

堤防破壊確率と堤防脆弱性指標に基づいた堤防危険箇所の推定法

堤防破壊確率 堤防脆弱性指標 堤防危険箇所

中央大学研究開発機構 ○田端 幸輔
中央大学研究開発機構 福岡 捷二

1. はじめに

洪水外力が増大傾向にある我が国にとって、実効性の高い治水対策を行い、流域水害リスクを低減させることは極めて重要な課題である。このため、洪水時の堤防破壊危険性の評価技術が求められている¹⁾。著者らはこれまで、大規模洪水の危機管理検討に資することを目的に、洪水流解析と堤防ボーリング調査データに基づいた信頼性解析を用いた堤防破壊確率推算法を提案した²⁾。しかし、本手法を用いて堤防破壊確率を検討した事例が多くなく、算出される堤防破壊確率の値が持つ工学的意味については十分明らかになっていない。

本研究では、近年に堤体被災実績のある河川を対象に、堤防断面諸元、堤防土質定数、過去の堤体被災箇所の実データを把握するとともに、堤防破壊確率算定結果が被災実績箇所を概ね説明できることを示す。また、洪水水位ハイドログラフ、堤防断面、土質特性の実データから堤防の脆弱性を表す指標を導き、複数の河川を対象に堤防脆弱性指標と堤防破壊確率、実績堤体被災箇所を関係付ける。これより、堤防脆弱性指標によって堤防破壊危険箇所を推定可能であることを示す。

2. 堤防破壊確率の算出方法

図1に本研究における堤防破壊確率計算の流れを示す。堤防前面水位の時間変化（水位ハイドログラフ）の縦断分布を入力条件とし、土質定数を確率変数として扱う信頼性解析によって、堤体浸透・裏法滑りによる堤防破壊確率を算出する。堤防前面の水位ハイドログラフの縦断分布は、検討対象領域において観測された水面形の時間変化に基づいた洪水流・河床変動解析の結果を用いる。堤体内の浸潤線は、内田³⁾が提案した非定常浸潤線の推定式（式(1)）を用いる。

$$\frac{h(x,t)}{H(t)} = 1 - \left\{ \frac{x/H(t)}{\sqrt{8/(3\lambda)}\sqrt{k\Delta t/H(t)}} \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

ここに、 h ：堤体内水位、 H ：河道水位、 k ：透水係数、 Δt ：水位 H が保たれているとしたときの浸透時間、 λ ：空隙率である。

本手法では、式(1)で計算される浸潤線が裏法面のいずれかの地点に達した場合に浸透破壊が生じるものと仮定している。また、堤体裏法の滑り面の力の釣り合いを円弧滑り法⁴⁾によって評価し、安全率が1より小さ

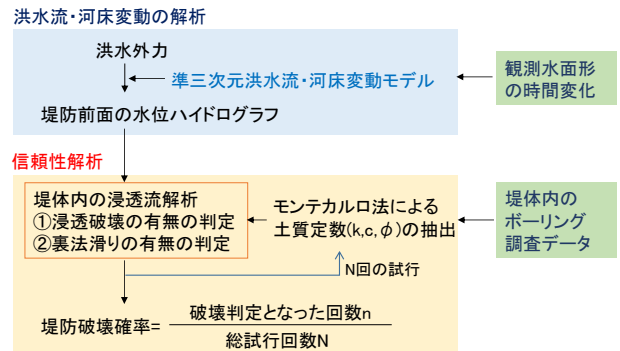


図1 堤防破壊確率計算の流れ

くなった場合に裏法滑り破壊が生じるとしている。

浸透または裏法滑りが生じる確率は、式(2)に示す範囲で表すものとする。

$$P_f = P_{f1} \cup P_{f2}, \quad (2)$$

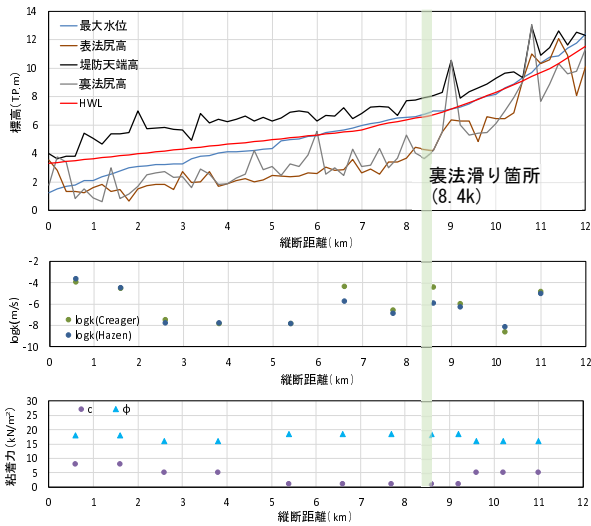
$$\max(P_{f1}, P_{f2}) \leq P_f \leq P_{f1} + P_{f2} - P_{f1} \cdot P_{f2}$$

ここに、 P_f ：堤防破壊確率、 $A \cup B$ ：AまたはB、添え字：破壊モード(1：浸透、2：裏法滑り)である。

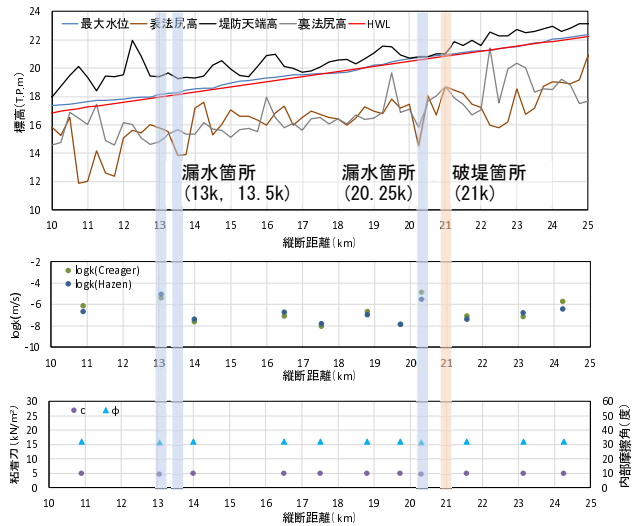
3. 堤体被災が生じた河川での堤防破壊確率

(1) 堤防基礎データ

ここでは、平成25年7月洪水により堤体被災が生じた梯川と、平成27年9月洪水により破堤及び多くの堤体被災が発生した鬼怒川を対象に、堤防の土質定数(k, c, ϕ)の断面平均値、堤防天端高、表法尻高、裏法尻高、堤体被災箇所を堤防縦断方向に整理した。堤防土質定数は、公表されている全国河川の堤防土質試験結果情報⁵⁾に基づいて設定した。透水係数は Creager, Hazen の推定値のうち大きい方の値を用いた。なお、粘着力と内部摩擦角は、 N 値と土質区分から分類する石原らの方法⁶⁾により設定した。図2に、梯川右岸堤防と鬼怒川左岸堤防の基礎データの整理結果を示す。図の上段には堤防天端高、表法尻高、裏法尻高、HWLを、中段には透水係数を、下段には粘着力と内部摩擦角をそれぞれ示している。梯川の8.4kや鬼怒川の13k、20.25kでは表法尻に比べて裏法尻が低くなっていることが確認できる。堤体土質定数を見ると、粘着力と内部摩擦角は縦断的な変化が小さいが、透水係数は縦断的に大きく変化しており、梯川では河口部や6.6k、8.6kで、鬼怒川では13kや20.25kにおいて相対的に透水係数が高いことが分かる。また、堤体被災箇所は、両河川ともに裏法尻高の低い箇所や透水係数の高い箇所に比較的集中している傾向にあることが分かる。

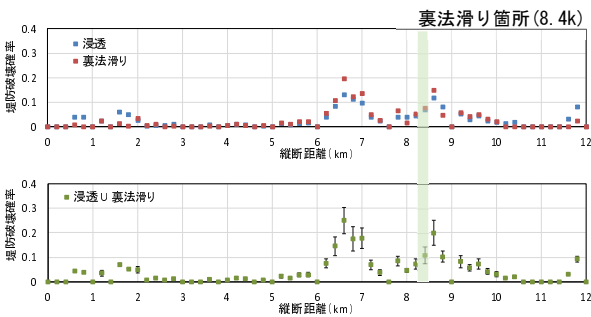


(a) 梯川右岸堤防

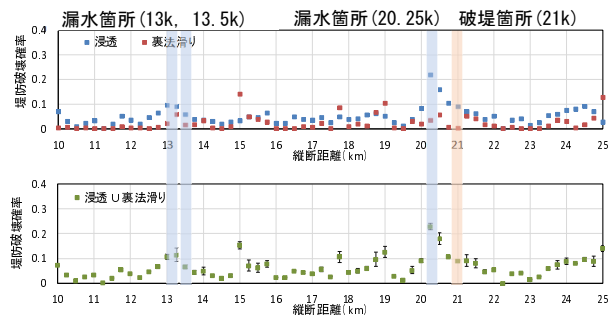


(b) 鬼怒川左岸堤防

図2 堤防基礎データの整理結果



(a) 梯川右岸堤防



(b) 鬼怒川左岸堤防

図3 浸透・裏法滑りによる堤防破壊確率の検討結果

(2) 堤防破壊確率の算出

堤防基礎データを把握した梯川と鬼怒川において、洪水流解析と堤防土質データに基づいた信頼性解析を用いて堤防破壊確率の算出を行った。堤防土質定数 (k, c, ϕ) には、ボーリング調査データに基づいて設定した各断面の平均値と、各定数の変動係数を与えた。信頼性解析におけるモンテカルロ法の試行回数は1万回とした。

図3に、梯川右岸堤防と鬼怒川左岸堤防の破壊確率縦断分布をそれぞれ示す。これによると、透水係数の大きい箇所付近で浸透による堤防破壊確率が高まっていることが分かる。また、浸透が生じやすかつ粘着力の小さい箇所において裏法滑りの発生確率も増大しており、浸潤線の上昇が滑り破壊に対して危険になることが分かる。実績堤体被災箇所と比較すると、堤防破壊確率が高い箇所でも必ずしも被災が生じているわけではないが、実績堤体被災箇所周辺では、堤防破壊確率が周囲に比べて相対的に高くなる傾向にある。

以上より、破壊確率算定精度の更なる向上は必要であるものの、堤防破壊確率算定結果が被災実績箇所を概ね説明できることが確認できた。このことは、堤防破壊確率が、流域水害リスクの算定に重要な役割を果たす可能性があることを示している。

4. 洪水水位ハイδροグラフと堤防基礎データに基づいた堤防脆弱性指標による堤防危険箇所の推定

(1) 堤防脆弱性指標の設定

梯川と鬼怒川の検討結果から、実績の堤体被災箇所は、堤防破壊確率の大きいところで起こっていることが概ね説明できた。しかしながら、多くの試行を伴う信頼性解析を用いて全国の長大河川堤防の危険性を検討するには、膨大な時間と労力を必要とする。このため、洪水外力と堤防基礎データから堤防の脆弱性を表す指標を導き、堤防危険箇所を推定する手法を構築することが重要になる。

堤防危険箇所の推定に関して、これまで宇野ら⁷⁾は堤防被災を経験した複数の中小河川を対象として、堤体裏法高、堤体断面積、被災実績の有無、堤体土質の粘着力等の基礎データの回帰分析により得られたロジックモデルを用いて、河道水位から破壊確率を算出する方法を提案している。

本研究では、洪水水位ハイδροグラフと堤防基礎データから得られる指標を複数設定し、これと算出した堤防破壊確率を関係付け、実績堤体被災箇所との比較により堤防破壊危険箇所の推定が可能かどうかを検討した。以下に設定した各指標の求め方を示す。

① 堤体の透水係数 k

対象堤体断面の平均的な堤体透水係数を用いる。

② 堤体の表法尻と裏法尻の比高差 Δz

堤防表法尻高と裏法尻高の差で表す。

$$\Delta z = z_1 - z_2 \quad (3)$$

ここに、z₁：堤防表法尻高、z₂：堤防裏法尻高

③ 動水勾配 I

河道水位と堤防裏法尻高、水際から堤防裏法先までの水平距離を用いて以下の式により算出する。

$$I = \frac{H(t) - z_2}{B(t)} \quad (4)$$

ここに、H：河道水位、B：水際から堤防裏法先までの水平距離である。

④ 無次元堤体浸透時間 t*

H₀(t₀)から H(t)まで水位が上昇するまでの時間（冠水時間）T と、H(t)の水位が保たれたとした場合に、浸潤線が裏法先まで到達するのに要する時間T' の比によって定義する（図4）。T'は、式(1)を時間について解くことで算出する。

$$t^* = \frac{T}{T'} = \frac{t - t_0}{3\lambda B(t)^2 / 8kH(t)} \approx \frac{t - t_0}{\lambda B(t)^2 / kH(t)} \quad (5)$$

ここに、t*：無次元浸透時間、t₀：冠水した時の時刻、λ：空隙率、k：堤体の透水係数の平均値、H：河道水位である。なお、破壊確率との相関性を調べることを目的とするため、係数3/8は無視した。

(2) 検討対象河川

検討対象河川は、梯川、鬼怒川に加えて、信濃川下流と江戸川、平成23年7月洪水により弱小堤防区間で被災が生じた中ノロ川（信濃川下流から分派・合流する県管理河川）の計5河川とした。これらの河川の左右岸堤防を対象に、3章で示した方法により堤防基礎データを把握し、堤防破壊確率の算出を行った。

(3) 各指標と堤防破壊確率の関係

検討対象とした5河川の堤防基礎データから求めた4つの指標と、算出した堤防破壊確率の関係を図5に示す。堤防破壊確率は、浸透または滑りが生じる確率として式(2)の最大値で評価し、水位ピーク時における堤防破壊確率と各指標の関係をプロットしている。また、堤体材料が礫分主体の箇所では、Creager や Hazen による透水係数推定式の適用性が不明であるため除外した。

指標②は、ほぼ相関を持たないが、他の指標は、少なからず相関性があることが分かる。しかし、透水係数や動水勾配（指標①、③）を用いると、堤防破壊確率に大きなバラツキが生じる。

一方、水位、冠水時間、堤防幅、透水係数の概念を取り入れた「冠水時間／裏法先まで浸透するのに要する時間」（指標④、以下では堤防脆弱性指標と呼ぶ）を用いると、破壊確率と指標との相関が最も高いことが分かる。このことは、河道水位、洪水継続時間、堤

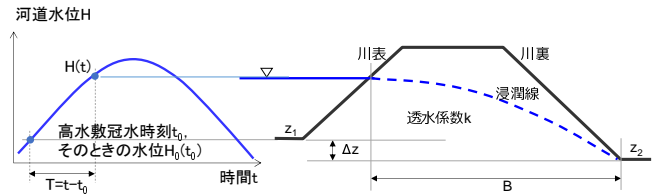
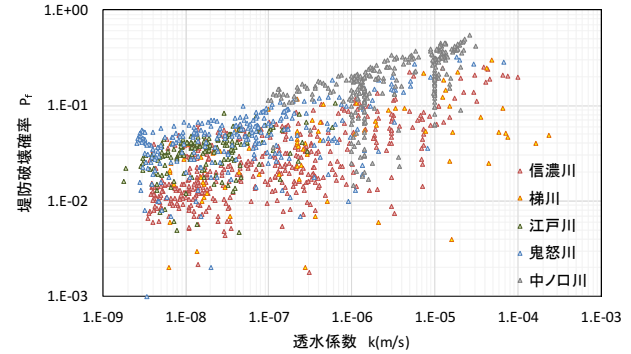
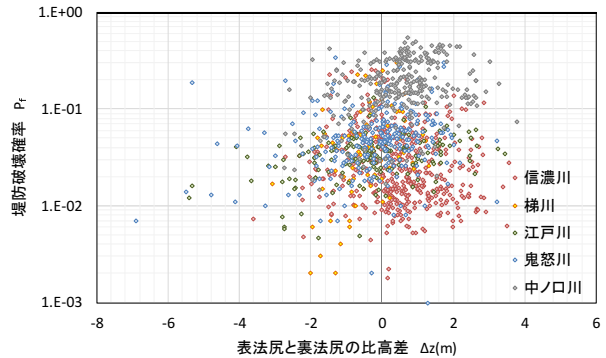


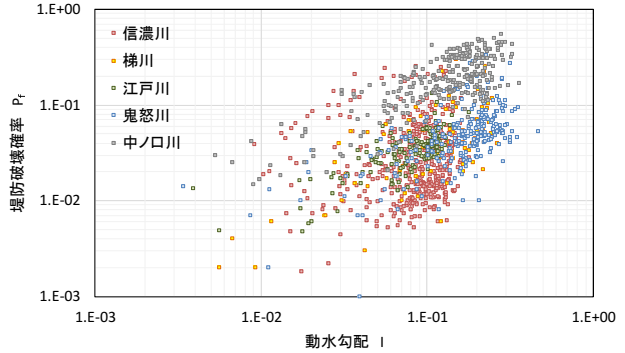
図4 指標算出に用いる変数の定義



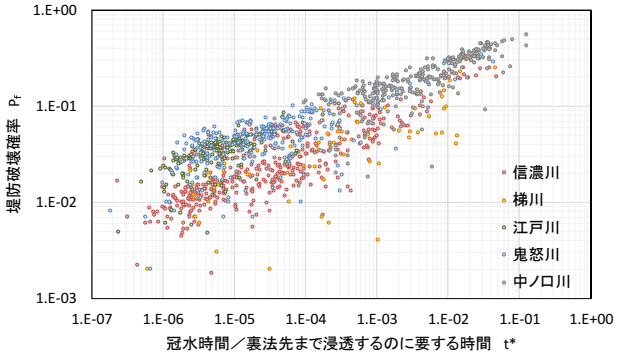
(a) 指標①を用いた場合



(b) 指標②を用いた場合



(c) 指標③を用いた場合



(d) 指標④を用いた場合

図5 各指標と堤防破壊確率の関係

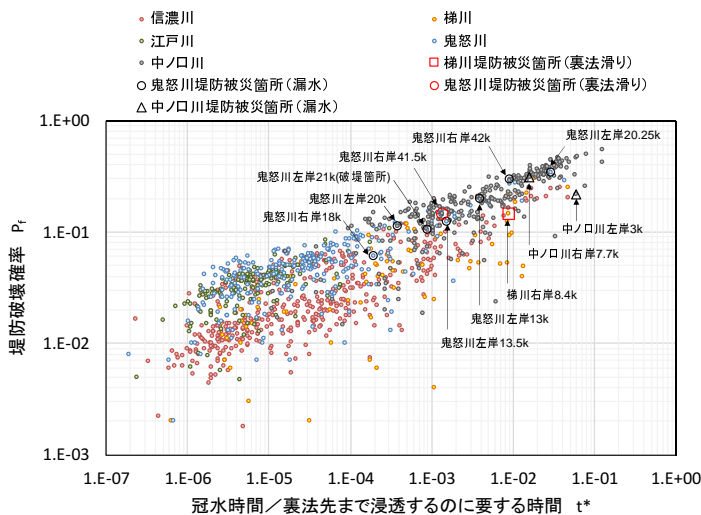


図6 t*と堤防破壊確率, 実績堤体被災箇所の関係

表1 堤防脆弱性指標 t*と堤体被災率の関係

t*の範囲	(1)プロットされたデータ数	(2)実績堤体被災箇所数	(3)堤体被災率(%) ((2)/(1)×100%)
$10^{-7} \sim 10^{-6}$	16	データ無し	—
$10^{-6} \sim 10^{-5}$	291	データ無し	—
$10^{-5} \sim 10^{-4}$	272	データ無し	—
$10^{-4} \sim 10^{-3}$	206	3	1.46
$10^{-3} \sim 10^{-2}$	173	5	2.89
$10^{-2} \sim 10^{-1}$	112	3	2.68
$10^{-1} \sim 1$	2	データ無し	—

※整理に用いた被災データの内訳

信濃川	0箇所	鬼怒川	8箇所
梯川	1箇所	中ノ口川	2箇所
江戸川	0箇所		

防断面形状, 土質を組み合わせた指標によって堤防破壊危険性を概ね説明できることを示している。

なお, 宇野らによる手法を用いて, 5河川を対象に堤防破壊確率を算出した結果, 実績堤体被災箇所の再現性が低いことが確認された。

(4) 堤防脆弱性指標による堤防破壊危険箇所の推定

堤防脆弱性指標 t^* と堤防破壊確率 P_r の関係図に, 実績の堤防被災箇所をプロットしたものを図6に示す。梯川, 鬼怒川, 中ノ口川の主な実績堤体被災箇所は, 図の右上の狭い範囲に多く分布する。すなわち, 実績堤体被災箇所では, 堤防破壊確率, 無次元浸透時間ともに大きくなる傾向が見られる。また, 堤防脆弱性指標の値に対する堤体被災率を表1に示す。堤体被災率は, 表の左列に示す堤防脆弱性指標の範囲に含まれる実績堤体被災箇所数とプロットされたデータ数(堤防断面数)の比によって定義した。これによると, 検討した5河川では, 堤防脆弱性指標の値が 10^{-4} より小さい範囲に顕著な堤体被災箇所は見られないが, 10^{-4} より大きくなると堤体被災率が 1.5~2.9%となり, 堤体被災の危険性が高まることが分かる。

以上より, 堤防脆弱性指標を用いた手法は, 現在入手可能な基礎データに基づいて容易に堤防危険箇所を推定可能であり, この推定結果を用いることで, 堤防破壊危険性を低減させるために必要となる治水対策(河道掘削, 堤防強化等)の具体的な検討等に繋げていけるものと期待される。一方で, 流域の減災適応策を検討していくためには, 堤防破壊確率 P_r に基づいた破壊リスク評価技術が必要となる。このため, 更に多くの河川において堤防破壊確率の検討事例を増やし, 梯川や鬼怒川のように, 実際に発生した堤防被災箇所と堤防破壊確率の関係を調べていくことで, 算出される破壊確率の値が持つ重要性を確かなものにし, 流域の水害リスクの分析に活用していくことが必要である。

5. おわりに

本研究では, 近年に堤体被災が生じた梯川, 鬼怒川の堤防破壊確率を算出し, 実績堤体被災箇所において堤防破壊確率が高くなることを示し, 堤防破壊確率が流域水害リスクの算定に重要な役割を果たす可能性を示した。また, 洪水水位ハイドログラフ, 堤防断面形, 透水係数から堤防脆弱性を表す指標を導き, 複数河川を対象に堤防脆弱性指標と堤防破壊確率, 実績堤体被災箇所を関係付けた。この結果, 高水敷冠水時間/裏法先まで浸透するのに要する時間を堤防脆弱性指標とすることで, 堤防危険性を評価できることが分かった。

堤防基礎データの収集には, 国交省北陸地方整備局河川計画課, 関東地方整備局河川計画課, 江戸川河川事務所, 信濃川下流河川事務所, 新潟県の多大なるご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二: 今後の河川防災・減災について, 河川 3月号, pp.3-8, 2015.
- 2) 田端幸輔・福岡捷二: 大規模洪水時における堤防の浸透, 裏法滑りによる破壊確率の評価法に関する研究, 第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2014.
- 3) 内田茂男: 自由境界を有する非定常浸透流について, 土木学会誌, pp.58-62, 1952.
- 4) 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), 財団法人国土技術研究センター, 2012.
- 5) 国土技術政策総合研究所河川研究室 HP, [http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/geo_download/geo_download.html]
- 6) 石原雅規・平林 学・吉田直人・佐々木哲也, 圧密非排水三軸試験による強度定数と標準貫入試験及び物理試験結果の関係, 第58回地盤工学シンポジウム, pp.211-216, 2013.
- 7) 宇野尚雄・森杉壽芳・杉井俊夫・中野雄治: 被災事例に基づく河川堤防の安定性評価, 土木学会論文集 第400号/III-10, pp.161-170, 1988.