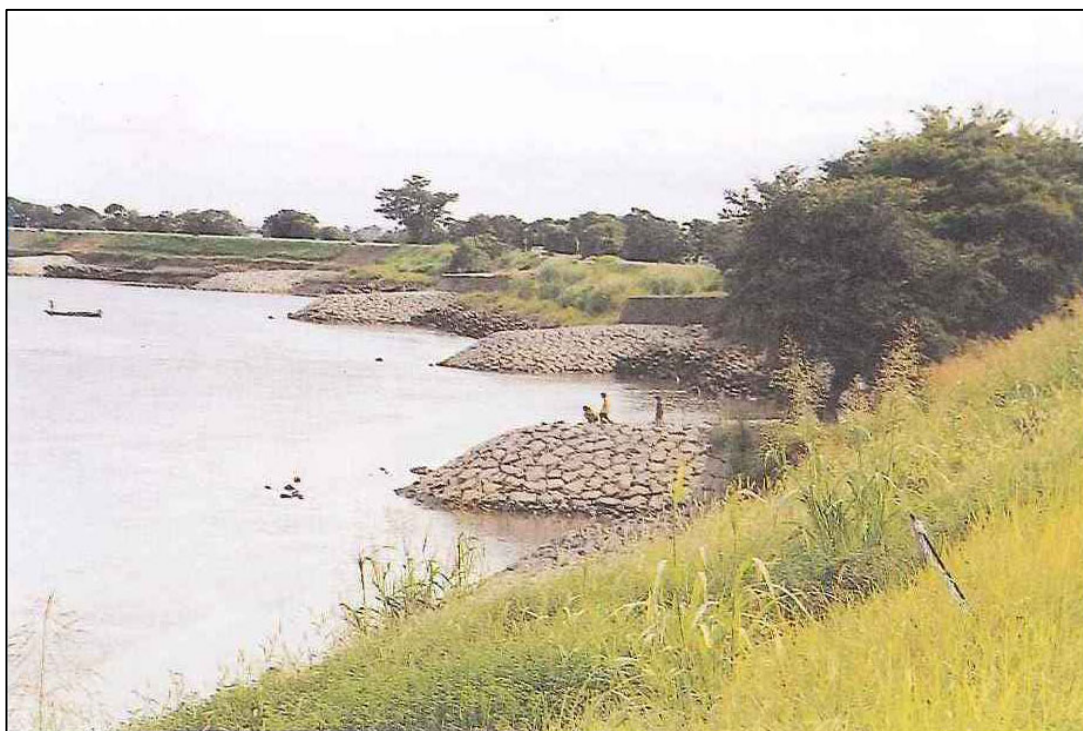


— 多自然川づくりのための —

水制工の設計参考資料

（ 三 次 案 ）



平成26年2月

国土交通省 九州地方整備局 河川部

まえがき

九州地方整備局では、平成2年の「多自然型川づくり」の通達以来、管内の河川でその積極的な推進を図るため水制工を活用してきた。しかしながら、その当初は、戦後の建設事業の近代化とともに、水制の設計・施工の技術を伝える人たちがほとんどいなくなっていた。このため、平成9年に、護岸・堤防を保護する目的の伝統的な治水機能を基本として、新しく水陸境界部の生態学的な環境の再生や、水辺の景観や親水機能などの創出を目的とした「低水水制の設計参考資料（二次案）」を平成9年に作成した。

以後、この二次案を参考に九州各地の現場で水制工を川づくりに活用してきたが、それらの施工現場を追跡、評価した結果、出水後に水制が土砂に埋没する事例や、目的とした効果が発揮されていない事例など、課題の残る事例が散見された。そしてその原因として、水制を設置した「川の特性」の把握や理解の不足、二次案の諸元が一律に適用できない多様な現場の存在と川の特性に応じた工夫の不足、治水対策という二次案で想定していない現場への適用などが考えられた。

そこで、現場での経験の蓄積や新たな研究成果をもとに、川の特性把握の方法やより多様な現場への対応方法について二次案を見直し、本書を作成した。

現在、水制工は環境の多様性創出に加え、河岸や堤防の保護、河床の二極化といった河道規模での土砂収支に関する問題への対応など、幅広い活用が期待されるようになってきている。本書を参考に創意工夫を重ね、課題解決にも繋がるより良い「多自然川づくり」に結びつけて頂ければ幸いである。

最後になりましたが、本書の発刊にあたっては九州の川づくり多大なご尽力を頂いた福留脩文氏に貴重なお意見とご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

九州地方整備局 河川部

表紙：菊池川右岸（熊本県玉名市小浜）

目 次

はじめに	1
1. 多自然川づくりと水制工(序論)	2
1-1 水制工とは	
1-2 水制工の「川づくり」への応用のはじまり	
1-3 わが国における水制工の研究	
1-4 多自然川づくりの新たな課題と水制工の可能性	
2. 水制の計画(水制群としてデザインする)	6
2-1 水制の計画・設計手順	
2-2 設計の視点としての「水と土砂の動き」の重要性	
2-3 「川成」から「水と土砂の動き」を読む	
■コラム1:簡易作図法を用いて湾曲河道における水衝部の流況を読む	
■コラム2:水衝部	
2-4 水制配置の考え方	
■コラム3:水衝部対策から河床形態の復元対策へ	
2-5 長さと間隔の考え方	
■コラム4:水制工の既往研究	
2-6 高さとの考え方	
2-7 どの方向へ向けるか	
2-8 平面形状をどうするか	
2-9 「透過」か、「不透過」か	
3. 水制の設計(構造の細部をデザインする)	24
3-1 材料に何をを使うか	
3-2 縦断勾配をどうするか	
■コラム5:水制の形状と物理環境の変化の傾向を知る	
3-3 頭部の根入れ深さをどうするか	
3-4 横断形をどうするか	
3-5 材料の大きさの決定	
■コラム6:カ石を要として一体的に構築した石組み構造	
3-6 石材形状の使い方と石組基本構造の組合せ	
■コラム7:「のめり」形状の考え方をを用いた分散型落差工の構造	
4. これからの水制設計で重要な視点	40
4-1 より安定した自然に近い構造を目指す	
4-2 他の工法と組み合わせて「水と土砂の動きを正常化(最適化)」する	
～自然に近い河床形態の復元による河床・河岸の安定化～	
4-3 現場の観察から「人為的な作用に対する物理的・生態学的な応答」を知る	
～水制工の新たな可能性を求めて～	
5. 特殊な水制(ハイドロバリヤー水制)	46
5-1 土砂を効率的に堆積させるハイドロバリヤー水制	
5-2 堆積した土砂を効率的に排除するハイドロバリヤー水制	
6. 今後の検討課題	50
7. 参考資料	51
■野石石組みの用語解説	
参考文献	53

はじめに

平成9年に作成した「低水水制の設計参考資料(二次案)」(以後、二次案と称す)は、もともと多自然型川づくりの技術を工夫するうえで、高水水制と低水水制と機能が分れる水制工において、低水水制を対象に水辺の環境を多様化する目的で作成されている。ただし、その時点では水制に関する普遍的な詳細設計の資料は少なく、まして生態学的な環境に配慮した構造や機能をまとめた文献は皆無に等しい状態であった。そのため、二次案は対象を低水水制に限定し、スイスでの先進事例やわが国の伝統工法の文献を参考としつつ、関係者によって創意工夫をしながら参考となる設計諸元やデザインを設定した。

幸い、二次案作成後約15年を経て、低水水制に関する多くの経験や知見が集積されてきている。また、現場におけるその後の水制への取り組みは積極的で、高水水制も議論・工夫が重ねられ、水衝部の河岸や堤防の保護といった治水対策にも多くの現場で普通に採用されるようになっていく。その場合には、水衝部での正しい流況の読み方とその流況に対応した適切な水制の諸元と配置方法を検討する必要があるが、この課題についても研究や関連する課題についての知見が集積されている。

さらに近年では、河床の二極化といった河道規模での土砂収支に関する問題等が生じており、その対策として水制を活用する研究や試験施工が進められている。ただし、この場合においては、「川成から水と土砂の動きを読む」という河川の設計思想と設計手法が必要である。

このような状況を踏まえ、水制工をより広く治水・環境の目的に応用して設計する際に必要な「川成の読み方」や配慮事項、二次案の作成以降に集積された知見や新たな研究成果をもとにした「水制工の諸元と配置法」などについて、参考となりうる技術的な考え方を加筆・修正して三次案を作成した。

なお、古来多様な現場に即する水制の設計実務書は存在しえないと言われるように、川成や水と土砂の動きは河川の流域特性や現場の地形によって異なるため、全ての現場を網羅した参考資料を作成することは難しい。従って、本書は水制設計に関する考え方や原則的な基準、代表事例の提示にとどめている。個々の現場における水制の設計にあたっては、本書を参考としつつ川成をよく観察した上で、水制工の水理学的または物理学的な現象や護岸・堤防の安定性について、それぞれの専門書や論文を参考に十分な検討を行い、現場の状況に応じた創意工夫を行って頂きたい。

1. 多自然川づくりと水制工（序論）

1-1 水制工とは

水制とは、岸から水の流れに突き出した構造物であり、流速減少と流向固定という2つの機能を有している¹⁾。その機能により、流水の流向制御・河岸侵食および護岸基礎洗掘の防止・水制近傍での土砂堆積および河床侵食などを期待するものである¹⁾。従来は、治水や航路維持などの利水を目的に設置されていたが、近年は環境の多様性創出に加え、河岸や堤防の保護、河床の二極化といった河道規模での土砂収支に関する問題への対応など、様々な目的として設置されることも多い。

水制は、その構造および性質により大きく透過水制、不透過水制に分類される。また、本書では流水に対する高さによって下記のように区分している。この他、護岸に対する水制の向きや平面形状、構築する材料などでも分類される（第2項参照）。

本書で用いる水制工の高さによる分類

- ┌ 非越流型水制：高水に水没しない高さの水制
- └ 越流型水制：平均年高水ほどの洪水で水没する水制
 - └ 高水水制：高さが平均年高水レベル
 - └ 低水水制：高さが平水レベル

また、水制の設置方法の違いでは、根固め工に水制を併設して護岸基礎の洗掘を防止する場合（根固め水制）と根固め工を併設せず護岸前面に土砂を堆積させ、または河岸前面の流速を遅くして河岸の崩壊を防ぐ場合の2通りがあり、本書では後者の構造について解説している。

なお、特殊な水制としては、ロシアの水理実験所によって開発された、土砂を効率的に堆積させるハイドロバリヤー水制などがある（第5項参照）。



1-2 水制工の「川づくり」への応用のはじまり

九州での多自然型川づくりにおける水制工の応用は、当初、1970年代後半にスイスから始まった河川の自然復元を目指す近自然工法の研究事例を参考にしている。スイスでの、イヴァン・ニキティン²⁾ やクリスチャン・ゲルディ³⁾ らが着目した視点は、以下の通りである。

単調な護岸法線区間に設置する水制は、その頭部で破線状に連続する固定点に水流を集中させ、水制域内の水流を本流から離して流速を減じる。その際、水流は水制頭部で約6度の入射角で偏位し、その一部は水制域内に鉛直軸をもつ回転渦と隅に二つの逆方向に回転する小さな渦を発生させる。流水の一部はこの回転渦に取り込まれて減速し、中心部に掃流物質を堆積させる(図-1、写真-1 参照)。

上向き水制は越流水を胴部の直角方向に戻し、河岸が流水で被災するのを防ぐ。また洪水が強く当たる河岸の水制を不透過型として、頭部の勾配を立てて流水抵抗を大きくすると、その先端に淵の形成を試みることができる。さらには、水制を土砂で覆い隠す(隠れ水制)と、侵食を受け切り立った河岸の形成を試みることができる(写真-2 参照)。

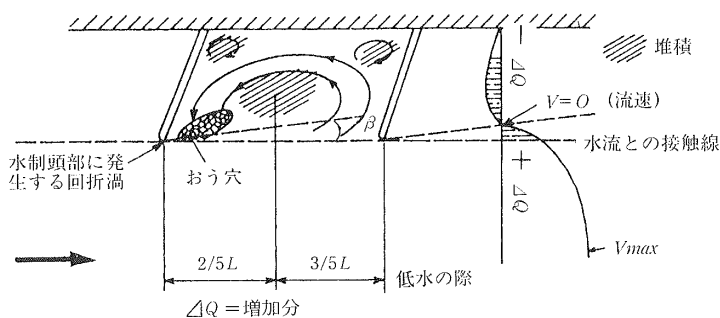


図-1 イヴァン・ニキティン²⁾ による河川直線部における水制と水流の状況

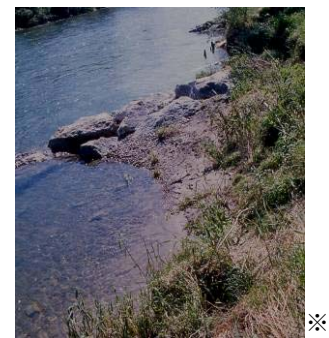


写真-1 スイス・トゥール川直線部の水制と水際

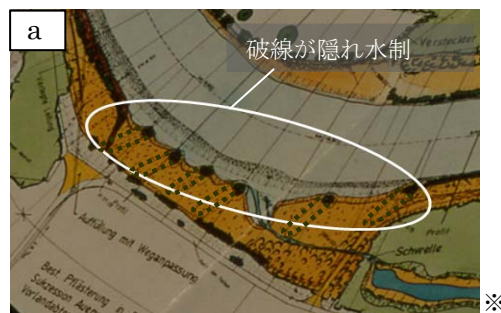


写真-2 同上トゥール川での水制。写真 a は水衝部に計画した隠れ水制群(水制全体を覆土しその水際を侵食させる)の配置図と、写真 b は工事完了後2年を経過した水際地形

1-3 わが国における水制工の研究

古くは江戸時代に編集された「治河要録」⁴⁾、「川除仕様張」⁵⁾などに、川成と洪水や土砂の動きと水制設置の要領を記した伝書が存在する。1932年に真田秀吉が「日本水制工論」⁶⁾を著し、伝統工法の総合的な資料編集と解説を行っている。1960年には、秋草⁷⁾が従来の水制工法の機能について、統計的・理論的に整理している。近年に至り、水制の働きを治水と環境の両面から活用するうえで、水制周りの流れの変化や土砂の動きを予測することが重要な課題となった。水制背後に生じる流れ⁸⁾や、水制近傍に河床材料がどのように堆積するか⁹⁾、水制周りの流れと河床変動の詳細¹⁰⁾、設置角度の異なる水制群に作用する流体力の分布特性¹¹⁾、連続する水没水制群を有する水路の底面流速と河床変動の解析法¹²⁾、さらに水制を使って自然に近いみお筋の蛇行と淵・瀬・砂州の保全・復元を図る設計法¹³⁾などの研究がなされ、治水と環境に調和する水制の有効性を評価できる道が開かれている。また、それらを体系的にまとめた専門書も出版されている^{14) 15)}。



水制工に関する参考図書

1-4 多自然川づくりの新たな課題と水制工の可能性

多自然型川づくりが始まって15年を経た2005年9月、現場で様々な成果が上がる一方、場所ごとの自然環境に配慮を欠く改修や、他の現場を真似た画一的で安易な事例も見られるとして、それらを検証し、新たな知見を踏まえた今後の方向性を提言する「多自然型川づくり」レビュー委員会が設立された。そして、2006年5月、川づくりの課題を目指し全体の水準を向上させるため、「多自然型川づくり」から「多自然川づくり」への提言が行われ、続いて「多自然川づくり基本方針」、「中小河川に関する河道計画の技術基準について」の通知がなされた。

その過程で、「多自然川づくり」の技術の問題として、人為的改変に対する物理的、生態学的な応答が十分に解明されていないこと、現在の知見を設計に十分生かせていないこと、その結果、従来同様の治水・利用に偏重した川づくり、標準断面での画一的で安易な川づくり等が行われていることが指摘された。そして、土砂移動や流量変動等、河川が本来持つダイナミズムの保全・回復や流域との連続性の確保に努めること等の必要性がうたわれ、多自然はすべての川づくりの基本であり、河川全体の自然の営みを視野に入れたビジョンが必要であること等が再認識された。

このような中、近年の様々なタイプの水制工の施工経験やそれを基にした研究成果から、各水制タイプの水理特性や環境形成の機能が明らかになりつつあり、適切な水制タイプの組み合わせと配置により、生態学的な環境復元や護岸や堤防の保護に対しても成果を上げつつある。さらにはその河川本来の川成に合わせて水制やその他の工法を配置することで、河川が本来持つダイナミズムを保全・回復させ、維持管理面でも効果的である可能性が示唆されるようになっている。このように、水制工の役割と可能性は大きく広がりを見せている。

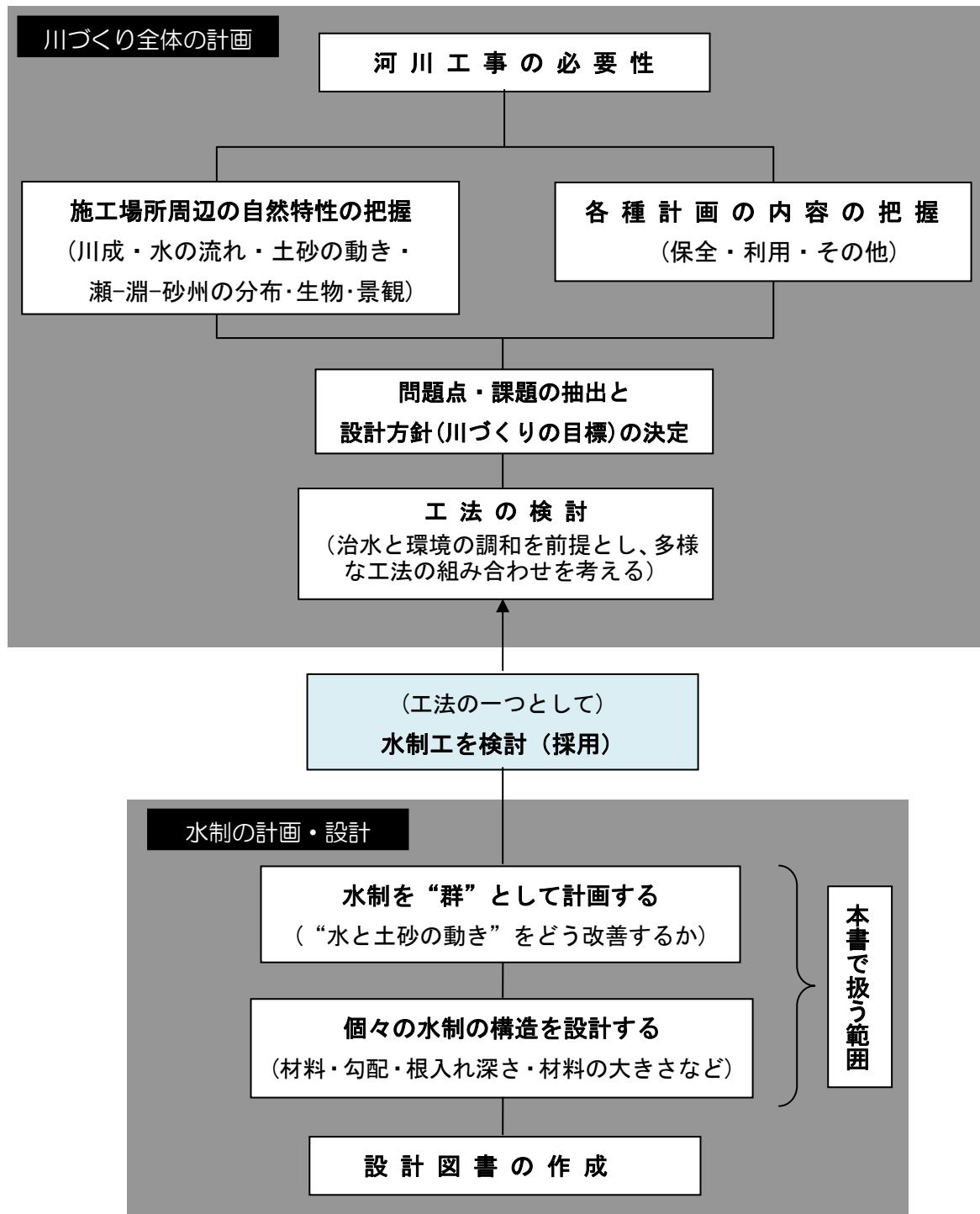


※

【生態学的な環境復元例：筑後川安武地先】かつて存在した「荒籠」と呼ばれる水制をうろこ積み様式で復元している。堆積した「ガタ土」の排除に加え、砂浜を回復することで、以前生息していたシジミなどの川の恵みが戻っていくことを目指した。

2. 水制の計画(水制群としてデザインする)

2-1 水制の計画・設計手順



水制の計画・設計手順

2-2 設計の視点としての「水と土砂の動き」の重要性

「水制工」を計画・設計する場合においては、設計箇所の現状だけにとらわれず、その上下流の河道の「水と土砂の動き」を把握し、予測した上で、これを制御する視点をもつことが重要である。

【解説】

流水の土砂に対する侵食・運搬・堆積の作用は、護岸や堤防の安定性を損なうような河床低下や河岸侵食などを引き起こす一方で、河道や河床・河岸に固有の形態（淵・瀬・砂州など）を出現させ、またその運搬過程で河床材料を分級して、多様な河川生物の生息空間や魚介類の産卵場を提供している。

これに対して、治水と環境（生物環境の保全・創出）の調和する川づくりを行っていくため、河川技術者には“流水の流れと土砂の動き”を理解し予測する技術が求められる。

特に、河岸から河心へ突き出す構造物である「水制工」では、その流水に対する作用が大きいことから、これを扱う場合には、その影響について慎重に検討する必要がある。

過去の水制工の施工事例を評価した結果、ねらいに沿った効果を発揮している現場がある一方で、課題の残る事例も散見された。後者の事例をみると、個別箇所のみを見て設計した結果、「川の特徴の把握や理解」が不十分であったことが原因の一つとして挙げられた。

河川は、その流域の成り立ち、河道の形状（線形や縦横断形）、流量、流速、土砂供給量、河床材の粒径などがそれぞれに異なるため、その特性は多様である（「事例紹介 1」参照）。また、河道内の「水」や「土砂」は動くものであり、みお筋や河床の地形は日々変化するものである。

したがって、川づくりや、その工法の一つとしての水制工を計画・設計する場合においては、設計箇所の現状だけにとらわれず、その上下流の河道の「水と土砂の動き」を把握し、予測した上で、これを制御するという視点をもつことが重要である。

【事例紹介 1】大量の細砂を含む土砂の供給により、移動性の大きくなった河道（番匠川水系久留須川）



※

番匠川支川久留須川。上流から大量の細砂を含む土砂供給があり、河道内の砂州は移動性が大きく、多くの水制が破壊されあるいは埋没した。写真は、大蛇行する外岸側に大量の土砂が堆積した（写真 a の赤枠の場所で写真 b の状態）。

2-3 「川成」から「水と土砂の動き」を読む

「川成」から「水と土砂の動き」を読むことで、洪水時の水衝点の位置や、淵・瀬・砂州の配置を想定できる。この結果は、現河道の問題点の抽出や、水制の配置検討に有効である。

【解説】

河道内の「水と土砂の動き」を把握し、予測するにはどうしたらよいのだろうか。

山本¹⁶⁾は、その著書において「河道の平面形状とその変動形態は、砂州の配置形態と砂州の移動に密接に関係しているので、河道の平面形状特性を論じるには、砂州、瀬と淵の配置状態と河道の平面形状の関係についての知見が必要である」と述べている。つまり、河道の平面形状と河床の形態には関係性があるということである。そこで、本書では、河道内の「水と土砂の動き」を把握する際の「川の見方」の一つとして、「川成（かわなり）」から読み解いていく。参考として、次頁に千田¹⁷⁾による簡易作図法（単曲線の場合）と、この作図要領を参考に福留¹³⁾が作成した瀬・淵・砂州の概念図を紹介する（「コラム1」参照）。

この千田¹⁷⁾による簡易作図法では、「川成」から水衝点（=淵の最深部）や洪水流により河床・河岸が侵食される範囲（=淵の範囲）の目安を立てることができる。また、これをもとに、自然河川にみられる瀬や砂州の分布特性を適用すれば、川成からみた淵・瀬・砂州の配置が想定できる。

これらの検討結果は、現状との比較によって現況河道の問題点を抽出したり、「2-4 水制配置の考え方」で後述する水制の配置検討に役立つ。

なお、上記の作業に加えて、空中写真、定期縦横断図、人為的な変化の履歴などから河道内の経年的な変化を読み取ることも有効である。

用語解説

<川成（かわなり）>

本書では、堤防法線や河岸（護岸）法線などの、河道内の水の流れを規制する河道の平面線形を川成（かわなり）という。

<水衝点（すいしょうてん）>

本書では、洪水流が河岸に最も強くあたり河床・河岸を侵食する点のことをいう。この水衝点は、淵の最深部となる。

コラム 1：簡易作図法（千田、1991）を用いて湾曲河道における水衝部の流況を読む

九州の多自然川づくりでは、当初から水衝部の治水対策と淵環境の保全・復元対策として、水制工を試行してきた。湾曲河道の複雑な流況に水制を計画する場合、模型実験や数値シミュレーションによる検討も行われるが、その以前に、洪水時の外力が河岸にどのような働きを及ぼしているかを理解しておく必要がある。

千田¹⁷⁾は、その湾曲部に発生する淵の位置を簡易に求める方法を提案しているが、単曲線の場合を以下に引用する(図-2)。

低水路流心計画の段階では、図-2 において流心線を延長して曲線部の対岸と交わる点 P と、曲線の始点 B、C 点との間の距離 l_0 、瀬岸の接線を延長して対岸と交わる点 Q と、曲線の始点との間の距離 l_1 とするとき、 $l_1/2$ の位置付近を淵頭とし、 l_1 の位置(Q 点)付近を淵の最深部としてほぼ大きな違いはないであろう。また、淵の終点は、曲線部の形状によってその長さは異なるが、Q 点から下流 l_1 以内の位置(B、C から $2l_1$)までを目安としている。

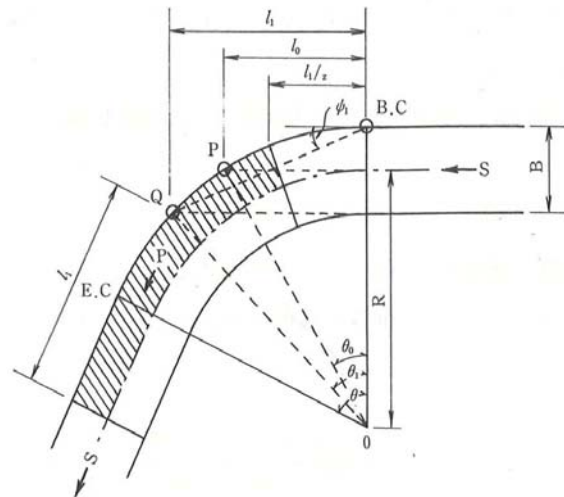


図-2 単曲線部の淵¹⁷⁾

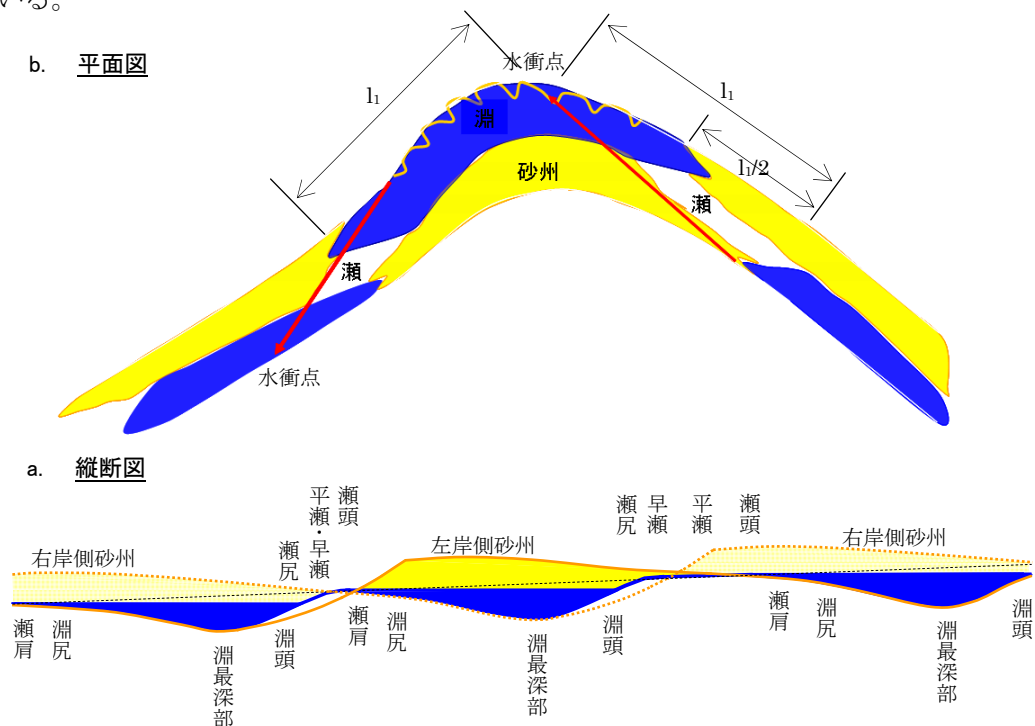


図-3 福留¹³⁾による千田¹⁷⁾の淵作図要領を参考に作成した瀬・淵・砂州の形状の概念図

コラム2：水衝部

河床・河岸形態に大きな影響を与えるのは洪水時の外力であり、その最も大きな力が加わるのは、曲線河道に発生する水衝部(図-4、5)や、水深・川幅比によって異なる砂州の形態から発生する水衝部(図-6)等である。

江戸時代の治水対策の要点を述べた“治ち河要録”⁴⁾では、『水制を設置する場合には、河岸に向かってくる洪水が岸に強く当たる地点を見極めること』が指摘されている。その洪水がやがて岸から離れる地点を見定めることも肝要である¹³⁾。

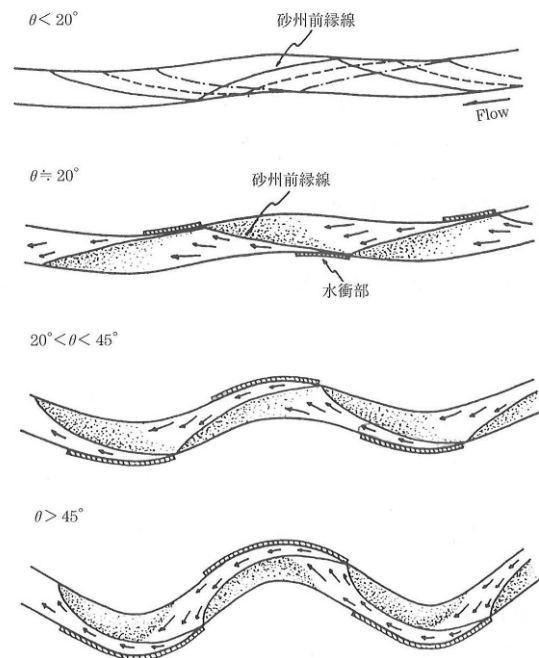


図-4 河道の曲り角と砂州形態との関係¹⁸⁾

※ θ : 湾曲角

1蛇行長に四つのプール

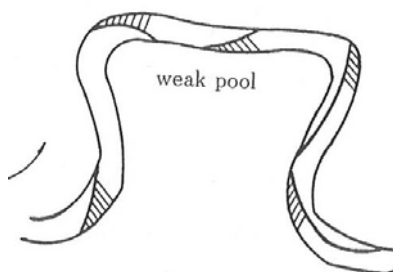


図-5 蛇行形状とプール¹⁶⁾

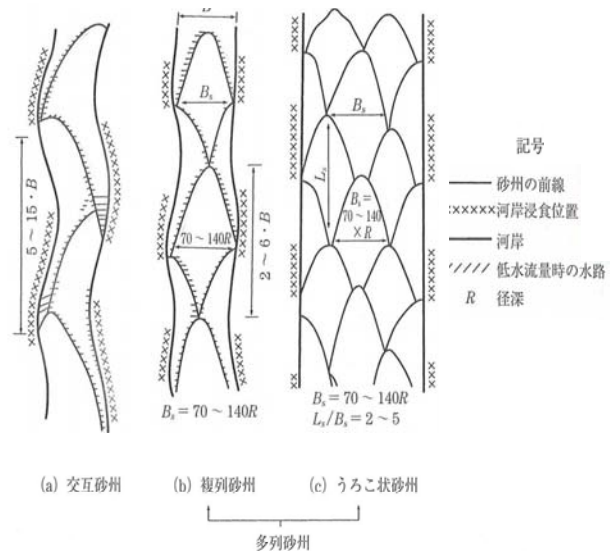


図-6 典型的な砂州のスケール¹⁶⁾

2-4 水制配置の考え方

水制の配置は、現状の「水と土砂の動き」をどうすべきかを解き、これを実現するためには、どこに、どのような機能をもつ水制が必要かを考えて決める。

【解説】

水制の配置は、「川成」などから読み取った「水と土砂の動き」を水制群によって、どうしたいのかを解くことが基本である。

湾曲河道での水制工の設置範囲は、洪水が岸に寄ってくる縮流区間と水衝点を過ぎて洪水が岸から離れるまでの区間に設置するのが妥当である¹³⁾。その区間や水衝点は、前項および図-7に示した千田¹⁷⁾の簡易作図法で求めた淵の範囲が参考（目安）になる。ただし、これは、河岸の線形や構造物の形状、砂州の移動や洪水の水位などにより変化するため、その範囲は現状や空中写真なども参考にして見定める必要がある。

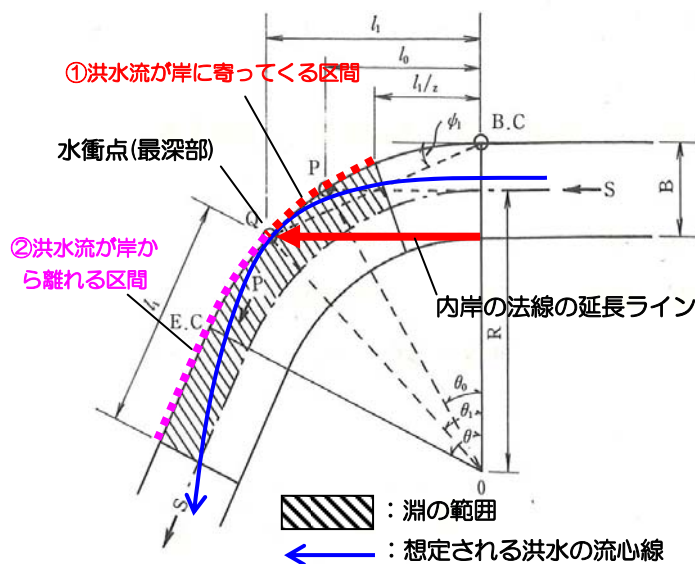


図-7 単曲線部の淵¹⁷⁾

1. 水衝点の特定

上流側河道の内岸の法線を延長したラインが岸に当たる位置が、「高水が最も強く当たり、河床を洗掘する地点（＝水衝点：最深部）」である。

2. 淵の範囲を推定

千田¹⁷⁾の簡易作図法

3. 設置範囲を設定

水制の設置範囲は、目的により異なるが、①洪水が岸に寄ってくる区間と、水衝点を過ぎて②洪水が岸から離れるまでの区間に設置することが基本である。

上記の設置区間内で、「水と土砂の動き」に応じて、必要な機能を有する水制を配置する。例えば、『洪水が岸に寄ってくる区間には、水制前面の河床を適度に洗掘させて淵を保全するタイプの水制を、洪水が岸から離れる区間には、瀬頭へ向けて徐々に流れを岸から離しながら水際に堆砂を促すタイプの水制を配置する』という具合である。

設置本数は、設計で意図した「水と土砂の動き」を実現するために必要な本数を、後述の水制長と水制間隔を踏まえて決める。

なお、直線河道に水制を設置する場合には、みお筋の流路は蛇行するものであるため、その蛇行特性や高水時の水衝部をよく検討して配置するのがよい。その水衝部区間の設定を誤ると、水制が土砂で埋没したり、あるいは下流端に設置した水制の下流側河岸が被災することがあるので慎重に検討する。

【事例紹介 2】水と土砂の動きを読んだ水制群の事例（高知県・仁淀川）

湾曲河道にできる淵の水衝部河岸の前面では、洪水の縮流が発生し河床を洗掘し始める辺りを淵頭として、水衝点辺りが淵最深部となり、水衝点を過ぎると洪水が河岸から徐々に離れ水深は漸次浅くなり淵尻に向かう。また、交互砂州形成河道では水衝部の対岸に砂州が形成される（図-7 参照）。

こうした湾曲河道で治水と環境の調和する対策を講じるには、下記の伝統的な水制群のはたらきが参考になる（写真-3～7 参照）。湾曲河道の水衝部に、半世紀を越えて堤防を護る水制の働きが報告されている¹³⁾。

淵頭～水衝点下流の河岸に設置された水制は、高水レベル高さの頭部が急勾配の角張った構造で、岸に寄る洪水を刳ねる構造である。水制長は淵頭～水衝点下流へと徐々に長くなり、洪水時にはこの頭部を結ぶラインで岸に寄る強い流れが岸から離されていく。また、この水制群の下流に続く河岸は、粗度の大きい自然に近い護岸で、洪水時にはその前面に緩やかな流れが形成されている。そして、水制頭部前面の河床は、淵頭～淵最深部～淵尻と移行した後、その滞筋は瀬を形成して、流向を対岸方向に転じている。

そこでは長期にわたり、淵とその上下流に鮎の産卵場となる瀬が保全されている。

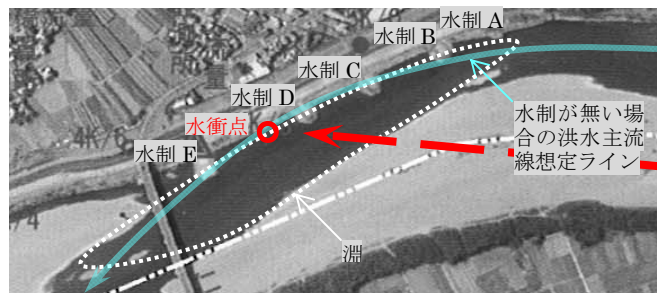


写真-3 高知県仁淀川中島地先¹³⁾

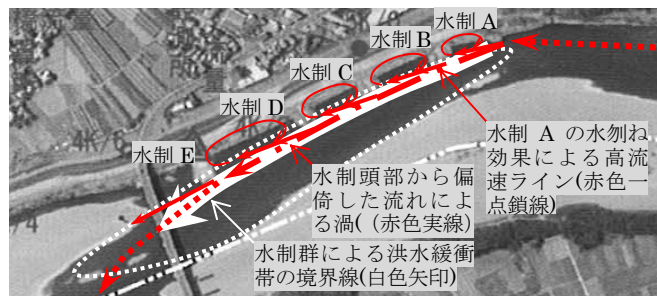


写真-4 同上。洪水を観察したときの水制周辺の流況図¹³⁾



写真-5 同上。水制 A～E を上流側から臨む¹³⁾

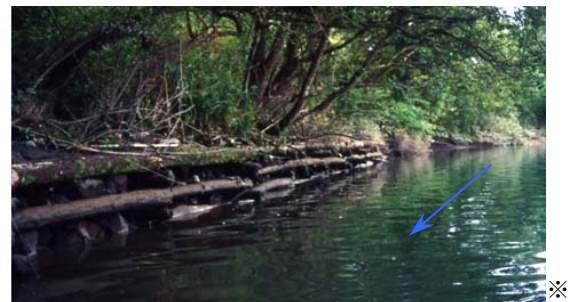


写真-6 同上。水制 E の下流側河岸



写真-7 同上。洪水時の水制 E 下流側の流況。流向は対岸に向かい、岸寄りの流速は緩やかである

コラム3：水衝部対策から河床形態の復元対策へ

福岡らは、大きな湾曲の外岸側で発生する洗掘対策として、国土交通省土木研究所の大型水理模型実験により、水制工の配置と洗掘深の軽減について次のように提案している^{19) 20)}。

洗掘が発生している大きな湾曲の外岸側に水制工を設置した場合、最大洗掘深の発生位置を河道中央寄りに移動させることができるが、それだけでは洗掘深を十分に軽減できない。湾曲部外岸側に発生する洗掘深を効果的に軽減させるためには、当該箇所の上流湾曲部内岸側と当該湾曲部外岸側に水制工を設置する必要がある。そうすれば、隣合う湾曲部の水制工が主流を制御し、当該洗掘箇所に向かう流れを緩やかにする。これは、河道法線形を緩やかに変更した場合と同等の効果を与えることができる。なお、上流湾曲部内岸側に水制工を、当該湾曲部外岸側に帯工を設置した場合においても、同様の効果が確認できる(図-8)。

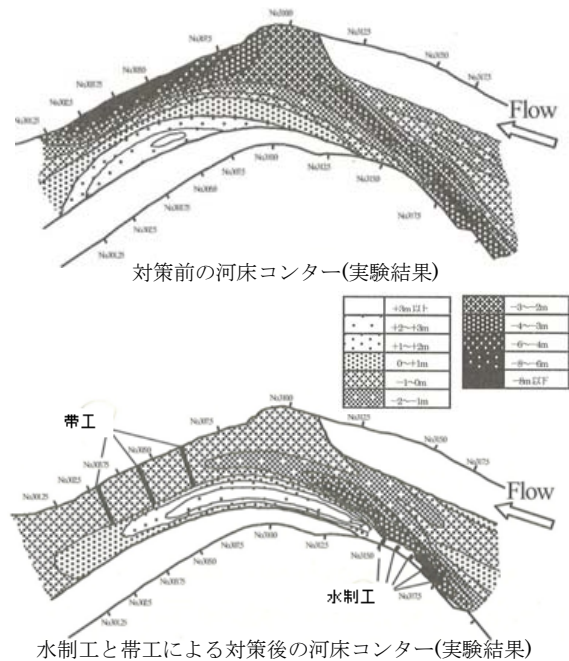


図-8 上流内岸側に水制を、下流外岸側に帯工を設置して洪水の流向を緩やかな曲線へと導いている^{19) 20)}

この対策は、湾曲部外岸側に設置する水制の先端部河床に、淵としてどれだけ大きな洗掘深を許容できるかに応じて、多様な活用が図れる¹³⁾。

図-9 は、スイスでの対策事例で、護岸の区間から水制の区間に移行する境界が水衝部になることを避ける対策として、水衝部護岸の川下に土砂の堆積を起こす上向きカギ型水制を配置する概念を示している。この対策にみられるカギ型水制の用い方は、湾曲部内岸側に形成される砂州の堆砂や攪乱の環境をコントロールすることへの参考となる。



図-9 護岸から水制に移行していくシステム²⁾

上記の二つの事例は、改修によって失われた淵・瀬・砂州の河床形態を、安全を確保しつつ自然に近く復元する対策工法としても応用できるであろう。

2-5 長さの間隔の考え方

水制の長さは、川幅の 10%以下で、現地の自然景観に調和するよう短めに計画することを基本とする。

水制の長さの間隔は、^{へんい}偏位流によって河岸が侵食されないように、流れの偏位ラインが岸から $L/3$ 程度のところで水制軸と交わるように決定する

【解説】

●長さの決定

既往の調査⁷⁾によれば、現在全国の河川に配置されている水制の長さ L は設置地点の川幅 B の 10% 以下のものが最も多く、25% を越して設置されることは非常に少ないことが報告されている。このように、日本での水制長は川幅の 10% 以下が大半であり、経験的にこの程度が対岸へ影響を与えない限度になるのではないかとと思われる。しかし、対岸の砂州を侵食させることを意図する場合などでは、10% 以上にすることがある。

水制の長さは川幅の 10% 以下で、現地の自然景観に調和するよう短めに計画し、完成後の効果を見ながら必要に応じて継ぎ足しなどを行うことを基本とする。このときの川幅 B は、複断面河道の低水路に設ける水制については低水路幅とし、比較的単一断面の河道に設けるもの、または、水制高が高く川幅全体に対して作用する水制に対しては全川幅とする（図-10）。

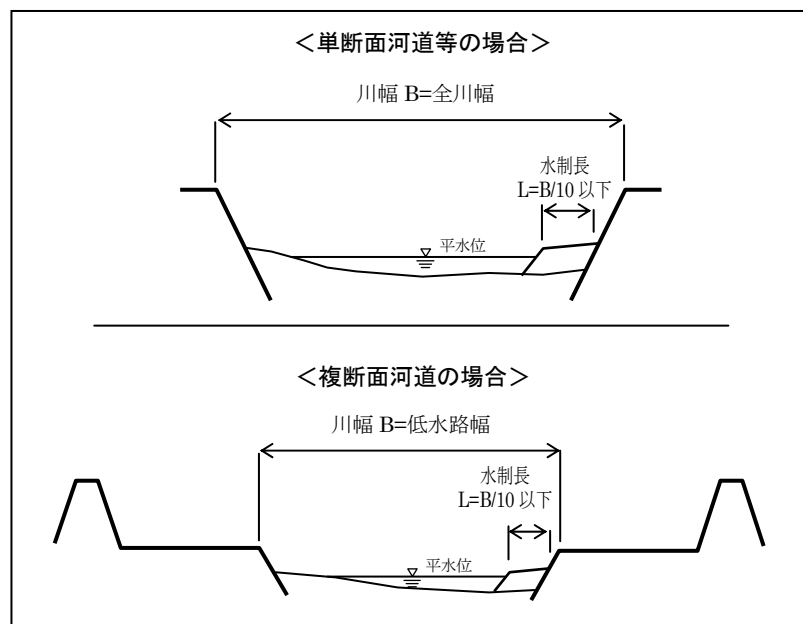


図-10 水制長の考え方

●間隔の決定

水制先端部を通り過ぎた流れの流線は、主流線に対して約 6° の角度（入射角）で水制域内に偏位^{へんい}することが実験により確かめられている（図-11）。偏位した流れの流線は、主流線の流向が河岸に平行であれば、水制長 L の約 9.5 倍の距離で河岸に到達する。

そのため、低水水制の間隔は、偏位流によって河岸が侵食されないように、流れの偏位ラインが岸から $L/3$ 程度のところで水制軸と交わるように決定するのがよい（図-12）。

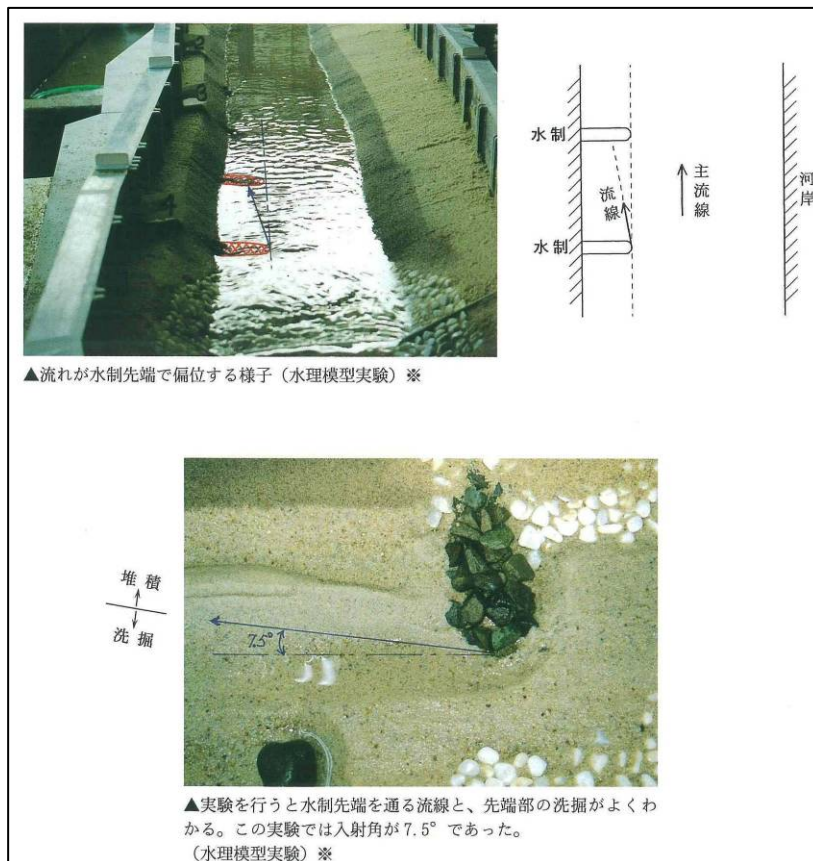


図-11 水制周りの流況を確認する実験

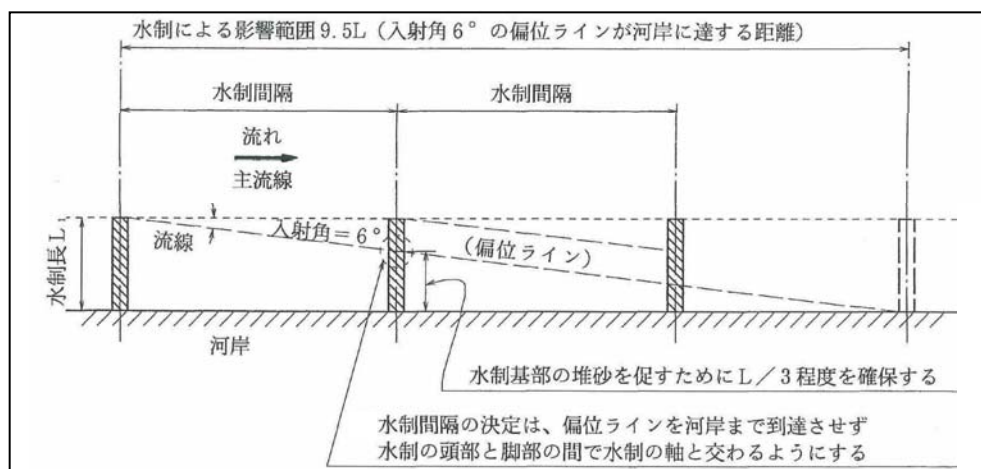


図-12 主流線が河岸に平行な場合の水制間隔の考え方

一方、水衝部のように主流線が河岸に向って進入する場所に設置する水制群が同様の働きをするためには、水制間隔を直線河道よりも短くする必要がある(図-13)。湾曲角の大きい河道ではその進入角度も大きくなり、水制同士が接近し過ぎて非合理的な構造となるため、水制群の最上流に水刎ねタイプの水制を配置して主流線の河岸に向う角度を小さくするなどの工夫をすることがある(前述の【事例紹介 2】参照)。また、主流線の流向は、一連の水制群の中でも個々の水制で異なることから、水制の長さで間隔を決定する場合には、平面図上で作図して決定することを勧める。

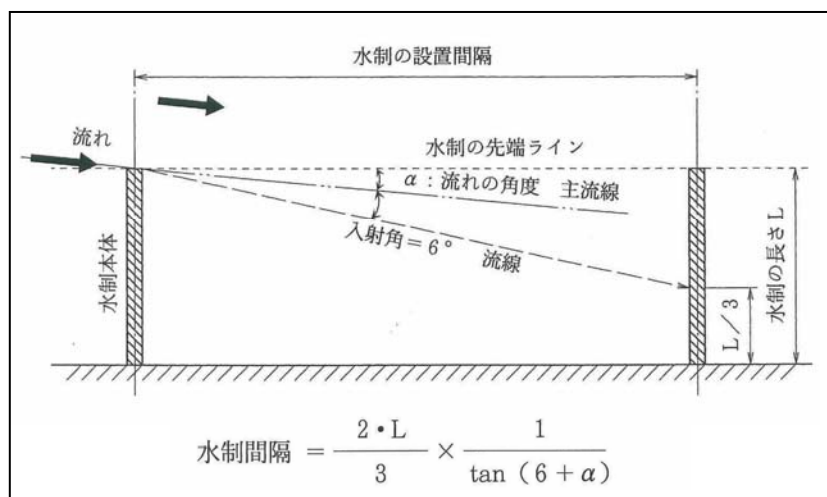


図-13 主流線が河岸に進入する場合の水制間隔の考え方

水制の長さで間隔の検討にあたっては、洪水時の河岸に対する流向をよく把握したうえで決定しなければならない。その流向は河道の湾曲角や、対岸の地形による流れの反射、あるいは滞筋の蛇行などの多様な要素が複合的に作用することから、現場毎に慎重な検討が必要である。

【事例紹介 3】 あえて水制間隔を長くして土砂の非堆積域を形成した水制事例(球磨川)



熊本県球磨川。災害復旧で護岸前面の河床を安定させる水制群。一部の区間の水制間隔を長くかつ根固めを施して土砂の非堆積域を形成した。左写真は工事完了後。右写真はその7年後。

コラム 4 : 水制工の既往研究

水制工の代表的な設計諸元として、水制工の高さ H_z 、長さ ℓ_n 、間隔 ℓ_s がある。本書では、これらの諸元を決める際の基本的な考え方を示しているが、決定にあたっては以下に紹介する既往研究の成果も参考にするとよい。

＜秋草ら⁷⁾による研究成果＞

秋草ら⁷⁾は、事例調査に基づく統計的研究を行っている。これによる水制工の代表的な諸元は、表-1 に示す通りである。

表-1 秋草ら⁷⁾の統計的研究による水制工諸元

水制高さ 水 深	大部分が 0.1～0.4 の範囲にあり, 0.5 以上はほとんどない.
水制長 川 幅	0.1 以下が大部分であり, 0.2 以上は非常に少ない.
水制間隔 水制長	大部分が 1～4 の範囲にある.

＜福岡ら²¹⁾による研究成果＞

福岡ら²¹⁾は、水制周りの洗掘状況、および湾曲部での水制効果を準三次元解析モデルを用いて検討し、湾曲部外岸側に発生する洗掘深を小さくする水制工の諸元は、 B を川幅、 h_a を設計水深として、次の条件を満足することが望ましいことを示している。

$$\left. \begin{array}{l} \ell_n/B \leq 0.2 \\ \ell_s/\ell_n = 2.0 \sim 3.0 \\ H_z/h_a = 0.1 \sim 0.4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

福岡ら²¹⁾が解析的に求めた式(1)は、秋草ら⁷⁾が統計的に求めた値(表-1)に含まれる。式(1)から、水制工の諸元は川幅と設計水深によって決定される(川幅は図-10 参照)。設計水深は、計画高水流量規模を設計水深とすると、水制工の高さが高くなり、低水路満杯流量規模では水制工は非越流型となる。そのため、設計水深は越流型水制では低水路満杯流量洪水時の水深に設定する。

なお、上記の福岡ら²¹⁾の研究に関して、非越流型水制(高水時に水没しない高さの水制)については、この計算条件の対象外と考えてよい。

2-6 高さ・形の考え方

水制の高さと形は、水制群全体として「水と土砂の動き」をどうするかを念頭において、個々の水制に求める「機能」に応じて決める。

【解説】

江戸時代に編纂された「川除仕様帳」⁵⁾では、治水目的の石出しの構造について以下のように示している。

川除仕様帳⁵⁾ より意識して抜粋

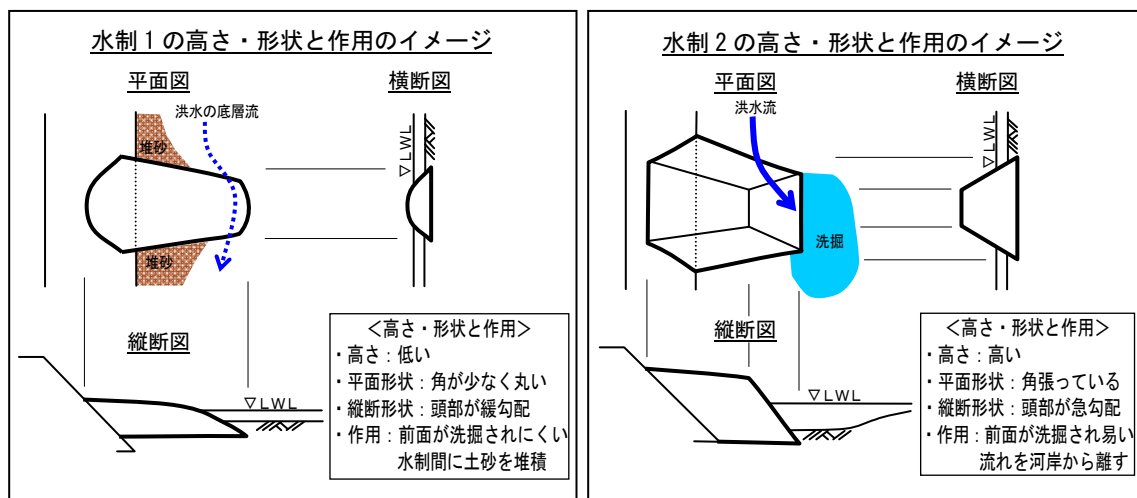
川底を平らにして川筋をなおすことで、低い水制により洪水の低層流を落ち着かせ、水面近くの水勢を殺いで流れを穏やかにすれば、堤防の上下流に石や砂がたまり、深く掘れたところも埋まってくる。

また、川の流れが岸を離れないよう、あるいは対岸側にある流れをこちら側に変えたいとき、高く大きく角を強くした水制を設置すれば、大水の時これに水が強く当たり岸を掘りたてるので、いずれ川の流れは寄り付く。

この文章は、次の二種類の水制についての記述であろう。

水制 1：河岸を根固め効果により間接的に保護する低水水制は、低層流を落ち着かせ河床を乱さない抵抗の少ない構造、つまり頭部を緩やかに河床に馴染ませ、角の少ない丸みのある形状とする(下図左)。この水制は前面の河床は洗掘されず、水制間に土砂を堆積させる。

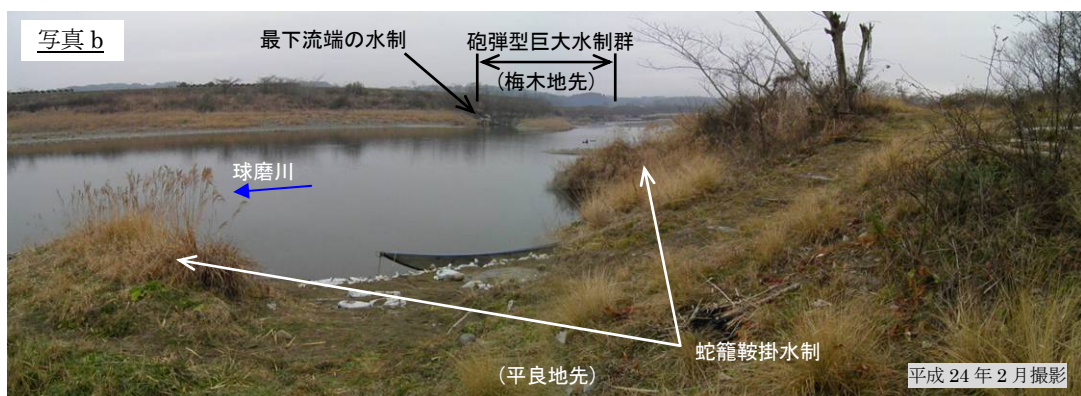
水制 2：水制頭部で水をはね、護岸や堤防の洪水水面の水勢を和らげる越流型高水水制は、頭部勾配を立てて角張った構造とする(下図右)。この水制は前面の河床を洗掘する。



このように、水制はその高さ・形によって、果たす機能が異なる。

例えば、上記の二つの水制を応用すれば、頭部形状を立てて角張らせた低水水制を水衝部の縮流区間（：淵頭付近～水衝点の区間）に配置すると、河岸下部の侵食を抑制しながら水制前面の河床を適度に洗掘させて淵の水深を確保することなどが期待できる。こうした伝統的な水制工で用いられてきた高水水制と低水水制の高さや形の組み合わせを、治水と環境に調和する対策工としてうまく応用することで、瀬から淵、そしてその淵尻からまた下流の瀬へと連続する自然に近い河床・河岸の環境形成を促すことができよう。

【事例紹介 4】 対岸へ向かう流れを引き寄せる水制群（球磨川）



球磨川中流域。S 字型蛇行の河道上下流で、左右岸の被災した水衝部にそれぞれ異なるタイプの水制が設置された。上流側右岸(梅木地先)に設置した巨大水制群(写真 a)は、対岸(平良地先)に向かう洪水の流向を下流側に引き寄せ、前面に堆積した寄り州を押し流している様子がみられる(平成 24 年 2 月時点)。平良地先に設置した蛇籠鞍掛水制は、15 年間土砂に埋没したままである(写真 b)。

2-7 どの方向へ向けるか

護岸基礎部の洗掘防止や水制域に反転流を形成させる越流水制の方向は、原則として「上向き」または「直角方向」とする。

これ以外の目的の水制などでは、水制の向きと流れに対する作用との関係を理解し、河岸への影響等を十分に検討した上で決定するとよい。

【解説】

水制の中心軸の方向（以下、「水制の方向」）は、流れの方向（または河岸の包絡線）に対して上向き、直角、下向きがある。水制を越流した水は、その重力に従い、水制の方向に対して直角に向けられる。そのため、水制の下流側での流向や河床の洗掘と堆積に対し、それぞれ異なる影響を及ぼす(図-14)。

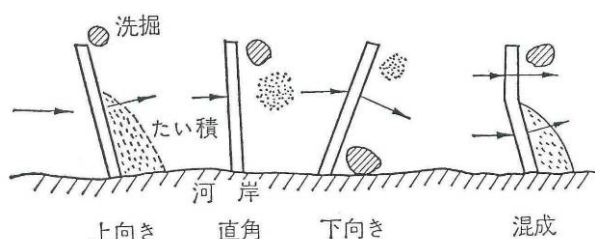


図-14 水制の方向と堆積・洗掘の場所 ²²⁾

したがって、護岸基礎部の洗掘防止や水制域に反転流を形成させる越流水制は、上向きまたは直角方向を原則とする。また、設置箇所による上向き水制の角度の目安を図-15に示した。

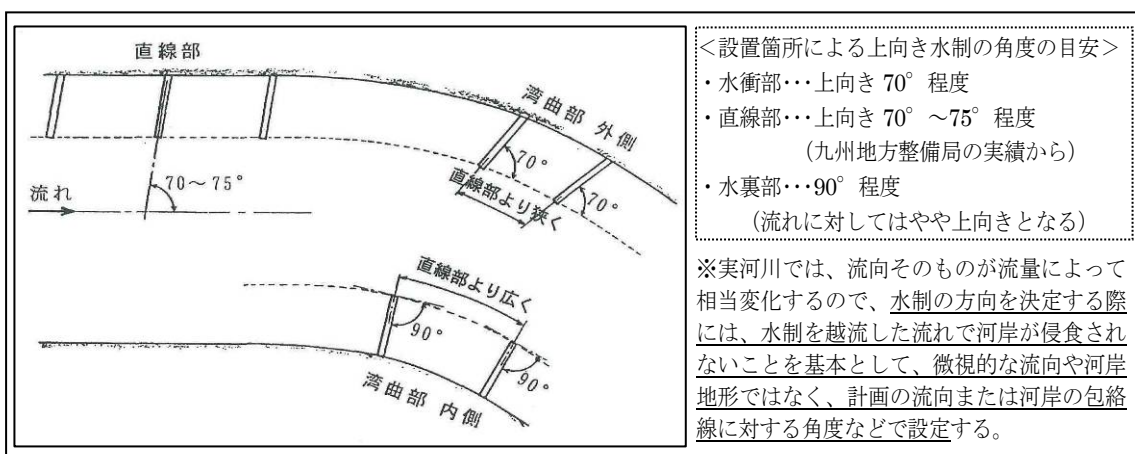


図-15 設置箇所による上向き水制の角度の目安

下向きの越流水制は、洪水時の流れを河岸に向けるので一般には用いられないが、目的によってその原則を逆に応用する下記のような例もある。採用するに当たっては、いずれも原則を理解した上で、配置場所や河岸保護について十分検討しておく必要がある。

- ・ 水制の下流側で河岸前面に淵をつくる目的には、河岸の防護対策を講じたうえで下向水制を用いると有効である。
- ・ 湾曲角の大きい河道の水衝部で、上流側内岸の湾曲起点部に直角～下向水制を用いると、外岸側に向かう流れの角度を小さくすることができる(前述の「コラム3」参照)
- ・ 湾曲角の大きい河道の水衝部で、水制群の最上流の水制を下向水制とすれば、上流から岸に向かう洪水流を強くはねて、岸に沿う方向の流れを形成できる(前述の【事例紹介2】参照)

2-8 平面形状をどうするか

水制の平面形状は、河道状況や水制群における個々の水制に求められる「機能」に応じて、使い分ける。

【解説】

水制の平面形状は直線形が多いが、河道状況や水制の設置目的によっては、屈折水制やカギ型水制等が有効である（図-16、図-19）。

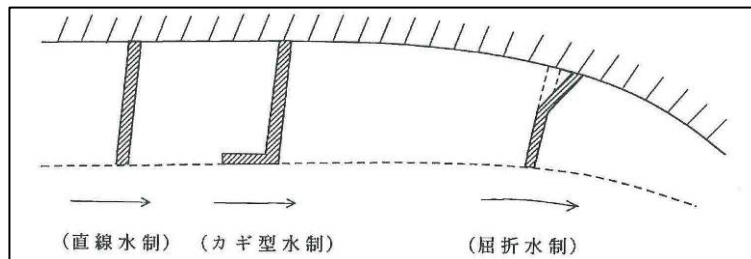


図-16 水制の平面形状

●直線水制

最も一般的な形状で、低水水制のほとんどがこのタイプである。越流した水の流向を水制の方向に対して直角方向に誘導して、土砂の侵食と堆積をコントロールする。

●屈折水制（図-17）

屈折水制は、河道の湾曲角が大きい箇所では流向を変えるのに有効である¹⁾。

① 根部を下流側に折った屈折水制

洪水の流線が水制下流で河岸に近づく場合、水制根部（つけ根）を下流側に折り、増水時に脚部を越流した水の流れを河岸から遠ざけて、河岸の侵食を防止する効果がある。

② 根部を上流側に折った屈折水制

洪水の流線が水制下流で河岸から遠ざかる場合、水制根部（つけ根）を上流側に折ることによって、出水時に脚部を越流した洪水流を河岸に寄せて、土砂堆積を防止する効果がある。

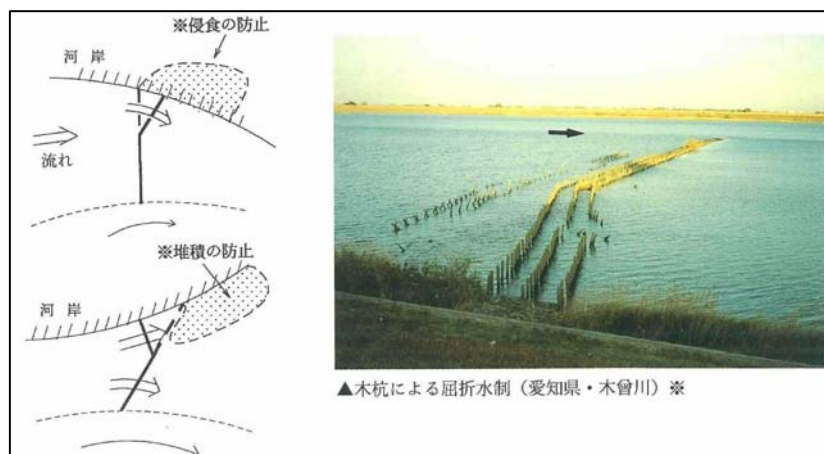


図-17 屈折水制

●カギ型水制（図-18）

カギ型水制は、水制の先端部にカギを付けることにより、水制域内の流れと土砂の洗掘、堆積をある程度制御することができる²⁾。

① 上向きカギ型水制

水衝部などに設けた水制間に土砂堆積がうまく進まない場合、上流向きにカギをつけた水制が有効である。また、水制間にワンドを形成し、ビオトープを創出したい場合にも効果的である。

② 下向きカギ型水制

下流向きのカギをつけた水制は、水制域内への土砂堆積を抑制し、ある程度の水深を維持する効果がある。また、魚の生息環境に重点をおいて保全する場合に効果的である。

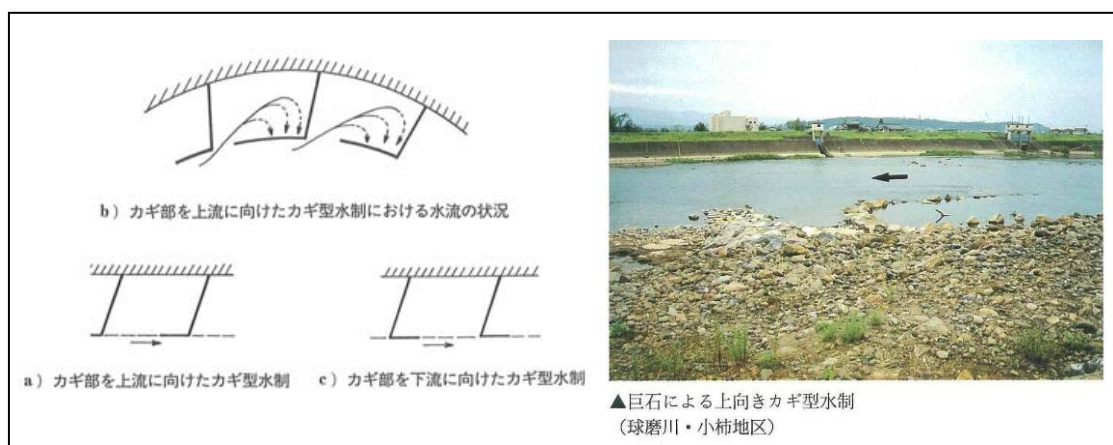


図-18 カギ型水制
(左図はイヴァン・ニキティン²⁾より転写)

●水刎ね水制（図-19）

湾曲角の大きい水衝部で、縮流の発生する辺りの河岸に不透過の短い水制(河岸に対し直角～下向)を出し、岸に強く当たる流水を、岸に平行な流れに変えさせることができる。

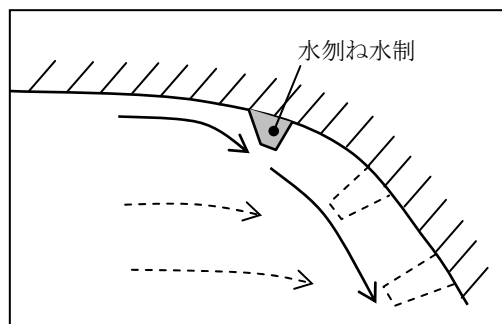


図-19 水刎ね水制



写真-8 水刎ね水制（高知県仁淀川）

【事例紹介 2】の水制 A が上写真と同じ水刎ね水制である

Point ! 水刎ね水制の形状の特徴は、水制上流側の稜線の方角を流向または河岸に対して下向きとする

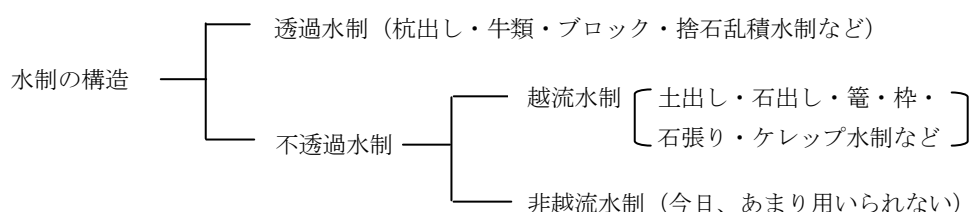
注：本書で用いる「水刎ね水制」とは上述の働きをする水制のことであり、一般に用いられている個々の水制が河心方向へ流れを寄せるという意味での「水刎ね(効果)」とは定義が異なる。

2-9 「透過」か、「不透過」か

水制の種類について、透過水制と不透過水制では、治水や生態系への改善効果が異なるため、目的に応じて使い分ける。

【解説】

水制を構造から分類すると「透過」と、「不透過」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。また透過でも、構造本体を流水がゆっくりと通過する半透過が含まれる。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改善効果が異なるので、目的に応じて使い分けるとよい。



●透過水制

主に河床が大粒径の石礫で構成されない緩流の河川で、木材を使った杭出しの透過水制が多く用いられる。これらの水制には、杭による流速低減効果とその土砂沈殿作用がある。大粒径の石礫河川で河床に杭が打てない場合には、古来、伝統的に牛類が使われてきている（図-20（a））。

水制間には通常砂泥の堆積は少なく礫底となることが多い。そのため、水生昆虫などの底生動物の多様性は細砂から礫まで多彩な河床材が堆積する不透過の水制工に比べて低い。しかし、水制の杭間等の水域は、主に緩流性魚類の生息空間となるほか、異形ブロックや自然石を用いた場合は、その間隙が穴居性動物^{けっきょせい}の生息空間となる。

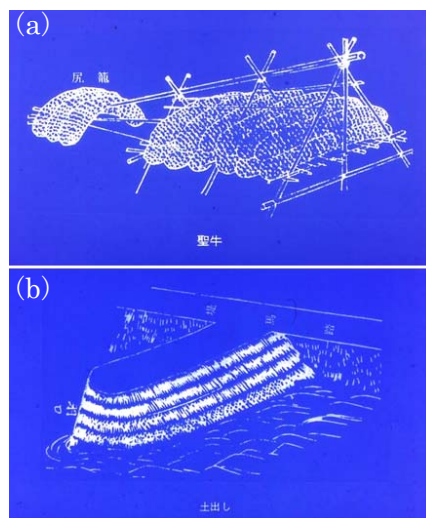


図-20 伝統工法の「牛」(a) と「土出し」(b)

●不透過水制

大粒径の河床材料を含む急流の石礫河川では、現地発生の大石や石礫を使った石出し水制が多く用いられる（写真-9）。また緩流の砂・泥河川には土出しの水制が見られる（図-20（b））。

水制間には、細砂から礫までが流速の強さによって水平分布するようになることから、多様な底生動物が生息可能となる。また、水制周辺では、流速や水深が大きく変化するため、生息する魚類の多様化にも寄与する。



写真-9 ドイツ・イザール川の石出し水制 ※

3. 水制の設計（構造の細部をデザインする）

3-1 材料に何をを使うか

水制の材料選定にあたっては、構造物の外力に対する安定性を確保できることを前提とし、現地条件やその川の歴史的・文化的な景観に配慮しながら、より効果的に機能させる材料を検討する。

【解説】

古来、水制工の構造は多様である。建設機械や材料が近代化された今日の水制工では、生態系の保全・復元や歴史的・文化的な景観への配慮という新しい要望にも応えることを考えれば、治水条件を犯さないことを条件に、伝統的な構造にこだわらず、より効果的に機能させる材料の選定と組み合わせが考えられる。

□材料の選定条件

- ・現地調達できることが、周囲の景観に調和する観点からも、最も好ましい
- ・屈撓性があり地形の変化に順応すること
- ・施工が容易で、被災時の補修などに対応できること
- ・構造が魚類や穴居性動物、水生昆虫などの多様な生息空間となり得ること

□材料の例

- ・自然石（野石、割り石、玉石など）
- ・植物（木杭、生木、芝など）
- ・鉄線（布団カゴ、蛇カゴなど）
- ・異形ブロック
- ・その他、これらのコンビネーション



表-2 低水水制のタイプと材料

おおよその適地 ○：適する △：場合によっては適する

セグメント（河川形態）			低 水 水 制 の 種 類 と 材 料											備 考	
区分	設置場所	水際の 状 態	水 制 の 形	透過・半透過型水制					不 透 過 型 水 制						
				聖牛	杭	ブロック	空石	練り石	竜類	棒類	空石	土出し	ブロック		
上流	水衝部	露 岩	岩盤・巨石のように仕上げる	—	—	—	—	○	—	—	△	—	△	岩盤が出ているところでは、通常は必要なし 上向き水制として、下流側に砂礫を堆積させる 透過水制も土砂の堆積で不透過になる可能性が大 岩盤が出ているところでは、通常は必要なし 局所洗掘に注意する 基礎を十分に入れる 上向きとして、水制間に土砂の堆積をおこす 横断勾配を少し変化させ、長さに変化をつける 不等沈下に注意する 屈とう性のあるタイプとすること 透過型でも堆積で不透過になることがある 下流側にカギをつけてワンドが埋まるのを防ぐ 通常は堆積場所であるので、必要としない 浸食を受けた場合の対策なら、埋め込み型とする 水制だけでなく、ワンドも埋まる可能性がある 流下土砂量に注意する	
	直線部	砂 礫	短かい標準的なタイプ 水制長を変化させる	○ 高水用	△	△	△	○	○	△	○	—	○		
	水裏部	砂 礫	標準的なタイプで、 水制長を変化させる	○ 高水用	△	△	△	○	○	△	○	—	○		
中流	水衝部	露 岩	岩盤・巨石のように仕上げる	—	—	△	△	○	△	△	○	—	○	岩盤が出ているところでは、通常は必要なし 局所洗掘に注意する 基礎を十分にに入れる 上向きとして、水制間に土砂の堆積をおこす 横断勾配を少し変化させ、長さに変化をつける 不等沈下に注意する 屈とう性のあるタイプとすること 透過型でも堆積で不透過になることがある 下流側にカギをつけてワンドが埋まるのを防ぐ 通常は堆積場所であるので、必要としない 浸食を受けた場合の対策なら、埋め込み型とする 水制だけでなく、ワンドも埋まる可能性がある 流下土砂量に注意する	
		砂 礫	短かい標準的なタイプ 水制長を変化させる	△ 高水用	△	△	△	△	△	○	○	—	○		
	直線部	砂 礫	中程度で、先端を水中に入れる	△ 高水用	—	—	—	△	○	○	○	△	○		
		砂 泥	中程度で、地形（横断面）に近い形	—	○	△	△	△	○	○	○	△	○		
		ワンド	低くて、長いもの 植物を生育させる	—	△	△	△	△	○	○	○	△	○		
	水裏部	砂 礫 砂 泥	低くて長いもの	—	△	△	△	△	○	○	○	○	○		
		ワンド	低くて、長いもの 植物を生育させる	—	△	△	△	△	○	○	○	○	○		
下流	水衝部	砂 礫	水面幅に応じて中～長いもの	—	○	△	△	—	△	○	○	△	○	ブロックと石の透過型は、穴が埋まる可能性がある 竜類は塩分に注意する ブロックの表面が見えないように、被覆する 周辺の状況に応じて、覆土・植栽を行う 低水路の固定に有効	
	直線部	砂 泥	水面幅に応じて中～長いもの	—	○	△	△	—	△	○	○	○	○		
	水裏部	ワンド	水面程度の高さで、 植物を生育させる	—	○	△	△	—	△	○	○	○	○		

ブロック：透過水制には異形ブロックの乱積み、不透水制には異形ブロックと石の併用または方形ブロック等をしめす
魚介類の生息のためには、異形ブロックの乱積み、大きな石による空石積みが良い



写真-10 鉄線には籠マット、蛇籠、ダルマ籠などの製品がある（熊本県球磨川）



写真-11 土出しの水制で、頭部に置石と丸太の乱杭を配置した事例（福岡県遠賀川）



写真-12 異形ブロックの基礎は、屈撓性や安定性に富む組み方もできる（熊本県迫間川）

3-2 縦断勾配をどうするか

水制胴部の縦断勾配は、河心に向かって $1/10 \sim 1/100$ 程度の下り勾配とすることを基本とする。

水制頭部の縦断勾配は、急勾配であるほど水制前面の河床を洗掘することなどを考慮して、流水に対する構造の安定を確保することを前提に、目的に応じて使い分ける。

【解説】

■水制胴部の縦断勾配

水制胴部の縦断勾配は、「河川砂防技術基準(案)」では「河心に向かって $1/20 \sim 1/100$ 程度の下り勾配をつけるのが一般的である」としている。その考え方は、秋草ら⁷⁾の研究から、概ね以下のよう
に解釈できる。

秋草ら⁷⁾による統計的研究より抜粋

- ・水制は流水を押し出し河心に集めることにも重要な意味があり、水制自身に縦断勾配をもたせ、河岸側を高く流水への抵抗を大きくして流心を河岸より離すようにされる。また、河心に近いほど流勢が激しく破壊力が大きいので、水制自体の維持のためにも流心側を低く抵抗を小さくする。
- ・勾配(i)は、総例数中半数以上が $i=1/10 \sim 1/100$ で、中でも $1/10 \sim 1/50$ のものが非常に多い。
- ・急流河川では比較的 i が大きい(写真-13 参照)。緩流河川では水平と i の大きいものの両方が存在するが、水平のものは急流河川ではほとんど使用されていない。

以上のような水制に縦断勾配を付ける理由や統計データを理解したうえで、水制胴部の縦断勾配は河心に向かって $1/10 \sim 1/100$ 程度の下り勾配とすることを基本とする。

縦断勾配の検討時には、流水に対する水制の抵抗をむやみに大きくしないよう、また水制の規模が過大にならないように配慮しながら、現地の河岸形状(水衝部=急、水裏部=緩など)に合わせることや、急流河川と緩流河川、緩流河川でも水衝部の区間で流況の異なる上流部と下流部など、現場条件や設計の意図に応じて使い分ける(写真-13、写真-14)。



写真-13 スイスアルプス麓の渓谷に設置された胴部を短く頭部を低くした高水水制



写真-14 急流河道に設置された胴部を長く頭部を高くした高水水制の崩落した先端部

■水制頭部の縦断勾配

伝統工法⁵⁾では、水制頭部の縦断勾配に関して次のように説かれている。

川除仕様帳⁵⁾ より意識して抜粋

治水の基本は河床を荒立てないことで、水制は頭部勾配を緩くすること、例外的に対岸の流れを引き寄せたいときは頭部を立てると良い。

水制頭部の縦断勾配は、急勾配（1割程度）であるほど流水を荒立てて前面の河床を洗掘する。
反対に緩勾配（2割以下）であるほど前面河床への作用は少なくなることから、流水に対する構造の安定を確保することを前提に、目的に応じて使い分ける。

例えば、『水衝部の上流部などで水制頭部の前面に淵を形成したい場合には、根入れを十分に深くした上で1割程度の角張った構造とし、水衝点を過ぎた下流側では2割よりも緩く丸みのある構造とする』ことを推奨する（図-21）。

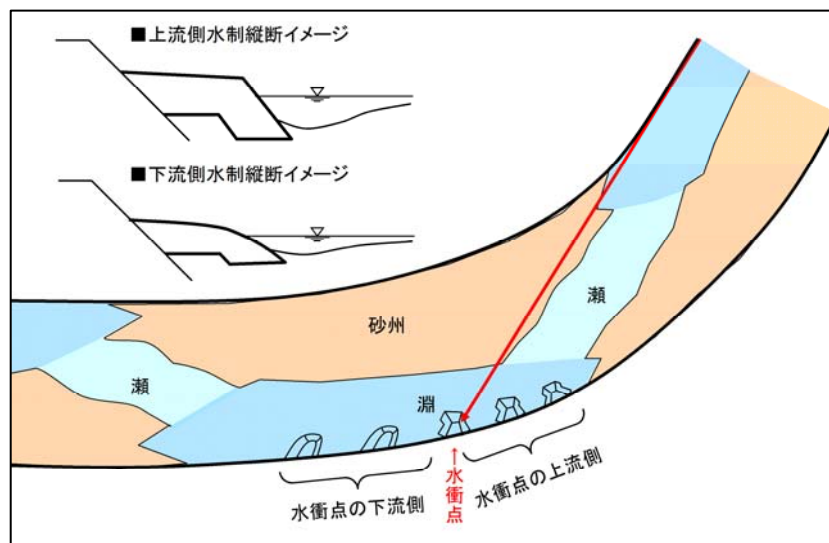


図-21 淵を形成したい場合の水制工の配置・形状の概念図

ただし、水制頭部の構造をいくら工夫しても、設置場所を間違っている場合は、ねらった効果が発現しない。過去の事例のなかには、水制群全体が土砂に埋没してしまう例も多く見られる。

また、水制は設置場所により働きが異なる。例えば、水刎ね水制は、流水の岸に寄る角度が鈍角であれば短くても効果を発揮するが、岸に平行または離れていく流れには、さほど効果を発揮しない。さらに、長すぎると水をはねず、かえって水制下流側に巻き付くこととなる。

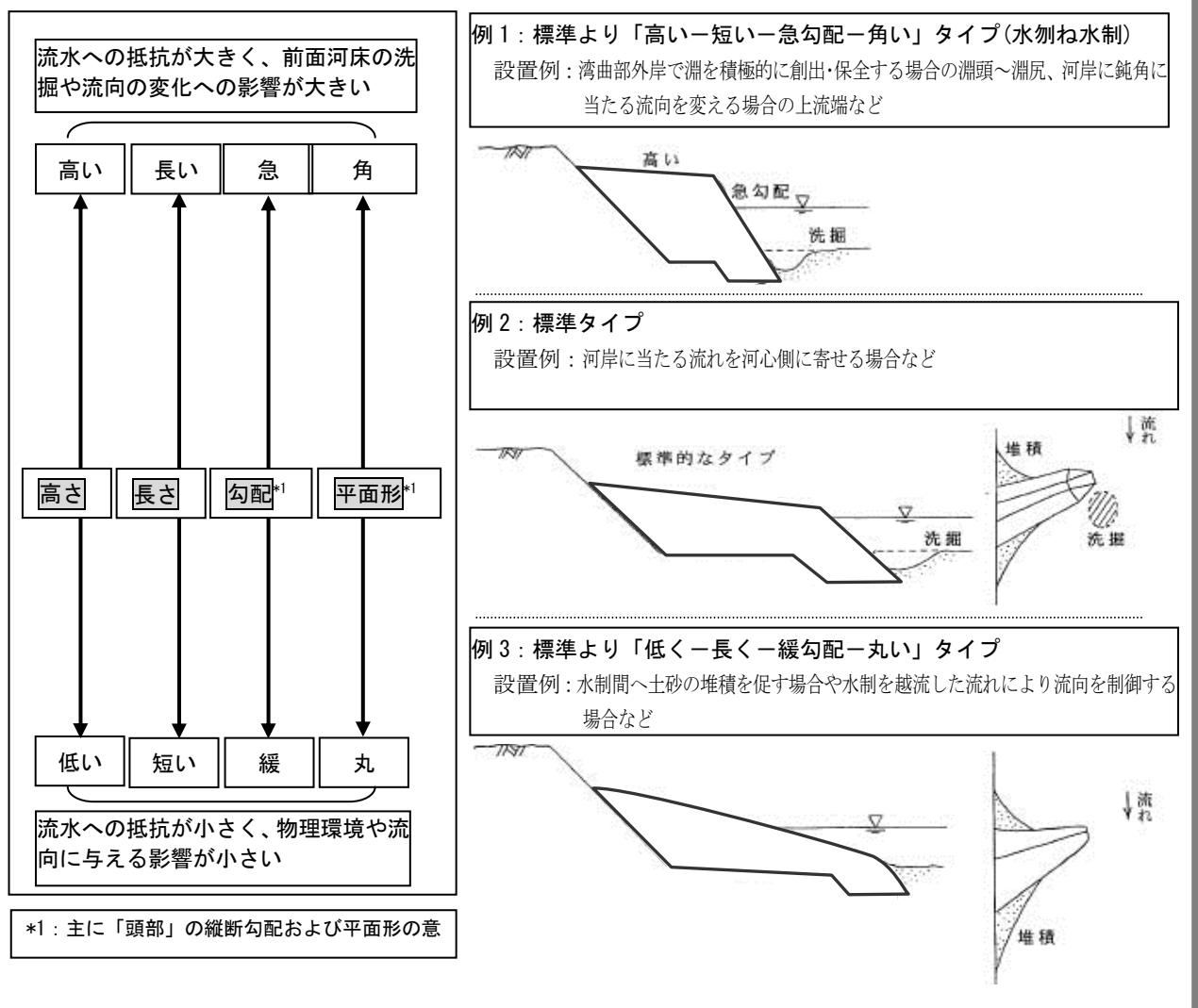
このように、個々の水制の形状を検討する時には、その前作業として、前述の「川成」から“水と土砂の動き”を読んで水制の配置を決めておくことが重要である。

コラム5：水制の形状と物理環境の変化の傾向を知る

個々の水制の高さや形の決定にあたり重要なことは、水制が持つ物理的な働きと自然環境に対する効果を正しく理解し、実際の計画・設計に反映させていくことである。水制の高さや形は、流水や河床への作用と密接に関係している。これを適切に設定することで、治水と環境の調和を目指す「多自然川づくり」の様々な課題に応用できる可能性がある。

下記に水制の高さや形とその作用との関係を示したが、これはあくまで基本的な傾向を示すものである。実際にはその場所の川成・水の流れ・土砂の動きを読み、これに応じた水制(群)を検討する必要がある。

□水制の形状と物理環境の変化（基本的な傾向）



3-3 頭部の根入れ深さをどうするか

水制頭部の根入れ深さは、施工箇所の堆積・侵食傾向や、設置する水制の目的に応じ
て適宜決定する。

【解説】

河川構造物の破壊は、基礎部の洗掘によって引き起こされるものが多く、水制の設計でも根入れ深さは重要な検討事項である。石出し水制の場合は、洗掘に対応できるように河床へ0.5m～1.5m程度の根入れを行っている事例が多いが、施工箇所の堆積・洗掘傾向をみて適宜決定する。

水制と護岸では根入れの概念が異なる。水制工の治水上の役割は背後の河岸（護岸）や堤防を護ることにある。それゆえ、不慮の外力を受けた際には、河床洗掘に対して根石が流失せず沈下することで、水制の胴部～根部が保たれていればよい（写真-15）。このとき、水制頭部が特に強い外力を受ける。このことに配慮して、水制工では、単体でも流出しない大きさの石材（以下、力石^{ちからいし}）を頭部の隅角部の根石に配置して（写真-16）、あるいは噛み合わせのよい異形ブロックを配置し（写真-17）、これが沈下すれば上置き、腹付けをするように維持管理すればよい。

なお、参考までに洪水時における一般的な洗掘深の目安を表-3に示した。



写真-15 2000年の東海豪雨で河岸堤防を護った矢作川の水制群¹³⁾。上流側の水制は頭部が河床に沈下して胴部を維持し、下流側の水制は完全に全形を保った



写真-16 頭部の隅角に力石を配置している



写真-17 異形ブロックを基礎にしている

表-3 一時的洗掘深（m）の目安²³⁾

平均流速 河床構成材料	3 m/s以上	3～2 m/s	2 m/s未満
礫以上の粒径	1.0	0.5	—
砂利程度の粒径	1.5	1.0	0.5
細砂利程度の粒径	—	1.5	1.0

3-4 横断形をどうするか

水制の横断面の勾配は、上流側は 1:1～1:2 程度、下流側は上下流対称または上流側よりも緩い勾配とすることを基本とする。また、水制根部では頭部よりも緩やかな勾配で河岸に擦りつけるとよい。

【解説】

水制の横断面形状は、上流からの流れを水制胴部の上流側面で受けて、その後の流れの方向を定める働きをする。そのため、受け止めた流れが激しく乱れるほど急に堰き止めず、また大きな凹凸を設けない勾配側面がよい。

水制の下流側側面は、頭部や胴部の構造を支える安定した法面勾配で、洪水時に緩やかな流速の水域を形成し、魚類の避難場所となる。平常時には稚仔魚や穴居性動物の生息場となり、あるいは人々の親水空間とすることができるため、多様なデザインの工夫が施されてもよい場所である。

湾曲河道の縮流域河岸(淵頭～水衝点)とそれより下流に設置する水制では、横断形状を以下のように変化させることは可能である (図-22)。

水制胴部の上流側側面は大きな凹凸のない側面とし、その勾配は淵頭から水衝点にかけては 1 割(根部に向けては緩やかな勾配で擦り付ける)、水衝点より下流の淵尻に向かっては、徐々に 2 割程度に(根部に向けては前記同様)緩くする。

水制胴部の下流側側面は、構造の安定性を保つ上では緩勾配が良いが、過去の実績から頭部・胴部は上下流側対称かまたは上流側よりも緩くする。また、河岸へは緩やかな勾配で擦り付けることで良いと判断される。

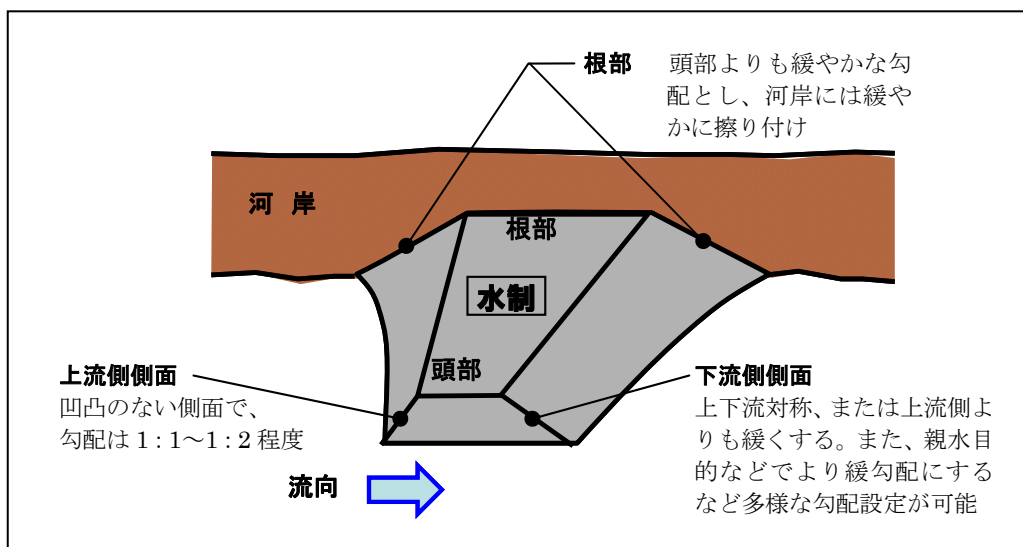


図-22 水制の横断形の模式図

3-5 材料の大きさの決定

■設計流速：水制周りの局所流速 V_g

水制の設計流速には、代表流速 V_0 を割り増した水制周りの局所流速 V_g を用いる。

$$V_g = \beta \cdot V_m \quad (1 < \beta < 2 \text{ 程度、} V_m = V_0)$$

【解説】

水制周りの局所流速 V_g は、水制から離れた位置での一様な流れの流速 V_m に対して、補正係数 β （最大値2程度）を乗じて設計する。 β の値は、対象地周辺の現地にある転石や根固工等に使われている石材等の大きさと安定状況を参考に決めることが望ましい。

ここで、 V_m は湾曲や洗掘などの影響を考慮した河岸の代表流速 V_0 を用いる。（ V_0 の算定については、「改訂護岸の力学設計法」²⁴「美しい山河を守る災害復旧基本方針」²⁵に示されている。）

なお、複数の水制工が設置される場合では、上流端の水制工では特に局所流速が大きくなる場合が多いと考えられる。上流から2基目以降の水制に比べ、 β に大きめの値を用いることが考えられる。

$$V_g = \beta \cdot V_m \quad (1 < \beta < 2 \text{ 程度、} V_m = V_0)$$

■石材の大きさの算定

水制に用いる石材の大きさは、洪水時にも移動しない重さ、大きさを有するものとする。

【解説】

「石出し水制」の構造は、強固な「石張り」や、噛み合わせの弱い「捨石」、流水の抵抗に配慮しながら石材をラフに組む「石組み」によるものなど、多様である。また、流体中で安定する石材の大きさの算定式も、滑動、転動、及び掃流など、複数のモデルが示されている。

このため、石材の大きさを算定する場合には、水制の構造に応じた適切な計算式を選択して算定し（流速は水制周りの局所流速 V_g を用いる）、これと設計箇所やその近傍で使用されている石材とその安定性といった情報などを総合して決定する。

次ページ以降に各計算式の概要とその適用例を示した（各計算式の適用については、現地条件等を踏まえ判断する必要がある）。

なお、外力を強く受ける構造の小口（隅角や天端）は、施工時に小さい石材とならないよう（通常の築石のなかでも大きめの石材（役石）を用いるよう）に注意が必要である。さらに、構造の要となる部分（＝力石、図-23の着色部分）には、必要に応じて築石よりも一回り大きな石材とすることが望ましい。

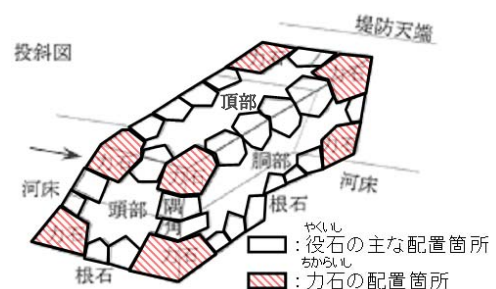


図-23 石積み水制工の一般的な構造における「力石」¹³⁾

参考式①：掃流一体性が弱いモデル²⁴⁾（石材同士に噛み合わせ効果がない状態と想定）

隣接する部材(石)との一体性が弱く、敷き並べられている状態（例えば、捨石などの設置状態を指す）のときを想定し、部材に作用する掃流力が部材の移動限界を越えないものとして流速と部材の大きさとの関係を定めた式。なお、以下に示す基本式は、アメリカ工兵隊の基準にある、捨石径の算定方法に基づいている。

基本式

$$D_m \geq \frac{1}{E_1^2 \cdot 2g[\rho_s/\rho_w - 1]} \cdot V_g^2$$

ここに、 D_m ：石の平均粒径(m)

V_g ：局所流速(m/s)

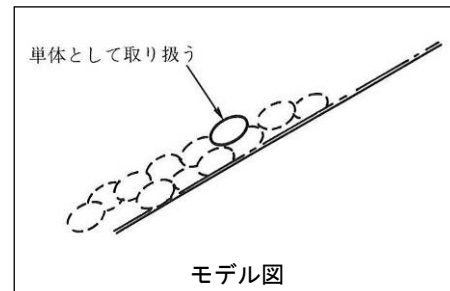
ρ_s ：石の密度(2650kg/m³)

ρ_w ：水の密度(1000kg/m³)

ρ_s/ρ_w は通常2.65程度である

g ：重力加速度(9.8m/s²)

E_1 ：乱れの強さを表す実験係数



流速の乱れ成分の影響は、実験係数 E_1 に含まれている。通常は $E_1=1.2$ が用いられる場合が多い。この値は、比較的乱れが小さい流れの場合の係数である。乱れが大きい流れの場合の係数としては、 $E_1=0.86$ という値が示されている。

上記の基本式は水平面上の部材について与えられるものであり、部材を斜面角度 θ の法面に設置する場合には、粒径 D_m に対して斜面の補正係数 K を乗じた値 $K \cdot D_m$ を石径とする。ここで、 Φ は石材料の水中安息角である。

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

Φ ：自然石では38°程度、碎石では41°程度である。

■本式の出典：財団法人国土技術研究センター編：「改訂護岸の力学設計法」,山海堂,2007.

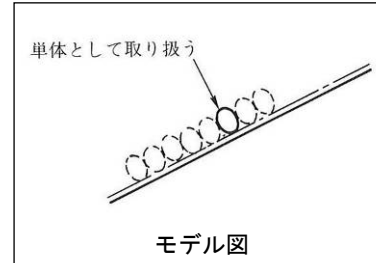
*本計算式中の記号や式の体裁は、他の計算式との整合を図るため、一部を変更している。

参考式②：掃流一体性が強いモデル²⁴⁾（石材同士に噛み合わせ効果がある状態と想定）

ほぼ等しい大きさの部材(石)が、かみ合わせ効果を期待できるように隙間に碎石などの胴込め材が施工されて、整然と設置されている状態のときに流れのせん断力がかかった場合の、掃流力と限界掃流力との関係から導かれた式

$$\text{基本式} \quad D_m \geq V_g^2 / \left[\{6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d/k_s)\}^2 \cdot \tau_{*sd} \cdot s \cdot g \right]$$

ここに、 D_m ：石の平均粒径(m) τ_{*sd} ：部材に作用する無次元せん断力を
 V_g ：局所流速(m/s) 斜面補正した値；(2)式
 H_d ：設計水深(m) s ：石材の水中比重(1.65)
 k_s ：相当粗度(m) g ：重力加速度(9.8m/s²)



河床材料の掃流と類似の状態であり、掃流力が限界掃流力を上回った場合に移動が生じる。限界掃流力はシールズなどの実験式によって求められた

$$\tau_{*d} = 0.05 \quad (1)$$

として部材の必要径を照査する。

式(1)は、水平床上での値であり、角度 θ の斜面上に設置する場合の補正を行うと

$$\tau_{*sd} = \tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \Phi}} \quad (2)$$

ここに、 θ ：斜面角度

Φ ：材料の水中安息角(Φ の標準値は自然石の場合38°、碎石の場合41°)

となる。ここに、 τ_{*d} ：部材に作用する無次元せん断力である。

これより、安定条件は部材の径 D_m (m) について

$$\tau_{*sd} = u_*^2 / (s \cdot g \cdot D_m)$$

$$u_* = V_g / \phi$$

$$\phi = 6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d/k_s)$$

より

$$D_m \geq V_g^2 / [\{6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d/k_s)\}^2 \cdot \tau_{*sd} \cdot s \cdot g] \quad (3)$$

で、与えられる。相当粗度 k_s は、 D_m と等しくとればよい。

なお、必要径 D_m は初期値を D_{m1} とし、 $k_s = D_{m1}$ と仮定し、式(3)により繰り返し計算を行うことによって求められる。

求められた値は、かみあわせが確保し得れば安全側の値であるが、なんらかの原因でかみあわせ効果が不十分であると、急激に流出しやすくなることを考慮した安全確保が必要である。例えば、施工後の状態に凹凸が見られる場合など、一体性の強さが確保できない場合があるので、照査の目標値としては30～50% 程度割り増した値とすることが望ましい。

■本式の出典：財団法人国土技術研究センター編：「改訂護岸の力学設計法」,山海堂,2007.

*本計算式中の記号や式の体裁は、他の計算式との整合を図るため、一部を変更している。

参考式③：球体の転動モデル²⁶⁾（石材を球体群上に置かれた球体と想定）

平坦に敷き詰められた球体群の上に1つの球体(石)が突出して置かれた状態で、これが流体力により転動する場合のモーメントの釣り合いを考えた式

$$\text{基本式} \quad D_m \geq F_s \cdot \frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)} \cdot (0.75 \cdot C_L + 1.3 \cdot C_D) \cdot \frac{V_g^2}{g}$$

$$1 \leq \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot V \cdot g \cdot r \cdot \sin 30^\circ}{F_L \cdot r \cdot \sin 30^\circ + F_D \cdot r \cdot \cos 30^\circ} \quad (1)$$

ここに、
 V : 石(球体)の体積 (m³)
 r : 石(球体)の半径 (m)
 ρ_s : 石の密度 (2650kg/m³)
 ρ_w : 水の密度 (1000kg/m³)
 g : 重力加速度 (9.8m/s²)
 F_D : 抗力
 F_L : 揚力

(1)式の左辺を安全率 F_s に置き換えて整理する。

$$F_s \leq \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot V \cdot g}{F_L + 1.73 \cdot F_D} \quad (2)$$

ここに、

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_w \cdot A \cdot V_g^2 \quad (3)$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (6)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho_w \cdot A \cdot V_g^2 \quad (4)$$

$$r = \frac{d}{2} \quad (7)$$

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (5)$$

C_D : 抗力係数 (0.4) A : 石(球体)の投影面積 (m²)
 C_L : 揚力係数 (0.32) D_m : 石(球体)の直径 (m)
 V_g : 局所流速 (m/s) F_s : 安全率 (1.2~1.5)

整理すると、下記の計算式となる。

$$D_m \geq F_s \cdot \frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)} \cdot (0.75 \cdot C_L + 1.3 \cdot C_D) \cdot \frac{V_g^2}{g}$$

なお、石は横断勾配(下流面)に沿って配置されるので、粒径 D_m に対して斜面の補正係数 K を乗じた値 $K \cdot D_m$ を石径とする。ここで、 Φ は石材材料の水中安息角である。

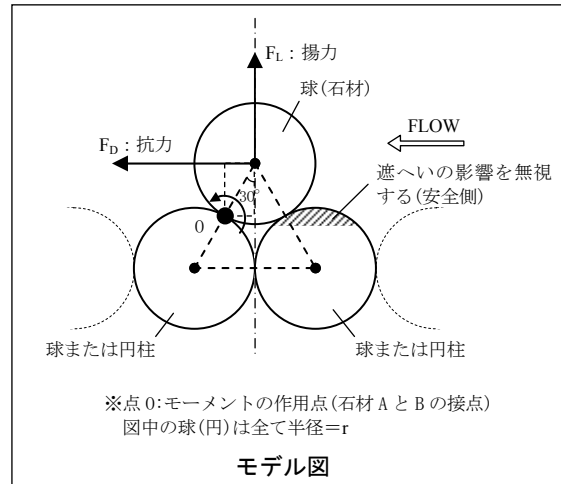
$$K = \frac{1}{\cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \Phi}}}$$

Φ : 自然石では38°程度、碎石では41°程度である。

■本式の出典：建設省土木研究所河川部河川研究室：「洪水流を受けたときの多自然型河岸防衛工・粘性土・植生の挙動・流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために」，土木研究所資料第3489号，1997。

* 上記のモデル図は、(1)式の構成を元にした推定図である。

* 本計算式中の記号や式の体裁は、他の計算式との整合を図るため、一部を変更している。



参考式④：角柱の滑動モデル²⁷⁾（石材を河床に置かれた正角柱と想定）

流れ方向の投影形状が正方形の角柱（石）を、流れ方向を長手として河床においたとき、これが流体により「滑動」する場合の力の釣り合いを考えた式。

※他の石による遮蔽を想定して流体力が作用する投影面積を調整する等の工夫ができる。

$$\text{基本式} \quad W \geq \frac{V_g^2 \cdot \rho_w}{2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)} \cdot \left(\frac{F_s \cdot C_D \cdot A}{\mu} + C_L \cdot A_L \right)$$

$$F_s \leq \frac{F_F}{F_D} \quad (1)$$

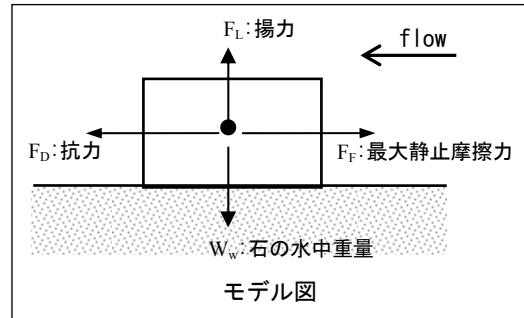
ここに、 F_s ：安全率(1.2～1.5)

F_D ：抗力

F_L ：揚力

F_F ：最大静止摩擦力

W_w ：石材の水中重量



$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_w \cdot A \cdot V_g^2 \quad (\text{抗力}) \quad (2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho_w \cdot A \cdot V_g^2 \quad (\text{揚力}) \quad (3)$$

$$F_F = \mu(W_w - F_L) \quad (\text{最大静止摩擦力}) \quad (4)$$

$$W_w = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) W \quad (\text{石材の水中重量}) \quad (5)$$

V_g ：局所流速 (m/s)

A ：流れ方向の石の投影面積 (m²)

A_L ：流れに垂直方向の石材の上方投影面積 (m²)

C_D ：抗力係数(0.5)

C_L ：揚力係数(0.2)

μ ：静止摩擦係数(0.8)

ρ_w ：水の密度 (1000kg/m³)

ρ_s ：石の密度 (2650kg/m³)

W ：石の空中重量 (kg)

※抗力係数 C_D と揚力係数 C_L は、改訂護岸の力学設計法(P77, 図 5-7)に示されている単体ブロック(ブロック B)の値を参考に、その最大値程度としている。

これらの式を整理すると、

$$W \geq \frac{V_g^2 \cdot \rho_w}{2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)} \cdot \left(\frac{F_s \cdot C_D \cdot A}{\mu} + C_L \cdot A_L \right)$$

なお、福留ら²⁷⁾はこの計算方法を用い、次頁のコラム 6 および次項 3-6 に示す石組みと「のめり」の考え方をもとに福岡県岩岳川にて試験施工し、出水前後の石材が概ね安定していたことを報告している。

■本式の出典：福留脩文, 有川崇, 西山穂, 福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計, 土木学会論文集 F, Vol. 66No. 4, 490-503, 2010.

* 本計算式中の記号や式の体裁は、他の計算式との整合を図るため、一部を変更している。

コラム6：力石を要（かなめ）として一体的に構築した石組み構造

石組みによる水制工では、構造の要となる部分に「力石」を用いて圧縮力を伝達する構造とすることで、水制工全体を設計流速に対して安定させることができる。

具体的には、根石の四隅に「力石」を配置し、これに対して水平面でアーチ状に他の石材を組むことで、これらの石材が力石より前に抜けない構造にする（図-24 参照）。

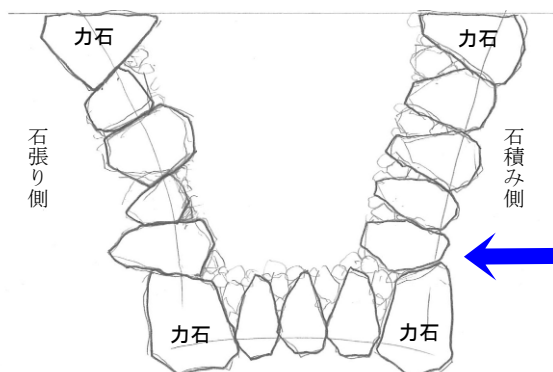


図-24 野石積み水制の根石配置の概念図 ¹³⁾



写真-18 筑後川安武町地先。既存の荒籠を修復・改良した杭打ち・石積み・石張り・雑石張りの構築様式による水制。要所に力石を配置している。

3-6 石材形状の用い方と石組基本構造の組合せ

■石材形状の用い方 ～流体中で安定する石材の形状「のめり」～

石材の設置方法は、流れに対して「のめり」形状とすることが望ましい。

【解説】

流水の外力を受ける石材を設置する際は、石材上面を上流側に傾斜させると、揚力が低減されて流水に対し安定性を増すことができる。このような石材形状の用い方を「のめり」と称する(図-25 参照)。この形状の用い方は、自然の堆積形態に近い安定した構造を再現するのに役立つ。

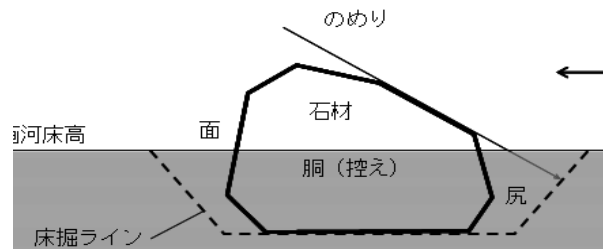


図-25 「のめり」の概念図 27)

コラム7: 「のめり」形状の考え方をういた分散型落差工の構造

力石を要とし、圧縮力を伝達して全体を安定させる構造と、「のめり」形状を用いる考え方により、アーチ状堆積形態(図-26(a)参照)や覆瓦状堆積形態(堆積学では「インブ리케이션」^{ふくが}と呼ばれる。図-26(b)参照)を再現することができる。

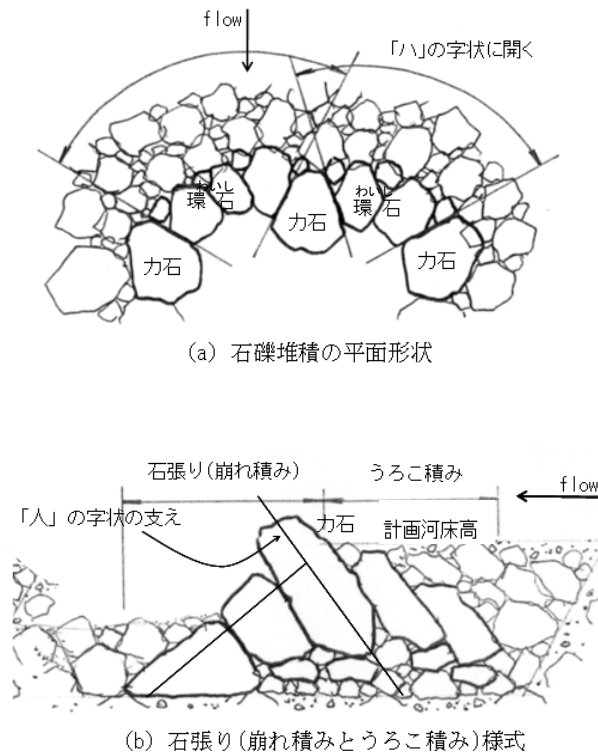


図-26 河床小規模河床形態の石組み構築様式 27)

■野石石組みの基本構造の組合せ

野石石組みの基本的な断面構造「石積み」「石張り」「崩れ積み」等を組み合わせて用い、また基本的な平面構造として半円形のアーチ状構造等を適宜用いて、自然地形に近い多様な形状の水制工を工夫して構築する。

【解説】

多自然川づくりにおいて過去に使われた野石石組みを断面構造から大きく分けると、「石積み」と「石張り」および「崩れ積み」とに分けられる。それらの構造は勾配や石組み表面の凹凸等に違いがある。上記の基本構造を組み合わせることにより、河川の護岸や水制、落差工などの多様な構造物を構築する際に、構造的な安定性を確保しながら自然地形の多様な形状を再現し構築することができる（写真-20）。

(1) 断面構造の基本形

「石積み」

一般に法勾配が1割5分未満のものをいい、背面の土圧を受けもち、切土盛土の土留めや城の石垣等に用いられている（図-27(a)）。

「石張り」

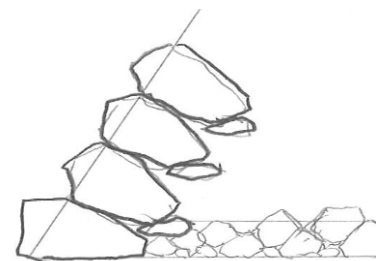
一般に法勾配が1割5分以上のものをいい、背面の土圧を受けもたず、法面の保護に用いられている（図-27(b)）。

「崩れ積み」

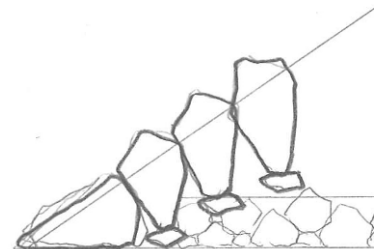
法面勾配の緩急が多様で、野石が自然に折り重なって安定した形を基本に、造園で多用されている。高知県ではかつて景勝地の道路擁壁に、また広島県や京都府でも同じく景勝地の砂防事業にも使われている。高知県の手法は野性味に富み、「土佐積み」と称されて多自然川づくりの現場にも多く登場する（図-27(c)、写真-19）。



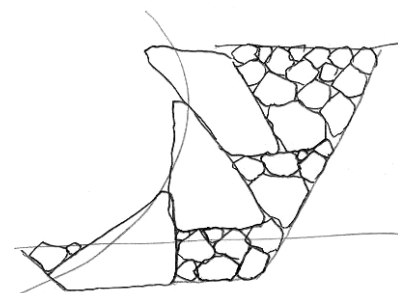
写真-19 桜島第二古里川での土佐積み



(a) 石積み



(b) 石張り



(c) 崩れ積み(土佐積み)

図-27 野石石組みの断面構造の基本形 ¹³⁾

(2) 平面構造の基本形

[半円形の平面アーチ状構造]

自然地形の水や風に侵食された形状や、石礫の堆積した形状には、しばしば半円状の形状が見られる。護岸や水制などの河川構造物を野石で組む際、構造の安定上からも、また生物の生育・生息環境や景観に配慮する上からも、この構造を再現することは好ましい。その要点を記す（図-28）。

- ・ 「力石」：半円状の両支点(リブ)に、力石と称する大石を据える
- ・ 「環石」：力石間に、上流や山手に向けて半円状(グローイン)の環石を組む

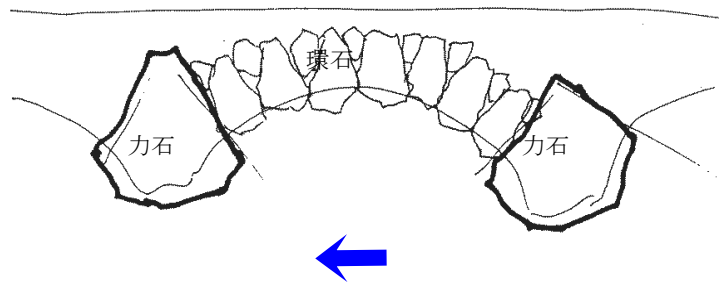


図-28 半円状石組み概念図 ※



写真-20 高知県安田川。石積み、石張り(崩れ積み)水制 ※

4. これからの水制設計で重要な視点

4-1 より安定した自然に近い構造を目指す

自然界で安定している地形の構造を、立地ごとに様々なスケールで見いだし再現することで、自然環境と景観の保全、構造物の安定性の向上を図る。

【解説】

地球上では、地殻運動に加え、日照や様々な気象現象及び生物の活動等の外力が働いた結果、様々な地形が形成されている。河川では、流水の侵食・運搬・堆積の作用による河道地形の形成を見ることができる。超大景観的には源流域から河口にかけての流域地形、大景観として河道の蛇行形態、中景観として河岸や淵・瀬・砂州の河床形態（写真-21）、小景観として河床や河岸に連続して現れる地形の「リブ・グローイン」（図-29(a)、写真-22）、「照り・起り」といった形状（図-29(b)、写真-23）、土石の移動過程として河床に規則的に堆積する石礫の礫列や礫段（図-29(c)、写真-24）、さらにミクロ的には河床の石礫集団に見られる「のめり・インプリケーション」（写真-25）といった個々の形状が読み取れる¹³⁾。

これらの大景観からミクロな景観の中に、地域独特の生態系が時を超えて育まれてきている。川づくりでは、主に上記の中景観・小景観及びミクロな景観のレベルで自然界がもつ安定構造を再現することが考えられる。このことは、地域独特の豊かな生態系と美しい自然景観を失うことなく河川の安全性・安定性を向上することに繋がる。

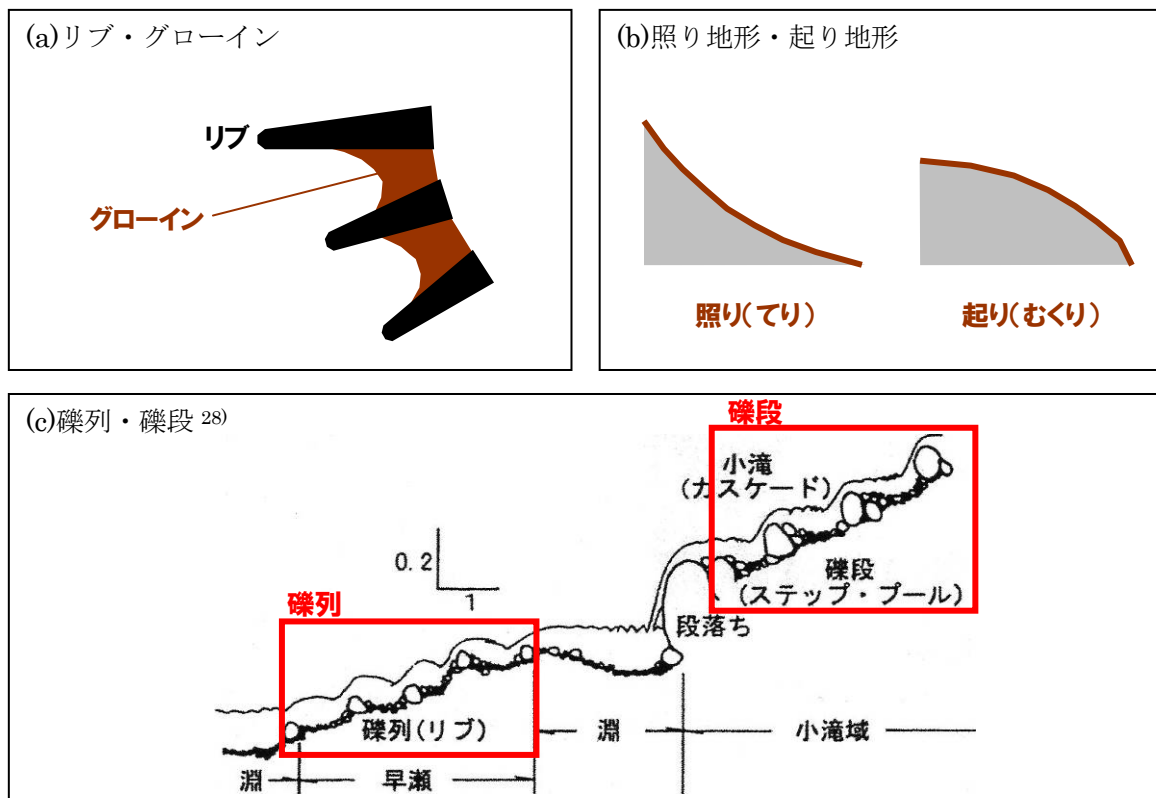


図-29 自然界で安定している地形構造の例（概念図）



写真-21 高知県仁淀川。瀬・淵・砂州が明瞭。¹³⁾



写真-22 栃木県片品川。リブ・グローイン構造。¹³⁾



写真-23 大分県番匠川水系久留須川。砂州に、「照り」地形(赤の実線)と「起り」地形(同破線)が見られる。[※]



写真-24 北海道岩尾別川。溪流での礫列(トランスバースリブ)の河床形態¹³⁾。



写真-25 自然の河川の石に見られる、のめり・インブリケーション¹³⁾



4-2 他の工法と組み合わせて「水と土砂の動きを正常化（最適化）」する

～自然に近い河床形態の復元による河床・河岸の安定化～

水制工以外の工種（護岸工・根固工・落差工・帯工・置き石・覆土など）を、機能に応じ適切な位置に組合せ、かつ一体的に造形することで、目指す流水の状況と河川地形の形成を促す。

【解説】

水制工は、川づくりにおいて水流と土砂移動を制御する手段の一つであり、自然地形の露岩や石礫の堆積形状の一形態を抽象化したものである。水制工の他にも、自然地形を抽象化して地形制御に用いる工種がこれまでに試みられている。

川づくりにおいて水と土砂の動きを正常化するためには、前章までに述べた各種タイプの水制の諸機能だけでなく、みお筋・河道を横断して水流を制御する帯工・落差工の機能や、局所的に河床の侵食を防ぐ置き石等の機能、陸上に守るべきものが近接する際に用いる護岸の機能等を必要に応じて併せて用い、河道内の地形形成を総体として制御・誘導する視点が必要である。

自然地形を抽象化したモデルに基づく水制以外の構造物として、河川立地に応じて次のようなものが認識され、これまでに試みられている。

[山地石礫河川]

- ・岩質の河岸をモデルとした護岸。
- ・ステップ・アンド・プールを形成する礫列・礫段をモデルとした分散型落差工。

[沖積砂礫河川]

- ・瀬を補強する落差工・盛土工（みお筋の蛇行と瀬・淵・砂州の形状・配置を正常化するための瀬の補強として、やや大きい粒径の材料を帯状に敷設する、または置き石を散在させて設置する。）

また、これらのモデルとなった自然地形は、互いに明瞭な境界をもって区別されるものではない。このため、川づくりにおいてこれらをモデルとした構造物を設置する際にも、水制と護岸、護岸と帯工など、相接する構造物同士の形状を別々に考えず、一体的・連続的にデザインすることで人工的な印象を和らげることが可能である。

【事例紹介 5】自然に近い河床形態の復元による河床・河岸の安定化～山地石礫河川の現場から～

【福岡県 岩岳川】¹³⁾

河積確保のための河床掘削後に、護岸を保護する水制状の根固め（石組み）とともに、河床に4基の分散型落差工が施工された。出水に対して安定で、かつ現場の立地に適した生態系の基盤環境となるステップ・アンド・プール地形を形成させることが目指された。

河床掘削前の河道はみお筋の低下と砂州の固定化による「河床の二極化」の状態にあり、環境の単調化と河道維持管理の問題を抱えていたが、工事が完了して7年、かつてのように河床二極化に向かう傾向は見られていない。（写真-26）



写真-26 岩岳川¹³⁾

【本明川】

湾曲河道水衝部に淵と河岸を保全する水制と護岸を施工する際、構造物の境界部分を連続させるよう、一体的に造形された。出水時の流れに洗われる水制先端部は石が露出し、護岸部は植生に覆われて、人工的な印象が抑えられ風景に馴染んでいる。（写真-27）



写真-27 本明川※

【事例紹介 6】自然に近い河床形態の復元による河床・河岸の安定化～沖積砂礫河川の現場から～

【菊池川水系 岩野川】¹³⁾

菊池川水系岩野川は、山間部での土砂供給が盛んで、改修後の河道に大量の土砂が堆積し、流路は護岸沿いの河床が低下して、河床の二極化が進行していた(写真-28 参照)。過剰堆積した砂州を維持管理で掘削する際に、淵ができやすい蛇行の水衝部に淵を復元し、淵と淵の間に瀬を保全する計画とした(図-30 参照)。

瀬・淵の明瞭な河道地形を形成させるために、ここでは水制・ハイドロバリヤー水制に加え、瀬頭を補強し河床低下の抑制を図る置き石群を組み合わせて設置した(図-31 参照)。



写真-28 菊池川との合流点から上流部の岩野川。モデル区間は右端の湾曲河道(白い丸印)

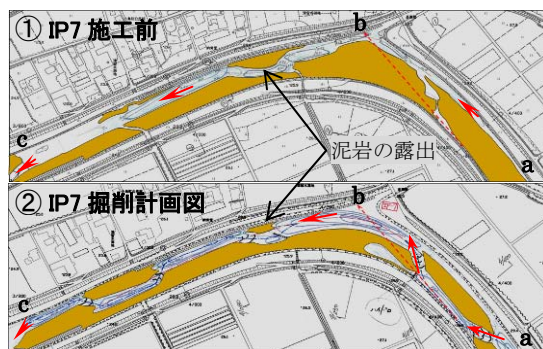


図-30 ①モデル区間の①現況図と②河床掘削計画

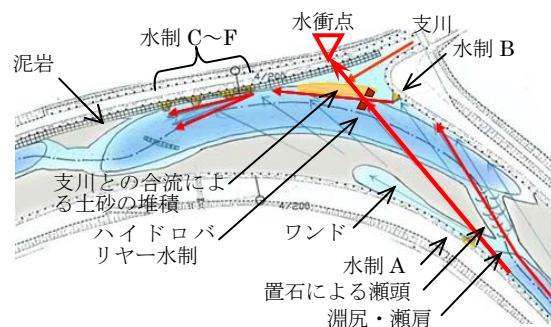


図-31 左図②の拡大図

工事完了後 4 年間、このモデル区間は、設計時に目標とした淵・瀬・砂州の地形が維持され、砂州上の植生も抑制できている。砂州上の植生は、工事前に当該区間を覆っていたツルヨシが減少し一年生草本が主となっており、毎年出水により攪乱されていることがわかる(写真-29)。

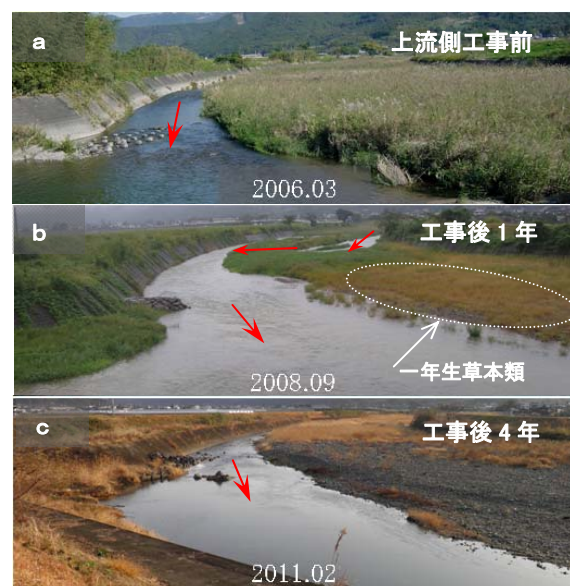


写真-29 菊池川水系岩野川 工事後の変化¹³⁾

4-3 現場の観察から「人為的な作用に対する物理的・生態学的な応答」を知る

～水制工の新たな可能性を求めて～

工学的・生態学的な視点で繰り返し観察し、水制工の応用の可能性を広げる知見を蓄積する。

【解説】

水制工で制御を図る洪水流と土砂の動き、また様々な時間スケールで変化していく物理環境は、完全に解明されていない。この物理環境を利用する様々な生物の応答についても解明されていない点が多く、完全な予測は困難である。

水制工の機能、応用範囲はまだ未知数の領域が多く、施工後の影響・効果について、設計に携わる技術者が生態学分野の知見を導入し（あるいは協働でモニタリングを行い）、新たな知見を蓄積していくことが重要である。

【事例紹介 7】：伏流水の湧出を促した例、高知県安田川²⁹⁾

淵を失った山地石礫河道においてかつての淵頭の位置に先端を掘らせるタイプの水制を、淵尻部には河床を掘らせないタイプの水制を設けた（図-32）。水制（石組み）には自然の堆積形態をモデルにした空石積み様式を応用した。

この現場において、水制根部を河岸（土砂が堆積した砂州の下流端部分）に貫入させると、水制の付け根部分から伏流水が湧出して水制域に滞留し、夏は低水温域、冬は温水域が形成され、溪流魚が生息できる環境が創出された（写真-30 (b) 参照）。

この事例は、空隙のある空石積み構造の水制が、伏流水を湧出させる機能を持ち、生物の生息環境のうち水温の多様性を増すことに寄与するケースがあることを示唆している。

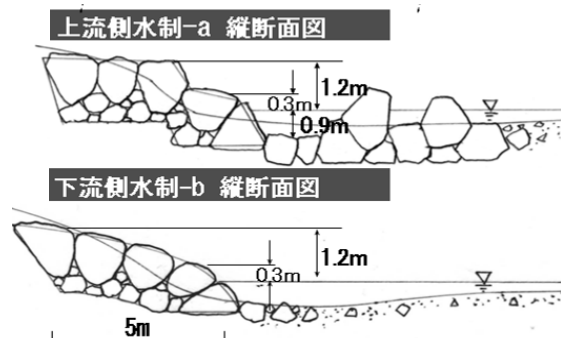


図-32 上図は淵頭、下図は淵尻に用いた水制縦断面図²⁹⁾



(a) 淵頭に設置した水制の工事完了



(b) 水制根部からの伏流水に集まった溪流魚のアマ

写真-30 高知県安田川。かつて改修で失った淵を復元するために水制を設置した。写真は淵頭の水制²⁹⁾。

5. 特殊な水制（ハイドロバリヤー水制）

「ハイドロバリヤー水制」は、水制軸と交わる方向の通水路をその胴部に設けた構造の水制をいう。以下 5-1、5-2 項に示す通り、その機能は、土砂堆積と土砂排除の相反する 2 つがあり、それぞれの構造物の形状の違いに注意する必要がある。

5-1 土砂を効率的に堆積させるハイドロバリヤー水制

〔通水路形状〕 細長形状

〔通水路方向〕 先端部を回り込む流れにぶつける方向

【解説】

ハイドロバリヤー水制は、土砂を堆積させ効率的に河岸を守る目的で、ロシアの水理実験所によって開発された（図-33～図-35）。構造は基本的に通常の水制と共通するが、胴部に通水路を水制の軸に対し角度をつけて設ける。水制の軸に対する通水路の角度 $\alpha=30$ 度～40 度として紹介された例がある¹⁾。通水路を通過して河心側に向けられた水流が、水制頭部の前方を通過して河岸側へ向けられた水流と構造体の下流で衝突することにより運動エネルギーの一部を失う。この原理により、構造体の下流側河岸付近に掃流物質の堆積を生じさせる。また、衝突後の水流が河岸へ到達する点は、不透過水制を設置した場合よりさらに下流へずれるため、水制一基が防護できる範囲が広がる（図-33）。

水制胴部の通水路の形状は、後述の土砂排除型ハイドロバリヤー水制に比べて細長く、その通水路長は、少なくとも開口部幅の 3 倍と解説されている²⁾。

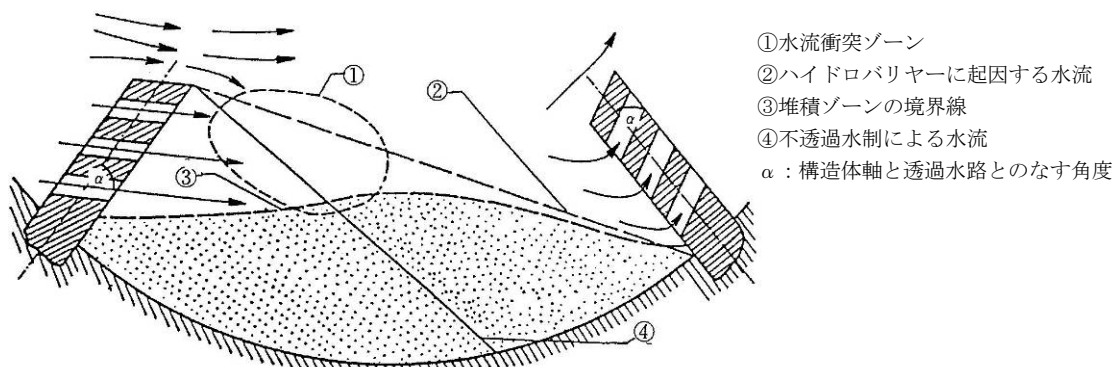


図-33 土砂堆積型ハイドロバリヤー水制の概念図²⁾

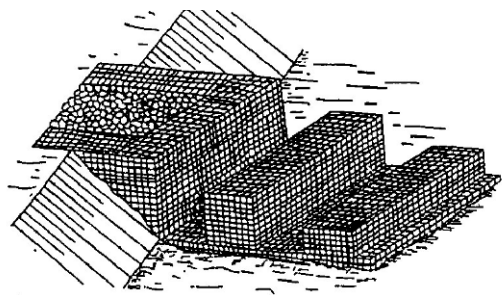
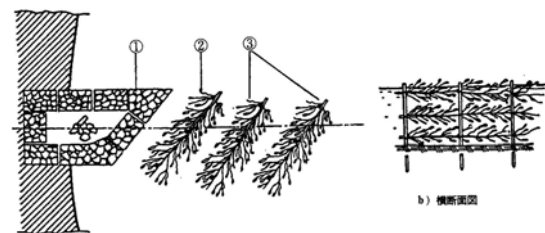


図-34 フトンカゴによるハイドロバリヤー水制²⁾



①布団カゴによる水制根部,②,③木杭により河床へ固定された樹木

図-35 粗朶によるハイドロバリヤー水制²⁾

【事例紹介 8】：土砂を堆積させるハイドロバリヤー水制、北海道藻琴川

わが国では、土砂を効率的に堆積させる水制の施工事例は少ないが、実施した現場ではその効果を発揮している(写真-31 参照)。

北海道藻琴川 藻琴湖に流入する火山灰系の浮遊砂を上流の河道内で捕捉する目的の土砂堆積型水制の施工例。湾曲河道水裏部に粗朶によるハイドロバリヤー水制を設置した。写真 a～c はともに工事完了後の雪解け出水後の状況である。写真 c を見ると、水制域内の堆積物が火山灰系の浮遊砂を捉えていることがわかる。



写真-31 北海道藻琴川の土砂捕捉を目的としたハイドロバリヤー水制

5-2 堆積した土砂を効率的に排除するハイドロバリヤー水制

〔通水路形状〕 幅広形状

〔通水路角度〕 原則として水制軸に対し90°

【解説】

前項 5-1 に示した土砂を堆積させるタイプに対し、河川水流を二手に分流したまま水勢を増し、下流に堆積する土砂を排除するタイプのハイドロバリヤー水制が提案され、効果を示した事例がある¹²⁾ (次ページ【事例紹介9】参照)。これらの事例では、構造はロシアで開発された原型と同じく胴部に通水路を設けるが、通水路長に対して通水路幅を広くして、隔壁部の幅を通水路幅ほどの広さとしている (図-36、写真-32、33 参照)。これまで試みられた事例は、通水路長 : 通水路幅 = 1 : 1.5 程度のものが多い。設置する位置は、堆積土砂の直上流の位置である。

このタイプの水制では、設置場所や通水路方向を誤ると、保全すべき河岸や河床を破壊する危険があるため、下記のことに注意すべきである。

- ・ 水制の基本原則(水制の方向と洪水流の流向制御の関係や偏位流など)を理解して設計する。
- ・ 現場観察(洪水流の流向・流速の変化と土砂移動との関係など)においては、経験的な判断を要する。
- ・ 強い外力に耐えられる構造で施工する必要がある。

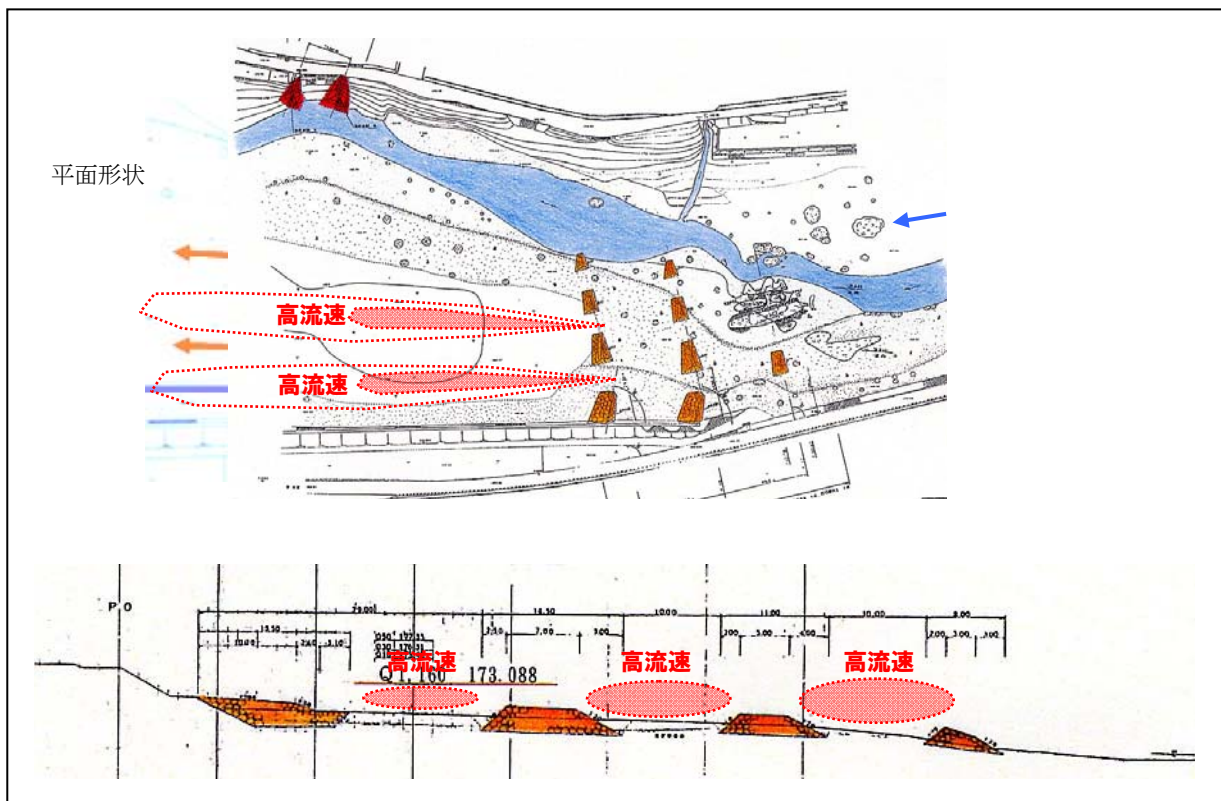


図-36 土砂排除型ハイドロバリヤー水制の概念図

【事例紹介 9】：土砂を排除するハイドロバリヤー水制、高知県四万十川・番匠川水系久留須川

写真-32 は、高知県四万十川での土砂排除型ハイドロバリヤー水制の例で、工事が完了して5年後の状態である。堆積していた土砂が一直線状に排除されているのが分かる。

写真-33 は、番匠川で実験的に製作した弁慶杵による土砂排除型ハイドロバリヤー水制である。下流側の土砂が帯状に掘れた地形に変わり、効果が現れている¹³⁾。



写真-32 高知県四万十川の土砂排除型ハイドロバリヤー水制



写真-33 一級河川番匠川（大分県）の土砂排除型ハイドロバリヤー水制

6. 今後の検討課題

これまでの九州における水制工についての取り組みを振り返ると、今日の多自然川づくりの時代も含めて、水制工の新しい課題に対する実験場の感もあった。机上で、また実河川の現場では、技術・工法の研究・討議、研修、あるいはコンペの形で水制工が扱われ、そして実践してきた。本設計参考資料は、こうした現場の中から得られた水制設計に必要な視点としての、立地条件と川成、水や土砂の動き、河床形態などを取り入れて作成している。

実際の現場に目を向けると、事前のねらいに沿った効果が概ね得られた事例がある一方で、「多自然型川づくりレビュー委員会」でも指摘されたような課題（1-4 項参照）の残る川づくりも依然として多く見られる。このようなこれまでの事例に見られる課題の解決方法を、本書を手がかりとしながら検討、改善していくことが今後求められる。また、上述した水制工の設計視点を基本としながら、これを応用することで水制工のもつ新たな可能性を探っていく必要もあろう。

例えば、人為的改変に対する物理的な応答に関しては、今日、治水上の問題として、従来の改修の影響により河床の局所洗掘と土砂堆積が同時に起きる、いわゆる「河床の二極化」が指摘されている。これに対しては、平常時の水路部（みお筋部）を改変しない状態で、陸上部の河床掘削が行われることが多い。しかしながら、二極化した河道では、みお筋部についても乱された状態であることが多い。したがって、みお筋部を含めた河床全体を自然な形態にコントロールして安定化させることが重要ではないだろうか。そのような目的での水制工の用い方についても、今後研究していく必要がある。

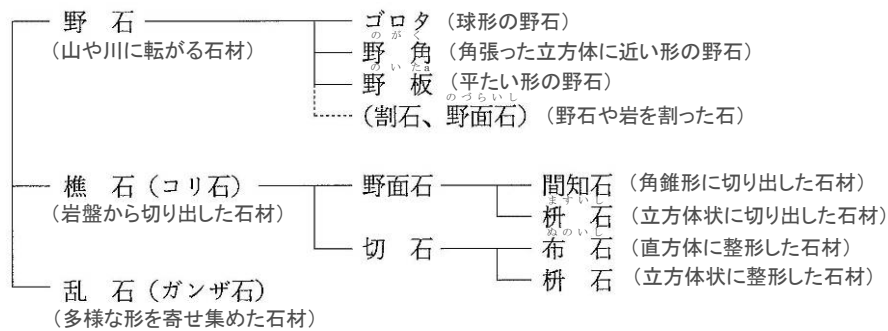
なお、本参考資料は、「二次案」作成時から現在までに九州管内をはじめ各地で得られた情報や経験をもとに、「川の特性」の把握・理解から構想・判断する視点を加えることにより一歩進めたものといえるが、記載した目安の数値や計算式などはまだ不確実性があるといわざるを得ない。今後も、水制工の施工現場毎の水流・土砂の挙動や構造物の安定性についてモニタリングし、より効果的な水制工の計画・設計・施工の手法や留意点について新たな知見を加えていく必要がある。

7. 参考資料

■野石石組みの用語解説

多自然川づくりで実際に用いられてきた野石石組み¹³⁾の、特殊な用語を以下に概説する。

1. 石材の種類



2. 石積の部位

【役石 (やくいし)】

次のような構造上の重要箇所に設置する石材は「役石」と呼ばれ、他の石材よりも大きい寸法のものが用いられる。

- ・「根石 (ねいし)」：石積面の下辺に設置される。
- ・「天端石 (てんばいし)」：石積面の上辺に設置される。
- ・「隅石 (すみいし)」：石積面が水平方向に折れている角部分に設置される。

【力石 (ちからいし)】

役石同士が接するコーナーの部分に設置する石材は特に重要で、「力石」と呼ぶ。力石は、他の役石よりも大きい最大級の寸法のものが用いられる。

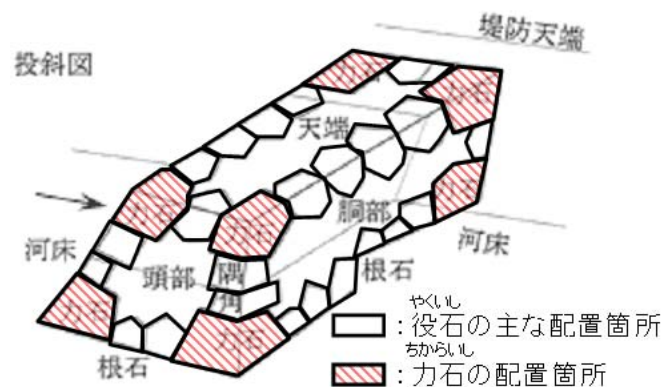


図-参-1 石積み水制工の一般的な構造図¹³⁾

3. 石積の構築様式

石積面を正面から見たとき、石と石が接する目地が形成する模様は、構築様式により様々な違いがある。石積みの構築様式は大きく分けると水平方向に目地が通る「布積（ぬのづみ）」に類するものと、水平方向に目地が通らない「谷積（たにづみ）」に類するものがある。河川の工作物として野石を空石積みで組む場合、多様な方向から外力がかかるため、剪断抵抗の強い「谷積」様式を用いるのがよい。大粒径の大石を用いる場合には、3 個の石で谷形をつくる構造が好ましい。

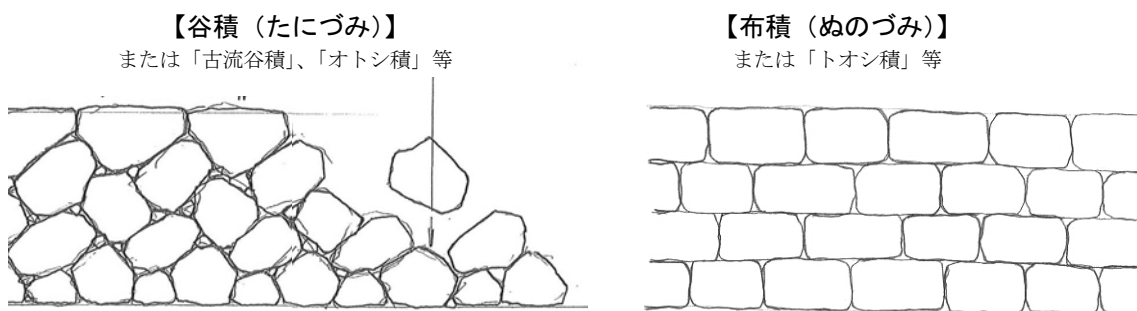
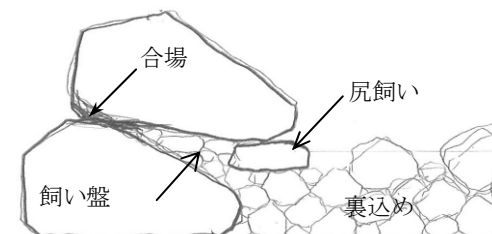


図-参-2 谷積・布積の概念図 ※

4. 石積の内部構造

- ・「尻飼い」: 築石の場合を定めて、胴部の上面勾配を固定するよう、尻部の下に大き目の安定した栗石をすける(図-参-3-イ)
- ・「飼い盤」: 築石胴部の上下位置が定まると、その安定性をさらに高めるよう、胴部の下位間隙に栗石を充填する(図-参-3-イ)
- ・「胴飼い」: 上記作業による築石の横方向の連結が終れば、築石胴部の平面的な位置を固定するため、尻部の間に栗石を打ち込む(図-参-3-ロ)。
- ・「胴込め」: その後、胴部の間隙に、面に近い所から奥に向かって小粒径の栗石を充填していく(図-参-3-ロ)
- ・「裏込め」: 以上の過程に併行して、築石の尻から奥に向かって小→大粒径の小栗、中栗、大栗を充填していく。施工要領は栗石の噛み合わせを良くするよう、凹凸面を形成してその凹部に凸部を落すように層ごとに仕上げていく(図-参-3-イ、ロ)

イ. 横断構造



ロ. 平面構造

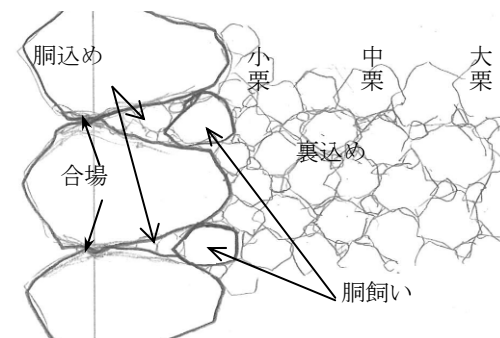


図-参-3 石積内部の栗石の配置 ※

参考文献

- 1) 砂防学会編：「改訂砂防用語集」,山海堂,2004.
- 2) イヴァン・ニキティン：「水制の理論と計算」-近自然河川工法の発想を高めるために-,信山社サイテック,1995.
- 3) クリスチャン・ゲルディ,福留脩文：「近自然河川工法」-生命系の土木建設技術を求めて-,近自然河川工法研究会,1990.
- 4) 農山漁村文化協会：「治河要録」,「日本農書全集 65 開発と保全 2」, 1997.
- 5) 農山漁村文化協会：「川除仕様帳」,「日本農書全集 65 開発と保全 2」, 1997.
- 6) 真田秀吉：「日本水制工論」,岩波書店,1951.
- 7) 秋草勲,吉川秀夫,坂上義次郎,芦田和男,土屋昭彦：「水制に関する研究」,土木研究所報告 107 号, 1960.
- 8) 崇田徳彦,清水康行：水制を含む流れの準 3 次元数値計算モデルの開発,土木学会論文集, No.497/ II -28, pp.31-39, 1994.8.
- 9) 崇田徳彦：河床材料から見た水制近傍の土砂堆積について,北海道開発局・開発土木研究所月報, No. 512, pp.40-47, 1996.1.
- 10) 福岡捷二,西村達也,岡信昌利,川口広司：越流型水制周辺の流れと河床変動,水工学論文集,第 42 巻, pp.997-1002, 1998.2.
- 11) 川口広司,福岡捷二,渡邊明英：設置角度の異なる越流型水制周辺の流れと流体力分布特性,水工学論文集,第 48 巻, pp.811-816, 2004.2.
- 12) 内田龍彦,福岡捷二：底面流速解析法による水没水制群を有する流れと河床変動の解析,土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.1, pp.16-29, 2011.
- 13) 福留脩文：治水と環境の両立を目指した川づくりの技術的考え方とその適用性に関する研究,中央大学, 2011.
- 14) 山本晃一：「護岸・水制の計画・設計」-一歩先そして一歩手前-,山海堂, 1996.
- 15) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法,森北出版, 2005.
- 16) 山本晃一：「構造沖積河川学-その構造特性と動態-」,山海堂, 2004.
- 17) 千田稔：「自然的河川計画」,理工図書, 1991.
- 18) 山本晃一・高橋晃・佐藤英治：河道平面形状と砂州の関係に関する基礎調査,土木研究所資料第 2806 号, pp.312-368, 1989.
- 19) 福岡捷二,土屋進,安部友則,西村達也：河床変動対策工の設計法に関する研究-信濃川・小千谷越路地区における現地対策工とその効果検証-,土木学会論文集, No.698/ II -58, 2002.
- 20) 福岡捷二,高橋晃,森田克史：信濃川小千谷越路地区河道計画模型実験報告書,土木研究所資料,第 2610 号, 1988.
- 21) 福岡捷二,西村達也,高橋晃,川口昭人,岡村昌利：越流型水制工設計法の研究,土木学会論文集, No.593/ II -43, pp.51-65, 1998.
- 22) 伊藤弘住：土木施行講座 9 河川構造物施行法,山海堂, 1978.
- 23) 藤井友竝編著：「河川工事ポケットブック」,山海堂, 1985.
- 24) 財団法人国土技術研究センター編：「改訂護岸の力学設計法」,山海堂, 2007.
- 25) 「美しい山河を守る災害復旧基本方針」,社団法人全国防災協会, 2006.
- 26) 建設省土木研究所河川部河川研究室：「洪水流を受けたときの多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動-流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために-」,土木研究所資料第 3489 号, 1997.
- 27) 福留脩文,有川崇,西山稔,福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計,土木学会論文集 F, Vol.66No.4, 490-503, 2010.
- 28) 長谷川和義・鈴木俊行・張祐平：溪流のステップ・プール構造とそのハビタット特性,(財)河川環境管理財団,河川環境総合研究所報告,第 13 号, pp.113-127, 2007.
- 29) 福留脩文,藤田真二,福岡捷二：「淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価」,水工学論文集,第 54 巻, pp.1267-1272, 2010.

(注) ※の写真・図は、(株) 西日本科学技術研究所の提供