

超過洪水における堤防越水時の堤体浸透・侵食及び高水敷，低水路河岸侵食の影響評価

堤防越流 全エネルギー水頭 堤防脆弱性指標

中央大学大学院 学生会員 ○佐藤海輝
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡捷二

1. 序論

超過洪水では、河道被災危険箇所が河道状況や水位によって変化する。高水敷に少し水が乗った低水路満杯時には、低水路と高水敷で流速差が生まれることから、低水路河岸の侵食被災が生じる可能性が高く、水位の上昇と共に高水敷洗掘へと広がる。計画高水位から洪水ピーク時には、堤防越流・堤防侵食・堤体浸透の危険性が高くなる(図-1)。低水路河岸の被災危険性が高い時間では、低水路と高水敷の流速差やエネルギー勾配で検討することが重要である。一方、堤防決壊の危険性がある水位の高い時間では、高水敷が冠水している時間や堤防越流時間が長く、堤防侵食や堤体浸透が発生していることが十分に考えられるため、越流・侵食・浸透の観点から総合的に検討することが重要である²⁾。解析技術の向上により、河道で起こる様々な被災形態について定量的に検討できる段階に近づきつつある。

本研究では、令和元年東日本台風時における千曲川を対象に、非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析を行い、得られた解析結果から全エネルギー水頭の平面分布や堤防脆弱性指標、無次元流量に対する無次元河幅、無次元水深の関係を分析し、低水路河岸侵食や堤防決壊の原因を検討した。

2. 解析方法・解析条件

図-2 は解析区間を示す。令和元年東日本台風時の低水路河岸侵食は 57.8km 左岸で発生し、堤防決壊は 57.4km 左岸で発生している。解析は千曲川と途中で合流する犀川を対象とする。上流端は杭瀬下水位観測所(千曲川 82.4km)と小市水位観測所(犀川 9.0km)であり、下流端は柏尾橋水位観測所(25.3km)である。解析手法は、非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析(Q3D-FEBS³⁾)を用いた。上下流端の境界条件には、それぞれの場所で観測された水位ハイドログラフを与え、粒度分布は洪水前に計測された粒度分布を与えた。河道内に繁茂している樹木群は樹木群透過係数を用いて考慮した。

3. 解析結果

3.1 水面形の実測と解析結果の比較

図-3 は水面形の観測値と解析結果を示す。図-3 より、解析水面形の時間変化は観測水位の時間変化をおおむね満たしており、解析は洪水を十分に再現している。

3.2 低水路河岸侵食被災の検討

図-4 は低水路河岸侵食場所と堤防決壊地点周辺における、高水敷に約 1.5m 水が乗った低水路満杯時、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)で評価される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⁴⁾。

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

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



図-1 令和元年東日本台風時における堤防決壊地点の様子(57.4km 左岸)¹⁾

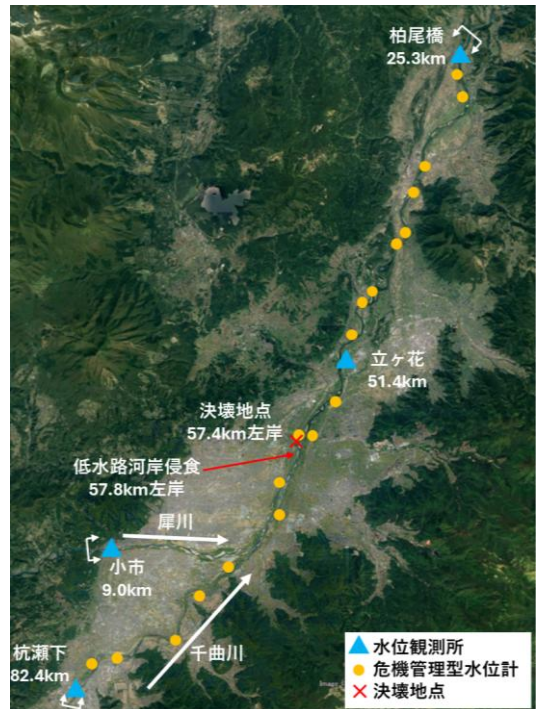


図-2 解析区間

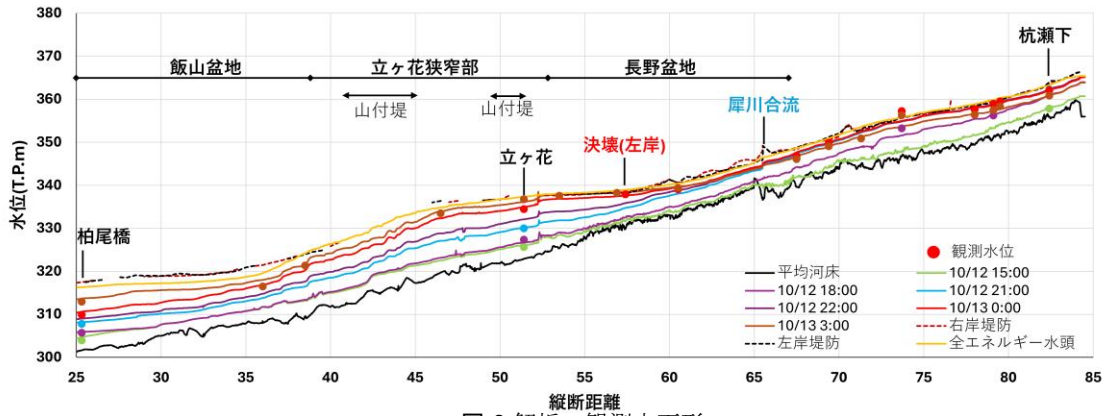
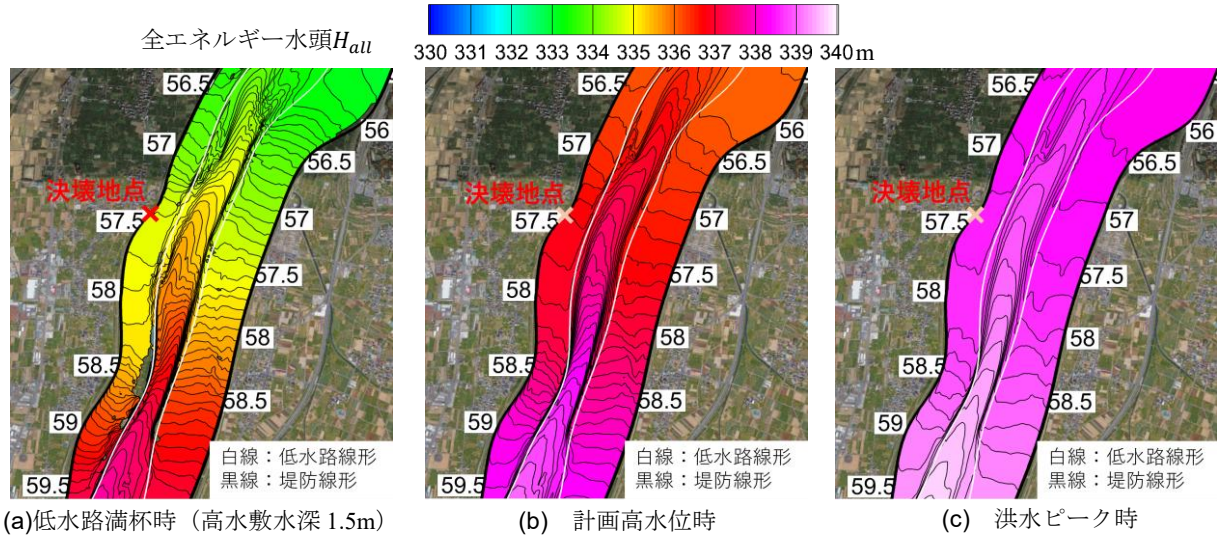


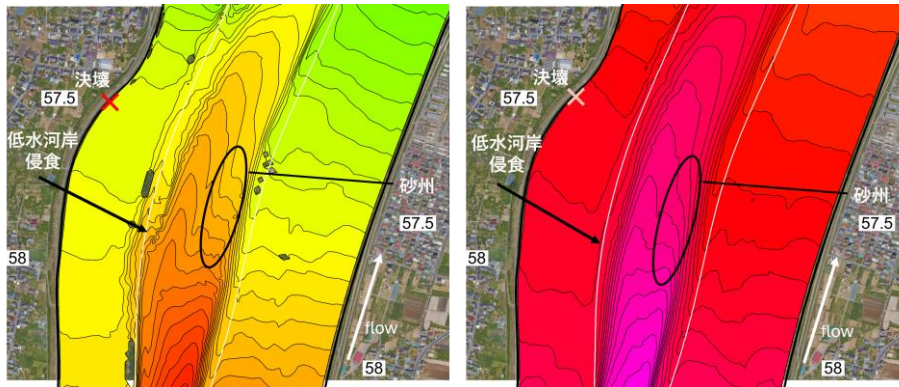
図-3 解析・観測水面形



(a) 低水路満杯時 (高水敷水深 1.5m)

(b) 計画高水位時

(c) 洪水ピーク時



(d) 低水路満杯時拡大図 (高水敷水深 1.5m)

(e) 計画高水位時拡大図

図-4 堤防決壊地点周辺の全エネルギー水頭の平面分布

白線：低水路線形
黒線：堤防線形

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 , x, y, z 方向の局所的な流速, p : 圧力, ρ : 水の密度, h : 水深, g : 重力加速度, z : 基準からの高さ, z_s : 水位, z_b : 河床高である。

図-4 より、低水路河岸侵食被災が生じた 58km 付近は下流の砂州の影響で、全エネルギー水頭の尾根が右岸から左岸に移り、被災場所に向かっている。縦断エネルギー勾配の時間変化に着目すると、高水敷に水が少し乗った低水路満杯時は計画高水位時と比較して、縦断エネルギー勾配が大きい。そして、高水敷流速に対して低水路流速が大きいため、低水路の速い流れに高水敷の遅い流れが引っ張られ、低水路と高水敷の境界付近でのせん断力が大きくなっている。高水敷に少し乗った低水路満杯時における低水路河岸侵食被災場所の底面にはたらくせん断力は、計画高水位時と比較して 3 倍程度であった。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いていることに加え、底面にはたらくせん断力が大きくなったことで、低水路河岸で侵食被災が生じたものと考えられる。エネルギー勾配が大きい低水路満杯時付近で最も低水路河岸侵食の危険性が高くなる。低水路河岸侵食がその後の水位上昇時に高水敷洗掘につながるか注意が必要である。

3.3 堤防決壊原因の検討

千曲川の決壊は図-1 に示すように、左岸堤防が約 70m 決壊した。越流が生じてから決壊まで約 3 時間を要し、越流水

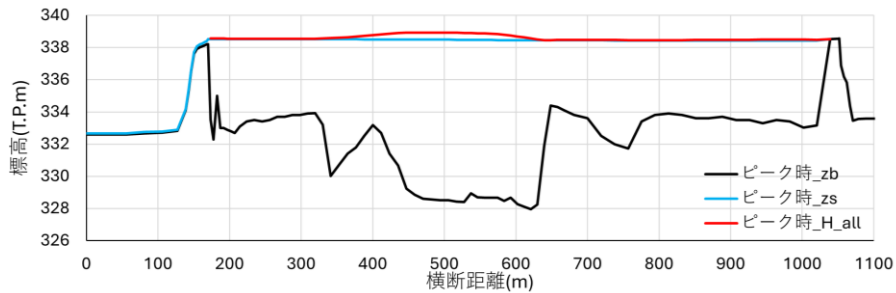


図-5 堤防決壊断面の洪水ピーク時における全エネルギー水頭の横断分布

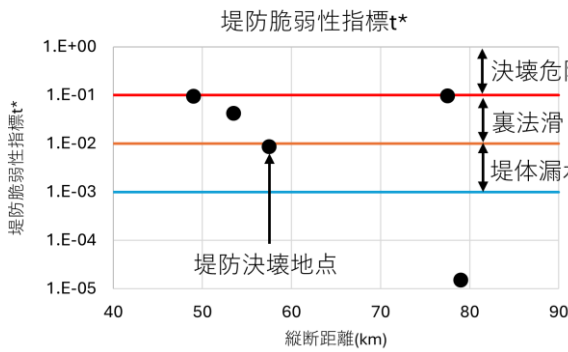


図-6 本洪水で越流が生じた場所における堤防脆弱性指標

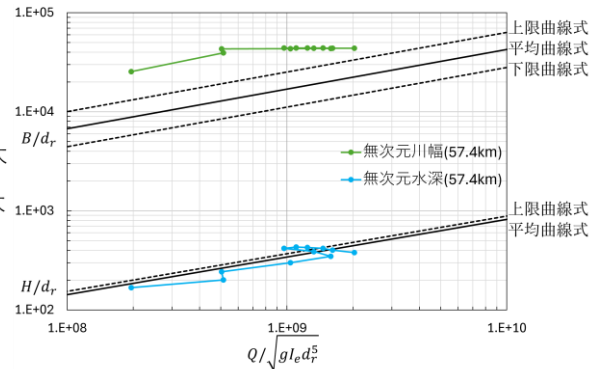


図-7 無次元流量と無次元河幅・無次元水深の関係

深は約 30cm であった。

初めに越流の観点から堤防決壊原因を検討する。図-4 より、堤防決壊場所周辺の全エネルギー水頭の等値線の縦断間隔が高水敷に 1.5m ほど水が乗った低水路満杯時から洪水ピーク時にかけて広がっている。これは縦断エネルギー勾配が小さくなっていることを示している。縦断的なエネルギー勾配が小さくなった理由は千曲川の地形特性にある。堤防決壊地点より約 5km 下流に立ヶ花狭窄部があり、川幅が約 900m から約 260m に急激に狭まる。狭窄部で背水が生じ、洪水ピーク時の水面勾配が 1/2000 程度となったことに伴い、縦断エネルギー勾配も小さくなっている。

しかし、全エネルギー水頭の絶対値に着目すると、低水路満杯時から洪水ピーク時にかけて水位が上昇することで全エネルギー水頭の絶対値が大きくなり、エネルギーレベルが高まっている。図-5 は堤防決壊地点の全エネルギー水頭の横断分布を示す。全エネルギー水頭の横断最大値は堤防高より約 70cm 高くなっており、全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高を超えている時間は堤防決壊時刻まで約 4 時間であった。エネルギーレベルが高い状態で長時間洪水流が流下し、越流したことが堤防決壊の原因の 1 つと考えられる。

次に堤体浸透の観点から堤防決壊を検討する。堤体浸透の評価には田端ら⁵⁾の堤防脆弱性指標を用いる。堤防脆弱性指標は式(3)で定義される。

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

ここに t^* : 堤防脆弱性指標, k : 透水係数, H : 水位, t' : 高水敷が冠水してから堤防決壊までの時間, λ : 空隙率, b : 堤防幅である。

堤防脆弱性指標は解析結果から得られた諸元と堤防上のボーリングデータから算出した透水係数を用いている。図-6 は対象洪水で越流が発生した場所における堤防脆弱性指標 t^* を示す。堤防決壊地点の堤防脆弱性指標は $t^* = 8.62 \times 10^{-3}$ であるため、堤体漏水の危険性が高い領域にプロットされた。つまり、堤防決壊地点は洪水時に浸透が進んでおり、堤体浸透も堤防決壊の原因の 1 つになるものと考えられる。

最後に堤防侵食の観点から堤防決壊を検討する。堤防侵食の評価には福岡ら⁹⁾の無次元流量と無次元河幅・無次元水深の関係式から検討する。福岡ら⁹⁾は沖積地河川の安定な断面形状は流量や河床材料などの物理量に規定され、式(4),(5)に示す無次元流量に対し、無次元河幅と無次元水深の関係で表される範囲の河道断面が望ましいとしている。

$$2.8 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.40} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.40} \quad (4) \quad \frac{H}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{gI_e d_r^5}} \right)^{0.38} \quad (5)$$

ここに Q : 流量, B : 水面幅, H : 水深, I_e : エネルギー勾配, d_r : 代表粒径, g : 重力加速度である。千曲川における令和元年東日本台風時の流量ハイドログラフと低水路における縦断方向のエネルギー勾配を用いて算出した無次元流量、無次元河幅、無次元水深の関係を図-7 に示す。無次元流量や無次元河幅、無次元水深は解析で得られた時間変化する値を用いて算出した。図-7 より、無次元河幅は増水期から洪水ピーク時間まで、上限曲線式を大きく上回っている。一方、無次元水深は堤防から越流が生じている時間は上限曲線式を少し上回っているが、増水期から多くの時間で上限曲線式

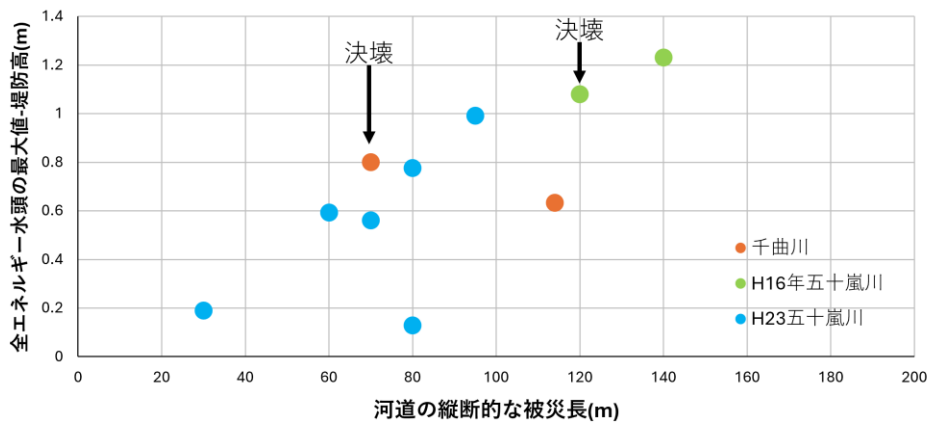


図-8 縦断的な被災長と全エネルギー水頭の横断最大値の堤防高からの超過高さの関係

より小さい値をとっている。これより、決壊地点は洪水流量に対して、十分な川幅を持っており、洪水ピーク時にも堤防侵食などの側方侵食がほとんど生じていないと考えられる。

千曲川堤防調査委員会¹⁾は洪水直後に現地調査を行い、堤防決壊場所の上下流の堤防侵食状況と高水敷洗掘状況を調査した。その結果、決壊地点の上下流とも川表法面に目立った侵食の痕跡は存在せず、堤防決壊付近の高水敷でも目立った洗掘は存在しなかった。

4. 洪水流の持つエネルギーと河道被災の関係について

図-8 は全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高を超過しているときの値と河道の縦断的な被災長さの関係を示す。この図では千曲川における解析領域内の河道内被災のデータと、土堤侵食を対象としていることから、五十嵐川における堤防高水護岸が設置され、護岸の土羽が剥離侵食された場所を除いたデータ²⁾を示す。図-8 より、被災の形態は堤防決壊や高水敷洗掘と様々であるが、全エネルギー水頭の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。この図から洪水流の持つ全エネルギー水頭が河道被災に密接に関係し、強い関係があることがわかる。超過洪水が頻繁に発生する近年、洪水流の持つ全エネルギー水頭から堤防や河道の被災危険箇所を推定し、河道計画・管理につなげることが重要である。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 低水路河岸侵食被災が生じた場所は、高水敷に少し水が乗った低水路満杯時で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い、底面にはたらくせん断力が增大したことで被災が生じた。
- 2) 令和元年東日本台風における千曲川の堤防決壊は、長時間全エネルギー水頭が高い状態で越流したことから、高水敷が冠水した時間が長く、堤体浸透が進んでいたことが原因と考えられる。
- 3) 全エネルギー水頭の横断最大値が堤防高を超過するほど、被災の縦断長さが大きくなることを示し、超過洪水が頻発する近年では河道の持つ全エネルギー水頭と河道被災の関係を十分に検討する必要があることを示した。

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) 福岡捷二：浸透破堤，侵食破堤，越流破堤の危険性の小さい堤防・河道の一体的設計法，河川技術論文集，第26巻，pp253-258，2020。
- 3) 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，No.1，pp.61-80,2019。
- 4) 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。
- 5) 田端幸輔，堀内崇志，福岡捷二：狭窄部と盆地部が連続する千曲川における大規模洪水流下時の河道貯留・堤防浸透破壊危険性の評価と今後の治水整備のあり方，河川技術論文集，第25巻，pp553-558，2019。
- 6) 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，No4，pp471-489，2010。
- 7) 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・河道被害機構—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。