

# 河道と堤防の一体的設計による破堤危険性の小さい河川を考える

河道計画・設計 治水ストック 河道断面形の式、  
堤防脆弱性指標、堤防破壊危険箇所

中央大学研究開発機構 ○福岡 捷二  
中央大学研究開発機構 田端 幸輔

## 1. 序論

人口減少、高齢化、財政不足等、社会・経済の変化は、治水事業を取巻く環境を大きく変化させ、また気候変動にともなう豪雨・洪水外力の巨大化は、大規模洪水災害発生の危険性を著しく高めている。このような状況変化の中で、堤防破壊に関する技術検討は、長年にわたり堤防断面の土質構造に着目し、土の飽和度、強度、変形を主眼に検討されてきているが、今必要なことは、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推定し、避難時間をどの程度稼げるか等、堤防管理、強化対策に活きる技術の確立である。起こりうる甚大な洪水氾濫災害を避けるためには、堤防破壊危険確率と地域の水害リスクを考慮した治水と水防を着実に実行していくことである。

現在の河道計画では、堤防と河道は独立に検討され、洪水流という外力に対し、本来あるべき両者の一体的設計がなされていない。すなわち、流下能力の観点から合理的な河道の縦・横断面形を持ち、かつ越流、侵食、浸透破壊の危険性が小さい堤防を有する合理的な河道設計を狙いとした設計法となっていない。一体的設計となっていない理由は、河道と堤防は、災害を経験として国力に合わせて、時間をかけて徐々に強化され、現在の形に造られてきた経緯があり、一気に造られたものでないためであり、重要な治水インフラの設計理念が弱いのが課題である。

気候変動に伴う洪水規模の巨大化に対応するため、行政は気候変動シミュレーションに基づく計画降雨の検討、すなわち河川の計画規模の強化の検討を始めている。それは現行の基本方針河道達成の延長上に位置付けられるものであり、現在の計画規模の河川整備が急がれる。長大な土構造物としての堤防は、歴史的に徐々に拡大強化されてきた。このため、堤防設計が経験に頼るところが多く、河道整備の遅れもあって、洪水流量の増大につれて破堤の危険性が高まってきた。堤防の変形から破壊危険箇所等を推定するのでは遅すぎ、かつ手がかかりすぎる。むしろ、堤防破壊を起こす兆候、キッカケを見つけることが重要と考える。河川堤防の危険箇所の発生は、洪水流による河道及び堤防内の水の動きから生じる。長大な堤防のどこが、どのような破堤を生ずるかを判断するには、洪水時の水の動きから破堤に繋がる「キッカケ」を捉え、また「キッカケ」を生じさせないような堤防-河道システムを作ることが重要である。

本研究は、洪水時の河道流れと堤防内の水の流れの視点から、堤防の破壊危険性の小さい河川について論ずる。なお、本文では、基礎地盤のバイピングによる破壊は検討対象としていない。

## 2. 河道と堤防を一体化した河道計画・設計・整備に向けて

ダムと河道は、治水計画の主要な課題として長年にわたり検討されてきた。近年河川における洪水水面形の時間変化の観測・解析とそれらの河道計画、管理への活用によって、これまでの河道計画の考え方、維持管理の在り方が大きく変わり、ダムと河道・堤防等の治水ストックの効果的な活用の重要性を示してきた<sup>1)2)</sup>。

近年、河川堤防の技術研究が進んできたことから、堤防等の治水ストックと堤防と河道のシステムを適切に活かし、流域全体の治水安全度の設定とそれに基づく河川整備・管理が重要となる。まずは堤防等、流域の治水施設のストックの実力を正しく評価できなければならない。

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ことの可能な河道と堤防づくりにある。堤防の役割は洪水氾濫を防ぐことである。これには、越流、洗掘、浸透による破壊危険性の小さい堤防と合理的な縦・横断面形持つ河道システムを設計できなければならない。

堤防は土で築造されていることから、堤防破壊については、地盤工学的な変形解析に基づく検討が一般的である。このような調査研究は重要であるが、堤防が変形し、破壊することによって人命・資産が損傷を受けることは、河川管理上許されることではない。堤防がどこで、どのような破壊を起こすのか、その「キッカケ」となる現象を事前に察知し、回避できるようにすることが河川管理上特に重要で、「キッカケ」を有する場所が分かってから堤防が変形し破堤に至る機構を調べればよいと考える。

堤防の破壊による洪水氾濫は、生命・財産を失わせることになり、最も避けなければならない。これまで、堤防について、その土質構造と強度、基礎地盤状況等がよくわからないことを理由に、技術検討が遅れてきた。これは、堤防の設計・管理が経験に基づくところが多いことも関係している。堤防構造とその安定性については、科学的に進められなければならない。前述したように、現在の河道計画では、河道と堤防を一体的に検討する設計法がとられていず、例えば流下能力の検討は堤防法線を与えて行う等、実態にそぐわない課題を有している。また、堤防の浸透、侵食、越流破堤の判定は個々に行われる。現在の判定法も一つの方法であるが、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。

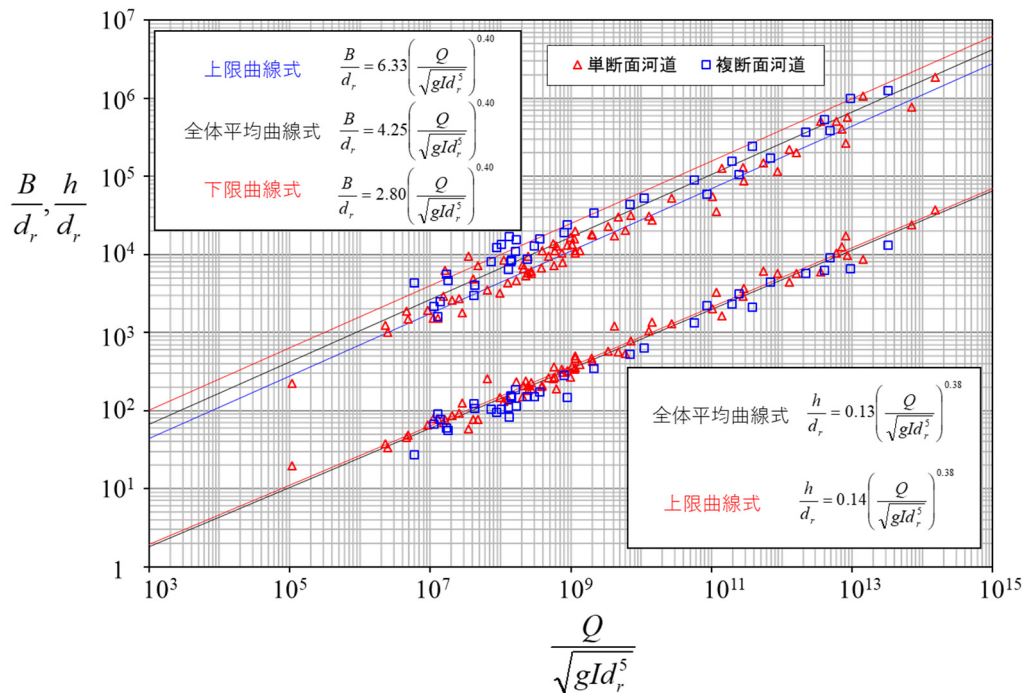


図-1 基本方針河道の無次元河道形成流量と無次元河道、無次元水深の関係

洪水時の堤防の浸食と浸透は同時に起こり、ある流量以上になると、堤防からの越流の危険性も高まることから、堤防の破壊に関わる3つの事象は、ほぼ同時に起こっていると考えるのがよいからである。

土で築造される堤防には、堤防構造を安定的に維持できる設計、管理技術が必要とされる。堤防の洗掘、越流、浸透による決壊を起こさないようにするためには、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」となる流れを出来るだけ起こさない堤防-河道システムを作ることである。すなわち、堤防決壊の「キッカケ」は洪水によって起こることから、それぞれの破堤の「キッカケ」となる水理現象を出来る限り防止することが、3つの総合的な作用による「破堤」を防ぐことになる。

## 2.1 「越流破堤」の「キッカケ」を小さくする河道

土堤防は越流には極めて弱い特性を有しており、このため基本方針河道では、計画洪水が、計画高水位以下で流れるような河道断面を考えている。しかし、超過洪水に対しても、余裕高部分の流れ、堤防天端を越えないような河道断面を造ることが出来れば、越流破堤は生じにくいことになる。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・水深の関係を、次元解析的手法を用いた<sup>2)</sup>。沖積地河川では、流下能力を超える流量が河道を流れると、土砂の移動により河道断面形は変化し断面積は広がる。このときの最大流量を、変形を受け広がった河幅の「河道形成流量」と呼ぶ。河道断面形状を規定する物理量は式(1)であらわされる。

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

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、 $\rho$ : 水の密度、 $\sigma$ : 土粒子密度である。式(1)について次元解析を行うことにより、8つの物理量は、式(2)の5つの無次元量で表現される。

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

福岡は、望ましい安定した河道断面形について、国内、国外の種々の河道特性、洪水特性を持つ多くの河川について式(2)を用いて検討した。図-1は、我が国の一級河川の直轄基準地点において計画河道を計画高水流量が流れるときの無次元計画高水流量と無次元河幅、無次元水深の関係を解析データに基づいて示す。図中には上限、平均、下限式を示す。無次元河幅については、図-1の上限式と、下限式の範囲に含まれると河幅は安定であることを示す。一方、望ましい無次元水深は、洪水流が望ましい無次元河幅の範囲内で流れ、かつ、計画高水位を越えなければ良いことから、上限式と平均式のみ示している。式(3)、(4)は、無次元河道形成流量と無次元平均水深、無次元平均水深の関係を示す。

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

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

堤防から越流させない河道の断面形は、式(3)、(4)より決める。

## 2.2 「洗掘破堤」の「キッカケ」を小さくする河道

堤防表法の洪水流による洗掘量を見積もるには、堤防表法面を構成する複雑な土の洗掘特性を知る必要があり、さらに堤防際の局所水理現象と洗掘を関係付けなければならない。複雑な流れと土質材料に対し、現在の水工学の知識で一般的に適用可能な河岸洗掘量を得ることは容易でない。もちろん、特定河川の特定河岸の洗掘深を見積もることは可能であるが、導かれた式は一般的な河岸洗掘深の評価式にはなり得ないのが実情である。しかし、上述の越流破堤に対して検討された河道断面について、船底型河道断面形を採用すれば、大きな洗掘や堆積を生じない河道断面形を維持することが明らかにされている<sup>3)</sup>。遠賀川で検討された船底型河道<sup>4)</sup>では、洪水流は断面内でよく制御され、堤防の洗掘破壊の危険性は著しく小さくなる。船底型河道断面形で、かつ、式(3)、式(4)を満足するような断面を持つ河道は、洗掘に対し安定な河道断面となる。今後、種々の土から構成されている堤防について、高精度な侵食解析が可能になれば、それをを用いることも選択肢の一つであるが、現在段階では、式(3)、式(4)により断面形を検討するのがよいと考えている。

侵食に耐え、望ましい流れをもたらす河道は、洪水流の抵抗が小さく、水面の上昇を抑制する河道であることから、上述のように、船底形河道等で、侵食破堤も越流破堤を起こさない河道の実現に向けた検討が期待される。

## 2.3 「浸透破堤」の「キッカケ」を小さくする河道

洪水時、堤防が変形すると破堤に繋がる可能性があるため堤防が変状を呈する前に、変状をきたす危険性の高い場所を見つけ、事前に対策をする必要がある。特に、浸透破壊が生ずる場合には、堤防の変形を伴うことが多い。この事実が、堤防の変形に着目する研究が多い理由である。

しかし、浸透破壊についても、堤防内の浸透流を「キッカケ」とする現象を如何に的確に表現するかが、浸透破壊危険性の高い箇所を見つけるカギとなる。堤防が変形し破堤に至る機構は重要であることは言うまでもない。浸透破壊を起こす浸透流の「キッカケ」となる場所が推定できたときに、変形・破壊の機構の蓄積はより重要性が増すことになる。

水理学的には、堤防の裏法先に浸透水が達することが浸透破壊の「キッカケ」の条件と考える。福岡、田端はこの条件に対して、堤防の浸透破壊を判定する式(5)で表現される堤防脆弱性指標  $t^*$  を見出した<sup>5)</sup>。

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

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までの洪水継続時間、 $\lambda$ ：空隙率、 $b$ ：最大水位になったときの堤防の敷幅である（図-2 参照）。

式(5)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ある<sup>5)</sup>ことから、式(5)を用い、現地堤防や模型堤防で観測された浸透破壊や、崩壊時の  $t^*$  がとる値の範囲が明らかになった。堤防決壊時の  $t^*$  は 0.1 以上の範囲にプロットされる。また、裏法滑りは、 $t^*$  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、0.001～0.1 の範囲で起こる。これにより、堤防の浸透破壊危険箇所が  $t^*$  を用いて科学的に推定することが可能になった。経験に基づく判断によることが多い堤防問題が、科学的に検討できるようになったのは、大いなる進展と考えてよい。

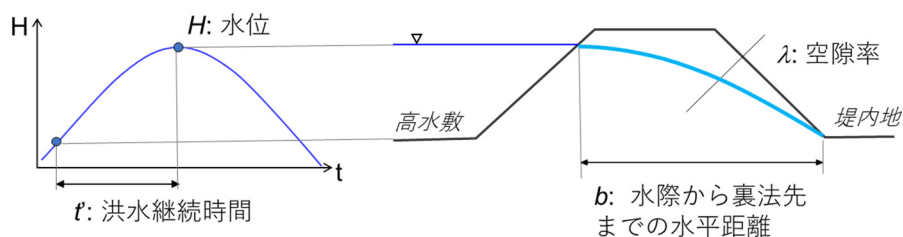


図-2 堤防脆弱性指標  $t^*$  に用いる変数の定義

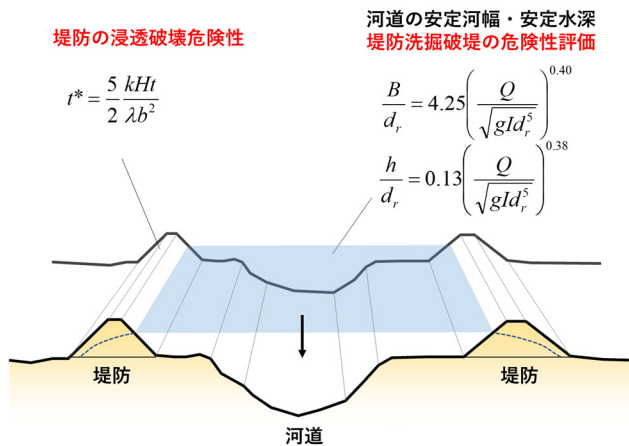


図-3 河道計画，設計の基本的考え方

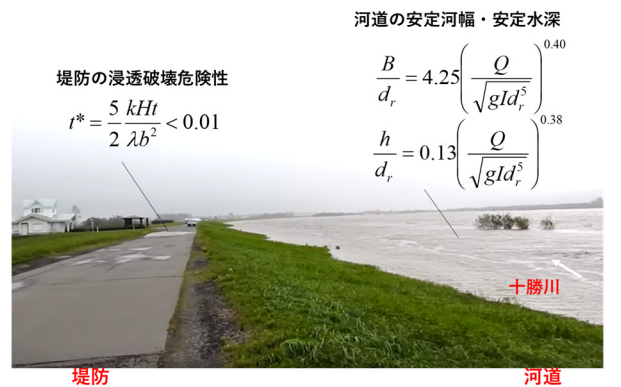


図-4 十勝川での堤防浸透破壊危険性，河道安定性の検討

以上のことから 大規模洪水によって、越流，洗掘，浸透破堤の起こらない河道と堤防は，図-3，図-4 に示すように，大洪水( $Q, H, t$ )が，堤防( $k, \lambda, b$ )を有する河道( $B, h$ )で起こったときに，福岡の安定な河道断面式(式(3)と式(4))及び脆弱性指標  $t^*$ (式(5))の閾値の両方を同時に満たすように決められる。河道と堤防を一体とする考え方が，平成 28 年 8 月の北海道を襲った台風による十勝川大洪水時の河道と堤防に適用された。その結果，長時間に及ぶ計画高水位を超える洪水が，式(3)，式(4)，及び式(5)を満足していることが明らかにされた<sup>9)</sup>。

### 3. 結論

土の堤防はどのような材料を用いてどこまで大きくすれば，越流破堤，浸透破壊，侵食破壊に対して安全であるかの明確な判断基準はなかった。これは一つに，河道の設計と堤防の設計は，本来一体的に行われるべきものが長年にわたり別々に行われてきたことに関係する。洪水時，堤防が変形すると破堤に繋がり，大災害が発生する可能性が大きい。したがって，堤防が変状を呈する前に，危険性の高い場所を見つけ，事前に対策をする必要がある。それには，堤防破壊のキッカケとなる洪水時の流れを如何に適切に捉えるかが重要であることを示し，両者を一体的に考えた判断基準を検討した。

一体的設計にあつては，河道は，大洪水流量を HWL 以下で流す流下能力を持ち，堤防に重大な侵食をもたらさないこと（耐越水）（耐侵食），さらに，洪水流により堤体内を進む浸透水が，いつ裏法先に達したかを算定でき，堤防脆弱性指標の閾値 ( $t^*=0.01$ ) より低い値をとること（耐浸透）を満足する河道－堤防システムでなければならない。

この河道計画の基本となる浸透，侵食破壊等の重要な課題に対し，河道の構造，堤防の構造・土質等が明確な十勝川の計画規模の大規模洪水に対して，河道流下能力に関する福岡の式と堤防脆弱性指標  $t^*$ を用い評価を行い，両者が安全であることが実証された。

### 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利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・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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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-SFn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.
- 6) 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, 2019.