

河床勾配と川幅に応じた破堤拡幅現象の分類

CLASSIFICATION OF LEVEE BREACH PROCESSES ACCORDING TO CHANNEL BED SLOPE AND CHANNEL WIDTH

島田友典¹・渡邊康玄²・岡部博一³・岩崎理樹⁴・中島康博⁵

Tomonori SHIMADA, Yasuharu WATANABE, Hirokazu OKABE, Toshiki IWASAKI and Yasuhiro NAKASHIMA

¹正会員 土木研究所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 北見工業大学教授社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

³非会員 国土交通省北海道開発局 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

⁴正会員 工博 土木研究所寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-7602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁵非会員 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部 (〒080-8585 北海道帯広市西4条南8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 channel bed profile and channel width on levee breach processes by using a numerical model to simulate levee breaches based on results of experiments using the Chiyoda Experimental Channel. The results of the simulation are as follows: In the case of steep slope channel, levee breach widening is dominant. In the case of mild-slope channel, river bed erosion is dominant.

Key Words: Levee breach process, Bed slope and channel width, numerical model, Nays2D breach

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9月の関東・東北豪雨では鬼怒川において越水に起因する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甚大な被害をもたらした²⁾. また2016年8月には半月のうちに北海道へ3個の台風が上陸するなど道内各地で大雨となり, 石狩川など4河川で計画高水位を超え, 空知川など複数の河川において堤防決壊が生じ, 浸水など甚大な被害をもたらした³⁾.

このような中, 藤田ら⁴⁾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.

そしてこの破堤拡幅メカニズムの解明を目的に, 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

2008年度から十勝川千代田実験水路⁵⁾ (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きている. これらの実験より, 越水から4つのステップを経て破堤拡幅すること, 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⁶⁾. さらにこれらの知見をもとに柿沼ら⁷⁾は水理量に応じて破堤拡幅過程を表現できる数値計算モデル「Nays2D Breach⁸⁾」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⁹⁾. しかしながら破堤特性の分類整理は破堤最終形状についての比較であり, 破堤被害の軽減技術の検討には破堤進行過程を把握することが重要である.

本論文では数値計算を用いて様々な河道形状における破堤現象について破堤進行過程の特性を明らかにした. また氾濫シミュレーションマニュアル(案)で用いられている経験式による破堤開口幅¹⁰⁾との比較を行うことで, 経験式を用いる際の留意点について整理を行った.

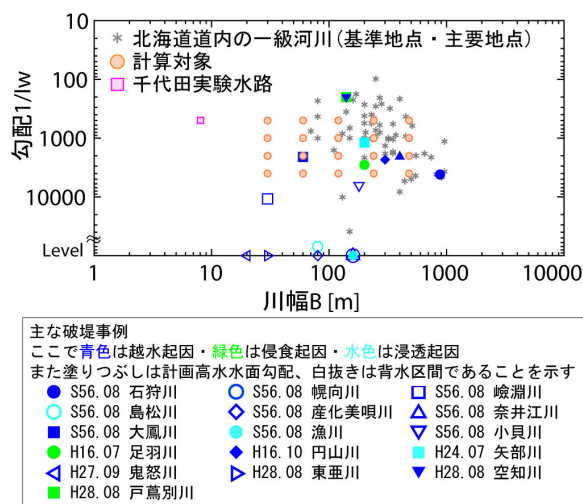


図-1 全国の破堤事例と北海道内一級河川における河道形状及び計算対象

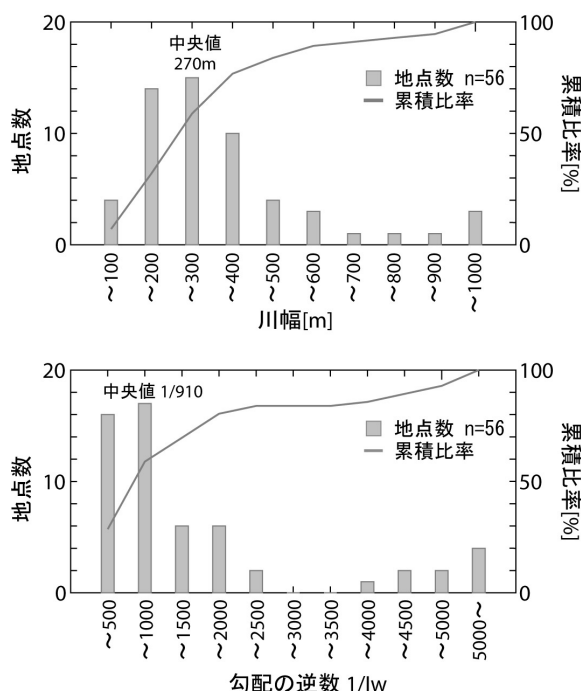


図-2 北海道内一級河川の河道形状

2. 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 Nays2D¹¹⁾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)⁶⁾を組み入れてモデル改良を行っている。

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

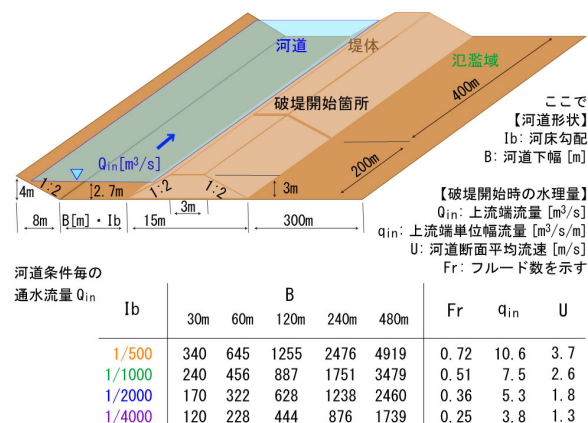


図-3 計算水路形状と計算ケース

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_* は破堤開口部近傍の上流、及び下流の氾濫流の水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、詳細については柿沼らの文献⁷⁾やNays2D Breachのマニュアル⁸⁾を参照されたい。

(2) 河道形状の選定

河道条件が破堤拡幅現象に与える影響を把握するにあたり、破堤災害及び実河川の主要地点における河道形状の整理を行う。

図-1に全国の破堤事例のうち河川整備基本方針¹²⁾等から水面勾配や川幅の記述や読み取りが可能な事例、及び千代田実験水路での破堤実験時における河道条件⁶⁾を示す。これより決壊要因によらず川幅の広狭、勾配の緩急と様々な河道形状において破堤が生じていることが確認できるとともに、千代田実験水路での破堤実験は特に川幅が狭い条件であると言える。また北海道内の一級河川の河川整備基本方針¹²⁾にある基準・主要地点における川幅と水面勾配の関係を図-1に、それらの分布を図-2に示す。

これらを参考に様々な河道形状を包括するように選定し、川幅5パターン、勾配4パターン、全20ケースを対象に検討を行う。

(3) 計算条件

検証に用いる河道形状、及び計算ケースを図-3に示す。その他の条件は千代田実験水路での破堤実験等、これまでの検討を参考とした⁹⁾。堤体形状は高さ3m、天端幅3m、裏法勾配2割とし、粒径は堤体・河床ともに18mm、マニングの粗度係数は0.023とした。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-3に示す流量を河道内の等流水深2.7mを満たすように決定し定常流

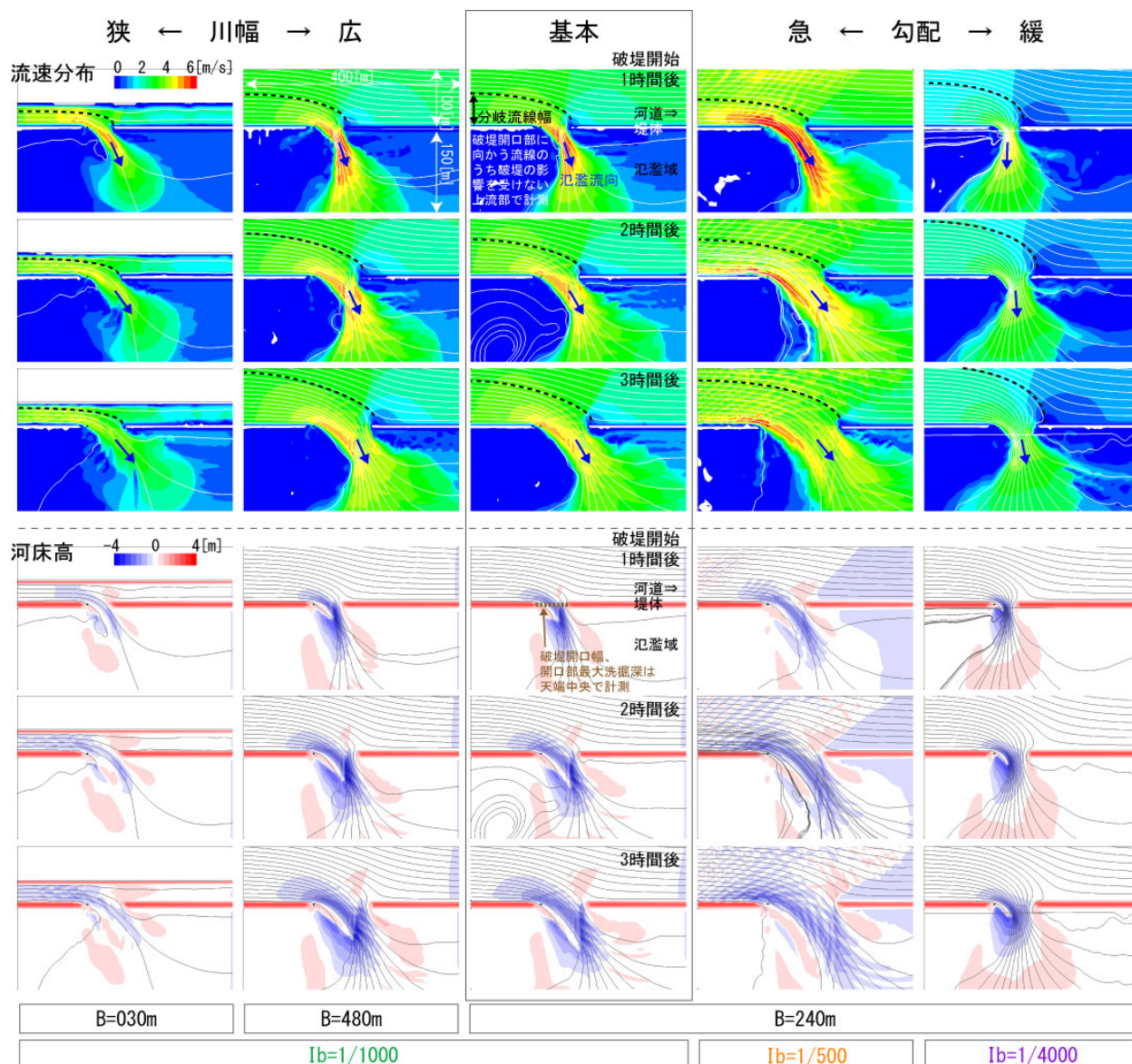


図-4 河道形状に応じた流況及び河床形状の進行過程（上段：流況，下段：河床形状）

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 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，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¹⁰⁾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3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との間の過程を簡略化して破堤開始箇所の河道水深が 2.60m に到達したのち，既往の千代田実験水路での破堤実験⁶⁾も参考に 4m 幅にわたって下刻決壊するものとした。これらの設定方法等の詳細については既往文献^{7), 8)}を参照されたい。

3. 河道条件に応じた破堤拡幅進行過程

(1) 破堤進行過程概要

図-4に破堤開始から1時間ごとの流況及び河床形状の変化を示す。ここでは計算結果のうち，図-2に示す河道形状分類より中央値に近い川幅 240m ・勾配 $1/1000$ を基本ケースとして，川幅が広いケース(480m)と狭いケース(30m)，勾配が急なケース($1/500$)と緩いケース($1/4000$)の5ケースを示す。

既報⁹⁾の通り特に破堤現象に大きな影響を与えるのは河床勾配である。河床勾配が急な場合には氾濫流況は破堤開口部から氾濫域に斜め方向へ流出し，破堤開口部は堤体が縦断方向に拡幅進行する。一方，河床勾配が緩い場合には氾濫流況は破堤開口部から正面越流に近くなり，破堤開口部は堤体の拡幅よりも河床洗掘が顕著となる。次項ではこれらについて時系列変化より比較整理を行う。

(2) 河道形状相違による破堤進行の相違

既報⁹⁾では主に最終形状での現象比較を行ったが、破堤拡幅時における被害軽減技術の検討^{13), 14)}にあたっては、その進行過程の理解が重要である。そこで堤防天端中央の破堤開口幅 L 、開口幅 L 断面における河床高からの最大洗掘深 D_{max} 、氾濫流量 Q_{out} 、河道流量 Q_{in} に対する氾濫流量の比率 Q_{out}/Q_{in} 、分岐流線幅 Be (破堤開口部に向かう流線のうち、破堤の影響を受けない上流部における河道横断方向の幅)、川幅に対する分岐流線幅の比率 Be/B 、そして破堤開口幅/分岐流線幅 L/Be について、時系列変化を図-5に示す。なお結果について勾配は4ケース、川幅は最も広狭なパターンと中央値である3ケースとし全12ケースについて示す。

a) 破堤開口幅・開口部河床最大洗掘深

破堤開口部の変化について川幅が広く河床勾配が急になるほど、破堤開口幅・拡幅速度は大きくなる。一方で河床勾配が緩くなるほど、破堤開口幅は拡がりづらくなるものの、開口部周辺の河床洗掘が顕著となる。これは図-4に示すように川幅が広く勾配が急になると、開口部から氾濫域に向かい堤体に作用する流速が大きくなることで縦断方向への拡幅が顕著になる一方、勾配が緩くなると氾濫流況は正面越流に近く、河道から氾濫域に向う流れは堤防に対して直角で、速い流れは開口部中央に集中することから堤体に流れが作用しづらく、堤体の拡幅よりも洗掘による下刻が顕著となるためと考えられる。

またいずれのケースも破堤開始から1時間後までの間に破堤開口幅、河床洗掘量が大きくなっている。これは堤防決壊時において減災工法を実施する場合、どのような河道形状であっても破堤開始の初期段で如何に早急な対応が出来るかが重要であることを示唆している。

b) 氾濫流量・氾濫流量／河道流量

氾濫流量については概ね破堤開口幅と同様の傾向を示す。川幅が広く河床勾配が急なほど氾濫流量が多くなり、実災害でも浸水面積が広範囲になることなどが考えられ、このような河道形状条件では減災工法を行うことで被害軽減効果が期待できる可能性がある。一方で川幅が狭い場合では、いずれの勾配においても破堤開始から1時間後までには河道内流量の大半が流出していることから、川幅が狭い場合には破堤被害軽減のための対策については、早急に対応できなければ、被害軽減効果が小さくなる可能性がある。

c) 分岐流線幅・分岐流線幅／川幅

河道形状と破堤拡幅現象の関係を理解するにあたり、破堤拡幅が河道へ与える影響範囲を把握することは重要である。ここでは分岐流線幅について整理を行う。河床勾配が同じケースでは川幅が広がると分岐流線幅も広がるが、特に河床勾配が緩くなるほど分岐流線幅は大きく広がる傾向がある。これは勾配が緩い場合、河道内の流下流速が遅く開口部周辺は正面越流に現象が近くなるため河道から氾濫域へと流れやすくなること、また今

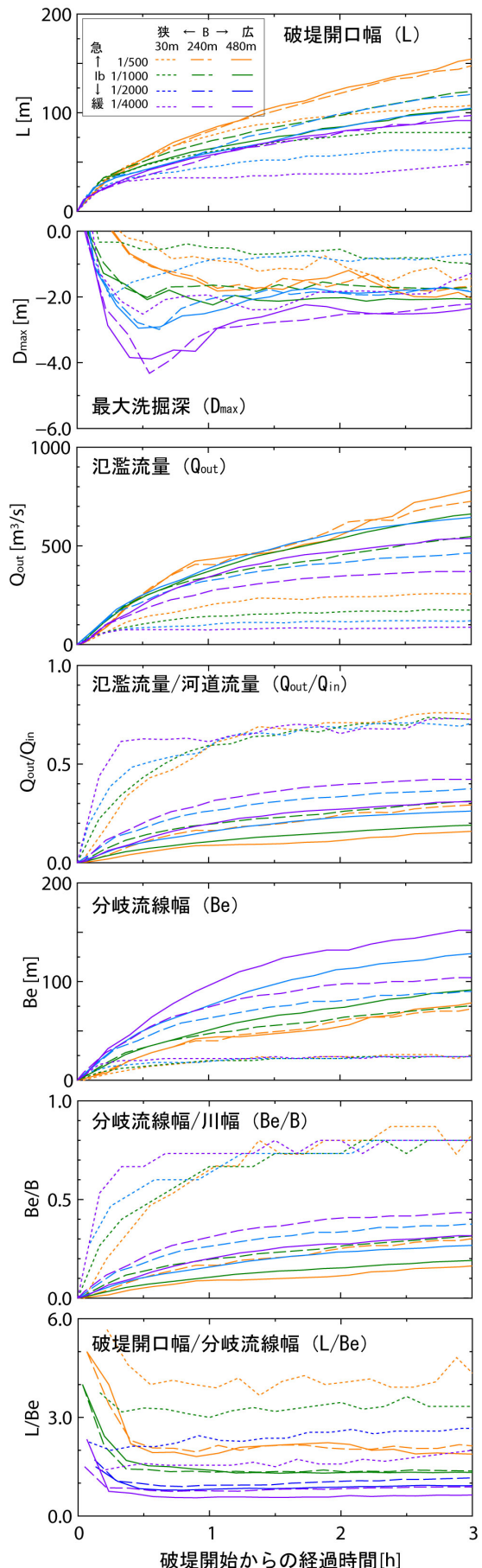


図-5 破堤進行過程の時系列変化

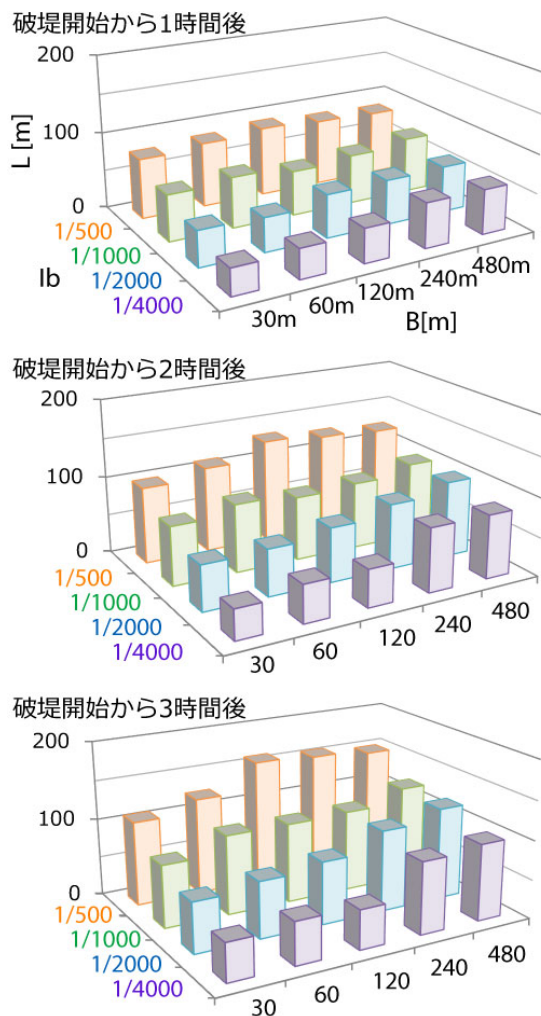


図-6 河道形状毎の破堤開口幅の時間変化

回の計算条件では勾配が緩くなるほど河道内の単位幅流量が小さくなることから、同じ氾濫流量であっても河道のより広い範囲から河道内流量を開口部に引き込む必要があることから、分岐流線幅が広がるものと考えられる。

なおこれまでの時系列比較より、河床勾配が1/500で川幅が240m・480mの両ケースでは破堤開口幅、氾濫流量、分岐流線幅ともに時系列変化は同程度の値を示している。これは河道幅が一定以上に広がると現象に大きな相違がなくなる可能性を示しており、河床勾配毎にこの分岐流線幅の上限値があるものと考えられる。

d) 破堤開口幅と分岐流線幅の関係

ここまでの整理より破堤開口幅は川幅や勾配など様々な要因により影響を受けていることがわかった。また分岐流線幅は川幅や河床勾配と関係があることが示唆されたため、ここで破堤開口幅／分岐流線幅の比を比較する。

破堤初期を除くとそれぞれのケースで概ね一定値で推移していることがわかる。これは破堤開口幅を推定するにあたり既往の経験式¹⁰⁾では川幅を用いるが、破堤開口幅は分岐流線幅と一定の関係性があることを示唆してい

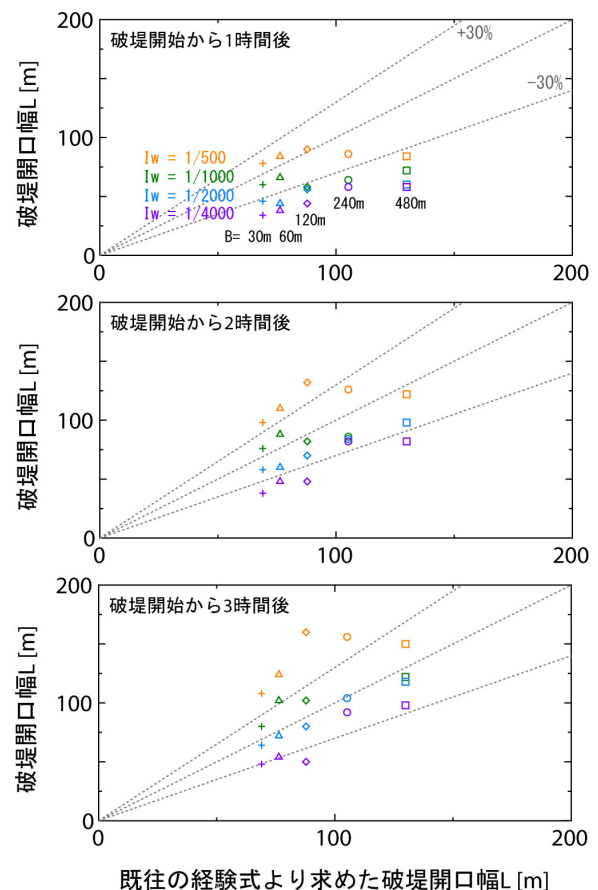


図-7 既往経験式より算出した破堤開口幅との比較

る。そして分岐流線幅は前述のように川幅・河床勾配・河道内流量などと密接な関係があると考えられ、今後はこれらの関係を検証することで、破堤拡幅速度や最終的な破堤開口幅などを各河川の河道形状等から推測できる可能性を示唆するものである。

(3) 既往経験式で算出した破堤開口幅との比較

堤防決壊による被害規模推定に影響を与える氾濫域への氾濫流量の算出あたり、破堤開口幅の推定は重要である。現在の氾濫シミュレーションの検討では、破堤開口幅の推定は川幅のみに依存し、破堤開始直後に最終破堤幅の半分が決壊、1時間後に最終破堤幅に到達するとし、その開口幅を用いて氾濫流量を算出し浸水域の推定を行っている¹⁰⁾。図-6は全計算ケースにおける破堤開口幅の計算結果について1時間毎の破堤開口幅を整理したものである。前述の通り、破堤開口幅は勾配が急になるほど、川幅が広がるほど、そして洪水継続時間が長くなるほど広がっており、川幅のみに依存しないと考えられる。

図-7は今回の計算で求めた図-6に示す1時間毎の破堤開口幅の結果と、既往の経験式を用いて川幅から推定した破堤開口幅の結果を比較したものである。

勾配が1/500と急勾配のケースでは破堤開始から1時間

で既往の経験式に近い値を示しているが、その後も破堤拡幅が進行し続けており、3時間後では経験式より最大で2倍ほど拡幅が広がっている。今後、気候変動等により大雨が長時間続くような出水では、特に急勾配河川において事前の想定以上に破堤拡幅が進行する可能性があるため注意が必要である。

一方で勾配が緩いケースでは破堤開始から1時間後では経験式より過小となるケースもあるが、3時間後には概ね経験式の値を中心に3割内外に位置している。これは経験式が過去の実破堤事例である長良川（1976年）、小貝川（1986年）、遠賀川（1953年）の事例より算出しており、例えば小貝川であれば図-1に示すように勾配1/6000程度であることから、急勾配以外の条件では今回の計算結果と既往の式で推定した破堤開口幅の値が近くなったものと考えられる。

なお破堤開始1時間後において既往経験式より過小となる傾向については、今回の計算では破堤開始時は4mの初期開口幅を与えているが、経験式では破堤と同時に最終破堤幅の半分が決壊としているため、相違があるものと考えられる。

また経験式との比較においては、計算ケースでは河道形状の相違に着目していることから、堤体材料は同一で河道は単断面であり堤内外の比高差はなく、また河道内流量も定常流とするなど現象を単純化しているため、得られた知見の一般化には実河川での実洪水を想定したような条件での破堤拡幅現象を把握することが重要となる。

4. まとめ

本論文では河道形状のうち川幅と河床勾配に着目し、破堤現象のうち破堤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。

- ・破堤開口部周辺の現象について、破堤開口幅は川幅が広く河床勾配が急になるほど大きく広がり、開口部の河床洗掘は河床勾配が緩くなるほど深く洗掘されることが明らかとなった。

- ・この進行過程について特に破堤開始から1時間の間に顕著に進行することから、破堤被害の軽減を考える場合、どのような河道形状であっても破堤開始初期段階で減災工法等の対応が出来るかが重要である。

- ・既往の破堤拡幅の経験式と比較を行い、破堤開口幅は川幅だけではなく川幅、河床勾配、洪水継続時間に大きく影響を受けることが明らかとなり、特に分岐流線幅と一定の関係があることが示された。

なお今回は河道形状の相違が破堤現象進行過程に与える影響を明らかにすることを目的としているため、現象

を単純化（堤体材料同一、河道単断面、堤内外比高差無、定常流等）して検証を行っているため、得られた知見の一般化に向けては実河川の破堤現象の再現などによる検討が重要である。

謝辞：本実験を行うにあたり、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，国土交通省関東地方整備局，2016.
- 3) 国土交通省北海道開発局：平成28年夏の大雨による被災状況等について，2017.
- 4) 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.
- 5) 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，<http://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/cttl1r0000002-ul9.html>
- 6) 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.
- 7) 柿沼孝治，飛田大輔，横山洋，井上卓也，武田淳史：千代田破堤実験と数値計算モデルの開発，寒地土木研究所月報，No.732，pp.10-19，2014.
- 8) 破堤計算ソフト(Nays2D Breach)，<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breach.html>
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) iRIC，<http://i-ric.org/ja/>
- 12) 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/
- 13) 島田友典，前田俊一，柏谷和久，飛田大輔，伊藤幸義，横濱秀明：根固ブロックを用いた破堤氾濫流量の基礎実験，土木学会地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集，第3回，I-4，2015.
- 14) 島田友典，前田俊一，柏谷和久，横濱秀明：河川堤防の荒締切工法に関する模型実験，土木学会河川技術論文集，大22回，pp.379-384，2016.

(2017. 4. 3受付)