堤防脆弱性指標を用いた堤防浸透破壊危険性評価に関する研究

中央大学研究開発機構　正会員　○田端　幸輔
中央大学研究開発機構　フェロー　福岡　捷二

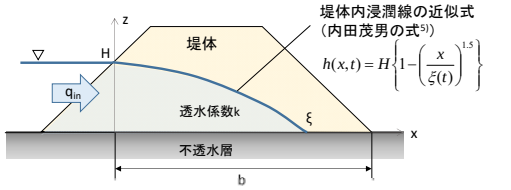
１．研究の背景・目的

我が国では，洪水時における河川堤防の破壊の危険性を推定し，堤防弱点箇所の強化や流域の危機管理対策を検討していくことは極めて重要な課題である．これまで福岡・田端[1]は，洪水水位，継続時間，堤体透水係数，堤防幅等の組み合わせによって表される堤防脆弱性指標を導き，堤防浸透被災箇所付近で堤防脆弱性指標が高くなることを確認している．しかし，堤防維持管理や水防活動を適切に行っていくには，堤防脆弱性指標の値と被災種類等とを関連付けていく必要がある．本研究では，洪水時に顕著な浸透被害が生じた鬼怒川，長良川，矢部川堤防を対象に堤防脆弱性指標を縦断的に算出し，手法の妥当性を実績被災データに基づいて検証する．そして今後の堤防維持管理に資するため，堤防脆弱性指標の値と被災規模，種類の関係を明らかにする．

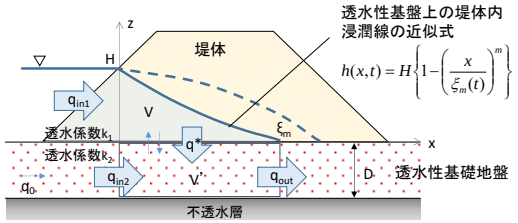
２．堤防脆弱性指標の考え方

図-1(a)に示すように，堤防の基盤が不透水性である場合の堤防脆弱性指標を式(1)に示す．この指標は，外力である河川水位の継続時間 t を，堤体内浸潤線が裏法尻までに達する時間 T で無次元化したものである．浸透時間 T_{sp} については，堤体内の浸透に関連する物理量として河川水位 H，堤体内の水の圧力 p，水平方向の浸透距離 x，時間 t，透水係数 k，水の密度 ρ，土粒子密 σ，堤防の空隙率 λ，重力加速度 g の 9 個を選び，π 定理を適用することで得られた式形を用いている．堤防脆弱性指標 t^*は，堤防幅 B が大きいと浸透時間が長くなることから浸透破壊に対して安全性が高まることや，水位 H，洪水継続時間 t'，堤体透水係数 k が大きいと浸透時間が短くなり危険となるといった洪水時の堤体内浸透流の特徴を的確に捉えている．

$$t^* = \frac{t'}{T_{sp}} = \frac{t'}{3\lambda b^2/8Hk} = \frac{8}{3}\frac{Hkt'}{\lambda b^2} \qquad (1)$$



(a) 不透水性基盤上の堤体内の浸潤線



(b) 透水性基盤上の堤体内の浸潤線

図-1　堤体内浸潤線の概念図

表-1　k2/k1，D/H に対する m 値の分布表[1]

D/H \ k_2/k_1	0	0.1	0.5	1	2	5	10	20
0	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
0.1	1.500	1.500	1.500	1.500	1.426	1.060	0.858	0.711
0.5	1.500	1.500	1.472	1.075	0.823	0.660	0.588	0.545
1	1.500	1.500	1.118	0.860	0.700	0.591	0.546	0.527
2	1.500	1.384	0.866	0.710	0.614	0.547	0.528	0.518
5	1.500	1.014	0.671	0.592	0.549	0.520	0.510	0.505
10	1.500	0.821	0.591	0.548	0.524	0.510	0.505	0.503
20	1.500	0.691	0.548	0.524	0.513	0.505	0.503	0.502

(a) 鬼怒川左岸 20.5k 付近[3]　(b) 長良川右岸 33.8k[4]

(c) 矢部川右岸 11.8k 付近[5]

写真-1　堤体浸透による被災状況

堤防は，さまざまな土材料から構成される自然堆積物の上に築堤された人工構造物であるため，図-1(b)に示すような堤体直下の基盤層が透水性である場合も多く見られる．このような場合，堤体内に浸透した水の一部が基盤層に抜け出すことで，浸潤線の形状やフロント位置の進行速度等が変化する．福岡・田端[2]は透水性基盤層を考慮した場合の堤体内浸潤線の近似解を導いた．不透水性基盤の場合と同様に，洪水継続時間 t を，透水性基盤層を考慮した場合の浸透時間で無次元化すると，基盤透水層への抜け出しを考慮し，より一般化された堤防脆弱性指標 t^*_m が得られる．

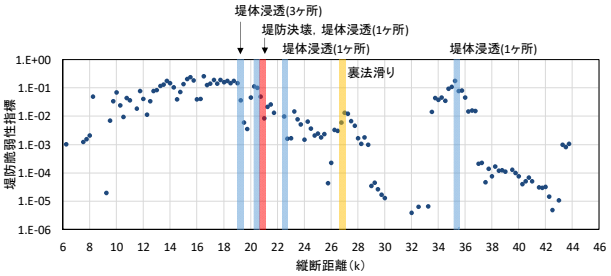
キーワード　堤防，洪水，浸透破壊，堤防脆弱性指標，透水性基盤層
連絡先　〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27-31214　中央大学研究開発機構　TEL 03-3817-1618

$$t_m^* = \frac{t'}{T_{sp_m}} = \frac{mk_1H - m(2m-1)k_2D}{mH+(m+1)D}\frac{Ht'}{\lambda b^2} \quad (2)$$

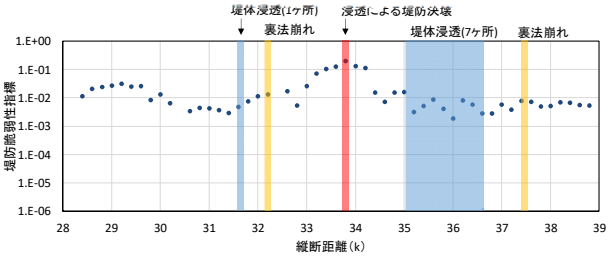
式(2)に含まれる m は，堤体内への流入量と基盤層への抜け出し量の関係によって決まると考えられる．福岡・田端[1]は，堤体及び基盤層を考慮した準二次元水平方向浸透流の数値解析に基づいて，堤体と基礎地盤の透水係数 k_1，k_2，水位 H と基礎地盤厚さ D と m 値の関係（**表-1**）を求めている．本検討では基盤が不透水性である場合は m=1.5 として式(1)を適用し，基盤が透水性である場合は**表-1** から m 値を求め，式(2)により堤防脆弱性指標を算出した．

3．浸透被災が生じた河川堤防への適用

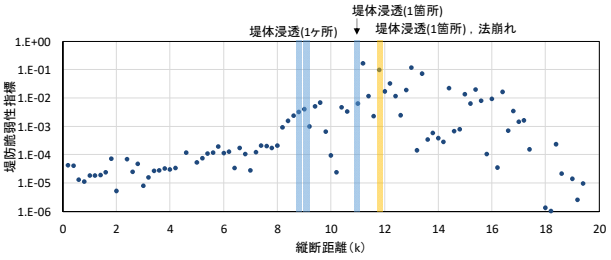
堤防決壊や堤体浸透被害が多く生じた鬼怒川平成 27 年 9 月洪水[3]，堤体浸透により破堤等の被害が生じた長良川昭和 51 年 9 月洪水[4]，法崩れ等の被害が生じた矢部川平成 24 年 7 月洪水[5]（**写真-1**）を対象に，堤防脆弱性指標を縦断的に算定した．**図-2** に最大水位時の堤防脆弱性指標の縦断分布を示す．鬼怒川 21k，長良川 33.8k，351～36.6k，矢部川 9k，11.8k 付近のように，縦断的に被災箇所が連続する箇所や被災規模の大きい箇所で堤防脆弱性指標の値が大きく算定されており，被災の程度と堤防脆弱性指標とがよく対応していることが分かる．以上で算定した堤防脆弱性指標と堤体被災の関係について分析した．**図-3** に堤防脆弱性指標と被災箇所数，被災種類の関係を示す．ボーリング調査箇所またはその近傍における堤防脆弱性指標を横軸，被災箇所数を近傍のボーリング調査の区間長で割ることで求めた被災密度を縦軸にとり，各河川堤防の値をプロットした．堤防脆弱性指標が大きい区間では，被災箇所数が相対的に多くなる傾向がある．更に，堤防脆弱性指標が 0.001 以上の範囲で堤体浸透が，0.01 以上の範囲で裏法滑りが，0.1 以上の範囲で堤防決壊が発生している．これらの値を閾値にとることで，堤体浸透破壊の危険性から見た水防箇所の合理的な設定等が可能になるものと考えられる．



(a) 鬼怒川左岸堤防（平成 27 年 9 月洪水）



(b) 長良川右岸堤防（昭和 51 年 9 月洪水）



(c) 矢部川右岸堤防（平成 24 年 7 月洪水）

図-2　堤防脆弱性指標の縦断分布

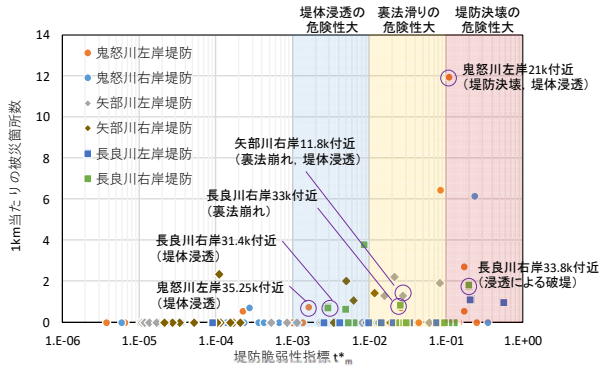


図-3　堤防脆弱性指標と被災箇所数，被災種類の関係

4．結論

洪水時に堤体浸透被災が多く発生した河川堤防を対象に，堤防脆弱性指標を縦断的に算定した．この結果，堤防脆弱性指標は，堤防決壊箇所周辺や，水防活動が集中的に実施された箇所の破壊危険性を良好に説明できた．また，堤防被災箇所の脆弱性指標を集計した結果，堤防決壊箇所付近の脆弱性指標が最も大きい範囲に分布し，そこから 1 オーダー毎小さくなる範囲に裏法滑り，堤体浸透の値が分布した．これより，堤防脆弱性指標を用いることで，堤体浸透の観点から見た被災種類を概ね推定可能であることを示した．

参考文献

1) 福岡捷二・田端幸輔：堤防破壊危険確率と堤防脆弱性指標に基づく堤防破壊危険タイムラインを用いた被災プロセスの見える化，第 4 回河川堤防技術シンポジウム, pp.61-64，2016. **2)** 福岡捷二・田端幸輔：堤体基礎地盤の透水性・堤防強化対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究，河川技術論文集，第 22 巻，pp.261-266，2016. 3) 国土交通省関東地方整備局：第 2 回鬼怒川堤防調査委員会資料，2016. 4) 建設省土木研究所，建設省中部地方建設局：長良川破堤に関する検討報告書，1980. 5) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，2013.