

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

INTEGRATED DESIGN METHOD OF THE RIVER LEVEE AND CHANNEL FOR
REDUCING THE FAILURE OF LEVEE BODY

福岡 捷二¹
Shoji FUKUOKA

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

The levee and river channel are important facilities to make the flood discharge pass safely in rivers, but have not been prescribed as an integral policy in the present engineering design standards. At first, the necessity of integrated system of the levee and channel is emphasized for proper management of floods and maintenance of rivers. Next, the method of the safety design of the levee and channel against levee overtopping, scouring and seepage failures is presented. The method was applied to the safety judgement of the levee and channel of the Tokachi river that had experienced the 2018 great flood. It was shown that the method was valid for checking of safety judgement of levee and channel system against the design scale flood.

Key Words : *Integrated design, levee, river channel, flood failure, overtopping, erosion, seepage, vulnerability index, Fukuoka's formula, levee free board,*

1. 序論

社会・経済の変化, 気候変動等, 治水事業を取巻く環境は大きく変化している. このような状況の中にあつては, 堤防と河道はその機能を十分発揮し, 洪水流による治水施設の損壊が起こっても破堤しないことが重要である. しかし, 現状の河川整備は, 洪水外力の増大に比して, 河道の縦・横断面形が計画上の完成形となっていない, その上堤防の大きさや強さが十分でないことから, 堤防の破壊危険性が高くなっている. このような中で, 令和元年東日本台風(令和元年10月の台風19号)による大洪水では, 多くの河川堤防が破壊され, 大規模な洪水氾濫が発生し, 甚大な人的・物的被害が生じた.

堤防の安定性に関する技術検討は, 長年にわたり堤防断面の土質構造, 土の飽和度, 強度, 変形に着目し検討されて来た. 洪水外力に対する堤防の耐力の評価は重要であり, 多くの調査研究はこの視点から行われてきた. しかし, 度重なる堤防破壊に伴う甚大な被害の軽減には, 長大な堤防がいつ, どこが, どのような破壊形態をとるかを河道と堤防の構造から事前に推定し, 弱点箇所を改修, 強化すること, そして破堤の頻度を低下させながら,

破堤リスクを見積もることによって, 水害リスクの小さい地域づくり, まちづくりを流域全体で考えた治水, すなわち「流域治水」を実践できるようにすることが強く求められている. このためには, 堤防破壊の危険確率を見積もり, 地域づくり, まちづくりの視点から水害リスク軽減を目的とした技術的蓄積により, 治水と水防を一体化した仕組みを作り上げていくことが喫緊の課題である¹⁾. 治水上は, 河川整備基本方針の達成に向けて, 河道と堤防の整備を着実に進め, 安全性を高めていかなければならない.

現在の河道計画, 河道設計は, 最も重要な治水施設である河道と堤防の一体的設計がなされていない点が課題に挙げられる. 一体的設計が出来ていない大きな理由は, 河川は, 他の土木構造物のように計画に合わせて一気に造られるのではなく, 河道と堤防は段階的に拡大, 強化されているからである. このことは, 大規模洪水に対して, 堤防の越流破堤, 侵食破堤, 浸透破堤の危険性が低くはないことを示している. それぞれの破堤に対する安定性の確認は, 河道と堤防の改修段階に応じて別々に行われているのが現状である.

これまでの堤防設計は, 一般の土木構造物の破壊と同様に, 堤体変形から破壊に至ると考え, 変形機構の解明

を中心に技術の蓄積が行われてきた。しかし、堤防変形機構の解明は重要であるものの、変形の機構を調べるだけでは堤防の危険個所を見つけることは容易ではないことも明らかになって来た。洪水時の堤防には、河道からの水の作用があり、堤防危険個所の発生は、堤体に及ぼす洪水時の水の動きと関係していると考えるのが自然である。水の流れが堤体に与える危険な兆候、破堤につながるキッカケを見つけることから、堤防の危険個所を推定することを考えてみる必要がある。

本論文では、長大な堤防のどこが損傷し、破堤に繋がるかを、洪水時の河道、堤体内の水の動きから「キッカケ」の要因を捉え、また「キッカケ」を生じさせないような堤防-河道システムを構築することを狙いとして、著者らが進めてきた河道における洪水流と土砂移動および堤体浸透流についての研究結果²³⁾⁴⁾⁵⁾を総合化し、再構築することにより、洪水による堤防破壊危険性が小さくかつ環境的にも優れた河道と堤防の創り方を提示する。

2. 河道と堤防を一体化した計画・設計

近年、河川における洪水流水面形の時間変化の観測、解析により得られる流量、水位の時空間変化から、洪水流と河床変動の実態がより深く理解されるようになって来た²³⁾。また河川堤防に関する技術の蓄積も進んできたことから、ダムと河道、堤防等、流域内の治水施設の相互の関係を考慮した流域全体の治水安全度の向上を目指した調査研究が行われるようになって来た⁴⁾。現在の河道計画、設計の基本は、計画高水位以下で洪水を安全に流下させる河道と堤防づくりにある。堤防の役割は第一義的には、洪水氾濫を防ぐことにある。このために、破堤危険性の低い堤防と合理的な縦・横断面形を有する河道を一体とした河川の計画、設計が求められている。

しかしながら、前述のように河道と堤防を一体的に計画、設計する方法がとられていず、河道の流下能力は、堤防法線形を与えて計画高水流量通過に対する河積の大きさを判断し、堤防の安定性については、計画高水位に対する堤体土質の安定計算に基づいて検討されている。一方、河道での洪水流が堤防へ与える侵食、越水の外力作用については、十分な検討結果が得られていず、実質的に考慮の対象にすることが出来なかったと言っても良いであろう。このことは、堤防に対する浸透、侵食、越流がもたらす破堤危険性は、これら個々の事象の判定条件のもとに行なわれ、三者がもたらす一体的危険性は考慮されて来なかった。

大きな洪水流量である水位以上になると、堤防に対する危険な侵食作用と浸透作用は、同時に起こっており、さらに水位が高まると堤防からの越流の危険性も高まる。堤防の破壊に関わるこれら3つの作用は、ほぼ同時に相互に影響を及ぼしあって起こっている。このことは、河

道の流下能力と堤防の安定性は、一体的に検討されるべきものであることを示している。

これまでは、堤防の浸透破壊は、変形をいかに推定するか地盤工学的検討が中心であった。しかし、河川管理施設としての堤防が変形したときには、破壊しないことを期待するのは無理がある。これは、越流破壊、洗掘破壊についても同様で、いずれも破壊につながる「キッカケ」となる水理作用を事前に察知し、回避できることが重要である。「キッカケ」を呈する堤防箇所が事前に判定できれば、対策は可能である。洪水時の河道及び堤体内において破堤に繋がる「キッカケ」となる流れの作用を出来るだけ生じさせないような堤防-河道システムを作ること、すなわち、越流、洗掘、浸透破堤の原因となる「キッカケ」につながる3つの水理作用をできるだけ小さくする川づくりが重要となる。

(1) 「越流破堤」「侵食破堤」の危険性を小さくする適切な断面形を有する河道

土で出来た堤防は、越流によって破壊されやすい。このため河川整備基本方針では、計画洪水流量が計画高水位 (HWL) 以下で流れる縦・横断面形を有する河道が計画されている。しかし、わが国の河川は、完成形である基本方針河道に達していない状況にあり、大規模洪水に対して堤防天端からの越流による大きな氾濫被害が予想される。計画規模を超える、または現在の河道断面の流下能力を超える超過洪水に対しては、HWLから堤防天端までの余裕高部分で流れることが可能な場合は、越流による破堤発生の可能性は小さくなる。同時に、この河道が河岸や堤防の侵食を緩和できる縦・横断面形を有していれば、洪水流による越流と侵食の二つの破壊作用を小さくすることが可能になる。ここでは、洪水時に越流破堤、侵食破堤の起こる可能性の小さい河道断面形状について論ずる。

福岡は、沖積地河川における無次元河道形成流量に対する無次元河幅、無次元水深の関係式を次元解析手法を用い導いた⁴⁾。河道の流下能力を超える洪水流量が流れると洗掘、堆積が起こり、河道断面形が変化する。このとき、河道を流れる洪水最大流量を「河道形成流量」と呼ぶ。河道を規定する物理量は式(1)で表わされる。

$$f(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) = 0 \quad (1)$$

ここに、 Q : 河道形成流量、 B : 河幅、 h : 水深、 I : 河床勾配、 d_r : 代表粒径、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 σ : 土粒子密度である。次元解析より式(1)の8つの物理量は、式(2)の無次元河道形成流量、無次元河幅、無次元水深、勾配、土粒子と水の密度比からなる5つの無次元量で表現される。

$$\phi\left(\frac{Q}{\sqrt{g} I d_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho}\right) = 0 \quad (2)$$

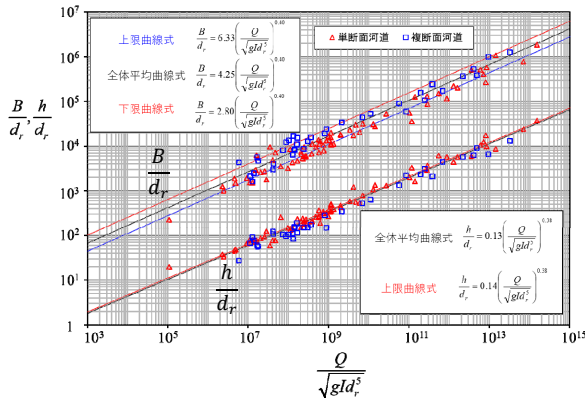


図-1 基本方針河道の無次元河道形成流量と無次元河幅、無次元水深の関係

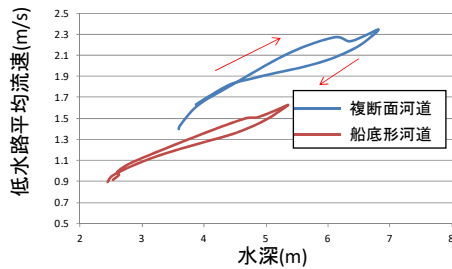


図-3 遠賀川19.8km地点における船底形河道と複断面河道での水深と低水路流速の関係

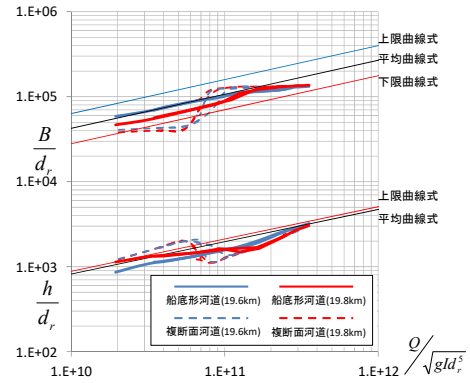


図-2 無次元流量と無次元河幅・水深の関係

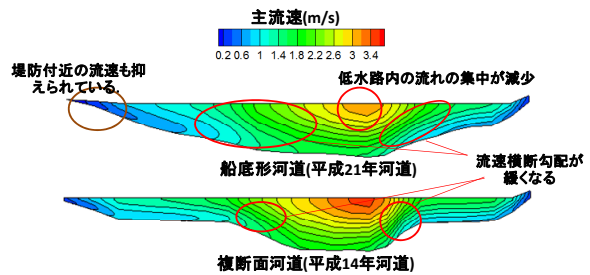


図-4 遠賀川19.8km地点における船底形河道と複断面河道での横断面内流速分布の比較

本研究では、計画高水流量を河道形成流量とする。その理由は、わが国の直轄河川流域の社会・経済の状況、産業形態、地形、自然条件、災害履歴等全国比較の中で、計画高水流量は設定されており、それぞれの河川流域で起こりうる河道形成流量として計画高水流量を用いることは適切であると考えからである。我が国の一級河川109水系の計画基準地点においては、計画高水流量をHWL以下で安全に流す計画河道の河幅、水深が求められているので、これらのデータを用いる。図-1は、式(2)の一つ目の無次元計画高水流量に対する二つ目、三つ目の無次元河幅と無次元水深の関係を示したものである。図-1には、プロットとされたデータの上限線、平均線、下限線とそれぞれの表現式を示す。無次元河幅が、上限線と、下限線の間が存在するとき、河道計画流量を安全に流下させる無次元河幅を与える。一方、無次元水深は、洪水流が安全に流れる無次元河幅の範囲内で、かつ、無次元計画高水位を越えなければ良いことから、無次元水深は上限線と平均線が示されている。式(3)、(4)は、それぞれ無次元河道計画流量と無次元平均河幅、無次元平均水深の関係を示す。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}d_r^5} \right)^{0.40} \quad (3)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g}d_r^5} \right)^{0.38} \quad (4)$$

式(3)、(4)は、計画高水流量時に堤防から越流を生じさ

せない河道の断面形を示す式と解釈できる。

近年、洪水流下能力増強のため、低水路の掘削が行われ、低水路河床の低下が著しくなり、低水路河道維持の困難等、複断面河道の管理上の問題が多く発生している。複断面河道の利点を活かしながら流下能力を上げ、かつ河岸が安定であるためには、船底形に近い河道断面に改修するのが良いことが遠賀川で実証されてきた⁶⁾。

図-2は、複断面河道から船底形河道に改修された遠賀川19.6km、19.8kmにおける改修後の船底形河道に対し、平成22年7月に起こった既往最大洪水の無次元流量に対する無次元河幅、無次元水深の関係を改修前の複断面河道と比較して示したものである。無次元流量に対する無次元河幅と無次元水深の変化の傾向は両者で大きく異なっている。点線で示された複断面河道では、流量増大に伴って低水路から平坦な高水敷上に水が乗ると、高水敷水深は浅いまま水面幅が急激に大きくなり、堤防に達する。この時間帯では、図-2に示すように低水路と高水敷の水深の平均（断面平均水深）は急減する。その後、流量が増大し続けても水面幅は一定のままで高水敷水深が増大し、結果として最大流量まで断面平均水深は増し続ける。一方、実線で示された船底形河道では、流量増大に伴う水面幅は緩やかに増大し、急激な変化はない。

図-3は、洪水時の低水路水深と低水路平均流速の時間変化の関係を示す。複断面流れでは、低水路水深の増加とともに低水路の平均流速は大きくなるが、船底形河道では、低水路際から堤防際に向かって高水敷は緩やかな登り勾配をなすために、低水路水深の増大とともに水面

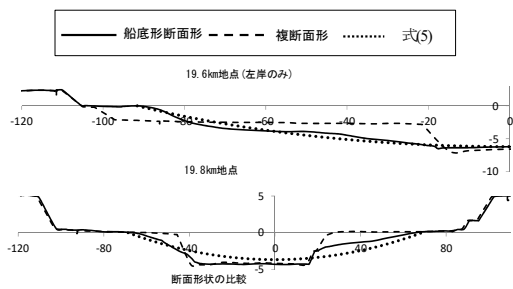


図-5 船底形河道断面形と式(5)の比較

幅は、堤防際まで緩やかに増大し、断面内の流速分布は、図-4に示すように低水路河岸際でも緩やかに変化する。この分布の違いにより、船底形河道の低水路河岸および河床に作用する流れのせん断力は複断面水路に比して小さくなり、河岸侵食や河床変動は抑制される。

さらに、船底型河道では、河川景観が著しく改善され、また水際を活かした低水路づくりや中小洪水での浸水頻度の増大より高水敷に樹木が生育しにくい等、環境的にも優れ、治水と環境の両面から望ましい河道となる⁷⁾。

福岡・山坂は、流水によって河岸が侵食され拡幅する移動床直線水路実験から、安定な流路の横断形状は、式(5)の無次元関数形で表現できることを示した⁷⁾。

$$\frac{h}{H_0} = 1 - \left\{ \exp\left(-\frac{B-y}{D}\right) + \exp\left(-\frac{B-y}{D}\right) - \exp\left(-\frac{2B}{D}\right) \right\} \quad (5)$$

式(5)の右辺第3項は、流路中心線に対する対称性の条件、第4項は、 $y=\pm b$ で水深 h がゼロとなる条件より付加された項である。上式では、 H_0 は、中央水深とはならず、中央水深と H_0 との関係は式(5)で $y=0$ と置くことにより与えられる。ここに、 h ：水深、 B ：水面幅、 y ：水路中心線からの横断距離である。 H_0 、 D は式(5)から流水断面積($A=\int b^2 h dy$)と水際での横断勾配角(dh/dy =水中安息角 φ 、 $\tan\varphi=0.75$)、すなわち、 A 、 B 、 φ を与えることによって決定される。

図-5は、遠賀川の改修前の複断面形河道から船底形河道に改修した断面形を示しており、式(5)との比較を示す。水際の横断勾配に実測の横断勾配を与えることで、式(5)は、船底形横断面形を表現出来ることが分かる。

次に、堤防の洗掘破堤について考察する。堤防の洗掘は、種々の要因が重なって起こり、特に、河道線形に起因する水衝部の発生、河床に形成される砂州等の変形による堤防への流れの集中が、洗掘破堤を引き起こす原因になることが多い。堤防を構成する土質は多様で複雑であり、堤防や河岸の洗掘深さを求めるには、局所的な水の流れと複雑な土質構成の土砂との境界で起こる三次元的な物理現象を解析出来なければならない。従来の解析法では、実際河岸の洗掘現象を定量的に説明できないこと、精度の高い予測手法は一朝一夕にはできないことが分かっている。しかし、堤防の侵食を予測する手法の重要性は変わらず、その確立は強く求められる。

このような現状を考慮すると、筆者は堤防の洗掘問題への対応は、侵食・堆積が小さい縦・横断面形を有する水理的に優れた河道断面形を作ることを優先するべきと考える。そのような河道とは、前述の越流破堤の危険性を減じる河道、すなわち、洪水流が滑らかに流れ、河岸、河床の洗掘、堆積の危険性が小さく、かつ河道内災害が発生しにくい式(3)、式(4)の断面形を有する船底形河道であると言える。

今後、河岸、堤防の侵食予測が可能になれば、予測式を用いることも考えられるが、越流と侵食に対する安全性の向上のためには、まずは、式(3)、式(4)に基づく船底形断面河道づくりを積極的に進めることが、洪水氾濫を軽減する確実な治水対策である。

(2) 「浸透破堤」の危険性の小さい堤防を有する河道

洪水時、堤防が変形を起こすと浸透破堤に繋がる可能性がある。堤体の変状は極めて危険な兆候であり、変状を呈する前に変状を起こす危険性の高い場所を見つけ、事前に対策をすることが重要である。浸透流が原因となって起こる堤防の浸透破壊についても、原因となる「キッカケ」現象を如何に的確に見つけるかが、危険箇所を見出すカギとなる。浸透破壊発生時の「キッカケ」は、洪水時に堤防の裏法先に浸透水が達し、集中し堤防の裏法先に泥濘化が生ずることにあると考える。

福岡、田端は、堤防の浸透破壊を判定する条件として、浸透流の基礎方程式から式(6)に示す堤防脆弱性指標 t^* を導いた⁹⁾。

$$t^* = \frac{5kHT}{2\lambda b^2} \quad (6)$$

式(6)のそれぞれの記号を図-6に示す。ここに、 H ：堤防表法面における高水敷高からの洪水最大水位、 k ：堤体の平均透水係数、 T ：高水敷高から最大水位に上昇するまでの洪水継続時間、 λ ：空隙率、 b ：最大水位になったときの堤防の敷幅である。

式(6)は、現地堤防と模型堤防の浸透現象に対する力学的相似条件を与える式でもあることから⁹⁾、式(6)を用い、現地堤防や模型堤防で観測された浸透破堤や崩壊の事例について、 t^* の値の範囲を調べ明らかにした。現地での検討結果を図-7に示す。検討の結果、堤防破堤時の t^* は0.1以上の範囲に、また、裏法滑りや崩壊は、 t^* が0.01~0.1の範囲で起こる。また、裏法先付近からの噴砂が確認されているケースは、バラツキは大きくなるものの、0.001~0.01の範囲を中心に発生する。このように、堤防脆弱性指標 t^* により、堤防の浸透破壊危険箇所と損傷の程度が推定可能になり、 $t^*=0.01$ 以上が堤防が損傷を受ける値とみなせる。 t^* に基づくことよって、経験による判断が多かった破壊箇所の推定が、科学的に検討できるようになったのは、大いなる進展である。浸透破壊を起こす「キッカケ」となる場所を t^* で推定できると、その場所の堤防破壊機構の検討に、これまで蓄積されて

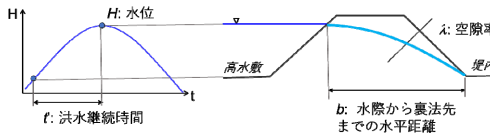


図-6 堤防脆弱性指標 t^* に用いる変数の定義

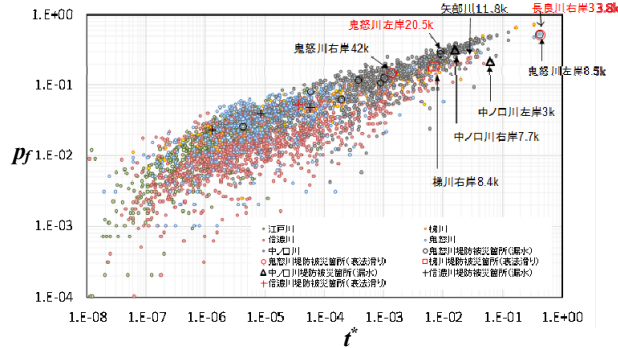


図-8 堤防脆弱性指標 t^* と破壊危険確率 P_f の関係

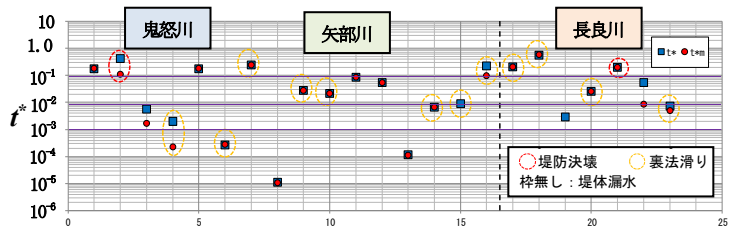


図-7 実堤防の損傷の程度と t^*

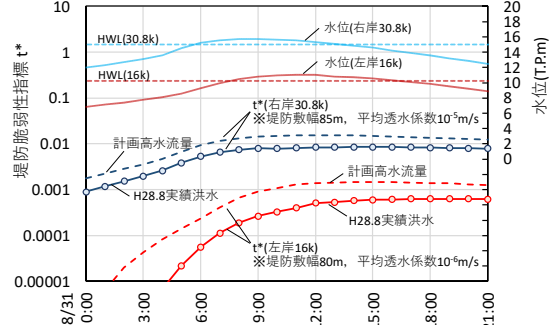


図-9 十勝川の洪水水位の時間変化に対する t^*

堤防の浸透破壊危険性

河道の安定河幅・安定水深

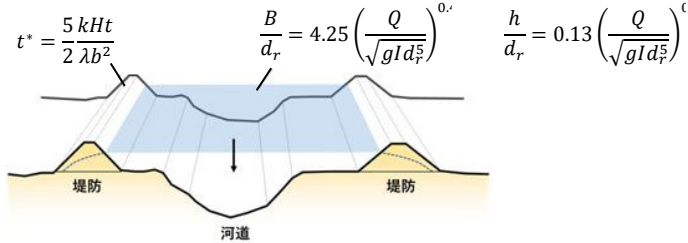


図-10 治水と環境の調和した河道計画，設計の考え方

来た地盤工学分野での変形，破壊についての技術的知見が活用できる。

以上のことから，河道と堤防の安全性を一体として扱う考え方に基づき，計画規模の大洪水 (Q, H, T) に対して，堤防の越流，洗掘，浸透破壊が起こる可能性を小さくする河道の諸元 (B, h) と堤防の諸元 (k, λ, b) は，河道断面形を表す式(3)，式(4)および式(6)から決めることになる。もちろん，これらの式は堤防，河道の一体的な計画，設計のための必要条件を与えるものであって，十分条件ではない。

堤防は種々の土質材料からなり，土質定数はばらつきを持つため，堤防のどの断面が浸透破壊するかは，不確実性が関係する。式(6)の透水係数 k には，対象とする堤防断面のボーリングデータから得られた k の平均値を用いている。田端，福岡ら¹⁰⁾は，堤体材料の不確実性を考慮した浸透破壊危険確率 P_f を求め， t^* の算定値に含まれる不確実性の程度を P_f と堤防損傷の実データを用いて評価している。 P_f と t^* の関係を調べたのが図-8である。河川堤防で発生した堤防破壊，崩壊，漏水の事例を図中にプロットしている。その結果，堤防損傷が現れる t^* の領域に近づくにつれて土質定数の不確実性に起因する P_f のばらつき幅が小さくなる傾向が見られる。堤防破壊や崩壊を示す堤防脆弱性指標 t^* の領域が $t^* > 0.01$ では，不確実性に起因する P_f と t^* の間にばらつき幅が狭くなり，

両者はほぼ線形関係にあることがわかる。これは，堤防の浸透破壊の程度を示す堤防脆弱性指標 t^* の信頼性は高いことを示している。

(3) 平成28年8月台風10号による十勝川洪水への堤防，河道の一体的設計法の適用

2(1)，(2)で示した堤防，河道の一体的設計法を平成28年8月台風10号による北海道十勝川大洪水に適用した¹¹⁾。十勝川堤防は，建設年代が新しく堤防と基盤土質データが明確で，透水係数の算定精度が高く，法勾配が5割の大きな堤防であること，そして計画高水位を長時間超える状態で洪水流が余裕高部分を流れ続け，場所によっては河川水位が堤防天端下50cmに達していたにもかかわらず，堤防が損傷を受けなかったことから，堤防，河道の一体的設計法の検討に加えて，堤防のあり方の議論にふさわしい事例であると考え検討対象河川に選んだ。

図-9は，平成28年8月洪水で計画高水位を超えた16kmと30.8kmでの水位ハイドログラフおよび計画高水流量が発生したときに起こる水位ハイドログラフに対し式(6)による両者の t^* の分布を示す。検討の結果，8月洪水では，式(3)，式(4)，及び式(6)の必要条件をいずれも満足し，堤防の被災が生じなかった結果を説明している。また現在の河道断面形で計画高水流量の洪水が発生した時には， t^* は右岸30.8kmで0.01を若干超える。これについては，

計画河道断面形が完成に近づくと水位が下がり、 t^* は確実に0.01以下に低下する。平成28年の洪水によって堤防は、堤防天端から50cm以下の水位であれば、計画高水流量が流れても浸透破堤に対する危険性は小さいことを経験している。十勝川堤防は、十分に管理された土質材料で5割の緩傾斜で堤防が作られており、法勾配3割の標準堤防断面形に比して、HWL以下の堤防断面、HWL以上の余裕高断面はともに幅広に強化されており、このことが超過洪水でも被災しなかった大きな理由であると考えられる。図-10は、十勝川河道を流れる洪水に対する河道と堤防の一体的計画、設計のための方法を模式的に示している。

河川管理施設等構造令では、堤防は計画高水位以下の水位の流水の正常な作用に対して安全な構造とすると規定されている。構造令の解説によれば、堤防余裕高は治水計画上の高さではなく構造上の高さである¹²⁾。しかし、我が国の河川は、ほとんどが完成断面形の河道が出来ていない整備途上であるために、十勝川大洪水で見られたように、水位が計画高水位を超え、洪水流が堤防余裕高部分を流れる場合が起こりうる。堤防天端を超える越流水深が大きくなると容易に越流破堤が発生する。越流が生じなくても、水位が堤防余裕高部分を流れると、余裕高部分は断面が小さいために浸透破壊の危険性が高まる。堤防余裕高は、堤内地への洪水氾濫を防ぐ役割を果たすことから危機管理の視点からも重要になる。堤防強化の際に、堤防余裕高部分を含め堤体全体を幅広で強化することは、破堤氾濫を減じ、氾濫被害を軽減するうえで極めて有効な対策になることを強調したい。

3. 結論

堤防は洪水氾濫による被害を防止・軽減する重要な施設であるにもかかわらず、どのような構造で、どこまで大きくすれば、越流破堤、浸透破堤、侵食破堤に対して安全であるかの明確な判断基準はない。本研究では、堤防と河道の一体設計の必要性を示し、洪水時の河道と堤防の有する水理的、地盤工学的的役割を的確に把握する必要性を示した。さらに、洪水時の堤防破壊のキッカケとなる条件を検討し、浸透破堤、侵食破堤、越流破堤の危険性の小さい河道と堤防の一体設計の方法を示した。すなわち、河道形状は、堤防に重大な侵食をもたらさず、越流の可能性を小さくする船底形断面とし、さらに、堤体内に発生する浸透水が裏法先に達し、泥濘化につながらないように堤防脆弱性指標が閾値($t^*=0.01$)より低い値をとる必要性を示した。

最後に、十勝川における大規模洪水に対する堤防、河道の一体的設計の妥当性とその実効性を示すとともに、氾濫被害軽減のために、現行の治水計画の中でも危機管

理対策として堤防余裕高部分を含む堤体の強化の必要性を強調した。最後に、船底形河道と堤防の緩傾斜化は、治水と環境の調和した川づくりに繋がり、今後の河川技術の革新にとって重要な課題であることを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：大規模氾濫時の被害軽減のための水害共生制度の構築に向けて—治水ストックと水防法等の発展を融合させた流域治水，法律時報 91巻 12号，pp.72-78，2019。
- 2) 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。
- 3) 福岡捷二：洪水水面観測情報の広域的・総合的活用による流域治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。
- 4) 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（招待論文），土木学会論文集F, Vol.66, pp.471-489，2010。
- 5) 福岡捷二，田端幸輔，出口桂輔：平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力、河道貯留及び河道安定性の検討，河川技術論文集，第22巻，pp.373-378，2016。
- 6) 笹木拓真，宮原 幸嗣，福岡捷二：複断面から船底形断面河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化，河川技術論文集，第20巻，pp.277-282，2014。
- 7) 樋口明彦，田浦扶充子，高尾忠志，佐藤直之，岡本良平：遠賀川直方地区緩傾斜スロープ高水敷における来場者行動特性，景観・デザイン研究論文集，Vol.3, pp.83-88，2011。
- 8) 福岡捷二，山坂昌成：なめらかな横断形状をもつ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析，土木学会論文集，第351号/II-2, pp.87-96，1984。
- 9) 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, pp.I_1435-1440，2018。
- 10) 田端幸輔，福岡捷二，瀬崎智之：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.71, No.4, pp.I_1273-I_1278，2015。
- 11) 福岡捷二，石塚宗司，田端幸輔：堤防脆弱性指標を用いた平成28年十勝川大洪水時における丘陵堤整備区間の浸透破壊に対する安全性と破堤リスク軽減に向けた今後の堤防設計の考え方，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75, No.2, pp.I_1399-I_1404，2019。
- 12) 改定 解説・河川管理施設等構造令，(財)国土開発技術研究センター編，社団法人，日本河川協会，山海堂，2000。

(2020. 4. 2受付)