

河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職
	戸田 祐嗣 (とだ ゆうじ)	名古屋大学大学院工学研究科	教授
②研究テーマ	名称	一連河道区間と局所的弱点箇所との2重スケール評価による低水護岸・高水敷系侵食被災リスク評価技術の開発	
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和2年度	令和3年度	合計
	812万円	582万円	1,394万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)		
氏名	所属機関・役職 (※令和4年3月31日現在)		
重枝 未玲	九州工業大学大学院工学研究院・准教授		
内田 龍彦	広島大学大学院工学研究科・准教授		
椿 涼太	名古屋大学大学院工学研究科・准教授		
尾花 まき子	名古屋大学大学院工学研究科・講師		
⑤技術研究開発の目的・目標	(様式河指-2、河指-3に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)		
<p>本研究では、『一連河道区間と局所的弱点箇所との2重スケール評価による低水護岸・高水敷系侵食被災リスク評価技術を開発』することを最終的な目的とする。この目的を達するため、以下の4つのサブテーマ (STと略する) の技術開発を行う (各STの主要な達成目標は簡条書きで示す)。</p> <p>【ST1: 現況横断面と安定河道断面の比較による一連河道区間の侵食被災ポテンシャル評価技術の開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 現況河道を模した水理移動床実験を行い、この結果に基づき川幅・水深・粒度分布の変動特性と平衡状態における横断面形状を把握する。現況河道について、川幅が拡幅する傾向にある横断面形状と条件、河床位が低下する傾向にある横断面形状と条件を明らかにする。 ・ 実河道において、安定河道横断面形状との比較から、河床低下や河岸侵食による被災ポテンシャルの高い区間の推定・評価方法を開発する。 <p>【ST2: 水理解析に基づく局所的侵食弱点箇所の抽出手法と対策技術の開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 河岸侵食は流水のエネルギー消散過程で生じることに着目し、洪水流の三次元流れと乱れエネルギーを高精度で予測できる解析手法を構築する。近年の河岸侵食発生箇所の解析を行い、乱れエネルギーを用いた河岸侵食危険箇所の抽出法を検討する。 ・ 平面二次元解析や地形データから、乱れエネルギーが集中しやすい箇所を簡易的に推定できる手法を構築する。 <p>【ST3: 被災事例分析に基づく低水護岸・高水敷系としての侵食リスク評価技術の開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実河川での低水護岸、高水敷侵食被災データおよび被災時の河道地形、水理データを収集し、【ST1】の出力となる安定河道との低水路幅、水深のズレや【ST2】の出力となる乱れエネルギーを説明変数とした、侵食被災の経験的な被害関数・脆弱性曲線を作成する。 <p>【ST4: 上記成果を統合した一連区間および局所的弱点箇所との2重スケールでの低水護岸・高水敷系侵食リスク評価の実施】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 一連区間および局所的弱点箇所との2重スケールでの低水護岸・高水敷系侵食リスク評価の枠組みを、具体的な河川での被災や改修事例に適用し、提案手法の適用性や、河道断面設計上の留意点を整理・提言する。局所的弱点箇所の個別の特性による効果的な侵食対策 (洪水流制御、要求される護岸基礎の深さ・高水敷幅等) を整理・提言する。 			

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

【ST1：現況横断面と安定河道断面の比較による一連河道区間の侵食被災ポテンシャル評価技術の開発】

ST1では、図-1に示す安定河道の概念に基づき、①安定河道と異なった横断面を持つ河道の応答の実験による把握、②侵食被災ポテンシャル評価法の開発を実施した。

①では現況河道を模した水理移動床実験結果と既存の実験結果に基づき、川幅・水深の変動特性と平衡状態における横断面形状を把握した。現況河道は、川幅や河床に制約がない自然河道(Case-SW1~3, Case-NW1)、護岸等で川幅(Case-CW1~3, Case-CWD1)に、護床等で河床位に制約がある河道(Case-CB1, 2)を想定した。図-2に、実験より得られた河道の応答を、「安定河道の条件」である τ_{*s} と B/h との関係、自然安定河道の τ_{*s} と B/h を規定する K 値と河床勾配 I との関係にまとめたものを示す。図中の矢印は、河道の応答方向を示す。①より、以下の成果が得られた。

- (1) 河道は、動的平衡状態へ向かう場合、時間の経過とともに安定河道断面に遷移する。
- (2) 河道は、自然河道に近い場合には平均的な K 値に対応する横断面形状に遷移する。
- (3) 河道は、 K 値が安定河道の条件より大きい場合には拡幅する方向に、小さい場合には河床が低下する方向に遷移する。護岸等で川幅に、護床等で河床位に制約がある場合には、「安定河道の条件」の境界付近の K 値に対応する横断面形状に遷移する。

②では、実河道データに基づき、「安定河道の条件」の条件等から護岸・堤防被災した区間の特徴の把握と、安定河道の条件である K 値、安定河道横断面形状、河道の縦・横断特性による深掘れ等に基づく、護岸・河岸の侵食被災ポテンシャル評価法の開発を実施した。図-3に、評価結果の一例を示す。②より、以下の成果が得られた。

- (1) 河岸や護岸の被災が発生した区間の多くは、 K 値が安定河道範囲よりも大きく、摩擦速度が 0.3m/s を超える区間であった。侵食被災ポテンシャルが高い横断面は、河道特性により安定状態になく拡幅する傾向にある横断面であることが示された。
- (2) 河岸・護岸が被災した区間は、同手法で侵食被災ポテンシャルが高く評価された区間に含まれる。過去の横断面データで被災ポテンシャルが高く評価された区間では、その後の出水で被災が確認された。このように、本評価法は一連河道区間の被災ポテンシャル評価が可能なが示された。

$$\left(\frac{B}{d_R}\right) \left(\frac{h}{d_R}\right)^{3/2} = \phi^{-1} \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_R^5}\right) \quad (1)$$

$$\tau_{*s} = (K^{3/2} \cdot B/h)^2 \quad (2)$$

$$h/d_R = K^{1/2} \cdot (I/s)^{-1/6} \left(\phi^{-1} Q / \sqrt{g} d_R^5\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$B/d_R = K^{-3/4} \cdot (I/s)^{1/4} \left(\phi^{-1} Q / \sqrt{g} d_R^5\right)^{1/2} \quad (4)$$

B : 安定河道水面幅, h : 平均水深, d_R : 代表粒径, s : 水中比重, Q : 河道形成流量, τ_{*s} : 無次元掃流力, ϕ : 流速係数, I : 河床勾配
 ■セグメント特性: I , d_R , ■抵抗特性: ϕ

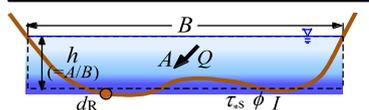


図-1 安定河道式と重要な諸量

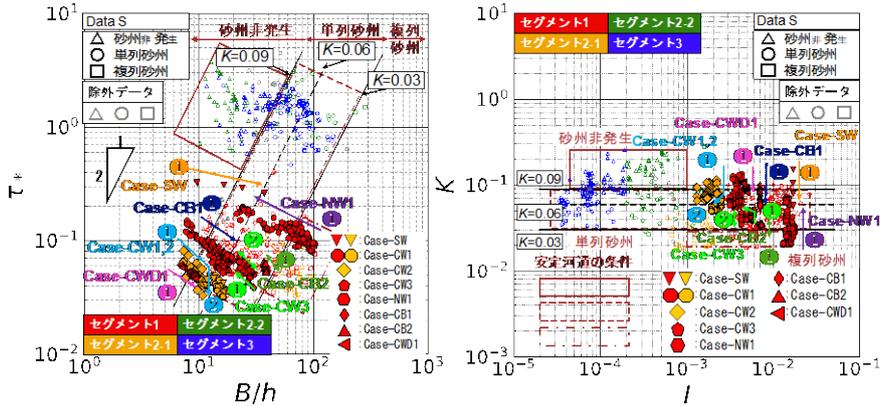


図-2 実験による河道の応答と安定河道の条件

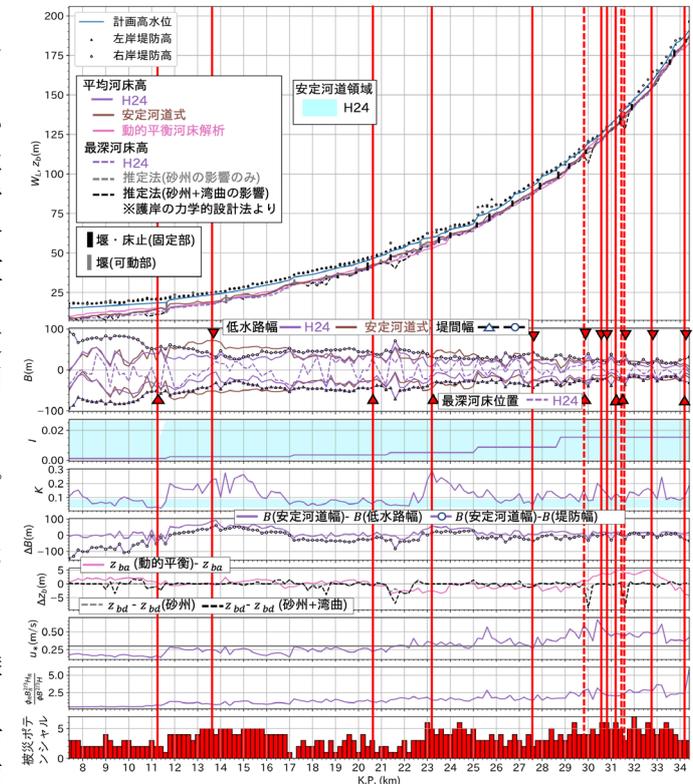


図-3 侵食被災ポテンシャル評価の一例

【ST2：水理解析に基づく局所的侵食弱点箇所の抽出手法と対策技術の開発】

ST2 では乱れエネルギーを用いた河岸侵食危険度評価法の妥当性を定量的に評価するために、まず河道安定条件から求まる摩擦速度を侵食評価指標の代表速度として用い、乱れ強度（乱れエネルギーの 1/2 乗）を無次元化した。次に、河岸侵食が起こるかどうかの事象が、無次元乱れ強度を用いた累積確率で生じると考え、確率密度関数を推定し、構造物設計によく用いられる流速と比較し、乱れエネルギーの指標としての妥当性を議論した。さらに、推定した確率密度関数を用いて、根谷川で行われた河川改修効果について侵食危険度の低下から定量的に評価した。以下に ST2 の概要と主要な成果を述べる。

まず河床変動が河岸侵食危険度に及ぼす影響を調べた。

図-6 は 2014.8 洪水の河岸侵食危険度の縦断分布を示す。青線は固定床解析結果、橙線は移動床解析結果であり、白抜き四角は河岸侵食箇所である。2014.8 洪水において右岸・左岸共に侵食が実際に起きた地点において侵食危険度の数値が移動床解析で大きくなった。また、2.1k 右岸、4.2k 右岸、3.7k 左岸・4.2k 左岸において固定床解析では侵食が起きていないにもかかわらず、危険度指標値が高くなっていたが移動床解析では値が固定床解析よりも低くなった。2021.8 洪水においても被災箇所で値が増加しており、同様の傾向が見られた。移動床解析を行うことで侵食危険度の説明力が向上したといえる。

次に河岸侵食危険度から見た河川改修効果を検討した。改修前後の河道に既往最大流量を記録した 2014.8 洪水の流出解析結果を用い、新河道の上流端条件とし計算を行った。各流量無被害確率を算出する為既往最大流量の波形を時間軸はそのままにして、ピーク流量を 20~610m³/s とする流量ハイドログラフを押し縮めて与えた。河川事業実施区間(3.6~4.8km)において比較し河川事業効果の評価をする。新旧河道の事業実施区間の右左岸最大水位を図-7 に示す。旧河道では堤防高と計画高水位を超える水位であったが、新河道では当区間の大半では計画高水位を下回る水位であった。

整備実施区間においての各流量の無被害確率を図-10 に示す。新河道の右左岸では各流量についても旧河道より無被害確率が大きい。右岸が左岸より値が小さいのは整備実施区間の大半が右岸を外岸とする湾曲部であることや、堰が右岸(左岸側が高水敷)に設置されている為と考えられる。既往最大流量を与えた新河道での計算結果は旧河道に対して右岸左岸ともに両解析共に安全率が大きく上昇していることを示した。しかし新河道の危険度は有為的に低くなったが、新河道の無被害確率 2~10%の範囲と被災リスクは高い結果であった。この既往最大流量より大規模出水(349m³/s)では各箇所において堤防欠損・護岸被害が 4 箇所(当該区間内で 2 箇所)見られている。図には 2021.8 の洪水流量ハイドログラフの無被害確率も示している。水位の観点からも安全度が大きく向上していたが、河岸際の流況を改善するか弱点箇所では構造物の耐浸食、洗掘力を向上させる必要があり、本手法によりこれらの課題を検出できることを示した。

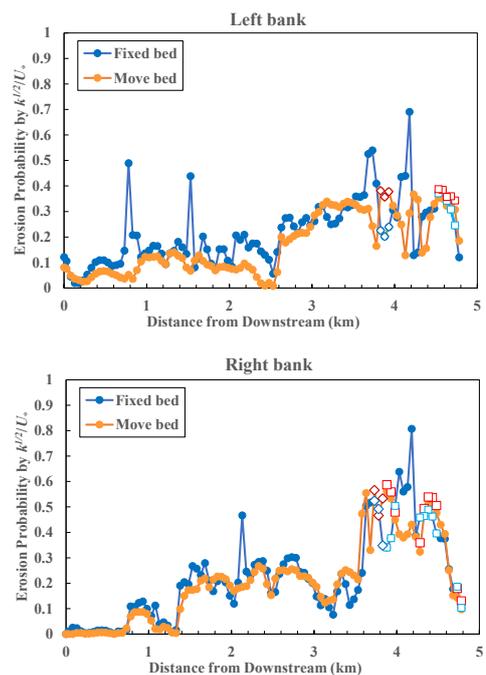


図-6 2014.8 豪雨の河岸侵食危険度の縦断分布

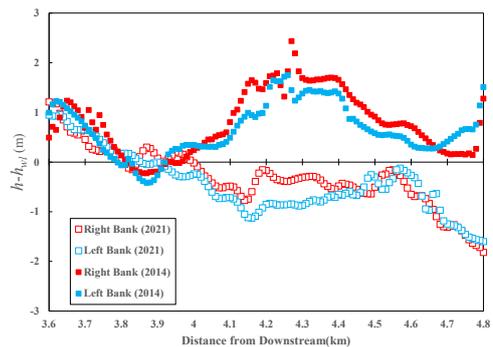


図-7 旧河道の事業実施区間の右左岸最大水位

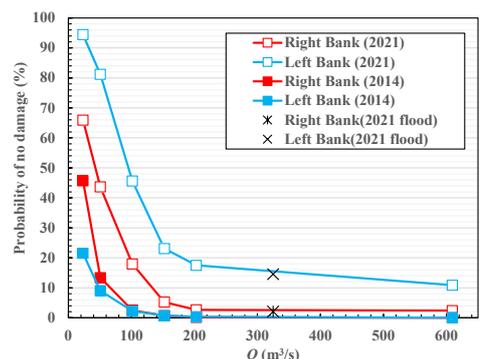


図-8 侵食危険度指標と侵食確率

【ST3：被災事例分析に基づく低水護岸・高水敷系としての侵食リスク評価技術の開発】

ST3では以下の【ST3a】と【ST3b】を実施した。

【ST3a】では、【ST1】、【ST2】の推進と連携させつつ、実河川での低水護岸、高水敷侵食被災データについて、中部地方整備局管内での12河川での事例に加え、北陸地方整備局の1河川および中国地方整備局の1河川について、被災前後の横断測量データ、航空レーザー測量データなど収集・整備した。

【ST3b】上記【ST3a】にて収集・整理した地形、水理データ、護岸被災状況に基づき、一連河道区間に対する安定河道理論の適用のためのデータ整理として、被災断面近傍の河床形状や、水理量などをもとに、安定河道ダイアグラム上にプロットしたものを図-9に示す。ここで、水理量は低水路満杯流量として整理した結果を示す。また、安定河道条件に近い河道は、河道が安定であり、護岸の被災リスクは小さく、安定河道条件から逸脱した河道は、拡幅や滞筋の洗掘により護岸被災リスクが小さいと仮定してデータ分析を行った。図-9に示す三つ無次元指標 (τ_{*s} , B/h , K 値) の他に、河道横断面形から得られる無次元洗掘深 d/h 、洗掘深と滞筋から近傍の岸までの距離の比 d/L 、河床高の経年変化 ΔZ についても算出し、被災の起きやすい断面の条件の特定を図った。最終的には、出水時の流況をもとに算出したフィラジリティーカーブ(図-10)が、少ない指標で、被害の有無を相対的にうまく判別できていることがわかった。また、安定河道条件を直接護岸被災リスク評価に用いるのではなく、護岸被災リスク条件は、安定河道条件とは若干異なることが示唆された。

局所的弱点箇所に関する乱れエネルギー簡易推定法の適用として、水深平均流解析によって得られたデータから、河岸侵食に対する局所的弱点箇所の抽出と、護岸の耐力を簡易的に考慮した侵食被災リスク評価方法を提案した。護岸の耐力について、整理された情報が欠損している区間が多数存在することから、護岸の力学設計法に準じて護岸が整備されたと仮定して、護岸の耐力を評価し、護岸設置位置については図面や航空写真から判別し図-11のように整理した。水深平均流解析により得られたデータから、底面と水平面の流速差 δu を算出し、護岸近傍の δu の縦断分布を図-12の上段のように算出した。被災箇所の分布から、 δu が大きめの値をとり、かつ縦断変化が大きな箇所では、護岸被災が見られることが確認できた。また、被災箇所の配置や、 δu の分布、ならびに水深平均流と δu との対応関係から、河岸侵食の局所的弱点箇所が、湾曲部の外岸側に多いことが確認された。局所的弱点箇所は、 δu で算出される脆弱性の他に護岸耐力の検討も必要であることがわかった。図-12の下段のように、被災箇所では基礎高と河床高の差が小さいことが確認された。その他、法覆工の各構造モデル式を活用することによって、外力と耐力を同じ長さの次元で評価することができることを確認した。

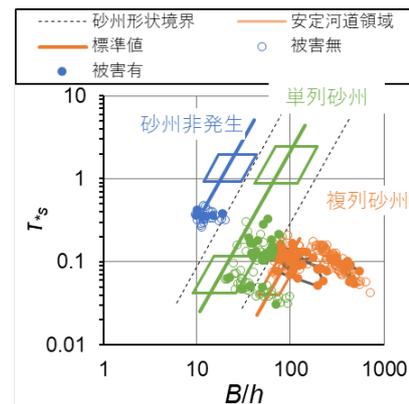


図-9 安定河道ダイアグラムへのプロット

● 被害有 ○ 被害無 — 被害関数

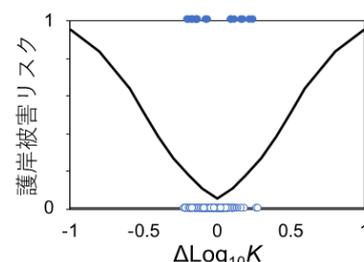


図-10 被害関数（外れ値を除いたデータ、河床形状でフィッティング）



図-11 護岸と被災箇所の関係の整理

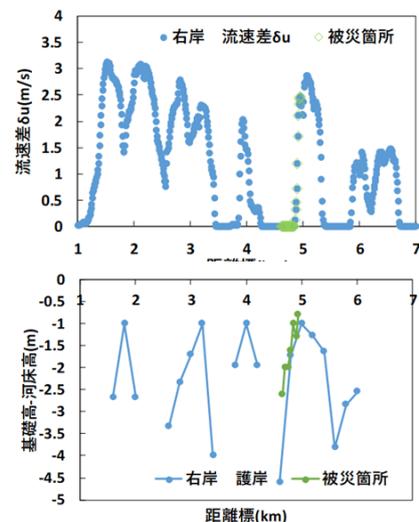


図-12 流速差 δu と被災箇所（上段）と、基礎高-河床高の関係（下段）

【ST4: 一連区間および局所的弱点箇所での2重スケールでの低水護岸・高水敷系侵食リスク評価の実施】

ST4では、まずST2で開発した被災リスク評価手法を河川改修事例に適用し、改修効果について検討した。続いて、近年の低水護岸・高水敷被災事例を対象にして、ST1とST3の成果から、侵食リスクが高くなる一連区間の断面特性を抽出し、またST2とST3の成果より、侵食リスクが高くなる一連区間の断面特性を抽出する。これらの情報を組み合わせた2重スケールでの侵食リスク評価を実施し、提案する手法の妥当性や現地適用性を確認した。以下では、2重スケールでの侵食リスク評価について報告する。

2重スケールでの侵食リスク評価においては、(1) これまでもST2で検討を進めてきた千曲川上流区間と、(2) 護岸耐力情報が整理され、また護岸被害が継続して発生している河道区間として、天神川水系小鴨川の下流区間を取り上げて、検討を進める事とした。

千曲川上流区間について、図-13に示す区間を検討対象とした。横断測量データが十分には整備されていない。そこで、被災前後の航空レーザー測量データを利用して、被災前の河道地形を推定し、検討に用いた。図-14に、2重スケール評価の結果を示している。同図のポリゴンの色は1km間隔で算出した一連区間の被災リスクを、左右岸の●の色は0.25km間隔で算出した局所的な被災リスクを、左右岸の赤丸は令和元年台風時の被災箇所を示す。図-14より、被害が集中している4kpの区間(図中に白色で4と示している区間)では、局所的被災リスクも大きく、一連河道区間の被災リスクも0.19とやや周辺より大きくなっている。このように、一連河道区間の被災リスクと局所的な被災リスクが両方ともある程度大きな箇所では護岸被害が発生しやすく、片方の被災リスクが大きくてももう片方の被災リスクがかなり小さい箇所では、護岸被害が発生しにくいことが確認された。

小鴨川下流区間については、護岸耐力情報として基礎高と最深河床高の情報も利用した検討を実施した。図-15に検討結果を示す。局所的な被災リスクを左右岸の丸の色(緑色～オレンジ色)で、また一連河道区間の被災リスクを河道内のポリゴンの色(緑色～オレンジ色)で合わせて示している。ここで、左右岸の丸が赤線で囲まれている箇所は、平成2年～23年の出水での被災箇所である。左右岸の外側の赤色～青色の丸の色は、平成2年から平成25年までの期間のなかでの、5時期での既設護岸基礎天端高から最深河床高までの比高差 ΔH の平均値を示す。つまり、外側の丸の赤色の部分は、既設護岸基礎天端高が最深河床高よりも浅く、河床洗掘による護岸被害が生じやすい状況にある区間を示す。被災箇所は、一連河道区間の被災リスクが大きめ(ポリゴンがオレンジ色)で、おおむね比高差 ΔH がマイナス(河道の外側の丸が赤色側)になっている箇所と対応していることが確認できる。

以上、二河川での検討結果を俯瞰すると、2河川での護岸被災が発生する背景的状况が異なることが浮かび上がる。つまり、局所的な流況による被害評価が適する河川と、安定河道への遷移により河道形状が不安定なことが、河床低下や護岸被災の発生を引き起こしている河川があると考えられる。このような、2重スケール評価は、具体的な河川整備の方向性を検討する上で有益と考えられる。

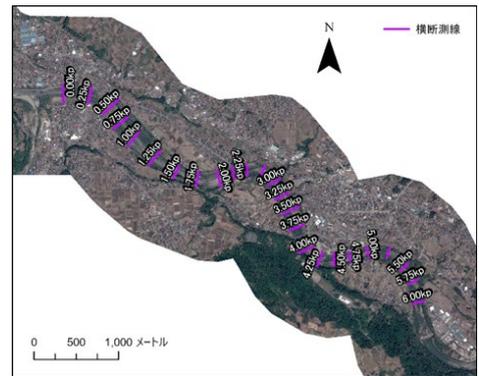


図-13 千曲川上流区間の検討対象区間の衛星写真と横断面(背景写真は出水後(2019年11月)撮影, © CNES 2017, 2019, Distribution AIRBUS DS)

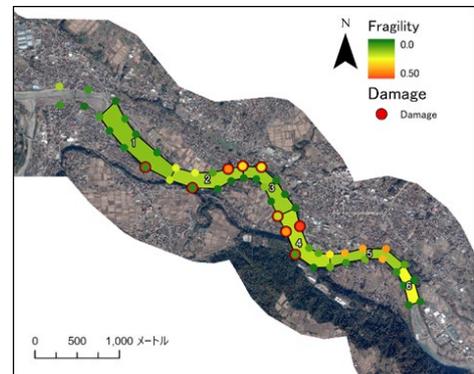


図-14 千曲川上流区間の検討結果.

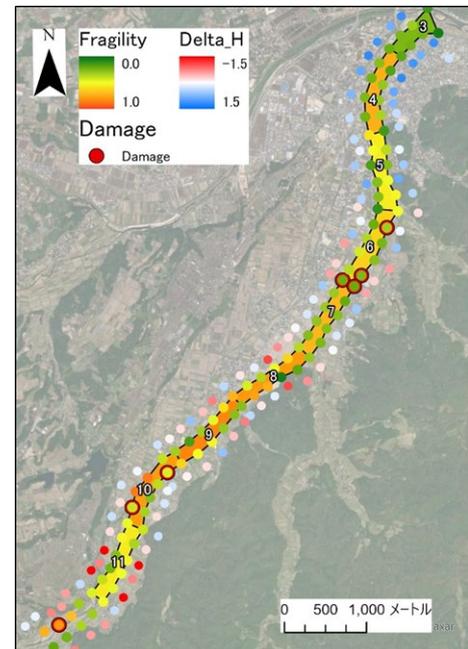


図-15 小鴨川の検討結果.

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・これまでに発表した代表的な論文
 - ・著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
 - ・国際会議、学会等における発表状況
 - ・主要雑誌・新聞等への研究成果発表
 - ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
 - ・研究成果としての事業化、製品化などの普及状況
 - ・企業とのタイアップ状況
 - ・特許など、知的財産権の取得状況
 - ・研究成果による受賞、表彰等
-
- 八木郁哉, 内田龍彦, 河原能久:大規模洪水時における河岸侵食箇所の三次元流況と乱れエネルギー分布の数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), vol176, No1, pp404-413, 2020.
 - 下田 倫太郎, 重枝 未玲, 秋山 壽一郎, 桂 佑樹:川幅の制約が安定した動的平衡縦横断面形状に及ぼす影響, 令和2年度西部支部研究発表会, 2021.
 - 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, 土木学会河川技術論文集, Vol.27, pp. 585-590, 2021.
 - 重枝未玲, 秋山壽一郎, 伊藤翔吾:安定河道条件に基づく河道変動特性の評価と護岸被災リスク評価のためのパラメータの検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77 No.2, pp. I_397-402, 2021.
 - 濱田信吾, 重枝未玲, 秋山壽一郎, 伊藤翔吾:安定横断面形状に基づく現況河道の変動特性の把握, 令和3年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, II-19, pp.155-156, 2022.
 - 椿 涼太, 森藤 慎, 安廣健太, 戸田祐嗣, 尾花まき子, 重枝未玲, 内田龍彦:道横断面形状の無次元指標の時空間変化に着目した低水護岸の被災リスク評価, 土木学会河川技術論文集, Vol.28, 2022.
- 【受賞】
- 令和3年度土木学会西部支部優秀講演者賞(濱田信吾), 2022.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

「河道管理ワークショップ ～今ある川を点検し評価する新しい河道技術にむけて～ (開催日:2021年2月3日(オンライン開催), 主催:土木学会水工学委員会・河道管理研究小委員会, 参加者数:52名)」にて, サブテーマ2の乱れエネルギーによる侵食リスク評価の成果の一部を発表。

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

該当なし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

- 1) 2重スケール評価について、本研究開発では、2つの河道区間で検討を実施したが、他の河川でも検討を進めることで一般性や適用性を確認していく必要がある。
- 2) 一連河道区間の被災リスク評価に際して、堰やダムといった人工構造物の影響によって、沖積的な自然状態を前提とした安定河道区間とは異なるが、構造物の効果も含め安定した河道区間が存在する可能性がある。そのような場合、現段階の評価手法では、被災リスクを適切に評価できない可能性が高い。そのようなケースについて評価方法などを検討していく必要がある。
- 3) 局所的弱点箇所の評価に際して、現段階の評価手法では、河川ごとの特性に応じた調整(外力指標の無次元化)が十分できていない可能性があり、河川によっては被災リスクを過大あるいは過小評価する可能性がある。すなわち、現時点では半定量という観点で評価された被災リスクを判断することが適切と考える。被災リスク評価の適用性、定量性を向上させるため、他河川、他セグメントでのさらなる検討は必要と考える。
- 4) 護岸基礎高といった耐力指標については、実河川でのデータが十分に得られていないため、外力指標と耐力指標が指標として統合されたリスク評価には至っていない。実河川での構造物情報の充実に基づいた耐力指標の更なる検討と外力指標と統合したリスク評価技術開発が必要である。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本課題の成果の実務への反映について、以下2つの方向性での活用が期待される。

【河道点検・評価手法の高度化・効率化に向けた活用】

現況河道において本課題で提案するリスク評価を実施し、被災リスクの高い箇所、区間を抽出することにより、出水期前の重要点検箇所や、河床高測定など詳細点検が望まれる箇所を特定し、危険度に応じた効率的・効果的な河道の点検・評価の構築につながることを期待される。

また、護岸の有無、基礎高、河床高などリスク評価を実施するために必要となる定量的な耐力情報を整理、活用することは、目視点検をベースとした現況の河道の点検・評価技術の向上、合理化・体系化につながることを期待される。

【河道設計・対策工設計手法への展開】

河道の平面形状、低水路幅、管理河床高などを計画する際に、本課題で提案する侵食リスクの外力指標が高くなるような河道形状や水制工の配置を検討したり、外力指標が高くなる箇所については、耐力指標を向上させるよう護岸形状、基礎高等に反映させたりするなど、河道設計、対策工設計技術の向上へ貢献することが期待される。