

首都圏氾濫区域堤防強化対策における堤防安全性評価に関する調査検討

堤防強化(断面拡大) 首都圏氾濫区域堤防強化対策
堤防脆弱性指標 堤防基盤脆弱性指標

関東地方整備局利根川上流河川事務所

中央コンサルタンツ株式会社

中央大学研究開発機構

○西野 正高

綿引 宙伸

牧 浩行

野川 浩生

フェロー会員 福岡 捷二

1. まえがき

1-1. 堤防安全性評価の現状について

河川砂防技術基準¹⁾によると、堤防弱部の合理的な評価及び洪水に対する堤防の縦断的な安全性の評価を的確に実施することは、現状の技術では困難な状況である。そのため、基礎地盤及び堤体の不均質な構造及び性状に由来する不確実性を低減するための調査及び検討並びに実現象を踏まえた堤防の破壊及び変形メカニズムを反映した解析手法等、更なる研究や技術開発に取り組むことが望ましいとされている。

近年では、洪水時の堤防裏のり先への浸透流の集中に着目し、堤防安定性を低下させる堤体等の特徴を指標化することにより、浸透に対する堤防危険箇所を推定する手法の研究が進められ、堤防の維持管理に活用され始めており、堤防強化に当たっての優先度評価への活用にも期待される。

福岡²⁾は、新しい堤防の技術基準の必要性を示しており、浸透による堤防破壊危険箇所の対策にあたっては、破壊危険発生確率や堤防脆弱性指標等を提案し、今後、堤防脆弱性指標等による堤防安全性評価が必要であると指摘している。

1-2. 首都圏氾濫区域堤防強化対策について

利根川の上流部右岸及び江戸川右岸の堤防が決壊すると埼玉県東部から東京都東部まで氾濫水が達し、首都圏が壊滅的な被害を受ける恐れがある。利根川上流河川事務所では、平成13年台風第15号の出水による漏水等の被害を契機に、平成16年度より堤防の浸透に対する安全性を向上させるため、断面拡大工法を採用し、川表法面を5割勾配及び川裏法面を7割勾配で整備する首都圏氾濫区域堤防強化対策(以降、「7H堤防」という)を実施しており、整備範囲約50kmのうち下流区間約23.5kmが令和5年度に概成している(図-1)。

本検討では、堤防脆弱性指標等に基づいて下流区間の完成堤防の安全性評価を実施するとともに整備効果を確認することを目的としたものである。

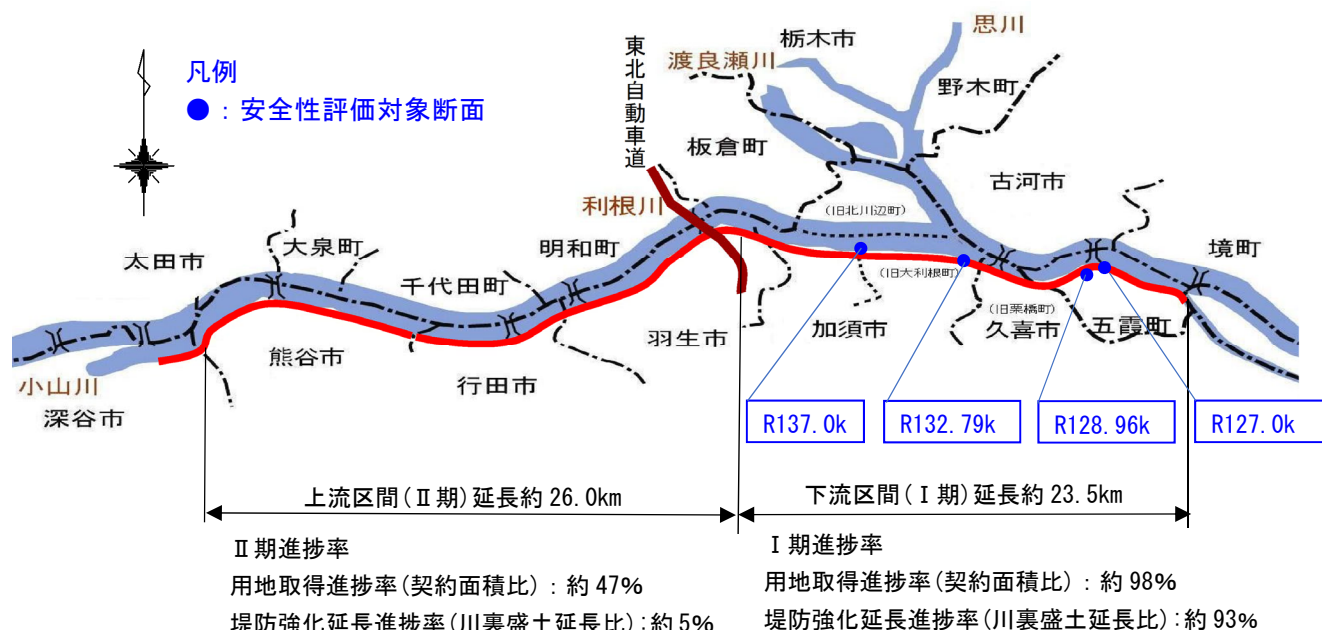


図-1 堤防整備の進捗状況概略図(令和6年3月末時点)

Investigation and study on safety evaluations of strengthened levee in the capital area.

M.Nishino, H.Watahiki(Kanto Regional Development Bureau,MLIT)

H.Maki H.Nogawa(Chuoh consultants Co.,Ltd.)

S.Fukuoka(Research and Development Initiative,Chuo University)

2. 利根川上流におけるこれまでの堤防安全性評価

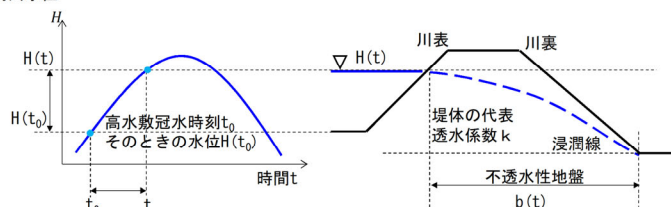
利根川上流における安全性評価は、これまですべり破壊やパイピング破壊、盤ぶくれに関する指標（浸透流解析）が用いられており、重要水防箇所設定に係る指標としても適用されている。また、7H堤防の検討段階においてもこれらの指標が用いられており、有識者からの意見を踏まえて整備に着手した。

一方で、浸透流解析以外の堤防安全性評価の指標として、田端ら³⁾の研究では堤防被災箇所の脆弱性指標を集計した結果、堤防脆弱性指標 t^* (図-2) と被災の種類・密度には明瞭な関係があることを分析している。佐藤ら⁴⁾の研究では、千曲川、梯川堤防で発生した堤防基盤漏水について堤防基盤脆弱性指標 tb^* (図-3) と堤防裏法尻先の土質特性を用いて検討している。なお、田端ら³⁾・佐藤ら⁴⁾によると、これらの指標は被災危険箇所や被災種類の推定が可能であるとされている。

3. 堤防安全性評価の検討方法

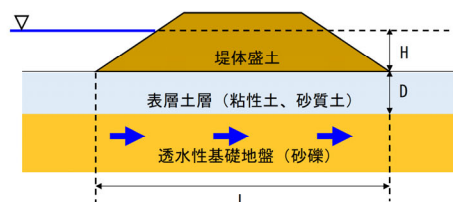
本検討における堤防安全性評価の評価項目は、浸透流解析に加え、力学的に導かれた相似則として成立する堤防脆弱性指標 t^* 及び堤防基盤からの漏水を判断する堤防基盤脆弱性指標 tb^* とした。堤防安全性評価の対象断面は、過年度の浸透流解析の評価実績や旧河道等、被害箇所の有無から4断面(利根川 R127.0k, R128.96k, R132.79k, R137.0k)を選定した。また、堤防安全性評価の精度向上に必要な地質構成や土質定数等を把握するため、断面拡大部や川裏法尻部の地質調査を実施した(図-4)。堤防脆弱性指標 t^* 及び堤防基盤脆弱性指標 tb^* の算出に用いた対象水位波形は、首都圏氾濫区域堤防強化対策の契機となった平成13年台風第15号と既往最大規模の出水である令和元年東日本台風における観測流量ハイドロを整備計画流量まで引き延ばし、各断面のHQ式より換算したものを対象とした。堤防脆弱性指標 t^* の基準値は「浸透に係る重要水防箇所設定手順(案)」⁵⁾ の重要水防箇所の基準値である $t^*=0.01$ とした。また、堤防基盤脆弱性指標 tb^* の基準値は佐藤ら²⁾の研究に示されている漏水発生範囲である $tb^*=0.3\sim 1.4$ の内、最小値である0.3とした。

河川水位



$$t^* = \frac{8kH(t) \cdot (t - t_0)}{3\lambda b(t)^2}$$

- t^* : 堤防脆弱性指標
- k : 堤体の代表透水係数(平均透水係数)
- $H(t)$: 時間 t における河川水位と川裏法尻高さの比高
- $t-t_0$: 冠水時間
- t_0 : 1洪水の中で最初に河川水位が両法尻高さに高い方に達した時間
- λ : 空隙率
- $b(t)$: 時刻 t において、河川水位と表法面が交差する位置と裏法尻の間の水平距離



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

- tb^* : 堤防基盤脆弱性指標
- 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 : 空隙率
- L : 表法先から裏法先までの水平距離

図-2 堤防脆弱性指標 t^* の考え方³⁾

図-3 堤防基盤脆弱性指標 tb^* の考え方⁴⁾

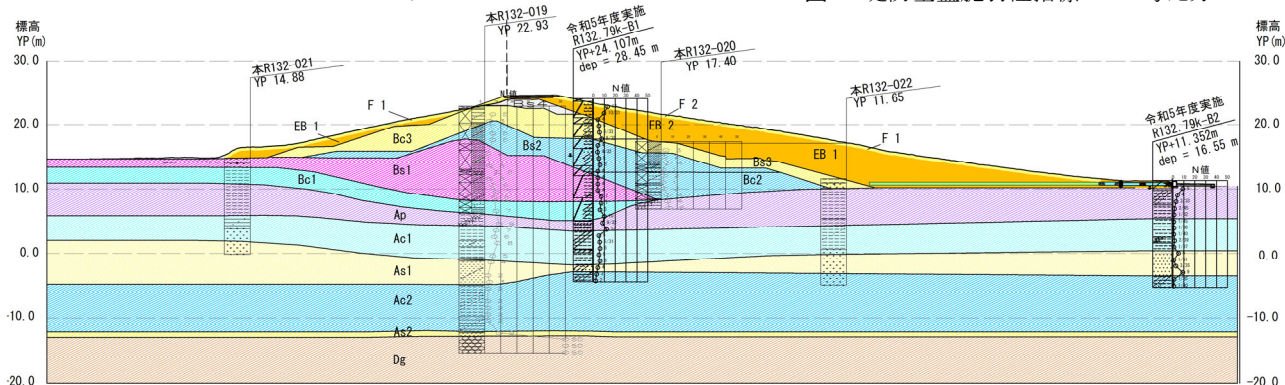


図-4 堤防安全性評価を実施した対象断面の一例(R132.79k)

4. 堤防脆弱性指標等を用いた堤防安全性評価

断面拡大前後の堤防脆弱性指標 t^* を比較した結果を表-3に示す。断面拡大前に $NG(t^* \geq 0.01)$ となった2断面(平成13年台風第15号のR132.79k, R137.0k)については、断面拡大後 $t^* < 0.01$ となったため、断面拡大による堤体有効敷幅の増加や堤体平均透水係数の減少が安全性確保に寄与していることを確認した。また、図-5～図-8に示すとおり、各断面において水位低下後に t^* の値が最大値を示しており、上村ら⁶⁾の研究と同様の結果となった。

表-3 堤防脆弱性指標結果一覧表

対象断面	対象洪水波形	断面拡大前									断面拡大後								
		透水係数 ks (m/s)	冠水時刻 to (hr)	最大 水位 YP (m)	最大 水深 (m)	t*発生時諸元(最大時)			t* 最大値	判定 (<0.01)	透水係数 ks (m/s)	冠水時刻 to (hr)	最大 水位 YP (m)	最大 水深 (m)	t*発生時諸元(最大時)			t* 最大値	判定 (<0.01)
						h(t) (m)	t-to (hr)	b(t) (m)							h(t) (m)	t-to (hr)	b(t) (m)		
R127.0	平成13年 台風第15号	3.86E-07	37.5	18.851	5.048	4.655	31.5	83.1	0.00020	OK	4.86E-06	41.2	18.851	3.915	3.724	25.8	89.3	0.00141	OK
R128.96		3.38E-07	30.1	20.058	7.358	7.158	36.9	70.0	0.00044	OK	1.54E-06	30.1	20.058	7.195	6.995	36.9	109.6	0.00080	OK
R132.79		7.52E-06	30.0	20.837	10.637	10.260	39.0	71.4	0.01418	NG	6.54E-06	29.9	20.837	9.945	9.165	42.1	124.7	0.00389	OK
R137.0		1.14E-05	29.2	22.476	6.307	6.118	37.8	59.3	0.01799	NG	8.44E-06	29.7	22.476	6.412	6.223	37.3	85.5	0.00643	OK
R127.0	令和元年 東日本台風	3.86E-07	43.1	18.851	5.048	4.855	14.9	82.2	0.00010	OK	4.86E-06	44.5	18.851	3.915	3.722	13.5	89.3	0.00073	OK
R128.96		3.38E-07	41.3	20.058	7.358	7.358	15.7	68.6	0.00020	OK	1.54E-06	41.3	20.058	7.195	6.777	17.7	111.0	0.00036	OK
R132.79		7.52E-06	41.3	20.837	10.637	5.321	63.7	91.8	0.00727	OK	6.54E-06	41.2	20.837	9.945	4.629	63.8	145.9	0.00218	OK
R137.0		1.14E-05	41.0	22.476	6.307	6.307	16.0	58.4	0.00811	OK	8.44E-06	41.2	22.476	6.412	6.018	17.8	86.5	0.00291	OK

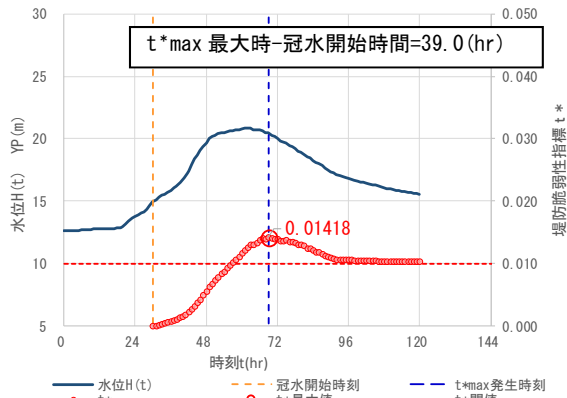


図-5 堤防脆弱性指標

(平成 13 年台風第 15 号 R132.79k 断面拡大前)

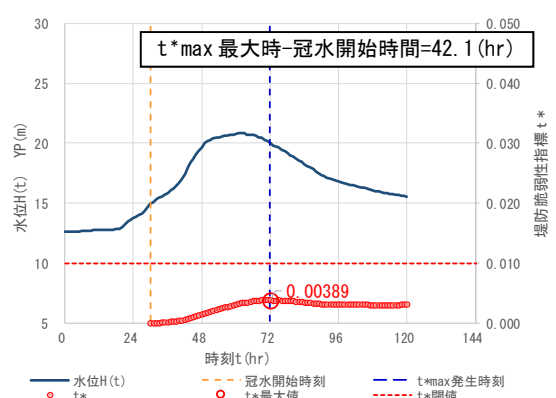


図-6 堤防脆弱性指標

(平成 13 年台風第 15 号 R132.79k 断面拡大後)

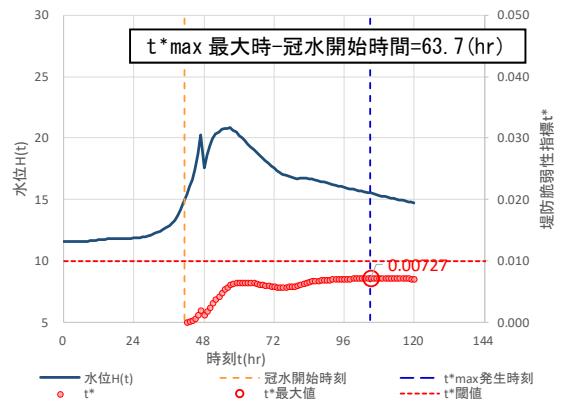


図-7 堤防脆弱性指標

(令和元年東日本台風 R132.79k 断面拡大前)

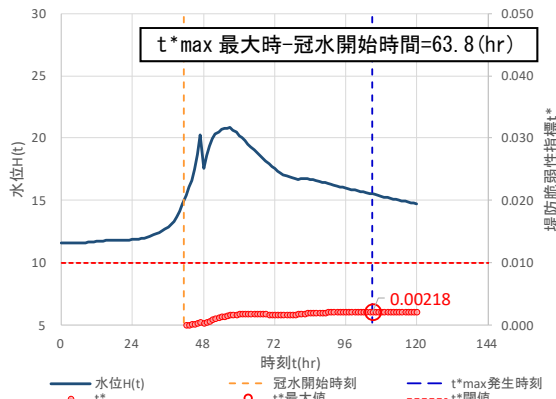


図-8 堤防脆弱性指標

(令和元年東日本台風 R132.79k 断面拡大後)

表-4 堤防基盤脆弱性指標結果一覧表

対象断面	対象水位波形	断面拡大前								断面拡大後							
		堤防裏法尻からの洪水最大水位	堤防裏法尻からの基礎地盤透水層までの厚さ	透水係数 ks	間隙率	表法尻先から裏法尻先までの水平距離	高水継続時間	tb*	判定 (<0.3)	堤防裏法尻からの洪水最大水位	堤防裏法尻からの基礎地盤透水層までの厚さ	透水係数 ks	間隙率	表法尻先から裏法尻先までの水平距離	高水継続時間	tb*	判定 (<0.3)
		H	D	k	λ	L	T			H	D	k	λ	L	T		
		(m)	(m)	(m/s)		(m)	(hr)			(m)	(m)	(m/s)		(m)	(hr)		
R127.0	平成13年 台風第15号	5.049	4.119	3.00E-05	0.484	103.833	25.512	0.0122	OK	5.720	4.790	3.00E-05	0.484	114.113	23.633	0.0094	OK
R128.96		6.443	2.454	7.00E-06	0.470	113.207	30.945	0.0029	OK	6.679	2.690	7.00E-06	0.470	149.407	30.945	0.0017	OK
R132.79		5.851	10.266	2.00E-06	0.495	94.259	31.046	0.0021	OK	6.025	10.440	2.00E-06	0.495	148.728	31.085	0.0008	OK
R137.0		6.174	2.368	1.00E-05	0.542	94.660	38.839	0.0062	OK	6.706	2.900	1.00E-05	0.542	112.163	31.313	0.0038	OK
R127.0	令和元年 東日本台風	4.479	4.119	3.00E-05	0.484	103.833	13.861	0.0062	OK	5.150	4.790	3.00E-05	0.484	114.113	13.158	0.0052	OK
R128.96		6.443	2.454	7.00E-06	0.470	113.207	15.707	0.0015	OK	6.679	2.690	7.00E-06	0.470	149.407	15.707	0.0009	OK
R132.79		5.851	10.266	2.00E-06	0.495	94.259	15.740	0.0010	OK	6.025	10.440	2.00E-06	0.495	148.728	15.754	0.0004	OK
R137.0		6.174	2.368	1.00E-05	0.542	94.660	18.565	0.0029	OK	6.706	2.900	1.00E-05	0.542	112.163	15.839	0.0019	OK

断面拡大前後の堤防基盤脆弱性指標 tb^* を比較した結果を表-4 に示す。平成 13 年台風第 15 号と令和元年東日本台風ともに、拡大前後によらず全断面で $tb^* < 0.3$ となっており、断面拡大後の方が安全側(tb^* の値が拡大前よりも小さい)となっていることから、断面拡大による堤体幅(水平距離)の増加が安全性確保に寄与していることが確認された。

今回の検討結果から、堤防強化(断面拡大)による堤体幅(堤体有効敷幅・水平距離)の増加が安全性の向上に寄与していることを確認した。

5. まとめ

首都圏氾濫区域堤防強化対策における拡大前後の堤防断面を対象に、堤防脆弱性指標等による安全性評価を行った結果、堤防脆弱性指標 t^* 、堤防基盤脆弱性指標 tb^* に対して、断面拡大による堤体幅(堤体有効敷幅、水平距離)の増加が安全性確保に寄与していることを確認した。

今回実施した安全性評価は、4 断面での評価結果であるため、今後は堤防安全性評価の対象断面数を増やし、断面拡大による堤防の安全性向上への寄与について引き続き検討する必要がある。基盤漏水の発生箇所は旧河道等との関係が深い(佐藤ら⁷⁾)ことから、旧河道等の断面特性を考慮した断面での安全性評価を実施し、基盤漏水と旧河道等の関係も含めて考察する必要がある。また、現地堤防への適用性を高める上では現地透水係数の算定精度を高めることが必要(上村ら⁶⁾、福岡ら⁸⁾)である。その算定方法として、洪水時の堤体内水位観測(図-9)を用いた透水係数の設定が提案されていることから、今後、堤体内水位観測を行い、透水係数の精度向上を図る必要がある。

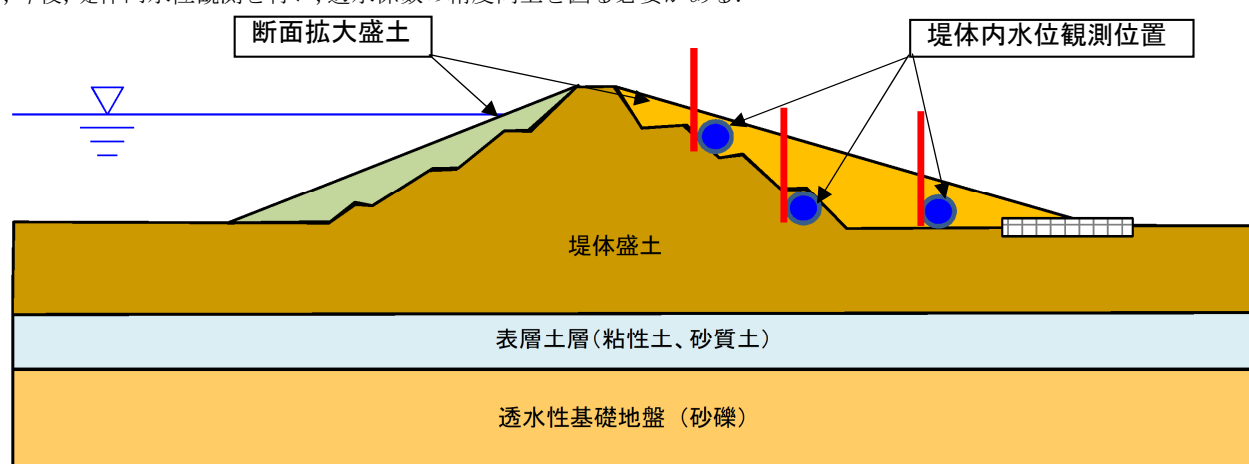


図-9 堤体内水位観測イメージ図

さらに、今後の堤防安全性評価の更なる深化に向けた取組として、福岡²⁾⁹⁾¹⁰⁾によると、現況堤防と相似性の高い模型堤防を用いた模型実験や堤体内の降水の見える化に資する堤体内水収支の検討が提案されている。したがって、7 H堤防との相似性を考慮した模型実験から浸透破壊(浸透流出)プロセスについて検証及び考察することや、7 H堤防を1つの流域として捉え、その水収支(貯留流出プロセス)を検討することが今後の検討課題となる。

参考文献

- 1) 河川砂防技術基準 設計編 技術資料(国土交通省)
- 2) 福岡捷二：河川堤防の調査・研究分野に期待することーこれからと100年後と、第5回河川堤防技術シンポジウム，pp. 1-4，2017.
- 3) 田端幸輔，福岡捷二，内堀寿美男，上村勇太：堤防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ー鬼怒川中下流部平成27年9月大洪水を例としてー，河川技術論文集，第23巻，pp. 387-392，2017.
- 4) 佐藤豊，福岡捷二：堤防基盤脆弱性指標 tb^* と地形，土質構成に基づく堤防の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, No. 2, I_121-I_126, 2021.
- 5) 浸透に係る重要水防箇所設定手順(案) 平成31年3月(一般財団法人 国土技術センター)
- 6) 上村勇太，福岡捷二：堤防脆弱性指標に基づく洪水位降下時における法裏安定性に関する研究，河川技術論文集，第24巻，pp. 547-552，2018.
- 7) 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変状，土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 4, I_1237-I_1242, 2018.
- 8) 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ー浸透流ナンバー 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.
- 9) 福岡捷二，近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp. 457-462，2022.
- 10) 福岡捷二，今求められる河川技術の革新，土木技術資料，pp. 5, vol166, No. 11, 2024.