

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

ESTIMATION OF RIVER STORAGE VOLUME AND LEVEE FAILURE RISK DURING A
LARGE FLOOD EVENT AND CONSIDERATION OF A FUTURE RIVER IMPROVEMENT
IN THE CHIKUMA RIVER WITH SEQUENCE OF VALLEYS AND BASINS

田端 幸輔¹・堀内 崇志²・福岡 捷二³
Kosuke TABATA, Takashi HORIUCHI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²国土交通省北陸地方整備局 防災室長 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1丁目1番1号)
(前 国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所 副所長)

³フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The Chikuma River characterized by the sequence of valleys and basins has a large river storage volume. However, the high water level continues for a long time in the basin areas and the risk of levee damage due to seepage flow will increase during a large flood event. In this paper, we developed the flood flow model which can grasp the hydraulic phenomena in the whole section of the Chikuma River based on the temporary changes of the observed water surface profiles during 2006 large flood. Then, the relationship between the river characteristics and river storage volume by the developed model was investigated. Also, the levee failure risk due to seepage flow was longitudinally evaluated based on the levee vulnerability index t^* . It was concluded that the most important future river improvement works in the Chikuma River were to strengthen the levee and utilize the river storage volume ability.

Key Words: Chikuma River, 2006 flood, temporary change of water surface profiles, river storage volume, levee vulnerability index t^*

1. 序論

近年、観測技術、解析技術、計算機器の発展に伴い、観測水面形時間変化に基づいた洪水流解析が可能となってきたことから、流域全体の洪水現象を大きく捉えた河道計画の必要性が指摘されている¹⁾²⁾。水面形の時間変化に基づいた流域全体の洪水流解析を行うことは、河道の流下能力及び洪水時の河道貯留特性の評価や、洪水外力が長時間作用した場合における堤防の浸透破壊危険性の縦断評価を可能にする。これらは、今後の治水整備の在り方を議論する上で極めて重要な検討課題である。

本研究で対象とする千曲川には、立ヶ花、戸狩の2つの狭窄部があり、それぞれの上流には長野、飯山盆地がある。このため、狭窄部上流の盆地部ではかなりの貯留効果が期待できる一方で、大規模洪水時には狭窄部や高

水敷植生による水位上昇により、堤防の浸透被害や、越水による沿川市街地の氾濫危険性が懸念されている。

これまで千曲川では、狭窄部や植生の影響を考慮した平面二次元解析モデルの構築が行われてきた³⁾。これにより、河道線形や樹木群が洪水水位や粒度分布変化に及ぼす影響等が検討されてきたが、これらはピーク流量時の、短い区間を対象に検討されたもので、千曲川全体の洪水流下特性を把握するには至っていない。

本研究では、実績洪水の観測データに基づいて、大規模洪水時の千曲川全体の水理現象を把握できる洪水流解析モデルを構築する。そして、河道特性に着目して河道貯留効果を調べるとともに、堤防脆弱性指標⁴⁾により堤防浸透破壊危険性を縦断的に評価する。これらの検討を通して、今後の千曲川の治水整備のあるべき姿について議論することを目的とする。



図-1 千曲川の平面図

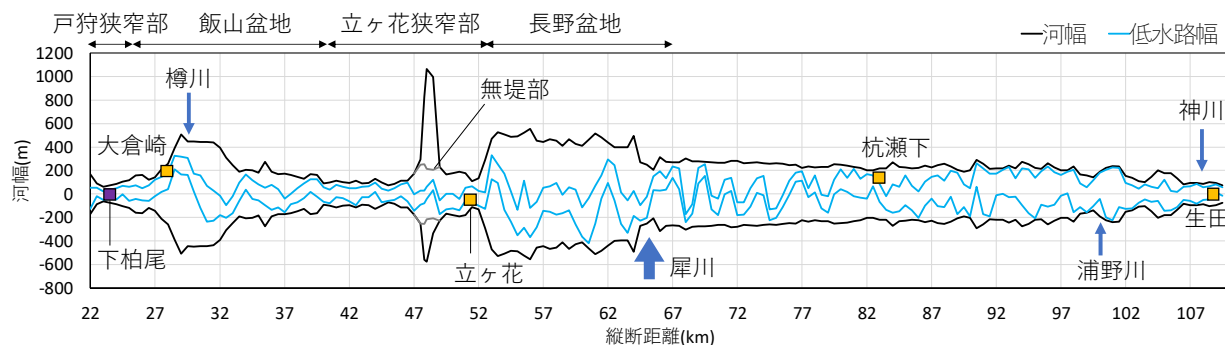


図-2 千曲川の河幅縦断分布

2. 千曲川平成18年7月大洪水の再現計算

(1) 解析条件

平成18年7月に発生した洪水は、立ヶ花観測所において観測史上第二位の水位を記録した。この洪水では、水位観測所の他に、樋門・樋管及び排水機場における水位が計測されており、これらを用いた観測水面形の時間変化に基づく検討が可能であった。本研究では、多くの河川で用いられ有効性が確認されている福岡らの観測水面形の時間変化に基づく洪水流解析手法⁹⁾を、千曲川平成18年7月洪水に適用した。検討対象区間は、千曲川24.8k～109.5k及び支川犀川0k～10kとした(図-1)。解析メッシュは、堤防と低水路線形を取り込み、盆地部と狭窄部の河幅変化(図-2)を表現するように作成した。更に、立ヶ花狭窄部下流に位置する無堤部からの氾濫と、飯山盆地区間に緩勾配で流入する支川樽川への背水による河道貯留は、本川の洪水流下に影響を及ぼすと考え、これらの形状を解析モデルに取り込んだ。メッシュ地盤高は、平成17年度横断測量データを基に設定した。なお、この洪水では河床変動はほとんど生じておらず、最大でも平均河床高変化量が0.5m程度であったことから、本検討では河床変動が洪水流下に及ぼす影響は小さいと考え、固定床条件で解析を行った。

千曲川の上下流端、犀川の上流端には、それぞれ生田、下柏尾、小市の観測水位ハイドログラフを与えた。小支川神川、浦野川については合流点付近での本川の観測水位を再現するように横流入量を与えた。粗度係数、樹木

群透過係数は、検討区間全体の水面形時間変化の解析値が観測値を再現するように調整し、最終的に低水路粗度係数を $0.022 \sim 0.031 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ 、高水敷粗度係数を $0.045 \sim 0.070 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ 、樹木群透過係数⁹⁾を $30 \sim 50 \text{ m/s}$ とした。

(2) 解析結果

図-3に、千曲川、犀川の水面形の時間変化の解析値と観測値の比較を示す。全体的に見て解析水面形は観測水面形を説明できており、ピーク時の水位は痕跡水位と概ね一致していることが分かる。勾配変化点となる杭瀬下(82.4k)より下流では水位増加量が上流区間よりも大きい。立ヶ花狭窄部上流の52～56k区間では、初めは河床勾配に概ね平行な水面形で流れるが、7/19 6:00頃から狭窄による背水の影響が現れ始め、水位が堰き上がる様子が確認できる。この区間の最大水位は、HWLまで上昇した。

図-4に、水面形の時間変化を再現するように計算を行った結果得られた流量ハイドログラフと観測値との比較を示す。いずれの地点においても、解析流量は観測値をよく説明できている。平成18年7月洪水では、千曲川に比べて犀川の方が、流量規模がやや大きく、小市と杭瀬下で見られるようにピーク流量発生時刻は小市の方が4時間ほど遅かった。しかし、犀川合流点下流の立ヶ花では、洪水波形は一つになり、7/19 14:00頃にピークを迎え、最大流量は約 $5,900 \text{ m}^3/\text{s}$ となった。立ヶ花狭窄部の下流の飯山盆地内に位置する大倉崎では、7/19 20:00頃にピークを迎え、最大流量は $5,700 \text{ m}^3/\text{s}$ である。よって、立ヶ花狭窄部は、洪水ピーク流量を約 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 軽減させ、ピーク発生時刻を約6時間遅らせていたことが明らかとなった。

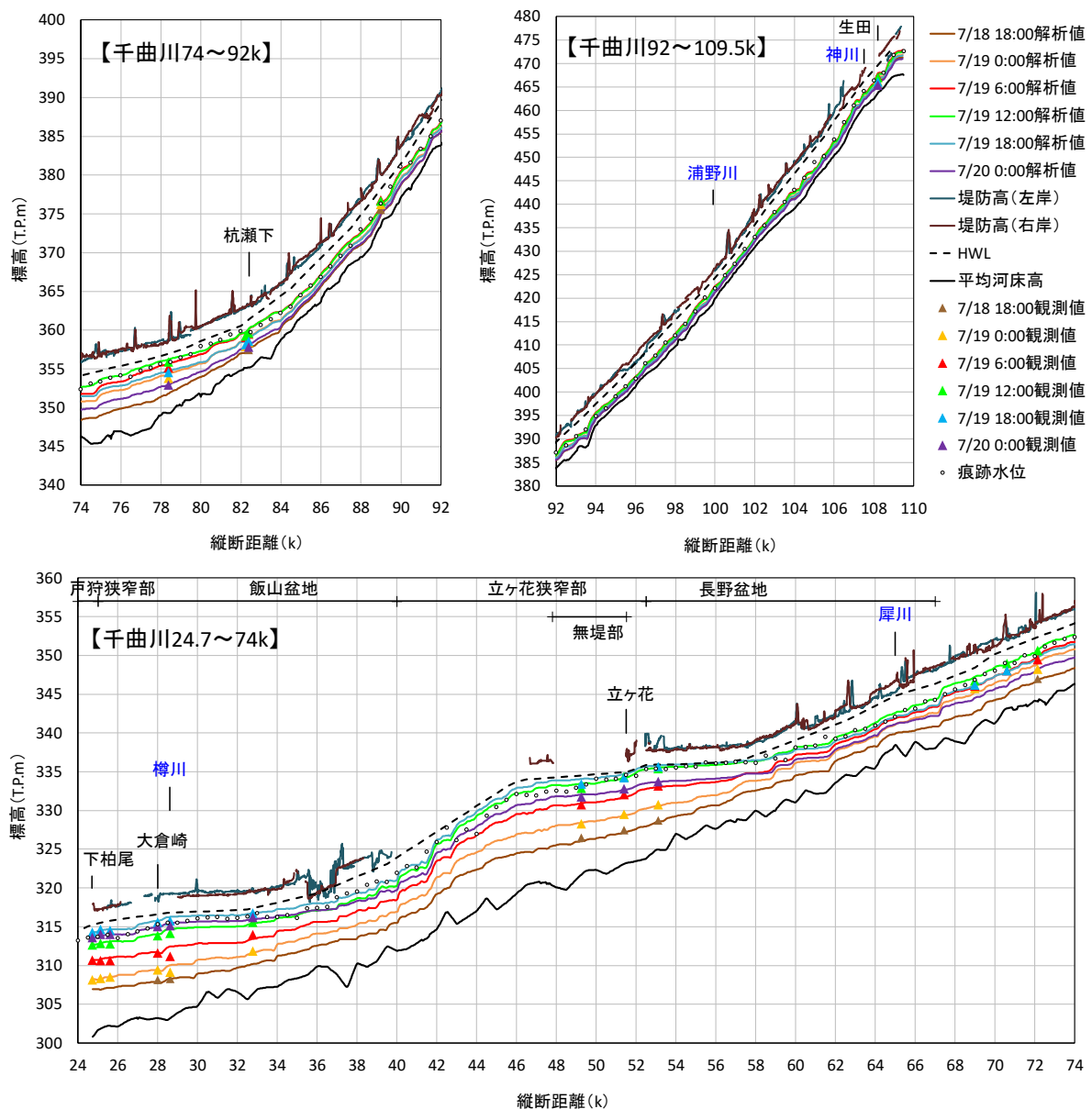


図-3 千曲川の水面形時間変化の観測値と解析値の比較

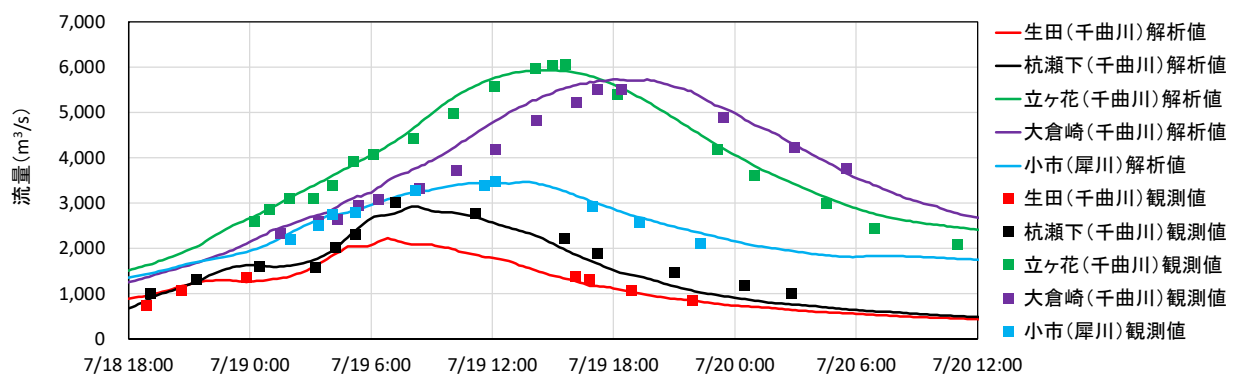
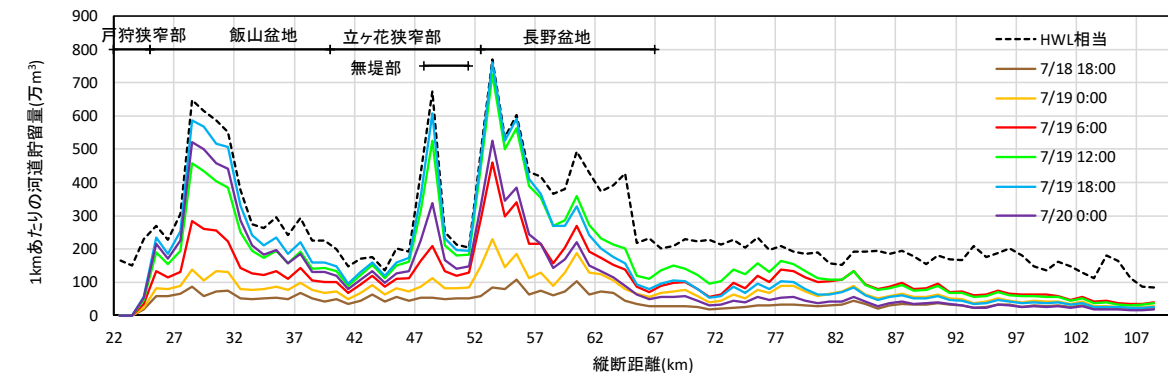


図-4 流量ハイドログラフの観測値と解析値の比較

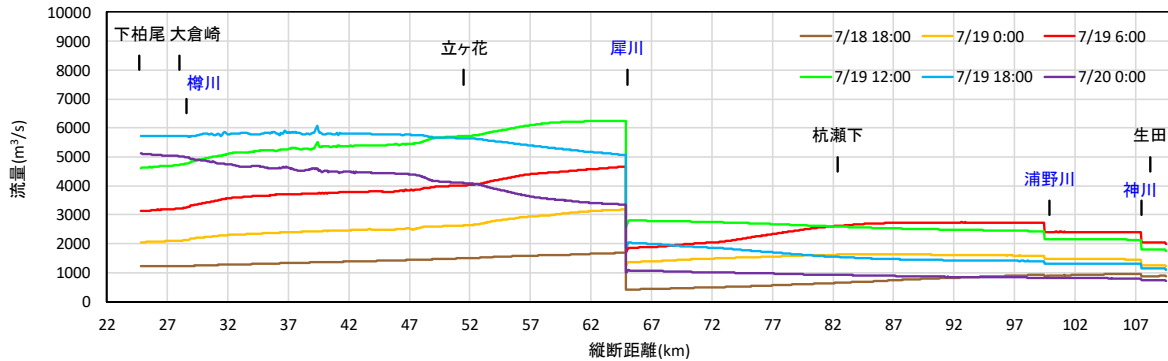
以上より、観測洪水水面形情報に基づいた洪水流解析モデルは、平成18年7月洪水を高い精度で説明できている。以降の検討では、本解析から得られた水位、流量データに基づいて、千曲川の河道貯留特性と、浸透に対する堤防の破壊危険性を分析する。

3. 千曲川の河道貯留特性

図-3に示した水面形の解析結果から、狭窄部上流等において水位の上昇量が縦断的、時間的に異なっていることが確認される。これは、かなりの河道貯留が狭窄部上



(a) 1km毎の河道貯留量縦断分布の時間変化



(b) 流量縦断分布の時間変化

図-5 千曲川の河道貯留量、流量の縦断分布の時間変化と河幅縦断分布

流で生じていたことを意味している。河道貯留量は、以下に示す定義式より算出される河道貯留率 dS/dt を時間積分することで算出される。

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

ここに、 S は貯留量、 t は時間、 Q_{in} 、 Q_{out} は検査区間の流入流出量である。洪水流の非定常性に加えて、河道断面形状や粗度の縦断変化により河道貯留量が急激に大きくなる時、下流への流出流量は低減される。河川ではこれが縦断的に生じることにより、ピーク流量の低減やピーク発生時刻の遅れが生じる。

洪水時の河道流量の時空間変化を知ることは、河道貯留量の時空間分布を知ることを意味する。これは、洪水と河道特性の関係を理解し、今後の河道改修のあり方を議論する上で有用な情報を与える。ここでは、2.で示した解析モデルを用いて、1km区間毎の河道貯留量を算出し、河道特性との関係を分析した。

図-5に、河道貯留量と流量の縦断分布の時間変化を示す。河道貯留量（図-5(a)）は、立ヶ花狭窄部及び戸狩狭窄部上流の盆地区間、立ヶ花狭窄部内の無堤部区間で相対的に大きくなり、これらの区間で洪水流を多く貯めこむ機能があることが分かる。流量縦断分布（図-5(b)）によると、上記区間で河道貯留量が大きくなる時間帯に、縦断的な流量低減が顕著に表れている。特に、立ヶ花狭窄部上流の52～62kでは、河道貯留量が増大する7/19 6:00～12:00の時間帯の流量が、縦断的に500m³/s程度低減して

いる。よって、これらの区間で生じた河道貯留が、下流の流量低減に大きく寄与していたことが明らかである。

また、平成18年7月洪水では、52～57kの区間においてHWLまで水位が上昇したが、57kより上流側区間ではHWLに対して十分な余裕があることが分かる。この余裕分を有効に使い、洪水をゆっくりと安全に流下させることができれば、更なる大規模洪水に対しても下流のピーク流量を軽減できる可能性がある。よって、今後は、計画規模洪水等に対して同様の検討を行い、現況河道のネック部でのHWL超過水量と、流下能力に余裕のある箇所での貯留可能容量を明らかにすることで、有効な河道貯留対策や、対策の規模等の議論が可能となると考えられる。

4. 千曲川堤防の浸透破壊危険性

千曲川の立ヶ花狭窄部上流から勾配変化点までの52～86k区間は、水位が高まりやすいことに加えて、貯留効果によって高い水位が継続しやすいといった水理的特徴を有している。特に、52～65k左岸堤防は、流域内で最も人口、資産の集中する長野市に面しており、洪水外力に対する堤防の決壊リスクをなるべく軽減させることは重要である。

ここでは、52～86k左岸堤防を対象に、ボーリング調査結果から推定した堤防土質・構造と、洪水位ハイドログラフを用いて、水位上昇～下降までの一連期間での堤

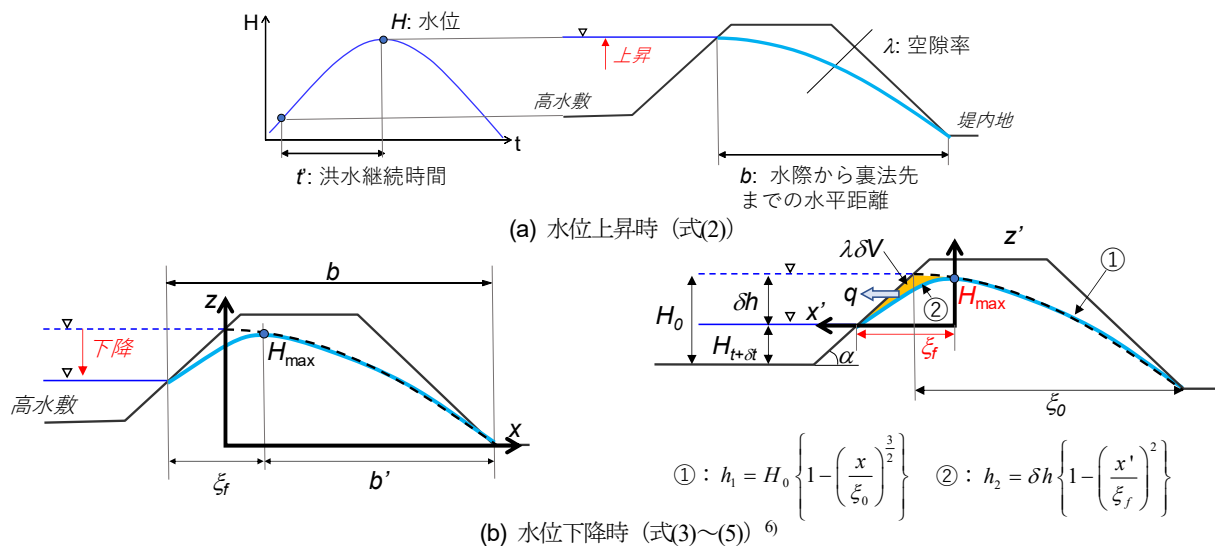


図-6 堤防脆弱性指標の算定に用いる各変数の定義

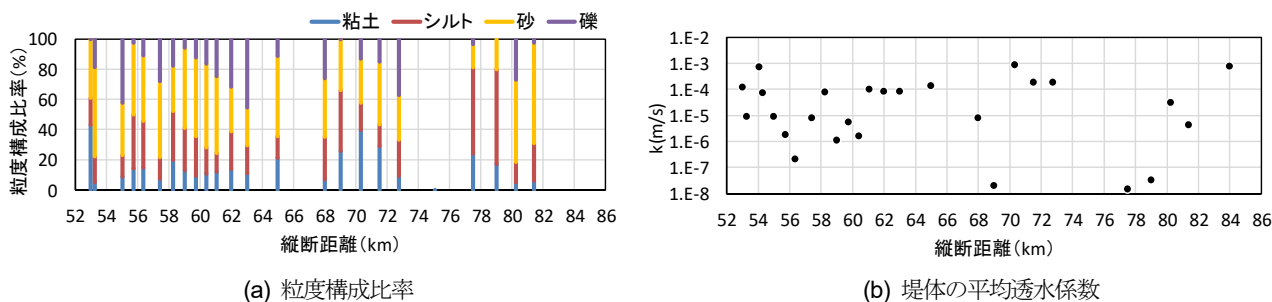


図-7 千曲川の粒度構成比率と透水係数の縦断分布

防脆弱性指標 t^* を算定し、千曲川堤防の浸透破壊危険性を推定する。

(1) 検討方法

福岡・田端⁴⁾は、洪水時における堤防の浸透に対する破壊危険性を評価するための無次元指標である堤防脆弱性指標 t^* を示している。

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

ここに、 H は水位、 b は堤防幅、 t' は水位が高水敷に冠水してからの洪水継続時間、 λ 、 k は堤体内の空隙率と透水係数である (図-6(a))。この指標を現地堤防及び模型堤防に適用した結果、堤防脆弱性指標の値が0.01~0.1で裏法滑り、0.1を超えると決壊の危険性が高まる傾向にあることが確認されている⁴⁾。

洪水水位が低下すると、図-6(b)に示すように堤体内浸潤線の頂部が徐々に裏法先に向かって移動する⁶⁾。その結果、水位下降中も浸透流は引き続き生じ、堤防破壊危険性は増加し続ける。これは主に浸潤線の最大高さ位置の移動に伴う式(2)の水平長さ b の減少が原因である。上村・福岡⁹⁾は、水位低下時における上記の非定常浸透現象を表現するための解析法を提案した。以下にその概要を示す。

堤防内の水の体積変化 $\lambda \delta V$ が、水位低下に伴う堤体表法からの排水量 $q \delta t$ と一致する連続条件を考える。 $\lambda \delta V$ は図-6(b)のオレンジ色の領域であり、式(3)で表される。

$$\lambda \delta V = \frac{\lambda \delta h^2}{2 \tan \alpha} - \frac{2}{3} \lambda \xi_f \left\{ \delta h - (\delta h + H_{t+\delta t}) \left(\frac{-\xi_f + \delta h / \tan \alpha}{-\xi_0} \right)^{3/2} \right\} - \lambda \left(-\xi_f + \frac{\delta h}{\tan \alpha} \right) \left\{ \frac{2}{5} (\delta h + H_{t+\delta t}) \left(\frac{-\xi_f + \delta h / \tan \alpha}{-\xi_0} \right)^{3/2} - \delta h \right\} \quad (3)$$

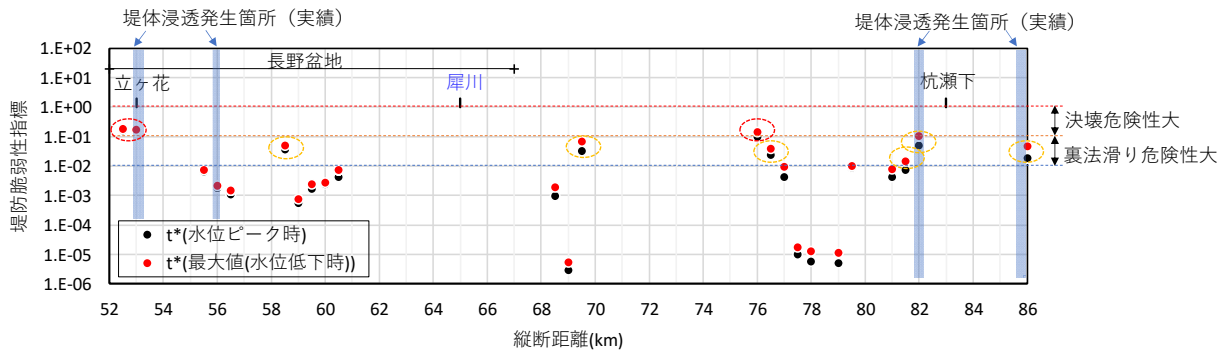
各変数の定義は、図-6(b)に示す通りである。また、 $q \delta t$ は表法からの排水量で、Dupuit-Forchheimer型の式で表現される。

$$q \delta t = \frac{k}{2 \xi_f} \left[\left\{ H_0 \left\{ 1 - \left(\frac{-\xi_f + \delta h / \tan \alpha}{-\xi_0} \right)^{3/2} \right\} \right\}^2 - H_{t+\delta t}^2 \right] \delta t \quad (4)$$

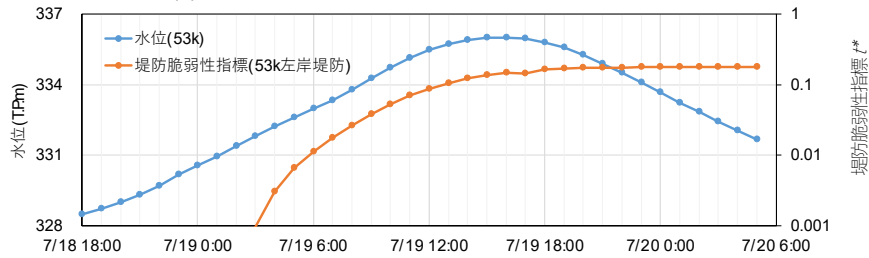
式(3)と式(4)が一致するように、浸透ラインの上部の水平位置 ξ (図-6(b)) を数値的に求める。そして、河川水位がピークとなった時の堤体内浸潤線 (図-6(b)の①) に沿って、浸潤線ピーク位置が移動すると仮定することで、浸潤線のピーク高さ H_{max} を求める。これより、水位低下時の堤防脆弱性指標は、式(2)の H と b の代わりに H_{max} と $b' (=b-\xi)$ を用いることで、式(5)のように表される。

$$t^* = \frac{5 k H_{max} t'}{2 \lambda b'^2} \quad (5)$$

式(2)、(5)を用いて、水位上昇～下降期における千曲川堤防の脆弱性指標 t^* を算出した。図-7にボーリング調査データから設定した堤体内の粒度構成比率と平均透水係数を示す。礫含有率が15%以上の堤防では浸透破壊の



(a) 堤防脆弱性指標 t^* の縦断分布 (千曲川左岸堤防)



(b) 53k 左岸堤防に作用する河川水位と堤防脆弱性指標 t^* の時間変化

図-8 算定した堤防脆弱性指標 t^*

危険性がほぼ無くなることから⁷⁾、本研究では礫分含有率が20%以上となる堤防は浸透破壊の危険性が低いとして t^* の検討対象から除外した。

(2) 堤防脆弱性指標を用いた浸透破壊危険性の評価

図-8に、算定した千曲川左岸堤防の脆弱性指標 t^* を示す。 t^* の縦断分布(図-8(a))によると、58.5kや69.5k、76.5k、86kでは t^* が0.01~0.1、53k付近や76k、82kでは0.1~1.0の値を取り、それぞれ裏法滑り、堤防決壊の発生危険性が大きい領域にプロットされた。これらの地点では実際に致命的な被災は生じなかったものの、53kや82k、86kでは堤体漏水が生じたことが確認されており、危険性を看過できない。よって、今後は詳細な地盤調査により堤防の土質・構造を見極め、耐浸透性を高めるための堤防強化対策を検討していくことが重要である。特に、狭窄部の直上流に位置し、高い水位が長時間継続される52.5k、53k付近では、 t^* が0.1を超える結果となった。図-8(b)に示した53kの河川水位及び t^* の時間変化によると、水位ピーク以降も浸透破壊に対して危険な状態が維持されることが分かる。この区間では、更なる大規模洪水時には堤防からの越水の危険性もあるため、堤防決壊リスクが高いものと推定される。また、決壊時には長野市街地の浸水被害も懸念されることから、浸透及び越流に対する堤防強化対策を優先して実施していく必要性が高い。

5. 結論

H18年7月洪水では、狭窄部上流の盆地部、無堤部、樽川合流部を含む区間の河道貯留効果により、下流域の流量低減に大きく寄与したことを明らかにした。また、高い水位が長時間継続する狭窄部上流では、堤防脆弱性

指標 t^* も上昇し続け、浸透破壊の危険性が高まるとともに、更なる大規模洪水時には越水の危険性もあることから、浸透及び越流に対する堤防強化対策の必要性が高いことを示した。

千曲川では地形的特徴に起因する河道貯留機能を活かし、洪水をゆっくりと下流に流すことを基本とした川づくりが有効である。このためには、流下能力に余裕のある区間の河道貯留量を高め、狭窄部上流部の水位を低減できる河道対策と、越水や浸透による堤防被災の危険性を軽減するための堤防強化対策を検討していくことが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—、土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I_355-I_360, 2017.
- 2) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集、第23巻、pp.251-256, 2017.
- 3) 富所五郎、後藤和也、石原祐樹、松本明人：植生を考慮した千曲川の洪水流と河床変動の解析、水工学論文集、第45巻、pp.775-780, 2001.
- 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)、Vol.74, No.5, I_1435-1440, 2018.
- 5) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法、森北出版、2005.
- 6) 上村勇太・福岡捷二：堤防脆弱性指標に基づく洪水位下降時における裏法安定性に関する研究、河川技術論文主、第24巻、pp.547-552, 2018.
- 7) 独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：浸透に起因する河川堤防のり尻からの進行性破壊現象に関する実験、土木研究所資料第4300号、2015.

(2019. 4. 2 受付)