

治水と環境の両立を目指した河道湾曲部の側方侵食を活用した拡幅形状の設定法

LOCAL RIVER WIDENING METHOD IN ERODED SPACE IN A CURVED CHANNEL ON THE BASIS OF NATURE-ORIENTED FLOOD PROTECTION

河野誉仁¹・大槻順朗²・中村圭吾¹・林田寿文³

Takanori KONO, Kazuaki OHTSUKI, Keigo NAKAMURA and Kazufumi HAYASHIDA

¹正会員 博（工） （国研）土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
（〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地）

²正会員 博（工） 山梨大学大学院助教 総合研究部工学域 土木環境工学系
（〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11）

³正会員 博（環境科学） （国研）土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター（同上）

The local river widening (LRW) has attracted attention as a technique that contributes both flood control and environment. However, it is rarely applied for post-disaster restoration because there is no specific study on how to plan the widening design. In this study, the LRW of a small to medium-sized river in a mountainous area to alluvial fan area was investigated in the context of both flood control and environmental conservation using two-dimensional simulation of riverbed deformation, assuming lateral erosion at the bend. As a result, it was found that the LRW in eroded section benefits both flood control and environment. However, it is important to pay attention to the design of the downstream attachment section in the LRW using the eroded part in the steep river. It was also found that it is useful to have a simulation tool that can be use in parallel with flood control and environmental consideration.

Key Words : local river widening, morphodynamic simulation, gravel bed river, nature-oriented flood protection, sediment storage

1. はじめに

我が国の中小河川では治水中心の狭く深い単断面河道への改修がおこなわれることがあり、環境の単調化や洪水流を早く流すことで下流域の水災害を誘発することが懸念される。そのため治水と環境の調和した川づくりの取り組みが求められている。近年、環境創出面から有意的な技術の一つとして「部分拡幅工法」が注目されている。海外ではLocal river wideningと呼ばれ、直線化された河川での部分的な拡幅によって拘束を除去し、川の営力によって河川環境を改善する取り組みとして盛んに実施されている。スイスのThur川（低平地）やイタリアのMarcit川（山地～扇状地）等、多様な環境の創出に成功している²⁾。国内でも自然再生を企図した河川改修で拡幅が実施されており、部分的拡幅部が特徴的な環境の形成に寄与しているという報告がある³⁾。

一方で、部分拡幅は特に中小河川において近年頻発する豪雨災害における「土砂・洪水氾濫」による被災状況

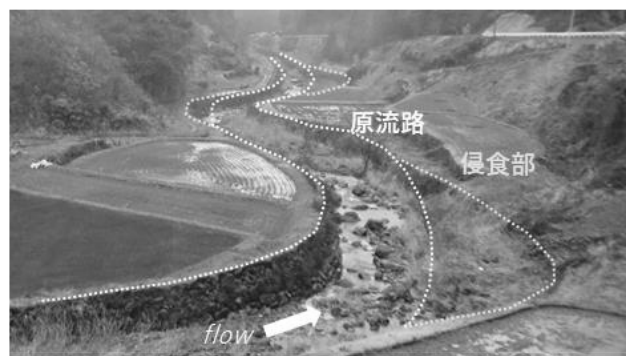


写真-1 侵食地形を活用した災害復旧が行われた五ヶ瀬川水系山附川（2019年3月撮影）。白点線は原流路、黄点線は侵食部を表す。

から、土砂対策としても注目されている。国土技術政策総合研究所資料「河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫対策に関する砂防施設配置検討の手引き」⁴⁾によれば、土砂・洪水氾濫による被害が発生しうる扇状地や谷底平野、下流平野、支川の合流部等を対象に、砂防堰堤等の土砂流送制御を目的とした施設により河道内に土砂を捕

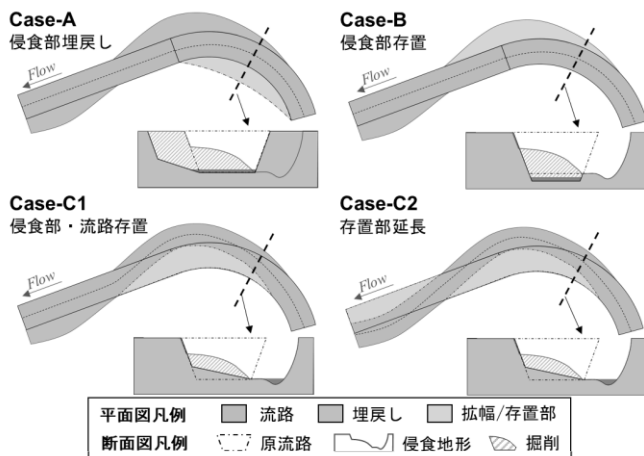


図-1 検討した4つの地形モデルの概念図

表-1 計算ケースごとの想定項目

検討ケース	流路	拡幅部	直線部	河岸防御
① Case-O	一様断面	-	-	-
Case-O'	侵食地形	-	-	-
Case-A	原位置	埋戻し	-	-
Case-B	原位置	存置	-	-
Case-C1	存置	-	-	-
② Case-C2	存置	-	流路延長	-
Case-A+	原位置	埋戻し	-	護岸
Case-C2+	存置	-	流路延長	護岸
Case-C2++	存置	-	流路延長	護岸+水制

捉することを目指している。つまり出水後の河道での土砂負荷分担を期待する動きであり、近年の想定以上の局所集中豪雨の発生頻発に鑑みれば、河道がそのような機能を一定程度担保するための技術的検討が必要だろう。

治水と環境の両立を目指した国土交通省の「中小河川に関する河道計画の技術基準について」の解説書である多自然川づくりポイントブックⅢ⁹⁾において、川幅の拡幅については、旧河道部の活用、片岸拡幅による対岸の保全に加え、「被災によって広がった川幅はできるだけ維持する」ことを推奨している。この意図は自然の特性やメカニズムによる良好な環境形成を狙ったものである。一例として、step-poolを呈する山地溪流の五ヶ瀬川水系山附川では湾曲部の側岸侵食を受けたスペースを存置した災害復旧がなされ⁶⁾（写真-1）、その後の環境形成も良好である。一方、扇状地区間で同様に湾曲外岸侵食部を利用した整備を行った岩手県・雫石川では、続く出水によって部分的に被災を生じており、部分拡幅が必ずしも技術的に容易でないことを示している⁷⁾。

部分拡幅の技術的困難さは、現象の3次元性が強いことに大きく起因している。他方、近年地形の3次元的測量やその解析技術が発展しており、河川の3次元性をそのまま取得、モデル化し、設計の評価に活用する「河川CIM」と呼ばれる枠組みが整いつつある。河川CIMは治水上の検討とともに環境上の検討を並行して行うためにも活用が期待されるものである⁸⁾。

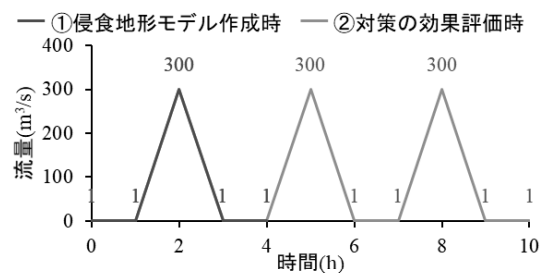


図-2 入力ハイドログラフ

こうした背景から、本研究では、部分拡幅工法に着目した具体的な設計法と注意点の明示を目的とし、特に湾曲部の側方侵食被災を想定した部分拡幅工法について治水・環境両面での効果を検討した。また、その結果とともに、今後の河川設計を取り巻く状況を踏まえた新しい河川設計の考え方についての提案を行う。

2. 方法

本研究では、2次元河床変動解析によって侵食部を活用した部分拡幅工法の検討を行った。手順としては、①被災を模擬した侵食地形の作成のための計算、②侵食地形における対策の効果評価のための計算となる。検討した地形モデルを図-1に、想定した対策項目を表-1に示す。河床変動解析にはiRICソフトウェア⁹⁾（以下、iRIC）Nays2DHソルバを用いた。

まず①については、前述の岩手県・雫石川⁸⁾を参考に、単湾曲水路と直線水路、一様断面からなり蛇行部の曲率、川幅、河床勾配、河床材料がそれぞれ $r/B=3$ 、 $B=30\text{m}$ 、 $i=1/70$ 、 $d=100\text{mm}$ となる原地形モデルを作成した。これをCase-Oとする。これに対し下流端水位を等流条件、上流端に最大 $300\text{m}^3/\text{s}$ の流量ハイドロの一分山（図-2、赤線）を境界条件とし斜面崩落を考慮した（河岸が安息角以上の角度に計算されたとき強制的に地形高を修正）河床変動解析を適用して侵食地形を仮想的に作成し、これをベースの侵食地形モデルとした。これをCase-O'とする。Case-OおよびCase-O'の地形を図-3左に示す。

②では、まず、Case-O'の地形に対し、河積は同じで対策が異なる検討地形モデル(Case-A, B, C1, C2)を作成する（図-1）。Case-Aは侵食部を埋戻し、原流路に復旧した上で内岸を拡幅した。これは従来の災害復旧の基本形である。Case-Bは侵食部を存置し、流路を原位置に戻すことで、侵食部を拡幅部とした。これは侵食部を活用した復旧をおこなう際に感覚的に実施しうる形状である。Case-C1は流路を存置し、原流路だった場所を拡幅部として、原流路に堆積した土砂を取り除いた。湾曲部から直線部への擦り付け区間の長さは川幅の3倍取っている。これは側岸侵食による再度被災を防止しつつ、川の営力によってつくられた地形を活かして環境面の効果を狙ったものである。Case-C2は流路の存置部を下流の直線部

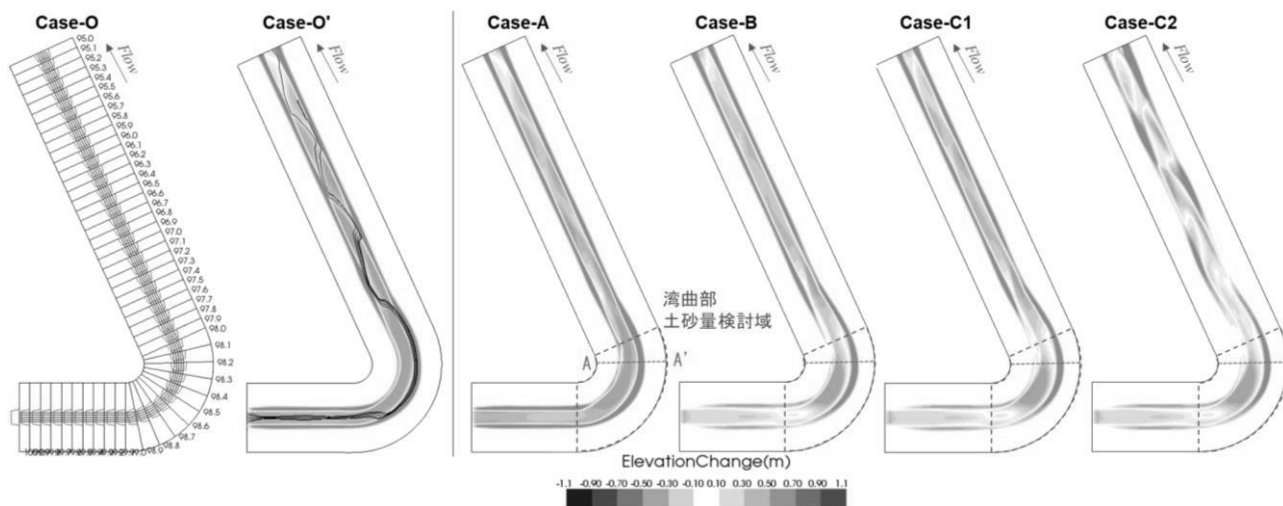


図-3 (左)原地形モデル(Case-O)と侵食地形モデル(Case-O') , (右) 各検討ケースに対する出水1回目の河床変動高(m)の比較

まで延長した。これは水の営力によって形成された地形を最大限尊重した形状であり、拡幅部のみならずその下流域を含んだ広範囲で良好な環境の創出を強く意図している。これに加え河岸防御の条件によって3つのケース(Case-A+, C2+, C2++)を設定している(表-1)。護岸及び水制は固定床セルとして考慮した。検討地形モデルはiRICのGUIに実装されている地形編集ツールのRiTER Xsec⁹⁾を用いて作成した。RiTER Xsecは横断面の形状変更を2次元の格子に展開する(横断面上の格子点に高さを割り当てた後縦断方向に線形補間する)ことで、拡幅、掘削などの横断面的な河道改変を3次的に表すことに長けている。

このように構築した地形モデルに対し、図-2の流量ハイドロ(赤+青線)を与え、出水ごとの河道形状、水位・流速、河道内の土砂堆積量、瀬淵の分布を解析した。河床変動解析の方法は①と同様である。瀬淵分布の解析にはiRICのソルバEvaTRiP Pro⁹⁾を用いた。EvaTRiP Proは、iRICで行われた水理計算結果を用いて各種の環境分析を行うソルバであり、簡易的区分での瀬淵分類ができる。ここでは、早瀬($v>60\text{cm/s}$, $h<30\text{cm}$)、瀬($30<v<60\text{cm/s}$, $h<30\text{cm}$)及び淵($v<30\text{cm/s}$, $h>30\text{cm}$)とした。

3. 結果と考察

(1) 侵食地形モデル

図-3左に原地形モデル(Case-O)の横断形状(図中赤線)と、出水を与えた後のCase-O'の河床変動高、および平水流量時流線(図中黒線)を示す。湾曲部においては側方侵食によって川幅が最大1.6倍まで広がるとともに、内岸側には固定砂州が形成されている。接続する直線水路では交互砂州の形成に伴い、平水時のみお筋が蛇行していることがわかる。一方、側方侵食により川幅が1.5倍程度に広がっている。湾曲区間の偏流の影響が

下流へ伝搬し砂州を形成する現象は現場でも確認されている¹⁰⁾。湾曲部での拡幅の設計には、下流での砂州発生とそれに伴う河岸侵食にも留意する必要があると言える。

(2) 流路変動、水位、土砂捕捉量による対策の評価

図-3右に各検討ケースに対する出水1回目の河床変動高(m)の比較を示す。この図では、堆積を赤、侵食を青で示す。また、同図断面A-A'での横断形状の変化を図-4に示す。右上の横矢印は河岸の侵食幅を示している。全てのケースに共通し、湾曲部での外岸侵食、内岸への堆積が生じている。湾曲部における外岸侵食幅は、外岸流路を存置する場合(Case-C1, C2)に比べて、侵食部を埋戻すCase-Aで大きかった。その他のケースを比較すると、原位置に流路を戻すCase-Bについては、出水により再び外岸へ振れ、最終的な横断形状はCase-C1, C2と大きな差はなかった(図-4)。直線部に注目すると、Case-A, B, C1では顕著な流路変動は見られないが、Case-C2については砂州の発生を伴う流路変動が生じている。侵食部を存置する場合、直線部への擦り付け区間を川幅の3倍程度まで長く取することで直線部の流路変動をCase-Aと同等にまで抑制できる。

図-4の横断形状をさらに比較すると、侵食幅についてはCase-Aが最も大きく、かつ右岸の位置が他より左岸よりである。そのため続く出水によって大きく侵食するリスクが大きいと推察される。一方、Case-Aについては正味の土砂堆積量が多いが出水後の河床高が最も低く、さらに土砂を捕捉しうるものと考えられ、土砂調整機能としては最も有効な形状であると考えられる。

次にCase-AとCase-C2の湾曲部において、理論式による1次元的な検討(点線、1次元)と本解析の2次元的な検討(実線、2次元)による横断方向の水位上昇量 Δh (最高水位-最低水位)を比較した(図-5)。なお、理論式には堤防の余裕高等の計算に一般的に使用される以下の式(1)を用いる。

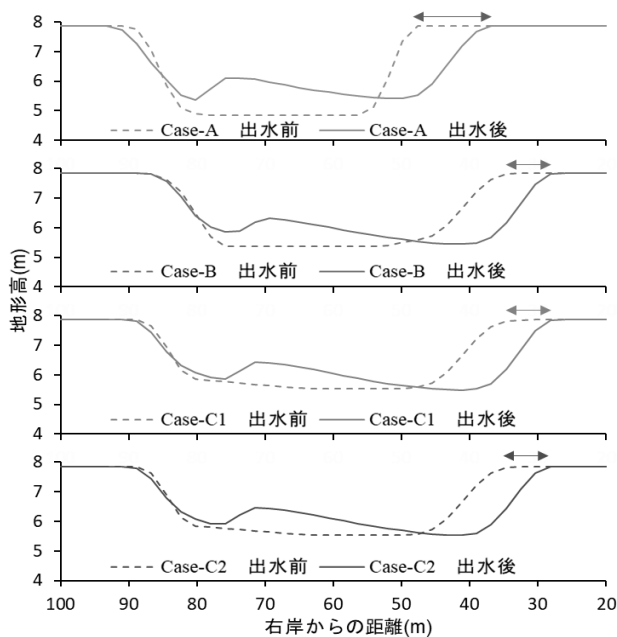


図-4 A-A'断面(図-3)における1回目の出水前後の横断形状の比較

$$\Delta h = \frac{BV^2}{gr_c} \quad (1)$$

ここに、 B ：川幅(m)、 V ：断面平均流速(m/s)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 r_c ：湾曲の曲率半径(m)である。本解析(2次元)のCase-AとCase-C2の水位上昇量を比較すると、侵食部を大回りする場合の上昇量が多いことが分かる。これは湾曲部による遠心力と拡幅による跳水の発生によるものと考えられる。続いて、理論式(1次元)と本解析(2次元)の水位上昇量を比較すると、上昇量のピークの位置が異なり、理論式より本解析のピークが高いことが分かる。また、本解析による上昇量は300-350m区間で上昇する一方、理論式では低下している。このように1次元的な予測のみでは湾曲外岸への水位のせり上がりを正しく評価できない可能性があることから、拡幅形状の設定の際は2次元計算による検討が妥当である。

図-6に湾曲部における土砂堆積量と侵食量(棒グラフ)及び正味の堆積量(堆積量－侵食量、折れ線)を示す。流路復元を行うCase-Aとそれ以外で河床変動量に大きな差が見られる。また、原地形のCase-Oでは、正味の堆積量がマイナスであるが、その他の拡幅を実施しているケースではプラスである。侵食部を活用するCase-B, C1, C2では河床変動量が小さく抑えられている。これらでは堆積量に大差ないが、侵食量はCase-B, C1, C2の順に小さくなっている。正味の堆積量を比較すると、土砂量が多いのはCase-AとCase-C2である。Case-BとCase-C1で正味の土砂堆積量が少ないのは、擦り付け区間での掃流力の増加の影響が考えられる。

(3) 対策による瀬淵環境形成

図-7にCase-AとCase-C2および護岸及び水制の有無の

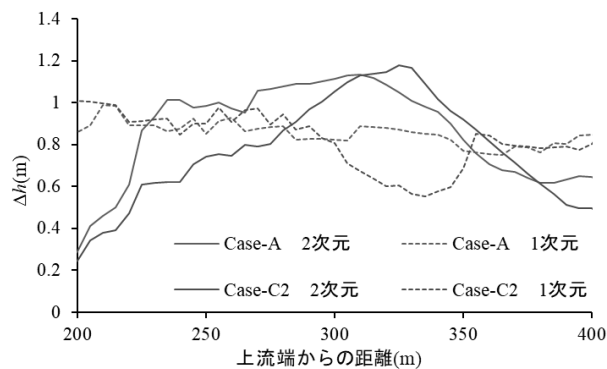


図-5 湾曲部における横断方向の水位上昇量 Δh の比較

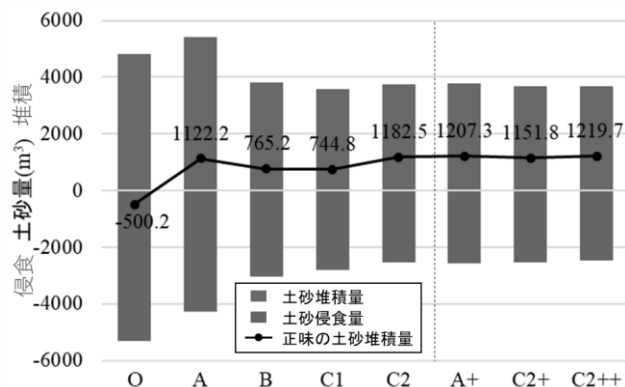


図-6 湾曲部における土砂堆積量と侵食量及び正味の堆積量(=堆積量－侵食量)

異なるCase-A+, C2+, C2++での瀬淵分類の結果を示す。護岸を設置しないCase-AとCase-C2では、主に早瀬と瀬が分布した。Case-AとCase-C2を比較すると、Case-C2では縦断的に「瀬」と「早瀬」が交互に現れるように環境の多様性が高くなっていることが推察される。一方で、どちらの場合も「淵」に分類される領域は見られず、2回目以降の出水後でも淵の形成には至らなかった(図略)。この一つの要因に、河岸崩落モデルの適用が考えられる。これは河岸が安息角以上の角度に計算された場合、安息角となるように強制的に地形高を修正するものであり、結果として河岸が浅くなるため淵ができにくい。これはモデル上の現象だけでなく実現象としても考えられることである。これに対し、護岸や水制が考慮されているCase-A+, C2+, C2++を見ると、Case-A+にのみ1回目の出水後に湾曲部出口付近に明瞭な「淵」が生じた。Case-C2+, C2++は侵食地形を存置した河床変動の落ち着いた後の河道を固定化したものであり、掃流力による侵食量の差で「淵」までに至らなかったと考えられる。形状ごとに護岸等の有無での結果を比較すると、Case-A+ではAよりも取り付け流路での堆積が進み、「早瀬」が「瀬」に変化していた。Case-C2とC2+およびC2++では取り付け流路に顕著な差はなかった。これは湾曲部での河床変動が小さかったことによる。

Case-C2+については、2回目の出水後には湾曲出口付

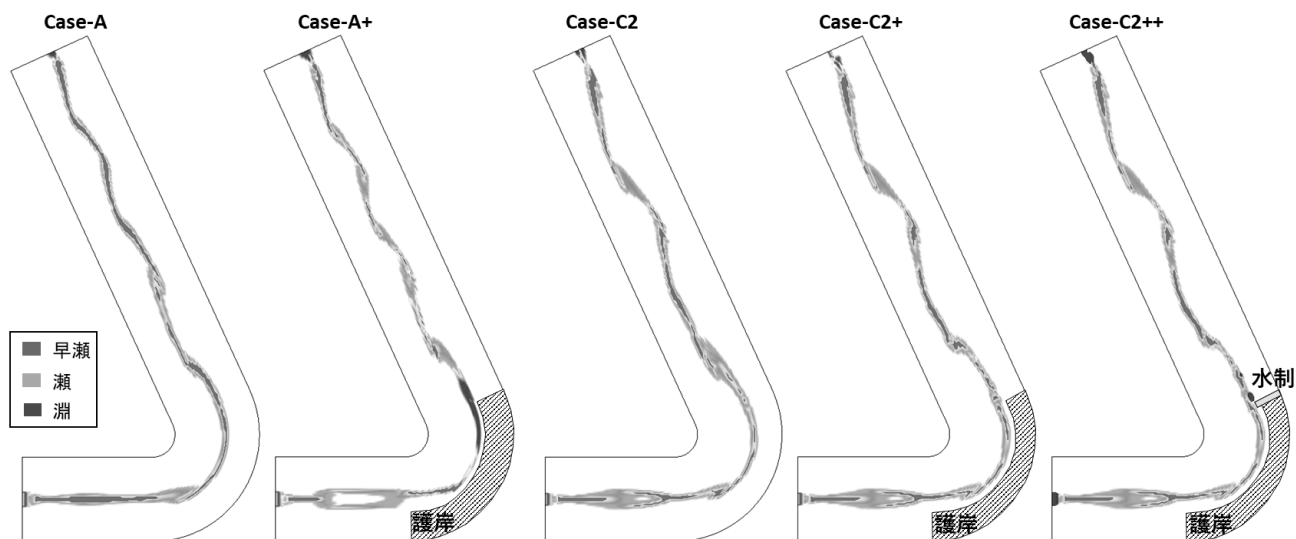


図-7 1回目の出水後の地形に対する瀬淵分布の比較 (Case-A, A+, C2, C2+, C2++)

近で「淵」が形成された。しかし、2回目の出水時は内岸への堆積が進行し河積が圧迫され溢水が発生したため、2回目の出水後に淵が形成されるというのは、治水的観点からは許容できないと考えられる。Case-C2++は水制を設置することで、内岸への堆積を一定程度抑制しつつ、水制周りの侵食を期待することで、溢水を生じさせることなく淵環境を維持することが可能かを検討する意図で設定したものである。結果を見ると、大局的な瀬淵分布には差はないが、水制の背後に「淵」が形成されているのが確認できる。以上より、EvaTRiP Proの分類による瀬淵の分布は、下流直線部では早瀬と瀬が主であり検討したケースに大差はなく、湾曲部における淵形成の有無は、外岸側の護岸や水制といった水衝部の有無に大きく影響されることが分かった。

4. 拡幅形状の設定法と課題

(1) 拡幅形状の設計における注意点と手順

3. における結果の整理から、侵食地形を活用した拡幅によって、拡幅部での土砂調節機能を担保しながら、対象領域全体の河床・河岸の変動量を一定程度緩和し、さらなる河岸の被災の防止にも寄与する可能性があることが分かった。また、湾曲部での形状の工夫は、拡幅部のみならず下流への取付流路での流路変動を変化させ、瀬淵の明瞭さに変化をもたらすことがわかった。このようなことから、河岸侵食部の存置・活用は、治水上、環境創出上の利点があることが示された。一方で、外岸側への水位のせり上がり量（湾曲および跳水）に関しては、侵食部を存置して大回りする場合のほうが大きいことに留意することや、河積や土砂調節機能の確保のためには定期的な内岸掘削が維持管理として必要となること、擦り付け部の形状設定に慎重な検討が必要となることが注

意点として挙げられる。また、外岸側の岩や水制、護岸などの非侵食部の工夫が治水上、環境の側面から淵の形成において重要な役割があることが分かった。

本検討では、条件を簡素化することで適用的な設計条件を見出すことを試みたが、拡幅形状、護岸や水制の配置など、実設計で考慮すべき条件を網羅的に調べることはシミュレーション上でも困難な部分があった。実設計では本検討で得られた内容を参考にしつつ、最終的には実現場を対象に試行錯誤的に検討を行う必要性がある。

(2) よりよい川づくりの設計に向けての課題

本研究で対象とした急勾配区間の湾曲部での現象は3次元性が強いいため、単純な1次元取的取り扱いでは実現象との乖離が大きく、3次元性を考慮に入れた設計・評価が本来必要であろう。これに対し、近年、点群測量やICT施工等によって、「測量」と「施工」に関しては技術の3次元化が進展している。一方「設計」に関してはCIMデータ運用上のルールの整備や多自然川づくりの求める要件に対する計画論や設計論の成熟していないこと等により、十分な3次元化が進んでいない。本研究での検討のように3次元的な現象は単純ではなく、護岸や水制の設置を検討したように、対話的な検討や繰り返し検討を行うことが重要である。高知県弘見川では、水制の設置による土砂堆積抑制と共に、良好な瀬淵環境の創出を目指した整備がなされた¹¹⁾。この事例では卓越した技術者が河川の平面形を見つつ出水時の水当たりや土砂堆積傾向等を予想しながら、水制の配置や形状を決定するというものであった。このような職人技とも呼べる極めて高度な検討を実現するためには、3次元地形情報を取りこみ、地形の編集、治水と環境の同時評価、これらの手順をスムーズに実施できるようなツールが必要である。本研究で用いたiRIC/RiTER XsecやEvaTRiP Proは、そうした3次元地形データに適合した機能を有している。こ

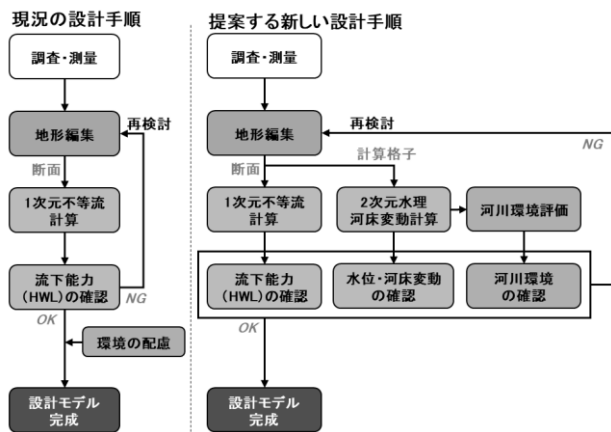


図-8 現況と提案する拡幅形状の設計手順

れをベースとした対話的検討の実現によって、職人のような仕事を実施できる可能性がある。

一方で、上記提案の手法は、既存の評価の枠組みからは外れたものになっている。図-8左に示すように、現況では、設計した地形を1次元計算によって評価し、十分な流下能力が確保できた時点で設計モデルは概ね完成となる。この手順は環境が後付になりやすい点はあるものの、整備の継続性に鑑みれば、新しい手法が開発されたとしても今後も保持する必要があるものである。これに対し、図-8右に示す設計手順を提案したい。3次元地形モデルから横断面と3次元地形を同時に出力することで、既存の1次元的评价と、2次元シミュレーションおよび河川環境評価を同時並行的に検討する。得られる評価を総合的に判断し、満足した結果が得られなければ地形編集に戻る。この手順を繰り返すことで、治水と環境を両立する河川整備設計に近づくのではないかと考える。

5. 結論

本研究では、中小河川における湾曲部の側方侵食の活用による部分拡幅を題材とし、治水と環境の両立しうる地形の活かし方や設計方法について検討した。以下にまとめを示す。

- ① 側方侵食を活用する拡幅手法は、従来の流路復元工法に対し、土砂捕捉機能や出水に対する耐力の観点から有利な点が見いだされた。また、拡幅部とその下流を含めた瀬淵の創出にも寄与できる。他方、下流区間への取付けや、外岸の水位のせり上がり量増加への留意が必要である。
- ② 実設計で上記を考慮するためには、2次元河床変動計算を用いた対話的検討が必要になる。3次元地形測定の普及とツールの開発により、地形編集と治水・環境の評価をスムーズに実施可能になっている。既存の枠組みを継承しつつも新しい技術を設計に取

り入れることが重要である。

本研究で得られた結果は厳密なものではなく、検討の視点を提供するものであり、現場への適用の際は、現場の土地利用や改修の方向性等により最適な拡幅法を選択し、数値計算や実験によって妥当性を確かめる必要がある。

謝辞：本研究の一部は河川基金助成（No.2020-5211-006、代表：大槻順朗）の一部を用いて行われた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Eduardo J. Martin, Masahiro Ryo, Michael Doering and Christopher T. Robinson: Evaluation of restoration and flow interaction on river structure and function: Channel widening the Thur River, Switzerland, *water*, 10, 439, 2018.
- 2) Ellen Wohl, Stuart N. Lane and Andrew C. Wilcox: The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, 51(8), pp.5974-5997, 2015.
- 3) 大槻順朗, 森照貴, 林田寿文, 中村圭吾, 萱場祐一: 中小河川の中山間地から扇状地区間における河道平面形状による魚類生息場および種の特性の比較, 河川技術論文集, Vol.25, pp. 399-404, 2019.
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫対策に関する砂防施設配置検討の手引き(案), 国土技術政策総合研究所資料, 第1048号, 2018.
- 5) 多自然川づくり研究会: 「多自然川づくりポイントブックⅢ」中小河川に関する河道計画の技術基準; 解説, 公益社団法人 日本河川協会, 2011.
- 6) 劉義濤, 島谷幸宏, 山下奉佐, 佐藤辰郎, 池松伸也: 多自然川づくりによる山地溪流河道の洪水による階段状河床形の変化, 河川技術論文集, Vol.18, pp.83-88, 2012.
- 7) 大槻順朗, 大石哲也, 萱場祐一: 中山間地河川の部分拡幅部における被災分析と軽減手法および環境評価に関する事例研究, 河川技術論文集, Vol.24, pp. 185-190, 2018.
- 8) 中村圭吾, 林田寿文, 大槻順朗, 小林一郎: 河川CIM (3次元川づくり) の考え方と標準化に向けた取組み・課題, 河川, Vol.76(3), pp.41-45, 2020.
- 9) iRIC Software Home Page: <http://i-ric.org/ja/>
- 10) 池田裕一, 飯村耕介, 江口陽祐, 矢部和史: 振幅の大きな蛇行河道と下流直線河道の接続部における流況と河床形態に関する基礎的研究, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.71, No.4, I 991-I 996, 2015.
- 11) 高知県 河川課: 弘見川で実施した川づくりの追跡調査について, 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/river/kankyo/main/kankyotashizen/pdf/h3_0_1_6.pdf (閲覧日: 2021.3.29) .

(2021. 4. 2受付)