

鉄道橋りょうを対象とした 側方侵食危険度評価方法の基礎的検討

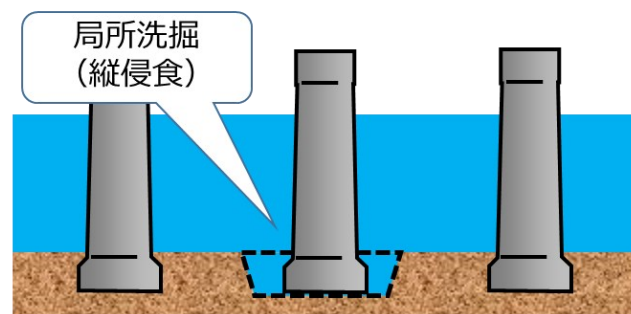
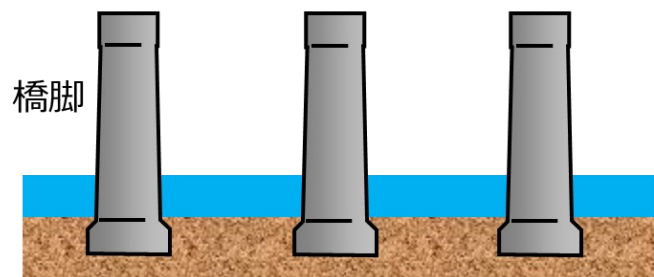
元 東日本旅客鉄道株式会社
東日本旅客鉄道株式会社
国立研究開発法人 土木研究所

石井秀憲
小野桂寿
原田大輔

はじめに

- 鉄道の河川橋りょうの被災が全国各地で発生している
- これまで主に**局所洗掘**を対象として被災危険箇所抽出法が検討されてきた一方で、近年は側方侵食とみられる事例が複数発生している
⇒ **側方侵食**に対応した危険箇所抽出法が求められる

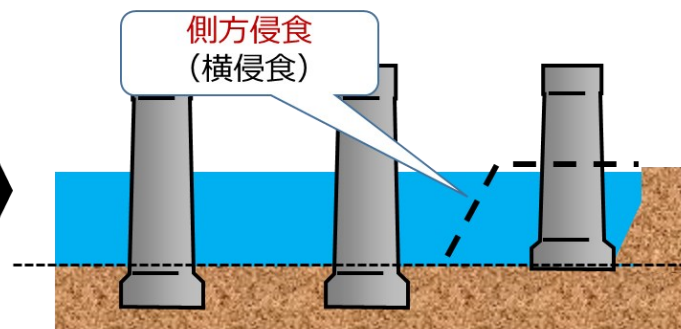
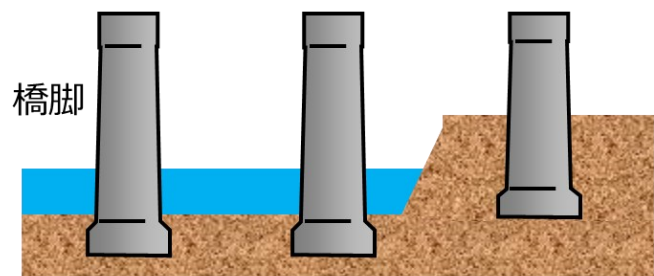
■これまで想定していた被災形態（局所洗掘）



局所洗掘 事例



■近年発生している被災形態（側方侵食）



側方侵食 事例



はじめに

- JR東日本では、洗掘のおそれのある橋りょうとして**数百の河川橋りょう**を管理している
 - ⇒ **複数河川を対象**に統一的に側方侵食の危険度を評価する必要がある
 - ⇒ **複雑な計算を必要としない、かつ、既に取得している（取得が容易な）データ**から簡易にスクリーニングできる手法が望ましい

目的

既に取得しているデータから計算できる「**河道特性を示す指標**」と「**低水路満杯程度の出水で発生した側方侵食**」の関連性を分析し、簡易に算出できる指標を用いた**側方侵食の危険度評価手法**を検討

検討の流れ

1. 側方侵食とみられる事例の個別分析
2. 河道特性と側方侵食の関連の分析
3. 側方侵食の危険度評価方法の検討

1. 個別事例の分析 (1)A橋りょう

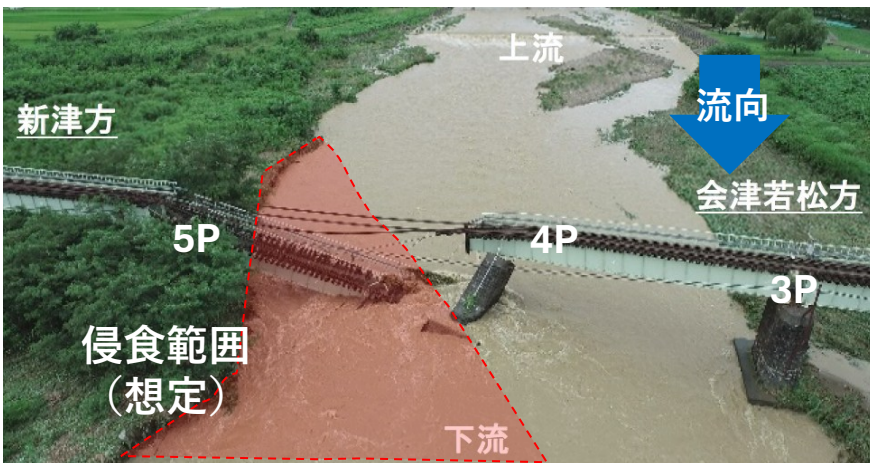
(1)A橋りょう

被災時の状況

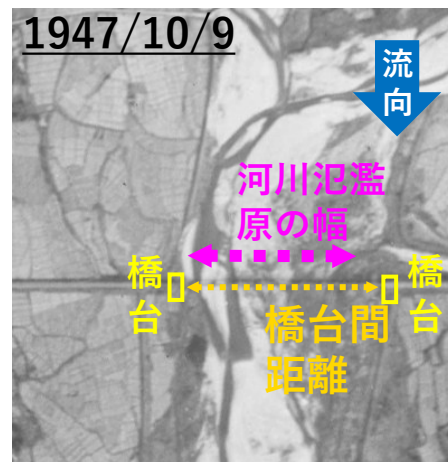
- 2022年の出水により橋りょう上下流概ね100mの範囲で右岸側が侵食、橋りょう付近では4Pから5Pの範囲までが侵食
- 低水路満杯程度の出水であったと想定

1947年河道と2021年河道の比較

- 1947年時点では、橋台幅付近まで河川氾濫原が広がり、複列砂州が発達
- 2021年は川幅が縮小し、単列砂州に遷移



被災状況（矢作ら(2023)に加筆）



1947年と2021年河道の比較

1. 個別事例の分析 (1)A橋りょう

(1)A橋りょう

2010年から2021年の河道の変遷

- 橋りょう上流の砂州前縁線は下流方向にはほとんど移動なし
- 河川横断方向に発達することで河道の湾曲が進行

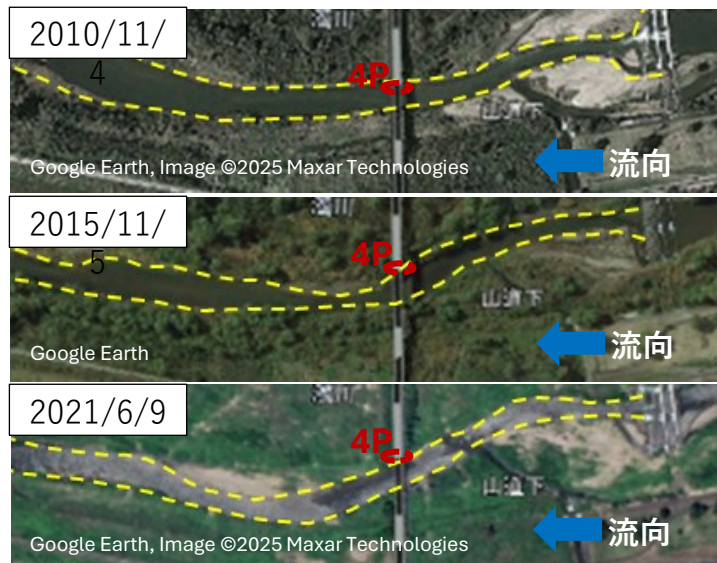
被災前(2021.10)の河床横断図

- 内岸側に比高の高い砂州が発達

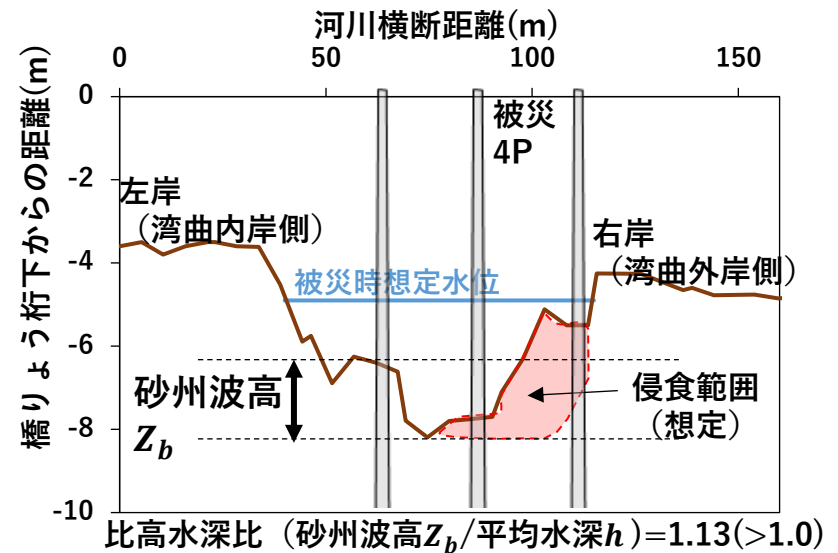
A橋りょうまとめ

過去と比較して川幅が縮小し、移動しない単列砂州に遷移

河道の湾曲と内岸側の砂州により、外岸側に流れが集中しやすかったと推察



2010年から2021年の河岸位置の変化

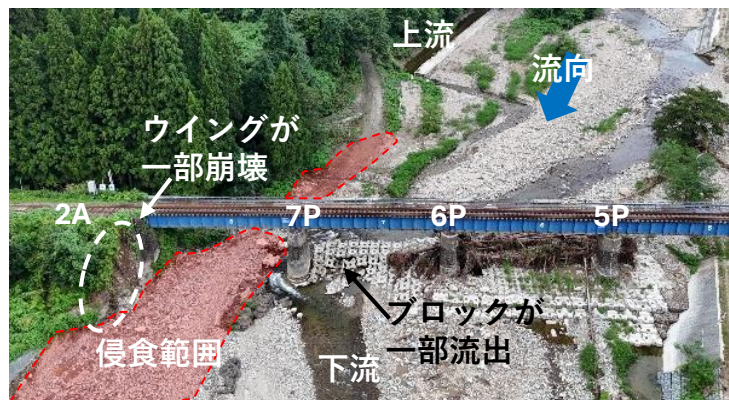


被災前(2021.10)の河床横断図

1. 個別事例の分析 (2)B橋りょう、(3)C橋りょう

(2)B橋りょう

- 2024年出水により、7Pから右岸側橋台周辺が侵食され、橋台のウイングが一部崩壊
- 過去と比較して河道が縮小、左岸側の一部に低水路護岸が設置



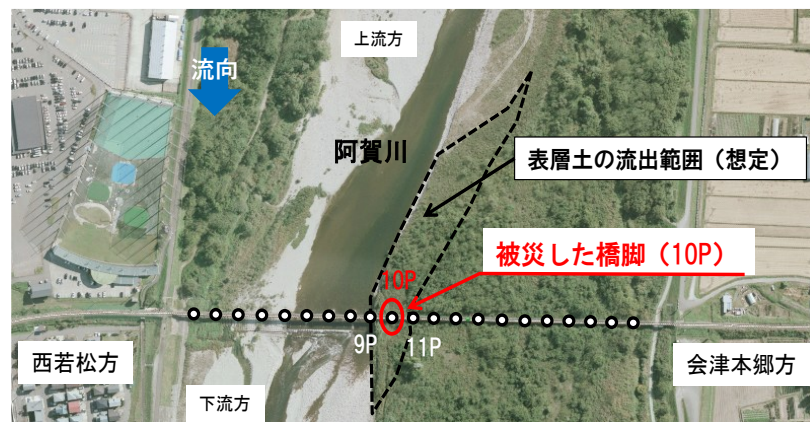
国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス



Google Earth, Image ©2025 Maxar Technologies

(3)C橋りょう

- 2015年9月の出水により、左岸側が侵食され10Pに変位が発生
- C橋りょうは過去と比較して川幅が縮小した河川において、固定化した砂州の対岸側が水衝部となり侵食されたと推測



伊東ら(2016)に加筆



国土地理院 地図・航空写真閲覧サービス



Google Earth, Image ©2025 Maxar Technologies

2.河道特性と側方侵食の関連の分析 (1)検討データ

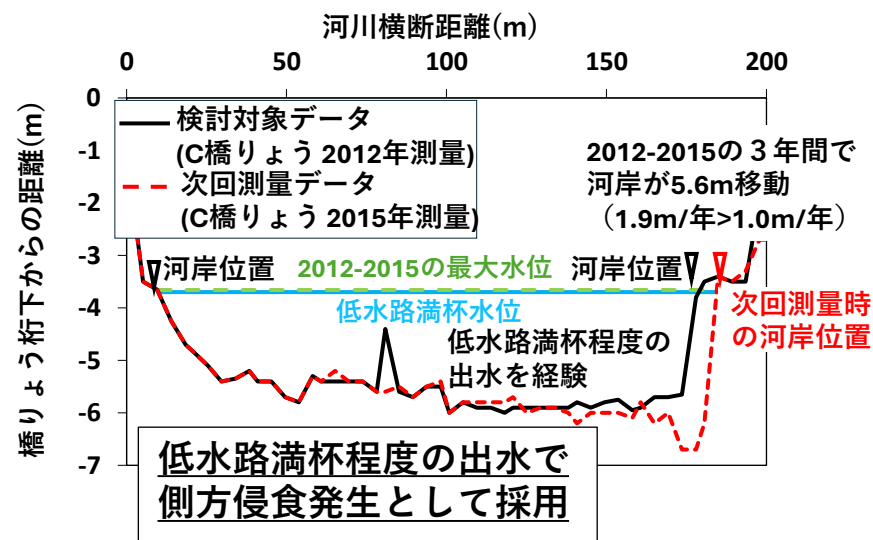
対象河川橋りょう

- 関東地方および東北地方の25橋りょう
- 河床勾配1/60～1/3100
- 建設年は1902から2002年であり、半数以上は戦前に建設

データ整理方法

- 概ね3年ごとの橋りょう断面の河床横断測量図を使用
(測量時点ごとに別データとして取り扱う)
- 検討対象の測量時点から次回測量までの期間中(概ね3年間)に、**低水路満杯水位程度の出水**が発生していた断面を採用
- 各断面ごとに低水路満杯時の河岸の位置を整理し、
川幅が拡大する方向に河岸が移動しているか(>1.0m/年)を判定

25橋りょう 77断面を採用
側方侵食発生: 8橋りょう 12断面



検討例 (C橋りょう 2012年測量データ)

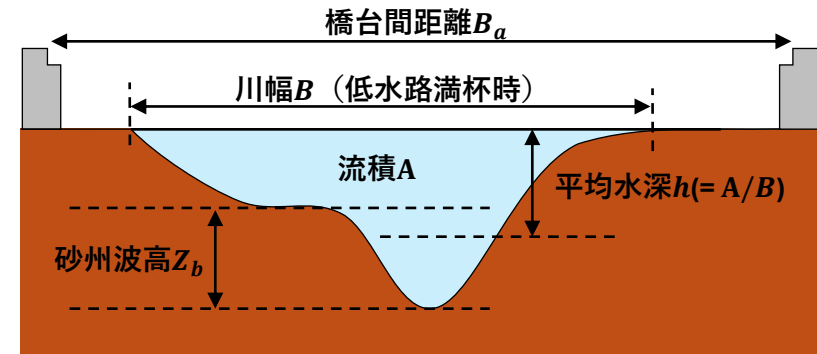
2.河道特性と側方侵食の関連の分析 (2)河道特性を示す指標

- 低水路満杯時の各諸量を整理
- 河道特性を示す指標として以下を使用

(a)安定河道の条件

(b)比高水深比

(c)川幅と橋台距離間の比 (次頁)



各諸量の定義

(a)安定河道の条件 (秋山ら(2018))

- 無次元掃流力 τ_* と川幅水深比 B/h の標準的な値にもとづき、安定河道かどうかを判断
- 係数 K 値(右式)を用いた被災リスク評価法が検討されてきた

重枝ら(2022): K 値が安定河道の条件より大きい区間において、河岸や護岸の被災が発生

椿ら(2021): K 値の標準値からの $\log$ 差を説明変数とした被害関数を構築

$$K = \sqrt[3]{\frac{\tau_*}{(B/h)^2}}$$

(b)比高水深比 (傳保ら(2024))

- 砂州地形の影響に着目し、横断的な比高差が増加した状態を示す指標として比高水深比 (砂州波高 Z_b / 平均水深 h) を提案
- 北海道内の河川での検討の結果、比高水深比1.0以上で侵食危険度が増大する傾向

2.河道特性と側方侵食の関連の分析 (2)河道特性を示す指標

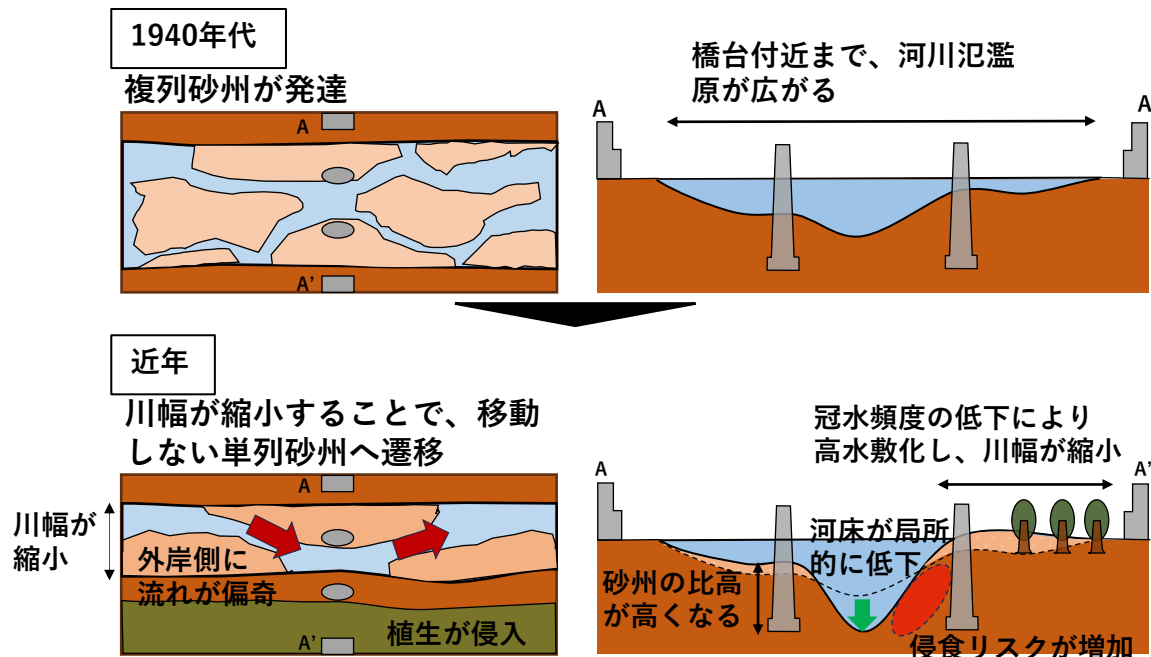
(c)川幅 B と橋台距離間 B_a の比 (今回提案)

過去と比較して、現在の川幅が縮小している事例が複数存在

川幅が縮小することで、

- ・ 滞筋部の摩擦速度の増大
 - ・ 移動しない単列砂州への遷移⇒砂州比高の拡大
- ⇒侵食リスクの増加

橋台間距離 B_a は橋りょう建設当時の河川氾濫原の幅をある程度反映していると考え
現在の川幅 B と橋台間距離 B_a の比 B/B_a を提案

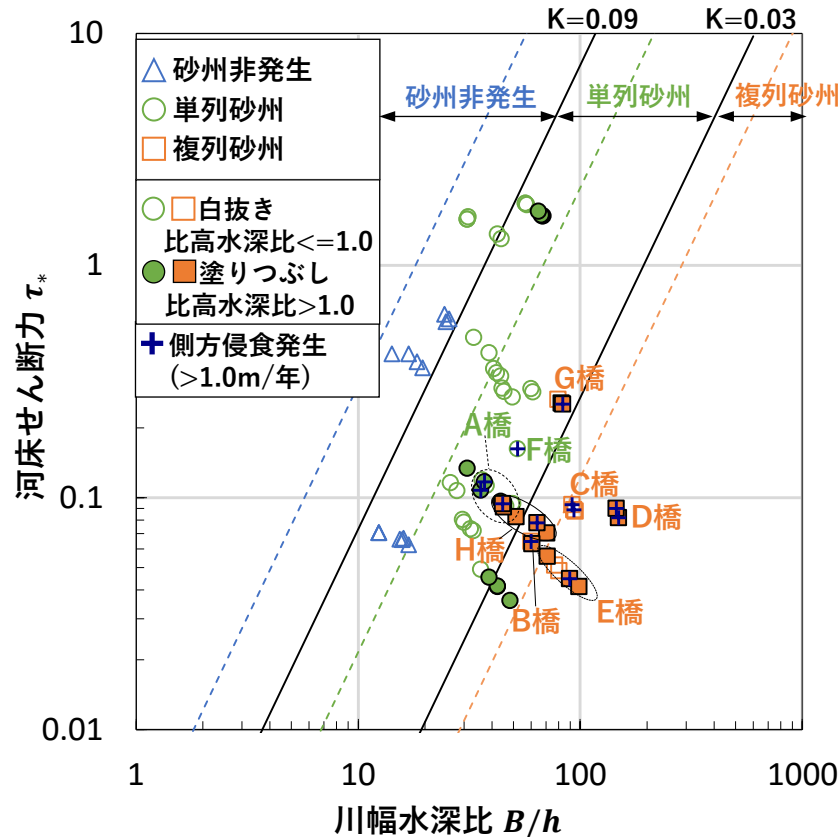


個別事例分析から推定した川幅縮小による側方侵食リスク増加のメカニズム

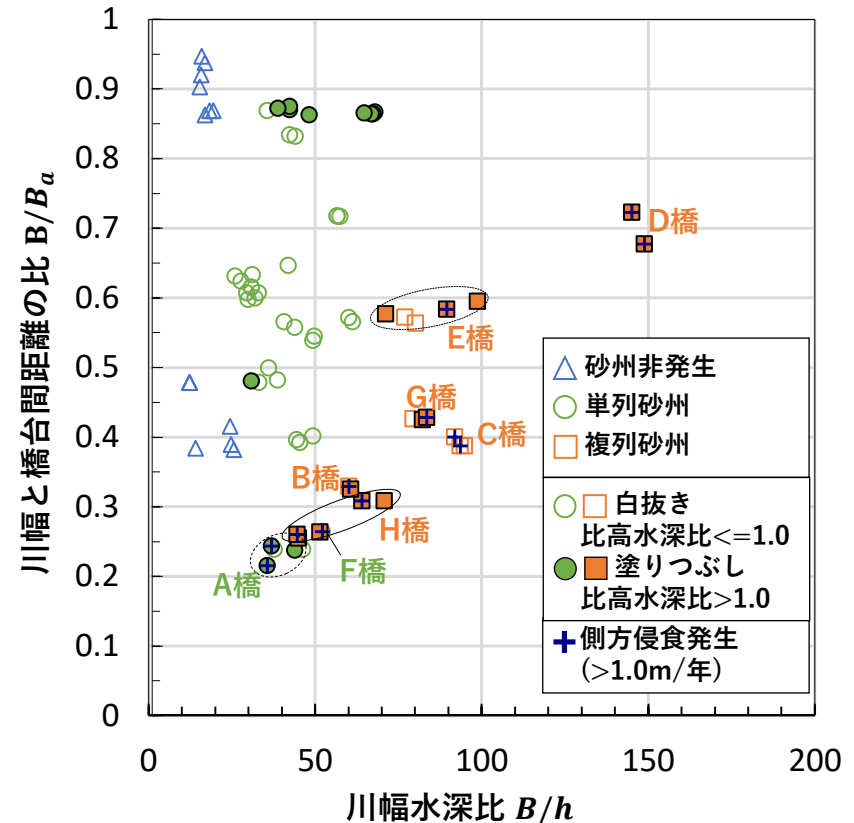
2.河道特性と側方侵食の関連の分析 (3)結果

側方侵食は以下の条件の橋りょうで発生

- 川幅が大きく複列砂州である地点 (**C,D,E橋**)
⇒複列砂州発生による河道の不安定性が側方侵食リスクを高めていると推測
- 過去に複列砂州だった河川の川幅が縮小し、単列砂州に近い河道に遷移した地点 (**A,B,F,G,H橋**)
⇒川幅の縮小による侵食リスクの増大と推測



安定河道断面図上にプロットした検討データ

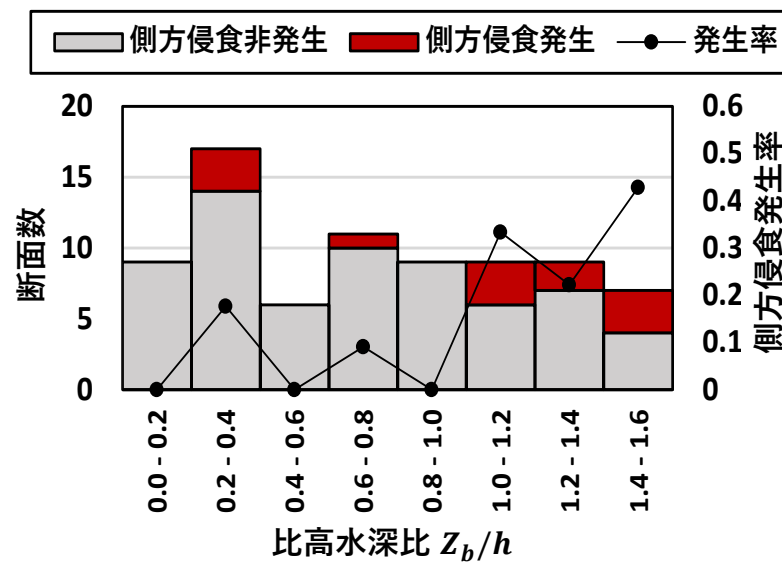


川幅水深比 B/h と橋台距離間の比 B/B_a の関係

2.河道特性と側方侵食の関連の分析 (3)結果

比高水深比 Z_b/h

- 傳保ら(2024)と同様に、比高水深比1.0以上で侵食発生率が増加
⇒比高の高い砂州の存在が側方侵食の発生に影響を及ぼしていると推測



比高水深比 Z_b/h と側方侵食発生率の関係

比高水深比1.0未満で側方侵食が発生した事例

- 橋りょう上流側の地形の影響を受けた可能性
⇒橋りょう断面地形で算出しているため、上流側の影響を反映できず、侵食要因を十分に説明できない可能性
詳細な考察は今後の課題



比高水深比1.0未満で側方侵食が発生した事例の発生前航空写真 (C橋りょう)

3.側方侵食の危険度評価方法の検討

検討方法

ロジスティック回帰分析を用いて、
河川の特徴を示す指標から側方侵食発生確率
を推定する方法を検討

各指標の統計的有意性を検討の結果、
「**川幅水深比 B/h** 」と「**川幅と橋台間距離の
比 B/B_a** 」を用いた評価方法（右図）を提案

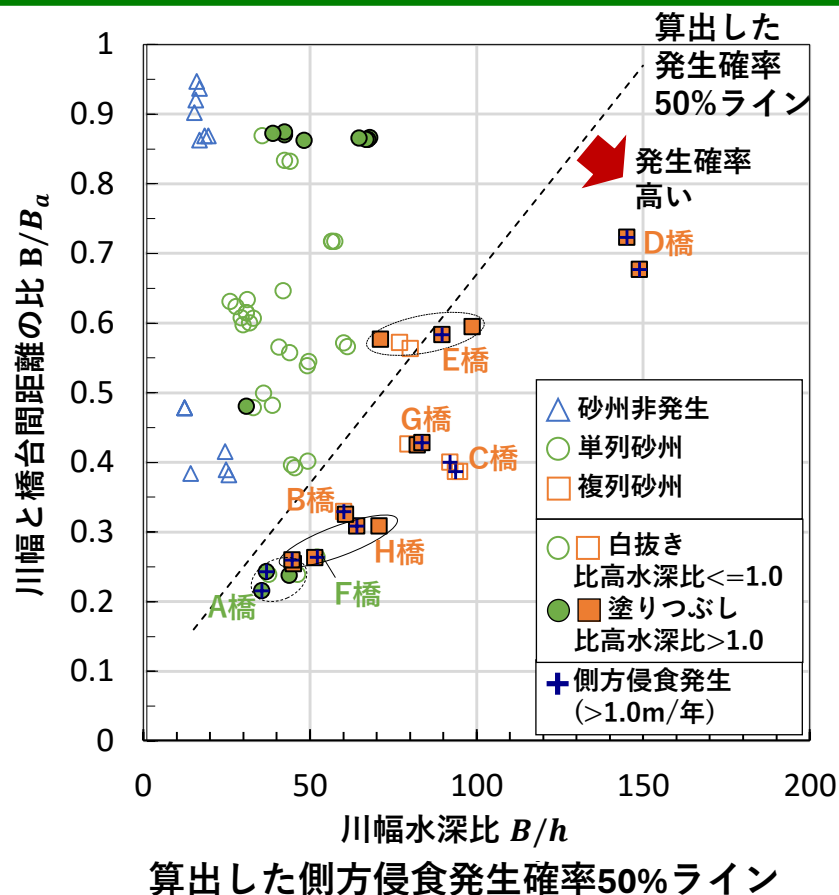
判定結果

⇒提案手法の発生確率50%ラインにより概ね
判定可能

		本手法	
		側方侵食発生	非発生
実データ	側方侵食発生	12	0
	非発生	11	54

A~H橋りょうのデータであり、検討対象期間内には側方侵食が発生していないが、
検討対象以外の期間には側方侵食が発生
⇒外力である出水の規模を考慮していないことが判定誤差の主要因と推測

⇒被災前に把握できる指標からスクリーニングする手法としては一定の有用性があると判断



まとめ

「低水路満杯程度の出水」で「側方侵食が発生」した事例に着目し、「河道特性を示す指標」との関連性を分析した

- B/h が大きく複列砂州が発達している地点, もしくは, 複列砂州だった河川の川幅が縮小した地点で側方侵食が発生 (後者は川幅の縮小を示す指標として提案した B/B_a が小さい傾向)
- 比高水深比が1.0以上で側方侵食の発生率が増加

統計的手法による分析から、

「川幅水深比 B/h 」と「川幅と橋台間距離の比 B/B_a 」を用いた危険度評価方法を提案

今後の課題

- 検討データの拡大
- 本手法の適用性について検討

ご清聴ありがとうございました

3.側方侵食の危険度評価方法の検討

ロジスティックス回帰分析

$$\text{側方侵食発生確率 } P(y = 1|X_i) = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \sum_j \beta_j X_{ij}))}$$

$$\text{側方侵食非発生確率 } P(y = 0|X_i) = 1 - P(y = 1|X_i)$$

i はデータ番号, β_0 は切片, β_j は各説明変数の回帰係数、
 y は目的変数（側方侵食発生:1,非発生:0）

X_{ij} は標準化された説明変数

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}$$

x_{ij} は説明変数, μ_j は説明変数 x_j の平均値, σ_j は説明変数 x_j の標準偏差

次式の尤度関数 $L(\beta)$ を最大化するように β_0 および β_j を同定

$$L(\beta) = \prod_{i=0}^N (P(y_i = 1|X_i)^{w_i y_i} \cdot P(y_i = 0|X_i)^{w_i (1-y_i)})$$

w_i は側方侵食発生と非発生のデータ数の不均衡を補正するための重みづけ係数

$$w_i = \begin{cases} \frac{N}{2N_0} & (y_i = 0) \\ \frac{N}{2N_1} & (y_i = 1) \end{cases}$$

3.側方侵食の危険度評価方法の検討

使用する指標の選定方法

1. 無次元掃流力 τ_* ，川幅水深比 B/h ， K 値の標準値からの差 $\Delta \log_{10} K$ ，比高水深比 Z_b/h ，川幅と橋台間距離の比 B/B_a を候補
2. 各指標について単変量ロジスティック回帰分析を実施し、統計的有意性が認められた($p < 0.05$)、 B/h ， Z_b/h ， B/B_a の3つを選定
3. B/h ， Z_b/h ， B/B_a の3変数を用いた多変量ロジスティック回帰分析を実施した結果、 Z_b/h の統計的有意性が低かったため、説明変数から除外
4. B/h ， B/B_a の2変数を用いた結果、両変数ともに統計的有意性が確認されたため、この2変数を採用

参考文献

1. 矢作和之，窪田利幸，滝沢聡：2022年8月豪雨による磐越西線濁川橋りょうの洗掘災害と復旧，**SED Structural engineering data**，47号，pp.24-35，2023.
2. 秋山壽一郎，重枝未玲，内野雅文，小野英一，長船健太郎：河道の安定性と河床変動解析に基づく整備計画河道横断形の設定法，**土木学会論文集B1（水工学）**，Vol.74，No.5，pp.1_985-1_990，2018.
3. 重枝未玲，伊藤省吾，濱田信吾，戸田祐嗣，椿涼太，内田龍彦：河道特性と安定河道縦横断形状に基づく河岸・護岸の被災リスクポテンシャル推定法，**土木学会論文集B1（水工学）**，Vol.78，No.2，pp.1_187-1_192，2022.
4. 椿涼太，安廣健太，戸田祐嗣，重枝未玲：安定河道横断面の概念を利用した低水護岸の被災リスク評価，**河川技術論文集**，第27巻，pp.585-590，2021.
5. 傳保潤也，井上卓也，平松祐基，川村里実，千葉学，下舘巧：河岸侵食に及ぼす地形・洪水流の影響，**河川技術論文集**，第30巻，pp.287-292，2024.
6. 伊東久雄，井上英一，宮崎真弥，伊藤 彰則：只見線大川橋りょうで発生した橋脚洗掘の原因と対策，**SED Structural engineering data**，61号，pp.70-77，2016.