

堤防決壊・侵食及び高水敷・低水路河岸侵食に 与える洪水流の全エネルギー水頭分布について

THE EFFECT OF FLOOD ENERGY DISTRIBUTION ON LEVEE BREACH,
EROSION AND EROSION OF FLOOD CHANNEL BED AND MAIN CHANNEL
BANK

佐藤海輝¹・浅見和人²・福岡捷二³
Kaiki SATO, Kazuhito ASAMI, Shoji FUKUOKA

¹正会員 東京都 水道局

²国土交通省 北陸地方整備局 千曲川河川事務所

³フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

超過洪水では低水路河岸侵食や堤防決壊などの河道被災が多く生じる。超過洪水は計画高水位以下の洪水より水位が高くなり、流れる流量も大きい。巨大なエネルギーを有して流下していることから、洪水時における時空間的なエネルギー分布を検討し、これと河道被災の関係について検討することが重要である。

本論文では千曲川と五十嵐川で生じた河岸侵食・堤体侵食等の河道被災を洪水流の持つ全エネルギー水頭の観点から分析し、被災原因について検討する。また、検討した結果を総合的に考え、洪水流の持つ全エネルギー水頭と河道被災長、エネルギー勾配の作用時間を用いた力積的な考えで被災を検討し、その工学的意味を考察した。

Key Words: excess flood, three-dimensional energy distribution, levee breach, energy gradient

1. 序論

洪水時の河道では、河道断面形や低水路線形、洪水水位によって、被災形態や危険箇所が異なる。低水路満杯時にはその流れの特性から低水路河岸侵食被災の危険性が高く、計画高水位やそれ以上になると高水敷洗掘や堤防侵食・決壊の危険性が高まる。さらに、大河川と中小河川では河川の規模によって洪水の増水・減水時の挙動が異なり、低水路満杯時、計画高水位以上の洪水時間が異なることから河道の被災形態が異なると考えられる。そのため、河道線形や砂州の配置などの河道特性に加え、河道スケールに応じた洪水のハイドログラフの特徴を踏まえて被災原因を検討することが重要である。

本研究はスケールの異なる2つの河川、千曲川（流域面積 7163km^2 ）の令和元年東日本台風と五十嵐川（流域面積 337.3km^2 ）の平成23年7月新潟・福島豪雨を対象に洪水流・河床変動解析を実施し、洪水時における全エネルギー水頭の平面分布を求める。そして侵食による河道被災延長と洪水流の持つ全エネルギー水頭の関係について分析を行う。最後に全エネルギー水頭のハイドログ

ラフや河道線形、河道スケールに応じた河道被災形態について調べ、河道災害の事前対策に資することを目的に考察する。

2. 令和元年東日本台風時の千曲川における河道

被災の検討

(1) 被災概要と解析手法、解析条件

図-1は令和元年東日本台風における千曲川の河道被災の様子を示す。本章では千曲川低水路河岸侵食被災と堤防決壊についてエネルギー的検討を行う。図-2は解析領域を示す。65.5km付近で左岸から合流する犀川を考慮して解析する。低水路河岸侵食は57.8km左岸で生じ、堤防決壊は57.4km左岸堤防で生じた。

解析手法は非静水圧洪水流・河床変動解析法(Q3D-FEBS²⁾)を用いた。解析条件として上流端は千曲川82.4kmの杭瀬下水位観測所と犀川9.0kmの小市水位観測所、下流端は千曲川25.3kmの柏尾橋水位観測所で観測された水位ハイドログラフを与えた。河床材料は、洪水前



(a) 低水路河岸侵食



(b) 堤防決壊

図-1 令和元年東日本台風における千曲川の河道被災¹⁾

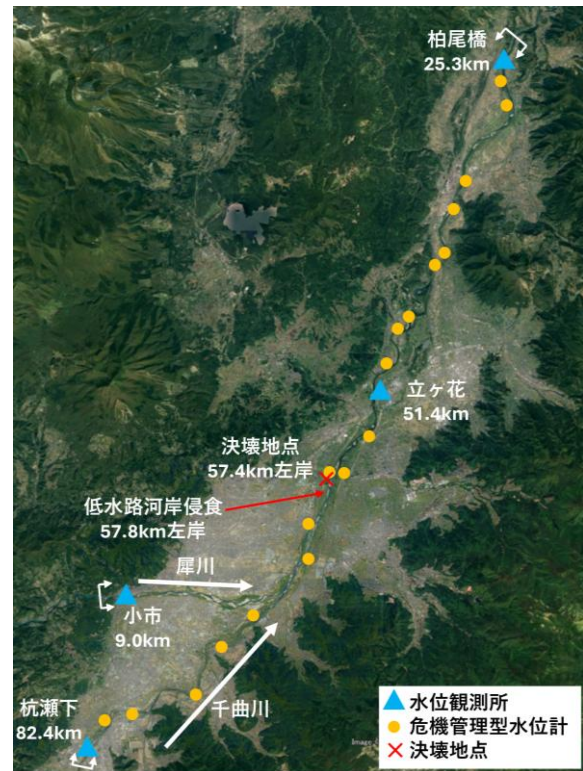


図-2 解析領域

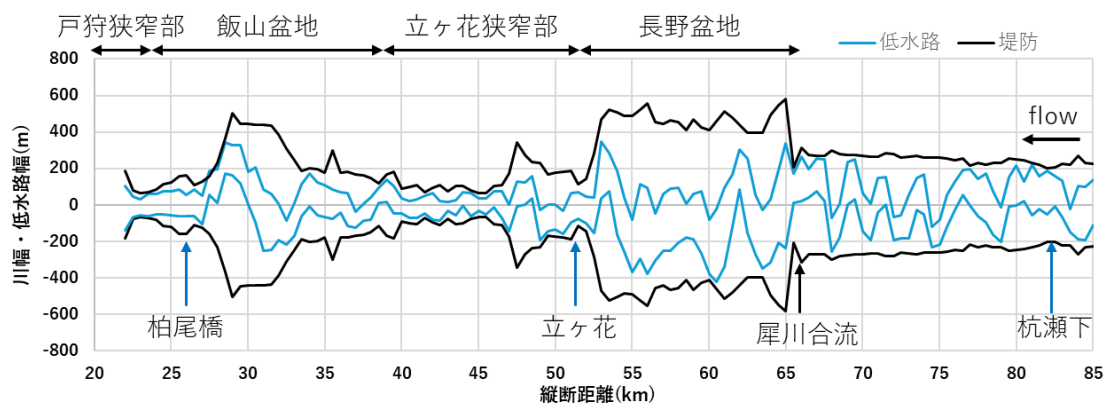


図-3 千曲川の川幅縦断図

に測定された粒度分布を千曲川と犀川にそれぞれ一様に与えた。河道内の樹木に関しては、洪水前後の航空写真や樹木高のコンター図より場所を特定し、これをもとに樹木群透過係数を決定し、抵抗として評価した。

(2) 千曲川の地形的特性

図-3は千曲川の川幅縦断図を示す。千曲川は、盆地と狭窄部が連続し、縦断的に川幅が変化する河川である。図-3より、犀川合流前は川幅が約500mに対し、合流後の長野盆地では900m～1000mと増大している。さらに流下し、立ヶ花狭窄部に入ると川幅が約250mになり、1/3から1/4に縮小している。そのため、立ヶ花狭窄部上流の盆地で背水が生じる。

(3) 解析結果

図-4は千曲川の解析・観測水面形の時間変化を示す。図-4より、解析水面形は観測水面形の時間変化をおおむね満たしており、本解析は実洪水を十分に再現している。

図-5は被災場所付近における低水路満杯時、計画高水位時、洪水ピーク時における全エネルギー水頭の平面分布を示す。全エネルギー水頭は式(1)で示す局所的なエネルギー水頭 H を底面から水面まで水深積分した式(2)で定義される³⁾。

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + z(x, y, t) \quad (1)$$

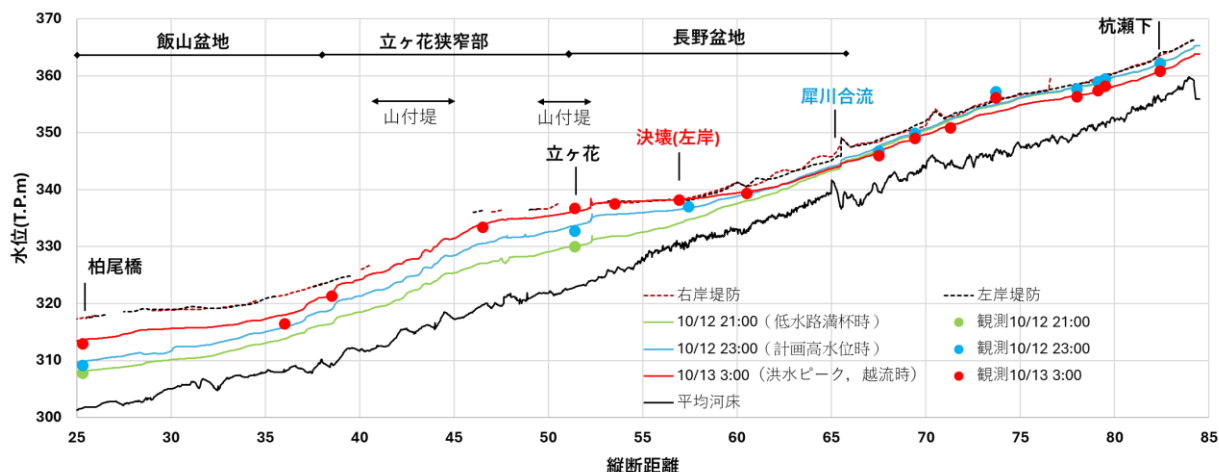


図-4 千曲川の解析・観測水面形

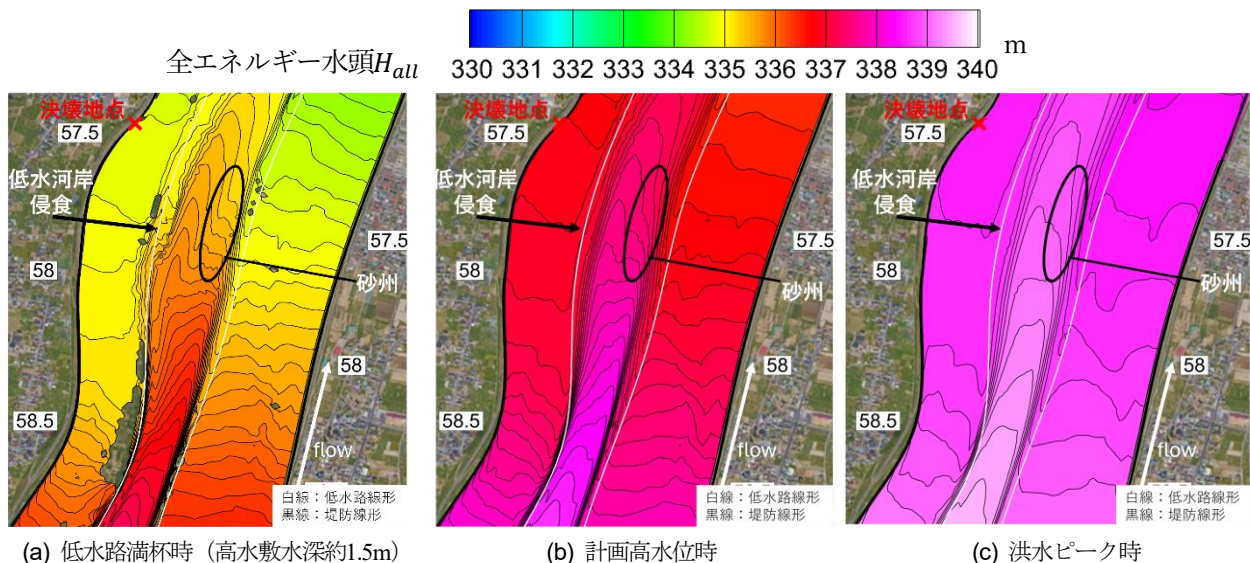


図-5 被災場所周辺における全エネルギー水頭の平面分布

$$H_{all} = \frac{1}{h(x, y, z, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (2)$$

ここに H ：局所的なエネルギー水頭， H_{all} ：全エネルギー水頭， u, v, w ：それぞれ x, y, z 方向の流速， p ：圧力， ρ ：水の密度， z ：基準面から測られた河床高， h ：水深， g ：重力加速度， z_s ：水面高， z_b ：底面高である。

図-5より，58km地点までは全エネルギー水頭の尾根が右岸側に生じているが，58km下流では左岸側に移動している。これは低水路満杯時から洪水ピーク時まで常に生じている現象である。57.5km～57.8kmの低水路右岸に砂州が存在することで，滞筋が右岸から左岸に移り，流速分布が変化したため，全エネルギー水頭の尾根も左岸側へ移り，低水路河岸被災場所に向かったものと考えられる。さらに，全エネルギー水頭の等値線に着目すると水位上昇に伴い，等値線の縦断間隔が疎になっており，低水路満杯時が最も縦断エネルギー勾配が大きい。これは，被災場所の約5km下流（52.5km地点）の狭窄部での背水の影響で，水面勾配が小さくなったため，エネルギー勾配も水位上昇に伴い小さくなったものと考えられる。また，低水路満杯時には，高水敷と低水路の流速差

が大きく，高水敷の遅い流れが低水路の早い流れに引っ張られ，高水敷と低水路の境界付近のエネルギー勾配が増大したため，せん断力が大きくなっている。これらの影響で低水路河岸侵食が生じた場所における低水路満杯時の低水路底面にはたらくせん断力は計画高水位時の約3倍と増大していた。

縦断エネルギー勾配が大きく，全エネルギー水頭の尾根が被災場所に向かっており，底面にはたらくせん断力が増大したことによって，低水路河岸侵食は低水路満杯時に生じたものと考えられる。

水位がさらに上昇し洪水ピークになると，図-5より，縦断エネルギー勾配は小さくなるものの全エネルギー水頭の大きさは増大し，最大となっている。洪水ピーク時における堤防決壊断面の全エネルギー水頭の最大値は堤防高より70cm以上高く，越流時間は約3時間という解析結果であった。長時間大きなエネルギーを有する洪水が流下・越流していたことが分かった。

堤防決壊断面における浸透について福岡，田端⁹⁾の堤防脆弱性指標を用いて検討した。堤防脆弱性指標は式(3)で定義される。

$$t^* = \frac{5Hkt'}{2\lambda b^2} \quad (3)$$

ここに t^* ：堤防脆弱性指標， H ：河川水位， k ：堤防の透水係数， t' ：高水敷が冠水している時間， λ ：堤防の空隙率， b ：堤防幅である。

図-6に千曲川の堤防越水場所における堤防脆弱性指標を示す。堤防決壊地点における堤防脆弱性指標は $t^* = 9.32 \times 10^{-3}$ であり，堤体漏水の危険性が高い状態にあったが，上下流地点と比較し，裏法滑りや決壊の危険性は低い状態にあったと考えられる。

堤体侵食の観点から堤防決壊について検討する。堤体侵食は福岡⁹⁾の無次元流量に対する無次元河幅・無次元水深の関係をを用いる。図-7は堤防決壊断面における無次元流量に対する無次元河幅・水深の関係を示す。無次元流量と無次元水深の関係に着目すると，洪水ピークの一部を除き上限曲線式を下回って分布している。一方，無次元流量と無次元河幅の関係は，増水期から洪水ピーク時まで常に，上限曲線式を上回る。つまり，堤防決壊断面は，洪水流量に対して，十分な川幅を有しており，洪水時に堤防侵食はほとんど生じていなかったものと考えられる。

以上より，本洪水は長時間大きなエネルギーをもって越流し，堤体川裏の洗掘¹⁾により決壊が生じたものと考えられる。

3. 平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川の河道被災の検討

千曲川に比して流域面積の小さい五十嵐川における堤防侵食被災について検討する。五十嵐川では，平成23年7月新潟・福島豪雨において複数の場所で河道被災が発生した。本研究では，3.4km右岸で生じた堤防侵食について検討する。対象河道は平成16年に生じた洪水で内岸側の堤防が決壊した区間であり，大規模な河川改修で，堤防高を上げ，低水路に落差工が設けられた場所である。

図-7より，五十嵐川の堤防侵食断面の無次元流量に対する無次元河幅の関係は，洪水ピーク時において下限曲線式を下回っている。一方，無次元流量に対する無次元水深の関係は常に上限曲線式を上回っている。つまり，堤防決壊断面は洪水流量に対して，河積が十分ではなく，洪水時に河床洗掘や堤防侵食が生じやすい河道であることが分かる。五十嵐川は川幅が狭いことから，洪水の立ち上がり早い。そのため，大河川のように低水路河岸から高水敷，堤防へと順に被災が及んだというよりも直接堤防侵食が始まったものと考えられる。

図-8は堤防侵食被災した蛇行部周辺の洪水ピーク時における全エネルギー水頭の平面分布を示す。被災が生じた3.4km右岸は蛇行部外岸で水衝部となっている。その

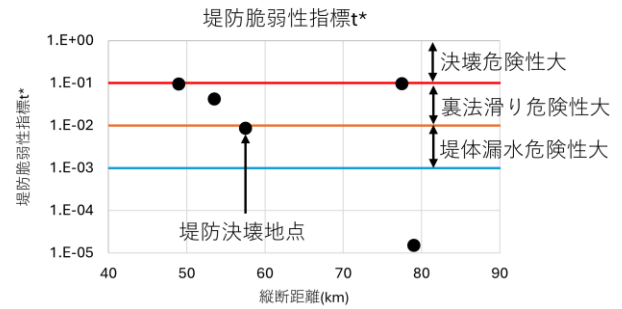


図-6 越流箇所における堤防脆弱性指標

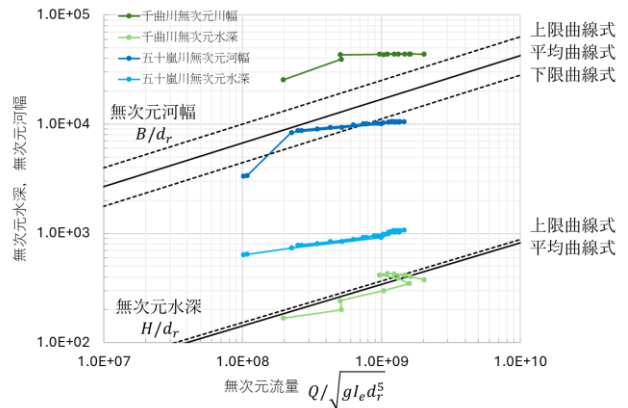


図-7 千曲川堤防決壊断面と五十嵐川堤防侵食被災断面における無次元流量に対する無次元河幅・水深の関係

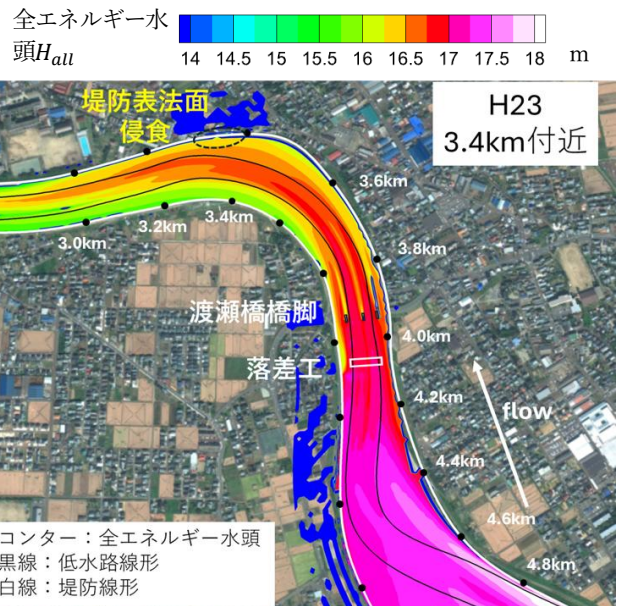


図-8 五十嵐川堤防侵食被災場所周辺の全エネルギー水頭の平面分布（洪水ピーク時）

ため遠心力の影響で内岸より水位が上昇し，越流が生じた。4.2km～4.6kmの蛇行部では内岸側に最大流速が生じ，複断面的蛇行流れが発生していたが，新設された低水路落差工によって流れが整えられ，その下流では最大流速が低水路外岸側で生じたため，蛇行部外岸側で全エネルギー水頭が高まり，堤防侵食が生じたものと考えられる。一方，蛇行部内岸側は流速が低減し，全エネルギー水頭

表-1 被災概要

被災番号	河川	距離	被災長	全エネルギー水頭-堤防高	被災内容	場所	特徴
1	千曲川	57.8	114	0.6325	低水路河岸侵食	低水路蛇行	砂州
2	五十嵐川	2.3	80	0.9469	低水路河岸侵食	蛇行部外岸	急湾曲
3	五十嵐川	0.6	80	0.279	高水敷洗掘	蛇行部外岸	
4	五十嵐川	1.1	60	0.6133	高水敷洗掘	蛇行部内岸	
5	五十嵐川	3.4	70	0.7836	堤防侵食	蛇行部外岸	急湾曲
6	五十嵐川	2.3	65	1.162	堤防侵食	蛇行部内岸	急湾曲
7	千曲川	57.4	70	0.8001	決壊	堤防蛇行, 低水路蛇行	砂州
8	五十嵐川	3.3	120	1.0133	決壊	蛇行部内岸	急湾曲

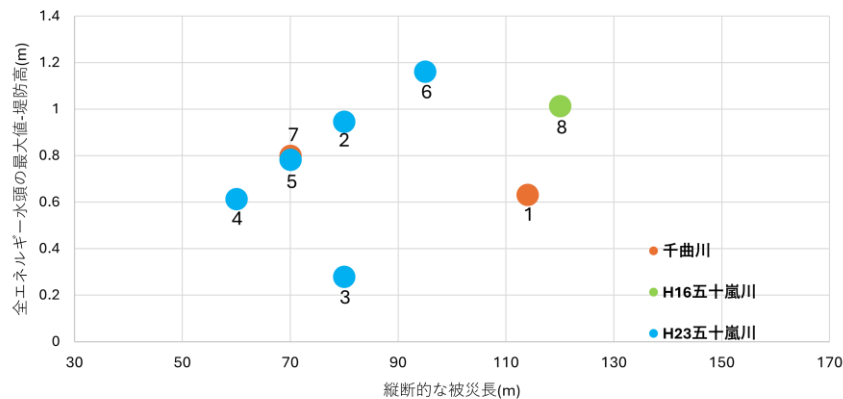


図-9 縦断的な被災長と全エネルギー水頭の最大値の堤防高からの高さ

も外岸側と比較して小さくなったため、平成16年洪水時のような堤防決壊を含む河道被災は生じなかった。この事実は河川改修の効果を示すこととなった。

以上より、被災場所は水衝部であり、洪水流量に対して河積が小さかったことに加え、全エネルギー水頭が外岸側で増大し、一部越流したことによって、堤防表法面の侵食が生じたものと考えられる。

4. 全エネルギー水頭と河道被災の関係から見た

河道侵食の対応の考え方

本章では千曲川と五十嵐川で生じた河道被災と洪水の持つ全エネルギー水頭の関係について総合的に検討する。図-9は本論文で検討した河道被災に加え、過去に著者らが行った⁹⁾平成16年7月新潟・福島豪雨での全エネルギー水頭の堤防高からの高さに対する河道被災長の関係を示す。表-1には被災場所やその内容等を示す。表-1, 図-9より、被災形態は様々であるが、低水路蛇行部や砂州によって滞筋が蛇行し、水衝部になっている場所において被災が多く生じている。また、全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高より高くなるほど、縦断的な被災長が長くなる傾向があることがわかる。この図と表から全エネルギー水頭と河道被災に大きな関係があることが分かり、事前防災のために、他の河川についても同様の検討を行っていくことが望まれる。

図-10は千曲川と五十嵐川における全エネルギー水頭

のハイドログラフを示す。千曲川と五十嵐川では河道スケールが異なるため、全エネルギー水頭のハイドログラフの特性が異なる。千曲川の長野盆地では川幅が広く、洪水増水期において緩やかに水位が上昇することから、全エネルギー水頭も緩やかに上昇し、洪水1山に対する低水路満杯時間が長くなり、計画高水位以上の時間の割合が相対的に小さくなる。一方で、五十嵐川は川幅が狭く、洪水増水期において急激に水位が上昇することから全エネルギー水頭も急激に上昇する。そのため洪水1山に対する低水路満杯時間が相対的に小さくなり、計画高水位以上の時間が大きくなる。河道の特徴によって侵食被災が生じる時間の長さが異なることから、前者の特徴を持つような河川では、低水路河岸侵食の危険性が高く、後者の特徴を持つ河川では、高水敷洗掘や堤防侵食の危険性が高いものと考えられる。

低水路河岸や堤防は長大な延長を有し、流れに対する耐力が大きく、瞬間的にエネルギーが高まるだけでは被災は生じず、その状態が長時間続くことで生じるものと考えられる。そのため、侵食を起こす作用時間を考慮した検討が必要であると考ええる。本研究では、全エネルギー水頭の縦断勾配を外力として、増水期において時間積分し、力積の形で被災形態との関係を検討する。図-11は全エネルギー水頭の縦断勾配を時間積分した値 $\int l_{ex} dt$ (式(4)) を求め、これと侵食被災の関係を示す。

$$\int l_{ex}(x, y, t) dt = \int \frac{\Delta H_{all}(x, y, t)}{\Delta x} dt \quad (4)$$

本研究では Δx は流下方向に10~20mを取っている。低水路河岸侵食から高水敷洗掘、堤防侵食へ、被災の履歴が次の被災に影響するものと考えられることから、時間積分した範囲は被災形態によって異なる。低水路河岸侵食被災は全エネルギー水頭が高水敷高さの0.5m下から1.5m上までの時間、高水敷洗掘被災は高水敷高さの0.5m下から計画高水位までの時間、堤防侵食被災は高水敷高さの0.5m下から洪水ピーク時までを時間積分した。なお、減水期は増水期と比較してエネルギー勾配が小さく、増水期により被災が生じるものと考え、増水期に注目し時間積分している。図-11より、低水路河岸侵食、高水敷洗掘、堤防侵食の順に $\int I_{ex} dt$ が大きい。複断面河道である五十嵐川においても⁶⁾単断面的な河道を有する場所では洪水ピーク時に最もエネルギー勾配が急になり、時間積分する時間も長いことから堤防侵食被災場所において $\int I_{ex} dt$ の値が増大しているものと考えられる。

河川によって洪水の立ち上がり方や計画高水位以上の継続時間が異なるため、河道特性や時間スケールを踏まえて外力を評価し、被災との関係についてさらに被災データを集めて検討することが必要である。

5. 結論

以下に本論文のまとめと今後の課題を示す。

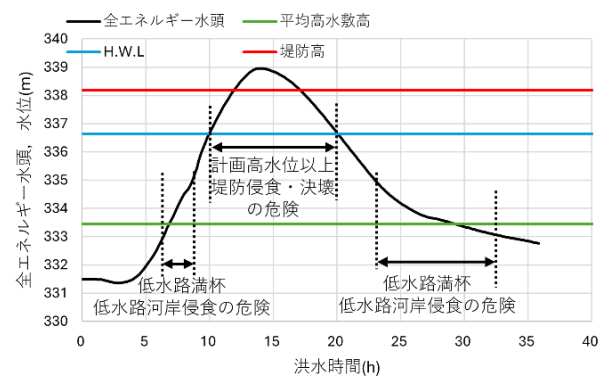
本論文では、千曲川と五十嵐川で生じた河道被災について、洪水流の持つ全エネルギー水頭の観点から検討を行った。低水路河岸侵食被災は縦断エネルギー勾配が大きくなる低水路満杯時に被災が生じやすいことを示し、堤防決壊や堤防侵食被災は、全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高より高くなっている場所において大きなエネルギーをもって長時間越流したことによって被災が生じたことを河道線形や河川改修を踏まえて検討し、明らかにした。

全エネルギー水頭の縦断勾配を時間積分し、力積を用いる工学的な方法は、低水路河岸侵食、高水敷洗掘、堤防侵食の順に力積が大きくなり、洪水エネルギーと時間スケールを一体とした解析ができることを示した。

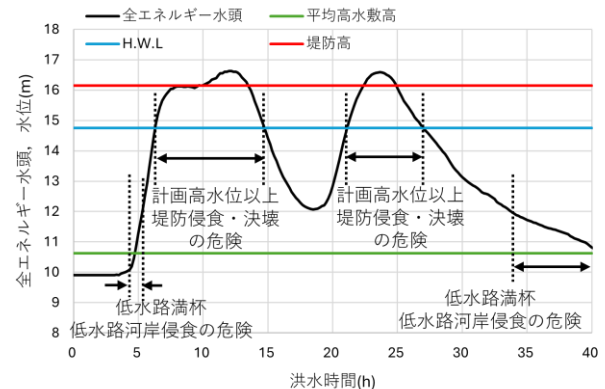
今後は他の河川においても全エネルギー水頭と被災の関係を分析し、事前防災として河道被災が生じやすい場所を知るための事前防災に活かすことを考えている。

参考文献

- 1) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020.
- 2) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1（水工学），Vol.75, No1, pp61-80, 2019.
- 3) 福岡捷二，加藤宏季：超過洪水流の時空間三次元エネルギー



(a) 千曲川（堤防決壊地点(57.4km)）



(b) 五十嵐川（3.9km地点）

図-10 全エネルギー水頭のハイドログラフ

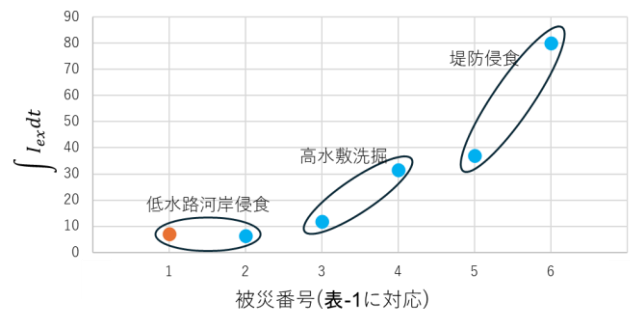


図-11 全エネルギー水頭が被災場所に作用したエネルギー量と被災形態の関係

分布に基づく河道計画・設計法，河川技術論文集，第30巻，pp411-416，2024.

- 4) 福岡捷二，田端幸輔：浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件—浸透流ナンバー SF_n と堤防脆弱性指標 t^* ，土木学会論文集B1（水工学），Vol74, No5, 2010.
- 5) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて，土木学会論文集F，Vol66, pp471-489, 2010.
- 6) 佐藤海輝，後藤岳久，岡田一平，福岡捷二：平成23年7月新潟・福島豪雨における五十嵐川の堤防・河道被災機構—平成16年7月新潟・福島豪雨と比較して—，河川技術論文集，第31巻，pp109-114, 2025.

(2026. 4. 2受付)