

堤防脆弱性指標 t^* , 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と土質特性を用いた堤防裏すべり発生への検討

堤防脆弱性指標 t^* , 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* , すべり破壊, 土質特性

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

洪水のリスクマネジメントには、堤防弱点箇所の抽出方法の確立が喫緊の課題である。堤防の浸透に対する弱点箇所の抽出においては、堤防決壊に至る箇所の抽出が重要であるが、堤防の浸透に対する安全性評価は 1~2 km ごとのボーリング調査にもとづき、浸透流解析、円弧すべり安定解析により、パイピング判定、すべり安全率を求めており、決壊まで至るかの判断はしにくい。また、この解析手法では堤体、基礎地盤の土質定数を同時に用いて解析を行うため、何が原因であるかを特定しにくいことが課題である。

これに対して、力学的に導かれた相似則として成立する堤防脆弱性指標 t^* , 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* は、これらの値に応じ破壊現象を捉える。さらに、 $t_b^* \sim t^*$ の関係図を作成することで、どちらの原因が大きいかを判断することが可能である¹⁾。筆者らの研究¹⁾では、基盤漏水において、扇状地の漏水形態は漏水のみの発生が多いことが確認されており、堤防破壊に至る噴砂、すべりの発生は氾濫原で多いことがわかっている。福岡が示す力学的相似則のある堤防脆弱性指標 t^* は、主に堤体浸透における裏のり尻付近の水の集中、泥濁化を示す指標で、裏のり側にドレーン効果のある砂礫地盤は対象としていない。本研究では、堤防決壊に影響を及ぼす堤防裏のりすべり破壊の発生について、氾濫原に堆積する土砂を対象に、堤防脆弱性指標 t^* , 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を用いて堤防裏法先の土質特性との関係を検討した。さらに、堤防模型実験と現地堤防の進行破壊の相似性について確認

し、堤防模型実験の持つ意義に言及している。

2. 堤防裏すべりの事例と t^*, t_b^* の関係

ここでは、既往研究¹⁾で整理した $t_b^* \sim t^*$ の関係図にすべり発生した子吉川や千曲川の百々川地区、五十嵐川堤防の堤防脆弱性指標 t^* , 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を求めてプロットした(図-1)。

(1) 梯川の事例

既往研究²⁾から、古府地区の漏水は堤体が不透水層材料からなり、基礎地盤に透水性の高い砂礫層が分布することから、堤防変状は基盤漏水によるところが大きい。噴砂、すべり破壊が発生した 8.4 km と噴砂が発生したが天端亀裂程度であった 8.6 km の地質断面図の比較から、すべりが発生した 8.4 km の裏のり尻付近の表層土質の粘性土(Ac1-1)層厚 D_c が薄く、噴砂発生層(As1-1)層

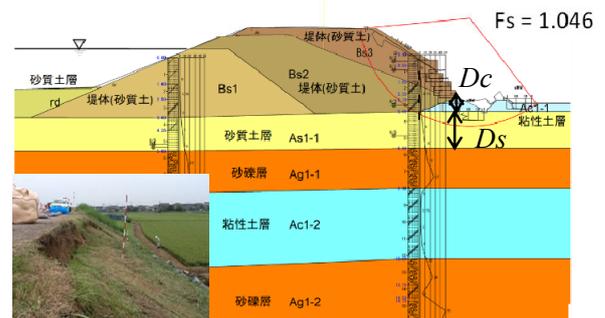


図-2 梯川古府地区 8.4 km の地質断面図(噴砂, すべり)

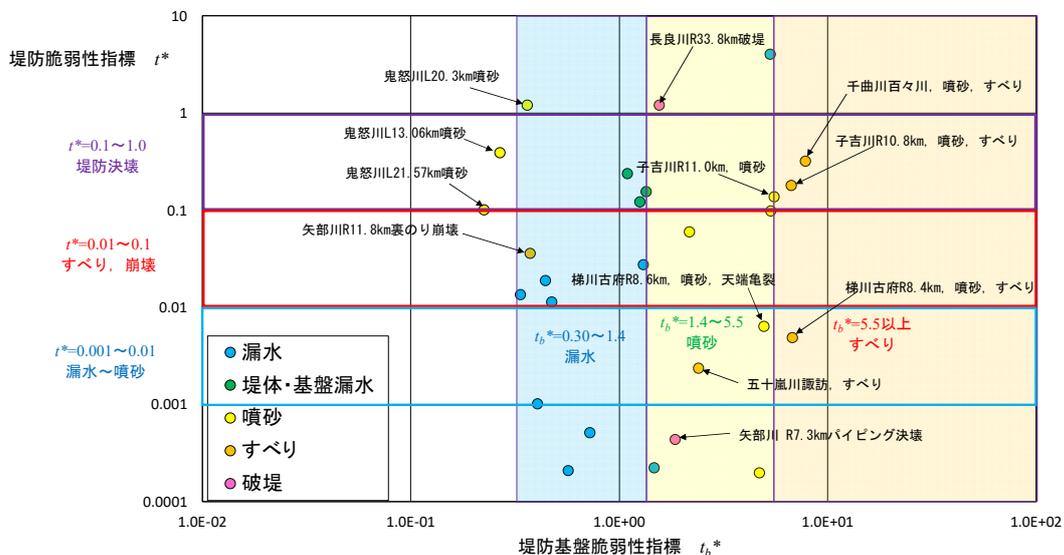


図-1 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* と堤防脆弱性指標 t^* の関係

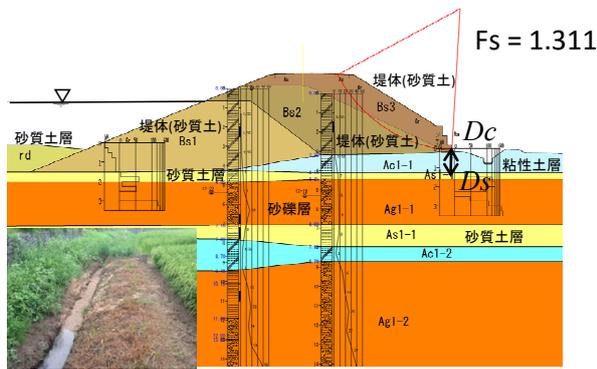


図-3 梯川古府地区 8.6 km の地質断面図
(噴砂, 天端亀裂)

厚 D_s が厚く、表層土質の層厚に影響することがわかっている。

(2) 子吉川の事例

子吉川では、裏のり尻付近の噴砂発生とともにすべり破壊が発生している。すべり破壊が発生した地質断面図、崩壊部分の裏のり尻付近のスケッチ図を図-4、図-5 に示す。子吉川の堤体土質は、主に砂質土 (Bs1, Bs2) で透水係数 10^{-5} m/s を示す。図-5 のスケッチ図から、シルト層 (Ac1) を斜めに分断するように砂質土 (As1) が貫入している部分があり、砂質土 (As1) を含む崩壊もあったことが示唆されている³⁾。また、噴砂が発生したがすべり破壊が発生していない箇所の粘性土層は、発生箇所に対して 0.5 ~ 1 m 程度厚く、地盤高も高いことが確認されている。この基礎地盤状況を踏まえて健全箇所の表層粘性土層厚 D_c を 0.5 m 加えて堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を求め、図-1 の梯川堤防の値と比較すると、 $t_b^* = 5.5$ 以上ですべりが発生することがわかる。また、子吉川堤防は図-4 の地質断面図から堤体土質が砂質土であり、図-1 で梯川よりも上部にプロットされることから、堤体浸透の影響も受けた漏水と考えられる。

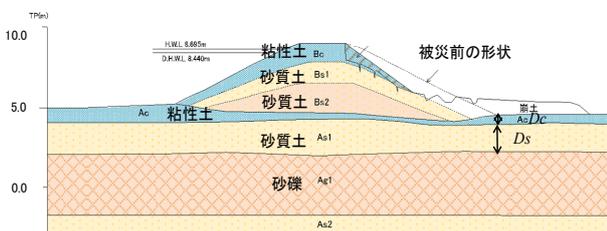


図-4 子吉川右岸 10.8 km 付近の地質断面図³⁾
一部加筆

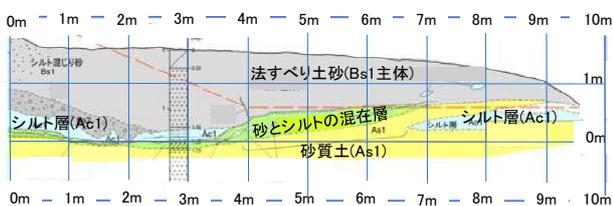


図-5 のり尻付近の開削断面スケッチ³⁾ 一部加筆

(3) 千曲川の百々川地区の事例

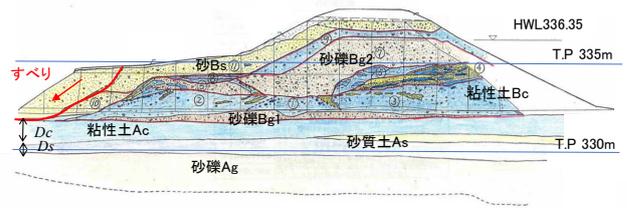


図-6 百々川地区の堤防スケッチ断面図

千曲川の百々川地区では、噴砂を伴う裏のり尻付近のすべり破壊が発生しており、図-6 に示すように堤防開削調査が行われている。堤体直下に水平方向に砂礫層 (Bg1) が分布している、築堤当初の不陸調整等の地盤を敷き均したと思われる土質である。すべりが発生した裏のり面側の築堤土は砂質土であるが、堤体土質は粘性土が主体である。この複合地盤の透水係数 1.7×10^{-7} m/s で求めた堤防脆弱性指標 t^* は 0.001 と小さく漏水の範囲であるが、堤体直下に分布する特殊層の砂礫の透水係数を代表値として求めた堤防脆弱性指標は、 $t^* = 0.32$ とすべり発生範囲にある。また、基礎地盤にも透水性の高い砂礫 (Ag) が分布し、堤防基盤脆弱性指標 $t_b^* = 7.8$ と 5.5 以上ですべり発生範囲にある。これらのことから、百々川地区のすべり発生は堤体直下の特殊層および基盤砂礫の浸透による影響と考えられる。

3. 模型実験による堤防破壊特性の検討

福岡・小高らは堤体浸透の力学的相似則を示す堤防脆弱性指標 t^* を用いて現地堤防と模型実験で発生した堤体漏水、裏法すべり、堤防決壊の被災形態が同一の値で発生することを示している⁴⁾。ここでは、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* を用いて模型実験と現地堤防の基盤浸透流についての力学的相似則を検討するとともに、模型実験結果と現地堤防について、堤体浸透および基盤浸透のすべり破壊形態の相似性を確認する。

模型実験に関する文献を表-1 に整理した。小型半断面は全断面に比して特別な条件のため、除外して全断面のデータを整理することとした(表-2)。

上野ら⁵⁾、笹岡ら⁶⁾の堤防模型実験では、様々な土質構成の条件で堤防破壊の過程を捉えた研究が行われている。ケース2,5,9 は、基礎地盤が複層地盤でそれぞれの層で透水性が異なる場合に短時間ですべり、決壊に至るパターンで梯川、子吉川の基礎地盤形状に類似する。同ケースは、模型実験の断面観察結果から透水層の所々で噴砂が発生し、ある時点で上層の砂層が広範囲の土砂移動が発生し、すべり破壊が発生し、その後加速的に土砂移動が起こり、決壊に至ることが確認されている。

ケース1,8 は、不透水層の堤体、表層土質の下に砂層が分布する単層構造のパターンで漏水のみがみられる。

ケース3 は、堤体土質が砂質土で堤体浸透のパターンで、堤防破壊はのり尻の泥濁化が起こり、次にのり尻か

表-1 浸透に対する堤防模型実験一覽

番号	論文名	著者	実験区分	概要	データ整理
1	漏水・噴砂の動態に着目した河川堤防のバイピングの進行性に及ぼす地盤条件と水位条件	楯山, 前田, 齋藤, 李, 泉	簡易バイピング実験, 小型模型実験 (堤防全断面)	基礎地盤の特性によって漏水, 噴砂の動態が異なる. 基盤が単一層, 層厚比が大きい場合にはバイピングに達する前に間隙水圧上昇による堤体の支持力不足による変状が発生する. 層厚比が大きい場合, 漏水量は少なく, 噴砂が発生する動水勾配は大きい. 噴砂の発生はのり尻付近に集中する.	
2	堤防全断面縮小模型を用いた透水性基礎地盤上の河川堤防の進行性破壊に関する実験	上野, 笹岡, 藤田, 森, 倉田, 下川	小型模型実験 (堤防全断面)	難透水性堤体では, 基礎地盤が単層より複層の方がのり尻部の全水頭が上昇しやすい. 堤体の泥浄化と崩壊を繰り返す進行性破壊が生じた. 難透水性堤体では水みちやバイピング発生が早い.	
3	模型実験にもとづいた河川堤防のバイピング発達に係る土質条件の分析	上野, 笹岡, 森, 中村, 福島, 藤田	小型模型実験 (堤防全断面)	基礎地盤の上層に対して下層の透水性が高い場合にはバイピングが発生しやすい. 堤体土質が変形しにくいほどバイピング発生時の水みちの進行速度が遅い.	○
4	大型模型実験に基づく河川堤防におけるバイピング発達過程の考察	笹岡, 上野, 森, 中村, 福島, 藤田	大型模型実験 (堤防全断面)	基礎地盤の上層に対して下層の透水性が高い場合には, 川裏法尻部において, 堤体土が間隙水圧で持ち上がり上層の噴砂発生し, 砂粒子の移動, 水みちが発達することを確認した. 実験後の堤防開削調査を実施し, 表のり面の陥没や堤体の沈下を確認した.	○

表-2 既往模型実験結果の土質構成と破壊パターン

実験形態	ケース	堤防区分	層区分	呼び名	D ₅₀ (mm)	透水係数 k(m/s)	層厚(m)	破壊パターン	破壊プロセスと発生時間 t _b *			
									漏水	噴砂	すべり	決壊
小型全断面	1	基礎地盤	堤体	混合土	0.28	4.1E-09	0.8	漏水のみ	開始後			
			基礎地盤	珪砂8号	0.3	2.9E-04	0.2					
	2	基礎地盤	堤体	混合土	0.28	4.1E-09	0.8	初期で決壊	45分		131分	下層流出
			基礎地盤	珪砂6号	0.3	2.9E-04	0.1					
	3	基礎地盤	堤体	珪砂3号	1.20	3.3E-03	0.1					
			基礎地盤	珪砂6号	0.3	2.9E-04	0.8	堤体砂流動	48分			
	4	基礎地盤	堤体	珪砂6号	0.3	2.9E-04	0.1					
			基礎地盤	珪砂3号	1.20	3.3E-03	0.1					
	5	基礎地盤	堤体	ローム	0.018	2.0E-08	0.8	時間をかけて変状	117分			
			基礎地盤	珪砂6号	0.3	1.9E-04	0.05					
	6	基礎地盤	堤体	珪砂6号	0.3	1.9E-04	0.05	時間をかけて決壊	23分	81分	134分	
			基礎地盤	珪砂1号	1.10	2.8E-03	0.15					
大型全断面	7	基礎地盤	堤体	混合土	0.28	4.1E-09	0.8	巨塊漏水のみ	開始後			
			基礎地盤	珪砂1号	1.10	2.8E-03	0.05					
	8	基礎地盤	堤体	珪砂C40	13.8	8.2E-03	0.15					
			基礎地盤	珪砂3号	1.20	3.3E-03	0.1					
	9	基礎地盤	堤体	ローム	0.018	2.0E-08	2.6	時間をかけて変状	45分	121分	1149分 (309分)	1449分 (609分)
			基礎地盤	珪砂6号	0.33	0.3						
	10	基礎地盤	堤体	ローム	0.018	2.0E-08	2.6	時間をかけて変状	98分			
			基礎地盤	珪砂3号	1.09	0.3						
	11	基礎地盤	堤体	ローム	0.018	2.0E-08	2.6	直後	27分	57分	103分	
			基礎地盤	珪砂6号	0.33	0.15						
	12	基礎地盤	堤体	珪砂1号	2.90	0.45		直後	85分	766分		土塊移動, 天端沈下
			基礎地盤	珪砂6号	0.25	0.3						

小型全断面: 参考文献⑤
大型全断面: 参考文献⑥

ら流動化が起こり, 天端方向に変状が拡大していく形態である.

次に透水層(下層)の透水係数が把握されている小型全断面型模型実験結果ですべり, 決壊まで至ったケース2,5について, 堤防変状発生した時間 t_n を式(1)の T に代入し, t_b* を求めて図-7 に整理した.

$$t_b^* = \frac{5(H+D)kT}{2\lambda L^2} \quad (1)$$

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-7 から, 小型全断面堤防模型の変状破壊プロセスに

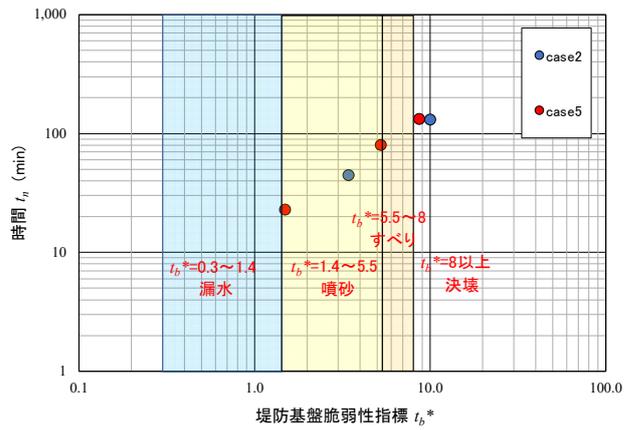


図-7 t_b* と堤防被災発生時間の関係

示された形態は, 図-1 に示された現地堤防での噴砂, すべり発生についての t_b* の範囲とほぼ同一であることがわかる. このことは, 堤防基盤脆弱性指標 t_b* の力学的相似則が式(1)で示されると判断される. なお, 大型全断面模型を図-7 に示していないのは, 透水係数が不明のためである. 本模型実験結果から, すべり発生の t_b* の範囲は t_b* = 5.5 ~ 8 であり, t_b* = 8 以上で決壊の範囲となるが, さらに実験例を増やし確認する必要がある.

なお, 模型実験の堤防裏のり先の土質構成は, 水平連続型や行止まり型のように設置されているが, 堤防裏のり尻付近の上層の層厚 D と透水層(下層)の透水係数によって, 破壊形態や破壊時間が支配されているものと考えられる. これについてもさらなる検討が望まれる.

4. t*, t_b* とすべり発生の土質特性の検討

堤防のり面すべり破壊と土質特性の関係を把握するためには, 模型実験の破壊形態の相違から, 堤体浸透と基盤浸透に分けて検討する. 堤体浸透によるすべりは, 模型実験結果からのり先から発生することから, 簡易的に斜面安定を求めるのに用いられる Taylor 安定図表のり面勾配 β とせん断強さ τ (= c + σ tan φ, σ = γt × H, γt: 堤体土質の単位体積重量, H: 堤防高) に影響すると考え, 堤防脆弱性指標 t* との関係を図-8 に整理した. のり面勾配 β が大きい場合には, すべり荷重(せん断力)が大きくなり, 堤体土質のもつせん断強さに耐えられず, 土粒子の移動が起こると考えられる.

図-8 から, 図-1 の t_b* ~ t* 関係図で左上にプロットされ, 堤体浸透によるすべり破壊と考えられる矢部川 R11.8 km, 鬼怒川堤防が t* = 0.01 以上で, τ/β = 1 以下の範囲にプロットされる.

基盤浸透のすべり破壊は, 模型実験結果から噴砂の進行による土塊移動によるせん断抵抗角 φ の低下と考えられ川, 子吉川の事例から表層粘性土の厚さ D_c, 砂層の厚さ D_s によって, すべりの発生が影響すること, 均等係数 Uc* (D₆₀ / D₂₀) が小さい場合に土粒子の移動がしやすいことから, これらの値と堤防基盤脆弱性指標 t_b* の関

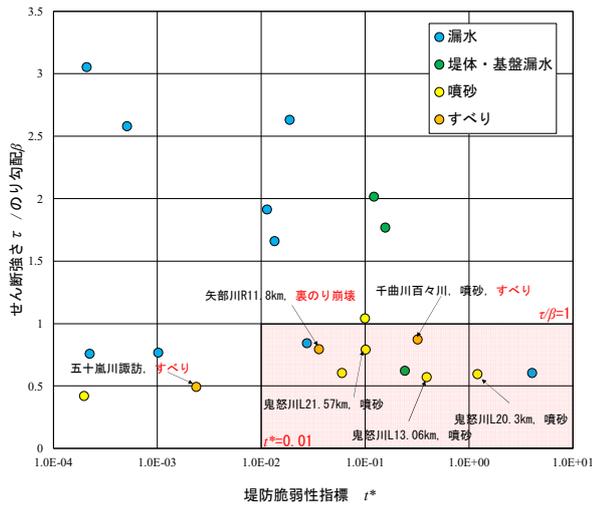


図-8 堤防脆弱性指標 t^* とせん断強さ/のり勾配 β の関係

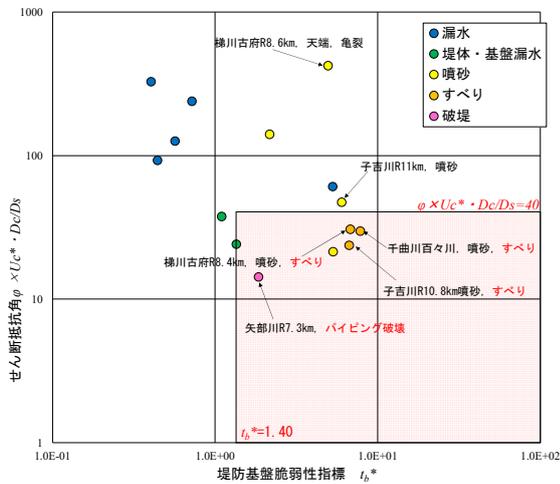


図-9 堤防基盤脆弱性指標 t_b^* とせん断抵抗角 $\phi \times U_c^* \cdot D_c / D_s$ の関係図

の関係を図-9 に示した。縦軸の値は、砂層が持つせん断抵抗角 ϕ に均等係数 U_c^* 、粘性土層厚 D_c と砂層の層厚の逆数 $1/D_s$ を乗じたものを示し、全体に値が小さい場合にすべり破壊が発生しやすくなると考える。粒径が均一で均等係数が小さい場合には、砂粒子が移動しやすく、表層の粘性土層厚 D_c が厚い場合には、砂層に作用する有効応力 ($\sigma = \gamma_{tc} \times D_c$, γ_{tc} : 粘性土層の単位体積重量) 大きくすべり抵抗が大きくなる。砂層の層厚 D_s が厚い場合には、つま先部分の砂層の噴砂量が大きくなり、すべり抵抗が小さくなる。図-9 から、梯川、子吉川のすべり発生と健全箇所と比較では $\phi \times U_c^* \cdot D_c / D_s$ の値が 40 で区分され、矢部川 R7.3 km のパイピング破壊もこの範囲にプロットされる。

5. まとめ

堤防脆弱性指標 t^* 、堤防基盤脆弱性指標 t_b^* の大きさによって、漏水、噴砂、すべりの発生を区別することができ、堤体、基礎地盤の表層土質特性を用いることによって、噴砂、すべり発生を判断ができることを示した。堤体のすべりは、のり面勾配と堤体土質のせん断強さが影響し、基盤浸透によるすべりは、均等係数、表層土質の層厚が影響することがわかった。また、 $t_b^* \sim t^*$ 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の影響を受けているか原因を判断することが可能と考えられる。

堤防整備にあたっては、これらの関係図を整理することで適切な対策工ができると考えられる。これまでの研究で、現地堤防と模型堤防について力学的相似則が明らかになったことから、今後、堤体土質のせん断強さと のり面勾配 β の関係や基礎地盤表層土質の土粒子移動とせん断抵抗角 ϕ の低下量を求めるための模型実験や室内土質試験に基づく研究開発によって、堤防決壊までの時間 t_n 等を検討課題にすることで堤防研究の進展が期待される。

参考文献

- 1) 佐藤豊, 福岡捷二: 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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, 2021.
- 2) 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_1237-1242, 2018.
- 3) 中川博樹: 子吉川における堤防被災メカニズムと調査岩石結果について, 第2回地盤工学から見た河川技術シンポジウム, 2014.
- 4) 福岡捷二, 小高猛司, 田端幸輔: 現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件-堤防脆弱性指標, 第5回河川堤防技術シンポジウム, pp.79-82, 2017.
- 5) 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.
- 6) 笹岡信吾, 上野俊幸, 森啓年, 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義雄: 大型模型実験に基づく河川堤防におけるパイピング発達過程の考察, 河川技術論文集 第23巻, pp.417-422, 2017.

(2021. 11. 14受付)