

自然形成型水制(トリピラ水制)の実用性に向けた 実態調査とその考察

STUDY ON A PRACTICAL USE OF A NATURE MADE TYPE GROUYNE (TRI-PYRA GROUYNE)

須賀 如川¹・三品 智和²
Nyosen SUGA and Tomokazu MISHINA

¹フェロー員 工博 特別上級技術者[防災] 宇都宮大学名誉教授 河相工学研究堂 代表
(〒276-0023 千葉県八千代市勝田台4-2-4)

²正会員 博(工) 中央技術株式会社 設計部 河川チーム (〒310-0902 茨城県水戸市渡里町3082番地)

This paper deals with a nature made type groyne which can be called laid triangular sharp pyramid type groyne(Tri-Pyra groyne). Original nature made groyne can be seen at some gravel and stone bed river channels. On the other hand, man-made old groynes of similar shape, called arako groyne, are still functioning at ash-mud bed channels in Kyushu, some are for more than 300 years. Here, considering the rationality of these groynes, stability and function of the groyne were evaluated by field consideration, and 2D calculation. Comparison was also made with another similar groynes. As conclusion, adaptation of this type of groynes, especially Tri-Pyra groyne, is proposed for practical application and the direction of its further development is also suggested.

Key Words : nature made type groyne, tri-pyra groyne, 2D calculation, practical application

1. はじめに

本論文では自然形成型の水制(不透過の越流型)を取上げる。既発表論文¹⁾では、自然形成の造形物が水制機能として合理性を有していることに着目し、単純化した単体としての水理特性について第1段の考察を行った。本論文では基本形状が近似する既存水制(荒籠・石出し水制等)と自然形成水制の実態について、実際面での機能を重視して検討を行い、水制機能を発揮する原因を明確にする。注目した水制とは、水制としての一般的な機能を有しており、自然河川において長期にわたり安定して存在する写真-1のような自然形成の造形物(自然形成水制)である。これをヒントに実河川への適用を考えたのが図-1のようなType1(後述)に示す自然形成“型”水制である。この自然形成型水制をLaid Triangular Sharp Pyramid Type Groyne(Tri-Pyra Groyne)-トリピラ水制と呼称¹⁾する。トリピラ水制の基本形状は、伏した三角錐体を基本とするが、細長い三角形の横断形状と水制先端まで弧を描く平面形状である。本論文の特徴は、これまで注目されることのなかった自然の造形物が有する水制機能を総合的に評価したことである。そして、これは既

に実在するものの改良であることから、信頼性は高いと評価され得るものであり、今後の実用化への発展に資することを目的としている。

本論文の構成を以下に示す。

- 1) 自然形成の造形物の実例として、怒江(中国)や富士川(禹之瀬地先)等の実態調査を通して、自然形成の造形物の水制効果とその実用化に関する一般事項の検討を行う。
- 2) 類似水制として、水制先端部が鋭角で、かつ側面が斜面となっている2つのタイプの水制(荒籠・石出し水制)を取上げ、実態調査及び2次元流況計算を行い、これらの改良型ともいえるトリピラ水制との比較検討を行う。
- 3) トリピラ水制の実用性に向けて、適用性・流況改善・安定形状等に関して、水理計算を含めた総合的な考察を行う。また、施工性や環境関連事項にも言及する。

2. 自然形成の造形物の水制としての評価

(1) 大礫構成の河岸堆積物の水制機能

水制周辺の局所洗掘軽減に対する斜面の効果については、荒籠の安定性等の事実からかねてより認識していたが、今回のトリピラ水制提案の直接のきっかけは、写真

-1に示す怒江(中国雲南省)で見られる自然形成の河岸堆積物とそれによる自然の流れにある。怒江は標高5000mクラスの石灰岩主体の山岳地帯を流下する三江併流(東から長江上流の金沙江, メコン川上流の瀾滄江, サルウィン川上流の怒江)の一つで, ほとんど手つかずの原始河川である。表-1に現地観測に基づく怒江の河道緒元の推定値を示す。着目すべきは, この自然形成の河岸堆積物が水制機能を有しており, かつ長期間に亘り安定していることである。

まず河岸堆積物の形成について述べると, その構成材料は大礫を含む混合粒径であり, 径1m超の巨石が少なくない。巨石の生産源は, 角ばった材料から判断して上流からの輸送ではなく, 河岸近傍の山岳からの供給によるものと考えられる。また, 流送土砂量は玉石や砂利・砂で構成される砂州の発達が限定的なこと, 及び流末部デルタの発達が著しくないことから, 比較的少ないものと判断される。このような河道条件下において, 河岸堆積物の発達過程は, 雨期洪水時の大礫によるジャムアップ効果の繰返しによって, 徐々に規模を拡大し安定性が増大したものと考えられる。この一連の現象は, 大礫を含む混合粒径河道で生じる横筋大礫帯²⁾の形成と類似している。なお, 河岸堆積物の安定性は, 複数の長老住民へのヒヤリングから大洪水の影響が少なく, 少なくとも50年以上はほぼ不変とのことである。

次に河岸堆積物の水制機能について述べると, その河道中央側に突き出た孤状の平面形状と緩い傾斜の側面形状, 及び大礫・巨石で覆われた表層の構造は, 洪水流に対する十分な抵抗を有している。水制としての機能が発揮されるのは, 大流量時には河岸洗掘の抑制・河道中央部での主流の形成・河岸堆積物への影響軽減などである。中小流量あるいは大流量時の減水期には, 写真-1に示すように河岸堆積物沿いの流れが形成され, 振れ幅の大きい蛇行が生じている。その安定性は, 実際に何れの河岸堆積物においても, 周辺の局所洗掘や河岸侵食を受けた痕跡が確認されていないことから, 比較的長期に亘り安定していると判断される。

(2) 自然形成水制の実用面への適用

前述の怒江の河岸堆積物の水制機能を活かして, ここでは自然形成水制の実用面への適用を述べる。水制機能を有した河岸堆積物は, 実際には怒江以外に国内においても, 笛吹川の琴川合流点付近, 富士川南部町地先等においても存在する。この河岸堆積物の形状は, 必ずしも自然形成だけとは限らず, 既存の捨石工や石出し水制等

表-1 怒江(中国雲南省)の河道諸元

最大流量 ^{※1}	4000 m ³ /s	平均勾配	1/400
最大流速	4.3 m/s	乾期流水幅	70~100 m
雨期流量	2000 m ³ /s	乾期水深	2~4 m
乾期流量	80~150 m ³ /s	礫の地質	石灰岩主体

※1: 住民ヒヤリングによる最高水位と土地利用状況等から判断



写真-1 怒江(中国雲南省) ※線は中小洪水時の流れ線



写真-2 テベレ川(イタリアローマ)



写真-3 網走川の水制³⁾

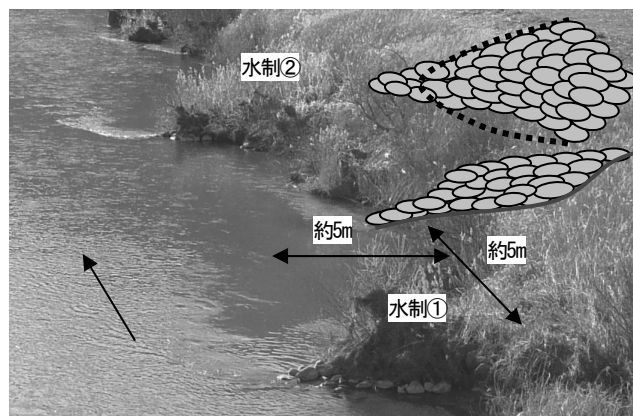


写真-4 富士川(禹之瀬地先)

からの変移で形成されることがある。例えば、写真-2はイタリアのテベレ川(ローマ)を示したが、護岸前面の捨石工は施工当初は直線的であったと推定される。波状形状に変移した理由としては、洪水を繰返すことで捨石の離脱・輸送・堆積が生じ、かつ大礫のジャムアップによる捨石の集積によって安定したことが原因と考えられる。その波状間隔は、怒江と比べて洪水流量と礫径が極端に小さいこともあり、やや狭い間隔を呈している。しかも、写真からは捨石突端に鋭角な突部が形成されており、捨石工が中小洪水流量以下に対しても流れを蛇行させる水制機能を有していることが確認される。写真-3に示す網走川では石積技術を適用して、約2mの城壁のような水制が建設された³⁾。天端は平坦だが平面的には三角形状である。荒籠より鋭角と評価され、この時点で竣工後1年程度であるが、今後露床もある平坦な河道との調和が注目される。

次に既存の石出し水制が自然形成水制に変移した事例として、富士川禹之瀬地先の石出し水制を取上げる。当該地区の河道諸元は、既往最大流量6800m³/s(S57)、平均河床勾配1/300、最大流速約5m/sである。石出し水制は、富士橋直下流60mの右岸の直線河道区間に2基存在する。写真-4は富士川橋より撮影したもので、写真右上には石出し水制の概略図を示した。点線は施工直後の平面形状である。施工年代の詳細は不明であるが、平成18年には既に存在する。水制諸元としては、2基共に水制長約10m・水制高約1.2m・水制幅約10mであり、構成材料は径40～70cmの巨石である。また、水制間隔は水制中心間で約60mである。

調査結果として、施工直後の平面形状は水制先端を中心に左右対称であり、水制上流側は現在のような孤状の平面形状ではなかったと考えられる。現状に至る過程には、水制上流側の河岸接続部の巨石の移動があり、その移動した巨石による水制先端部での巨石の集積があった。さらに以降の洪水によって巨石のジャムアップが繰返され、集積部の安定化が得られたと判断される。その巨石の集積規模は、水制先端より横断方向に2m程度であり、水制先端の深掘れは殆どない。しかも、水制先端には鋭角な突部の形成があり、中小洪水時には河岸沿いから河道中央側に円滑した洪水流が生じたものと推測される。

上述の調査結果を受けて、トリピラ水制の基本形状は自然形成の河岸堆積物に似せた三角錐体を基本とするが、より伏した細長い横断形状と水制先端まで弧を描く平面

表-2 2次元流況計算の計算条件

	Case1	Case2
水制基数	1基	2基
水制間隔	—	30m(水制中心間隔)
水制諸元	水制高: 2 m 水制長: 5 m	水制高*: 2 m 水制長*: 10m *下流側の水制, 上流側はCase1と同じ
	水制タイプ: 3タイプ Type1: トリピラ水制, Type2: 石出し水制(三角錐型), Type3: 荒籠水制(先丸型)	
Case1・2共通	河道データ: 縦断延長100 m, 横断幅60 m 河床勾配: 1/200, 粗度係数: 0.035 流量: $Q=500 \cdot 1000 \cdot 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (定常流) メッシュ: $401 \times 241 = 96,641$ 1メッシュ: $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ (直交座標)	

形状とした。その曲線形状は、今回は仮に図-1のType1に示したように $a : b : c$ の比率で示すと、概ね a を基準に $a : b : c = 1 : 1.0 \sim 1.3 : 0.1 \sim 0.3$ 程度とした。

3. 水制3タイプの2次元流況計算

ここでは、2次元流況計算⁴⁾を用いてトリピラ水制と基本形状が近似する石出し水制(三角錐型)・荒籠水制(先丸型)の計3タイプの水制について、流況比較を行う。もとより2次元計算では厳密さを欠くことは否めないが、本論文では2次元性の大きな流れを対象とし、かつ既発表論文¹⁾で取扱った類似水制周辺(荒籠)での洗掘量が軽微との実験結果を踏まえて、水平軸渦の発生を無視すると推定し、2次元計算による再現性の信頼は高いと判断して計算を実施している。図-1は水制3タイプの立体図である。Type1は本論文で提案するトリピラ水制である。これは三角錐体を基本とするが平面・横断共に局面形状を呈している。Type2は石出し水制を模した三角錐体の水制であり、Type1に対して直線形を呈している。Type3は九州有明海を河口に持つ潟土河川(ex. 六角川・嘉瀬川・矢部川・筑後川等)に現存する荒籠(アラコ)を模した水制(ただし、天端の平坦部をトリピラ水制に近い形状とした)である。荒籠の形状は、水制先端に向けてトリピラ水制とは逆に孤状(凸面)の形状を呈し、先端は丸みを持つ。荒籠の役割としては、潟土河岸の維持以外にも舟運が盛んな時代には、航路維持(水深確保)として設置⁵⁾されており、現存する荒籠には300年以上の歴史を誇

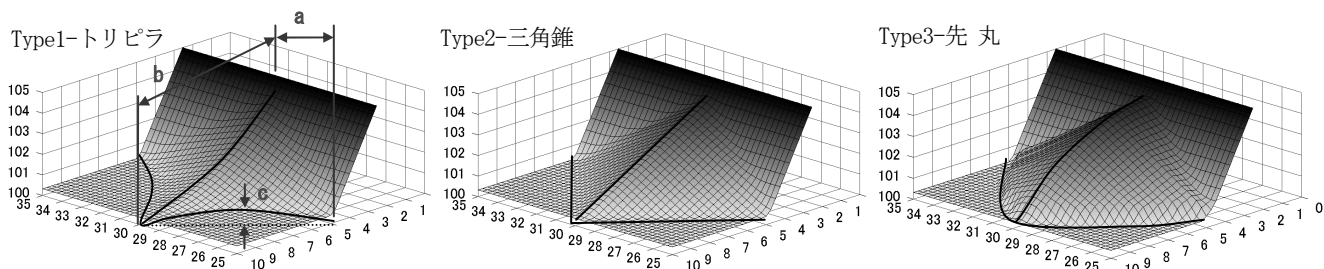


図-1 3タイプ水制の立体図 ※x, y, z座標の単位: m

るものも存在する。

3タイプの流況比較として、まずCase1では単体水制における流況特性の比較検討を行い、水制形状の違いによる流況変化の特徴を明確にする。次にCase2では水制群としての水制効果について、水制2基を設置した場合の流況比較を行う。最近では大礫を含む混合粒径の砂礫河川において、中小流量や大洪水の減水期等に護岸前面のみおの鮮明化が顕在化し、それが引き金となって大規模な河岸侵食力を有するクランクフローに発達することがある⁶⁾⁷⁾。河岸沿いみおの鮮明化の抑制対策の一つとして、水制工が期待される。そこで、2次元流況計算では下流側の水制規模を若干大きくし、流向の円滑化と河岸沿い流速の緩和に関する水制効果を確認することとする。なお、表-2は2次元流況計算の計算条件を示しており、今回は日本で多く見られる扇状地河道($i=1/200$, $n=0.035$)を想定して計算を行うこととした。

(1) 単体水制としての水制効果

単体水制の流況特性について、図-2はCase1における0.5m/sピッチの流速コンター図である。主な結果を以下に列挙する。

- 1) 水制設置による流況変化の拡大範囲は、流量 $Q=500 \cdot 1000 \cdot 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 共にトリピラ水制(Type1)が最も小さく、次いで三角錐型水制(Type2)、先丸型水制(Type3)の順である。特に $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 時には、3タイプ共に水制先端部($x=30$, $y=10$)より下流側において流速の極大値を示しており、なかでもType3が水制部より最も離れ、 $x=50 \sim 57.5 \text{ m}$ で $v=5.5 \sim 6.0 \text{ m/s}$ の流速値を示している。
- 2) 水制本体での最大流速部は、3タイプ共に水制中心より下流側で発生しており、その最大流速部は $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 時において、Type3が最も高く9.5m $\sim$ 10m/s、次いで

Type2で9.0 $\sim$ 9.5m/s、Type1で7.5 $\sim$ 8.0m/sである。

3) 水制背後には図-2に示したように、時計周りの平面渦の形成が見られる。その渦は $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 時には3タイプ共に渦が発生しており、その縦断範囲はType3が大きく水制先端部($x=30 \text{ m}$)から渦中心($x=50$)まで約20mである。次いでType2で約17m、Type1で約8mである。また、Type1とType2では流量増大($Q=1000 \cdot 2000 \text{ m}^3/\text{s}$)により渦の規模は縮小傾向にあるが、Type3だけは $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 時に渦の範囲が増大し、かつ複雑性を増している。ただし、Type3の $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 時には渦の規模は縮小している。

(2) 水制群としての水制効果

群体水制の流況特性について、図-3はCase2における0.5m/sピッチの流速コンター図である。また、図-4はCase2における水制による流速拡大の程度を示す指標の角度と流量との関係図である。なお、図-3には流量ケース毎に、簡単のため平均断面流速(水制設置無し)の1 $\sim$ 5割増しの範囲について、上流側水制の先端部($x=30$, $y=10$)を基準に点線の直線で示し、その角度で比較している。また、図-5には河岸沿いの流速分布として、 $y=5 \sim 10 \text{ m}$ 範囲の最大流速を縦断方向に示している。以下に主要な結果を列挙する。

- 1) $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 時の流速コンター図(図-3)から流速拡大の範囲は、Type1 $\cdot$ Type2 $\cdot$ Type3の順で拡大している。特にトリピラ水制(Type1)は 20° とType3の 60° に対して1/3であり、流速拡大の範囲は狭い傾向を示している。
- 2) 流量と流速拡大範囲の関係図(図-4)からトリピラ水制(Type1)は、流量増大によって流速の拡大範囲が増大する比例関係にあるが、他の水制(Type2 $\cdot$ Type3)は $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 時の流速拡大の範囲が大きく、 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 時には一旦減少し、 $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 時に再び増大する傾向を示し

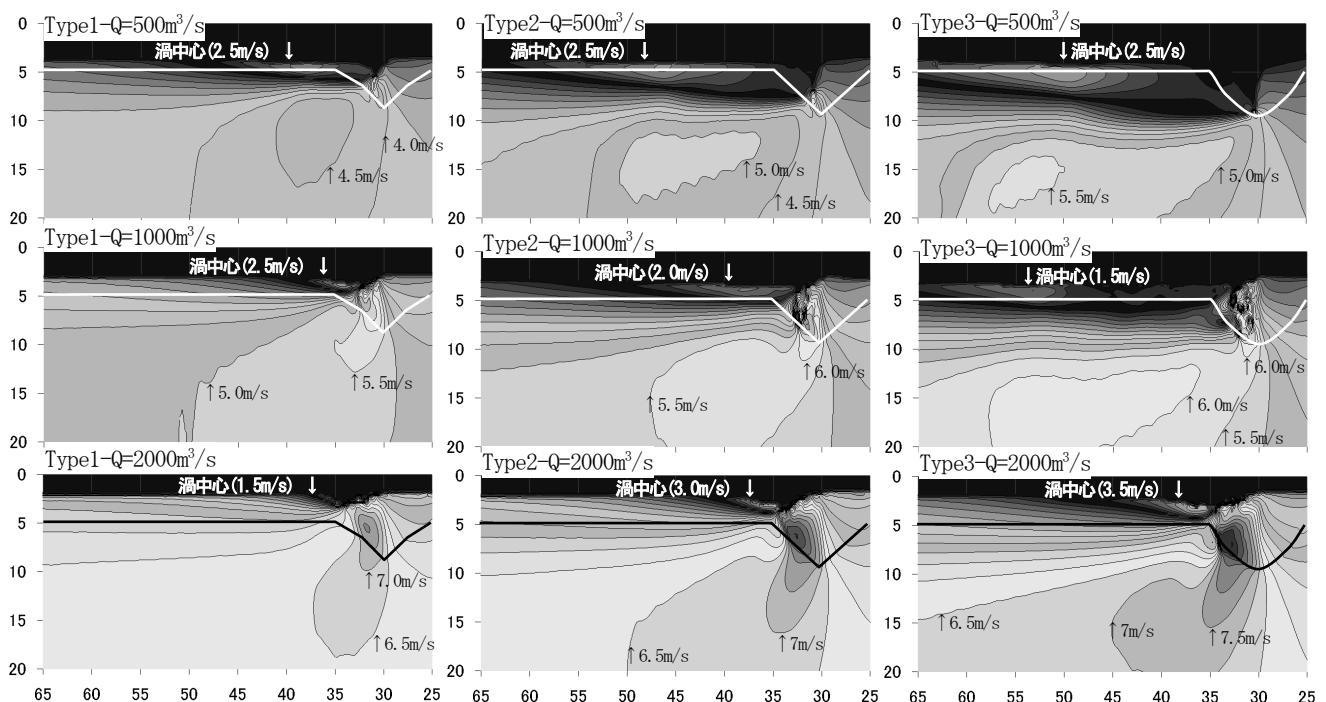


図-2 流速コンター図 (Case1) ※流速値: V_x, V_y の絶対値, コンターピッチ: 0.5m/s, xy座標の単位: m

ている。ただし、3タイプの $Q=1000$ から $2000\text{m}^3/\text{s}$ に掛けての流速拡大範囲の拡大傾向は、同程度である。

3) 河岸沿い流速の縦断分布(図-5)からは、水制設置が無い場合の等流速が $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ で約 3m/s 、 $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ で約 4.5m/s 、 $Q=2000\text{m}^3/\text{s}$ で約 6m/s とすると、上流側の水制($x=30$)では、Type2とType3は水制の上流側に流速の低減が見られる。一方、トリピラ水制(Type1)は $Q=500 \cdot 1000\text{m}^3/\text{s}$ 時に水制の上流側、約 10m ($x=20\text{m}$)まで流速が増大し、それより上流側で水制の影響が少なく、ほぼ等流速と近似する。また、水制下流側の流速の低減効果は、上下流の水制共にType3が最も低減効果があり、次いでType2・Type1の順でトリピラ水制の低減効果は小さい。

4) 洪水流が水制本体に与える影響については、 $Q=2000\text{m}^3/\text{s}$ 時の河岸沿いの縦断分布(図-5)から判断すると、3タイプ共に水制付近で局所的な流速増大が確認されるが、なかでも先丸水制(Type3)の局所流速が大きく、特に上流側水制で顕著である。

4. 自然形成型水制の実用性に関する考察

トリピラ水制の特徴としては、通常の不透過の越流型水制の一般的機能を有し、かつa)水制周辺の洗掘量が小さいことから水制自体の安定性が大きく、河岸保全に有効的であること、b)2次元計算による想定流況から流れ

の流況改善の計画立案が簡便であること、c)施工性・コスト・景観等に優れていることなどが考えられる。

(1) 現地調査に基づく考察

自然形成水制は、斜め状(孤状)の平面形状、斜面の側面形状に特徴がある。類似タイプ(荒籠・石出し水制)は斜面の効果があり、越流すれば流速が増大し、周辺の洗掘が生じている。トリピラ水制は類似タイプを自然形成水制にならって改良したいものと位置付けられる。トリピラ水制周辺では大きな局所洗掘がないものと推定できることから水平軸渦の発生は顕著ではなく、2次元計算による再現性は高く、今後の設計に応用可能と考えられる。トリピラ水制は自然形成を基本とすることから自然の姿に近く、その景観も評価されよう。また、トリピラ水制周辺の局所洗掘が小さいことは、基礎工軽減の可能性を高め、その場合には仮締切の省略の可能性も大きく、工期短縮も考えられ、コスト面でも優れていると推定される。

(2) 2次元計算に基づく補足事項

トリピラ水制の流況特性について、石出し水制(三角錐型)と荒籠(先丸型)を加えて、計3タイプの2次元流況計算による流況比較を行った。その結果、まず単体水制として見た場合、トリピラ水制は他の2タイプと比べて、水制周辺への流況変化の拡大範囲が小さく、水制本体の局所流速が小さい傾向を示している。特に大流量時

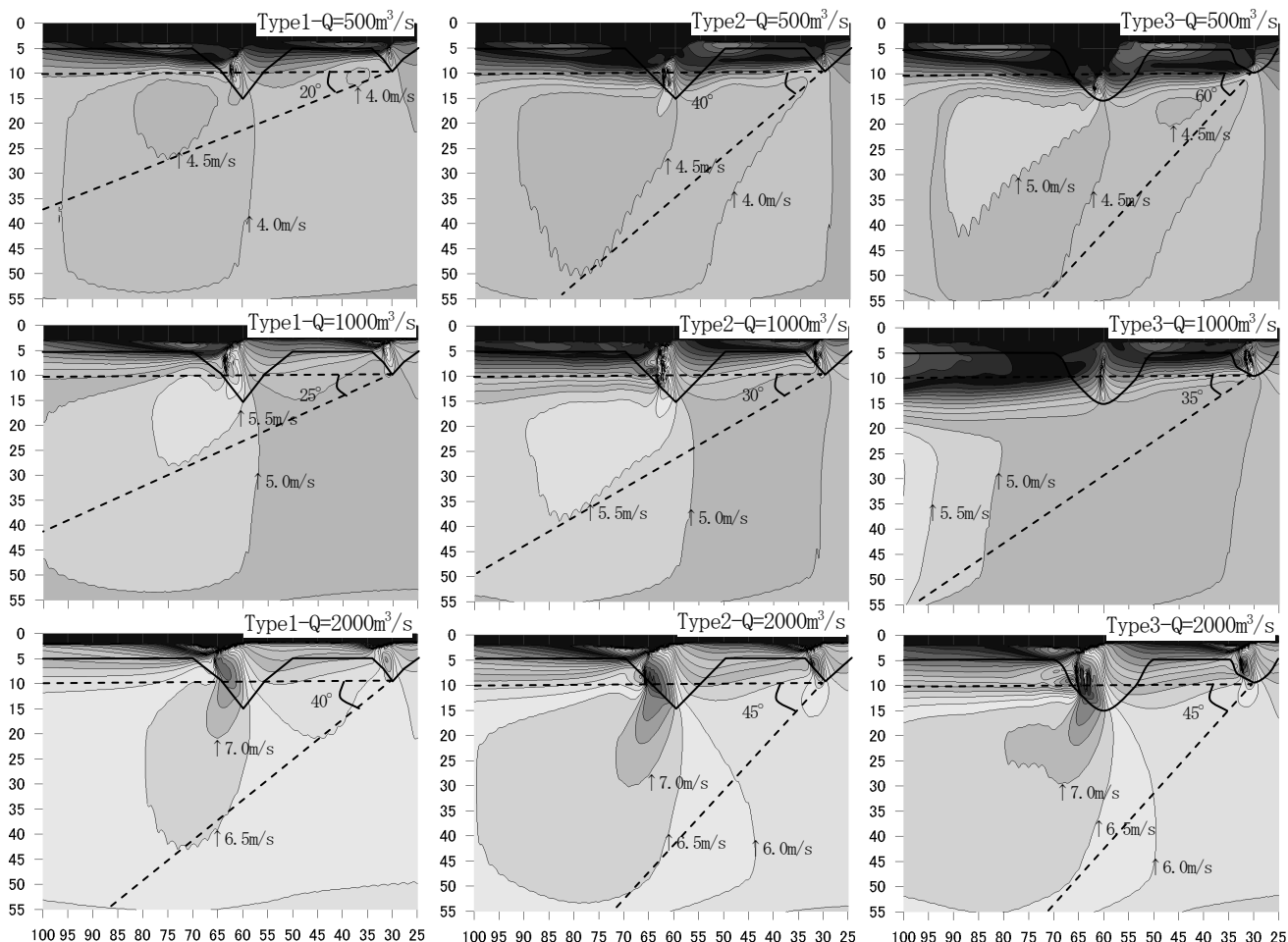


図-3 流速コンター図 (Case2- $Q=500\text{m}^3/\text{s}$) ※流速値: V_x, V_y の絶対値, コンターピッチ: 0.5m/s , xy 座標の単位: m

(ex. $Q=2000\text{m}^3/\text{s}$, 平均断面流速: 約 $6\text{m}/\text{s}$) の場合, 水制本体の最大流は, 荒籠 (Type3) が $9.5\sim 10\text{m}/\text{s}$ に対して, トリピラ水制 (Type1) は $7.5\sim 8.0\text{m}/\text{s}$ であり, 流速が $2\text{m}/\text{s}$ 程度低減している. このことからトリピラ水制は洪水流に対する抵抗を抑える効果があるものと判断される. また, 水制背後の渦形成について, トリピラ水制は他の2タイプに比べて, 流量増大とともに渦規模が縮小傾向を示し, その流速は $2.5\text{m}/\text{s}$ 以下である. このことから実河川でトリピラ水制を適用した場合, 小流量時には河岸前面の寄州形成を促進し, 大流量時には河岸堆積物への影響が軽減されると推定される. 次に水制群として見た場合, トリピラ水制は河岸沿い流況改善, 及び対岸への円滑な流速拡大にも効果が期待できる. その効果として, 流量増大とともに対岸への流速拡大の範囲は連続して拡大しており, 他の2タイプ (三角型・先丸型) と異なる. 他の2タイプ水制は小流量 (ex. $500\text{m}^3/\text{s}$) での流速拡大が大きく,

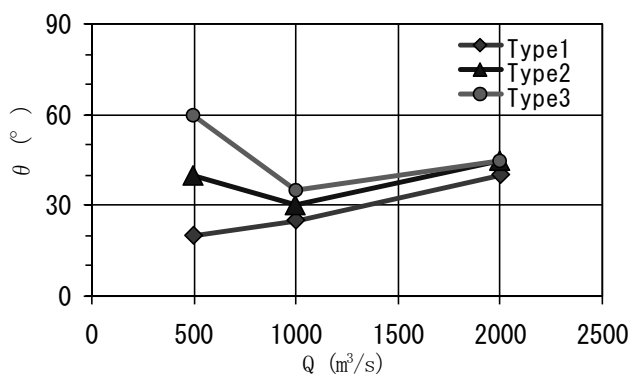


図-4 流量と角度で示した上流側水制の影響範囲の関係 (Case2)

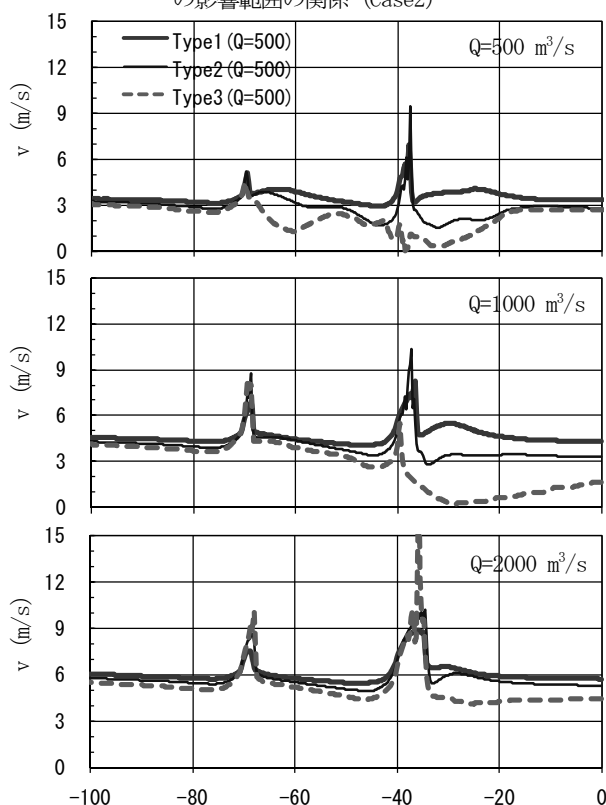


図-5 河岸沿い流速の縦断分布 (Case2)

その後流量増大によって流速拡大範囲が減少し, 再度増加するような不連続な流速拡大変化を呈している. このことから, トリピラ水制は洪水流量に応じて連続した流速拡大が期待できる点で優れているとみなしうる.

5. 結 論

本論文で自然形成型水制 (トリピラ水制) に関して, 自然形成水制及び基本形状がそれと近似する既存水制 (荒籠・石出し水制等) を取上げ, トリピラ水制の実用性に向けて実態調査と2次元流況計算に基づく考察を行った. 以下に主要な結果を示す.

- 1) 現地調査によれば, 自然形成水制及び類似水制の着目点は, 水制周辺の洗掘量が小さい点にある. これは水平軸渦の主因となる局所的な流れの3次元性が低いことを示すと考えられる. これにより長期的な河岸維持と蛇行流路の安定を実現していると判断される. トリピラ水制はこれらの利点を取り入れたものであり, 合理性があり, かつ実用性が高いものと位置付けられよう.
- 2) 既発表論文¹⁾によると, 自然形成型水制周辺の流れに関しては, 2次元計算による再現性の近似度が大きいと考えられるが, これによるとトリピラ水制は荒籠等の類似水制より流況が円滑であり自然的な流れであることが判明した.
- 3) 水制の計算に2次元計算を活用しうるのは, 合理的設計に役立つ. また, 今後の河川への適用として仮締切や基礎工の縮減・省略の可能性もある. なお, トリピラ水制は自然形成の形状を基本としていることから環境面や景観面でも歓迎されよう.

参考文献

- 1) 須賀如川・三品智和: 自然形成型水制の合理性に関する第一段の考察, 水工学論文集, Vol. 54, pp. 1033-1036, 2010. 2.
- 2) 須賀如川: 大礫を含む混合粒径河川における河道システムの本質に関する考察, 河川技術論文集, Vol. 10, pp. 95-100, 2004. 6.
- 3) 佐々木葉・河合隆富: 網走川の挑戦, 建設業界 CE (2月号), 日本工業協会, Vol. 159, 2010.
- 4) 水理公式集例題プログラム集: 平成13年版.
- 5) 市山誠・山本善光・古賀忠直・今村久代: 筑後川城嶋地先における荒籠修復の実験による検討, 土木学会年次学術講演会, Vol. 61, 2006. 9.
- 6) 須賀如川・三品智和・唐沢潔・竹内清文・古川保明: 発散・収束河道のクランクフローに関する現地調査とその考察, 水工学論文集, pp. 979-984, Vol. 50, 2006. 2.
- 7) 須賀如川・三品智和・長谷部正彦・池田裕一: 大礫中州と2列蛇行の水理特性に関する考察, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 775-780, 2008. 2.

(2010. 4. 8受付)