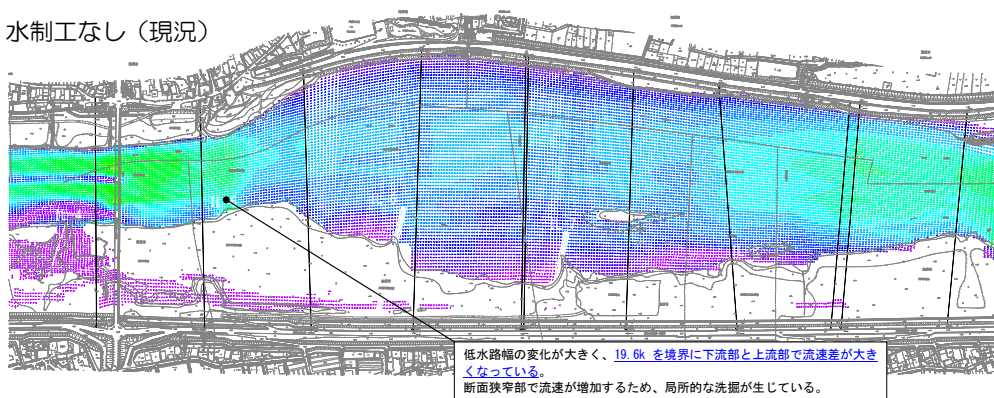


図 4-2-3 水制の方向と洗掘および堆積の関係

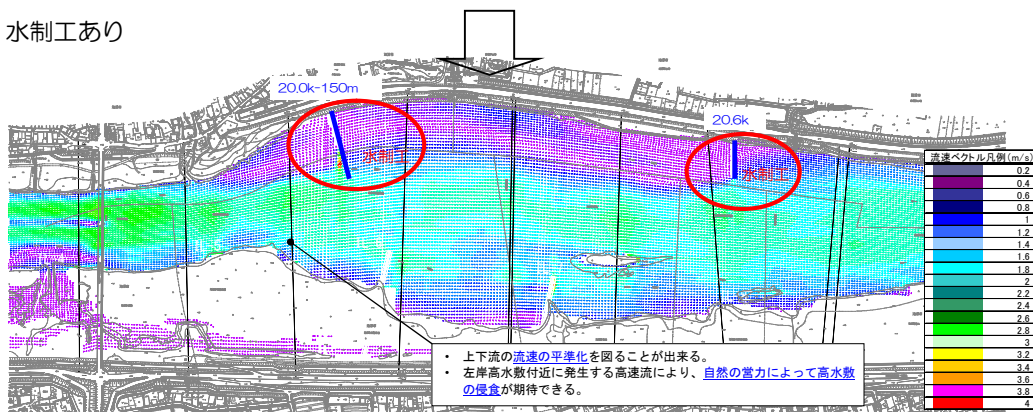
【コラム】流況解析の事例

○水制工の設置計画においては、必要に応じて流況解析等により、その効果を定量的（流速分布）、視覚的に把握する場合がある。

水制工なし（現況）



水制工あり



流況解析（流速分布の状況）の例

3) 水制の長さ、高さおよび間隔 [河川砂防(設I)第1章5.2]

水制の長さ、高さおよび間隔は、河状、水制の目的、上下流および対岸への影響、構造物自身の安全を考慮して定めるものとする。

【解 説】

(1)流速の低減効果を目的とするもの（河岸侵食防止のための根固水制）

- ① 一般に強固な単独水制で流れに抵抗させるのは、水流の乱れを大きくし、水制付近に大きな洗掘を招くことが多く、また水制自身の維持も容易ではない。したがって、一定区間にわたる水制群として総合的な効果により流速を低減させ、かつ各水制が平等に抵抗力を発揮するよう、構造、配列を定める必要がある。
- ② 水制工の長さは、河幅の10%以下とする。
- ③ 水制の高さ(hg)は計画高水流量が流れるときの平均水深の0.2~0.3倍程度、砂河川での水制の高さは、根付け付近で平水位上0.5~1.0m程度とし、河心に向かって1/20~1/100の下り勾配をつけるのが一般的である。急流部では、高い水制を用いる傾向がある。栈型の根固水制の高さhgは、平均年最大流量時の水位と根固工の上面位置からの差の1/2より大きくならないようにする。
- ④ 水制の間隔の純間隔(c)と水制の高さ(hg)の比c/hgが10~15程度の場合が粗度として最も有効に作用するが、水制工の設置量が増大するので費用対効果の視点から、それが最適ということではない。急流巨石河道でない限りc/hgを20程度に配置してもよい。また、湾曲部の凹部では水制の間隔は長さの2倍以下にすることが多い。 [日本の水制4.3.6]

【図 解】

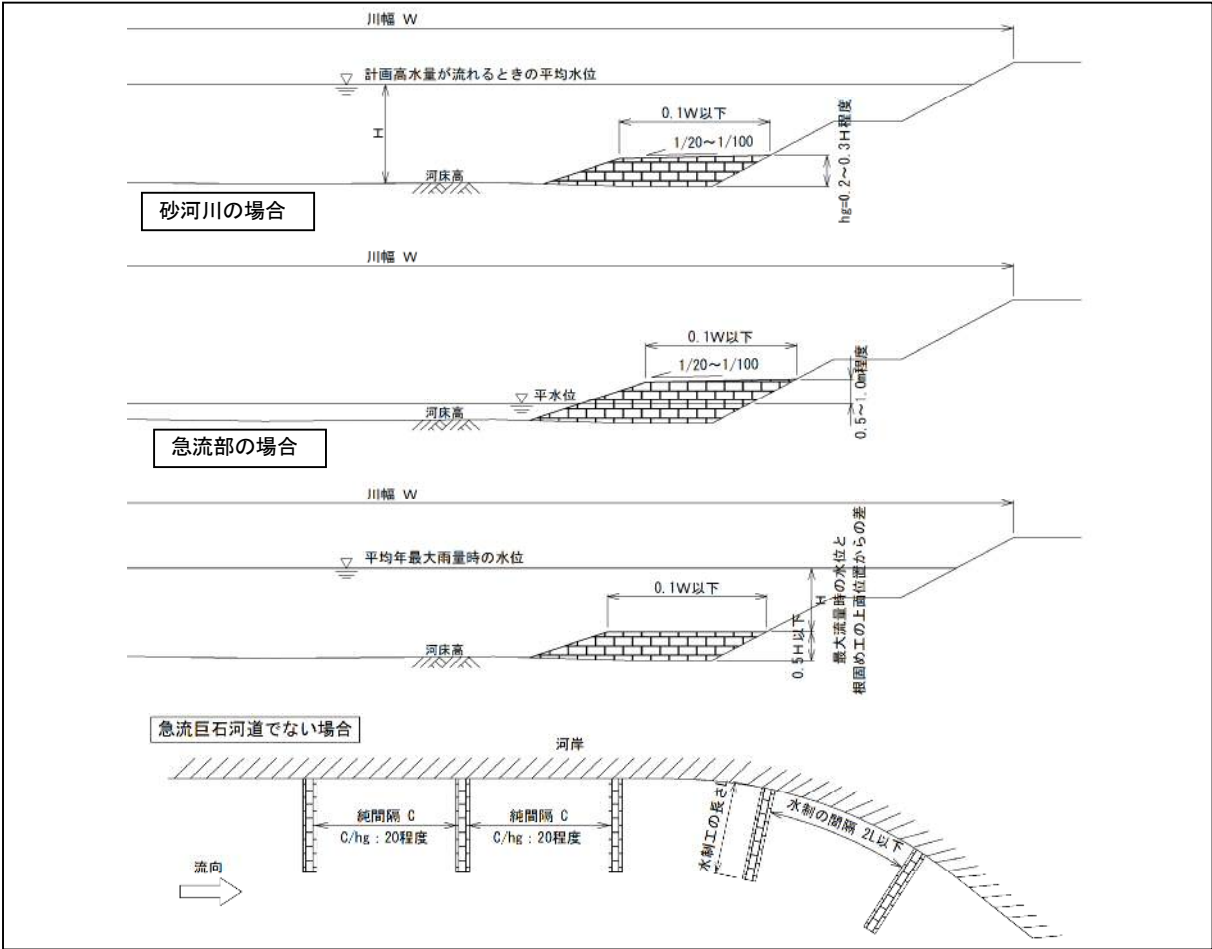


図 4-2-4(1) 水制形状の設定の目安

(2) 水はね効果を目的とするもの（河岸侵食防止のための水はね水制）

- ① 高さが高く不透過水制を設置する場合は、これを河岸侵食防止の水制として位置付けるべきであり、扇状地河川で単断面河道にこのような水制を設置する場合は、水制工の元付け部分の高さは計画高水位程度とし、水制を越流した流水が堤防護岸をたたかないようにする。

なお、水制の前面の水位は、水制先端部の流水が流速水頭だけ上昇するので水制前後の堤防護岸は十分な高さまで練積み等の強固な護岸で保護しておく必要がある。

- ② 水制の間隔は当該区間に形成される砂洲長さの $1/2 \sim 1/3$ 程度以下とする。
- ③ あまり長大な不透過水制を出すことは工事費面で得策でない。この場合の水制の方向は、河岸に直角か多少下向きとする。

【図 解】

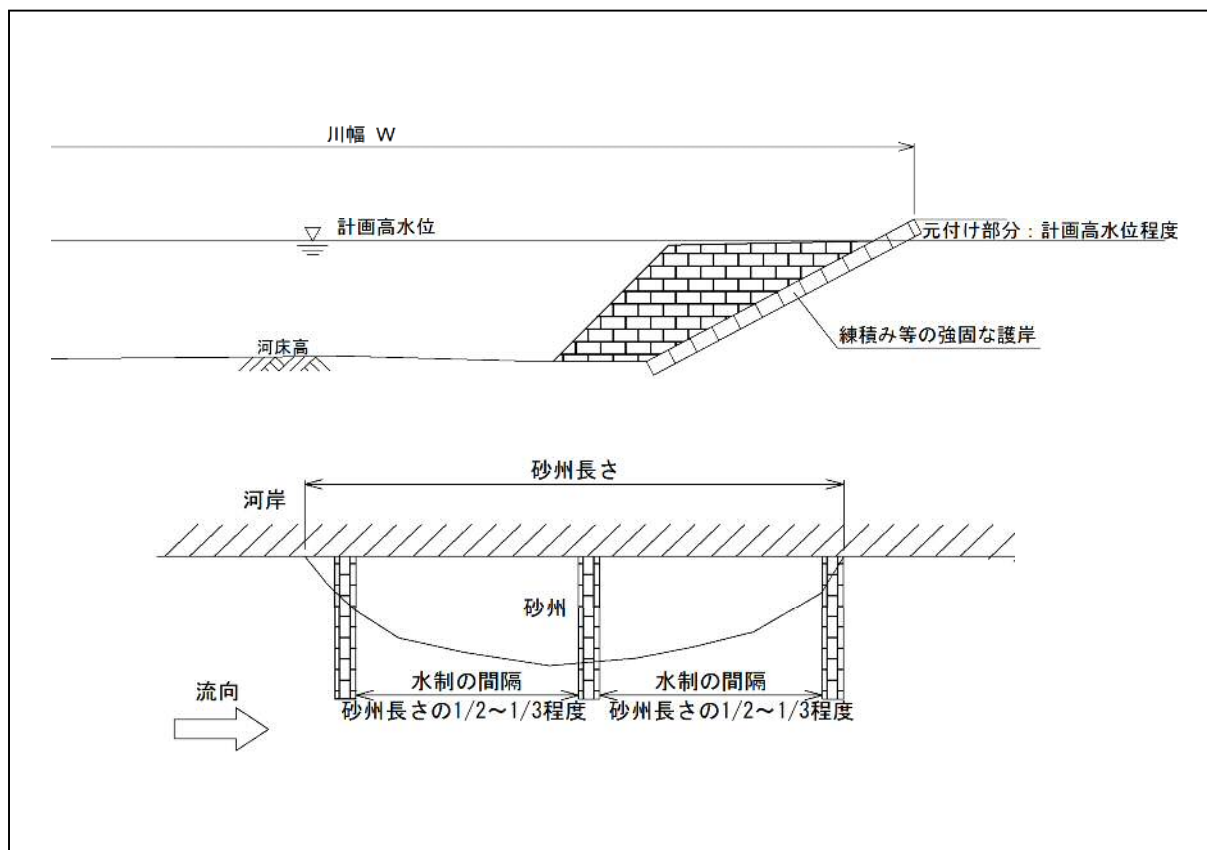


図 4-2-4 (2) 水制形状の設定の目安

(3) 航路維持のための水制

文献や過去の事例等を参考にして決定する。

(4) 河川環境の保全・創出のための水制

水制の機能としては、① 水の流れに変化を与えることにより水中生物に多様な環境を作る、② 洪水時に魚の避難空間を形成する、③ 河岸を自然河岸と同様な環境としうる、の3点が考えられる。

この場合の設計のポイントは次のようである。

- a. 水制の材料として木材を用いる場合には、水面付辺の木材が腐りやすい点に十分に留意して設計する。
- b. 多孔質な材料（石材、籠工）を用いた水制を工夫する。
- c. 意図的に水制によってワンドを形成する場合は、ワンドが土砂により埋設しないようにする。
- d. 既存の護岸、根固め周辺の生態環境の改善を図るために水制を設置する場合には、護岸との取付部周辺で流体力が大きくなるので、護岸およびその周辺河岸の安全性に留意する。
- e. 工事終了後に水制周辺に生ずる土砂の堆積、侵食、植生状態の変化等を想定して設計する。ほぼ同ような河道特性を持つ事例調査が役立つ。

4) 設計上の留意事項

(1) 水制による流速低減効果 [日本の水制 2.4]

① 棧型粗度

横工水制で不透過越流型の場合は、水制を棧とみなし、棧型粗度に関する実験結果を利用して、水制領域内の平均流速 V_m （主流の影響ない領域）を求める。

$$V_m = \{6.0 + 5.75 \log(H_d / K_s)\} \cdot \sqrt{g \cdot H_d \cdot I_e}$$

ここに、 H_d : 設計水深（ $= H - h_g / 2$ 河床を水制高の中央にとった場合の水深）（m）

K_s : 棧型粗度の相当粗度で図 4-2-4 参照

I_e : エネルギー勾配

h_g : 水制高（m）

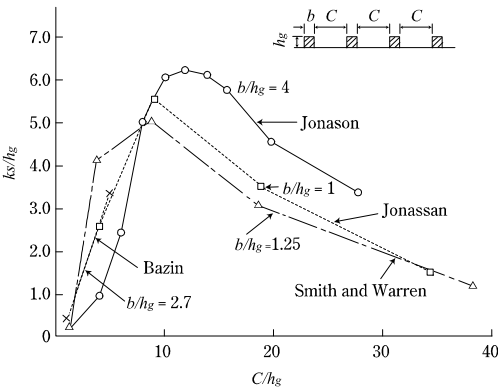


図 4-2-5 棧型粗度の抵抗 [水理公式集 6.3]

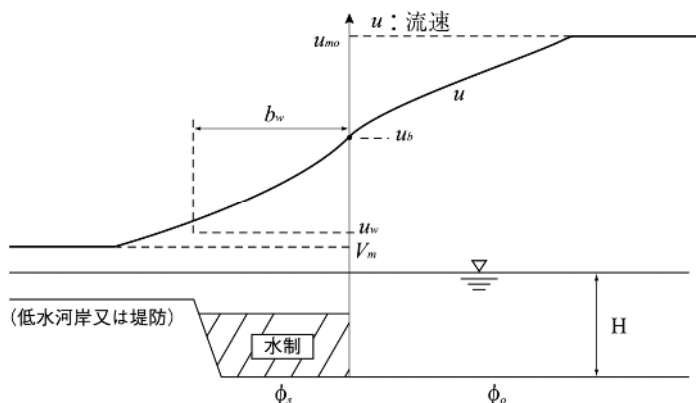
$$b_w = \frac{-\ln\left(\frac{\alpha \cdot V_m}{u_b - V_m}\right)}{\sqrt{\frac{F_w - V_m}{H \cdot \varepsilon}}}$$
$$\alpha = \frac{u_b - V_m}{V_m} \cdot \exp \left[-b_w \sqrt{\frac{F_W \cdot V_m}{H \cdot \varepsilon}} \right]$$
$$u_b = \frac{V_m \sqrt{F_W \cdot V_m} + u_{mo} \sqrt{F_m \cdot u_{mo}}}{\sqrt{F_m \cdot u_{mo}} + \sqrt{F_W \cdot V_m}}$$

$$\varepsilon = (f')^2 (u_{mo} - V_m)^2 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{F_m \cdot u_{mo}}} + \frac{1}{\sqrt{F_W \cdot V_m}} \right]^2 \cdot H$$

$$u_{mo} = \phi_o \sqrt{gHI} \qquad V_m = \phi_s \sqrt{gHI}$$

$$F_m = 2/\phi_o^2 \qquad F_w = 2/\phi_S^2$$

f' : 境界混合係数で 0.04 程度

$$U_w = (1 + \alpha) V_m$$
 u_{m0} : 主流の流速 V_m
$$\mathcal{U}_b$$
$$\phi_s$$
 ϕ_0

H

$$b_w$$

図 4-2-6 記号の定義

杭水制領域の平均流速は次式による

$$V_m = \sqrt{\frac{gIBhL \left(1 - \frac{\pi ND^2}{4Bl} \cdot \frac{h_g}{H} \right)}{\frac{1}{2} C_D ND h_g \alpha^2 + \frac{1}{\phi_g^2} \cdot Bl}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{河床より水制の高さまでの平均流速} \quad V_{mb} = \{6.0 + 5.75 \log(h_g/k_s)\} \cdot \sqrt{gHI} \quad \dots (2)$$

$$\text{水制領域の平均流速} \quad V_m = \{6.0 + 5.75 \log(H/k_s)\} \cdot \sqrt{gHI} \quad \dots (3)$$

ここに、 $\alpha = V_{mb}/V_m$

I : 河床勾配	h_g : 水制の高さ (m)
B : 水制領域の幅 (m)	k_s : 水制域の杭を含めた平均の相当粗度
H : 水深 (m)	C_D : 杭の抗力係数
D : 円柱の径 (m)	N : 1～2断面 l 区間の杭本数

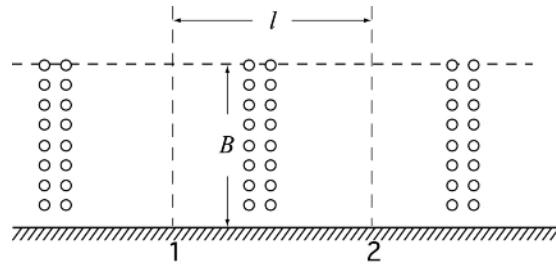


図 4-2-7 杭水制の配置

V_m を求めるには、 k_s を仮定して(2)式、(3)式より V_{mb} と V_m を求め、これを V_{mb}' 、 V_m' とし、これの比 α' を求め(1)式に代入して V_m を計算する。この V_m と V_m' が一致しなければ k_s の値を変え同じ操作を行い V_m' と V_m がほぼ一致するまで繰り返す。

ここで、 C_D の値は秋草らの実験結果より、(水理公式集 平成11年版 6.3.4 図2-6.26 参照) 杭間の間隔が杭径Dの5倍以上で、 H/h_g が3以上では2程度、 H/h_g が1.5～3程度では2.5程度となっている。

※ 計算例

① 設計条件

水深 $H=7\text{m}$ 、河床勾配 $I=1/5000$ 、 $\phi_s=11$ (砂堆相当)の河川において、区間 $l=40\text{m}$ 、長さ $B=20\text{m}$ 、杭径 $D=0.15\text{m}$ 、水制の高さ $h_g=2.5\text{m}$ (水深の1/3程度とした)の杭水制を設置して杭のみで水制域の平均流速を80 cm/sec程度とする。

② 計算

杭間隔は1m、杭本数は $N=4\text{列} \times 20\text{本}=80\text{本}$ 程度となる。

ここに、杭の抗力係数は $C_D=2.2$ とした

$$V_{mb}' = \{6.0 + 5.75 \log(2.5/5.5)\} \cdot \sqrt{g \times 7 \times 1/5000} = 0.47 \quad \text{m/sec}$$

$$V_m' = \{6.0 + 5.75 \log(7/5.5)\} \cdot \sqrt{g \times 7 \times 1/5000} = 0.77 \quad \text{m/sec}$$

$$\alpha' = 0.47/0.77 = 0.61$$

$$V_m = \sqrt{\frac{g \times 1/5000 \times 20 \times 7 \times 40 \left(1 - \frac{\pi \times 80 \times 0.15^2 \times 2.5}{4 \times 20 \times 40 \times 7}\right)}{\frac{1}{2} \times 2.2 \times 80 \times 0.15 \times 2.5 \times 0.61^2 + \frac{1}{11^2} \times 20 \times 40}} = 0.76 \doteq V_m' \quad \text{m/sec}$$

(2) 水制材料の移動限界流速 [日本の水制 2.6]

水制を構成する材料は、流水に対して移動しないだけの重さ、大きさ、形状であることが必要であり、構成材料の移動限界流速を評価する。

① 玉石、割石の場合 (本編 3-4-2 4) (1)参照)

$$D_m > \frac{1}{E^2 \cdot 2g \cdot S} \cdot V_o^2 \quad \dots\dots\dots \text{米国工兵隊の評価式}$$

上式より $E=1.20$ $S=1.65$ として求めると、次式のようなになる。 [日本の水制 2.6]

$$D_m > \frac{1}{46.6} \cdot V_o^2$$

ここに、 D_m は 50%粒径である。

河岸斜面角 θ ののり面に設置する場合は、粒径 D_m に対して斜面の補正係数 K を乗じ $K \cdot D_m$ とする。

$$K = \frac{1}{\cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}}}$$

ここに、 θ : 斜面角 (°)

ϕ : 石材料の水中安息角 (割合の場合 41° 、玉石の場合 38° 程度)

② 異形コンクリートブロックの場合

水制として異形ブロックを用いる場合は、ブロックは群として用いられる。

設計に当たっては、第3章 護岸 3-4-2 4) (4) 異形ブロック積み根固工によるものとする。

(3) 水制工と河岸線 [日本の水制 2.7]

水制の高さ h_g が高く、土砂が水制間に堆積し高水敷化した場合、あるいは水制間の河床を埋め立てて高水敷化した場合、水制間の河岸線がどのような形になるかについて検討する。

① 砂州の影響がない場合

水制間隔 L_g が砂州長 L_s に比べて十分に短い、あるいは砂州の発生しない河川の場合、その河岸線の形状を図 4-2-7 のように簡略し、水制の配置を次式より評価する。

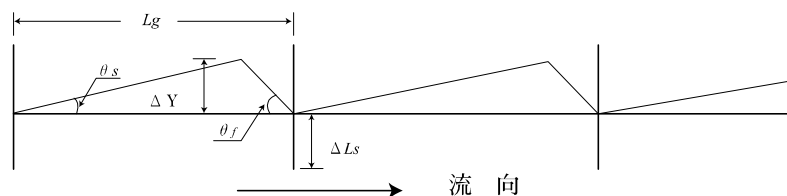


図 4-2-8 水制工の配置

$$\Delta Y = L_g \cdot \tan \theta_s \left(1 + \frac{\tan \theta_s}{\tan \theta_f} \right)$$

ここに、 θ_s : 河岸線への堤防の入れこみ角度 ($6^\circ \sim 7^\circ$)

θ_f : 突起前面に生じる死水域の形 (45° 程度)

L_g : 水制間隔 (m)

ΔL_g : 水制の河岸線よりの突出長 (m) である。 ΔL_g は水制の先端形状や高さにより変化するが、水制の頂部の高さが水制間の堆積面積高より高ければ、概略 $\Delta L_g = 0$ としてよい。

$\theta_s = 7^\circ$ 、 $\theta_f = 45^\circ$ とすると、 $\Delta Y = 0.11 \Delta L_g$ となる。

② 砂州が水制間の河岸線に影響する場合

- a. 砂州の長さ L_s と水制間の長さ L_g が同程度の場合、砂州の形状から、 $\tan \theta_s \leq B_s / L_s$ と考えられる。
一般には、 $B_s < L_s$ は 3~5 程度なので、 $\tan \theta_s = 1/3 \sim 1/5$ となる。 $\tan \theta_s$ を小さくするには L_g を L_s の $1/2 \sim 1/3$ 以下とし、砂州による河岸線の堤防側への食込みの影響を取り除くことが必要である。
- b. 単列砂州の場合、 ΔY が大きくなると急縮部が規則的に配置された水路形状となるため、砂州が複列的になったり、変形を受けたりするおそれがある。これに対しては、 L_g / L_s の値をより小さくしたり、頭部に縦工を配置して河岸線の形状をコントロールし、砂州形態の変化が生じないようにする。

③ セグメント1の河川

セグメント1の河川で、高水敷幅が低水路の砂州幅の $1/2$ 程度以上、高水敷の冠水頻度が $1/5 \sim 1/10$ 以上の場合、水制の間隔 L_g は、河岸侵食量 ΔY が許容侵食量内に収まるようにする必要がある。

さらに、砂州による河岸線への影響を取り除くため、低水路内に形成される砂州のスケールを調査し、短めの砂州の波長 L_s の $1/2 \sim 1/3$ 以下とする。

- a. ΔY は L_g が L_s の $1/3$ 程度の場合は、実験結果より $\theta_s = 12^\circ$ 、 $\theta_f = 20^\circ$ 以下となる。したがって河岸侵食量は前式より $\Delta Y \leq 0.14 L_g$ となる。
- b. L_g が L_s と同程度の場合は、②の砂州が水制間の河岸線に影響する場合と同等となる。
- c. L_g が L_s に比べて小さく、砂州の影響を無視し得る場合には、①の砂州の影響がない場合と同等と考えてよい。

【コラム】水制の設計における留意点

【水制先端部の留意点】

○水制の先端部は、流水により洗掘されやすいため、河床の変化に追随できる構造とすることが望ましい。



ポスト水制の例

河床の変化に追随
できる構造

【水制の周辺状況に配慮】

○近傍に河床変動の影響を受ける施設が存在する場合は特に、設計段階で水制設置後の河床変動の予測について十分な検討を行うことが望ましい。

○水制の周辺では、出水の度に洗掘や堆積など河床が変化する場合がある。よって、河川利用が多い箇所に設置する場合は、利用者の安全性にも配慮して、水制の設置箇所を検討することが望ましい。



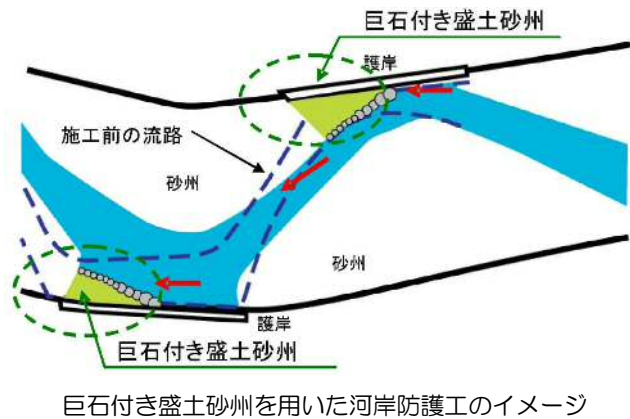
近接構造物（樋管等）
に配慮

水制下流の河床堆積により排水が困難となった樋管
（堆積部に排水路を設けて排水している）

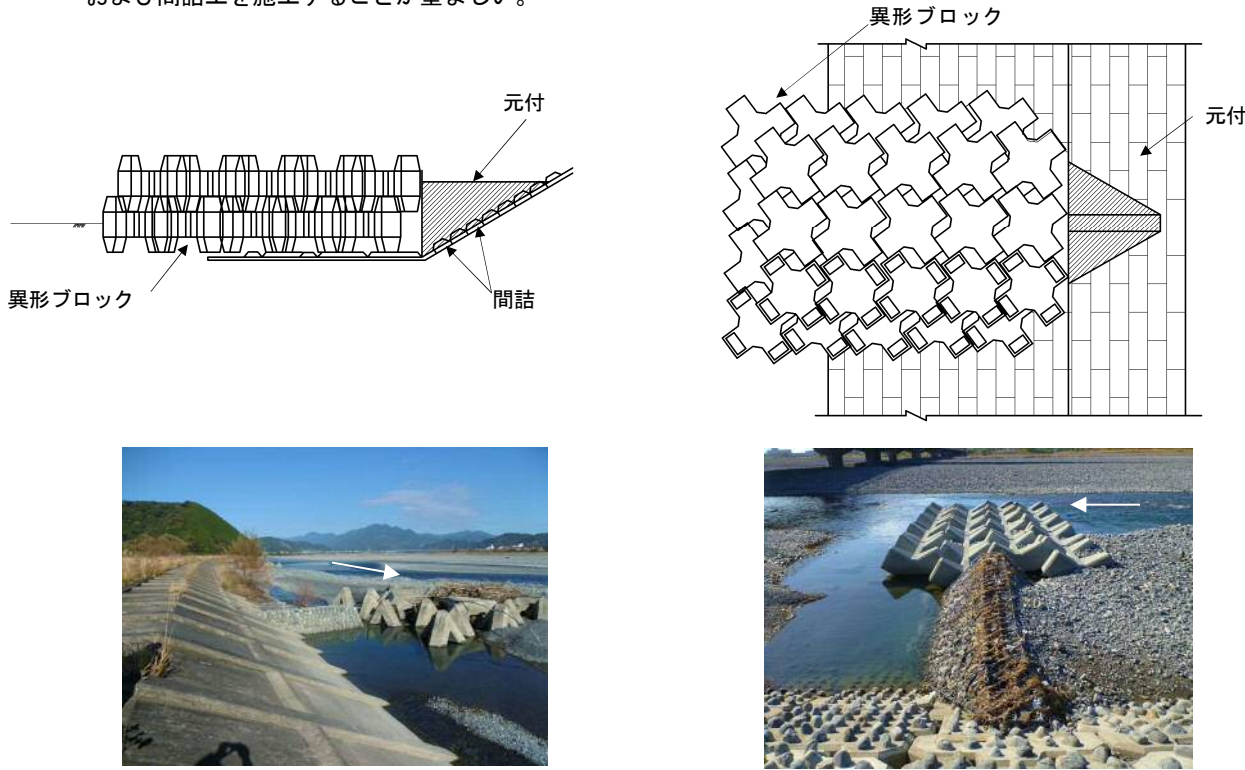
【コラム】 巨石付き盛土砂州を用いた河岸保護の事例

○急流河川では、洪水流のエネルギーや土砂量が一般的な河川に比べて大きいので、滞りが不安定であり河岸の侵食が予想外の箇所で行進する場合がある。また、護岸整備により、流路が護岸際に固定化し、護岸の下流部が侵食するという課題を抱えている。

○これらの対策として、砂州の水衝部に現地の巨石を配置した「巨石付き盛土砂州」を用いた河岸防護工が注目されている。この工法は、砂州の侵食、洗掘を抑制し、滑らかな低水路の河道線形を維持するのに効果があり、洪水に対する安定性と河川環境との調和を図る工法である。



(4) 水制の元付及び間詰水制の元付付近は、これを溢流する場合や不測の流水により災害を受け易いので、護岸法面と水制とに隙間が生じる場合は「コンクリート」「ふとん籠」「詰石」又は異形ブロック等で元付および間詰工を施工することが望ましい。



元付の例1（コンクリート）

元付の例2（ふとん籠）

図4-2-9 ブロック水制施工例

○参考文献

基準等の略称	参考文献	年月	監修・編集・発行等
河川砂防（設Ⅰ）	改訂建設省河川砂防技術基準（案）設計編（Ⅰ）	H9.10	（社）日本河川協会
河川工事ポケットブック	現場技術者のための河川工事ポケットブック	H12.5	藤井友竝 山海堂
水理公式集	水理公式集	H11.11	（社）土木学会
日本の水制	日本の水制	H8.6	山本晃一 山海堂