

平成 27 年 9 月 鬼怒川大洪水時における堤体浸透被害と
透水性基盤を考慮した堤防脆弱性指標 t_m^* との関係

中央大学大学院 学生会員 ○上村 勇太
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二
中央大学研究開発機構 正会員 田端 幸輔

1. 序論

鬼怒川では、平成 27 年 9 月に下流区間で水位が H.W.L.を上回る大洪水が発生し、堤防決壊を含む多くの堤防被災が生じた。著者らは¹⁾、鬼怒川平成 27 年 9 月洪水時の堤防破壊危険性と堤防被災箇所・規模²⁾(図-1)、土質特性との関係を調べるために、まずは不透水性基盤を仮定した堤防脆弱性指標を縦断的に検討した。しかし、鬼怒川の堤体直下には透水性基盤層が存在しており、堤体に浸透した水の一部が基盤に抜け出すことの影響を考慮する必要がある。本研究では、鬼怒川平成 27 年 9 月洪水を対象に透水性基盤を考慮した堤防脆弱性指標を縦断的に算出し、堤防土質特性、堤防被災箇所・規模との関係を考察する。

2. 透水性基盤を考慮した堤防脆弱性指標 t_m^* と計算条件

本研究では、堤防の盛土部分を堤体、自然堆積層を基盤と定義し、堤体の浸透破壊危険性について検討する。不透水性の基盤を仮定した時の堤防脆弱性指標 $t^{*3)}$ は、図-2(a)に示す洪水水位 H 、堤防裏法の水際から裏法先までの水平距離 B 、洪水継続時間 T 、堤体の平均透水係数 k_1 、空隙率 λ の組み合わせにより式(1)の無次元形で表される。

$$t^* = \frac{T}{T_{sp}} = \frac{8}{3} \frac{T k_1 H(t)}{\lambda B^2} \tag{1}$$

ここに、 T_{sp} ：堤防裏法先までの浸潤線の到達時間である。一方、堤体直下に透水性基盤層を有する場合の堤体内の浸潤線は、堤体から基盤層へ水が抜け出すことで、下に凸の形になる(図-3(b))。福岡ら⁴⁾は、堤体直下に透水性基盤層がある場合の浸潤線を内田の式⁵⁾を参考に式(2)で近似し、堤体、基盤層内の連続式とダルシー則に基づいて、浸潤線が堤防裏法先に到達するまでの時間 T_{sp} を求めた。これと洪水継続時間 T の比を取ると、透水性基盤を考慮した堤防脆弱性指標 t_m^* は式(3)で表すことが出来る。

$$z(x,t) = H \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\xi_m(t)} \right)^m \right\} \tag{2}$$

$$t_m^* = \frac{T}{T_{sp}} = \frac{2(m+1)}{2m-1} \frac{m k_1 H - m(2m-1) k_2 D}{m H + (m+1) D} \frac{HT}{\lambda B^2} \tag{3}$$

式(2)、(3)に含まれる m は、堤体内への浸入量と基盤層への水の抜け出し量の関係により決まると考えられる。堤体・透水性基盤層を考慮した鉛直二次元浸透流数値解析⁶⁾を行い、堤体・基盤層の透水係数 k_1 、 k_2 、堤防際の水位 H 、基盤層厚さ D を変化させた時に得られる浸潤線形状を式(2)で近似することで、 m 値が k_2/k_1 、 D/H の値に対して表-1に示すような分布を取ることが確認されている³⁾。この表は、全国の堤防ボーリング調査データから k_2/k_1 、 D/H の取る範囲を調べ、その範囲内で作成されたものである。ここでは、鬼怒川堤防(6~46 km)の現地データに基づいて

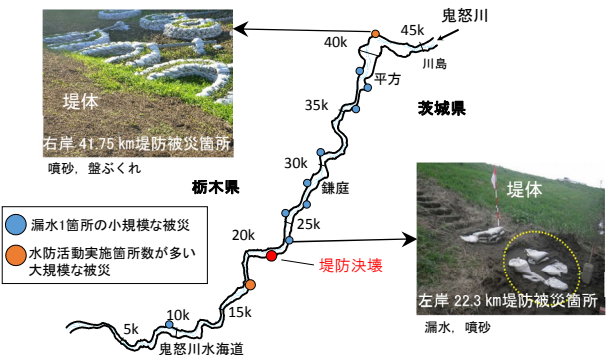


図-1 鬼怒川平成 27 年 9 月洪水時の堤体浸透被害一覧²⁾

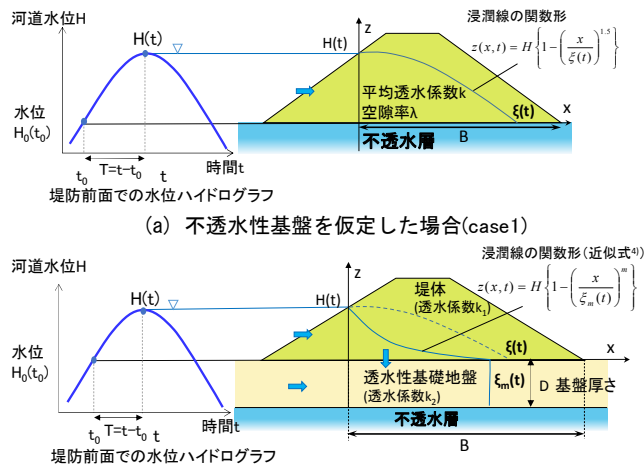


図-2 堤防脆弱性指標の物理変数

表-1 k_2/k_1 、 D/H に対する m 値の分布表³⁾

k_2/k_1 \ D/H	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	0.516
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

■ 左岸26.0km ■ 右岸20.5~22.5km ■ 左岸12.0~13.5km ■ 右岸41.0~43.0km

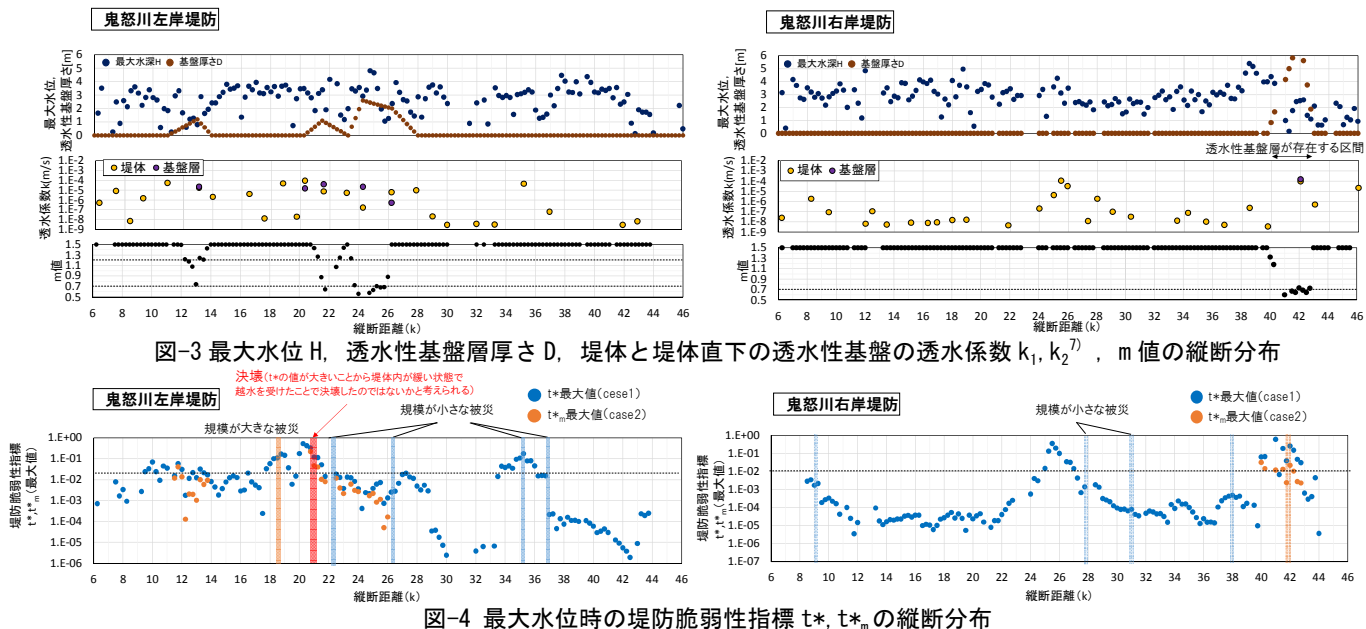


図-3 最大水位 H, 透水性基盤層厚さ D, 堤体と堤体直下の透水性基盤の透水係数 k_1, k_2 ⁷⁾, m 値の縦断分布

図-4 最大水位時の堤防脆弱性指標 t^*, t_m^* の縦断分布

k_2/k_1 , D/H を調べ、表-1 より m 値を決定した。H は、観測水面形の時間変化に基づく洪水流・河床変動解析⁷⁾により得られた水位データの最大水位時のものを用いた。D は、堤体直下から不透水性基盤層までの厚さとした。ただし、不透水性基盤が地下水面よりも十分深い位置にある場合は、地下水面より下層に水は抜け出さないものと考え、堤体直下から地下水面までの深さを D と定義し、この範囲内の平均透水係数を k_2 とした。右岸 42.0 km 付近は、後者のケースに該当する。尚、ここでは検討対象外としたが、鬼怒川中流区間ではこのようなケースが多くみられるため、不透水層の位置と地下水位の関係を調べ、D を適切に設定する必要がある。本検討では、透水性基盤への水の抜け出しによる影響を見るため、不透水性基盤を仮定した $t^*(\text{case1})$ と透水性基盤への水の抜け出しを考慮した $t_m^*(\text{case2})$ の比較を行った。

3. 堤防土質特性と m 値、堤防脆弱性指標と堤体浸透被災箇所・規模の関係

図-3 に、最大水位、透水性基盤層厚さ、堤体と堤体直下の透水性基盤の透水係数⁸⁾, m 値の縦断分布を示す。左岸堤防では、右岸側より比較的多くの透水性基盤層が存在していることが分かる。左岸 12.0~14.0 km, 20.5~22.5 km では、 D/H が 0.1~1, k_2/k_1 が 0.5~2 と比較的小さな値の範囲で分布するため、m 値は概ね 1.2 程度となる（表-1 の緑、赤枠）。一方、左岸 26.0 km 付近では、 D/H が 1 程度、 k_2/k_1 が 0.1 程度であることから、m 値は表-1 より 1.5 の値をとり不透水性基盤として扱うことが出来る（表-1 の青枠）。また、右岸 41.0~43.0 km では、 k_2/k_1 が 1 とほぼ一定値を示すが、透水性基盤層が厚く D/H が 0.5~5 と大きい値まで分布する（表-1 の黄色枠）。この区間は、基盤層厚が左岸 12.0~14.0 km 等に比べて大きいため、m 値は 0.7 程度となる。図-4 に、鬼怒川堤防における最大水位時の堤防脆弱性指標の縦断分布を示す。透水性基盤を考慮した $t_m^*(\text{case2})$ は、不透水性基盤を仮定した $t^*(\text{case1})$ に比べて全体的に 1 オーダー小さく、堤体内の水が基盤に抜け出すことにより浸透破壊危険性が低下することが表現出来ている。特に、 D/H が大きい右岸 41.0~43.0 km でこの傾向が顕著にみられる。しかし、噴砂や盤ぶくれ等、大規模な変状が発生した右岸 42.0 km では基盤層への水の抜け出しを考慮しても、 t_m^* は依然として大きな値を示すことが分かった。 t_m^* の縦断分布に着目すると、被災規模の大きい区間で t_m^* が相対的に大きな値 ($t_m^* > 10^{-3}$) を示しており、比較的小さい被災規模の区間で t_m^* の値が相対的に小さくなることから、 t_m^* の値が高くなるにつれて被災の規模が大きくなることが確認された。また、規模の大きな堤体浸透被災が発生した箇所では、 t_m^* が 10^{-2} を超え、堤防決壊が生じた箇所では t_m^* が 10^{-1} を超えるようである（図-4）。

4. 結論

堤体に浸透した水の一部が基盤へ抜け出すことを考慮した堤防脆弱性指標 t_m^* は、不透水性基盤を仮定した堤防脆弱性指標 t^* よりも小さくなり堤防破壊危険性が若干低下することが分かった。このことは、透水性基盤上の堤防でも、不透水性基盤であるとして堤防脆弱性指標を用いても堤防危険箇所の推定が可能であることを示している。

参考文献

- 1) 上村, 福岡ら: 鬼怒川中下流部の平成27年9月大洪水時における堤防被災と堤防脆弱性指標の関係に関する考察, 土木学会関東支部, 第44回技術研究発表会, II-69, 2017.
- 2) 鬼怒川堤防調査委員会: 堤防における漏水発生箇所の詳細調査報告, 2016.
- 3) 福岡ら: 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, 第三回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2016.
- 4) 福岡ら: 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, 2016.7.
- 5) 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.
- 6) Klute, A.: A Numerical Method for Solving the Flow Equation for Water in Unsaturated Materials, Soil Sci., 73, pp. 105-106, 1952.
- 7) 福岡ら: 平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力, 河川技術論文集, 第22巻, 2016.6.
- 8) 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].