

堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と地形，土質構成に基づく堤防のり先での漏水形態の推定法

佐藤 豊¹・福岡捷二²

¹正会員 工博 株式会社 キタック (〒950-0965 新潟県新潟市中央区新光町10番地2)
E-mail:satoh_yt@kitac.co.jp (Corresponding Author)

²フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

本研究は、千曲川、梯川堤防で発生している堤防基盤漏水について、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と堤防裏法先の土質特性を用いて検討した。漏水発生範囲は、裏法付近の水の集中度を表す t_b^* が、 $t_b^* = 0.30 \sim 1.40$ 、噴砂発生範囲は $t_b^* = 1.40$ 以上で、裏法尻付近の基礎地盤土質の層厚、粒径特性に応じて漏水、噴砂が発生することを示した。 $t_b^* = 0.30$ より小さい値の範囲では、広域地下水型、常襲型の漏水発生が見られ、これらは t_b^* と地形、裏法先での土質特性から漏水形態を区分できることを示した。さらに、堤防弱点箇所抽出のために、堤防脆弱性指標 t^* と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の関係図を作成することで、堤体漏水、基盤漏水またはその両方が一緒になった漏水による弱点箇所であるかを判定できることを示した。

Key Words: foundation vulnerability index t_b^* , levee vulnerability index t^* , soil characteristics of levee foundation ground, landform classification

1. はじめに

堤防の浸透に対する弱点箇所の抽出手法として福岡ら¹⁾によって導かれた堤防脆弱性指標 t^* は、堤体に浸透した河川水が横断面勾配を形成し、裏法尻に向い水の集中により堤防裏法尻の泥濘化を促進し、漏水形態を判定し、堤防破壊の可能性を示す指標である。この指標は、また、現地堤防と模型堤防について浸透流の力学的相似条件を与え、模型を用いて堤防の破壊検討に用いることができる。これに対して、堤防基盤の漏水による破壊事例も見られるが、基礎地盤の複雑さなどから力学的指標については明らかにされていない。

本研究では、堤防基盤からの漏水、噴砂を判断する力学指標 t_b^* を堤防脆弱性指標 t^* に準じて導き、千曲川、梯川堤防の基盤漏水、噴砂データに対し、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* がどのような範囲の値をとるか、堤防裏法尻付近の層厚や砂層の粒度特性等の土質特性との関係はどうかについて検討した。さらに、堤防の破壊には、堤体浸透と基礎地盤浸透の両者の脆弱性が関係している場合が多いことから、本文では浸透による堤防被災形態と t^* 、 t_b^* の関連性も検討する。

2. 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の考え方

堤防裏法先への水の浸透集中による浸透破壊の危険性を評価する堤防脆弱性指標 t^* は、浸透流の支配方程式の Richards 式を無次元化して導かれた唯一の無次元浸透流ナンバー SF_n から、堤防脆弱性指標 t^* を導き、模型実験や現地堤防の被災箇所適用することによって、堤防損傷の程度を与える t^* の値の範囲が決められ、堤防危険箇所の推定に使われている¹⁾。

Richards 式で体積含水率を飽和度と間隙率で表現すると式(1)が導かれる。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \lambda S_r}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 S_r : 飽和度、 λ : 間隙率、 k : 透水係数、 h : 全水頭 ($=\Psi+z$)、 Ψ : 圧力水頭、 z : 位置水頭である。

福岡ら¹⁾は、現象を支配する基礎方程式を無次元化し、無次元基礎方程式が原型と模型で同じとなる時、両者の間に力学的相似条件が成立することに着目し、式(1)の各変数を、式(2)の代表値を用いて無次元化し、式(3)を導いた。

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad S_r' = \frac{S_r}{S_{r0}}, \quad \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad h' = \frac{h}{H_0} \\ t' = \frac{t}{T_0}, \quad k' = \frac{k}{k_0}, \quad x' = \frac{x}{L_0}, \quad y' = \frac{y}{L_0}, \quad z' = \frac{z}{L_0} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho' \lambda' S_r'}{\partial t'} + \frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2}$$

$$\left\{ -\frac{\partial}{\partial x'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) - \frac{\partial}{\partial y'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial z'} \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

ここに、'は無次元量であり、下付き 0 の量は各代表量である。式(3)の第 2 項の無次元数が原型と模型で同一の値を持つとき、両者は同一の方程式となることから、浸透流の力学相似条件で示す重要な量として、式(4)を導き、浸透流ナンバー SF_n と呼んだ。

$$SF_n = \frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2} \quad (4)$$

浸透流ナンバー SF_n は、 $S_{r0} \lambda_0 L_0^2 / k_0 H_0$ と T_0 の 2 つの時間の比で表されており、前者は、浸透流の実質流速 $k_0 H_0 / S_{r0} \lambda_0 L_0$ によって代表水平長さ L_0 を移動するに要する時間を表し、 T_0 は浸透流の代表時間を示す。

浸透流ナンバー SF_n を堤防浸透流に対する力学指標に書き換えるために代表諸量を選ぶ。

洪水流による堤防浸透流にあっては、代表水位 H_0 は洪水流の水位 H 、代表長さ L_0 は堤防の敷幅 b 、代表時間 T_0 は高水敷に洪水流が乗っている時間 t である。この時浸透流ナンバーは、堤防内の浸透流による堤防破壊指標である堤防脆弱性指標 t^* と呼び、式(5)として表している。

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

ここに、 H ：堤防表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、 λ ：間隙率、 b ：洪水のときの堤防の敷幅である。

同様に堤防基盤の浸透流についても Richards 式が成立することから、基盤浸透流の唯一の無次元数は SF_n である。図-1 の堤防基盤の諸元を SF_n に代入すると式(6)が得られ、これを堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と呼ぶ。

$$t_b^* = \frac{5 (H+D) k T}{2 \lambda L^2} \quad (6)$$

ここに、 H ：堤防裏法尻からの洪水最大水位、 D ：堤防裏法尻から基礎地盤透水層までの厚さ、 k ：基礎地盤透水層の代表透水係数、 T ：高水継続時間、 λ ：間隙率、 L ：表法先から裏法先までの水平距離で与えられる。

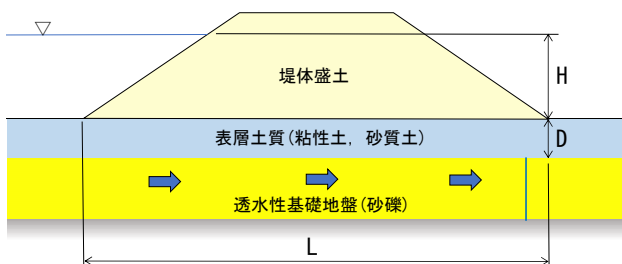


図-1 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の考え方

3. 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と地形、表層土質特性と漏水形態の関係

千曲川では、図-2 に示すように千曲川扇状地から戸狩狭窄部までの約 72 km 区間で、約 80 箇所の漏水が発生している。このうち、地質データが把握されている無被害箇所と漏水、噴砂発生箇所について堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を求めた。図-3 には、代表箇所の地質断面図から堤防裏法尻付近の土質構成を 4 区分し (図-4)、河川流下方向に t_b^* をプロットした。同図には地形と漏水形態との関係性を把握するため、狭窄部、盆地、扇状地の区間を記入した。

(1) t_b^* と漏水、噴砂の発生現象

図-3 から、漏水発生は、 $t_b^* = 0.30 \sim 1.40$ の範囲にあり、噴砂は $t_b^* = 1.40$ 以上の範囲で発生する。堤防脆弱性指標 t^* と同様に t_b^* の値の大きさに応じて漏水、噴砂の可能性を表している。噴砂発生の裏法尻付近の土質構成は、粘土、砂、砂礫の土質構成① (図-4) で発生していること、これらの範囲には、無被害箇所も多数存在していることから、漏水、噴砂発生には、裏法尻付近の土質特性や地形等が影響すると考えられる。

$t_b^* = 0.07 \sim 0.30$ の範囲では、広域地下水型 (河川水の浸透だけでなく、支川、扇状地などからの伏流水等の浸透の影響を受けた基盤漏水) の漏水や常襲型 (過去の洪

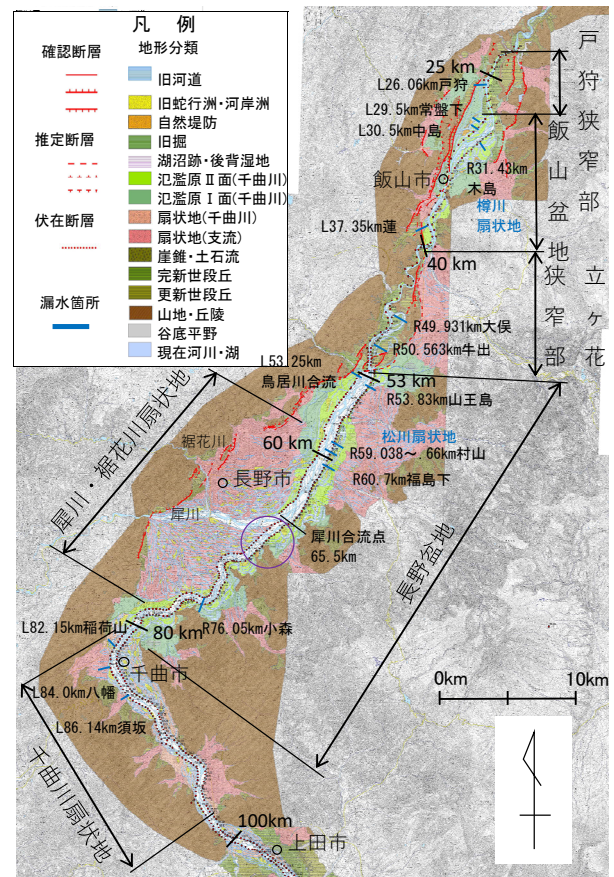


図-2 千曲川の堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の検討区間

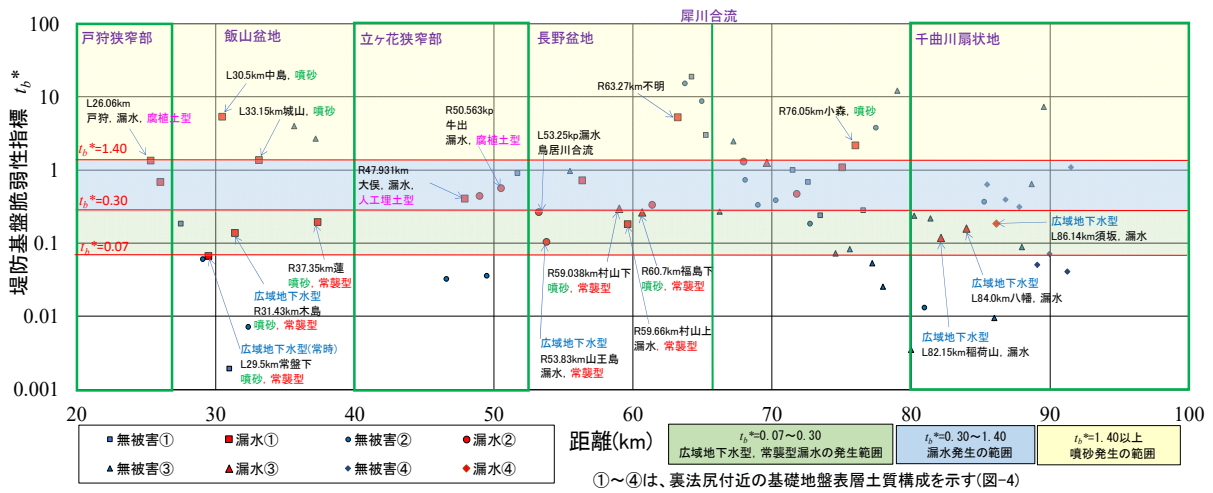


図-3 千曲川の地形と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* , 漏水形態, 基盤表層土質構成 (図-4 の①~④) の関係

土質構成①		土質構成②		土質構成③		土質構成④(扇状地)	
粘土	表層土質の層厚 D	粘土	表層土質の層厚 D	砂	表層土質の層厚 D	砂礫	表層土質無し
砂		砂礫					
砂礫		砂礫					

図-4 裏法尻付近の基盤表層土質構成区分

水で発生した箇所と同じ箇所でも発生する漏水) の漏水が分布する。これらの漏水は河川水位だけでなく、背後の地下水の影響や過去の洪水によってパイピング破壊が進行するなど小さい t_b^* 値で漏水が発生する。以下に t_b^* と地形, 表層土質特性との関係を検討する。

(2) t_b^* と地形分類の関係

a) 扇状地

図-3 から, 千曲川扇状地では, 広域地下水型の漏水のみの発生であり, 先に示した t_b^* の範囲で漏水, 噴砂の発生は確認されていない。扇状地は透水係数の大きい砂礫層が広く分布し, 一般的な扇状地面 (堤防地盤面) は河道部分よりも高い位置にある。このことから, 河川水位の増水に対して裏法尻への水の集中は存在しても漏水の発生にはなりにくい。上野ら²⁾の透水係数の大きい碎石を基礎地盤に用いた室内模型実験からも漏水の発生のみで噴砂が発生しないことが確認されている。犀川合流付近も犀川扇状地が千曲川に押し寄せた地形で漏水が発生していない (図-2 の丸の部分)。

b) 狭窄部 (人工埋土型漏水, 腐植土堆積型漏水)

図-3 の戸狩狭窄部, 立ヶ花狭窄部では人工埋土型, 腐植物堆積型の漏水発生が多い。人工埋土型漏水は, 一例として, 立ヶ花狭窄部の大俣地区に分布する旧河道 (図-2) では, 明治初期の川掘工事によって, 旧河道を人工的に埋め立てた部分で, 重機によって締固め管理された埋土ではないため, 埋土が粘性土であっても埋土塊の隙間を浸透して漏水が発生する。腐植土堆積型漏水は,

狭窄部が形成された地盤の隆起によって, 旧河道が三日月湖状に残存し, 植生の繁茂によって腐植土が堆積したところで見られる。腐植土堆積型の漏水は, 小貝川でもみられ³⁾, 鬼怒川との合流付近の後背湿地で発生している。狭窄部で発生する漏水は, 堤防基盤脆弱性指標 $t_b^* = 0.30$ 以上であり, R26.06 km 戸狩地区では $t_b^* = 1.4$ と噴砂範囲付近で, 噴砂発生を表層土質構成①であるが漏水のみの発生である。図-5 には千曲川における基盤表層土質の層厚 D' (図-4 の表層土質構成①は粘性土の厚さとする) と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の関係を示したが, 腐植土堆積型漏水や人工埋土型漏水では, 表層土質の層厚が 4 m 以上でも漏水は発生している。それ以外の漏水は, 層厚 3 m 以下で発生している。狭窄部の人工埋土型や腐植土堆積型の漏水は, $t_b^* = 0.30$ 以上で漏水のみが発生し, 表層土質の層厚 3 m 以上でも発生する。

c) 支川合流箇所 (広域地下水型漏水, 常襲型漏水)

広域地下水型漏水は, 図-3 の堤防基盤脆弱性指標 $t_b^* = 0.07 \sim 0.30$ で発生している。広域地下水型漏水は, 河川水の浸透だけでなく, 支川, 扇状地などからの地下水

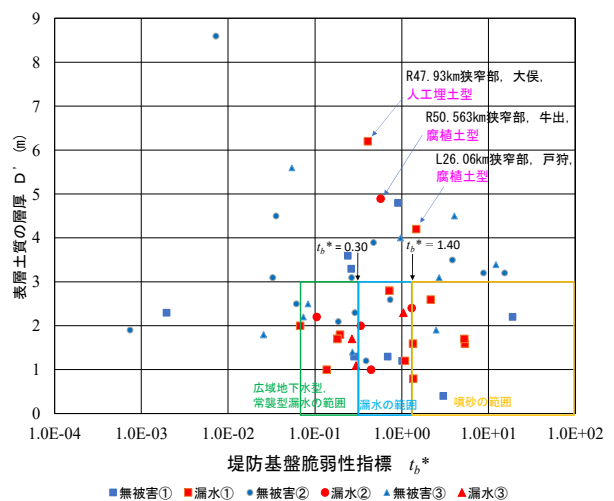


図-5 千曲川における基盤表層土質の層厚 D' と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の関係

の影響を受けて発生するため、漏水、噴砂の発生範囲より小さい範囲の t_b^* で発生する。図-2 の千曲川扇状地で発生する広域地下水型漏水は、支川扇状地を形成する支川の合流付近で発生している。漏水発生時の t_b^* は、支川扇状地の大きさ（支川の流域）に応じ、大きいものほど低い値をとる。30～50 km 付近で発生している広域地下水型漏水は、樽川、鳥居川、松川の合流点付近で発生している。これらの漏水発生は、 t_b^* 値が小さいと常時の湧水が見られ（常盤下地区）、 t_b^* 値が大きいと季節的な湧水が見られ（木島地区）⁴⁾、洪水時は支川合流部の漏水（鳥居川合流）となる。このように広域地下水型漏水の t_b^* の値は、背後の支川の流域の大きさや湧水発生状況に影響される。広域地下水型漏水の対策は、河川水の浸透対策だけでは十分でなく、対策後も同じ箇所でも漏水が発生することが多い（常襲型漏水）⁵⁾。

(3) t_b^* と堤防裏法先周辺の基盤表層土質構成の関係

漏水は、堤防基盤脆弱性指標が $t_b^* = 0.30 \sim 1.40$ の範囲で、図-5 から、堤防基盤の表層土質層厚 3 m 以下で発生している。図-4 の裏法尻付近の土質構成でみると、①、②、③のいずれの土質構成でも発生し、表層土質構成に関係せずどこでも発生する可能性が高い。噴砂発生は、細粒分含有率が少なく、粒径均一な砂で発生しやすいことが確認されている⁶⁾。このような研究結果を受けて図-6 には堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と 60% 粒径の関係、図-7 には t_b^* と均等係数 (D_{60}/D_{20} とする) の関係、図-8 には t_b^* と細粒分含有率 FC の関係をプロットしている。これらの図に、梯川の堤防で噴砂発生時の白江地区、すべり発生時の古府地区の 8.4 km、多量の噴砂の発生による堤防天端亀裂の古府地区 8.6 km の t_b^* 、土質特性値もプロットしている。噴砂発生は $t_b^* = 1.40$ 以上の範囲でかつ、基礎地盤の表層土質構成が上位から粘土、砂、砂礫の構成①が多い。梯川堤防の白江地区は土質構成③である。

漏水発生範囲 $t_b^* = 0.30 \sim 1.40$ においては、60% 粒径、均等係数、細粒分含有率は、 $t_b^* = 0.30$ 以下、 $t_b^* = 1.40$ 以上の範囲に比べバラツキが大きい。噴砂発生範囲の $t_b^* = 1.40$ 以上のデータは、60% 粒径が 0.33～0.59 mm、均等係数は 5 以下、細粒分含有率 20% 以下で他の t_b^* の範囲と比べ分布範囲は小さい。これに対して、常襲型漏水範囲 $t_b^* = 0.07 \sim 0.30$ での 60% 粒径と均等係数のデータは、噴砂発生時のデータ分布範囲よりも大きい。漏水発生時の表層土質の粒度は、幅広く、漏水によって細粒分が流出し、細粒分が少ない均一な粒子で噴砂が発生すると考えられる。さらに細粒分の流出によるパイピング等が進行していき、常襲化すると、 $t_b^* = 0.30$ 以下で粒径が大きい砂や細粒分含有率の多い砂も噴出すると考えられる。すべり破壊が発生した梯川堤防の古府地区 8.4 km と天端亀裂で留まった古府地区 8.6 km での t_b^* は、 $t_b^* = 8$ 以

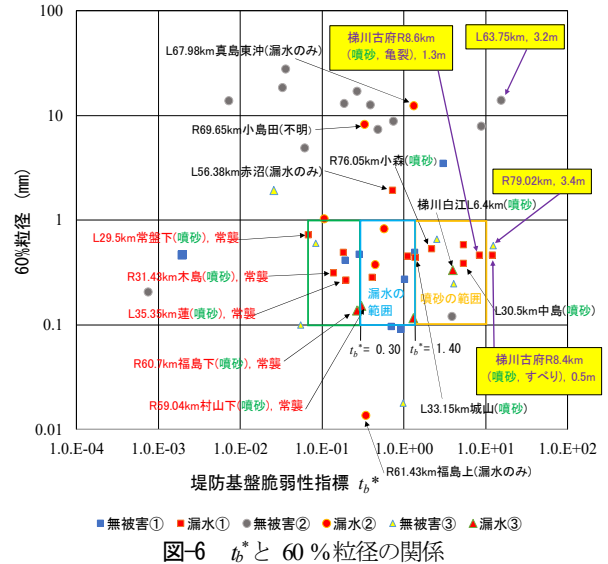


図-6 t_b^* と 60% 粒径の関係

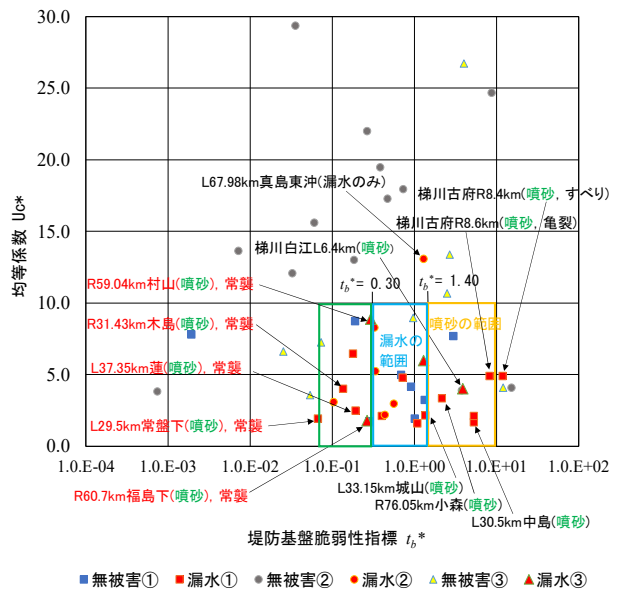


図-7 t_b^* と均等係数 U_c^* (D_{60}/D_{20}) の関係

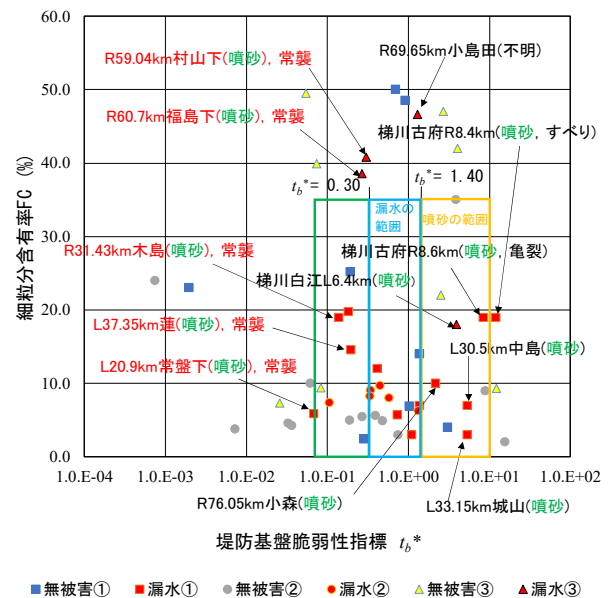


図-8 t_b^* と細粒分含有率 FC の関係

この土質構造では堤防脆弱性指標 t^* の影響を強く受けた被災形態になると考えられる。梯川古府地区は、堤防脆弱性指標 t^* は漏水～噴砂の範囲であるが、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* が大きく、基盤浸透の影響を受けた噴砂、すべりが発生している。

図の楕円で囲まれた漏水は、大きく下側に分布することから、堤体浸透の影響が極めて小さい基盤漏水で、狭窄部の人工埋土型漏水、腐植土堆積型漏水で旧河道での漏水が多い。矢部川 R7.3 km も旧河道でこの範囲にあると考えられる。

赤色四角点線で囲まれた漏水は、プロット範囲の中央付近に位置しており、堤体漏水および基盤漏水の両方が発生している。

以上から、堤防脆弱性指標 t^* と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の関係図を整理することで堤体漏水か基盤漏水、または両方の合いまった漏水であるかを判断できる。堤体浸透の影響が大きい場合、築堤履歴と透水係数等の詳細調査が必要であり、基盤浸透の影響が大きい場合、裏のり尻付近の表層土質構成の詳細調査が必要である。また、旧河道では、 t^* 、 t_b^* の値とともに、文献等や地質データを調べ、人工埋土型、腐植土堆積型の漏水であるかを確認する必要がある。

5. まとめ

本研究では、最初に堤防基盤からの漏水、噴砂の発生に密接に関係する堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を導き、これと地形、堤防基盤土質特性の関係について論じている。千曲川、梯川堤防の漏水、噴砂事例から、基盤の漏水、噴砂、すべりは t_b^* の異なる大きさに生じること、また、堤防裏法尻付近の土質構成、層厚がどのように影響するかを示した。堤防弱点箇所抽出にあたっては、堤体自身および堤体の基礎地盤の両面からの検討が必要である

ことを示し、堤防脆弱性指標 t^* と堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の間の関係図を作成することで漏水、噴砂形態等を把握することができることを示した。これに加えて、法先周辺の地盤特性を知ることは危険性の理解を高め、発生要因に応じた適切な対策の施工や効率的な堤防維持管理にも寄与できるものとする。

参考文献

- 1) 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- I_1440, 2018.
- 2) 上野俊幸, 笹岡信吾, 森啓年, 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義雄: 模型実験に基づいた河川堤防のパイピング発達に係る土質条件の分布, 河川技術論文集 第23巻, pp.405-410, 2017.
- 3) 関東地方整備局: 利根川百年史, 1004p, 1989.
- 4) 佐藤豊, 大淵貴, 上野優, 福岡捷二: 河川堤防の基盤漏水発生箇所と旧河道の関係, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.17-20, 2017.
- 5) 佐藤豊, 福岡捷二: 千曲川旧河道の形成過程と土砂の堆積構造, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_295- I_300, 2020.
- 6) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二: 梯川における基盤漏水が発生する地形・地質及びパイピングによる堤防破壊, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, I_1237- I_12420, 2018.
- 7) 国土交通省関東地方整備局: 第4回鬼怒川堤防調査委員会資料, pp.4-8, 2016.
- 8) 田端幸輔, 福岡捷二, 内堀寿美男, 上村勇太: 脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究-鬼怒川中下流部平成27年9月大洪水を例として-, 河川技術論文集, 第23巻, pp.387-392, 2017.

(Received June 30, 2021)
(Accepted September 3, 2021)

PREDICTION METHOD OF LEAKAGE AND SAND BOILING BASED ON THE LEVEE FOUNDATION VULNERABILITY INDEX t_b^* , AND SOIL CHARACTERISTICS AT THE TOE OF LANDSIDE LEVEE

Yutaka SATOH and Shoji FUKUOKA

This paper classified the levee foundation leakages in the Chikuma River and the Kakehashi River using the levee foundation vulnerability index t_b^* and soil characteristics of the toe of landside levee. We found: 1) underground leakages occur when $0.3 \leq t_b^* \leq 1.4$; 2) sand boilings occur when $t_b^* \geq 1.4$; 3) boilings and sliding failures following a sand boiling occur depending on the thickness and grain size of the levee foundation soil layer at the toe of landside levee; and 4) a leakage causing from the regional underground water in the alluvial fan and tributaries and a leakage seen frequently during floods occur when $t_b^* < 0.3$.