

堤防基盤漏水指標 t_b^* と堤防基盤特性に基づく漏水、噴砂の発生位置の推定

堤防基盤漏水指標, 堤防基盤特性, 漏水, 噴砂

キタック 正会員 佐藤 豊
中央大学 フェロー 福岡捷二

1. はじめに

基盤漏水, 噴砂に対する研究は, 主に地盤工学の分野で模型実験を中心に行われ, 堤防変形, 破壊機構と関係して行われているものが多い. 洪水が基礎地盤に浸透し, 堤防裏のり尻のどの部分に浸透水が集中し, 泥濁化を起こしやすいか浸透流の力学と地盤特性の両面からの研究はほとんどない. 福岡, 田端¹⁾は, 河川水が堤体に浸透し水面勾配を形成し, 堤防裏のり尻での水の集中によって泥濁化が促進されると考え, 堤防の浸透破壊箇所の推定のために, 堤防脆弱性指標 t^* を提示している. この指標は, 現地堤防, 模型堤防との浸透について力学的相似条件を与え, 堤防実験, 現地堤防の浸透破壊位置の推定に有効であることを示している. 基盤の浸透破壊機構は, 堤体に比してより複雑なため, 危険箇所の判定に資する力学指標が必要とされている.

本研究では, 堤防脆弱性指標 t^* に準じて導いた堤防基盤からの漏水, 噴砂に対する力学指標 t_b^* を, 千曲川, 梯川堤防での基盤漏水, 噴砂発生事象に適用する. そして, t_b^* を主要な力学指標とし, これに地盤特性と関係づけて漏水, 噴砂発生箇所の推定を行う.

2. 堤防基盤漏水指標 t_b^* の考え方

堤体浸透による堤防裏法先への水の集中の程度を評価する手法として用いられる堤防脆弱性指標 t^* は, 一般的な浸透流の支配方程式であるRichardsの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 SFn を, 堤防浸透流に適用し, 堤防の浸透破壊危険性を表現する指標である¹⁾. 堤防脆弱性指標 t^* を模型実験や現地堤防に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. ここでは浸透流に対する式(1)の浸透流ナンバー SFn の一般性, 普遍性から, 堤防下の基礎地盤浸透流の浸透のしやすさの指標について式(2)を準用し, 式(3)の堤防基盤漏水指標 t_b^* を得る. 式中に用いる各物理量は図-1に示す. 基礎地盤構造の平均透水係数は, 基礎地盤が水平堆積しているものと考え, 層厚比の重み付き平均で設定²⁾するが, 長野盆地では砂礫が厚く分布しているため, 砂礫層の値をそのまま用いる.

浸透流ナンバー SFn

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

ここに, k_0 :代表透水係数, H_0 :代表水位, T_0 :浸透流の代表時間, S_{r0} :代表飽和度, λ_0 :代表空隙率, L_0 :代表長さを表す.

浸透に対する堤防脆弱性指標 t^* は式(2)で表現される.

$$t^* = \frac{8 H k t'}{3 \lambda b^2} \quad (2)$$

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, λ :空隙率, b :最大水位になったときの堤防の敷幅である.

堤防基盤漏水指標 t_b^*

$$t_b^* = \frac{8 H k T}{3 \lambda L^2} \quad (3)$$

ここに, 図-1に示すとおり, H :堤防裏法尻からの洪水最大水位, k :基礎地盤の平均透水係数, T :高水継続時間, λ :空隙率, L :表法先から裏法先までの水平距離で与えられる.

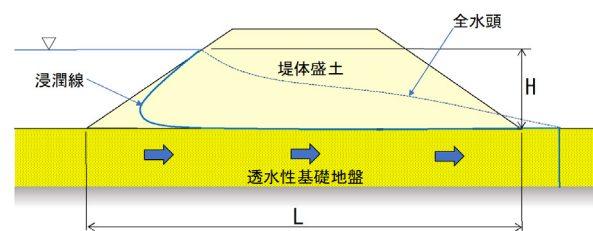


図-1 堤防基盤漏水指標 t_b^* の考え方

3. 堤防基盤漏水指標 t_b^* と現地堤防の漏水状況

図-2は, 千曲川の堤防基盤から漏水, 噴砂発生が見られた河川区間を示す. 千曲川の代表断面で求めた堤防基盤漏水指標 t_b^* の検討結果を図-3に示す. 漏水, 噴砂の発生についてみると, 漏水発生の範囲は $t_b^*=0.20 \sim 1.20$ の範囲にあり, 噴砂発生は $t_b^*=1.20$ 以上の範囲にある. 噴砂発生箇所の基礎地盤の表層土質構成をみると, 上位から粘土, 砂, 砂礫の土質構成(図-4の土質構成①)であり, 粒径等の地盤工学上の特性も考慮する必要がある.

丘陵からの広域地下水の影響を受けた漏水, 常襲型漏水は, $t_b^*=0.03 \sim 0.20$ の範囲で発生している. 常襲型漏水は, 過去の洪水で発生した漏水と同様の箇所(地形分類)

Occurrence prediction of leakage and sand boiling based on the vulnerability index and soil characteristics of levee foundation ground.

Y. Satoh (KITAC CO., LTD)
and S. Fukuoka (Chuo University)

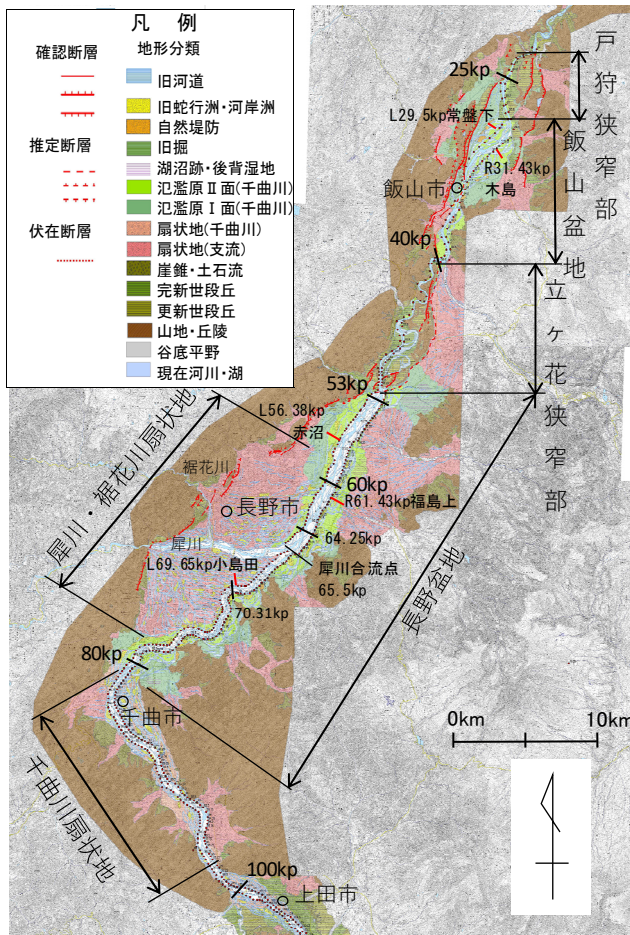


図-2 堤防基盤漏水指標 t_b^* の検討区間

で発生する漏水で2回以上発生したものを示す。これらは、漏水の繰り返しによる進行性や、広域地下水のため低い河川水位で漏水が発生する。このことは、通常の漏水、噴砂の発生 t_b^* よりも低い範囲に発生していることがわかる。さらに、広域地下水の影響を受けた漏水、常襲型漏水箇所での発生範囲をみると、左岸29.5kp(常盤下地区)で最

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	砂 粘土 表層土質の層厚	砂 表層土質の層厚	砂礫 表層土質無し k: 透水係数
砂 k: 透水係数	砂礫 砂礫 k: 透水係数	砂礫 k: 透水係数	

図-4 裏のり尻付近の土質構成

も小さい t_b^* 値を示している。当該箇所は周辺からの広域地下水の影響を受けた漏水であり、現地調査から、常時において水路から湧水が確認され、融雪期には特に多量の湧水が確認される箇所である。同じく広域地下水の影響を受ける右岸31.43kp(木島地区)でも t_b^* は小さく、常時においては湧水の発生はないが融雪期に湧水を確認している。このように広域地下水の影響や、常襲型の漏水箇所での t_b^* の範囲は、小さい値ほど地下水の影響、特に繰返しの影響を受けていると考えられる。

64.25kp~70.31kp間(図-3の赤枠の区間)では、 $t_b^*=0.20$ 以上で漏水、噴砂の発生範囲にあるが、現地堤防では発生は見られない。当該区間では昭和60年以前に漏水が発生したが、その後、堤防整備が行われ、近年の洪水ではこの区間では漏水が発生していない。また、平成18年7月出水では犀川合流から下流側ではH.W.L.に近い洪水であったのに対し、当該区間は、川幅が千曲川で最大の1.1kmとなることから、河川水位はH.W.L.-1.5m程度であった。右岸65.27kpの堤防基盤漏水指標は $t_b^*=1.7$ と噴砂発生範囲であるが、H.W.L.-1.5mで求めると $t_b^*=0.98$ となり漏水の範囲内となり、現地状況と一致する。64.25kp~70.31kp間は、犀川扇状地が東側の山地に押し出しており、砂礫の粒径が千曲川扇状地と同程度か大きい値を示している。上野、笹岡ら³⁾が行った堤防模型実験では、基礎地盤に透水係数が大きい碎石層を設けたケースでは、漏水はあっても噴砂が発生しないことが示されており、他の河川でもさらに検討が必要である。

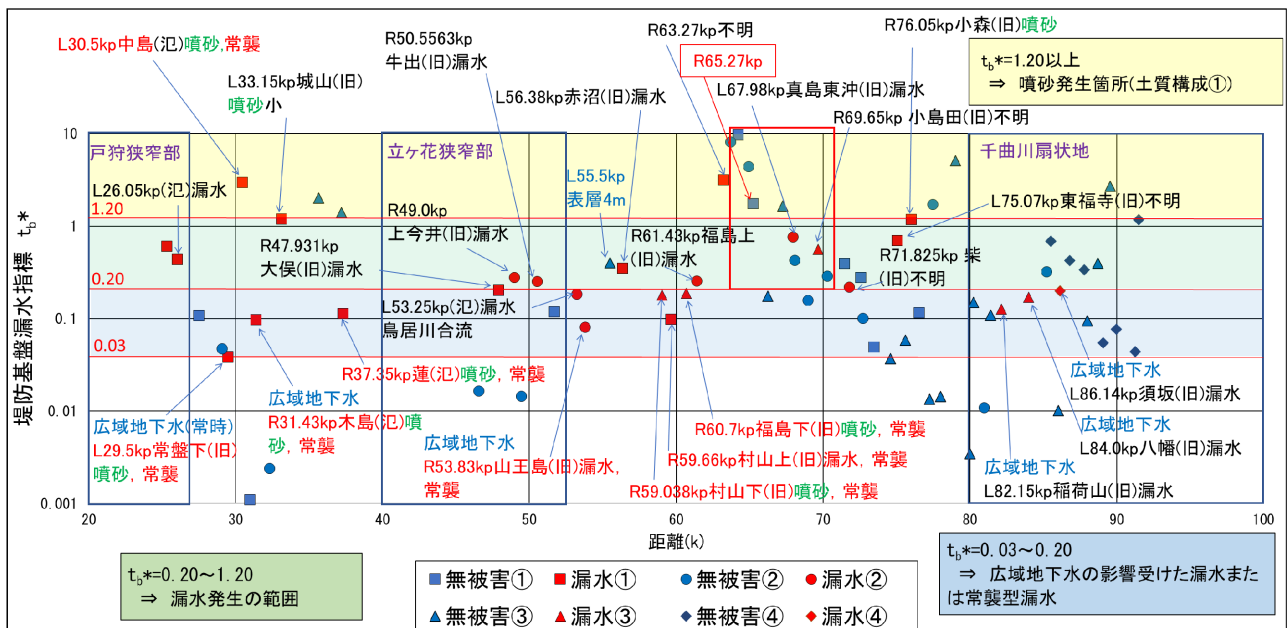


図-3 千曲川20kp~100kp区間での堤防基盤漏水指標 t_b^* と漏水の有無(凡例の丸数字は、図-4の土質構成を示す)

4. 堤防基盤特性にもとづく漏水、噴砂との関係

堤防基盤漏水指標 t_b^* は、物理的には堤防裏のり尻付近の水の集中の程度を表現するものであり、図-3から、 t_b^* の大きさによって、漏水、噴砂現象を概略区分できると考えられる。噴砂が発生する表層土質構成は、上位から粘土、砂、砂礫の土質構成であり、裏のり尻付近の浸透水の集中によって、地盤中の水圧と表層土質の重量のバランスが崩れ(盤ぶくれ)、漏水、噴砂が発生する可能性が高くなる。この時、基礎地盤の透水係数の異なる砂層と砂礫層の間の浸透力により、土粒子の移動が起こり、漏水とともに噴砂が発生する場合も起こり得る。さらに、盤ぶくれが発生し、裏のり尻付近への浸透水が集中することにより、砂層はせん断強さを失い、漏水とともに噴砂が発生する。砂のせん断強さは、粒度組成に影響する。細粒分が多くなると粒子間の粘着力が大きくなり、粒子が大きくなると粒子のかみ合わせによる抵抗が大きくなる。

このように堤防破壊は、浸透による裏のり尻付近の水の集中に加えて、抵抗する堤防基盤の地盤特性が影響する。ここでは、堤防基盤漏水指標 t_b^* と漏水、噴砂に影響する地盤特性との関係について以下で検討を行なう。

(1) 漏水と堤防基盤特性の関係

堤防基盤漏水指標 t_b^* は、物理的には堤防裏のり尻付近での漏水による地盤の泥濘化の程度を表現するものであるが、式(3)には、基礎透水層の層厚や粒径等が明示的に含まれていない。図-5に示すように基盤透水層の層厚と透水係数の間には、表層土質の層厚が3m以下で基盤層の透水係数が $10^{-4}m/s$ 以上で漏水の発生がみられる。千曲川では、透水係数 $10^{-5}m/s$ オーダーで表層の層厚が2m以下で漏水が発生している。狭窄部区間は、人工埋土や腐植土による特異な漏水タイプであることから4m以上の層厚でも漏水が発生している。

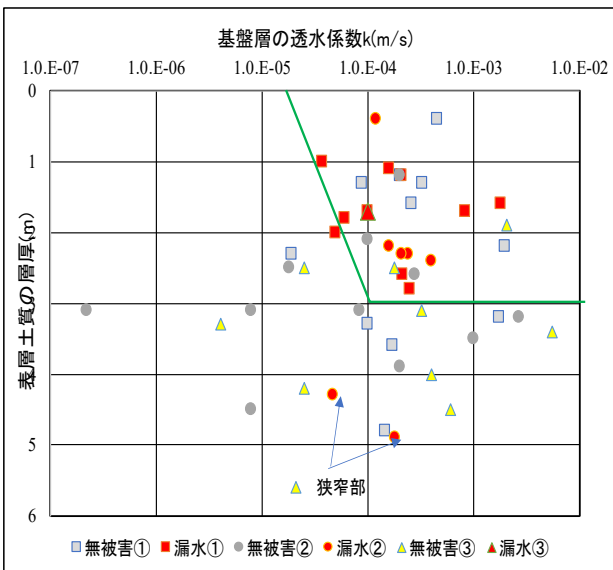


図-5 千曲川における基盤表層の層厚と透水層の透水係数の関係

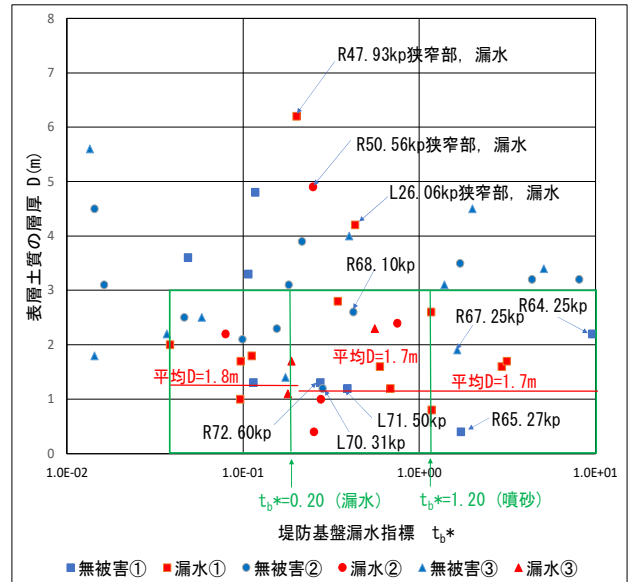


図-6 千曲川における基盤表層の層厚と浸透による堤防基盤漏水指標 t_b^* の関係

図-6には、表層土質の層厚と堤防基盤漏水指標 t_b^* の関係を示している。漏水が発生している箇所の層厚はバラツキがみられるが、平均値でみると常襲型漏水、漏水、噴砂とも層厚は平均1.7m程度であることがわかる。これらより、 t_b^* は漏水、噴砂に対する層厚の影響を直接考慮していないが、氾濫によって生じた表層土質の堆積層厚と堆積砂礫の影響は、実質的に t_b^* の無次元形でかなりの程度で表現できていると考えられる。この点については、さらに他の河川においても検討が必要である。

(2) 噴砂と堤防基盤特性の関係

梯川の検討⁴⁾から噴砂が発生している砂質土はほぼ均一な粒子であり、噴砂のしやすい範囲は、液状化のしやすい範囲と同範囲にあることがわかっている。 t_b^* を基本量とし、堤防基盤特性量として60%粒径、均等係数 U_c^* (D_{60}/D_{20} とする)、細粒分含有率FCを用い噴砂について検討する。

図-7には t_b^* に対する60%粒径 D_{60} 、図-8には t_b^* に対する均等係数 U_c^* の関係を示す。同図には、噴砂が発生した梯川白江地区(左岸6.4kp付近)、基盤の泥濘化によりすべり破壊が発生した古府地区(右岸8.4kp付近)のデータもプロットしている。図-7、図-8において、白江地区は $t_b^*=2.7$ で $t_b^*=1.20$ 以上の噴砂発生範囲にあり、古府地区は漏水被災が発生したデータでは最大値 $t_b^*=6.9$ を示しており、千曲川のデータ範囲と一致する。 $t_b^*=1.20$ 以上の噴砂発生箇所は、すべて $D_{60}=0.1\sim 1mm$ 、 $U_c^*=10$ 以下でありデータのバラツキが小さい。これに対して、常襲型漏水の範囲($t_b^*=0.03\sim 0.20$)では、比較してデータのバラツキが大きいことがわかる。 D_{60} 、 U_c^* の値のバラツキが小さいのは、表層土質構成でみると、粘土、砂、砂礫(土質構成①)が多い。これに対して砂、砂礫(土質構成③)ではバラツキがみられる。土質構成①は、模型実験では決壊しやすい複層構造に位置づけられる³⁾。また、筆者らの水圧分布の

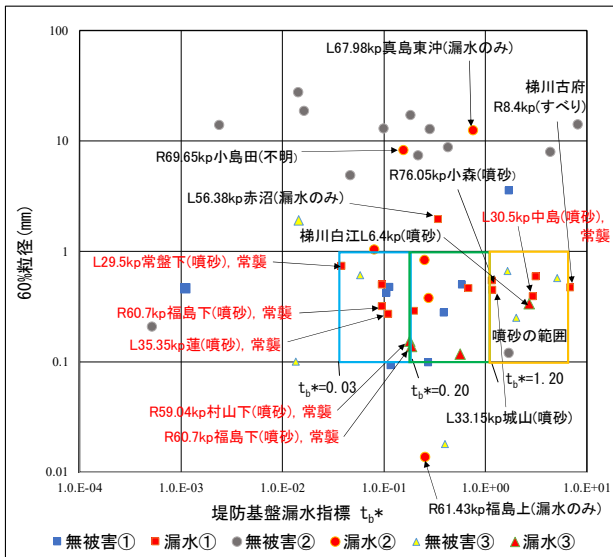


図-7 t_b^* と60%粒径の関係

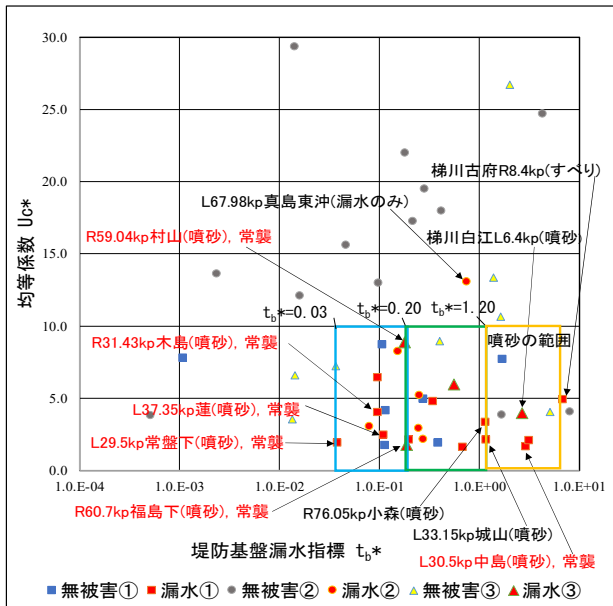


図-8 t_b^* と均等係数 U_c^* (D_{60}/D_{20})の関係

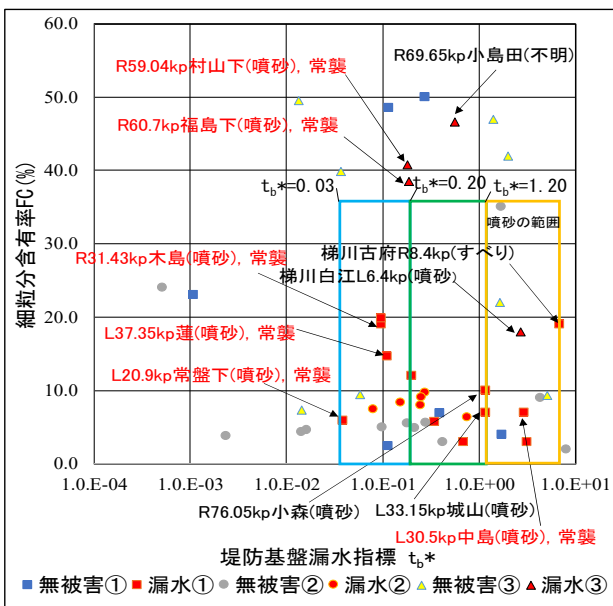


図-9 t_b^* と細粒分含有率FCの関係

試算結果や旧河道付近の地下水観測結果から⁵⁾、表層に粘性土層が分布する土質構成では、表層に砂層が分布する土質構成に比べ高い水圧分布をもち、噴砂が発生しやすい構造である。表層に砂層が分布する土質構成③では排水効果により、噴砂が発生しにくい構造と考えられる。

図-9に示した細粒分含有率FCと t_b^* の関係をみると、常襲型漏水の範囲、漏水の範囲である $t_b^*=0.03\sim 1.20$ では細粒分含有率FCのバラツキが大きく、 $t_b^*=1.20$ 以上範囲では、細粒分含有率FC=35%以内で噴砂が発生している。細粒分含有率FC=35%以上で噴砂が発生している箇所は、土質構成③であり、表層土の不均一性等により基礎地盤の噴砂は局所的に発生していると考えられる。

噴砂の発生しやすさは、 t_b^* が同じでも表層土質の粒径が影響すると考えられる。図-7～図-9の t_b^* と60%粒径 D_{60} 、均等係数 U_c^* 、細粒分含有率FCの関係図から、均等係数の値のバラツキが小さいことがわかった(漏水の範囲 $t_b^*=0.20\sim 1.20$ の比較においても均等係数の値のバラツキが小さい)。

5. まとめ

堤防基礎漏水指標 t_b^* は、基礎地盤浸透による裏のり尻付近の水の集中度を示しており、 t_b^* の大きさと堤防下の基礎地盤特性で概ね漏水、噴砂が区分できることが示された。すなわち、これらの事象発生には、 t_b^* を主たる外力指標に選び、 t_b^* と層厚、60%粒径、均等係数、細粒分含有率との関係図から漏水、噴砂の発生位置の推定が可能となった。今後、さらに多くの現地データを用い検討することにより、本手法の信頼度を高めていく必要がある。

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-I_1440, 2018.
- 2) 国土技術研究センター: 浸透に係る重要水防箇所設定手順(案), pp.13-17, 2019.
- 3) 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.
- 4) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二: 梯川における基礎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, 2018.
- 5) 佐藤豊, 大淵貴, 福岡捷二: 旧河道の地下水分布と堤防周辺の基礎漏水発生箇所の関係, 第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.33-36, 2018.

(2020. 11. 13受付)