

## ◆ 特集：環境に配慮した河道計画・設計 ◆

## 治水環境機能から見た水制の計画・設計

山本晃一\*

## 1. はじめに

水制は河岸近傍の流れを緩めたり、流れの方向を変えるために河岸から突き出た形で設置される構造物であり、古来より数多く設置され、被災を通して徐々に改良されてきたものである。特に明治の中頃から昭和30年代までは、治水が国の重要な事業であったこと、西洋の科学技術を取り入れたこともあって水制工法の改良発展期であった。しかし、昭和30年代後半以降、水制は護岸と異型コンクリートブロックを用いた根固め工に取って替われ、水制の技術は途絶えてしまった。

ところが、平成の時代に入るとコンクリートを用いた護岸・根固め工は、河川景観や河川生態系保全の観点から種々の批判がなされ、水制の設置が急増することになった。しかしながら、設置した水制が被災する事例が多々見られ、水制の合理的な計画・設計論が求められている。

本論では、自然堤防帯を流れる河川に水制を設置する場合の計画・設計論の概要を述べてみたい。

## 2. 水制の機能と設計手順

水制の機能としては、①流れに対して粗度要素となり流速を軽減させる、②流れに対して直接障害物となり流れの方向を変化させる、の2つの働きしかない<sup>1)</sup>。この2つの作用によって水制設置目的に適うように、設置場の特性の応じて水制形状、配置、構造を指し示すのが水制計画・設計論といえる。

現代における水制の主な設置目的は、①河岸侵食あるいは護岸の破壊を防ぐ、②生態系の保全・復元、③景観の改善、の3つであるが、単独の効果を狙うものでなく3つを同時に満足させること

が期待されている。

堤防および河岸侵食の防止を図る水制は、その機能から基本的には次の2つに分類される。

## (1) 河岸線防御水制

水制の高さを高くして流水に対して障害物となることによって、流水を河岸（堤防）から遠ざけ、河岸（堤防）の破壊を防ぐもの。

この場合、護岸工と一体となって目的を達成させるものと、水制工のみによって（水制間は自然河岸）目的を達成させるものがある。水制根部の頂高が、平均年最大流量時の水位程度ある（河岸高より高くない）不透過水制であればこの分類と見なされる。

## (2) 根固め水制

水制の高さが低く、洪水時には水制上を流水が流下する形式のもので、一連の群として機能して河岸付近の流速を軽減し、かつ水刃ね作用により、法覆工と一体となって河岸侵食防止を図るもの。

法覆工前面に根固め工を敷設し、さらに根固め水制を設置するものと、根固め水制のみのものがある。

河岸線防御水制と根固め水制は、設計思想が異なるので、明確に意識化して設計する。

河岸線防御水制および根固め水制は、河岸（堤防）を侵食から防御しえるような配置・形状とするとともに、

- ・流体力に対して許容される変形の範囲内に収まること
- ・流下物の衝撃に耐えられること
- ・水制部材が設計寿命（耐用年数）内に腐朽しないこと
- ・必要とされる景観・美観が確保されること
- ・必要とされる生態系保全機能を確保することを満足するように設計する。

なお、既設の水制には、上述の(1)、(2)の分

Design of Groin Works from a Viewpoint of Environment and Bank Protection

類のどちらにも区分し得ないものがある。そのような構造様式とする場合には、両者の設計論によって構造物の安定性の照査を行う。ただし、設計論が十分に確立していないこと、経験的情報の少ないことより、水理模型実験によって水制の設置目的の達成度、安定性を確認することが望ましい。

水制を計画・設計する場合には、当該水制以外の工法と比較して当該水制に有利性があるか比較検討を行うことが望ましい。その場合、通常の護岸・根固め工との比較を必ず実施する。水制を使用する場合は、水制設置による生態系改善効果（平水時における魚類や水棲生物の生息域の多様性増加）、景観改善効果、堤防（河岸）防御に対する信頼性向上効果（安全装置の2線化）などの2次的効用をカウントする。比較の項目としては、建設費と維持費、景観効果、生態系保全効果、信頼性の向上効果、などであり、これらを総合的に比較検討し、水制を設置するかを判断を行う。

水制設計のための安全性照査水位および設計のための基準水位としては、次の3つの水位（流量）が取られる。

① 計画高水位

計画高水位は設計対象の水位として考えるべき最大の水位である。この水位時に流水の流速が最大となり、水制に働く流体力が最大になると考えられている。

② 平均年最大流量時相当水位

河床材料の代表粒径が、1cm以上の河川では、低水路内に生じる砂州のスケールや河床の横断形状は、計画高水流量のような大流量に対応したものでなく、平均年最大流量程度の流量時の水位に対応したものとなっている。水制の配置や形状設計にあたっては、この水位程度の流量時の砂州や横断形状と調和的であることが必要であるので、

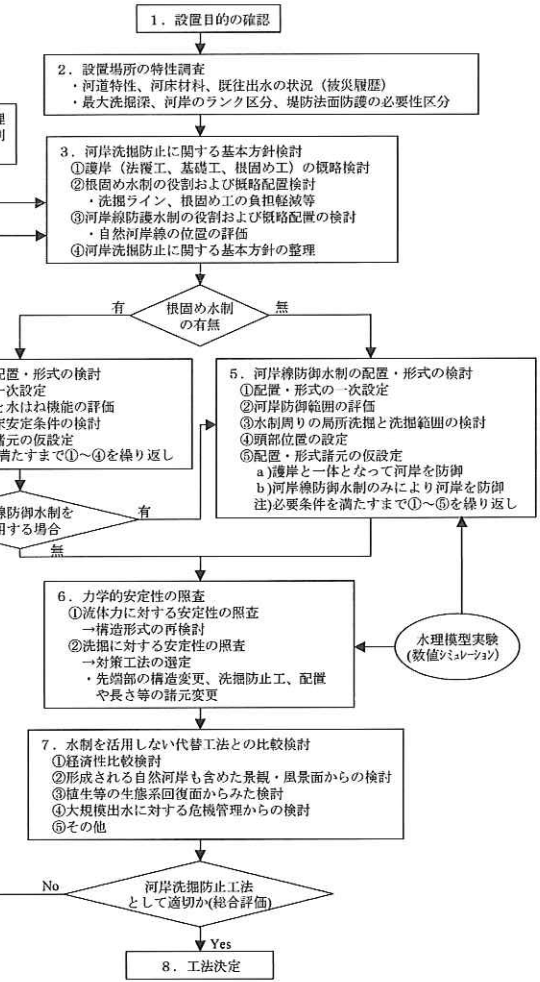


図-1 水制設計の手順

平均年最大流量時相当水位を設計の基準水位とする。

③ 平均低水位

水制の基礎高、水制の高さなどの基準水位として平均低水位を使用する。

以上まとめて、図-1に設計の手順を示す。

3. 河岸侵食防止工としての水制の意義と方向

昭和以降に設置されてきた水制を見ると、それ自体単独で用いられるのではなく、護岸を一体となって用いられる根固め水制がほとんどである。

現在多くの河川で行なわれている異型コンクリートブロックを用いた根固め工法と比較して、根



固め水制が優れているのかの判断は難しい。根固め水制はコストが高く、河岸侵食防止に期待する効果のみならず河川生態系の保全、河川景観の改善、河岸線防衛の2線化などの副次的効果を総合的に評価しなければ根固め水制の生きる道は少ないように思われる。

護岸工を設置しない河岸線防衛水制が、河岸侵食防止工として有効であれば、護岸法覆工を節約でき水制間が自然河岸となり、自然となじみ易い工法となる。河岸線防衛水制が設置可能なところは設置を試みるべきである。

#### 4. 河岸侵食防止工設置場所の河岸のランク付けと水制工種

河岸侵食防止の重要度から見たの河岸のランク区分は、低水路河岸管理ラインを河岸侵食による堤防被災の可能性の強弱に応じて護岸の構造や強度を変えようとするために持ち込んだ概念である<sup>2) 3)</sup>。すなわち河岸の持つ機能に応じて護岸・水制の性能規定を設定しようと意図するものである。

河岸のランクは、検討対象時点における河道状況、堤防防護のために必要な高水敷幅、河岸侵食の発生可能性、高水敷利用実態・計画などに基づいて区分する。

河岸侵食防止の重要度から見た河岸のランクは、以下のように定義する<sup>4)</sup>。

##### ・ランク A 強固な防護が必要

堤防防護に必要な高水敷幅がなく、かつ洪水時に河岸侵食が発生し易い区間で、洪水時の堤防表面や高水敷の侵食の可能性が高く破堤氾濫時の想定被害形態から見て堤防と一体となって低水路河岸を防護する必要のある重要度が非常に高い区間

##### ・ランク B 防護が必要

堤防防護に必要な高水敷幅がなく、かつ洪水時に河岸侵食が発生し易い区間であるが、堤防表面や高水敷の侵食の恐れがない区間

堤防防護に必要な高水敷幅があるが洪水時に河岸侵食が発生し易い区間で、かつ高水敷の利用等から洪水時の河岸侵食を防ぐ必要がある区間

##### ・ランク C 防護の必要性があるが低強度のものでも対応可能

堤防防護に必要な高水敷幅が十分にあるが、高水敷の利用等から洪水時の河岸侵食から高水敷防護する必要のある場合で侵食に対して低強度の河岸防護工で対処しえる区間

堤防防護に必要な高水敷幅はないが、河岸侵食が発生する可能性が少ない区間

##### ・ランク D 防護をほとんど必要としない

堤防防護に必要な高水敷幅が十分にあり、洪水時の河岸侵食から高水敷を防護する必要のない区間

なお河川管理施設等構造令によって設置が義務付けられている橋脚、落差工・堰などの横断構造物、樋門、樋管の周辺は、ランク Aあるいはランク Bとする。

各ランクの河岸に対して適用される河岸侵食防止のための水制工種は以下のごとくであろう。

##### (1) ランク A

セグメント 2-1 では、低水路の法線形を修正してランク A の河岸をランク B の河岸にすることが好ましいが、それができない場合は護岸・根固め工を標準とする。水制を設置する場合は、河岸肩部を荒らさないように水制高の低い不透過型の根固め水制とする。水制工種としては、巨石・異型コンクリートブロックを用いた横工水制や牛類を縦に並べ根固め工とする工法が取られる。

セグメント 2-2 では根固めを補強する杭出水制が好ましい。

##### (2) ランク B

セグメント 2-1 では通常の護岸・根固めで河岸処理を行えばよいが、水制を設置するとすれば根固め水制とする。河岸線防衛水制は、水制工根部の河岸が荒れることを免れないが、それを許容できる場合には設置を試みる。

セグメント 2-2 では河岸線防衛水制を積極的に導入するべきである。

##### (3) ランク C

伝統工法や植生材を用いた護岸・水制の設置を試みる。

(4) ランク D

基本的には河岸侵食防止工を設置せず、自然河岸を残す。

5. 水制工の形状と配置

水制工の形状と配置形状は水制設置場所の河道特性、水理条件に適合したものとする。以下の説明のため図-2に水制形状の定義を示す。

(1) セグメント 2-1

ランク A の河岸では根固め水制とし、水制先端付近間まで深掘れを追いやるように設計すべきである。水制長  $l_g$  は河岸から深掘れ位置をどれだけ離すかによって定め、水制の間隔  $L_g$  は水制高  $h_g$  の 10~20 倍程度とする（流速低減効果、コストからの判断<sup>2)</sup>。砂利川では大出水時に河床に発生する小規模河床波は砂堆となり、低水路部の流速係数  $\phi$  は 12 程度、マンングの粗度係数で 0.03~0.035 となるので、あまり水制高の低い水制では流速低減効果を期待できない。水制の高さは根部で平均河床高から平均年最大流量時の平均水深の 1/3~1/2 程度の高さは必要であろう。

水制の構造は瀬替え（ドライワーク）が可能なら、水制周りの洗掘を防ぐ基礎工（平型のコンクリートブロック、木工沈床）の上に異型コンクリートブロックあるいは巨石を積み上げ水制とするか、乱積み水制とする。なおどちらにしても護岸前面には最低限の根固め工が必要である。

ランク B の河岸についてはランク A と同様とする。

河岸線防御水制を設置しないのは、大洪水時、水制根部の堤防、高水敷の侵食を免れがたいためである。侵食を許容し補修するなら、あるいは侵食防護工を設置するなら、設置可能である。

(2) セグメント 2-2

ランク A の河岸に根固め水制を設置する場合には、水制先端の洗掘を軽減するように、不透過の水制より図-3 および写真-1 のような杭出しを主体とした水制のほうがよいと思われる。

この杭出しは護岸の根固め工のブロックや捨石の流出を防ぐ効果もある。杭列間およびその周辺には沈床や籠工を敷設する。異型コンクリートブロックでもよい。杭水制の間隔、設置密度は、水

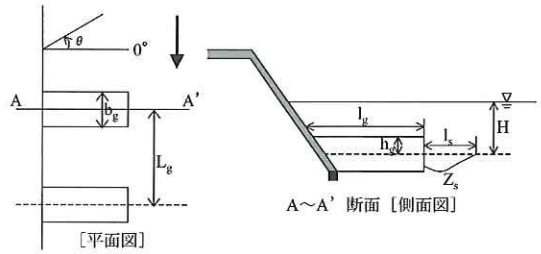


図-2 水制の形状と定義

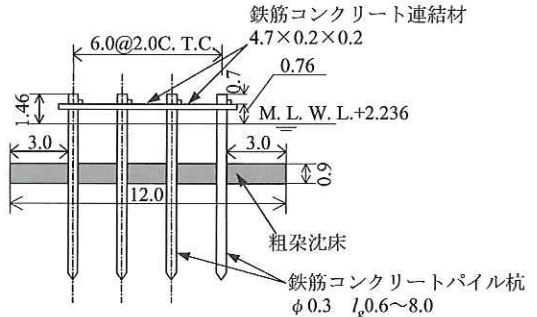


図-3 昭和 30 年代の杭だし水制横断面 (最上川、丸沼地区、単位：m)

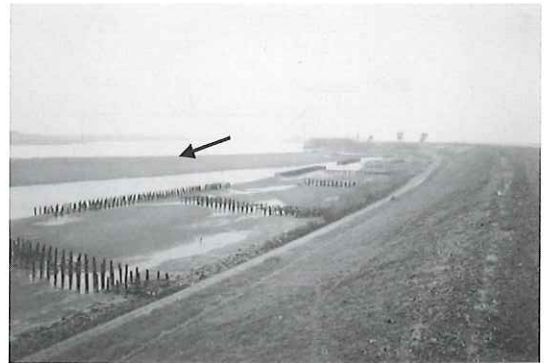


写真-1 木曽川の杭だし水制 (セグメント 2-1)

制設置域の流速係数  $\phi_s$  が 6~8 程度となるように設計する（設計法については文献 2) 5) 参照）。杭の高さは河岸近くの河岸高より低くし（河岸高と平水位の差の 1/2 程度以下、あまり高くすると景観上見苦しい）、河心側に向かって水制高を低くする。この横断勾配をどの程度とするか明確な基準はないが景観に配慮する。低くするのは水制先端部の局所洗掘深を軽減し、かつ河岸よりの流速低減を図るためである。なお護岸前面には最低 4m 程度の根固めを敷設しておくべきである。

ランク B の河岸において根固め水制を設置す



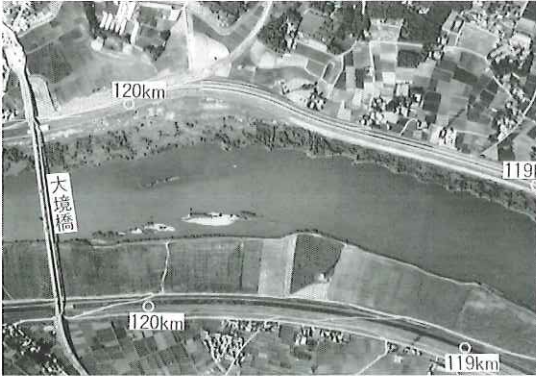


写真-2 既存水制の河岸線防御水制化  
(利根川 120km 付近)

る場合はランク A の河岸と同様でよいが、高水敷があるので護岸工を設けない河岸線防御水制を積極的に設置したい。

河岸線防御水制の水制形状や設置間隔については、すでに文献 6) で述べたので詳しく述べないが、水制間の河岸は最終的には図-4 のようになる。

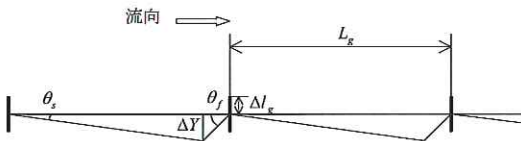


図-4 水制間の河岸線と記号の定義 (平面図)

水制の間隔  $L_g$  は、河岸線の凹凸をどれだけ許すかによって決める。河岸線の形状を実河川の事例研究によると  $\theta_s$  は 7 度程度、 $\theta_f$  は 45 度程度であった。したがって幾何学形状より  $\Delta Y = 0.11L_g$  となる。 $\Delta l_g$  は水制の先端形状や高さによって変わるが、水制の頂部の高さが水制間の土砂堆積面高より高ければ概略ゼロとしてよい。水制頂部を河心に向かって低くすると  $\Delta l_g$  の値が大きくなる。簡単な移動床模型実験により評価することが望ましい。

砂州の長さ  $L_s$  と水制の間隔  $L_g$  が同程度の場合は、斐伊川での事例によると砂州により水制間の張り出し  $\theta_s$  の値が大きくなる。水制の間隔  $L_g$  が砂州長  $L_s$  の 1/2 以下であれば、砂州の影響は小さい。 $\Delta Y = 5 \text{ m}$  とすると  $L_g = 45 \text{ m}$  となる。

水制根部は水制設置前の高水敷の中に河岸高程

度食い込ませておく。水制間に土砂を堆積させたい場合は、豊水位以上の高さに埋め立て草本類の繁茂を図り、細粒物質をトラップさせ自然堤防の形成を助長する (1 級河川で自然堤防が成長するのに 10 ~ 30 年以上を要す)。ワンドとして残しておきたい場合は埋め立てないが、長年の間には土砂が徐々に堆積してしまおう。

水制の構造は流体力により流失しないものとする。水制先端は洗掘をまぬがれないので沈床あるいはそれに代わる根固め工を先端水制頂高の 2.5 倍程度の範囲に設置する。

## 6. 水制設計のための照査条件と照査法

水制の設計に当たっても護岸・根固め工と同様、外力条件と境界条件が必要である。すなわち代表流速  $V_0$  と設計対象河床高  $Z_D$  を設定する必要がある ( $V_0$  と  $Z_D$  は護岸と同様、設計用の河岸付近の流速と河床高と定義する<sup>4)</sup>)。この設定法については文献 4) 5) を参照されたい。

水制の設計に当たっては、水制が突起構造物であるため、これに加えて、水制まわりの流速増加量と水制回りの局所洗掘深を評価して、設計のための外力条件と境界条件としなければならない。既存の研究成果によりある程度この量を評価できるので、その成果を用いて力学的安定性照査が可能であるが (文献 5) 参照)、水制は形や配置形状が個々であるので、なるべく簡易な移動床模型実験を行い水制の力学的安定性の照査を行いたい。これにより水制形状や配置の妥当性も確認できる。

## 7. 生態系保全を意識化した水制設計の留意点

河川生態系の保全・復元の原則は、河川自身が作り出す河川地形の変化を人間が考える範囲でできるだけ許容することである。

まずは、河岸線防御ラインを生態系の観点から適切なものとし、ランク C、ランク D の河岸線を生み出し、必要のないところに河岸侵食防止工を設置せず、さらに河岸侵食防止工として河岸線防御水制を設置できる区間は積極的に設置し、なるべく自然河岸を生み出すことである。

水制が生態系の保全・復元に役立つものとして、

次のようなことが言われている。

- ① 水の流れに変化を与え、流速の速いところ、遅いところを生じさせ、水棲生物に対して多様な環境場をつくる。
- ② 水制頭部の洗掘や背後の土砂堆積により、河岸地形が複雑になり、①の作用と相まって、水棲生物や植物に対して多様な環境場を提供する。
- ③ 洪水時に魚の避難空間を提供する。
- ④ 土砂の堆積により河岸が自然の土砂と植物で覆われる可能性がある。
- ⑤ ①、②の作用と相まって水制間の河床および河岸材料が土砂の分級によって変化に富むものになる可能性があり、生物種の多様性や生育空間の改善となる。

このような機能を根固め水制により期待する場合は、水制先端部の洗掘防止用根固めの設置高を深くする。水制の根部の水制頂部高さを通常の根固め水制より高くし、先端に向けて低くするなどの工夫を行う。写真-3は根固め水制として設置したものであるが、水制の生態系保全上の機能を実感できよう。

水制によりワンド空間を意図的に形成する場合は、水制設置後、水制間に土砂が堆積し陸化しないように水制高、間隔を決める。陸化を防ぐには、水制高を高くせず浮遊砂の堆積を助長させないようにし、低水位時水制間が水面下となるよう設計する。基本的には越流型の水制とし、洪水時の水制域の流速をあまり低減させないように、水制頂高を平水位上1～2m程度以下とする。水制間の河床高が平水位以上となると草本類の侵入が始まり、急速に浮遊砂やワッシュロードの堆積が進行するので設計に当っては注意を要す。

既存の護岸・根固めの上に生態系改善を目的とした水制を設置する場合は、護岸との取り付け部の流体力が大きくなるので、既存施設の安全性のチェックを行う。また付加された水制についても構造上の安全性の照査を行う。流体力の算定が適切でなく、水制根部の破壊、水制先端部の巨石の流失された水制が見られる。



写真-3 最上川 13km 付近の根固め水制の状況

## 8. おわりに

紙数の関係で、水制の計画・設計論について詳しく記述できなかった。水制の標準的な設計論はまだ確立していない。新しい試みを実施する場合は、移動床模型実験を実施することを薦める。なお現時点での筆者の水制設計の考え方については、文献5)を参照されたい。

### 参考文献

- 1) 秋草勲、吉川秀夫、坂上義二郎、芦田和男、土屋昭彦：水制に関する研究、土木研究所報告、第170号、pp.40-41、1960年
- 2) 山本晃一：日本の水制、山海堂、pp.393-437、1996年
- 3) 国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き、山海堂、pp.174-180、2002年
- 4) 国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法、山海堂、1999年
- 5) 山本晃一編著：護岸・水制の計画・設計、山海堂、2003年
- 6) 山本晃一：これからの水制工、土木技術資料第35-8、1993年

山本晃一\*



(財)河川環境管理財団研究総括職、工博  
Dr.Kouichi Yamamoto