

川幅と河床勾配が破堤現象に与える影響

島田 友典¹・渡邊 康玄²・岡部 博一³・岩崎 理樹³・中島 康博⁴

¹ 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

E-mail:shimada-t22ad@ceri.go.jp

² 正会員 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 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

⁴ 非会員 北海道開発局 帯広開発建設部 治水課 (〒080-8585 北海道帯広市西 4 条南 8 丁目)

近年、堤防決壊が頻発する中、破堤被害軽減技術の構築は重要であるが、それには破堤現象の解明が不可欠である。千代田実験水路を用いた破堤実験により様々な知見を得ているが限られた河道条件である。そこで実験をもとに開発された数値計算モデルを用いて、川幅と河床勾配が破堤現象に与える影響について検討を行った。河床が急勾配では川幅の広狭によらず縦断方向に破堤拡幅が進行すること、河床勾配が緩くなるにつれ落掘の発達が目著になり川幅が広くなると氾濫流況は正面越流に近くなることなど、河道特性を 4 つのカテゴリーに分類し破堤現象の相違を明らかにし、効果的な減災工法の考え方を示した。

Key Words: levee breach process, channel width and bed slope, 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。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²⁾。

このような中、藤田ら³⁾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。

島田ら⁴⁾は河川堤防の破堤に関する研究を体系的に整理・レビューし、特に実スケールでの 3 次元越水破堤メカニズムについて未解明な部分が多いことを指摘している。それを背景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が進行すること、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

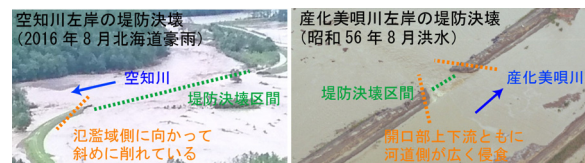


図-1 河道特性に応じて異なる破堤形状

で表現できることを示すなどを様々な知見を得ている⁶⁾。

千代田実験水路における実験は、実スケール規模の検討という強みはあるものの、実験施設の制約上、限られた河道条件、実験ケース数にならざるを得ない。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、河床勾配が急である空知川では開口部下流の堤体断面が河道から氾濫域に向かって斜めに侵食しているが²⁾、合流する本川の影響で出水時の水面勾配が非常に緩い産化美唄川では河道側に向かってハの字型に侵食している⁵⁾。破堤進行過程の相違を明らかにすることは、減災対策を効果的に行う上で重要であり、また千代田実験水路で得られた知見の一般化を図るためにも、河道特性に応じた破堤現象を把握することが重要である。

松下ら⁷⁾は縮尺模型実験により川幅の違いが破堤現象へ与える影響について検討を行っているが、川幅は現地換算で 24m までであり、実河川を想定するとさらに川幅を拡張した条件での検証が必要だと考えられる。しかしながら、縮尺模型実験においても施設の制約があるため、数値計算を併用した検証が有効であると考えられる。

本論文では千代田実験水路における破堤実験で得られた知見をもとに柿沼らが開発した破堤拡幅計算モデル「Nays2D Breach⁸⁾」を用いて、川幅だけでなく河床勾配の違いも組み合わせ、それらが破堤拡幅現象にどのような影響を与えるか検討を行い、さらに得られた知見より破堤被害軽減のための減災工法に関する考え方を示した。

2. 河道形状が異なる破堤現象の再現検証

Nays2D Breach の破堤拡幅過程の再現性については、千代田実験水路での実物大破堤実験結果との比較を行い確認しているが、川幅 8m、河床勾配 1/500 と限られた条件である⁸⁾。そこで川幅と河床勾配を変えた模型実験を対象に河道形状を変えた場合の再現性検証を行う。

(1) 計算モデルの概要

Nays2D Breach の基本となるモデルは 2 次元浅水流河床変動計算モデル iRIC Nays2D⁹⁾であり、堤防部分の破堤拡幅進行は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の改良を行っている。

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

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、詳細については柿沼ら⁸⁾の文献を参照されたい。

(2) 模型実験の概要と計算条件

a) 模型実験概要

千代田実験水路では、川幅や河床勾配を変化させた実験は困難であるため、既往の検討でも用いている千代田実験水路の縮尺 1/20 模型¹⁰⁾ (図-2) を用いて実験を行った。なお実物大規模の実験結果との比較のため、以下に示す水路諸元、水理量、時間、計算結果はフルード相似則で全て現地規模に換算している。

実験区間の川幅は 30m (千代田実験水路で行った実験では川幅 8m)、氾濫域幅は 116m、ハッチ部分は深さ 3.8m の移動床としている。破堤実験区間は延長 140m、高さ 3m、天端幅 3m、表裏法勾配を 2 割とし、破堤のきっかけとして切欠 (深さ 0.6m・上幅 2.0m・下幅 0.8m) を設けている。実験に用いた実験砂は既往実験¹⁰⁾と同様

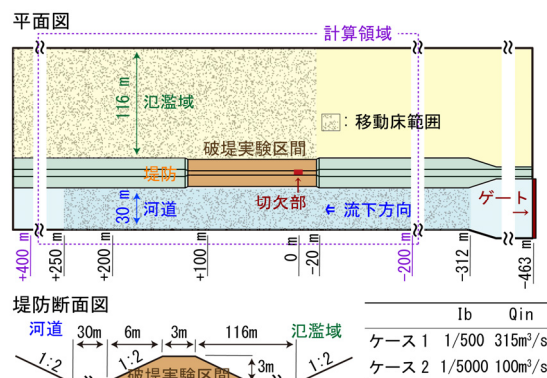


図-2 模型実験水路および実験条件

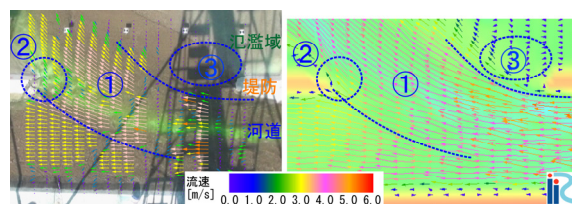


図-3 模型実験と計算結果の流況比較 (開口幅 80m 程度)

で現地換算で $d_{50}=18\text{mm}$ である。

実験ケースは図-2 に示すように川幅および河床勾配をケース 1 は 30m および 1/500、ケース 2 は 30m および 1/5000 とした。また供給流量は一定流量を通水し、概ね破堤拡幅が停止するまで行った。

b) 計算条件

計算領域は図-2 に示す通りである。マンニングの粗度係数は 0.023、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。下流端は河道、氾濫域ともに自由流出とし、河道上流端より通水している。なお Nays2D Breach では、越水から破堤拡幅過程に至る堤体下刻の侵食過程は表現できない。このため、こ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 (切欠部の越流水深 0.20m 相当) に到達したのち、千代田実験水路での破堤実験⁹⁾を参考に 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については既往文献を参照されたい¹¹⁾。

(3) 実験結果と計算比較

図-3 にケース 1 の流況を示す。①河道から破堤開口部の中下流を主流として氾濫流が通過、②その流れが開口部下流部にぶつかり堤体が侵食することで破堤拡幅が進行、一方で③開口部上流は非常に流れが緩やかであるなど、特徴的な現象を良好に再現できている。

図-4 に破堤開口幅と氾濫流量の時系列を示す。破堤開口幅が加速度的に拡がりそれに伴い氾濫流量が増加、破堤拡幅速度の低減、氾濫流量が一定量に落ち着き推移するなど、時系列変化についても良好に再現できている。

以上より、Nays2D Breach は様々な河道条件においても破堤現象を表現できることが確認された。

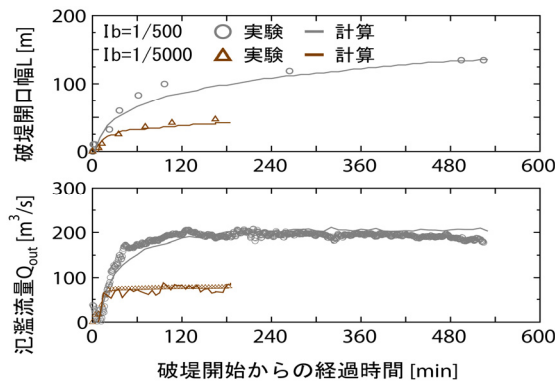


図-4 実験結果と計算結果の時系列比較
(上段：破堤開口幅、下段：氾濫流量)

3. 河道特性に応じた破堤現象の相違

(1) 河道特性の選定と計算条件

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、実河川の河道条件の整理を行った。図-5 に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河床勾配の関係を示す。なお川幅については二級河川も公表¹³⁾されているため、一・二級河川の基準・主要地点における川幅地点数の比率を示す。

これを参考に川幅に関しては一・二級河川を包括できるような3パターンを、河床勾配に関しては一級河川を包括し、またフルード数(0.25・0.50・0.75)を目安に3パターン、全9ケースを対象に検討を行う。

検証に用いる水路形状と計算ケースを図-6 に示す。堤防形状は同一とし、表に示すフルード数を満たすように流量を決定し、通水は2時間とした。その他の条件は前述の再現性検証と同様である。なお氾濫域については氾濫流により水位がせき上がると破堤進行速度に影響を与えることが考えられるため、側方は自由流出とし氾濫域幅300mでせき上げが生じないことを確認し設定した。

(2) 計算結果概略

図-7 に計算終了時点の流況と河床形状、破堤開口幅と氾濫流量の時系列を示す。全9ケースを左から右に行くほど川幅が広く、上から下に行くほど河床勾配が緩く(フルード数が小さく)なるように配置しているが、河道形状が異なることで破堤拡幅現象(破堤開口幅や氾濫流況、河床低下等)が異なることが確認できる。そこで形状毎の検討を行う前に今回得られた計算結果の妥当性を既往の被災事例等を参考に確認を行う。

図-8 は藤田ら¹⁴⁾が既往の実災害時等の破堤形状について整理したものである。今回の計算結果のうち、傾向に明確な差が確認できる図-7 の4隅の結果をプロットしているが、概ね既往事例の範囲内に収まっている。これより実河川を参考に大きく河道条件を変えて行った今回の

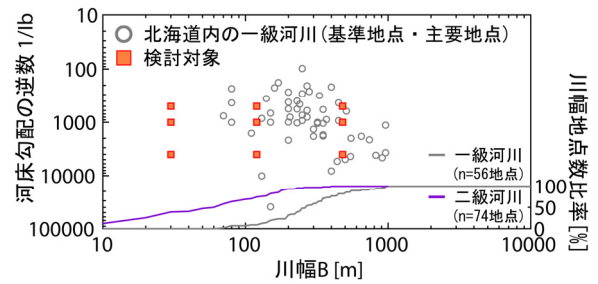


図-5 道内河川の河道形状(二級は川幅のみ)と計算対象

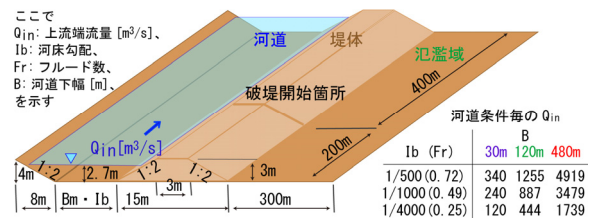


図-6 計算水路形状と計算ケース

計算結果についても実現象をとらえることが出来ていると考えられ、実河川規模で河道条件を変えた場合においても Nays2D Breach の妥当性が示された。

4. 河道条件が破堤拡幅現象に与える影響

河道形状が破堤拡幅現象に与える影響について、その差がより明瞭である図-7 の上下左右4隅について(カテゴリーI～IV)、それぞれの現象について考察を行う。

(1) カテゴリーI (B狭-Ib急：図-7左上)

このカテゴリーは川幅が狭く勾配が急であり、上流域河川に相当すると考えられる。川幅全体に速い流れが生じており、分岐流線からもその大半が開口部に向かい、氾濫域に斜め方向に流出している。開口幅は川幅の2倍以上、氾濫流量は河道流量の大半である7割以上が流出している。そしてこの流速の速い地点を中心に河道から開口部、氾濫域に向け全体に河床低下をしているが、通水中に開口部で生じた落掘の最大洗掘深は1.2m程度であり、このカテゴリーの落掘が最も浅い。これは川幅が狭く、破堤拡幅とともに河道水位が低下することで、堤内外との水位差がなくなるためと考えられる。

これらの現象は千代田実験水路での実験と同様の傾向⁹⁾であり、実験で得られた知見はこのカテゴリーにおいては概ね適応することも可能であると考えられる。

(2) カテゴリーII (B広-Ib急：図-7右上)

河床勾配はカテゴリーIと同じ1/500で川幅が480mと広い条件である。破堤から2時間後の破堤幅は120m程度まで広がっているが、破堤開口部から氾濫域に向かう

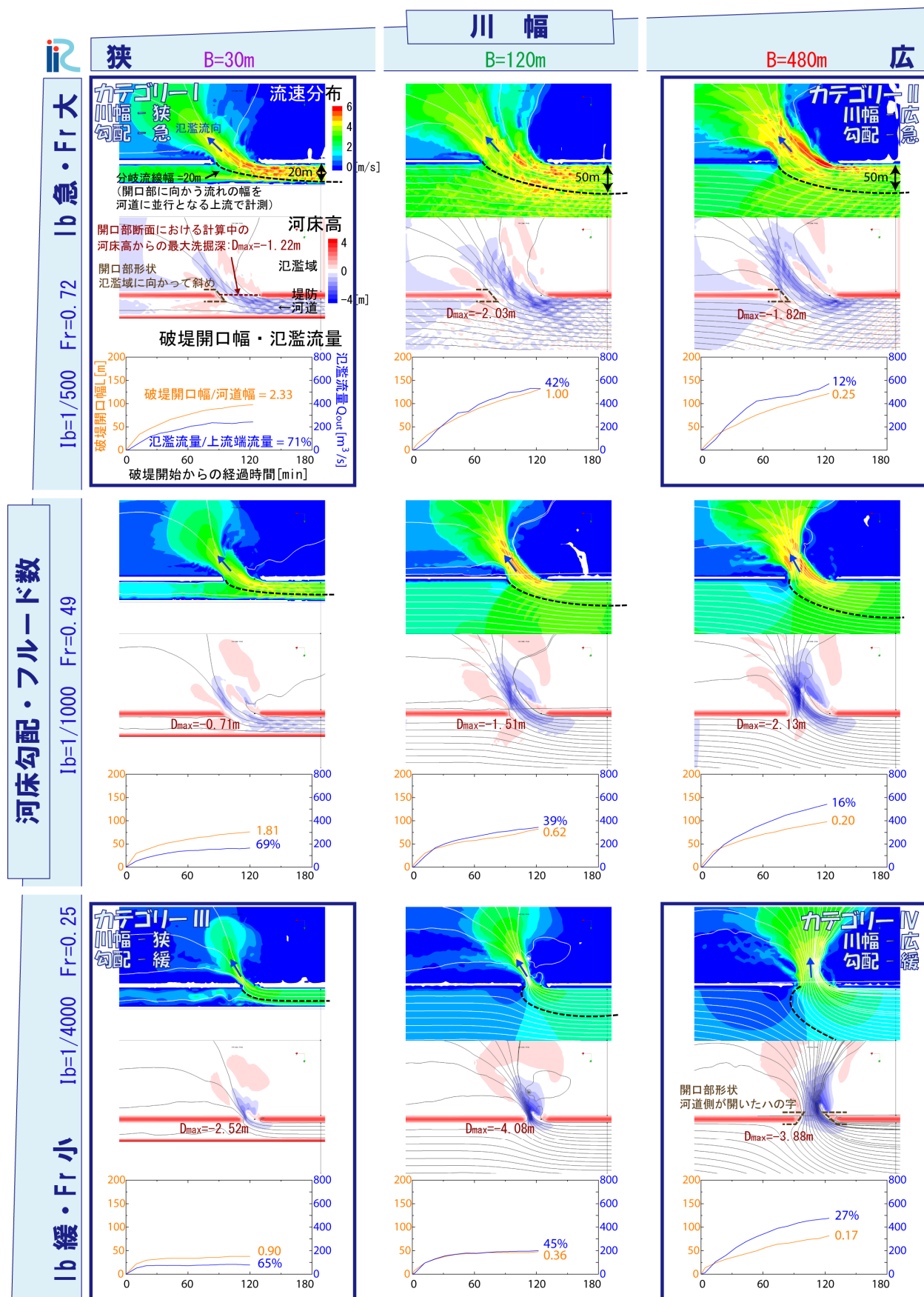


図-7 河道形状に応じた破堤形態分類 (上段: 流況, 中段: 河床形状, 下段: 破堤開口幅と氾濫流量)

斜めの流況などは川幅が狭い場合と同様である。

一方で分岐流線幅を見ると川幅全体には広がらず堤防

から 50m 程度である。カテゴリー I と II に挟まれている

川幅 120m でも分岐流線幅は 50m と同程度である。これ

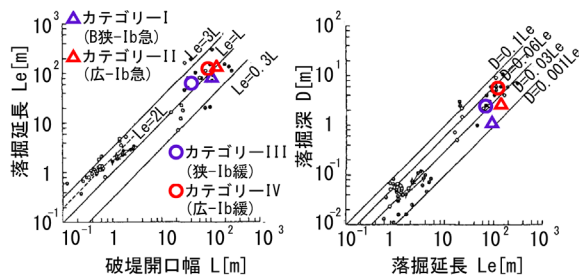


図-8 破堤形状特性¹⁴⁾

は松下ら⁷⁾が行った実験(河床勾配 1/500)で指摘して「流線幅には限界値があり、河道幅がその限界値以上であると川幅に関係なく流線幅は限界値に落ち着く」と同様の傾向であった。また川幅が 120m と 480m で 4 倍の差があるにもかかわらず、破堤から 2 時間経過後の破堤幅・氾濫流量は概ね同じであることから、カテゴリⅡに属するような河床勾配が急で、一定以上の川幅がある場合に、破堤拡幅速度や氾濫流量増加率は川幅によらず同程度に落ち着く可能性を示唆している。

なお破堤開口部の最大洗掘深は 1.8m 程度とカテゴリⅠと比べても大きな差は見られない。カテゴリⅠ・Ⅱのように河床勾配が急な場合は落掘と言われる河床洗掘による鉛直方向の開口部の拡大よりも、縦断方向の拡大となり、破堤拡幅のほうが卓越していると考えられる。

実河川にあてはめると図-1 で示した空知川の堤防決壊はカテゴリⅠとⅡの間に近い条件と考えられ、破堤開口部下流が斜めに削れる様子など、今回の計算と同様の状況であったことから、ここでの知見は実河川での破堤現象でも共通していると考えられる。

(3) カテゴリⅢ (B 狭-Ib 緩 : 図-7 左下)

今回の検討では通水流量が最も少なく、破堤拡幅が始まった後、河道水位が早く低下し破堤拡幅もあまり進行せず、また氾濫流況も河道から氾濫域に向かって斜めである。この現象は千代田実験水路で行った下流端をせき上げて Fr 数を小さくした実験と同じような傾向⁹⁾であった。一方で開口部の最大洗掘深は河床高から-2.5m 程度とカテゴリⅠやⅡと比べても深くなっている。これは緩勾配の場合、河道を下流する流速は小さく堤体に流れがぶつかることによる破堤拡幅はあまり進まないが、下刻方向の侵食が激しくなるためと考えられる。

(4) カテゴリⅣ (B 広-Ib 緩 : 図-7 右下)

ここまで見てきたカテゴリと破堤形態が大きく異なるのがこのカテゴリⅣである。

氾濫流は破堤開口部から堤防に対して直角方向に氾濫域に抜けている。そして河道内では開口部の下流から上流に逆流するような流れも確認でき、開口部の中心付近に最も速い流速が位置している。開口部形状は図-1 で

示した産化美唄川の事例のようにハの字形状である。

河床洗掘は流況同様、堤体部から氾濫域に向かって直角方向に洗掘している、また開口部の最大洗掘深も 3.9m 程度と堤防高と同程度であり、一般的に言われる落掘形態に近い。

(5) 得られた知見から減災工法に向けた考察

破堤メカニズム解明において最も重要なのは現地調査や実験、今回のような数値計算を通じて、次の出水で堤防決壊の危険性が生じた、また堤防が決壊に至った場合に、如何に現場で対応し被害規模の軽減・最小化を図る技術に繋げることが出来るかである。

北海道開発局と寒地土木研究所では、破堤被害軽減に向けて、破堤拡幅抑制工¹⁵⁾(水防資材である根固ブロックを用いて破堤拡幅進行速度を低減し氾濫流量の増加抑制を期待する技術)や、破堤拡幅後の破堤氾濫流量を低減させる技術¹⁶⁾(破堤開口部を早急に締め切るための荒締切工など)の検討を行っているところである。これらの減災工法について、今回の破堤特性の検討結果からいくつかの考察を行う。

カテゴリⅠ (B 狭-Ib 急) では川幅が狭く、短時間のうちに破堤幅が川幅以上となる。その結果、河道内流量の大半が氾濫流として流出することになる。そのため破堤拡幅抑制を行う場合、破堤開始地点から相当近く(例えば河道幅程度)で抑制しなければ、被害軽減効果が小さくなる可能性がある。また上流域河川に相当すると考えられるため、水位上昇から低下までが短くなることから如何に早く減災工法に取り掛かることができるか、特に資材運搬等も含めた検討がきわめて重要である。

カテゴリⅡ (B 広-Ib 急) では、洪水継続時間が長くなる場合、破堤拡幅が継続しそれに伴い氾濫流量の増加も考えられるため、破堤拡幅を抑制することで減災効果が期待できる。一方で開口部の流速が本事例では 4m/s 以上となる高流速であり、例えば水防資材である根固ブロックを用いた工法の場合、転動流出しないような工夫が必要と考えられる。また破堤拡幅進行が抑制できた場合も、その周辺の流れによって河床洗掘が促進されないよう注意することが必要である。

カテゴリⅢ (B 狭-Ib 緩) ではもっとも破堤拡幅が進まないが河床の洗掘が進行している可能性があり、投入すべき水防資材が不足しないように事前に投入想定数などの計画を立てた上で作業を進める必要がある。

カテゴリⅣ (B 広-Ib 緩) では正面越流に近い形態であり、また氾濫流量の主流が破堤開口部の中心である。カテゴリⅠ・Ⅱのように堤体に激しい流れが直接ぶつかりながら破堤拡幅が進行はしないため、拡幅抑制工については机上での検討は困難であるため、模型実験等による検証が必要と言える。また落掘が堤防高以上に深く

なっていることも考えられるためカテゴリーⅢ 同様に資材準備に十分な検討が必要であり、また開口部中央に流速が高い状況であることから、開口部両側から締切を進めた場合も高流速が継続していると考えられ、開口幅が狭くなることで更なる河床洗掘を助長させる懸念もあるため注意が必要であり、とくに最後の締切る段階、いわゆるせめ工の実施が困難となることが予想される。

以上、現在検討中である減災工法についてカテゴリー別に述べてきたが、今回の破堤特性分類より、緩勾配の河川であれば縦断方向への拡幅を低減する破堤拡幅抑制工ではなく、例えば鉛直方向への低下を低減する破堤下刻抑制効果が見込める工法など、カテゴリーに応じた幅広い減災工法を検討をしていくことが重要である。

5. まとめ

以下に今回、得られた知見を簡潔に示す。

- ・破堤計算モデル Nays2D Breach は様々な河道形状における破堤現象を表現できることが示された。
- ・河床が急勾配の場合、河道幅の広狭によらず破堤開口部が縦断方向に拡幅進行する。
- ・河床が緩勾配の場合、破堤開口部の落掘発達が顕著となり、また川幅が広くなるに従い氾濫流況は正面越流に近くなる。
- ・河道形状に応じ 4つのカテゴリーに破堤特性を分類し、それぞれの特徴を考慮した上で被害軽減工法を実施する必要性、及びその考え方を示した。

謝辞：本実験を行うにあたり、十勝川千代田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) 国土交通省北海道開発局：災害・防災情報，

- 3) 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。
- 4) 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.333-338，2009。
- 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.ob.hkd.mlit.go.jp/-hp/riveroffice/chiyoda/zi/zi0.htm>
- 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) 松下拓人，渡邊康玄：横越流破堤現象への川幅の影響，土木学会応用力学シンポジウム講演概要集，大 19 回，pp.155-156，2016。
- 8) 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。
- 9) iRIC，<http://i-ric.org/ja/>
- 10) 伊藤幸義，島田友典，横山洋，坂野章，茂木映治：模型実験による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討，河川技術論文集，vol.16，pp.371-376，2010。
- 11) 柿沼孝治，飛田大輔，島田友典，竹村健：破堤計算ソフトウェア「Nays2d Breach」の公開，寒地土木研究所月報，No.740，pp.36-45，2015。
- 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/index.html
- 13) 河川整備基本方針・河川整備計画，北海道，<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kn/kss/ksn/kasenkahome/enrakusaki.htm>
- 14) 藤田裕一郎，村本嘉雄：河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験，土木学会年次学術講演会第 2 部，第 42 回，pp.559-560，1987。
- 15) 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抑制の基礎実験，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。
- 16) 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，第 22 回，pp.379-384，2016。

(2016. 9. 30 受付)

THE EFFECT OF CHANNEL WIDTH AND CHANNEL BED SLOPE ON LEVEE BREACH PROCESSES

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

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 width and channel bed profile 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 steep slope channel, levee breach widening is dominant. In the case of mild-slope channel, river bed erosion is dominant.