

堤防破壊危険性評価と洪水流・氾濫流解析に基づいた 流域水害リスクの分析と被害軽減策に関する研究

中央大学研究開発機構 機構准教授 田端幸輔

概要：

水害リスク軽減に向けた危機管理対策を検討するためには、堤防決壊箇所と氾濫水挙動を適切に評価することが課題となる。これまで、浸透による堤防破壊の発生条件が明確でなかったことから、実務上は洪水水位が HWL またはピーク水位を越えると、堤防が決壊すると仮定して、氾濫計算が実施されてきた。しかし、現実には HWL を超過しても決壊しない場合や、その逆の状況も多く発生している。

本研究では、堤防脆弱性指標 t^* から、堤体浸透による破堤条件（河川水位、時間）を推定する。そして、これに基づいて設定される複数の破堤シナリオを考慮した洪水流・氾濫流解析を実施する。これにより得られる浸水情報を、破壊危険確率 P_f を考慮して集計することで、堤防浸透破壊に対する流域の浸水リスクの空間分布を提示することを目的とする。

キーワード：堤防脆弱性指標、堤防破壊危険確率、堤防決壊、水害リスク、鬼怒川平成 27 年 9 月洪水

1. はじめに

水害リスク軽減に向けた危機管理対策を検討するためには、堤防決壊箇所と氾濫水挙動を適切に評価することが課題となる。これまで、浸透による堤防破壊の発生条件が明確でなかったことから、実務上は洪水水位が HWL またはピーク水位を越えると、堤防が決壊すると仮定して、氾濫計算が実施されてきた。しかし、現実には HWL を超過しても決壊しない場合や、その逆の状況も多く発生している。

これまで水工学分野で扱われてきた堤防問題は、主として堤防天端からの越水に伴う流速・圧力場の解明や、越流水の作用による堤防裏法尻の侵食被害の予測が中心であった。しかし、余裕高部分を洪水が流れることで発生が懸念される堤体浸透による堤防破壊も同様に重要であり、その危険性や、想定される氾濫被害についても研究されるべきである。申請者は、これまで浸透破壊に対する危険度を表す指標、堤防脆弱性指標 t^* を提示し、 t^* が 0.1 を越えると浸透による堤防決壊が生じる可能性が高くなることを見出している¹⁾。また、信頼性解析によって算定される破壊危険確率 P_f の算定法についても検討してきた²⁾。

本研究では、破堤による浸水被害が生じた鬼怒川 2015 年 9 月洪水外力を対象として、堤防脆弱性指標 t^* から、

堤体浸透による破堤条件（河川水位、時間）を推定する。そして、これに基づいて設定される複数の破堤シナリオを考慮した洪水流・氾濫流解析を実施する。これにより得られる浸水情報を、破壊危険確率 P_f を考慮して集計することで、堤防浸透破壊に対する流域の浸水リスクの空間分布を提示することを目的とする。

2. 検討方法

(1) 検討の流れ

まず、洪水流解析により得られる河道水位の時空間変化、堤体の土質定数（透水係数 k 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）の縦断分布、堤防の横断形状データを用いて、堤防脆弱性指標 t^* を時空間的に算出する。 t^* が 0.1 を越える場所を浸透による破堤箇所として設定する。

次に、絞り込んだ破堤点に基づいて、破堤シナリオを作成する。破堤点以外の箇所は無破堤とし、破堤点では破堤または無破堤のいずれかの条件を考慮し、複数破堤を含む全ての組み合わせを求める。

そして、洪水流解析を再び実施し、それぞれの破堤シナリオにおける破堤点からの氾濫流量を計算する。このとき、1 点目の破堤は t^* が 0.1 を越えた時間に生じるとする。2 点目は、1 点目の破堤に伴う氾濫流出による河道の

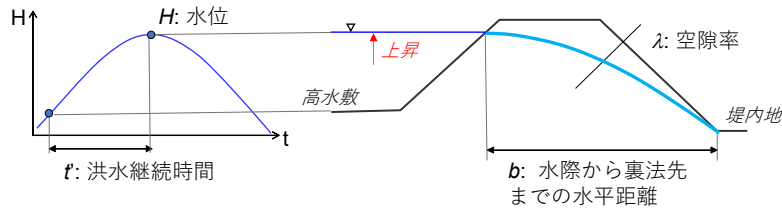


図-1 堤防脆弱性指標の算定に用いる各物理量の定義

水位、流量変化を考慮して算出される水位を用いて、 t^* を算出し、0.1を越える時に破堤が生じるとする。3点目以降も同様の手順である。これにより、各破堤シナリオにおける各破堤点からの氾濫流量を見積もる。

最後に、各破堤シナリオに対して、得られた氾濫流量を用いて流域氾濫計算を実施し、浸水範囲を推定する。そして、地先の浸水深と浸水発生確率（破堤確率）を掛け合わせたものを、全てのシナリオで足し合わせることで、地先の浸水リスクとして評価し、その平面分布によって浸水リスクの空間分布を作成する。

(2) 堤防浸透破壊危険性の評価法

a) 非定常浸潤線の解析

以下に示す内田の式³⁾を用いて堤体内の非定常浸潤線を解析する。この方法は、不透水性基盤上の堤体内浸潤線の時間変化に関する模型実験を行い、図式解法を用いて浸潤線の時間変化を解析した結果得られたものである。

$$h(x, t) = H \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\xi(t)} \right)^{1.5} \right\}, \xi(t) = \sqrt{\frac{8kHt}{\lambda}} \quad (1)$$

ξ は時刻 t における浸潤線フロントの位置を表している。

b) 堤防脆弱性指標 t^*

堤防脆弱性指標は、Darcy 則が成り立つ場合の浸透流の基礎式である Richards 式の無次元化により得られる浸透流ナンバー SF_n を、堤防浸透及びその破壊に適用することで得られる無次元力学指標であり¹⁾、以下の式で表される。

$$t^* = \frac{5Hkt'}{2\lambda b^2} \quad (2)$$

ここに、 H は時刻 t における河川水位に対する堤防前面の水深、 k は堤防の平均透水係数、 t' は水位が高水敷に乗り堤体浸透が開始された後から時刻 t までの経過時間、 b は堤防の水際から裏法先までの水平距離である。(図-1参照)

c) 堤防破壊危険確率 P_f

堤体内浸潤線の発達に伴う堤防法先の泥濘化と裏法滑りを破壊モードとして、これらの発生危険性を、信頼性解析を用いて評価する。本研究では洪水時に堤体内浸潤線の先端が裏法先に達することが、法先の泥濘化を引き起こすきっかけをもたらすと考え、式(3)により泥濘化の性能関数を定義する。

$$LSE_1 = b - \sqrt{\frac{8kHt}{3\lambda}} \quad (3)$$

式(3)の右辺第一項は、時刻 t に河川水位が H となったときの水際から堤防裏法までの水平距離、第二項は内田の式(式(1))による浸潤線の先端位置 ξ を表している。

裏法滑りは、浸潤線の発達に伴う裏法斜面の滑り円弧の力学的なつり合い条件を考えた性能関数(式(4))によって評価する。

$$LSE_2 = \left\{ \sum c\Delta l + (w - u\Delta a)\cos\theta \tan\phi \right\} - \sum w \sin\theta \quad (4)$$

ここに、 c は粘着力、 Δl はスライス片の円弧長、 w はスライス片の重量、 θ はスライス片の斜面勾配、 u は間隙水圧、 Δa はスライス片の幅、 ϕ は内部摩擦角である。

それぞれの確率密度分布に基づいて、モンテカルロ法によりランダムに抽出される土質定数を式(3)、(4)に与え、泥濘化と裏法滑りの発生の有無を調べる。この試行を複数回実施し、破壊判定となった回数を総試行回数で除すことで破壊危険確率を算出する。また、完全独立の条件により、二つの破壊モードの和事象の確率を以下の式により算定した。

$$P_f = p_{f1} \cup p_{f2} = p_{f1} + p_{f2} - p_{f1} \cdot p_{f2} \quad (5)$$

なお、堤防土質定数は、堤防ボーリング調査データを基に設定した。確率密度分布と変動係数は、田端らの研究により得られた値²⁾を用いた。

(4) 洪水流、堤防浸透破壊、氾濫流の解析

河道洪水流は一般座標系平面二次元解析法を、氾濫流はデカルト座標系平面二次元解析法を用いた。氾濫解析メッシュはデカルト座標系の直交構造格子で構築し、八間堀川や主要幹線道路、個々の家屋を概ね表現できるように計算メッシュサイズを $5\text{m} \times 5\text{m}$ とした。計算メッシュの平均地盤高は、平成27年9月洪水氾濫の後の航空レーザー計測によって得られたDTM (Digital Terrain Model)データ(以下、LPデータ)を基に設定した⁴⁾。

決壊後の破堤幅の拡大については、以下のように簡単に扱うものとした。2015年洪水で決壊した鬼怒川21.0k左岸堤防で観測された結果から、決壊幅の時間変化を次のとおり設定した。

- ・決壊直後：決壊幅約20m
- ・180分後：200m(最終決壊幅)

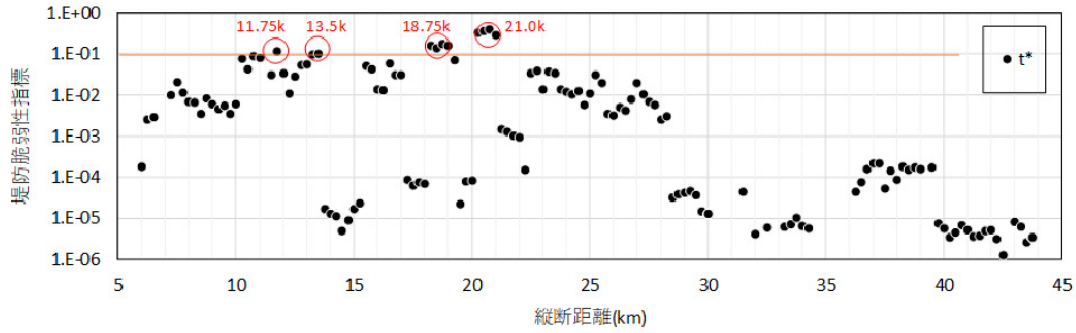


図-2 鬼怒川 2015 年洪水を外力とした場合の堤防脆弱性指標 t^* の縦断分布

表-1 破堤シナリオと各破堤点の破堤・無破堤確率および同時確率

case	破堤				破堤または無破堤となる確率				同時確率
	21kL	18.75kL	11.75kL	13.5kL	21kL	18.75kL	11.75kL	13.5kL	
case1	破堤	無破堤	無破堤	無破堤	0.157	0.570	0.671	0.693	0.042
case1-1	破堤	破堤	無破堤	無破堤	0.157	0.317	0.726	0.740	0.027
case1-2	破堤	無破堤	破堤	無破堤	0.157	0.570	0.328	0.693	0.020
case2	無破堤	破堤	無破堤	無破堤	0.667	0.279	0.659	0.694	0.085
case2-1	無破堤	破堤	破堤	無破堤	0.659	0.279	0.276	0.708	0.036
case2-2	無破堤	破堤	無破堤	破堤	0.667	0.279	0.659	0.219	0.027
case2-3	無破堤	破堤	破堤	破堤	0.663	0.279	0.276	0.219	0.011
case3	無破堤	無破堤	破堤	無破堤	0.611	0.570	0.278	0.672	0.065
case3-1	無破堤	無破堤	破堤	破堤	0.639	0.573	0.278	0.222	0.023
case4	無破堤	無破堤	無破堤	破堤	0.667	0.612	0.659	0.219	0.059

本研究では、21.0k 左岸以外の決壊推定箇所が決壊幅の進行速度と最終決壊幅が、これと同じになると仮定することで、洪水時における堤防決壊幅の拡大を表現した。

3. 検討結果

(1) 決壊危険箇所の推定

図-2 に鬼怒川 2015 年洪水を外力とした場合の堤防脆弱性指標 t^* の縦断分布を示す。この洪水では、水位はいずれの地点も高く、ほぼ堤防満杯となり、堤防余裕高部分を使って流れたが、 t^* によると、浸透破壊危険箇所は絞られる。これは、浸透破壊危険箇所が水位だけでなく洪水継続時間、堤体透水係数、空隙率、堤防幅の組み合わせによって決まるためである。この結果から、決壊危険箇所、すなわち $t^* > 0.1$ となる点は、21.0k, 18.75k, 13.5k, 11.75k の 4 点に絞られる。

(2) 複数点での破堤を考慮した破堤シナリオの設定

推定された決壊危険箇所 4 地点のうち、1 地点が決壊すると、氾濫流出により破堤点の下流の流量と、上下流の水位が低下する。このとき、残り 3 地点の t^* が 0.1 を越えるかどうかを確認した。以上を全てのケースについて実施し、決壊時刻と、そのときの P_f の値を計算した。なお、ここでは、前述の P_f (堤防破壊危険確率) を「破堤確率」と呼ぶこととする。無破堤確率は、1-破堤確率 ($1-P_f$) で定義する。

表-1 に、検討の結果得られた破堤シナリオと各破堤点の破堤・無破堤確率および同時確率を示す。決壊地点は 4 つであり、複数破堤を考慮すると、破堤シナリオは計 11 パターンとなった。同時確率は、21kL, 18.75kL, 11.75kL, 13/5kL の破堤または無破堤確率の積で表される。この値が、各 case における地先の氾濫被害の生起確率として与えられる。

(3) 破堤シナリオに対する浸水氾濫範囲の予測

図-3 に、代表して case2 と case2-3 における氾濫流量と最大浸水深のコンター図を示す。決壊箇所が異なると、当然浸水範囲も異なる。しかし、どの地点が決壊しても、座標 (16000m, 4000m) の付近は浸水することが分かる。

また、case2-3 が最も浸水範囲が広く、浸水深も大きくなるが、表-1 に示した破堤の同時確率によると、case2-3 の発生危険性は最も小さい。このため、case2-3 は低頻度大規模災害となるケースであることが分かる。一方、case2 は浸水範囲、浸水深は小さいが、破堤同時確率は最も大きい。このため、case2 は高頻度であるが比較的小規模な災害となる。このような結果をもたらす理由は、氾濫流量の違いにある。決壊危険性が高くても、破堤数高が高い場合には、氾濫流量は小さめに算定される。逆に、決壊危険性がそれほど高くなくても、破堤数高が低い場合には、氾濫量が大きく算定され、大規模な被害をもたらすことになる。以上より、 t^* や P_f による評価結果だけでなく、氾濫流量、氾濫被害も検討し、総合的に危険度を判断することがリスク評価では重要となる。

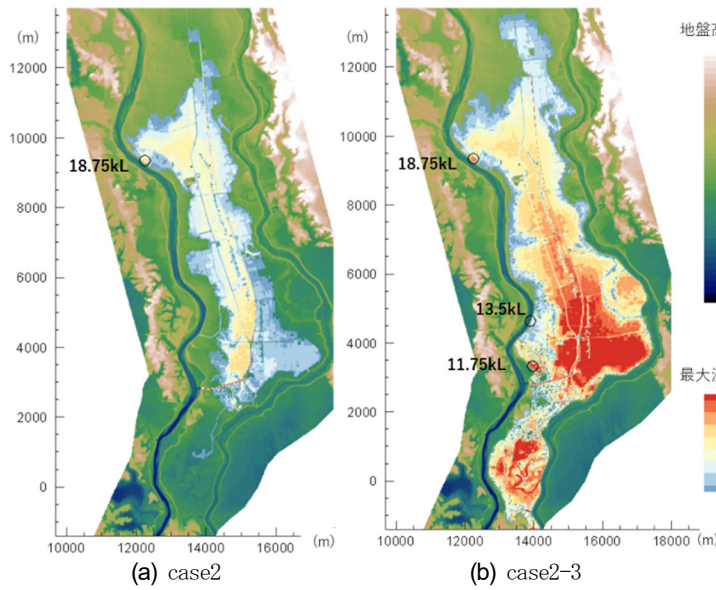


図-3 破堤シナリオにおける浸水計算結果

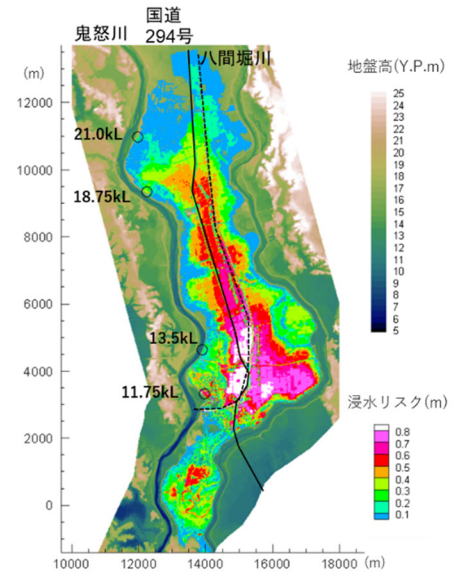


図-4 浸水リスクの空間分布

(4) 地先毎の浸水氾濫リスクの空間分布の検討

各ケースの浸水深に破堤同時確率を掛けたものを、全てのケースで足し合わせることで、浸水リスクを定義し、その空間分布を描画した。図-4 に、浸水リスクの空間分布を示す。

図の赤色～白色は、どの地点が破堤しても、浸水するリスクが高い地域であると言える。常総市街地は、主として河川沿いの自然堤防（微高地）に形成されているため、市街地の浸水リスクは相対的には低く、農地の浸水が大部分を占めることが予想される。ただし、国道 294 号が標高の低い部分を南北に通っており、浸水リスクの高い領域（図の赤色や白色）も含むことが確認される。このため、破堤氾濫時には交通インフラの断絶が懸念されることになる。よって、浸水リスクの高い地域では、避難所の設立を避けることや、避難ルートとしても利用しないような規制を検討することが必要である。

また、浸水のリスクの高い領域は、南東部に集中している。このため、湛水の長期化を回避するためには、内水小河川網（八間堀川）を整備し、鬼怒川だけでなく東側を流れる小貝川への排水も含めて効果的な排水計画の立案が必要になる。

4. おわりに

破堤点ごとに、当然浸水範囲は異なるが、鬼怒川の沿川の常総市の場合、どの場所が破堤しても必ず浸水の危険性があるところが特定された。この地域は、浸水リスクが極めて高いことを意味している。このため、このよ

うな地域については、本研究により推定された氾濫に対する被害リスク結果に基づいて、避難行動の在り方や湛水長期化を回避する上での排水計画立案等について積極的に検討していくことが必要である。

また、浸水被害を最小限にとどめるためには、まずは河川の流下能力を高めるための整備（河道掘削，河道線形の是正，粗度・樹木管理など）と、堤防強化が重要である。これらを実施することで、氾濫危険度をかなり提言できることが期待できるため、着実な実施を続けていくことが重要である。本手法は、これまでに経験した最大規模の洪水（鬼怒川 2015 洪水）のみを対象とし、破堤確率を考慮してリスクを算定したが、今後は、更に大規模な洪水に対するリスクや、逆に、どの程度の小規模氾濫であれば被害を許容できるのか、すなわち許容リスクについても明らかにし、鬼怒川のような低平地河川の水害リスク評価手法を構築していく必要がある。

参考文献

- 1) 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—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_1435-1440, 2018.
- 2) 田端幸輔, 福岡捷二, 瀬崎智之：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1273-I_1278, 2015.
- 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) 田端幸輔・福岡捷二・吉井拓也：平成 27 年 9 月鬼怒川流域における洪水流・氾濫流の一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1399-I_1404, 2018.