

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 —

A CONSIDERATION ON THE EFFECTS AND ISSUES OF PREVENTIVE MEASURES FOR THE LEVEE COLLAPSE CAUSED BY BANK EROSION IN THE OTOFUKE RIVER - VERIFICATION OF RISK EVALUATION PERFORMED FOR THE SERIOUS BANK EROSION DUE TO CHANGES IN WATERCOURSES -

柏谷 和久¹・桑村 貴志¹・泉 典洋²・渡邊 康玄³・山口 里実⁴・横山 洋⁴
Kazuhisa KASHIWAYA, Takashi KUWAMURA, Norihiro IZUMI, Yasuharu WATANABE,
Satomi YAMAGUCHI and Hiroshi YOKOYAMA

¹正会員 北海道開発局 帯広開発建設部 (〒080-8585 帯広市西5条南8丁目)

²正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 北見工業大学 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁴正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

In the Otofuke River, levee collapse caused by bank erosion occurred due to changes in watercourses in the 2011 flood and the 2016 flood. After the disaster in 2011, levee erosion preventive measures have been implemented based on the risk evaluation taking into account the characteristic of the changes in watercourses. It was shown that the validity of the risk evaluation method was confirmed, indicating the usefulness of the measures. On the other hand, it becomes clear that the re-evaluation is necessary after the major river channel change because the safety of the low water revetment undeveloped area is reduced for the second and subsequent floods after the evaluation. For more effective preventive measures, it is necessary to predict erosion area during continuous floods or floods with long durations. It was also shown that it is required to clarify the chute cut-off mechanism sometimes observed in the changes in watercourses, in order to more accurately predict the serious bank erosion in the Otofuke River.

Key Words: Bank erosion, changes in watercourses, preventive measures for levee collapse, risk evaluation, the Otofuke River

1. はじめに

急流河川である十勝川水系音更川では、2011年に続いて2016年出水時に流路変動による堤防侵食が生じた(写真-1)。2011年の被災後、「音更川河道計画WG」が設置され、堤防侵食の要因となる流路変動特性やその将来予測が検討されるとともに、次のような堤防侵食対策が示された。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したものであ



写真-1 音更川における堤防侵食箇所

る^{1),2),3)}。その後この優先度に応じて整備が進められた。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、先の侵食対策の効果と課題を検証

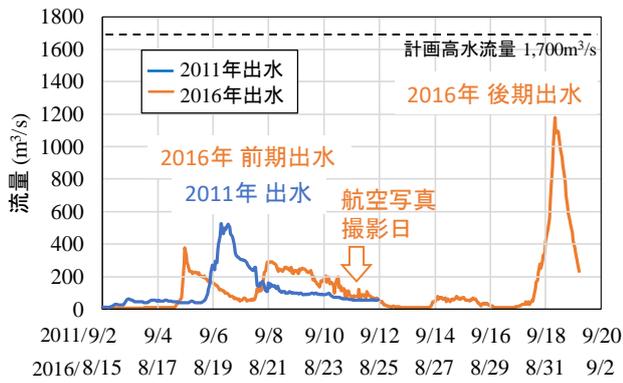


図-1 流量ハイドログラフ

することが本研究の目的である。

河川急流部における堤防の侵食被害が頻発する中、音更川のような急流河川では、被災箇所の復旧だけでなく、堤防侵食を予防するための計画的段階的な河道の整備が求められている。危険度評価に基づいた段階的な侵食対策をより確実に実施するため、また、他河川への適用を検討するためにも、実際の出水経験後の評価手法の検証は重要である。本報は、音更川で実施された既往の危険度評価とそれに基づいた堤防侵食対策を検証した事例を報告するものである。

2. 2011年出水後に実施された堤防侵食対策

(1) 音更川における2011年出水概要

a) 河川概要

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渓谷の間を流れ、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³⁾。2016年8月の出水で堤防侵食が発生した箇所は、それより3km上流にあたるKP21.2 の左岸地点であった。

b) 被災概要²⁾

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

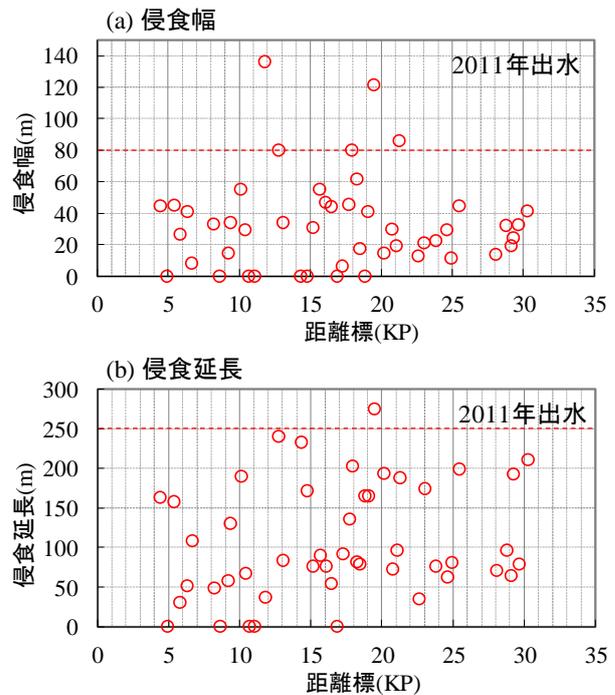


図-2 2011年出水時の侵食規模¹⁾

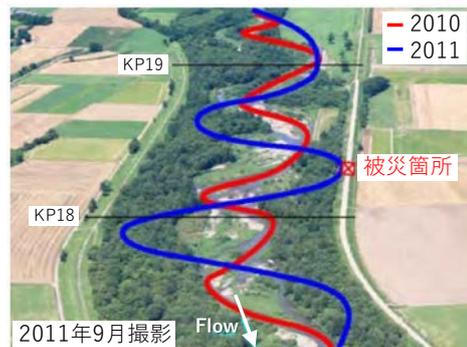


図-3 2011年出水の蛇行流路の変化¹⁾

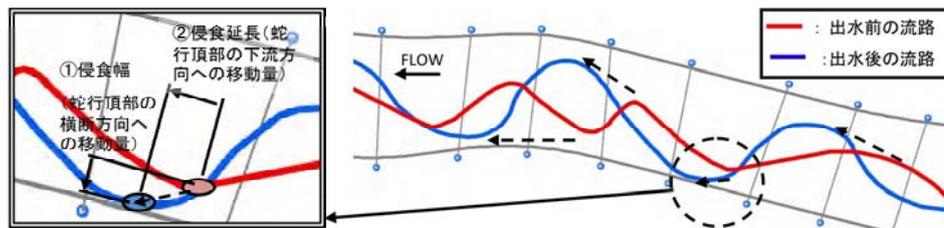
のすぐ近くまでせまる大規模な河岸侵食が発生していた。

図-1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。

c) 河岸侵食特性^{1),2)}

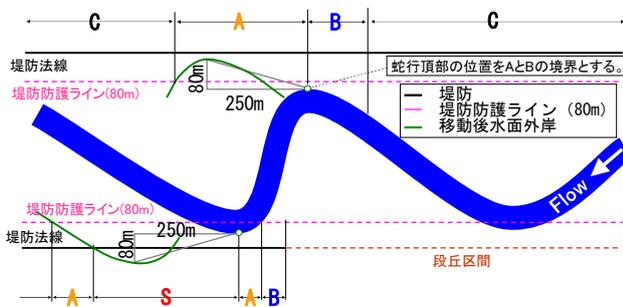
2011年出水時に発生した河岸侵食箇所の侵食幅と侵食延長を図-2に示す。広範囲で大規模な河岸侵食が発生し、最大で幅80m、延長250m程の侵食規模であったことがわかる。当時、出水前後の航空写真により河道形状の変化特性を検討したところ、流路の横断方向の蛇行振幅が出水によって増大し、また、蛇行流路そのものが出水中に下流側へと移動する傾向が明らかになった（図-3）。このような流路変動の特性に伴い、図-2に見られる大規模な河岸侵食が音更川の広範囲で発生したとされる。

出水中のこのような蛇行流路の発達は、既往出水時に形成された砂州形状に起因した現象であることが当時整理された^{3),4)}。また、4章(2)で後述するように、堤防侵



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-4 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、低水路が堤防防護ライン(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	堤防防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-5 実施した堤防侵食に対する危険度評価

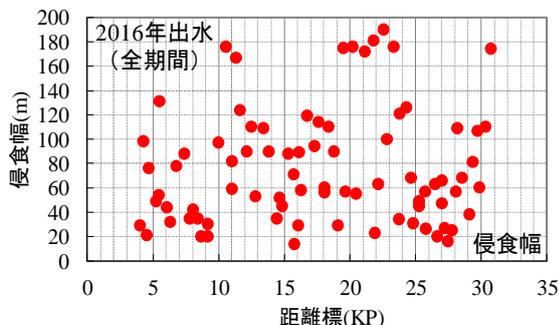


図-6 2016年出水時（全期間）の侵食規模

食箇所より上流側において、比較的大規模な蛇行流路の短絡が出水中に生じていた。この短絡地点より下流側では、蛇行流路の位相が大きく変動しており、蛇行振幅の急激な発達への関連性が注視されたものの、当時は大規模侵食に対する流路短絡の影響は不明であった。

(2) 実施した堤防侵食対策

a) 予測される侵食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-4)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-5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

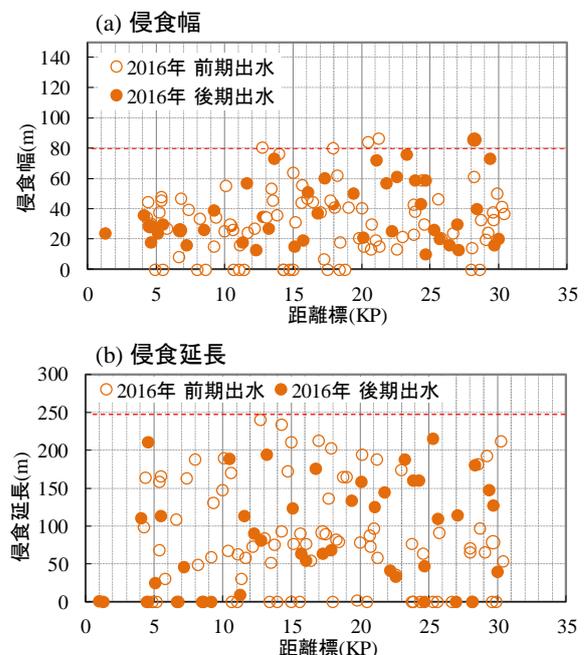


図-7 2016年前期出水時と後期出水時の侵食規模

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、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。

b) 優先度に応じて実施した低水護岸の整備

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 の箇所では低水護岸の整備が完了している。

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ないことから、当時の検討では、ランク C 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。

3. 2016年出水の経験を踏まえた堤防侵食対策の

検証

(1) 2016年出水概要

2016年8月、北海道に上陸した3つの台風とその一週間後の台風10号の接近に伴う降雨の影響により、音更川では図-1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、前出の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-1)。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。

(2) 先の出水後に実施した堤防侵食対策の検証

a) 侵食規模の検証

2016年出水の全期間中に進行した河岸侵食幅を図-6に示す。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-2)、これを出水前後の航空写真と比較し、それぞれ前期出水時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-7に示している。

図-6より、連続した出水全期間でみるといたる箇所では侵食幅が80mを上回っている。しかし、前期出水と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

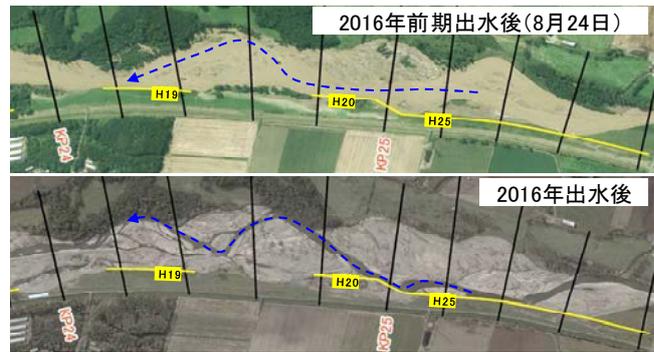


写真-2 2016年前期出水後(8月24日撮影)および2016年出水後の航空写真例

出水で最大幅80m、延長250m程度の河岸侵食が生じるといふ予測は妥当であることが示された。

b) 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-8)、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 の全ての箇所で、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-9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数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-10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。

c) 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



図-8 実際の侵食状況と既往の危険度評価結果との比較例

策の効果を以下に示す。

・図-9からもわかるように、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-10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. より効果的な堤防侵食対策に向けて

(1) 連続洪水を見据えた対策の必要性

先の危険度評価が妥当であったにも関わらず、2016年出水時に堤防侵食の被害が生じたのは、複数の出水が連続して発生したためである。仮に前期出水後に危険度が再評価されていれば、確実に低水護岸が整備された箇所である。しかし、気候変動による降雨形態が変化している現状において、今後も2016年のような連続洪水が発生する可能性は否定できない。そのため、連続洪水を見据えた危険度の評価が求められる。単に当評価における侵食予測範囲を2倍にすると明らかな過大評価となり現実的ではない。連続出水または長期出水に対する流路変動と河岸侵食の予測精度の向上が今後の課題である。

(2) 大規模河岸侵食の発生要因の再考

a) 流路短絡箇所の下流側で大規模河岸侵食が発生

流路の蛇行振幅が急速に発達し、大規模な河岸侵食が発生した箇所について河道特性を改めて分析した。図-11に2011年出水時の堤防侵食箇所、図-12に2016年出水時の堤防侵食箇所をそれぞれ示した。

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								×	×	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	■			○	×					護岸背面土砂流出
13.6~13.8 右岸								□	×	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								×	×	護岸敷設されておらず
22.4~22.7 左岸								×	×	護岸敷設されておらず
23.0 左岸				○	×					堤防背面土砂流出
24.0 左岸								□	×	護岸敷設されておらず
24.5~24.8 左岸						□	×			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								□	×	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
× 河岸侵食を受けた

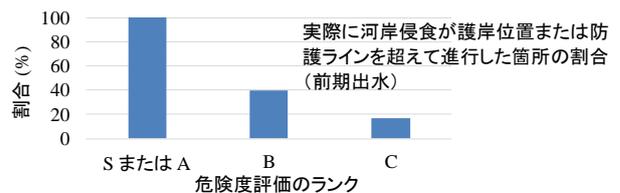


図-9 各ランクにおける実際の危険度の検証



図-10 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

前述のとおり、2011年出水後の検討においても上流側の流路短絡と大規模な河岸侵食の関係性が示唆されていたが、2016年出水時も堤防侵食箇所より上流側で大規模な流路の短絡が生じている。両図をみると、上流側で流

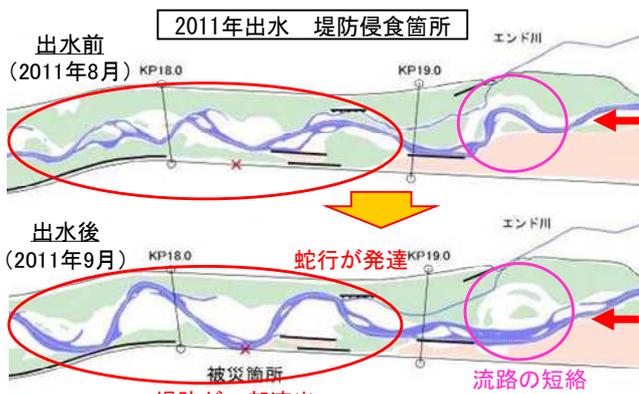


図-11 堤防侵食箇所上流で流路短絡 (2011年出水時)

路が短絡したことによって、その下流で流路の位相が大きく変化しており、蛇行振幅が大きくなり大規模な河岸侵食が発生している、という点で非常に類似した現象であることがわかる。

b) 短絡により新たに発生した蛇行流路の発達の危険性

既往研究では、2011年および2016年出水時の河道変化がそれぞれ平面二次元河床変動計算で再現されている⁹⁾。いずれの再現結果でも上流側の短絡により位相の異なる蛇行流路の発達が認められた。下流側で発生した大規模な河岸侵食に連動するような流路の蛇行振幅が発達する現象が出現した可能性がある。

短絡によりそれまでの蛇行とは異なる蛇行流路の発達やそれによる河岸侵食は、経験的な当手法のみでは十分に予測できない。このような流路の短絡がいつどこで発生するか、という点も含めて予測精度向上のために、今後、短絡現象と流路発達に関する機構解明が必要である。

(3) 低水護岸背面土砂の洗掘防止の必要性

既設の低水護岸は、河岸侵食の進行を護岸前面で抑制することで有効に機能したが、その一方で低水護岸の背面が洗掘された箇所が散見され、次の出水に対する河岸侵食抑制機能が損なわれる事態となった。短期間に連続した洪水が発生した実績を踏まえ、低水護岸の背面（高水敷）の保護を目的とした、護岸の継ぎ足しなどの対策工法の必要性が示された。背面土砂の洗掘実績と出水時の各種水理量との相関などを調べ、背面土砂洗掘の発生予測を試みたが予測手法の確定には至らなかった。今後、低水護岸背面土砂の洗掘機構の解明や有効な対策工法について検討が必要である。

5. おわりに

本研究は、2011年出水後に音更川で実施された堤防侵食対策の効果と課題を検証することが目的である。対策実施後に実際に経験した2016年出水を踏まえて対策の妥当性を検証した結果は次のとおりである。

- ・音更川では、蛇行流路の振幅の増大と蛇行流路そのも

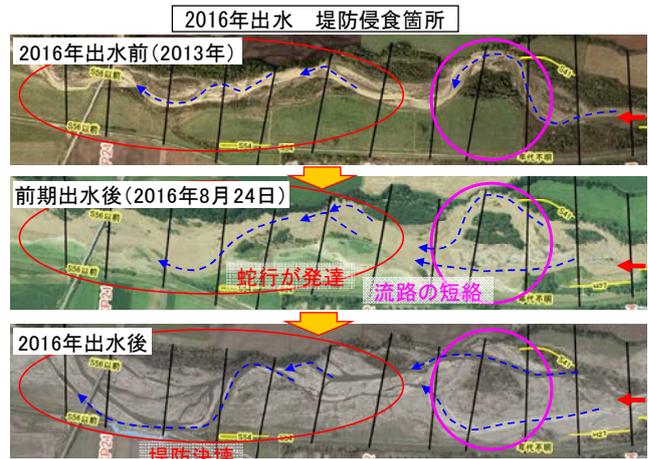


図-12 堤防侵食箇所上流で流路短絡 (2016年出水時)

のの流下が大規模な河岸侵食の要因となるため、堤防侵食の危険度を評価する上で、堤防防護幅だけでなく、水衝部の流下現象を踏まえ、流下方向に防護すべき延長距離についても考慮する必要がある。当危険度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。

- ・特に危険度評価後1番目の出水に対して高い精度で効果が確認できた。しかし、その一方で、2番目以降の出水に対しては、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。

- ・より効果的な堤防侵食対策に向けて、連続出水または長期出水に対する流路変動と河岸侵食の予測精度の向上が今後の課題である。

- ・特に、流路の短絡が生じると、新たに発生した流路の蛇行振幅が急速に発達する危険性が示された。河岸侵食の予測精度向上のためにも、今後機構解明が必要な現象である。

参考文献

- 1) 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年度技術研究発表会, 2012.
- 2) 北海道開発局帯広開発建設部, 寒地土木研究所: 十勝川水系音更川の堤防の一部流出に係る調査報告, 2012.
- 3) 北海道開発局帯広開発建設部: 音更川の河岸侵食対策について, 2013.
- 4) 永多朋紀, 渡邊康玄, 安田浩保, 伊藤丹: 砂州地形に誘発された蛇行発達, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.69, No.4, I1099-I1104, 2013.
- 5) 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, I1153-I1158, 2018.
- 6) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura I: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, *Advances in Water Resources*, 93, A, pp.118-134, 2015.

(2020. 4. 2受付)