



Fault Tree 図と流況計算を活用した 複断面河道における 侵食・洗掘による破堤危険性評価の提案

パシフィックコンサルタンツ株式会社 坂野アイカ*

※研究時は公益財団法人河川財団に所属

公益財団法人河川財団 河川総合研究所 上席研究員 鈴木克尚

公益財団法人河川財団 河川総合研究所 所長 天野邦彦



1. はじめに

研究の背景

- ▶ 音更川 (H28.9)、千曲川 (R1.10)、藁科川 (R4.9) など、侵食・洗掘による堤防欠損が多発している
- ▶ 予防保全型の河川管理を行うためには、破堤危険性を定量的かつ客観的に把握することが出発点であり、重要なプロセス



出典：
十勝川堤防調査委員会報告書 (H29.4)



出典：
千曲川堤防調査委員会報告書 (R2.8)

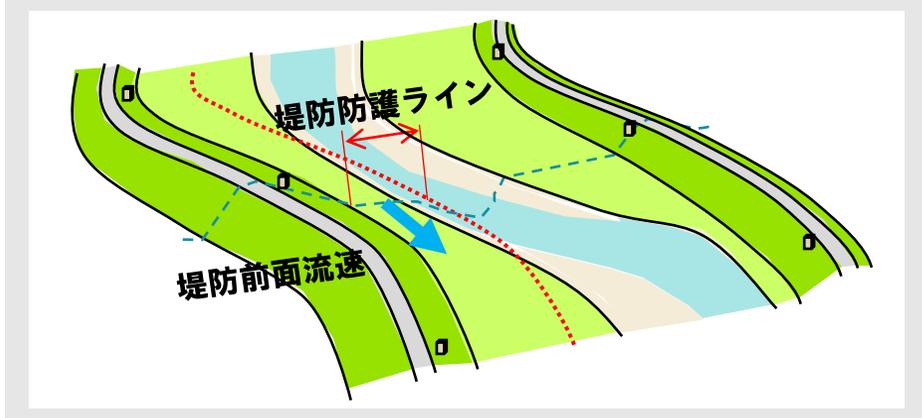


出典：
令和4年9月23日～24日の台風15号による
安倍川大井川流域の出水状況速報版【第2報】
(R4.10国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所)

1. はじめに

実務における対応

- ▶ 実務では堤防前面流速、堤防防護ラインなどをもとにした管理が行われている。



侵食・洗掘による破堤危険性評価についての課題

破堤に至る現象や経路が複雑

可能な限りの定量的な評価

洪水前に取得できる情報からの評価

堤防や河道の状況に応じた評価

被災メカニズムや数値計算の知見の反映

既往研究

単断面河道でのFault Tree図を用いた破堤危険性評価の提案

避けるべき頂上現象を設定し、頂上現象に至るまでのすべての事象を記載したFault Tree 図(以下、FT図)を作成し各事象の危険性を調べることで頂上現象の生起可能性を評価する手法

国の直轄管理区間は複断面の河道であることも多い

堤防は長大な線状構造物

FT図と流況計算を活用した複断面河道における侵食・洗掘による破堤危険性評価の提案

2. 検討方法

計算による予測の現状

- ▶ 侵食・洗掘による破堤までのすべての過程を計算で予測できれば、破堤の危険性を数値解析で評価が可能になるはずだが、侵食・洗掘過程の予測計算が困難

本研究での検討方法

- ▶ まず、破堤に至る過程について、Fault Treeで表現することにより、破堤につながると考えられる重要な前駆的現象（トリガー）を抽出
- ▶ 実際の被災事例を基に再現計算を実施し、前駆的現象（堤防のり面侵食等）の発生と、洪水時の流体力との関係性を検討
- ▶ 水理計算結果をもとに前駆的現象発生可能性の高い箇所を評価する方法を提案



3. 複断面河道のFT図の作成

FT図の作成の検討方法

- ▶ 堤防欠損、護岸破損などの事例を分析することで、現場で起きている破損のパターンを整理し、破堤に至る進行過程を推定
- ▶ 推定した進行過程や個々の堤防や護岸の壊れ方に関する既往知見を踏まえて事象の関係を整理・展開して、複断面の河道に対応したFT図を作成

損壊事例

事例番号	破損事例	河川	外力
事例①	・ 堤体侵食	多摩川	令和元年東日本台風
事例②	・ 高水敷洗掘	多摩川	令和元年東日本台風
事例③	・ 堤防欠損	音更川	平成28年台風第10号
事例④	・ 低水護岸背面の洗掘	多摩川	令和元年東日本台風
事例⑤	・ 河岸侵食	多摩川	令和元年東日本台風

既往知見

- ・ 改定 護岸の力学設計法, (財)国土技術研究センター, 2007
- ・ 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版), (財)国土技術研究センター, 2012
- ・ 十勝川堤防調査委員会報告書, 十勝川堤防調査委員会, 2017
- ・ 洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 建設省土木研究所, 土木研究所資料, 1997
- ・ 河川構造物と堤内地の洪水応答特性と減災への反映, 諏訪, 中央大学博士論文, 2021
- ・ 急流河川における急激で大規模な河道変動に伴う側岸侵食リスクと治水対策に関する研究, 岡部, 北海道大学博士論文, 2021 など

3. 複断面河道のFT図の作成

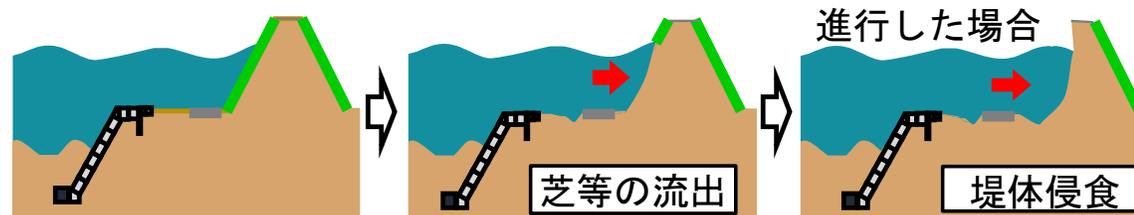
複断面河道の損壊事例の例

① 堤体侵食事例
(多摩川)
セグメント2-1



出典：出水概要（国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所）

破壊メカニズムの推定

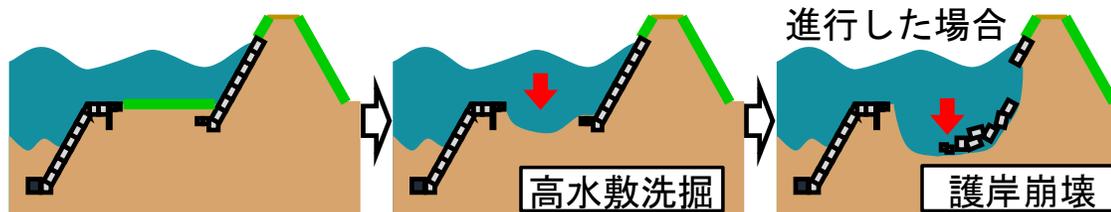


② 高水護岸前面
の洗掘事例
(多摩川)
セグメント2-1



出典：出水概要（国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所）

破壊メカニズムの推定



③ 流路変動による
堤防欠損事例
(音更川)
セグメント1

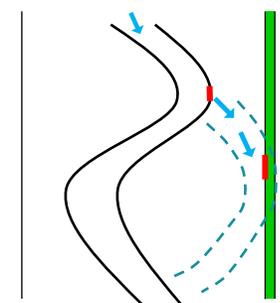


出典：十勝川堤防調査委員会報告書



出典：国土地理院地図に加筆

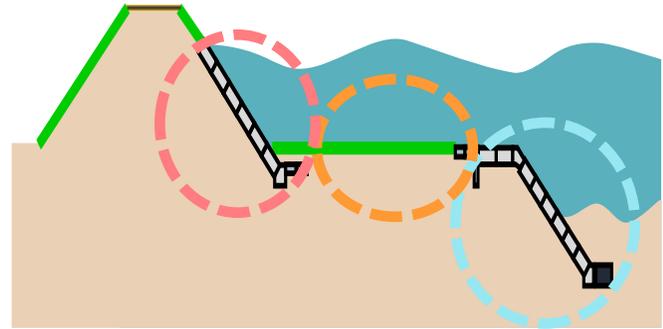
破壊メカニズムの推定



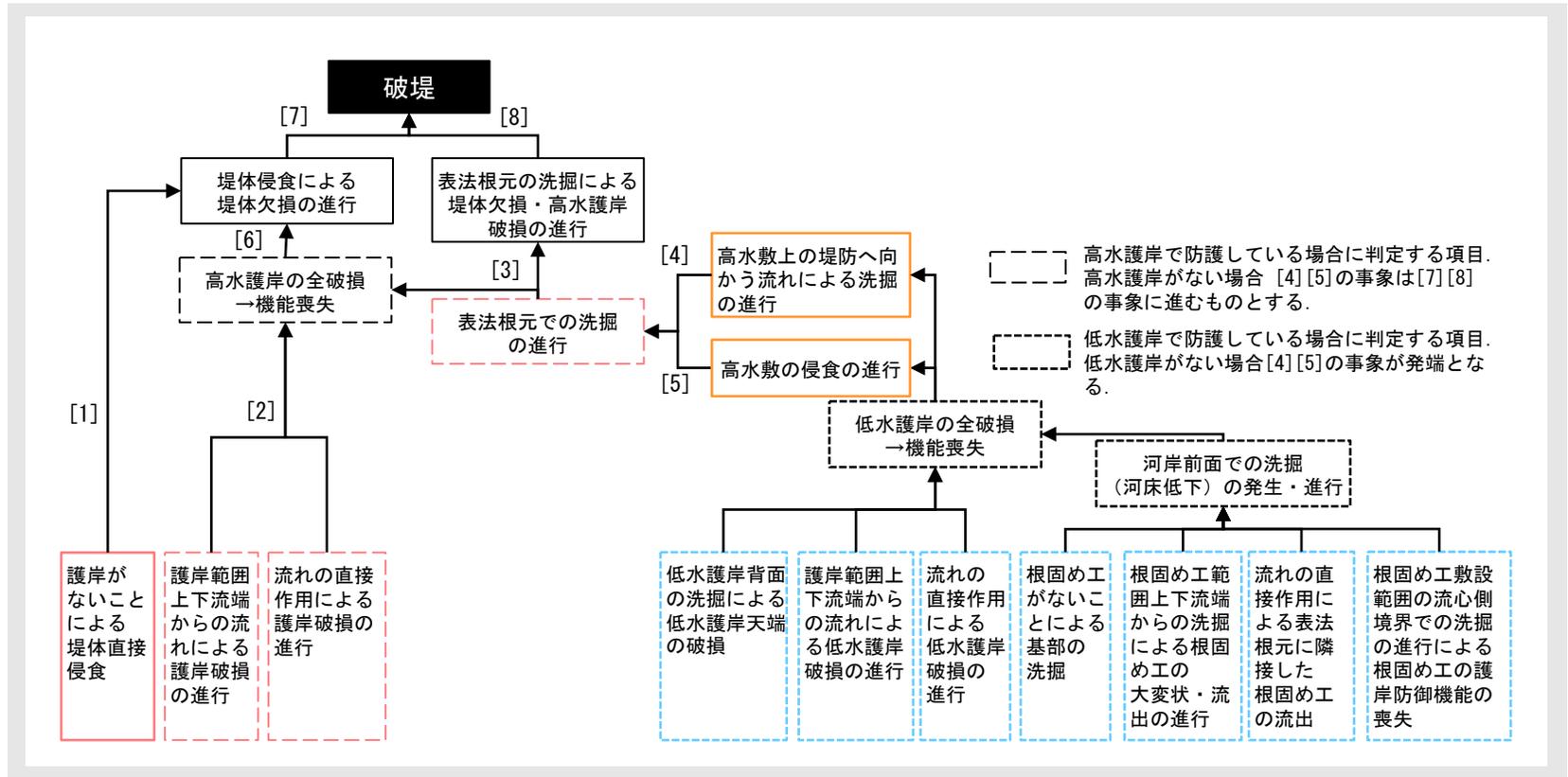
3. 複断面河道のFT図の作成

FT図の作成結果

- ▶ 既往知見や複断面河道の損壊事例から、**破堤の発端となる事象の発生箇所は、①堤防近傍、②高水敷、③低水路河岸(低水護岸)、の3箇所と推定**
- ▶ それぞれの箇所で発生する事象を展開し、破堤に至る過程として連鎖的に起こる事象の関係性を整理することで**複断面河道に対応したFT図**とした



複断面河道の概念図



複断面河道のFT図

4. FT図中の高水敷洗掘の生起可能性の判定手法

高水敷の洗掘を判定する指標・閾値の設定方法

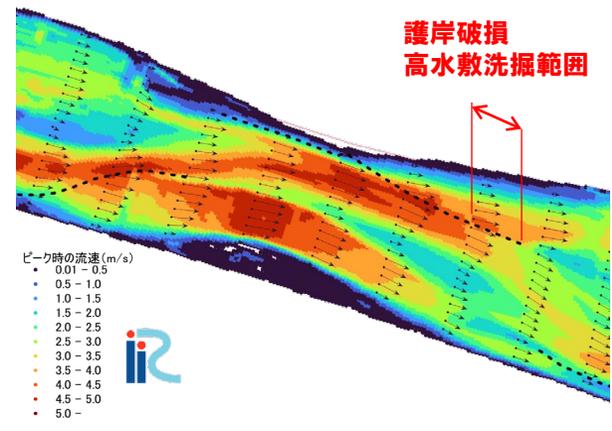
- ▶ 複断面河道の破堤危険性評価では高水敷や高水護岸の安定性を評価する必要があるが、高水敷の洗掘現象の生起可能性を判定するための指標・閾値が体系化されていない
- ▶ 実績の高水敷洗掘状況と流況再現計算とを比較して洗掘有無と対応関係が高い指標を選択し、高水敷の洗掘・非洗掘を分ける指標・閾値を設定した

実際の洗掘箇所・非洗掘箇所



出典：出水概要
(国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所)

平面流況計算



再現計算結果 ピーク時流速コンター図

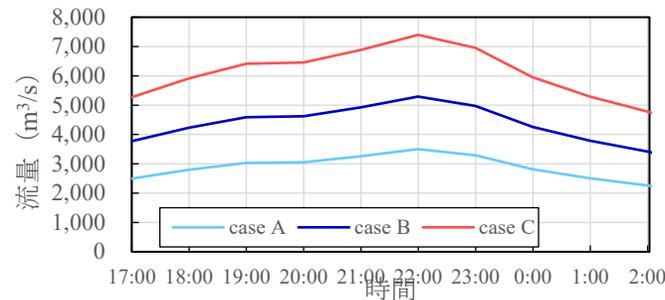
洗掘箇所を見分ける指標・閾値を分析

4. FT図中の高水敷洗掘の生起可能性の判定手法

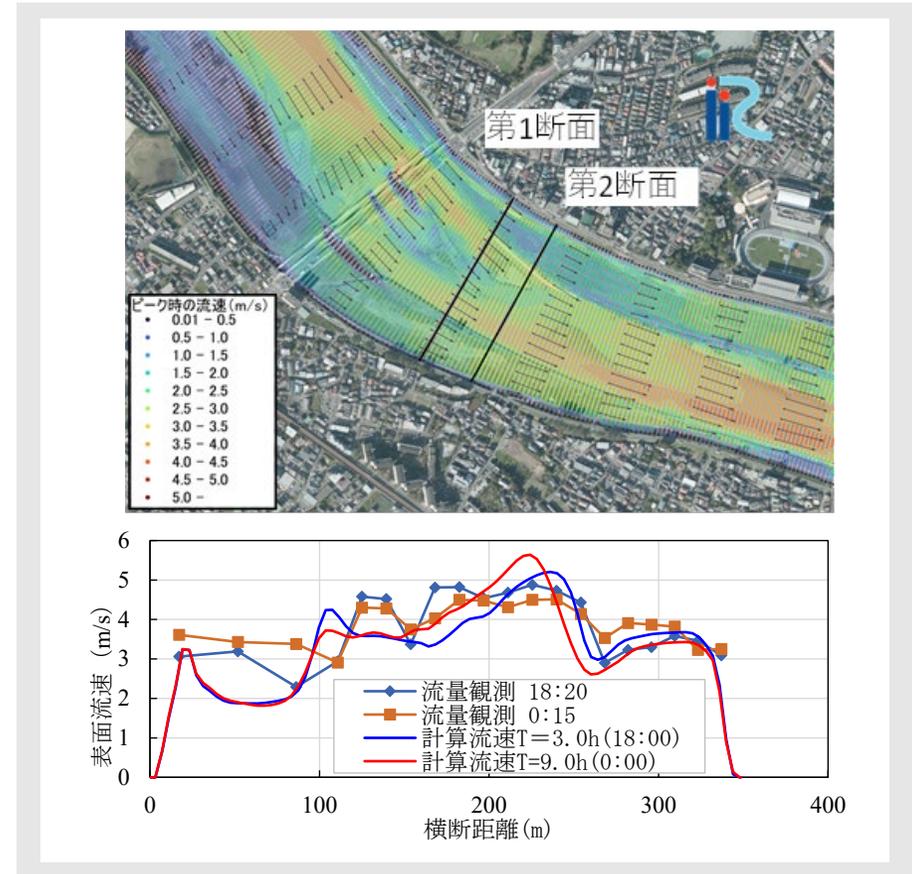
流況再現計算モデルの構築

- ▶ 高水敷の洗掘箇所分析に用いる流況計算は令和元年東日本台風時の多摩川18k~28k付近を対象とし、iRIC Nays2d+による固定床条件での平面二次元流況計算を実施
- ▶ 本計算における主な解析対象は堤体や高水敷に作用する流速によって規定される流体力であるため、高水観測時の浮子流下速度と解析結果の表面流速を比較し流速が概ね再現されることを確認

項目	設定値	設定備考
計算モデル	固定床平面流況解析 (iRIC Nays2d+を用いて計算)	
計算範囲	多摩川 18k付近 ~ 28k付近	
メッシュサイズ	横断方向約 4m、縦断方向約 8m	横断方向を一様に分割
地形	R2年 ALB	令和元年東日本台風後の地形
粗度係数	低水路、高水敷 (植生部以外)	0.025
	植生部	粗度係数に換算して設定 草本0.069、木本0.107
上流端流量	観測所の流量ハイドログラフをもとに設定	
下流端水位	観測所ピーク水位 下流区間の解析水位	
構造物	橋梁横断面図より橋脚を設定	



- 令和元年東日本台風のハイドログラフはcaseBの波形と想定
- caseAはピーク流量を7400m³/sとし、caseCはピーク流量を3500m³/sとしたハイドログラフであり後述の検討ケース



4. FT図中の高水敷洗掘の生起可能性の判定手法

高水敷洗掘を判定する指標・閾値の設定

- ▶ 流況再現計算結果を用いて得た、①ピーク時の流速、②流速×時間の累積値、③ピーク時の摩擦速度、④摩擦速度×時間の累積値、⑤根毛層洗掘深、の値の空間分布を求めて実績の洗掘発生箇所の分布との対応関係から洗掘判定への適用性を評価
- ▶ ほとんど差はなかったが、5つの中で最もよく合致していた④摩擦速度×時間の累積値を評価指標とした

項目	算出式	施設被災箇所の捕捉割合が80%以上となる閾値	閾値以上の洗掘範囲/ 閾値以上の範囲
①ピーク時の流速	V	2.2m/s	13%
②流速×時間の累積値	$\Sigma(V \cdot \Delta T)$ 0.33h毎の出力値を代表値として集計	15.0m/s・h	9%
③ピーク時の摩擦速度	$U_* = \sqrt{ghi}$	0.325m/s	13%
④摩擦速度×時間の累積値	$\Sigma(U_* \cdot \Delta T)$ 0.33h毎の出力値を代表値として集計	3.5m/s・h	14.0%
⑤根毛層洗掘深 ^{※2}	$\frac{\Delta Z}{\Delta t} = \frac{\alpha u_*(t)}{\ln(10)} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(10)}{\alpha u_*(t)} \cdot Z\right)$ $Z = \alpha u_* \cdot \log(T)$	7.0cm	13.7%

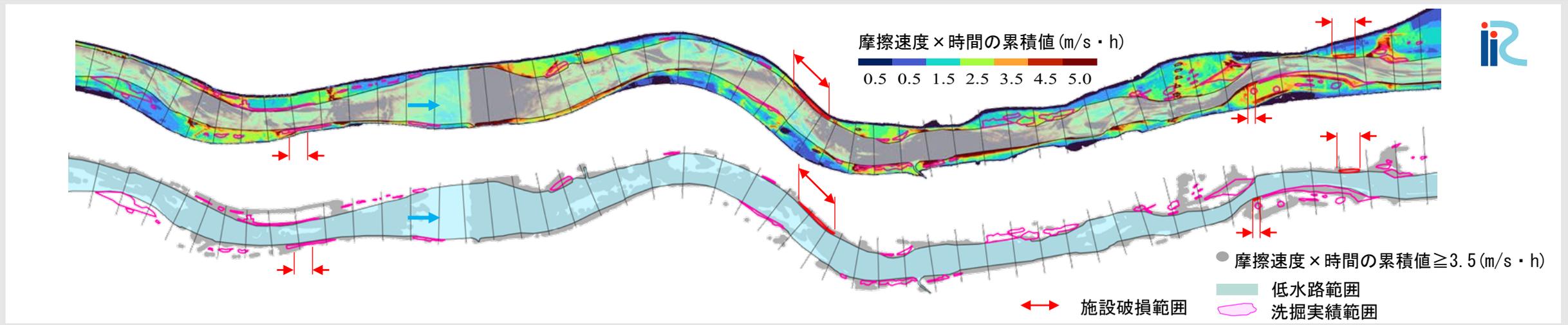
※1 五十嵐川における河川構造物への流速の作用時間に着目した被災要因の分析, 安田ら, 河川技術論文集, 第18巻, 2012

※2 根毛層が発揮する耐侵食性の評価方法, 服部ら, 土木学会第51回年次学術講演会, 1996

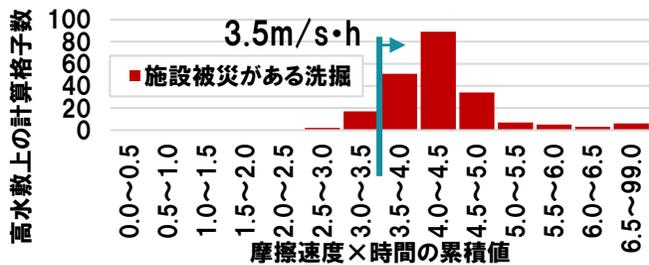
4. FT図中の高水敷洗掘の生起可能性の判定手法

高水敷洗掘を判定する指標・閾値の設定

▶ 摩擦速度 × 時間の累積値を評価指標とし、**高水敷洗掘の発生を判断する閾値を3.5m/s・hとした**



高水敷上の計算点の頻度分布

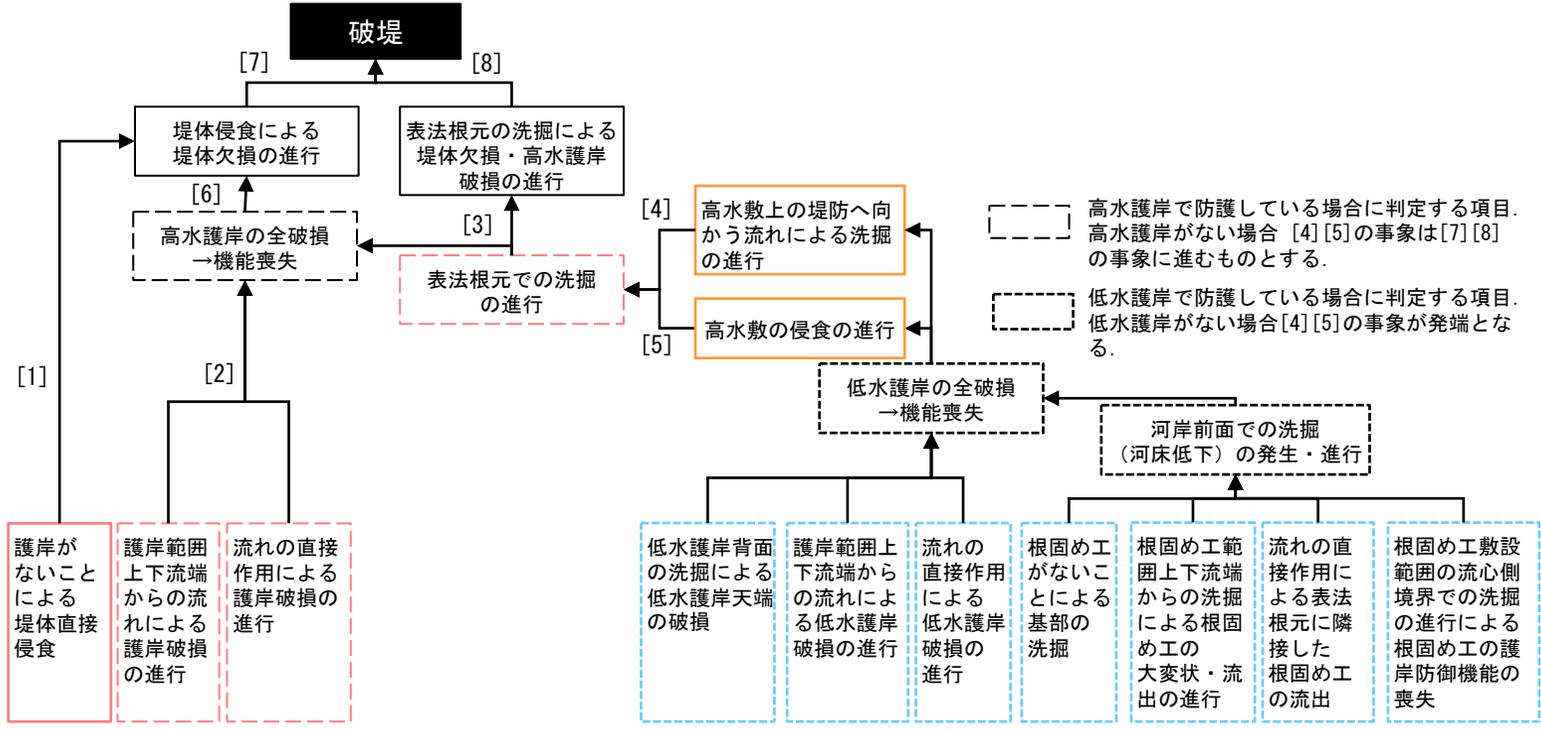
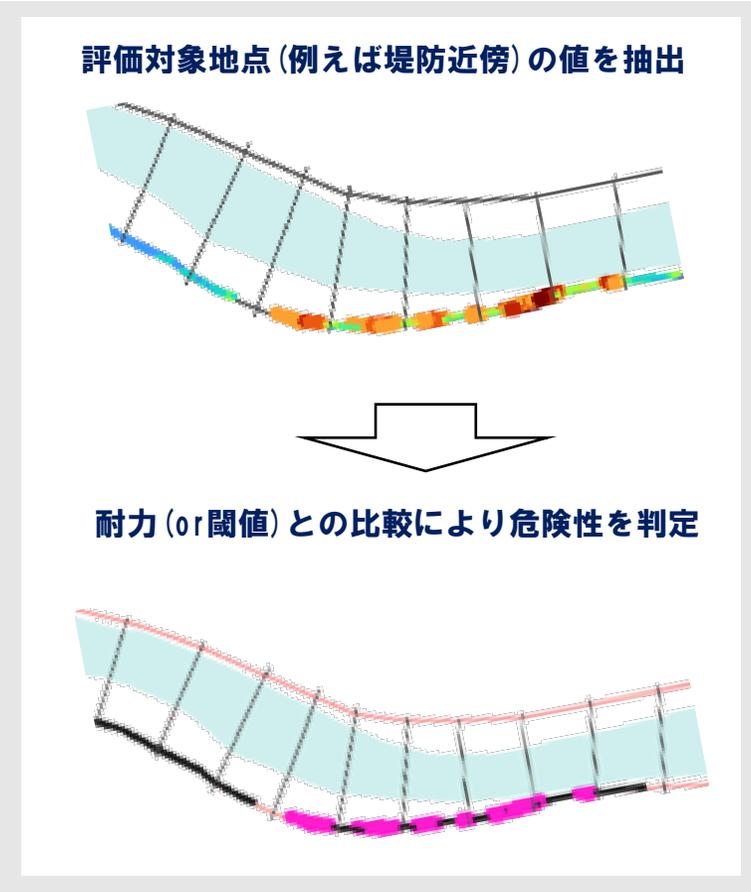


- ✓ **指標の値が大きい箇所で洗掘が発生**
- ✓ **洗掘箇所の計算点の頻度分布をとると、比較的大きな洗掘が発生した箇所では概ね3.5m/s・h以上であった**
- ✓ **洗掘なしの箇所の計算点の頻度分布をとると3.5m/s・h未満の箇所が多い**

5. FT図と流況計算を活用した破堤危険性評価

FT図と流況計算を活用した破堤危険性の評価方法

- ▶ FT図に各経路の事象の生起可能性を一つ一つ調べることで破堤危険性が高い箇所を明らかにする
- ▶ 実務での活用のためにFT図上の重要な事象を取り上げ、その生起可能性を流況計算結果を用いて判定することで破堤危険性が高い区間を抽出し、平面図に図示する



5. FT図と流況計算を活用した破堤危険性評価

トリガーとなる事象の生起可能性の判定方法

- ▶ 本研究では堤体侵食の発生や高水護岸前面の洗掘の発生など、**トリガーとなる事象の生起可能性を判定**することで破堤危険性が相対的に高い箇所を抽出する

FT図中の番号	項目	相対的に危険性が高いと判定する指標・閾値	備考
[1]	堤体直接侵食の発生	堤防前面の摩擦速度×時間 3.5m/s・h以上	堤体侵食が高水敷洗掘と同様に流れによるせん断力を受けて発生すると考え、4.で得られた指標・閾値をもとに設定
[2]	流れの直接作用による護岸破損の発生	護岸前面の流速 5m/s※以上	※高水護岸の耐流速については護岸構造によって異なるため、実際には場所毎の護岸構造を調査し、耐流速を設定するプロセスが必要であるが、ここでは評価を例示するために連節ブロックの設計流速の目安値1を参考に耐流速を5m/sと仮定した。上下流の端部の耐流速も5m/sに包含されていると仮定した。
[3]	高水護岸表法根元での洗掘の発生	護岸前面の摩擦速度×時間 3.5m/s・h以上	4.で得られた指標・閾値
[4]	高水敷上の堤防へ向かう流れによる洗掘の発生	低水護岸背面の摩擦速度×時間 3.5m/s・h以上 かつ 流速ベクトルの向きが堤防方向に向かっている区間	河岸際の流向と低水護岸背面の洗掘の発生により評価する。 低水護岸背面の計算結果を抽出し、4.で設定した指標・閾値より大きい区間、かつ、流速ベクトルが堤防方向となる区間を危険性が高い区間として判定する。
[5]	低水護岸の破壊及び高水敷侵食を発端とする破壊	-	河岸侵食については、現段階で十分な技術開発ができていないと言えない。 対象区間では、低水護岸の破壊に先立ち、高水敷の洗掘が見られるため、当該地先における破壊のトリガーとして低水護岸の破壊を契機とする高水敷の側方侵食が重要な経路とは考えにくい。 そのため、今回は本項目の評価は対象外とした。
[6] [7] [8]	高水護岸の全破損 堤体侵食による堤体欠損の進行 表法根元の洗掘による堤体欠損・ 高水護岸破損の進行	-	堤防欠損の生起から侵食が進行して破堤に至るまでには経過時間が存在するが、これを定量的に評価することは現時点では困難である 本研究では堤体侵食の発生や高水護岸前面の洗掘の発生など、トリガーとなる事象の生起可能性を判定することで破堤危険性が相対的に高い箇所を示す。

5. FT図と流況計算を活用した破堤危険性評価

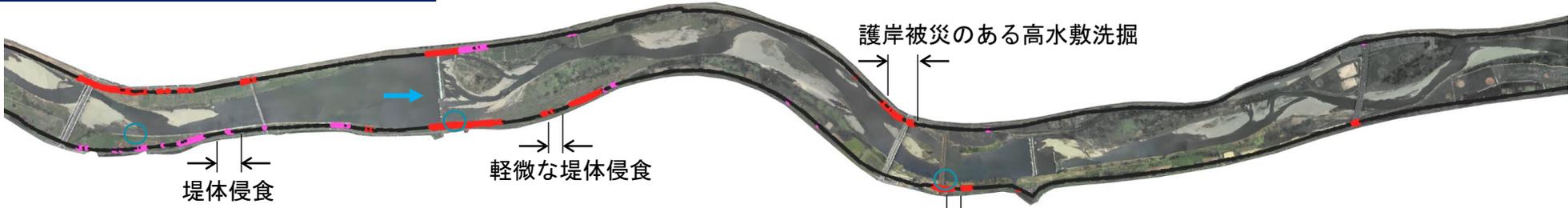
相対的に破堤危険性が高いと推定される箇所の図示

- ▶ 流況計算とFT図を用いて破堤のトリガーとなる事象が生起する危険箇所が高い箇所を抽出して図示
- ▶ 外力の規模毎に破堤危険性が相対的に高いと推定される箇所を評価した

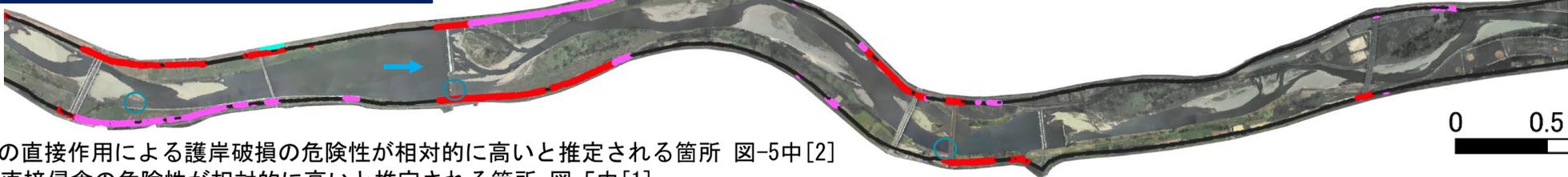
(A) ピーク流量3,500m³/s



(B) ピーク流量5,300m³/s



(C) ピーク流量7,400m³/s



- 流れの直接作用による護岸破損の危険性が相対的に高いと推定される箇所 図-5中[2]
 - 堤体直接侵食の危険性が相対的に高いと推定される箇所 図-5中[1]
 - 高水護岸表法根元での洗掘危険性が相対的に高いと推定される箇所 図-5中[3]
 - 高水敷上の堤防に向かう流れによる洗掘危険性が相対的に高いと推定される箇所 図-5中[4]
- ※ 今回の検討では、高水敷の側方侵食を起因とする破堤危険性については評価対象外とした。

※国土地理院航空写真に加筆
※護岸設置範囲は想定

6. 考察とまとめ

- ▶ 複雑な事象をFT図で系統的にまとめた上で破堤に至る重要な個別事象の発生を破堤の必要条件とし、個別事象の発生可能性を流況計算から評価できるようにしたことで、相対的に危険性が高いと推定される箇所を評価できた
- ▶ この分析評価手法は一般性を有しており例示した河川以外にも適用性がある

本研究の有効性

① 流況計算を活用した評価の有効性

- ▶ 計算区間内の評価を一括して行うことが可能である。
- ▶ 長大な構造物である堤防の危険性評価にあたっては、優先的に対応が必要な箇所を抽出し、詳細検討につなぐ有効性は高い。

② 高水敷及び堤防の侵食・洗掘の生起可能性を判定する指標・閾値の活用

- ▶ 堤体侵食・高水敷洗掘を判断する指標として摩擦速度×時間の累積値を示し、閾値を $3.5\text{m/s}\cdot\text{h}$ とした。
- ▶ 物理現象のメカニズムは河川に寄らず共通であることから、同様の植生・河床材料の河川では同様の閾値が判定の目安になると考えられる。

③ 洪水規模毎の危険箇所の把握に対する有効性

- ▶ 複断面河道では、洪水規模により堤防近傍の流況のパターンが異なるが、提案した手法では規模毎の流況に応じた評価を行うことが可能である。
- ▶ 流量規模を確率年と結びつけ、それぞれの事象の生起確率の評価につなげることで、将来的には破堤危険性を確率評価することができる可能性を有している。

7. 今後の課題

- ▶ FT図の作成にあたっては明らかに他の経路の破壊が問題になる場合はFT図を見直す必要がある
 - **水制工設置箇所や堰周辺などについては、別途その施設状況に対応したFT図の検討が必要**
- ▶ 本研究では限られた情報のもとで事前に危険性評価を行うことに重点を置き、モデル構築や再現性の検証に多種・多量の実測値が必要な河床変動計算は行わなかった
 - **危険箇所をより一層絞り込むためには、場所毎の特性を踏まえて洗掘量を推定できる河床変動計算モデルを構築することが課題**
- ▶ 各経路の評価の内、高水敷の側方侵食については破堤危険性に結び付けた判定手法を設定できていない
 - **侵食が重要な事象となる河川へ適用するには高水敷の侵食量を推定する方法を確立することが課題**

ご清聴ありがとうございました

- ▶ 本研究にあたり、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所からALB地形測量成果等のデータの提供等、多大なご協力を頂いた。厚く感謝申し上げます。