

急流河川の大規模河岸侵食対策技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 3

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：大串弘哉、川村里実、
大石哲也、岩崎理樹

【要旨】

急流河川では、河岸侵食による堤防決壊等の被災が多く発生している。出水時に流路が変動して河岸が大規模に侵食されることが要因となることも多い。どのような条件下で大規模な河岸侵食が進行するのかを把握することや流路変動や河岸侵食を再現・予測することは、河川整備を実施するために必要であり、河川管理上重要な課題である。十勝川水系の支川では、2016年出水時に流路変動に伴う側岸侵食で堤防決壊や落橋、護岸損壊などの深刻な被害が多数発生した。本課題は、特に堤防侵食被災の低減に貢献する技術開発の推進を目的として3つの達成目標の下で研究を実施した。本報では、それぞれの達成目標毎に得られた主な成果を記す。

キーワード：急流河川、河岸侵食、堤防被災、予測技術、侵食対策

1. はじめに

急流河川では、河岸侵食による堤防決壊等の被災が多く発生している。出水時に流路が変動して河岸が大規模に侵食されることが要因となることも多い。どのような条件下で大規模な河岸侵食が進行するのかを把握することや流路変動や河岸侵食を再現・予測することは、河川整備を実施するために必要であり、河川管理上重要な課題である。

北海道東部に位置する十勝川水系では、2016年8月に茂岩観測所等の12箇所の観測所で既往最大水位を記録する大規模な出水が発生し、この時、流路変動に伴う側岸侵食によって堤防決壊や落橋、護岸損壊など河岸侵食に関連する深刻な被害が多数発生した。本課題は、特に堤防侵食被災の低減に貢献する技術開発の推進を目的として次の3つの達成目標の下で研究を実施した。本報ではそれぞれの得られた成果を報告する。

1つ目の達成目標は「急流河川における流路変動特性の検証と予測」であり、前述の2016年出水の堤防侵食被災に至った流路変動特性を検証するとともに河床変動計算モデルによる再現を実施した。実河川における大規模な流路変動と堤防侵食に対して計算モデルを適用した事例は稀であったが、本課題では、十勝川水系で発生した多くの侵食被災箇所を対象とした再現を実施しており、被害予測へ計算モデルが適用できる可能性を示した。本報にはそれらの成果の一部を載せる(第2章)。

2つ目の達成目標は「河道内樹木の管理による対策技術の開発」である。十勝川水系で発生した侵食被災



写真-1 札内川で発生した堤防決壊 (2016年出水、帯広開発建設部提供)



写真-2 音更川 KP21.2 で発生した堤防決壊 (2016年出水、帯広開発建設部提供)

の中には、樹木域で大規模な河岸侵食が生じた事例が散見された。しかし、河岸の樹木が侵食現象に与える影響については複雑で未だ把握できていない。近年河道内の樹林化が問題視される中で、侵食に対する樹木の影響を予測することは、樹木管理また侵食対策を検討する上で重要であることから、本課題では、水理実験により河岸植生が側岸侵食に与える危険性を明らかにした上で、樹木の影響を考慮できる計算モデルを開発した。本報では、水理実験で得られた結果の概要を報告するとともに、樹木の影響を考慮した計算モデルにより侵食被災の再現性が大きく向上した事例を示す(第3章)。

3つ目の達成目標は「流路変動特性を考慮した侵食防護技術の開発」である。寒地河川チームでは、2011年出水時にも堤防侵食の被災が生じた十勝川水系音更川を対象として、2011年出水以降、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部(以下、帯広開発建設部とする)治水課と連携し(音更川河道計画WG)、流路変動特性を考慮した侵食対策の技術開発を行ってきた。ここで提案された対策技術は、堤防侵食の危険度の評価、対策の優先順位の分類や低水護岸整備といった一連の検



写真-3 音更川上流部で連続して発生した堤防決壊⁵⁾



写真-4 2016年出水後の戸蔦別川(帯広開発建設部)(写真左が上流、写真右は札内川との合流地点)



写真-5 2016年出水後のペケレベツ川

討において、流路変動の範囲（侵食範囲）を既往出水時の実績より予測して堤防侵食の危険度を評価する手法を取り入れるとともに、将来にわたって維持すべき低水路幅の設定や未整備箇所の将来的な低水護岸ラインの設定などの検討も含まれたものとなっている。音更川では2011年の被災以来、これに基づいて整備が進められており、前出の2016年出水はそれ以降に発生した出水となる。本報では、2016年出水経験を踏まえ、提案した侵食対策の効果を検証しその妥当性を示した（第4章）。

2. 十勝川水系における平成28年出水時の堤防侵食等の被災

2.1 同時多発的に発生した侵食被災

2016年出水では前出のとおり十勝川水系の支川で大きな被害が発生した。札内川（写真-1）および音更川（写真-2、写真-3）では堤防決壊、戸蔦別川（写真-4）や芽室川では堤防決壊、氾濫、農地侵食、ペケレベツ川（写真-5）では落橋、宅地の侵食、住宅の流出、パンケ新得川では落橋、市街地への氾濫など、十勝川支川流域において侵食に起因した被害が同時多発的に発生した。これらについてそれぞれ現地調査や再現計算等を実施し、その被災過程や要因を検証した。これらの成果は、水害調査報告書や各種論文集で報告している^{1)~10)}。この出水では、記録的な豪雨によって大量の水が河道を流れただけでなく、それに伴って大量の土砂が移動し河道内に堆積することで、活発な流路変動および側岸侵食が発生した。本章では、特に被災特性と河道内の土砂動態に着目して検証した成果⁴⁾を示す。

2.2 出水時の河道内の土砂動態

主にセグメント1に分類されるような急流河川では、出水時に大量の土砂が移動して流路が湾曲するように変動すると大規模な側方侵食が発生し、深刻な災害を引き起こす。このため河道内における出水時の土砂動態と流路変動の関係を把握することは、河川管理上重要な課題である。従来、側岸侵食を伴う河道形状と土砂動態の関係が研究されている^{11), 12)}が、直線流路が対象であった。流路変動と側岸侵食の関係は最近多く研究が行われるようになった^{13)~17)}が、土砂動態と側岸侵食を伴う流路変動の関係に関する研究^{18)~20)}は未だ数少ない。

2016年出水時、十勝川の二次支川であるペケレベツ川では写真-5のように流路の蛇行化とともに川幅が出水前の約3~5倍にも拡幅し、市街地が深刻な被害を

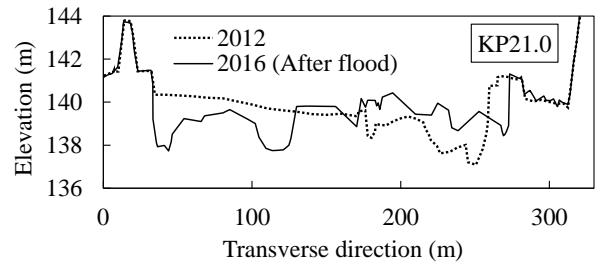


図-1 横断面形状

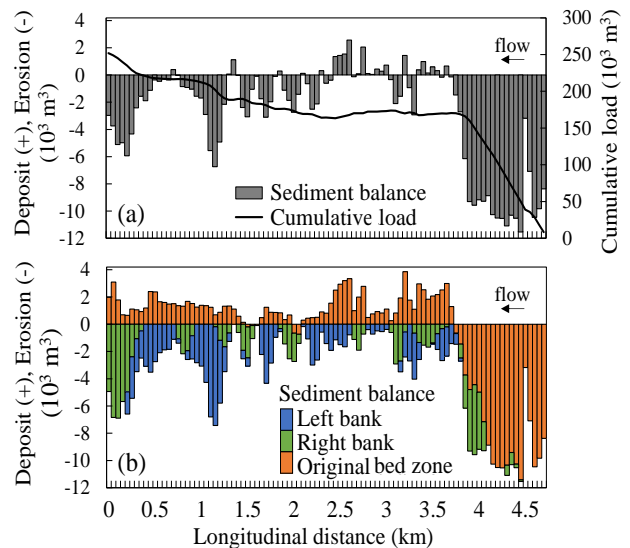


図-2 ペケレベツ川の横断測線毎の土砂収支。(a)横断測線毎の収支、(b)元河道内と左右側岸部の収支。(久加ら³⁾)

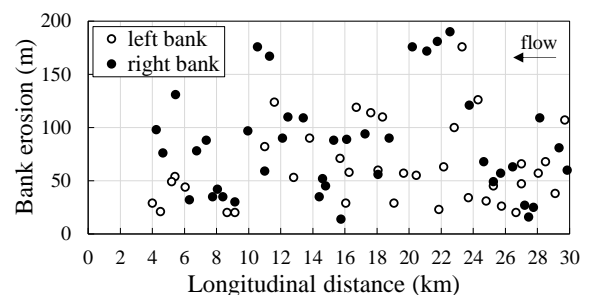


図-3 音更川侵食幅

受けた³⁾。後述するように、久加ら³⁾は河道内への土砂堆積が蛇行発達と側方侵食の一因だとしている。また、同十勝川水系音更川では、流路変動に伴って側方へ約170m侵食が進行し、堤防が決壊した（写真-2）。当該箇所から200m下流の横断形状の変化を図-1に示す。元来低水路箇所への堆積と大規模な側方侵食はペケレベツ川で確認された変化³⁾と類似している。なお、音更川では2011年にも流路変動による堤防侵食が発

生したが、当時も河道内への土砂堆積を伴う流路変動が要因とされている²⁾。

このような状況から、急流河川では、河道内の土砂堆積が流路変動を伴う大規模な側方侵食の主要因となっている可能性がある。そこで、本検討では、流路変動に伴う側方侵食が大規模化する要因を河道内の土砂動態の観点から明らかにすることを目的とする。

2. 2. 1 ペケレベツ川

ペケレベツ川における 2016 年出水前後の土砂収支を図-2(a)に示す。横断測線毎に下流端から 4.7km までを示す。測線間隔は約 50m だが、一定ではないため断面積の変化量に各区間距離を乗じた体積を示す。区間距離に湾曲は考慮していない。これより上流には砂防施設(床固工)が整備されている。図中の実線は、土砂収支から算出される各測線を通過した累積土砂量

である。ここでは 4.7km 地点を起点とした(起点での流砂量は除いていることに注意)。図-2(b)には元河道内と左右側岸部に分けた収支を示す。砂防施設の直下流では河床低下とこれに伴う土砂流出がみられ、その下流側では河道内の堆積とともに侵食に伴う側岸からの土砂流出がみられる。久加ら³⁾は、いくつかの条件下で河床変動計算を実施した結果、上流側の河床低下は砂防施設によって供給土砂が抑制されたことが要因であり、下流側では勾配が 1/48 から 1/66 (計画)に変化する 3.6km 付近での土砂堆積が要因で写真-5のように蛇行した流路の発達とそれに伴う大規模な側方侵食が発生したとしており、砂防施設で上流からの土砂供給を抑制するだけでなく、河道内における土砂の流出を抑制する必要性を指摘している。

本研究では、側方侵食が勾配変化点(3.6km 付近)

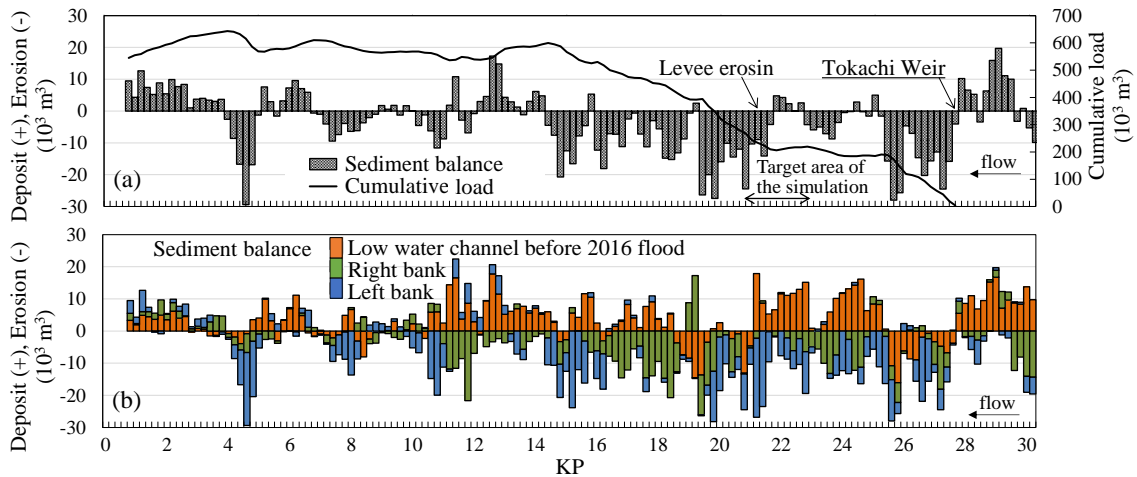


図-4 音更川の横断測線毎の土砂収支。(a)横断測線毎の収支、(b)元低水路と高水敷(左右岸)の収支。(帯広開発建設部)

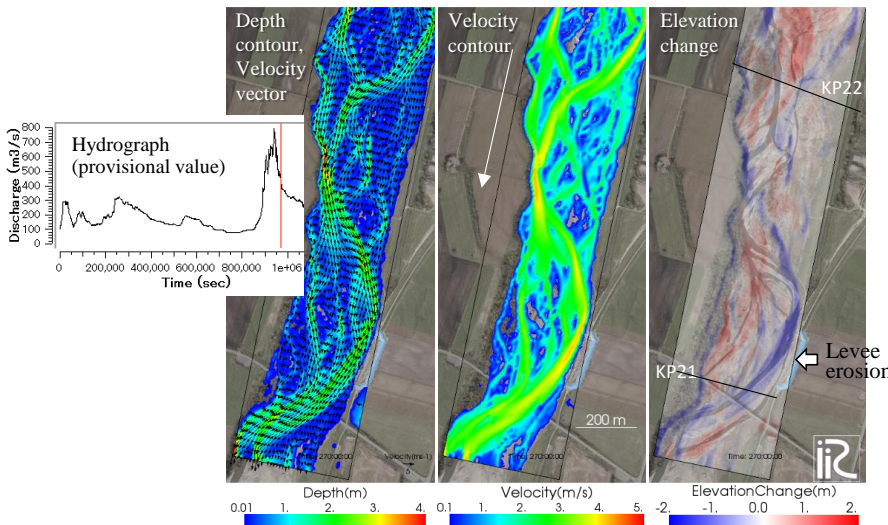


図-5 堤防決壊箇所の再現計算結果(堤防侵食発見時)

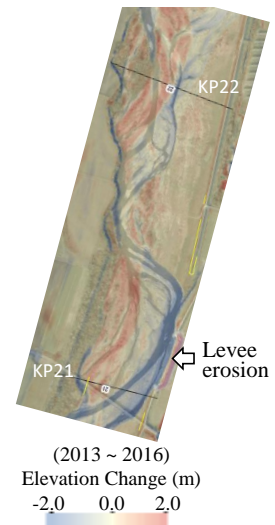


図-6 LP データ差分値(帯広開発建設部)

での局所的な現象ではなく、勾配変化点から離れた下流側でも継続して発生している点に着目する。河道内への土砂堆積も下流端まで継続している。河床材料は平均粒径約 90mm と比較的大きく、勾配変化点より上流から流出した土砂が直接下流側にまで移動し堆積したとは考えにくく、むしろ側岸から流出した土砂が供給源になり得る。側岸からの流出土砂が河道内に堆積することで河道が不安定となり、側方侵食を誘発するような流路が発達すると、侵食の進行に伴い流出土砂量は更に増加すると考えられる。このような連鎖によって大規模な側岸侵食が下流側の広い範囲にまで及んだ可能性がある。

2. 2. 2 音更川

a) 側方侵食

2016 年出水時に音更川で発生した側方侵食幅を図-3 に示す。出水前 (2013 年) の河道地形と比較し、低水路の側方侵食が発生した各箇所における最大の侵食幅を示している (帯広開発建設部提供)。図より 100~200m 規模の侵食がいたる箇所が発生しており、ペケレベツ川と同様、大規模な側方侵食は局所的な現象ではなく河道全体で生じていたことがわかる。

b) 河道内における土砂動態

2013 年と 2018 年出水後の横断データより測線毎 (約 200m 間隔) の土砂収支を整理したものを図-4 (a) に示す。図中の実線は図-2 (a) と同様で各測線を通過した累積土砂量であり、ここでは十勝頭首工 KP27.7 を起点とした (起点での流砂量は除いていることに注意)。累積土砂量が流下方向に増加しているのがわかる。図-4 (b) に出水前の低水路箇所と高水敷 (左右岸) に分けた収支を示す。頭首工上流側で堆積、直下流で侵食が見られ、ペケレベツ川と同様で上流から平衡流砂量以上の供給は無かったと考えられる。その下流側では、KP10 付近までの約 14km の区間で低水路への堆積と高水敷から大量の土砂流出が確認でき、この区間の累積土砂量の増加に高水敷からの土砂流出が寄与していることや低水路への堆積土砂の多くは高水敷が供給源だったことが考えられる。

例えば、堤防決壊地点 KP21.2 (写真-2) では、図-4 (a) より断面内の土砂収支はマイナスであるが、(b) より元低水路には大量の土砂が堆積していることがわかる。その上流側では、断面内の土砂収支がほぼゼロであっても、低水路の堆積と引き換えに高水敷からの土砂流出がみられ、これが下流側の堆積に寄与した可能性がある。特に、河岸など普段動かない土砂が侵食によって流出する場合は、重大な供給源となり得ることがわ

かる。

c) 水理実験による検証

前節で示すように、側岸からの流出土砂が重大な供給源となる可能性があり、この土砂流出がどのように流路変動へ影響を及ぼすのかを明らかにすることが重要となる。そこで本研究では、水理実験による検証を試みた。水理実験では、側岸からの流出土砂量の違いが流路変動へ与える影響を検討し、主に次の結果が得られた (実験の詳細は文献⁴⁾を参照されたい)。

側岸からの流出土砂は直下流の砂州の外岸側への拡大に寄与し、砂州の外岸側へ流路が変動することで更に側方侵食が進行するという現象が当実験で確認された。これにより、側岸からの流出土砂が多いと、側方侵食をより進行させる蛇行流路が発達した。この流路発達により側方侵食が進行し、側岸からの土砂流出量が大幅に増大した。側岸からの流出土砂が流路変動へ与える影響を介して、側方侵食と土砂流出は連鎖的に大規模化することが水理実験により実証された。

2. 3 流路変動の再現計算

堤防決壊地点 KP21.2 (写真-2) での大規模な側方侵食現象を検証するために河床変動再現計算を行った。計算領域は KP20.8 付近から上流側約 2km 区間 (河床勾配約 1/145) とし、地形標高は 2013 年計測の LP データ (帯広開発建設部) を使用した。流量は高水位が続いた 2 週間について土幌観測所地点の暫定値 (帯広開発建設部) を用いた。計算は iRIC Nays2D (平面二次元河床変動計算) で実施した (<http://i-ric.org/>)。計算格子サイズは縦横断方向ともに 5m とし、植生域は航空写真を参考に設定、河床材料はこの付近の平均粒径を参考に 50mm の均一粒径とした。マニング粗度係数は 0.03 とし、流砂量式には芦田・道上式²⁾、河岸侵食には崩落モデルを適用した。上流端では動的平衡条件下で給砂量を与えた。

計算結果を図-5 に示す。堤防侵食発見当時の蛇行流路が再現されている。図-6 に 2013 年と 2016 年出水後の LP データの差分値を示す。計算結果の河床変動量コンター図と比較すると堆積域や侵食域がほぼ一致し、出水時の河床変動が計算で良好に再現されたことがわかる。河道内の堆積に伴い大きく蛇行する流路変動が計算され、大規模な側方侵食は土砂堆積に起因した流路変動によることが検証された。本計算では上流端で平衡流砂量しか与えていないにも関わらず土砂堆積に起因した流路変動が再現されることから、側岸を含む河道区間からの土砂流出と堆積が侵食を大規模化する流路変動と密接に関連していることが反映された結

果と考えられる。

2. 4 まとめ

十勝川水系の支川で発生した 2016 年出水時の侵食被災を検証した。この出水では、河道内の大量の土砂が移動し堆積することで、活発な流路変動および側岸侵食が発生した。特にペケレベツ川や音更川の出水時の土砂収支を整理し河道内土砂動態と側岸侵食を伴う流路変動との関係を検証したところ、縦断的に広範囲にわたって側岸から大規模な土砂流出が発生していた。この流出土砂が供給源となり河道内へ堆積することで側岸侵食が大規模に進行した可能性がある。また、側岸からの流出土砂が多いと、側方侵食をより進行させる蛇行流路が発達することを水理実験により実証した。これらの結果より、特に普段動かない河岸などからの流出土砂は、河道内へ堆積する土砂の重大な供給源となり、大規模な側岸侵食を誘発する流路変動の要因となり得ることが明らかになった。

従来実河川における大規模な流路変動と堤防侵食に対して計算モデルを適用した事例は稀であったが、本課題では、写真-1～5 に示したような十勝川水系で発生した多くの侵食被災箇所を対象として、前節で使用した計算モデルによる再現計算を実施した^{1)~10)}。いずれも良好な再現性を示しており、被害予測へ計算モデルが適用できる可能性が示された。

3. 河道内樹木が大規模河岸侵食に与える影響とその予測モデルの開発

3. 1 河道内樹木による侵食リスクの増大

近年、河道内樹林化に関する維持管理上の問題が全国各地の河川で顕在化してきた。2016年出水時の被災の中には、樹木域で大規模な河岸侵食が生じた事例が散見され(写真-3や写真-6)、樹木域によって侵食リスクが増大しているように見える。特に十勝川水系の急流部ではヤナギ類が多く繁茂しており、その根長は写真-7のように河岸高さに対して短い²³⁾。この場合、樹木域であっても河岸斜面の崩落は容易に生じるので耐侵食は期待できない。樹木は流れに対して大きな抵抗となり、このような樹木が流路変動に伴う河岸侵食に対してどのような影響を与えているのか明らかでない。侵食に対する樹木の影響を予測することは河道管理上重要な課題である。

本課題では、写真-7 のような河岸の樹木が流路変動に伴う河岸侵食に対してどのように影響するのか基本的な特性を把握することを目的として、いくつかの水理実験(写真-8)によって検証している^{5), 24), 25)}。

水理実験の結果、音更川のヤナギ類のように根が浅い場合(実験では河岸高より根が短い芝を利用)は、側方への侵食を抑制する効果は小さく、かえって水衝部では侵食規模が拡大する危険性が示された。詳細は



写真-6 流路変動による側岸侵食(音更川, 2011年出水, 帯広開発建設部提供)



写真-7 河岸に繁茂した樹木(音更川上流部)



写真-8 河岸植生が流路変動や河岸侵食に与える影響に関する水理実験の実施状況

文献⁵⁾を参照されたい。文献⁵⁾内の実験で観測した侵食幅の時間変化を図-7に示す。植生無しのケースでは、

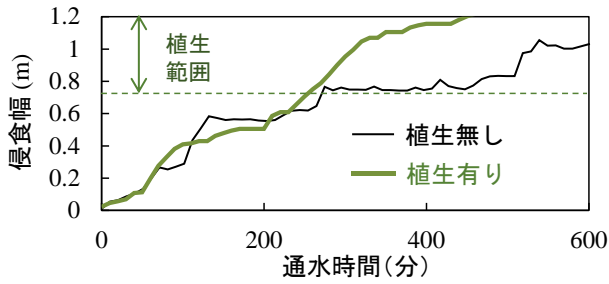


図-7 実験結果



図-8 植生有りのケースで設定した植生範囲

前出のとおり一度に進行する侵食規模に限度があり、侵食は断続的に進行するが、これに対して植生有りのケースでは、植生域において一度に進行する侵食規模が増大するのがわかる。これは植生が砂州や水衝部の流下を抑制するためである。このように、河岸植生が侵食リスクを増大させることを水理実験で実証した。

3.2 河道内樹木の影響を考慮した流路変動予測モデルの開発

侵食リスク増大に対する樹木の影響を予測するためには前章で示した計算モデルへ樹木の流失/残存の影響を取り入れる必要がある。iRIC Nays2D (平面二次元河床変動計算) に対して、次のような樹木流失のモデルを加えた。樹木流失を初期河床からの侵食深に応じて判定するものとし、ここでは植生が流失する侵食深を20cmと設定した。これは、侵食による植生流失は樹木の根長に関わると考えられるため、同十勝川水系支川である札内川での既往報告²³⁾の根長を参考としている。本モデルの妥当性を検証するために、音更川上流部で発生した堤防侵食被災区間(写真-3、図-8)を対象とした再現計算を実施した。



図-9 出水後の河道状況

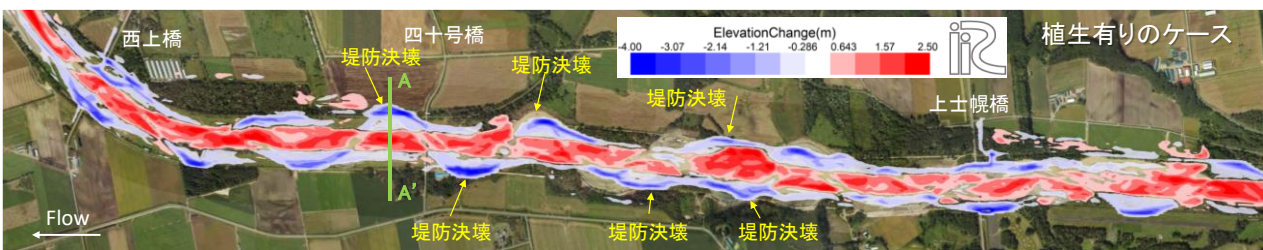


図-10 計算終了時の河床変動量コンター図 (植生有りのケース)

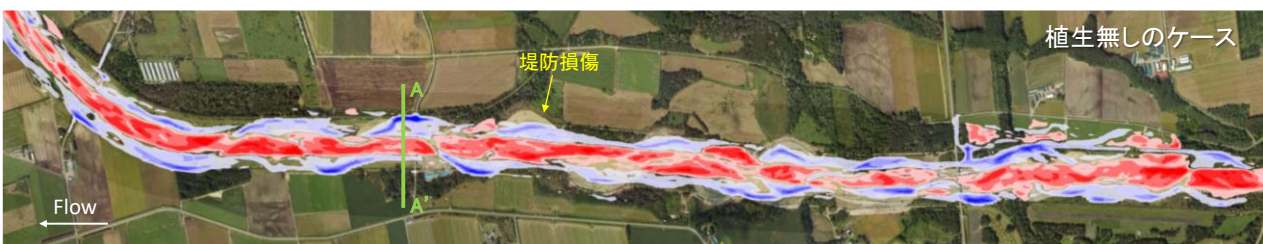


図-11 計算終了時の河床変動量コンター図 (植生無しのケース)

3. 2. 1 対象河道の概要

音更川上流部の上土幌町付近においては、2016年出水で図-9に示すように河道内の樹木域の大部分が消失するとともに流路が大きく蛇行し、水衝部で大規模な河岸侵食が発生することによって左右岸連続で7箇所破堤するといった特徴的な被災状況が認められた。

3. 2. 2 計算概要

計算領域は、音更川SP1300～SP8600の区間とし、計算格子は縦断方向に7m、横断方向に4mとした。計算格子の河床高データには2009年取得のLPデータ（帯広開発建設部）を用いた。上流端流量には2016年8月台風10号による出水時の土幌観測所の暫定値（帯広開発建設部）を用いた。河床材料は現地調査結果⁸⁾より55mmの均一粒径とし、マニング粗度係数は0.03で一定値を与えた。河道内植生の密度は、前出の既往報告²³⁾を参考に0.03とした。流砂量式は芦田・道上⁹⁾の平衡流砂量式を用い、隣り合うメッシュ間の河床高の差が安息角以下になるように斜面崩落を考慮した。

計算は、植生有りと植生無しの2ケースを実施した。植生有りのケースでは、対象区間の出水前の航空写真（2016年8月）を参考に、計算格子単位で樹木の分布条件を与えた（図-8）。植生無しのケースは、対象区間に樹木が一切存在しないとして樹木による抵抗が無い条

件で実施し、植生有りのケースと比較した。

3. 2. 3 計算結果

図-10に植生有りのケースの河床変動量コンター図を示す。流路の蛇行化に伴い水衝部で大規模な側岸侵食が生じることによって左右岸連続した複数箇所であらゆる堤防が侵食される様子が良好に再現されている。本計算は、樹木の流失/残存を考慮できるモデル化を付加することで、流路変動にともなう大規模な河岸侵食の特性を再現できる十分な精度があると考えられる。

一方、植生無しのケースの河床変動量コンター図を図-11に示す。このケースでは、側岸侵食の規模が過小評価されており、複数箇所であらゆる堤防が侵食された被災状況を再現できておらず、樹木の流失/残存を考慮することで再現性が大きく向上することがわかる。

3. 2. 4 考察

図-12に両ケースの流況と植生分布状況を経時的に示す。出水ピーク時（図-12中ハイドログラフの①の時点）は、両ケースともに流れが低水路内で蛇行しているのが確認できるが、植生有りのケースの方がより明確な蛇行流が見られる。これは、河岸や砂州上では植生の抵抗によって流速が低下し、これを迂回するような蛇行流が強調されるためと考えられる。更に、流量低下時（図-12中ハイドログラフの②および③の時

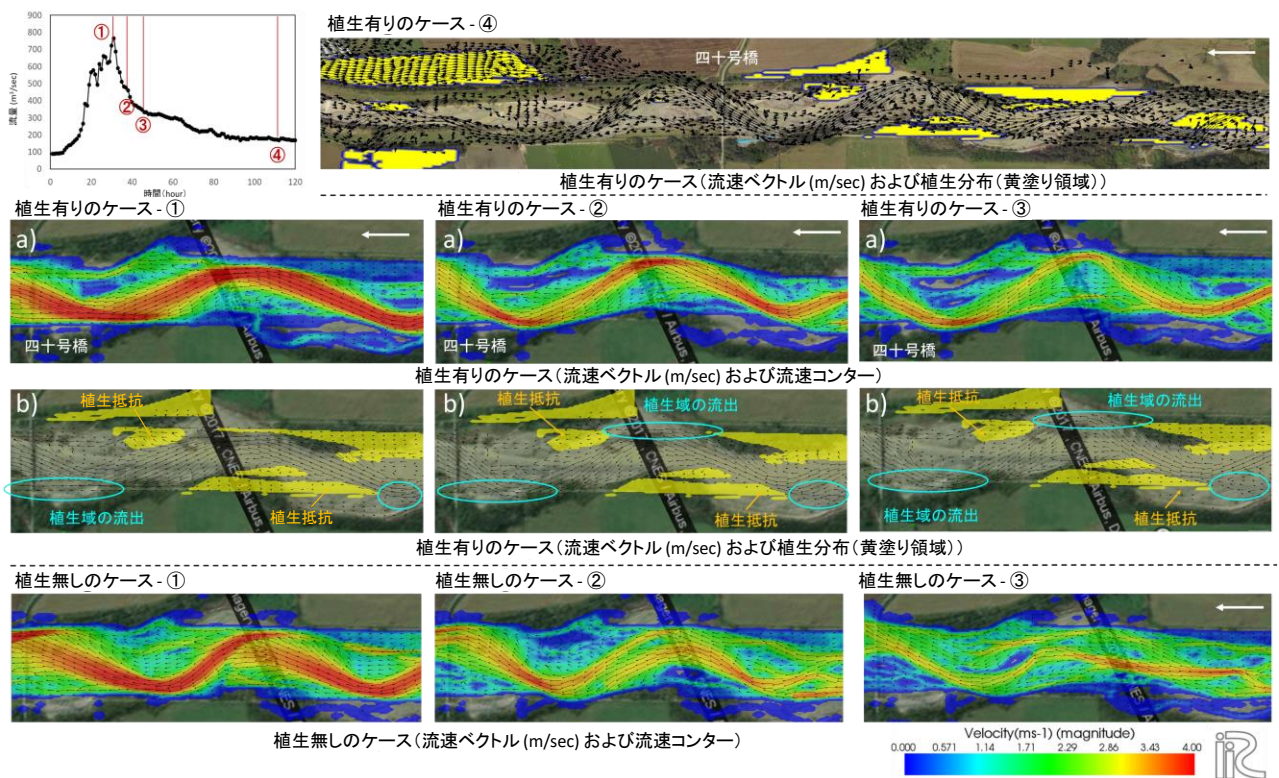


図-12 両ケースの流速分布の経時変化

点)において、植生無しのケースでは、蛇行流の水衝部が流下すると共に蛇行流が不明瞭になっているのに対して、植生有りのケースでは明確な蛇行流が維持されている。これは、流水抵抗によって侵食が生じにくいため植生が流失されにくく残存するために、前述と同様に植生箇所を避けるような蛇行した主流が維持されやすく、この残存した植生の抵抗によって水衝部の流下が妨げられたためと考えられる。水衝部以外では植生が残存しやすい一方で、水衝部では、河岸近傍が激しく洗掘されるので、たとえ樹木域であっても、根が浅い場合は斜面崩落によって河岸侵食が進行する。つまり、水衝部では植生抵抗に関係なく崩落による侵食が進行するのに対して、水衝部以外では流水抵抗が耐侵食性として働くため、水衝部と水衝部以外で流水抵抗による耐侵食性の度合いが異なる。このことが樹木域で側岸侵食が大規模化する要因と考えられ、樹木の流失/残存を考慮することで計算モデルにこの現象が反映されて再現性が向上することが確認できた。

3. 3 まとめ

2016年出水では、樹木域で大規模な河岸侵食が生じた事例が散見され、樹木域によって侵食リスクが増大した可能性があった。水理実験を実施し、音更川のヤナギ類のように根が浅い場合(実験では河岸高より根が短い芝を利用)は、側方への侵食を抑制する効果は小さく、かえって水衝部では樹木により侵食リスクが増大することを水理実験で実証した。また、計算モデルに樹木の流失/残存を考慮できるモデル化を付加することで樹木域における流路変動を予測するモデルを開発した。これにより、樹木域における流路変動および侵食規模の再現性が大きく向上することを示した。

4. 流路変動特性を考慮した侵食対策技術の開発

4. 1 音更川における流路変動特性を考慮した危険度評価とそれに基づいた堤防侵食対策

急流河川である十勝川水系音更川では、2011年²¹⁾に続いて2016年出水時に流路変動による堤防侵食が生じた(写真-2および写真-6)。2011年の被災後設置された「音更川河道計画WG」において、寒地河川チームは帯広開発建設部と連携し、堤防侵食の要因となる流路変動特性やその将来予測を検討するとともに、次のような堤防侵食対策を提案した²¹⁾。河道内流路の水衝部が次の出水中に側方および流下方向に移動する範囲を実績より予測し、その侵食予測範囲より堤防侵食の危険度を評価し、対策の優先順位の分類や低水護岸整備の必要箇所を決定するものである^{21), 26)}。その後この

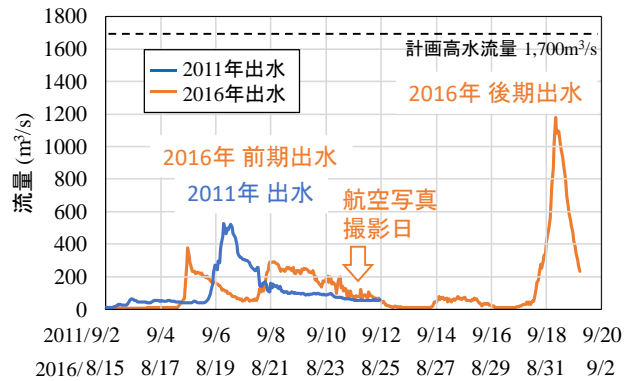


図-13 流量ハイドログラフ

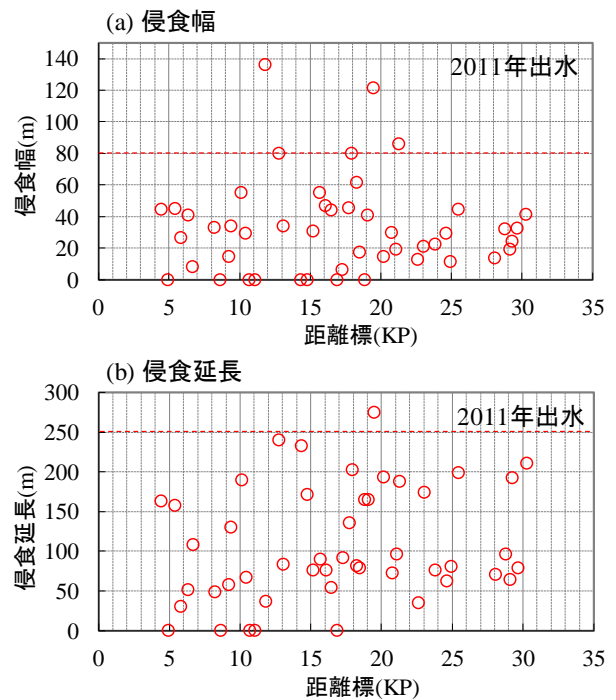


図-14 2011年出水時の侵食規模¹⁾

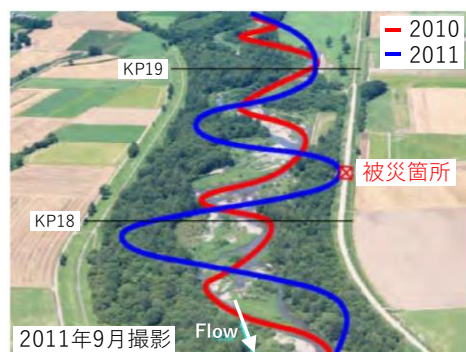
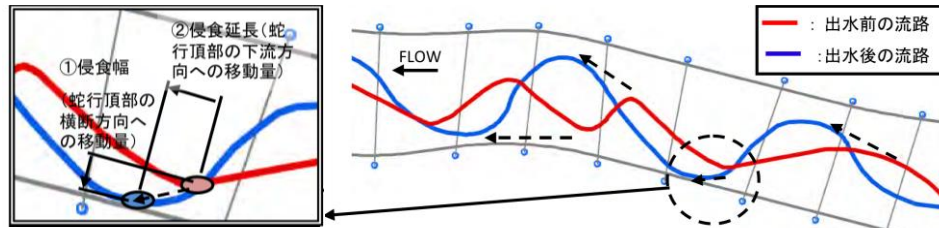


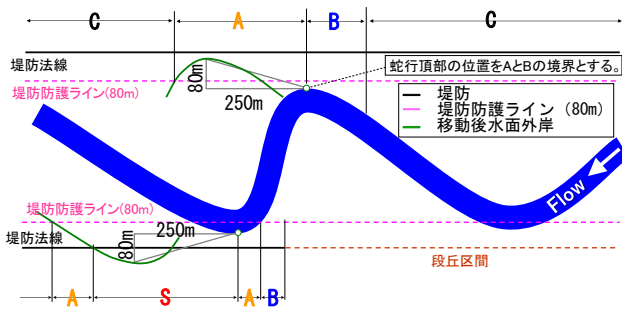
図-15 2011年出水の蛇行流路の変化¹⁾

優先度に応じて実際に整備が進められた。2016年出水では、約2週間に中規模の出水と既往最大規模の出水が連続発生し、前者の出水時は堤防被害が無かった一方



出水後の流路位置を予測し、堤防侵食の恐れがある若しくは必要な高水敷幅が確保できない緊急性の高い箇所に対策を実施する。

図-16 侵食予測範囲設定のイメージ



危険度	内容	設定基準	備考
S	堤防流出の可能性が高い箇所	今後の蛇行変化に伴う河岸侵食によって、低水路が堤防法線を割り込むと想定される区間。	今後流路が移動した場合は随時見直しを行う。
A	河岸侵食が堤防の近傍に達する箇所	今後の蛇行変化に伴う河岸侵食によって、低水路が堤防保護ライン(80m)を割り込むと想定される区間。	
B	護岸端部のすり付け箇所	堤防保護ラインは満足しているが、護岸端部の破壊防止など、機能維持のために防護が必要な区間。	
C	将来、流路の変動によっては対策が必要になる箇所	堤防区間において、S~Bに該当しない区間。	

図-17 実施した堤防侵食に対する危険度評価

で、後者の出水終期に堤防侵食が生じた。この出水経験を踏まえ、提案した侵食対策の効果を検証した結果²⁷⁾を報告する。

4. 1. 1 堤防侵食対策

a) 2011年出水の被災概要および河岸侵食特性

音更川は流域面積 740km²、幹川流路延長 94km(内、直轄管理区間延長 30km)の十勝川の一次支川である。上流は石狩山地の山間溪谷の間を流れ、山地から土幌台地へ抜ける箇所には発電用の糠平ダム(流域面積 388 km²、昭和 31 年竣工)、元小屋ダム(流域面積(糠平ダムと重複する流域を除く) 21km²、昭和 33 年竣工)が建設されている。その下流は畑作地帯の中を流れる有堤区間となっている。2011年9月の出水で堤防侵食が発生した箇所は、有堤区間のほぼ中央にあたる KP18.2 の左岸地点であった。この地点は、平均的な河床勾配が約 1/164 であり、河床材料の代表粒径は約 69mm、平均的な河道幅(堤堤間)は約 300~350m、低水路幅は約 100~200m と比較的広く、セグメント 1 に分類される幅広河道の急流区間である。

2011年9月の出水時に、音更川の随所で河岸侵食や流路変動が発生した。堤防が侵食された KP18.2 左岸付近では、低水護岸および高水護岸がもともと設置されておらず、洪水によって高水敷の侵食が進行し、その侵食が堤防裏法の法肩にまで達した。また、他の地点でも堤防のすぐ近くまでせまる大規模な河岸侵食が

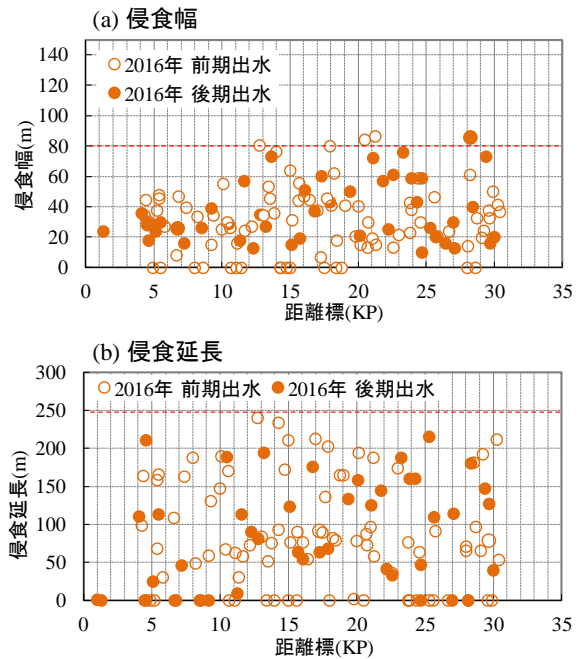


図-18 2016年前期出水時と後期出水時の侵食規模

発生していた。

図-13 に音更川下流の音更水位流量観測所の既往出水の流量ハイドログラフを示す。2011年出水は、ピーク流量が中規模でありながら、洪水が長時間継続していた。このことから、流量規模だけでなく洪水の継続時間が侵食規模に影響することが当時の検討で示唆さ

れた。

2011年出水時に発生した河岸侵食箇所の侵食幅と侵食延長を図-14に示す。広範囲で大規模な河岸侵食が発生し、最大で幅80m、延長250m程の侵食規模であったことがわかる。出水前後の航空写真により河道形状の変化特性を検討し、流路の横断方向の蛇行振幅が出水によって増大し、また、蛇行流路そのものが出水中に下流側へと移動する傾向を明らかにしている(図-15)。このような流路変動の特性に伴って図-14に見られる大規模な河岸侵食が音更川の広い範囲で発生した。

b) 侵食予測範囲に基づいた危険度評価³⁾

蛇行流路の振幅の増大と蛇行流路そのものの流下が大規模な河岸侵食の要因となる音更川において、予め堤防侵食の危険箇所を特定することは難しい。しかし、短期間で全川にわたって低水護岸を整備することは経済的にも難しく、段階的な整備が求められる。そこで、2011年出水時の実績に基づき、蛇行流路の水衝部では次の出水中に側方に最大80mおよび流下方向に最大250mの侵食が生じるとして侵食予測範囲を定めた。全ての蛇行流路水衝部に対して、侵食予測範囲を設定(図-16)し、予測された侵食範囲、堤防位置、既設護岸敷設区間および将来の河道整正を考慮して、図-17に示すように、ランクS、A、BまたはCに危険度を分類した。ここで、ランクSまたはAの上下流区間は、護岸端部からの侵食による破壊防止の観点から、護岸の機能維持に必要なすりつけ箇所としてランクBとした。その範囲は、整備される護岸と当時の流路との平面的な位置関係より判断した。

このとき、音更川における堤防防護に必要な高水敷幅は2011年出水の実績より80mに更新された(2011年出水以前は40m)。また、河岸侵食に対する堤防防護幅だけでなく、流路変動による水衝部の流下現象を踏まえて、流下方向に防護すべき延長距離についても考慮されている点が当危険度評価の主な特徴の一つである。

危険度がランクSまたはAと評価された箇所より優先して低水護岸の整備が実施された。実際に、2013年度までに危険度評価がランクSまたはAおよび一部のランクBの箇所で低水護岸の整備が完了した。

直ちに堤防侵食が生じる危険性が無い箇所は、優先度が最も低いランクCに分類され、少なくとも2016年出水が発生するまで低水護岸は未整備であった。しかし、水衝部の位置が大きく変動する音更川では、自然河岸である限り堤防侵食の危険性を完全に排除でき

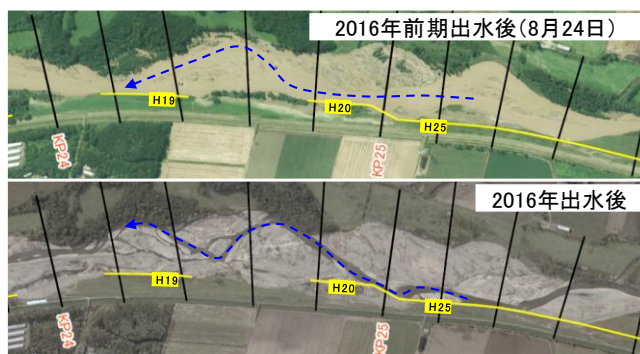


写真-9 2016年前期出水後(8月24日撮影)および2016年出水後の航空写真例

ないことから、当時の検討でランクCの区間においても将来的な必要性を想定した暫定的な低水護岸ラインが設定された^り。

4. 1. 2 2016年出水の経験を踏まえた堤防侵食対策の検証

a) 2016年出水ハイドログラフの特徴(前期出水と工期出水)

2016年8月、音更川では図-13のように2週間のうちに複数の出水が連続して発生した。図中に示すように前期出水と後期出水に分けると、前期出水は2016年以前の既往最大規模に相当し、後期出水はその既往最大流量を更に大きく上回る規模であった。この連続した出水の間、音更川ではほぼ全川にわたり流路が大きく変動し、随所で河岸侵食が発生した。

前期出水時にも随所で河岸侵食や流路変動が生じてはいたが堤防被害は発生しなかった。その一方で、KP21.2左岸における堤防の侵食が後期出水の終期に発生した(写真-2)。この付近は2011年出水後に実施した危険度評価でランクCに分類された箇所であり、低水護岸が未整備であった。水衝部における河岸侵食が高水敷で止まらず堤防裏法の法肩まで進行した。

b) 侵食規模に関する検証

2016年出水の全期間中に進行した河岸侵食幅を図-3に示している。ここでは、出水前(2011年出水後撮影)と出水後(2016年出水後撮影)の航空写真を比較して河岸侵食幅を計測した。また、2016年の出水期間中、前述の前期出水の終期(後期出水の前)にあたる8月24日に航空写真を撮影しており(写真-9)、これを出水前後の航空写真と比較し、それぞれ前期出水および後期出水時に発生した河岸侵食幅と侵食延長を求めた。その結果を図-18に示している。

図-3より、連続した出水全期間でみるといたる箇所で侵食幅が80mを上回っている。しかし、前期出水と

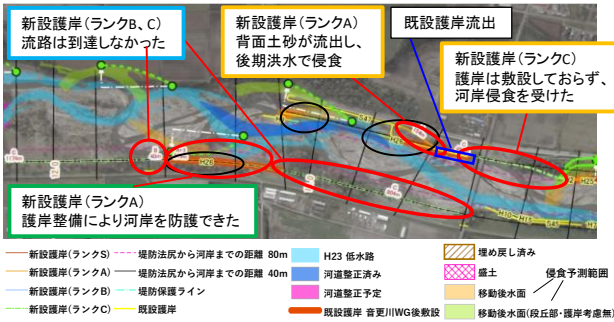


図-19 実際の侵食状況と既往の危険度評価結果との比較例

後期出水それぞれでみると、いずれの出水時の最大の侵食幅は80m程度、最大の侵食延長は250m程度であり、2011年出水における実績と同規模である。前期出水と後期出水は流量規模が大きく異なるにも関わらず、発生した最大の侵食規模は2011年出水時の最大侵食規模と同程度であったことが確認された。このことより音更川では、一出水で最大幅80m、延長250m程度の河岸侵食が生じるという予測は妥当であることが示された。

c) 危険度評価の検証

2011年出水後に実施した既往の危険度評価の妥当性を検証するため、上述の前期出水（先の評価後1番目の出水に相当）と後期出水（2番目出水に相当）の侵食状況を既往の危険度評価結果と比較し（図-19）、整理した結果を表-1に示す。その概要は以下のとおりである。

・ランク S または A

危険度のランク S または A の全ての箇所、低水護岸が敷設されており、河岸侵食が低水護岸前面まで進行し河岸侵食が抑制されていた。このことから、ランク S および A の評価は妥当であったと考える。ただし、後期出水時に低水護岸背後が侵食された箇所があった。

・ランク B または C

ランク B と評価された15カ所のうち、低水護岸を敷設した箇所は13カ所で、そのうち、6カ所で低水護岸により河岸侵食が抑制された。低水護岸が未敷設の2カ所では後期洪水により防護ラインを超えて河岸侵食が進行した。

ランク C と評価された12カ所では低水護岸は敷設されておらず、前期出水中に河岸侵食が防護ラインを超えて進行した箇所は2カ所だった。

図-20は、各ランクの評価箇所数に対して実際に河岸侵食が護岸位置まで達したか若しくは防護ラインを

表-1 検証結果

KP	護岸有り (■)	河岸侵食危険度ランク(H23洪水後河道)						備考			
		S		A		B			C		
		前期	後期	前期	後期	前期	後期		前期	後期	
5.0 右岸	■										
6.0 右岸	■			○	○						
6.2 右岸	■					○	○				
6.3 左岸	■							□	□		
6.6 右岸	■			○	○						
6.8 左岸	■							x	x		護岸敷設されておらず
7.6 左岸	■			○	○						
8.0 左岸	■			○	○						
8.4 左岸	■					□	□				
8.4 右岸	■					□	□				
8.6 右岸	■			○	○						
9.2 左岸	■			○	○						
9.4 左岸	■					○	○				
9.8 左岸	■	○	○								
10.0 右岸	■					□	□				
10.4 右岸	■	○	○								
10.6 左岸	■			○	○						
11.2~12.2 左岸	■							□	□		
12.4 左岸	■					□	□				
12.5 左岸	■			○	○						
12.8~13.6 左岸	■					□	□				
13.4 右岸	■			○	x						護岸背面土砂流出
13.6~13.8 右岸	■					□	x				護岸敷設されておらず
14.0 右岸	■			○	○						
14.2 右岸	■	○	○								
14.4 左岸	■	○	○								
14.8 左岸	■			○	○						
14.8~15.1 右岸	■	○	○								
15.2~15.4 右岸	■			○	○						
16.0~16.2 左岸	■			○	○						
16.1~16.7 右岸	■							□	□		
16.8~17.8 右岸	■			○	○						
18.0 右岸	■					○	○				
18.0 左岸	■					□	□				
18.4 右岸	■			○	○						
18.6 左岸	■			○	○						
18.8 左岸	■			○	○						
18.8~19.1 右岸	■							□	□		
19.2 左岸	■	○	○								
19.4 左岸	■			○	○						
20.8~21.2 左岸	■							x	x		護岸敷設されておらず
22.4~22.7 左岸	■							x	x		護岸敷設されておらず
23.0 左岸	■			○	x						堤防背面土砂流出
24.0 左岸	■							□	x		護岸敷設されておらず
24.5~24.8 左岸	■					□	x				護岸敷設されておらず
25.0~25.3 左岸	■			○	○						
25.4 左岸	■			○	○						
26.0 右岸	■					□	□				
26.5 左岸	■					□	○				
26.8 左岸	■			○	○						
26.6~27.4 右岸	■							□	□		
27.2~27.4 左岸	■			□	○						
27.6~27.8 左岸	■			○	○						
28.0 右岸	■			○	○						
28.0 左岸	■							□	x		上流で護岸背面土砂流出
28.3 右岸	■							□	□		
28.6 右岸	■			○	○						
29.2 右岸	■	○	○								
29.2 左岸	■			○	○						

○防護できた(護岸有りのみ)
□流路は到達しなかった
x河岸侵食を受けた

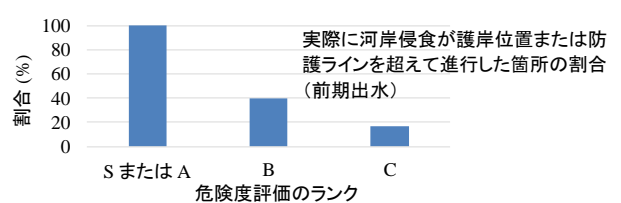


図-20 各ランクにおける実際の危険度の検証

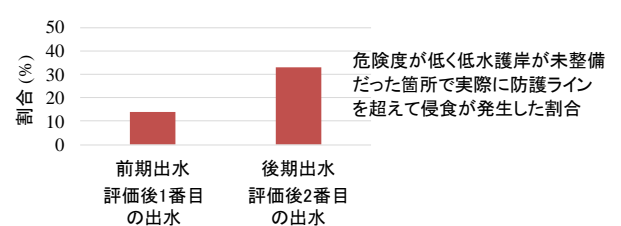


図-21 危険度が低く低水護岸未整備箇所における安全性の検証

超えて進行した箇所数の割合を示している。評価した危険度が低いほど、実際に危険だった箇所の割合が大きく減少しており、当危険度の評価は妥当であったと考えられる。

図-21 は、危険度が低く低水護岸が未整備だった箇所数（21カ所）に対して実際に防護ラインを超えて侵食が進行した箇所数の割合を示している。図より、危険度が低いと判断された箇所では、前期出水時（先の評価後1番目の出水に相当）に比べて後期出水時（2番目出水に相当）の方が実際に堤防侵食の危険性が増大していたことになる。このように、2番目以降の出水に対する安全性の低下が確認された。

d) 危険度評価に基づいた堤防侵食対策の効果

上記の検証より先の危険度評価に基づいた堤防侵食対策の効果を示す。

- ・図-20 からわかるように、当危険度評価手法の妥当性が示された。上述のとおり、実際に河岸侵食が防護ラインを超えて堤防に接近する危険があった箇所を高い確率で低水護岸によって防護できており、当対策の有用性が示された。

- ・特に危険度評価後1番目の出水（前期出水）に対して高い精度で効果が確認できる。

しかし、その一方で、図-21 に示すように、2番目以降の出水（後期出水）に対しては、低水護岸未整備箇所の安全性が低下するため、大きな河道変化後に再度危険度を評価し直す必要性が示された。今後は、大きな河道変化後に再度危険性を評価しなおし段階的な整備を進める必要がある。先の検討において優先度の低いランクCの箇所にも低水護岸法線を設定しており、河道変遷後の再評価の際には、低水護岸法線を変えず危険度のみを再設定するだけで良いため、効率的な護岸整備が見込める。

4.2 より効果的な堤防侵食対策に向けた課題

急流河川では出水毎に河道が変化するため、出水の度に侵食リスクを評価し直すことが重要であることが示された。そのためには、リスク評価をより効率的に実施できる技術の開発が必要となる。

また、気候変動に伴い、今後流量規模や洪水継続時間が増大する可能性もある中で、出水時の侵食規模の予測については既往出水の実績だけでなく物理的根拠に基づいた予測技術を確立させることが重要である。本課題で実施した水理実験により得られた知見や開発した計算モデルによって、大規模な侵食被害が同時多発的に発生した現象を物理的に明らかにしてきた。しかし、これらの技術だけでは水文現象や現地

状況に含まれる不確定さが反映されないため、将来の予測技術としては不十分である。これまでに得られた知見による河道特性の評価・分類や向上しつつある現地モニタリング技術等も合わせて活用するような予測技術の開発が必要であり、今後の課題である。

4.3 まとめ

2011年出水の音更川での堤防侵食被災を受けて、寒地河川チームは帯広開発建設部と連携し、堤防侵食の要因となる流路変動特性を踏まえた侵食リスクの評価とそれに基づいた堤防侵食対策を提案した。これに基づいて整備が進められた後に発生した2016年出水を受けて、提案した堤防侵食対策の効果を検証した。その結果、当評価手法の妥当性が認められ、当対策の有用性が示された。より効果的な堤防侵食対策に向けて、出水の度に变化する急流河川においては頻繁に再評価が可能となるようにリスク評価をより効率的に実施できる技術の開発が必要となる。将来予測の精度向上と合わせて今後の課題である。

5. おわりに

十勝川水系では、2016年出水時に流路変動に伴う側岸侵食で堤防決壊や落橋、護岸損壊などの深刻な被害が多数発生した。本課題は、特に堤防侵食被災の低減に貢献する技術開発の推進を目的として次の3つの達成目標の下で研究を実施し、本報にそれぞれ得られた主な成果を記した。

1つ目の達成目標「急流河川における流路変動特性の検証と予測」では、2016年出水の堤防侵食被災に至った流路変動特性を主に河道内の土砂動態の観点から検証するとともに、河床変動計算モデルによる再現を実施した。実河川における大規模な流路変動と堤防侵食に対して計算モデルを適用した事例は稀であったが、本課題では、十勝川水系で発生した多くの侵食被災箇所を対象とした計算でその再現性を実証しており、被害予測へ計算モデルが適用できる可能性を示した。

2つ目の達成目標「河道内樹木の管理による対策技術の開発」では、樹木域で大規模な河岸侵食が生じた事例が散見されたことに対して検証を実施し、河岸の樹木が侵食現象に与える危険性を明らかにした。また、樹木の影響を考慮できる計算モデルを開発し、樹木域においてそのモデルの再現性が大きく向上した。

3つ目の達成目標「流路変動特性を考慮した侵食防護技術の開発」では、2011年出水時にも堤防侵食の被災が生じた十勝川水系音更川を対象として、流路変動特性を踏まえた侵食リスクの評価とそれに基づいた堤

防侵食対策を提案した。これに基づいて進められた整備の効果を検証し、当評価手法の妥当性が認められ、当対策技術の有用性を示した。より効果的な堤防侵食対策に向けて、出水の度に変化する急流河川においては頻繁に再評価が可能となるようにリスク評価をより効率的に実施できる技術の開発が必要となる。将来予測の精度向上と合わせて今後の課題である。

参考文献

- 1) 土木学会北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害報告書、2017
- 2) 石田義明、山口里実、久加朋子、岩崎理樹、清水康行、川村育男、泉典洋:札内川・戸蔭別川合流地点における堤防決壊と氾濫原からの還流による被害特性の検証、河川技術論文集、第23巻、pp.1-6、2017
- 3) 久加朋子、清水康行、宮本具征、劔持浩高、酒谷賢治、泉典洋、山口里実、岩崎理樹、石田義明:2016年北海道豪雨災害におけるペケレベツ川の被災状況と流路変動特性の検証、河川技術論文集、第23巻、pp.55-60、2017
- 4) 山口里実、久加朋子、清水康行、泉典洋、渡邊康玄、岩崎理樹:河道内の土砂動態と流路変動の関係、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_1153-I_1158、2018
- 5) 久加朋子、山口里実:側岸に繁茂する植生が流路変動に与える影響、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_1135-I_1140、2018
- 6) 岡部和憲、久加朋子、清水康行、長谷川和義、新庄興、山口里実:流量低下時における河道変動の応答特性～十勝川水系音更川を事例として～、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_1501-I_1506、2018
- 7) 渡邊健人、久加朋子、山口里実、清水康行:大規模出水時における河道内樹木と流路変動特性の関係：札内川を事例として、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.I_1015-I_1020、2018
- 8) 岡部和憲、久加朋子、清水康行、長谷川和義、新庄興、山口里実:流量ハイドログラフ形状に対する蛇行流路の移動特性～十勝川水系音更川を事例として～、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.I_1009-I_1014、2018
- 9) 山口里実、久加朋子、岡部和憲、桑村貴志:急流河川における低水護岸背後の高水敷侵食特性に関する水理模型実験、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.75、No.2、pp.I_955-I_960、2019
- 10) 岡部和憲、久加朋子、山口里実、清水康行、新庄興、長谷川和義:急流河川における将来洪水流量を考慮した河岸侵食特性と河道計画に関する考察、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.75、No.2、pp.I_1423-I_1428、2019
- 11) 後藤孝臣、北村忠紀、辻本哲朗:上・下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究、土木学会論文集、No.684、pp.35-46、2001
- 12) 中西哲、長谷川和義、高橋圭吾:拡幅を伴う直線流路の河床変動1次元解析、水工学論文集、第49、pp.985-990、2005
- 13) Johannesson H., and G. Parker: Linear theory of river meanders, Water Resour. Monogr., Vol. 12, pp. 181-213, 1989
- 14) 泉典洋、青木章宜:河床上昇・低下を伴う蛇行の線形安定解析、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.68、No.2(応用力学論文集 Vol.15)、pp.I_609-I_616、2012
- 15) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura, I.: Numerical simulation on bed evolution and channel migration in rivers, River Flow 2012, pp. 673-679, 2013
- 16) Asahi K., Shimizu Y., Nelson J., Parker G.: Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 118, 2208-2229, 2013
- 17) Nagata T., Watanabe Y., Yasuda H., Ito A.: Processes and mechanisms of river bank erosion planform shape of the river bank, Earth Surf. Dynam., 2, 255-270, 2014
- 18) Germanoski D., Schumm S. A.: Changes in braided river morphology resulting from aggradation and degradation, Journal of Geology, vol. 101, p. 451-466, 1993
- 19) 泉典洋、高畑知:供給土砂量の変化が流路形態に及ぼす影響に関する実験的研究、研究所紀要(XX)、1、2009
- 20) 芦田和男、江頭進治、里深好文:網状流路における流砂量、pp.391-396、1991
- 21) 北海道開発局帯広開発建設部治水課、(独) 土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ:平成 23 年 9 月 2 日からの停滞前線による大雨被害十勝川水系音更川の堤防の一部流出に関わる調査報告、2012
- 22) 芦田和男、道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No.206、pp.59-69、1972
- 23) 永多朋紀、渡邊康玄、清水康行、井上卓也、船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究、水工学論文集、Vol.60、pp.1081-1086、2016
- 24) 井上佑輔、久加朋子、山口里実、今日出人、清水康行:急流河川に繁茂する植生流失特性の違いに伴う流路変動特性に関する実験、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.75、No.2、pp.I_883-I_888、2019
- 25) 山口里実、久加朋子、南郁慧、清水康行、岩崎理樹:河岸植生が流路形態へ与える影響に関する実験—河岸高さに対して根が浅い場合—、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.77、No.2、pp. I_721-I_726、2021

- 26) 桑村貴志、永多朋紀、旭一岳:出水時における音更川の流路変動特性と堤防防護の対策について、平成 24 年度北海道開発技術研究発表会、2012
- 27) 柏谷和久、桑村貴志、泉典洋、渡邊康玄、山口里実、横山洋:音更川における堤防侵食対策の効果と課題—流路変動にともなう大規模河岸侵食に対して実施した危険度評価の検証—、河川技術論文集、第 26 巻、pp.503-508、2020

RESEARCH ON THE PREVENTION OF THE DAMAGE CAUSED BY LARGE BANK EROSION IN GRAVEL BED RIVERS

Research Period : FY2017 - 2021

Research Team : River Engineering Research Team

Author : OGUSHI Hiroya,

KAWAMURA Satomi,

OISHI Tetsuya,

IWASAKI Toshiki

Abstract : The river channels sometimes change drastically during flood, and serious damages such as levee breach due to bank erosion occur in gravel bed rivers. Simulation and predicting the change in river channel and bank erosion is an important issue for river management. In the tributaries of the Tokachi River, a lot of serious damages such as levee breach, collapse of bridge, and revetment damage occurred due to bank erosion occurred by channel change during the 2016 flood. This study was conducted under three objectives, especially for promoting technological development that contributed to the reduction of levee erosion damage. This report describes the main results obtained for each objectives.

Key words : Gravel bed rivers, Bank erosion, Levee damage, Prediction, Countermeasures