

# 河岸侵食対策のための 目標澇筋による水制群設計法

## GROYNE DESIGN METHOD USING TARGET THALWEG FOR RIVERBANK PROTECTION

松木洋忠  
Hirotada MATSUKI

正会員 工博 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課（〒100-8919 東京都千代田区霞が関2-1-3）

This report proposes a design method of groynes for riverbank protection. As a time-honored precedent, Niyodo Groynes in Kochi, Japan implies a natural process of focusing and dispersing flow, developing pool-riffle-bar and shifting thalweg during a flood event. Traditional river engineering indicates essences of groyne techniques to fix thalweg on riverbed, create calm water zones at riverbank and maintain the channel at the minimum cost. These previous knowledges suggest a new design concept of “target thalweg method” which was used to determine parameters of a series of groynes at La River in Ha Tinh, Vietnam. This is an interactive approach to make intentional impact to and wait expected reaction from the river, so that it is applicable to sustainable river management for erosion control, water intake security and natural habitat conservation.

**Key Words:** groyne, traditional river engineering, flow focusing and dispersing, pool-riffle-bar, shifting thalweg, calm water zone, target thalweg

### 1. はじめに

持続的な河川管理のためには、洪水時の安全確保、安定した水利用、良好な河川環境の維持が必要である。本編では、流送土砂のある蛇行河川における水制群を用いた河岸侵食対策について報告する。

筆者はこれまでに、高水位期の土砂堆積を低水位期の河岸の押え盛土とする「メコン川における河岸侵食対策のための連続水制工<sup>1)</sup>」、根固めで河岸前面の流速を低下させる「ベトナムにおける土砂堆積を用いた河岸侵食対策<sup>2)</sup>」について報告した。本編は、より汎用性の高い河岸侵食対策としての水制群の設計事例である。

モデルとしたのは仁淀川中島地先の一連の水制群である（写真-1）。ここでは5基の水制工が一体として機能して、堤防にとって安全な場所に澇筋を誘導しつつ、長期的に安定した淵と瀬と砂州を形成している。

この水制群の機能を、筆者はベトナム国ハティン省のラー川において、「目標澇筋」の考え方をを用いて再現した。目標澇筋とは、洪水が河岸侵食を起こさずに流下できる河岸保護ラインであり、個々の水制を設計するための基準となるものである。これは現地に限られた予算で

施工可能であり、長期的に維持管理可能な河岸保護対策である。

この手法は水制を用いて河川に働きかけ、河川の自然の力を利用して河岸の安定を図る手法である。予算制約のある河岸侵食対策として有効であるとともに、長期的に低コストで河道を維持管理する手法として応用できる。

以下に、河岸侵食の一般的な特徴と伝統河川技術の考え方を整理した上で、仁淀川水制群の機能を評価する。その上で、ラー川水制群の設計手法と設計諸元を示す。



写真-1 仁淀川中島地先の水制群（2016年撮影）

## 2. 河岸侵食の一般的な特徴

河道は、水と土が移動する空間である。河床地形は、上下流方向に均一ではなく、流量の増減によって刻々と変化し、また、長期的にも変遷する。河岸侵食とは、流水の掃流力と河岸の対抗力の平衡状態が損なわれる現象である。ここでは、湾曲河道の外側に発生する河岸侵食の一般的な特徴を整理する。

### (1) 洪水流の集中と拡散

河岸侵食は、湾曲河道の外側で発生する。直進性をもつ流れが曲線部に入ると、外側の河岸の制約を受けて下降して螺旋流を生じる。螺旋流は、曲線部を進むにつれて強くなり、水衝点で最大となった後、下流に向かって拡散していく。

直線部から曲線部に移る単純な河道の場合（図-1）、内側の直線河岸の延長線と外側の曲線河岸の交点で流れが集中する。ここを水衝点とすると、対策が必要な侵食は、湾曲起点から水衝点の間付近から始まることが多く<sup>3)</sup>、ここを侵食始点と呼ぶこととする。

### (2) 淵と瀬と砂州の形成

螺旋流が強くなるにつれて掃流力が増加するため、湾曲河道に入ってから河床は徐々に低下していき、水衝点で最深となる。他方、水衝点の対岸にあたる水裏部には強い掃流力が発生せずに土砂が堆積する（図-2）。

水衝部を過ぎると流れが拡散するため流速が低下して、掃流力が小さくなる。流水が運ぶ土砂が堆積するため、河床は水衝点から下流に向かって広がりながら上昇し、水面近くに湾曲した土砂の高まりが残る。

洪水流が造る河床地形は、流量が減少した平水時に残される（図-3）。水衝点附近の滞筋の痕跡が淵となる。水衝点の対岸には砂州が、また淵の下流端には河道を斜めに横断する砂州が残る。流水は砂州を越えて流れるため、安定した横断砂州があれば淵の水位が維持される<sup>4)</sup>。

### (3) 洪水時の滞筋移動と河岸侵食

平水時には、河床に働く掃流力と河床材料のバランスによって河床地形が維持されている。しかし洪水時には、流量の増減で掃流力が変化し、滞筋が移動する。

洪水時の流量増加に伴って流速が高まり、水面が上昇する。そのため、螺旋流の直進性と掃流力が高まり、滞筋は深くなるとともに湾曲の外側に移動する。洪水流が減少に転ずると、流速と水位が低下し、螺旋流の掃流力が小さくなる。そのため、滞筋は河床侵食の場から土砂堆積の場へと変化する。洪水末期には、滞筋が浅くなり、湾曲の内側へと戻っていく（図-4）。

この過程で、滞筋が河岸に近づき、河岸の安定を損なう現象が河岸侵食である。河岸の土砂が崩落し、一時的

に安定が回復されるが、崩落土砂が洗い流されると再び河岸侵食が進行する。すなわち侵食地形は、過去の洪水時に成立した河岸安定の平衡状態を示すものである。

このように洪水中に滞筋が移動する。また水位上昇によって水面形状が変化すると水衝点の場所が変わることに留意しなくてはならない。いずれにしても洪水末期は土砂を堆積させる好機であるといえる。

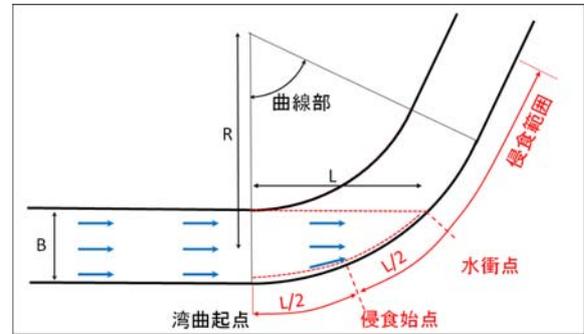


図-1 湾曲河道における流れの集中

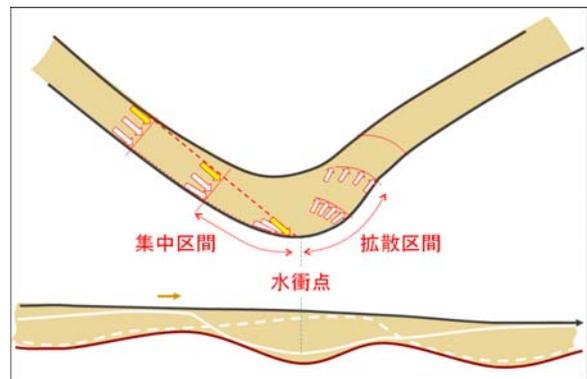


図-2 洪水時の流れの集中と拡散

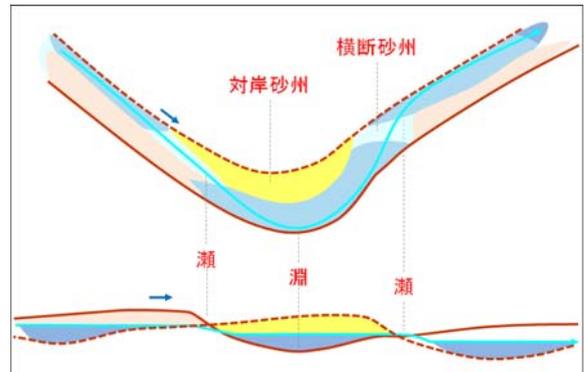


図-3 平水時の淵と瀬の形成

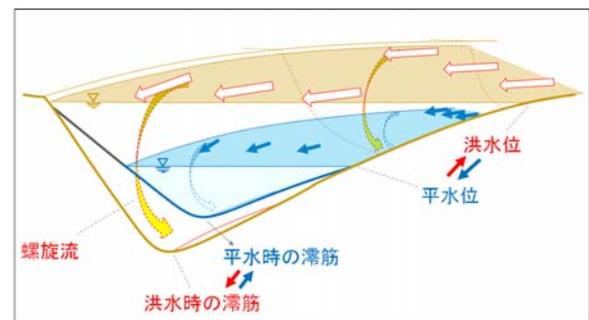


図-4 洪水中の滞筋の移動

### 3. 伝統河川技術における水制

江戸時代以降の技術文献には河岸侵食対策の考え方が記されている。ここでは、伝統河川技術の基本的な原則を確認するとともに、多用されてきた水制の物理的な特性を整理する。

#### (1) 川除仕様帳（水寄せ水制と水除け水制）

18世紀の江戸時代中期に書かれた「川除仕様帳<sup>5)</sup>」は、『川除強く大なれハ川水も又強く大きに集り、其所川瀬不除、深ク堀立是非押崩、其跡普請仕にくき者也。縦又、弓鉄砲者情分強くして堅き物にあたりてハ損ざし、幕に当たりてハ矢も玉もとまりて幕も不損』として、強固な構造物は洪水の力を増大させるので、幕のような柔軟な護岸が望ましいとしている。また水制について、角張った石積で河床を深くする水寄せ水制と、低く出して河床を遠浅にする水除け水制の機能を書き分けている。

#### (2) 治河要録（静水域をもって洪水流を防ぐ）

19世紀半ばの江戸時代末期の「治河要録<sup>6)</sup>」は、『其術、宜しく水の激せざるやうに人つとめて宥むるにあり。其なたむるにハ、滝壺にて其勢を平にするに術あり。譬へハ流川などにて堤の表に水停つこと海の如くなれば、出かかりぬる洪水も、湛たる潜水にて受こたゆるやうになせということなり』として、『水は水にて防ぐ』という諺を河川技術者の秘訣としている。河岸に集中する流れ(写真-2)を滝壺のような静水域(写真-3)で受け止める方法である。滝壺では、鉛直方向に集中する流れが河床を洗掘することでエネルギーを消失しているため、河岸の安全が保たれている。

#### (3) 日本水制工論（積極的な河川維持管理）

20世紀前半の水制技術をまとめた「日本水制工論<sup>7)</sup>」は、『水制とは、これによつて水流の方向を変更せしめ、また水制の蔭に土砂の沈澱を誘致するのを目的とする。水制は寧ろ積極的の工法であり、これを巧に應用する事によつて、河川維持の万全を期し得るであろう』として、護岸を防御一方の工法、水制を積極的な工法としている。また流れに働きかける水制を適切に用いることによつて、長期的な河道の維持管理コストを削減可能としている。

#### (4) 日本の水制（河岸線防御水制）

20世紀末の「日本の水制<sup>8)</sup>」は、『護岸を設置せず、流水を勿ねて高速流が河岸に接近しないようにして、水制自身で河岸を守る工法』は、江戸時代の主流の工法であったとし、これを河岸線防御水制と呼んでいる。このような河川伝統技術の特徴について、「河川審議会管理部会河川伝統技術小委員会報告<sup>9)</sup>」は、川の自然の力を積極的に利用するため、水制工等の活用を推奨し、国際

協力への活用の可能性を指摘している。

#### (5) 水制周辺の水理特性

このような伝統的な活用方法は、水制が流水に与える水理特性のうち、局所洗掘、回り込み流、乗り越し流を効果的に利用している(図-5)。

局所洗掘は、河床近くの流れが水制頭部に集中するために発生する。水制の形状を先端下がりにすることで、その程度を小さくすることができる。回り込み流は、流れの一部が水制の先端から $6\sim 7^\circ$ の角度で偏向する現象である。水制天端の上を通る乗り越し流は、水制の軸の方向に対して直角方向に屈折する。



写真-2 水平方向に集中する流れによる河岸侵食



写真-3 鉛直方向に集中する流れによる河床洗掘

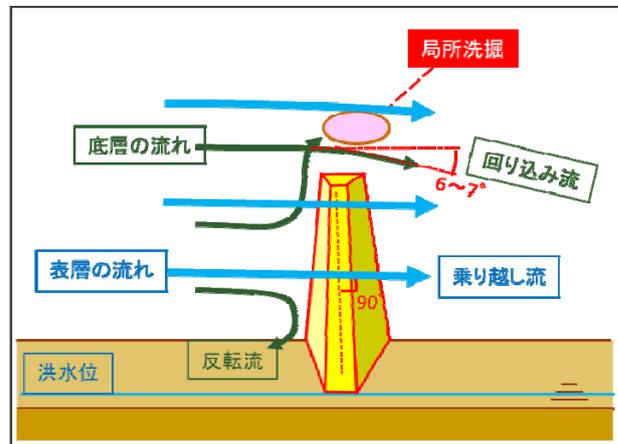


図-5 水制周辺の局所洗掘、回り込み流、乗り越し流

#### 4. 仁淀川水制群の機能

冒頭に紹介した仁淀川水制群は、数百年の長期にわたり機能を維持しており、その有用性は時間が証明している。これまでに示した考え方や水理特性が、どのように利用されているのかを整理する。

##### (1) 流れの集中と拡散

仁淀川水制群は5基で構成される（写真-4）。最上流の1号基は侵食始点にあたり、3号基付近が流れの集中する水衝点で、最下流の5号基から滞筋が河岸を離れる。すなわち上流側の水制は流れの集中区間にあたり、下流側のものは拡散区間に位置している。それぞれの水制の高さはいずれも低く、洪水時の底層流に作用し、表層流には直接的な影響を与えない。

水制群周辺の河床地形は、水制群の頭部は安定した淵であり、対岸には固定砂州が、下流には横断砂州が発達している。

##### (2) 滞筋の固定

流れが最も河岸に近くなる場所に1号基があり、その構造は短く、低く、先端下がりとなっている（写真-5）。そのため、上流側の反転流を発生させにくく、流水から受ける圧力が小さい。そして、河岸に近い頭部附近の河床に局所洗堀を発生させている。

下流に向けて徐々に長くなる2号基以降の水制は、洪水流の圧力を分散して受け止め、それぞれの頭部に局所洗堀を形成する。これらを繋ぐように螺旋流が導かれ、河岸から徐々に遠ざかる滞筋が形成される（図-6）。

##### (3) 静水域の形成

1号基から3号基まででは、水制頭部からの回り込み流が発生する。これが次の水制で反転し、水制間に緩い循環流が生じる。この静水域が底層にあることで、洪水の表層流が河岸に達したとしても螺旋流の発達が抑制されている（図-7左）。

4号基は上向きに置かれており、河岸から離れる方向に乗り越え流を屈折させている。また5号基は幅広の天端をもち、流水に対する抵抗となっている。いずれも水制間と下流側に流速の遅い静水域を形成することに寄与している（図-7右）。

##### (4) 水制による河道の安定

上記の水制の機能は流れの集中と拡散を利用したものであり、河岸に近づいた滞筋は、1号基から徐々に離れていき、堤防は洪水流の直撃を免れている。一方、下流の仁淀川大橋の付近には横断砂州が形成され、橋脚周辺の洗掘リスクが小さくなっている。ただし、水制自身は破損しやすいため、出水後に点検し、変状があれば速やかに機能を修復する必要がある。



写真-4 仁淀川水制群（2012年高知河川国道事務所）



写真-5 仁淀川水制群の1号基（2015年撮影）

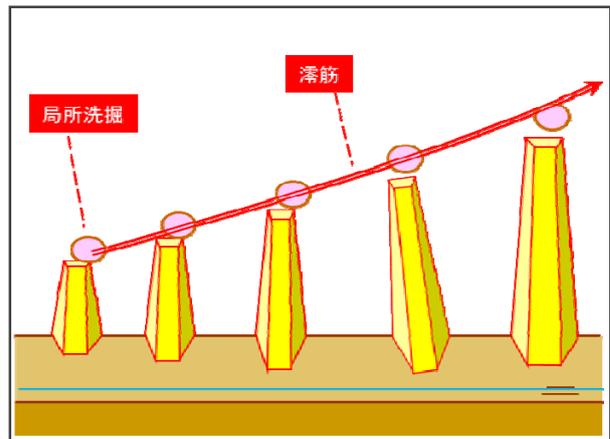


図-6 局所洗堀による滞筋の固定

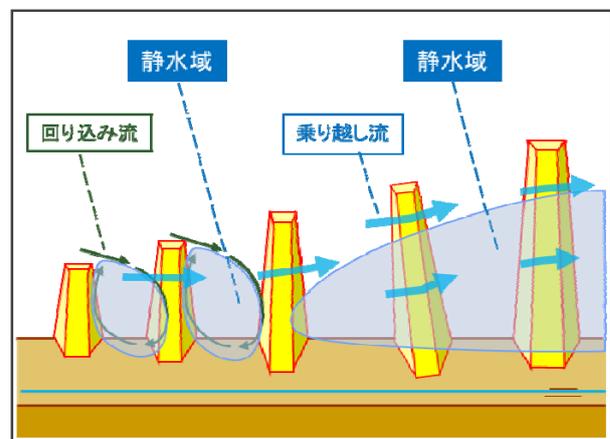


図-7 回り込み流と乗り越え流による静水域の形成

## 5. 目標滯筋による水制群設計

筆写はベトナムでの河岸侵食対策にあたり、低コストで持続的な効果を期待して、仁淀川水制群を参考にした。川の自然の力が安定した滯筋を形成するように水制群を設計したものである。ベトナム国ハティン省のラー川（図-8）において2015年に行った対策事例を紹介する。

### (1) 河岸侵食の状況

河岸侵食周辺の河道の形状（写真-6）は、川幅150mの直線がおよそ1km続いてから約60度の角度で左に屈折する。堤防は河岸から数百m離れて、堤外地にも集落が点在する。一帯は沖積平野の感潮区間であり、河床勾配は小さい。両岸の土質は0.1mm以下の砂質堆積物である。

### (2) 目標滯筋の設定

洪水時には川幅が拡大することから、水位上昇と流速増大は小さい。現地踏査では、河岸は切り立った法面崩落の形状を残していた。最も激しい侵食の場所は地形から判読される洪水の水衝点に一致していた（図-9）。

河床地形測量からは、平水時の滯筋が特定される。これが移動して侵食痕跡を残したものとして、洪水時の滯筋が推定される。この2本を参考にしながら、侵食始点から滯筋が河岸から離れ、かつ、下流河道の中心に向かってるように目標滯筋を設定した（図-10）。

目標滯筋を河岸防護ラインとして、これが最も河岸に近づく地点に最上流の水制を置き、その下流に5基の水制を配置した（図-11）。水制の構造は、予算上の制約、材料入手の容易さ、現地での施工実績を考慮して、石積みとした。なお、施工単価は概ね400USD/mに相当した。

### (3) 設計諸元の設定

6基の水制の設計諸元は、目標滯筋との関係から、次の考え方で定めた（図-12）。

#### a) 水制群の範囲

設計滯筋が河岸に最接近する地点から、河岸から離れていく地点まで。

#### b) 水制の長さ

水制の頭部が目標滯筋に達するまで。

#### c) 水制の方向

目標滯筋に対して直角する角度。河岸に対しては、最上流ではやや下向きになり、下流側では上向き。

#### d) 水制の高さ

対岸砂州の高さ、河岸の比高の半分程度。

#### e) 水制の間隔と基数

下流に向けて間隔を大きく、侵食区間に6基を配置。

#### f) 水制の形状

頭部が先下がりになる形状を基本とし、最上流は1:1.5の急勾配、最下流は1:3.0の緩勾配。

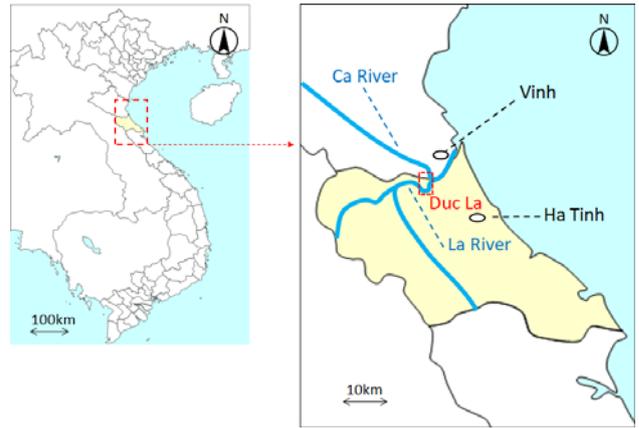


図-8 ラー川の河岸侵食対策現場の位置



写真-6 河岸侵食周辺の河道形状

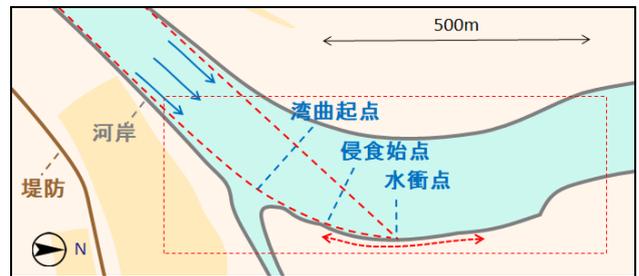


図-9 水衝点と河岸侵食区域

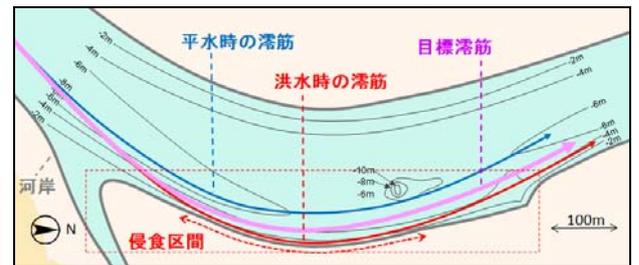


図-10 目標滯筋の設定

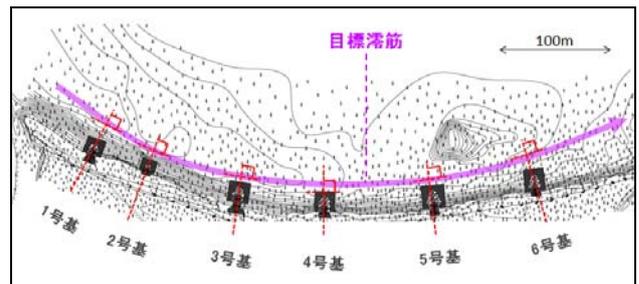


図-11 水制群の配置計画

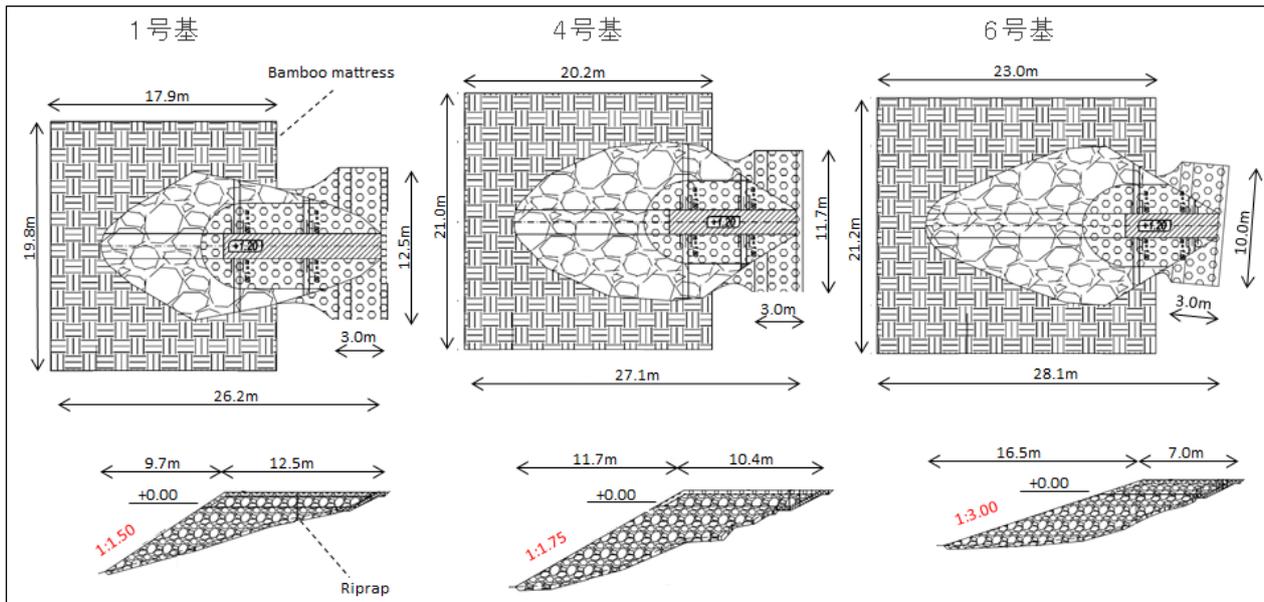


図-12 1号基, 4号基, 6号基の平面図と上流面図



写真-7 ラー川の水制群 (2015年撮影)

水衝点を一点に固定することができれば、河岸侵食対策の必要範囲を限定することができる。

また水衝点が動かなければ、下流の一定の場所に高さの揃った横断砂州が形成される。安定した砂州は河岸や横断工作物周辺の河床低下を予防し、取水が可能な高さに淵の水位を維持する。また流れが分散し、河道の二極化を予防することができる。さらにさまざまな水深と流速を創出して動植物の多様な生息環境を提供する。

このように水制を用いた河道管理には、河岸侵食のコスト縮減のみならず、下流への洪水流達の遅延、利水施設の機能確保、河川環境の改善などが期待される。総合的な河道管理技術としてさらに研究を進めたい。

#### (4) 水制群の効果

2015年に設置したラー川の水制は、その後の3回の洪水期を通じて河岸保護機能を維持している (写真-7)。

ここで用いた河岸侵食対策の設計は、また過去の洪水時の侵食が起こった際の平衡状態を、水制を用いて安全側にずらすという考え方をする。そのため設計にあたっては、侵食状況、上下流の河道形状、周辺の河床地形、調達可能な水制材料など、現場で情報を入手することが基本である。これらを用いて定性的な条件を十分に考察することで、数値データが十分に得られていない場合でも、試験的な設計、施工を行った事例である。

## 6. おわりに

水制群による河岸侵食対策は、単に河岸を護るだけではなく、集中する洪水流に河床洗堀を許容し、流水の運動エネルギーを減衰させることに特徴がある。そのため、

#### 参考文献

- 1) 松木洋忠: メコン川の河岸侵食対策のための連続水制工, 河川技術論文集第19巻, 2013.
- 2) 松木洋忠: ベトナムにおける土砂堆積を用いた河岸侵食対策, 河川技術論文集第22巻, 2016.
- 3) 千田稔: 自然的河川計画, p81~p83, 理工図書, 1991.
- 4) 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察とその適用性に関する研究, p2.14~p2.17, 2011.
- 5) 川除仕様帳, 日本農書全集65, p11, 日本農山漁村文化協会編, 1997.
- 6) 治河要録, 日本農業全集65, p203, 日本農山漁村文化協会編, 1997.
- 7) 眞田秀吉: 日本水制工論, p12, 岩波書店, 1951.
- 8) 山本晃一: 日本の水制, p396~p397, 山海堂, 1996.
- 9) 河川審議会管理部会河川伝統技術小委員会報告, 生活・文化を含めた河川伝統の継承と発展, p3-14, 1999.

(2018. 4. 3受付)