

河道形状が堤防決壊拡幅現象に与える影響

THE EFFECT OF RIVER CHANNEL SHAPE ON LEVEE BREACH PROCESSES

島田友典¹・渡邊康玄²・横山洋³・米元光明⁴

Tomonori SHIMADA, Yasuharu WATANABE, Hiroshi YOKOYAMA,
and Mitsuaki YONEMOTO

¹正会員 寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北見工業大学 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³正会員 工博 寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴非会員 国土交通省北海道開発局河川計画課 (〒080-8585 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

It is important mitigating flood damage by overflow from a levee breached. The mechanism of levee breach has not been clarified. This study aims to clarify the below point, the effect of river channel characteristics on levee breach processes by using a numerical model to simulate levee breaches based on results of the experiments. The results of the simulation are as follows: In the case of Froude number becomes larger, levee breach widening is dominant. In the case of Froude number becomes smaller, river bed erosion is dominant. And the phenomenon switches when the Froude number is about 0.5.

Key Words: Levee breach process, Efficient of river channel characteristics

1. はじめに

近年, 台風や局所的な集中豪雨などに起因した出水により大規模水害の発生リスクが高まってきており¹⁾, 河川堤防の整備が進んでいる今日でも堤防決壊が発生している. 2015年関東・東北豪雨²⁾では鬼怒川において越水が起因とされる堤防決壊が生じ, 広範囲で長時間にわたる浸水や家屋の流出などがリアルタイムで放送され, 堤防決壊がもたらす被害規模の甚大さを目の当たりにしたところである. その後も2016年に北海道豪雨³⁾, 2017年に九州北部豪雨⁴⁾, 2018年に西日本豪雨⁵⁾と毎年のように堤防決壊に至るような出水が発生している.

特に堤防決壊による被害は甚大であり, 過去の事例ではその8割以上が越水に起因するものとされている. 越水破堤に関する研究は様々な観点や手法(実験・現地調査・数値計算)で進められており, 島田らはそれらを体系的に整理しレビューを行っている⁶⁾. また近年では服部ら⁷⁾が堤防被災状況を取りまとめデータベースを作成しており, 越流水深や堤体表面の被覆状況と堤防決壊有無の関係性を整理している.

一方で藤田ら⁸⁾は洪水外力から水害被害の軽減に至るまで, 減災システム整備という観点から破堤現象に関する課題を整理し, 破堤被害軽減の重要性を示している. その中で堤防決壊の有無だけでなく時間経過も重要であ

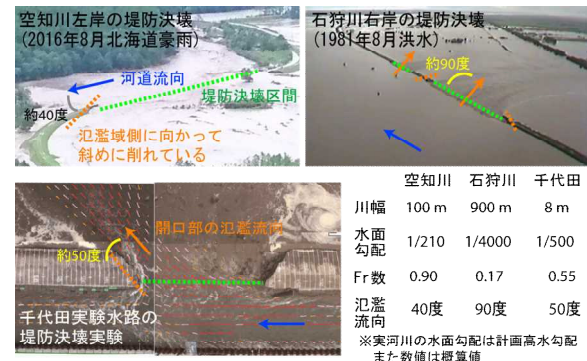


図-1 河道特性に応じて異なる破堤形状の一例

るため, 破堤拡幅メカニズムの解明, 定量化に関する研究を深めることが必要であると述べている.

図-1は実河川での堤防決壊時における破堤開口部の形状であるが, 空知川³⁾では破堤開口部が下流方向に進行する傾向, 石狩川⁹⁾では破堤開口部の中央に速い流れが存在する正面越流に近い傾向を示すなど破堤拡幅メカニズムが異なることが確認できる. このような中, 国土交通省北海道開発局と土木研究所寒地土木研究所では破堤拡幅メカニズムの解明を目的に, 2008年度から十勝川千代田実験水路¹⁰⁾(以下, 千代田実験水路と称す)において実物大規模での越水破堤実験を行っている. これらの実験では空知川の事例同様に下流方向に拡幅進行する傾向であり(図-1), 越水から4つのステップを経て破堤

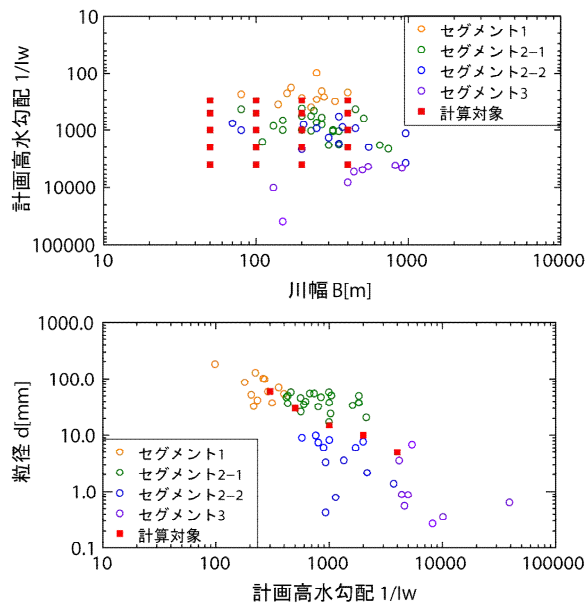


図-2 北海道内一級河川の計画高水勾配と川幅・粒径

拡幅すること、破堤拡幅過程に重要である堤体崩壊量は破堤開口部周辺の無次元掃流力を用いて、掃流砂量式に近い形で表現できることを示すなど様々な知見を得ている⁸⁾。さらにこれらの知見をもとに柿沼らは水量量に応じて破堤拡幅過程を表現できる数値計算モデル「Nays2 D Breach¹¹⁾」を開発し、島田らは河道形状を変えた破堤模型実験とその再現計算を行い、河道特性の異なる条件においても本モデルで破堤現象を再現できることを示し、河道形状に応じた破堤特性を分類整理した^{12), 13)}。しかしながら破堤特性分類は傾向把握までであり、実河川において堤防が決壊した場合、どのような破堤拡幅過程を示すかまで明確に示すには至っていない。

本論文では北海道内一級河川全ての基準点・主要地点における河道形状や堤体形状を収集整理し、それらを包括するような条件下での破堤拡幅現象について数値計算により破堤進行過程特性を明らかにするとともに、河川管理者が管理する河川の破堤拡幅形態を事前に把握出来ることを念頭に破堤現象に与える要素を示し整理を行った。さらに得られた知見より、破堤被害軽減のための考え方を示した。

2. 北海道内における河道形状と堤体形状

河道特性が破堤拡幅現象に与える影響を把握するため、実河川の河道形状、及び堤体形状の整理を行った。

図-2に北海道内の一級河川の河川整備基本方針⁴⁾に記載されている基準・主要地点における川幅（現況測量横断）と計画高水勾配（整備計画附図に記載）の関係を示すとともに、既往の検討^{12), 13)}では勾配が変化させても同一の粒径（千代田実験水路の粒径）で検討をしていたため、計画高水勾配と粒径（河川整備基本方針検討で設

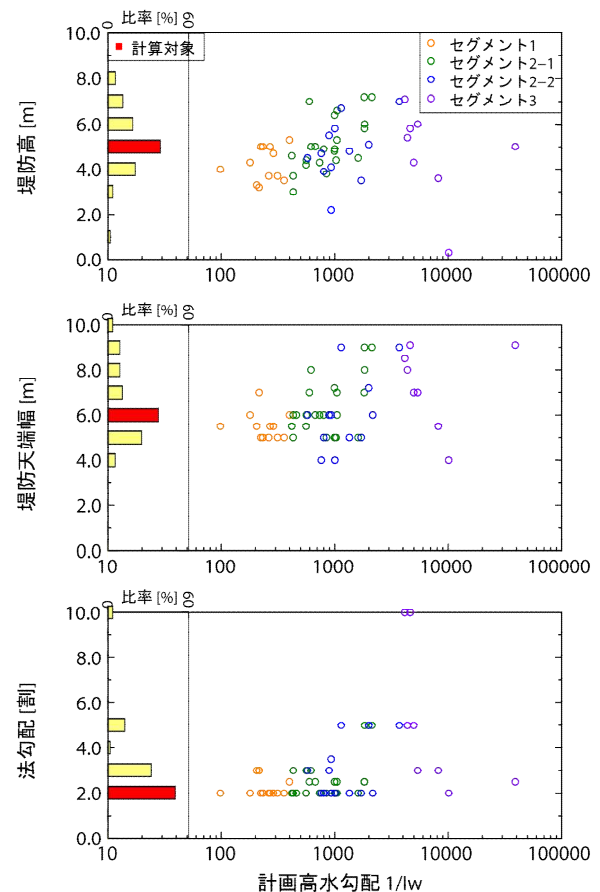


図-3 北海道内一級河川における堤体形状

定した代表粒径) の関係も示す。

図-3に北海道内の一級河川の河川整備基本方針における堤体形状のうち堤防高（現況堤防天端高標高-現況測量横断の平均高水敷高）、天端幅・法勾配（計画、及び暫定計画値）を示すが、ここではいずれも左右岸の平均値としている。

以降の計算ではこれらの整理した実河川データを元に計算条件の設定を行っている。

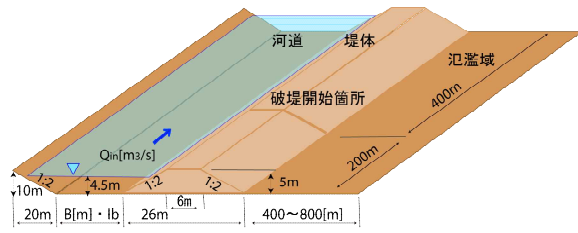
3. 計算概要

(1) 計算モデルの概要

Nays2D Breachの基本となるモデルはiRIC Nays2D¹⁵⁾であり、河道や氾濫域は2次元浅水流河床変動計算を行い、堤防部分の破堤拡幅進行のみ千代田実験水路での破堤実験結果より得られた無次元掃流力と堤体崩壊量の関係式(1)⁹⁾を組み入れてモデル改良を行っている。

$$q_* = \frac{dV}{dt} \frac{1}{\sqrt{sgd_{50}^3 B_m}} (1 - \lambda) = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (1)$$

ここで、 q_* ：無次元堤体崩壊量、 V ：堤体崩壊量、 t ：時間、 s ：砂粒の水中比重、 g ：重力加速度、 d_{50} ：砂粒の50%通過粒径、 B_m ：堤体下幅、 λ ：空隙率、 τ_* ：無次



lb	Q _{in}				n	d ₅₀	Fr	U
	B = 50m	100m	200m	400m				
1/300	1533	2892	5615	11062	0.026	60	0.89	5.9
1/500	1342	2533	4917	9686	0.023	30	0.78	5.2
1/1000	1039	1961	3808	7501	0.021	15	0.60	4.0
1/2000	812	1533	2976	5863	0.019	10	0.47	3.1
1/4000	642	1212	2352	4633	0.017	5	0.37	2.5

ここで 【河道特性】 lb: 河床勾配、B: 河道下幅[m]、n: 粗度係数、d₅₀: 粒径[mm]
 【水理量】 Q_{in}: 河道流量[m³/s]、Fr: フルード数、U: 河道断面平均流速[m/s]

図-4 計算水路形状と計算ケース

元掃流力、 τ_c : 無次元限界掃流力、 α^* 、 β^* : モデル定数を示す。 τ_c は破堤開口部近傍の上流、及び下流の氾濫流の水理量より算出しこれを堤体に作用する外力とし、堤体崩壊量 dV/dt を算出することで破堤拡幅が進行するが、詳細についてはNays2D Breachのマニュアル¹¹⁾を参照されたい。

(2) 計算条件

検証に用いる河道形状、及び計算ケースを図-4に示す。

河道形状は図-2を参考に様々な実河川の河道形状を包括するように川幅4パターン、河床勾配5パターンの全20ケースを選定した。今回は特に河道特性の相違が破堤拡幅現象に与える影響理解が目的であるため、堤体形状については図-3を参考に最頻値である堤防高5m、天端幅6m、法勾配2割を代表値とした。

粒径は河床・堤体ともに図-2を参考に勾配に応じて代表的な粒径を d_{50} として選定し、粗度係数はManning-Stricklerの式(2)を用いて粒径に応じて算出した。

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (2)$$

ここで、 n : 粗度係数、 k_s : 相当粗度であり粒径 d_{50} を用いた。

境界条件は河道については下流端を自由流出とし、上流端からは図-4に示す流量を河道内の等流水深4.5mを満たすように決定し定常流として与えた。氾濫域については下流端と側方を自由流出とした。計算格子は2m×2m、計算時間刻みは0.05秒とした。計算時間については、経験式による破堤開口幅⁶⁾の算出にあたり破堤開始から1時間で最終破堤幅に到達すると仮定しており、それとの比較も念頭に破堤開始から5時間まで計算を行った。

なおNays2D Breachは越水から破堤拡幅過程に至る堤体が下刻する侵食過程は表現できない。そのため、越水から破堤拡幅に至るこの間の過程を簡略化して破堤開始箇所の河道水深が4.5m（千代田実験水路における破堤実験では破堤のきっかけとして堤防高-0.5mに切欠を設け

た）で流れが安定した後、既往の千代田実験水路での破堤実験⁹⁾も参考に堤防の縦断方向8m区間が基盤高まで瞬時なくなるものとした。これらの設定方法等の詳細については既往文献^{12), 13)}を参照されたい。

4. 河道特性に応じた破堤拡幅進行過程

(1) 破堤進行過程概要

図-5に破堤開始から1, 3, 5時間後の平面流況及び河床形状を示すが、既報^{12), 13)}より破堤拡幅現象により大きな影響を与えるのは河床勾配であると考えられることから、ここでは川幅は200m（図-2に示した河道形状整理より中央値付近）、河床勾配は全ケース1/300～1/4000（Fr数0.91～0.38）を対象とした計算結果を示す。また同一勾配であっても水深や流速が異なること、得られた知見の一般化を念頭におくことから、以降では勾配だけでなく河道水理量としてFr数を併記する。

勾配が急（Fr数が大）な場合、氾濫流況は破堤開口部から氾濫域に向かい斜め方向に流出し、速い流れが破堤開口部下流側に作用することで破堤拡幅が進行している。また開口部下流側の堤体形状は図-1の空知川と同様に、氾濫域側に向かい斜め方向に侵食されている。

勾配が緩く（Fr数が小）なるに従い、氾濫流向は徐々に堤防法線に対して直角方向へと切り替わっていき、また速い流れは開口部中央付近に見られるようになる。特にFr数が0.5を下回ると破堤開口部下流側から逆流するように氾濫域に向かう流れも現れ始め、その流れにより破堤開口部は河道側にハの字形状に侵食されている。また破堤幅は急勾配に比べると狭いものの、開口部の基盤洗掘は大きくなっている。

(2) 破堤開口幅と氾濫流量の時系列変化

図-6上段に堤防天端中央の破堤開口幅と10分毎の拡幅速度、中段に氾濫流量と10分毎の氾濫流量変化量、下段に堤防天端中央測線（破堤開口幅の計測測線上）の河床基盤高からの平均量の時系列変化を示す。

勾配が急（Fr数が大）な場合、破堤開口部から氾濫域に向かう速い流れが特に破堤開口部の下流側堤体に作用することで下流方向への拡幅が顕著であり、破堤幅・拡幅速度は大きくなる。

勾配が緩く（Fr数）なるに従い、破堤幅は広がりづらくなるが、基盤の洗掘量は大きくなる。これは速い流れが開口部中央付近に位置することからも、速い流れが堤体に作用しづらく、破堤拡幅よりも堤体部基盤の洗掘が顕著になるためと考えられる。

図-7に破堤幅と氾濫流量、及び基盤洗掘深の関係を示す。これより破堤拡幅に伴い氾濫流量は増加するが、勾配1/1000～1/4000では①破堤幅20～50m程度、勾配1/300

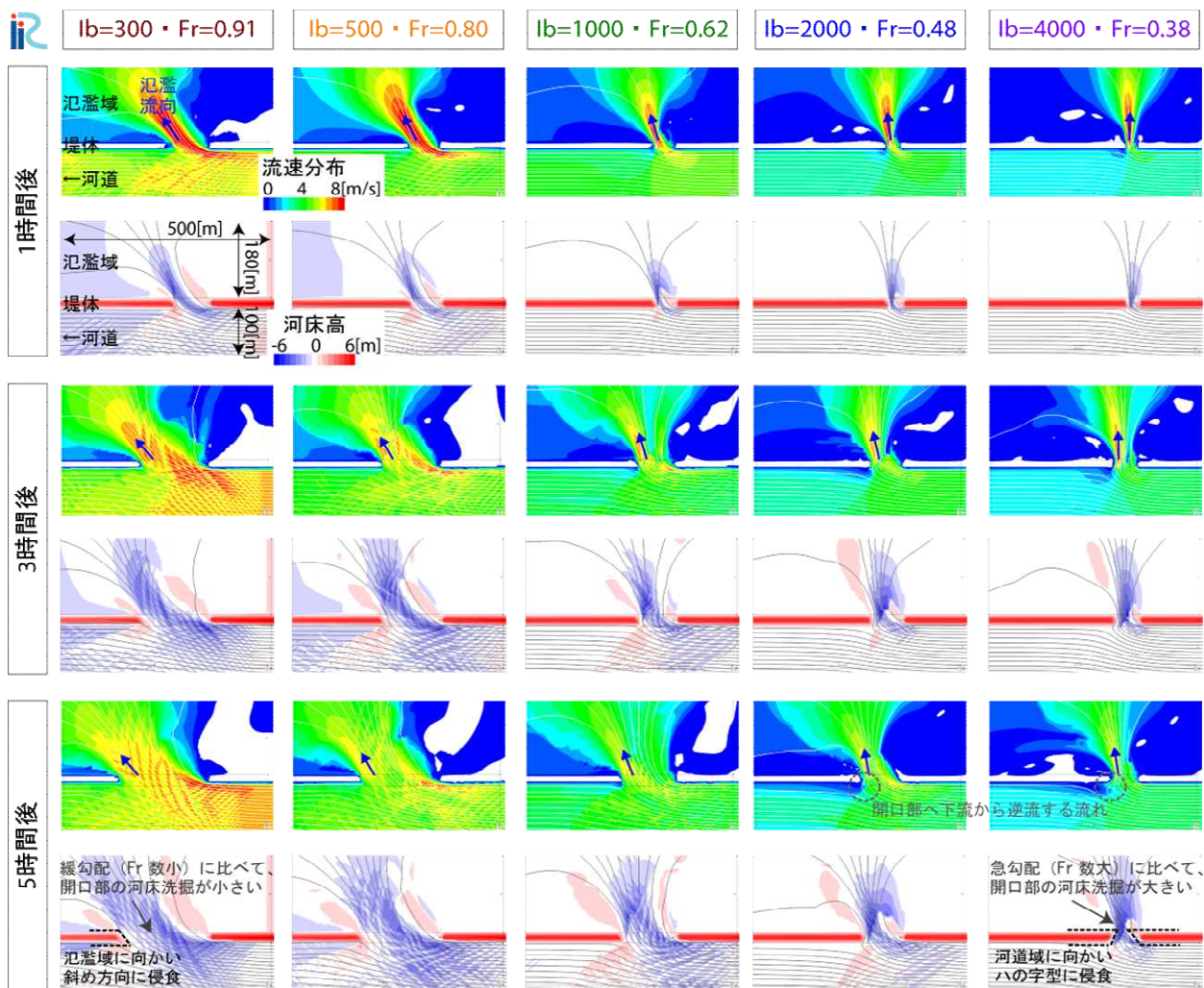


図-5 河道形状に応じた流況及び河床形状の進行過程 (川幅200m) (上段：流況，下段：河床形状)

～1/500では②破堤幅50～100m程度の区間において、やや下に凸となり氾濫流量が増加している。これは基盤洗掘が大きくなる時間帯と同じであり、破堤幅だけでなく基盤洗掘量が氾濫流量の増加に寄与することを意味しており、例えば破堤拡幅速度が緩やかとなった場合でも、基盤洗掘に伴う氾濫流量の変化に留意が必要である。

図-6上・中段に10分毎の破堤拡幅速度、氾濫流量変化量を示すが、いずれのケースにおいても破堤開始から1時間内で最大値を示している。これは破堤開始直後では河道水位が高い状況から氾濫域側に急激に氾濫流が流れ込むためであり、開口部の流速が高い状況からも確認出来る。これより特に破堤初期においては破堤部周辺では家屋流出等の危険性があるだけでなく、その周辺でも急激な浸水が想定されることから、破堤前の早期避難が重要だと言える。

(3) 破堤開口幅および累積氾濫流量の時間変化量

図-8に今回検討を行った全20ケースの破堤開口幅、及び被害規模推定のため重要である累積氾濫流量の1時間毎の増加量とその累積量を示す。

破堤開口幅について図-6上段の時系列変化と同様に、

勾配が急 (Fr数が大) になるほど開口幅は広くなるとともに、同一勾配の場合は川幅が広くなるに従い大きくなることがわかる。またいずれのケースも破堤開始から1時間の破堤幅変化量が大きくなっており、今回の条件では1時間で最大100m近く破堤拡幅が進行しているケースがあることから、堤防決壊直後の被害軽減対応はきわめて困難となることが考えられる。

累積氾濫流については河道流量が異なるためケース毎の単純な比較は難しいが、破堤開口幅と同様に勾配が急 (Fr数が大)、そして川幅が広くなるほど大きくなる。一方で破堤開口幅では決壊直後から1時間の変化量が最大であったが、累積氾濫流量では時間の経過とともに大きくなっている。これは破堤初期では図-6中段のように瞬間的な氾濫流量変化量は大きいものの破堤開口幅はまだ拡幅過程段階であることから、累積氾濫流量は増加していない。そして拡幅が進むとともに氾濫域側への累積氾濫流量が増加し、浸水範囲や浸水深が大きくなると考えられる。このため破堤開始から一定時間が経過した場合であっても、氾濫流量を軽減させるための対応、例えば現地対応の困難さはあるものの、万が一、破堤拡幅段階となった場合においても、少しでも拡幅速度や拡幅量

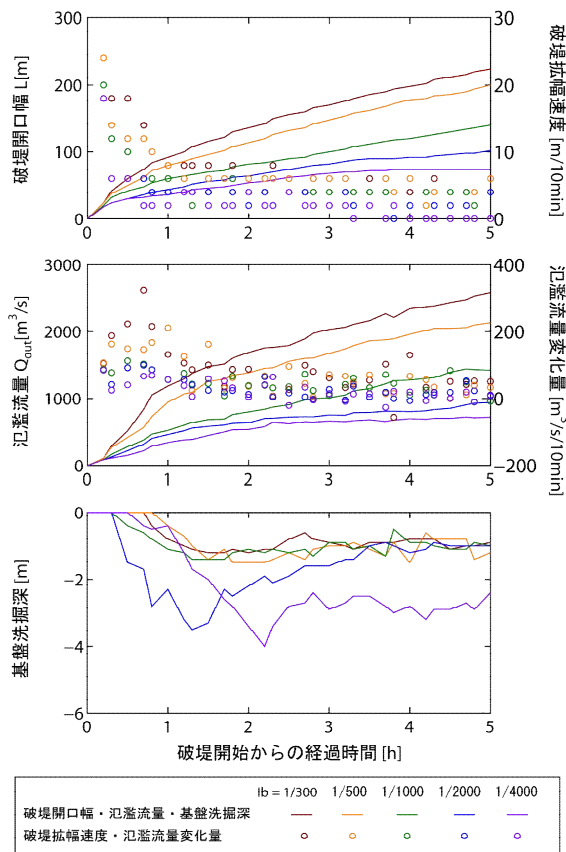


図-6 破堤開口幅、氾濫流量、基盤洗掘深の時系列変化

を抑制するような技術の開発¹⁸⁾も重要であり、その結果、災害時の被害軽減だけでなく、災害後の早期復旧（例えば排水ポンプ車による排水時間の短縮）につながる可能性もある。

なお今回の検討では河道流量を破堤開始時のピーク流量として一定流量を通過しているが、実河川ではハイドロ減衰時等により破堤開口幅や累積氾濫流量の時間変化量は今回のケースより小さくなることも考えられる。しかしながら、今後の気候変動に伴い懸念される局所的な集中豪雨の頻発やそれに起因する洪水継続時間の長期化等も考えられることから、少しでも越水から決壊までの時間を引き延ばすことが出来れば被害規模軽減につながる事が出来る。例えば現在、国道交通省が全国で進めている危機管理型ハード対策¹⁷⁾、また対策対象外区間においても越水時に堤防決壊までの時間の引き延ばしが可能となる水防技術工法等の検討・開発が急務である。

5. 河道特性に応じた破堤拡幅現象の分類

ここまで述べたように河道特性のうち特に勾配（Fr数）に応じて破堤拡幅現象が異なることが明らかとなったが、河川管理者が管理する河川において万が一、破堤した場合にどのような破堤拡幅現象となるのかをあらかじめ把握出来れば、それに応じた事前の準備や堤防決壊

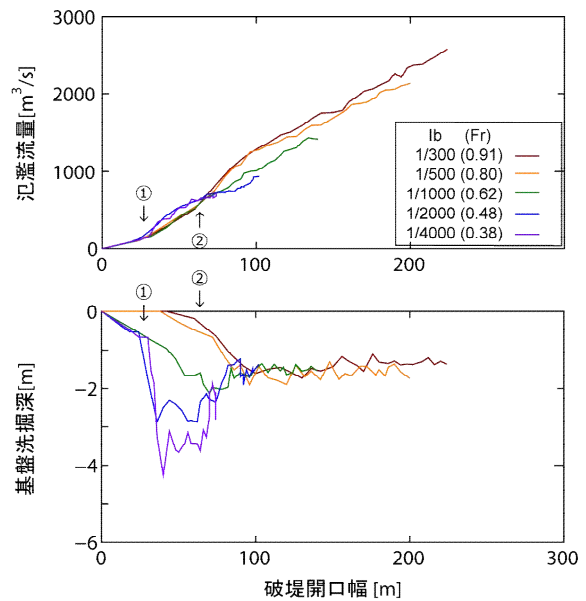


図-7 破堤開口幅と氾濫流量及び平均基盤洗掘量の関係

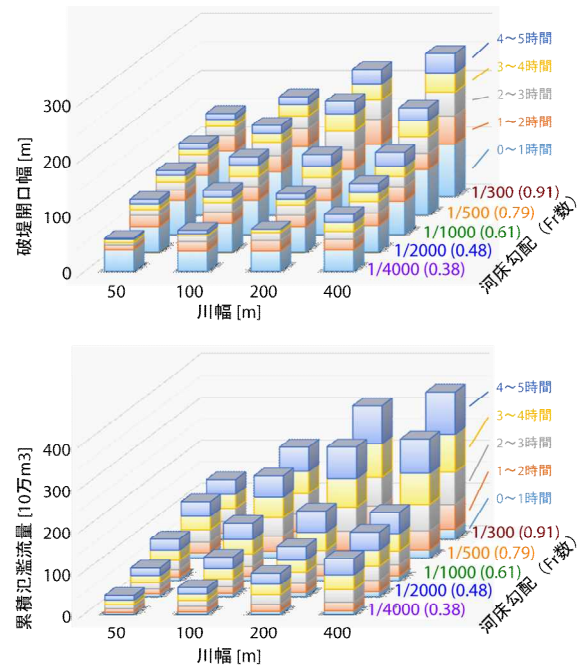


図-8 破堤開口幅、及び累積氾濫流量の時間変化量

時の対応などを迅速に行うことが期待できる。実堤防では法面の芝や天端の舗装、裏法尻ドレーン等、様々な要素はあるものの、ここでは計画高水時の条件を想定し、破堤開始時における河道内のFr数と破堤拡幅進行過程時における破堤開口部の流向について整理する。ここでは計算を行った全20ケースを対象に決壊から5時間後まで、10分毎に破堤開口部の流向、及び勾配毎の平均流向を求めた。なお開口部の位置によっては流速が大きく異なることから、ここでは流速を加味した加重平均により氾濫流向を算出している。

図-9に破堤開口部の氾濫流向とFr数の関係を示す。これよりFr数が多いほど開口部流向は流下方向に近くな

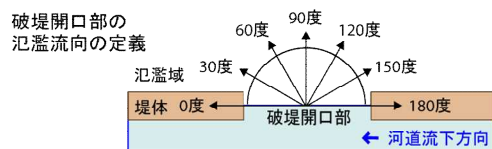
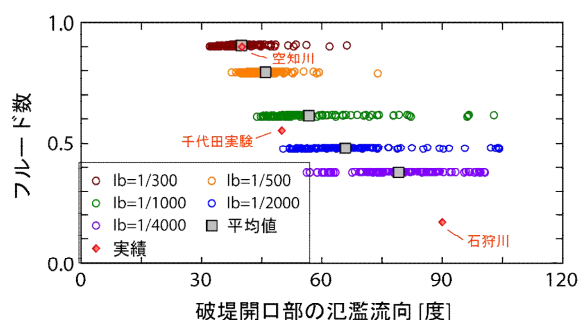


図-9 Fr数と破堤開口部氾濫流況との関係

り、Fr数が小さくなるに従い堤防法線に対して直角方向へと変化していくことが確認出来る。

ここで今回の求めた関係性の妥当性を確認することを目的に、図-11に示す実破堤事例、および千代田実験水路における破堤実験結果からFr数と破堤氾濫流向を推定したものの併記するが、計算で求めた関係と概ね一致している。限られた破堤事例ではあるが、これより河川管理者が管理する河川の計画高水流量時の河道内のFr数を事前に求めておくことで、概ねの破堤形態が推定出来る可能性を示唆するものであり、全国の河川系事務所が堤防決壊時の緊急対策シミュレーション等を実施する際にも参考として、より実態に近い破堤拡幅現象を理解出来るとともに堤防決壊時の被害軽減につながるための知見になると考えられる。

6. まとめ

本論文では河道特性のうち川幅とFr数・河床勾配に着目し、破堤現象のうち破堤拡幅進行過程の理解を目的に数値計算を行い、次のことが明らかとなった。

- ・河床勾配が急な場合（Fr数が大）、破堤開口幅は縦断方向に拡幅するが、河床勾配が緩い場合（Fr数が小）では、破堤開口部周辺の基盤洗掘が顕著となる。

- ・破堤拡幅速度は破堤開始段階が最も大きく、それに伴い氾濫流量も急激に増加する一方、累積氾濫流量の時間変化量は、時間の経過とともに増大する。

- ・破堤現象の分類について河道特性のうちFr数を用いることで現象を説明出来ることを示した。Fr数が大きければ縦断方向へ拡幅進行する形態、Fr数が小さくに従い基盤洗掘が顕著となる正面越流破堤に近い形態となる。

謝辞：本研究を行うにあたり、十勝川実験水路アドバイザー委員会と同検討会より、多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について(答申)，国土交通省，2015。
- 2) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会報告書，関東地方整備局，2016。
- 3) 土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書，2017。
- 4) 平成29年7月九州北部豪雨災害に関する情報，九州地方整備局，http://www.qsr.mlit.go.jp/bousai_joho/H29hokubugouu.html
- 5) 高梁川水系小田川堤防調査委員会，中国地方整備局，2018。
- 6) 島田友典，渡邊康玄，横山洋，辻珠希：千代田実験水路における横断堤越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第53巻，pp. 871-876，2009。
- 7) 服部泰士，二瓶泰雄，大槻順朗，八木澤順納：実測データベースに基づく河川堤防の越流決壊・破損条件の検討，土木学会論文集B1（水工学），vol.71，No.4，I_1285-1290，2015。
- 8) 藤田光一，諏訪義雄：減災システム整備における河川堤防技術，土木学会河川技術論文集，第6巻，pp.1-6，2006。
- 9) 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅過程に関する実験報告書：国土交通省北海道開発局，土木研究所寒地土木研究所，2012。
- 10) 十勝川千代田実験水路について，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000000ry5o.html（2019年4月3日確認）
- 11) 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅過程に関する実験報告書：国土交通省北海道開発局，土木研究所寒地土木研究所，2012。
- 12) 破堤計算ソフト(Nays2D Breach)，寒地土木研究所寒地河川チーム，<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breach.html>（2019年4月3日確認）
- 13) 島田友典，渡邊康玄，岡部博一，岩崎理樹，中島康博：川幅と河床勾配が破堤現象に与える影響，土木学会論文集B1（水工学），vol.73，No.4，I_1345-1350，2017。
- 14) 島田友典，渡邊康玄，岡部博一，岩崎理樹，中島康博：河床勾配と川幅に応じた破堤拡幅現象の分類，土木学会河川技術論文集，第23巻，pp.411-416，2017。
- 15) 河川整備基本方針・河川整備計画，国土交通省，http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html#map4（2019年4月3日確認）
- 16) iRIC，一般社団法人iRIC-UC，<https://i-ric.org/ja/>（2019年4月3日確認）
- 17) 氾濫シミュレーションマニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-，建設省土木研究所資料，第3400号，1996。
- 18) 水防災意識社会再構築ビジョン，国土交通省，<http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/>（2019年4月3日確認）
- 19) 島田友典，横山洋，山本太郎，友田隆啓，米元光明：堤防決壊時に行う緊急締切作業の効率化に向けた技術検討，土木学会河川技術論文集，第24巻，pp.645-650，2018。

(2019. 4. 2受付)