

河道横断形状の相違が破堤現象に与える影響

島田 友典¹・渡邊 康玄²・横山 洋³・米元 光明⁴

1 正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 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 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

3 正会員 博(工) 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 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 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、技術検討を行うには破堤現象の解明が不可欠である。現象解明を目的として千代田実験水路を用いた破堤実験を行うことで様々な知見を得ているが、それらは限られた河道条件下で求められたものである。そこで縮尺模型実験、および千代田実験をもとに開発された数値計算モデルを用いて、河道横断形状の相違が破堤現象に与える影響について検討を行った。単断面と複断面河道において氾濫流況や破堤拡幅形態などの現象が定性的には同じであること、高水敷幅が分岐流線幅より狭い場合には氾濫流量を増加させる危険性があることなどを示した。

Key Words: levee breach process, low-water channel, high-water channel, 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。

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⁴⁾(以下、千代田実験水路と称す)において実物大規模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、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、様々な知見を得てきている⁵⁾。さらにこれらの知見をもとに柿沼らは水理量に応じて破堤拡幅を表現できる数値計算モデル「Nays2D Breach^{6),7),8)}」を開

発し、島田らは河道特性を変えた破堤模型実験や数値計算を行い、川幅と河床勾配に応じた破堤拡幅現象について分類整理した^{9),10)}。

一方で国内河川の中下流部では一般に低水路と高水敷からなる複断面形状であるが、前述の検討ではいずれにおいても河道は高水敷を有しない単断面を対象としている。特に資産が集中しているのは中下流部であり、今後、破堤被害の軽減技術の検討のためにも横断形状の相違が破堤現象に与える影響を理解することは重要である。

本論文では縮尺模型を用いた複断面河道における破堤実験、及び「Nays2D Breach」を用いた再現計算を行い現象の把握を行った。次に河道横断形状の相違が破堤現象に与える影響を把握することを目的に、単断面と複断面、高水敷幅の広狭、河床勾配の緩急に着目して実河川規模を想定した数値計算による検討を行った。

2. 複断面河道における破堤模型実験と再現検証

(1) 模型実験の概要

a) 河道横断形状特性

河道横断形状が破堤拡幅現象に与える影響を把握するにあたり、実河川における河道横断形状の整理を行った。図-1に北海道内の一級河川の基準・主要地点における川幅と、河床勾配・低水路幅・高水敷幅・低水路深の関係¹¹⁾を示す。併せて模型実験の河道条件、および後述す

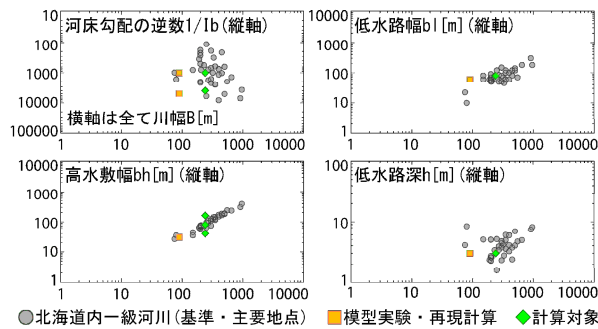


図-1 道内河川の横断形状特性と模型実験及び計算対象

る一般河道を想定した数値計算の計算対象も示している。

b) 模型実験概要

既往の検討と同様に千代田実験水路の縮尺 1/20 模型¹³⁾を用いて実験を行ったが、川幅は最大 30m と複断面形状とすることが困難であったため、縮尺 1/60 として実験を行った。ここで縮尺の変更については渡邊らの検討¹²⁾により、縮尺 1/70 までであれば破堤拡幅現象を再現できることを確認している。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。

図-2 に実験水路形状を示す。川幅は 90m、氾濫域幅は 232m、ハッチ部分は深さ 4.2m 以上の移動床としている。破堤実験区間は延長 360m、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現地換算で $d_{50}=10.8\text{mm}$ （珪砂 7 号）とし、既往実験¹³⁾と同様に堤体にはベントナイトを 15% 配合した。なお低水路河床部については $d_{50}=21.6\text{mm}$ （珪砂 6 号）用いている。

実験ケースは図-1 で整理した河道横断形状特性を参考に、河床勾配は中央値付近である 1/1000 と緩勾配の 1/5000、低水路幅 60m、高水敷幅 30m、低水路深 3m 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。

(2) 数値計算の概要

a) 計算モデル

Nays2D Breach の基本となるモデルは iRIC Nays2D¹⁴⁾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の改良を行っている。

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

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

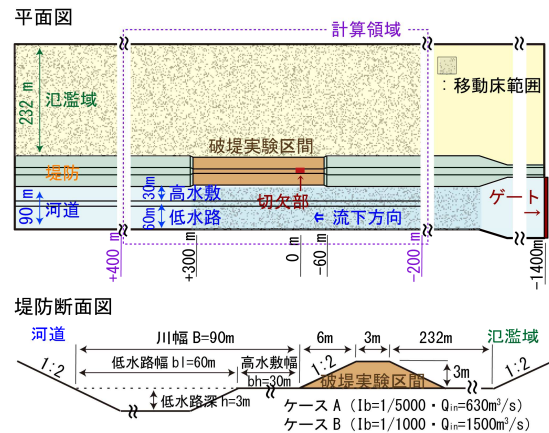


図-2 模型実験水路および実験条件

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⁹⁾の文献や Nays2D Breach のマニュアル⁸⁾を参照されたい。

b) 計算条件

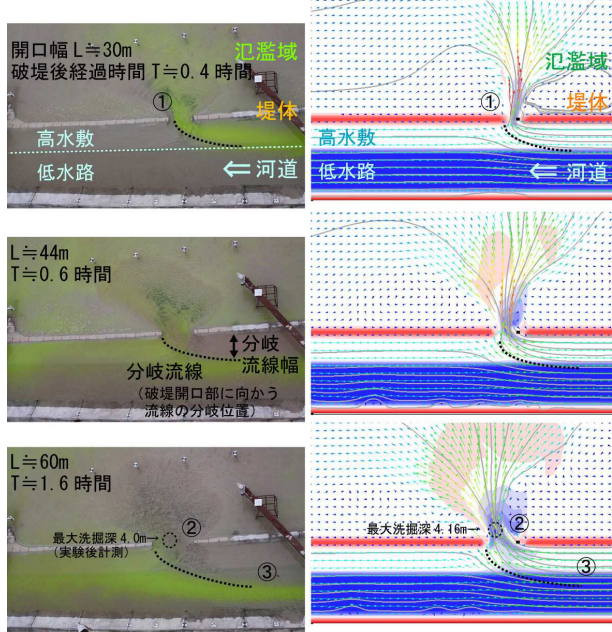
計算領域は図-2 に示す通りである。マンニングの粗度係数は 0.023、計算格子は $2\text{m} \times 2\text{m}$ 、計算時間刻みは 0.05 秒とした。下流端は河道、氾濫域ともに自由流出とし、河道上流端より通水している。また低水路河床部については、実験観察から大きな河床低下が生じていないこと、本計算モデルでは河床部のみ粒径を変えることが出来ないため、固定床として計算を行っている。なお Nays2D Breach では、越水から破堤拡幅過程に至る堤体下刻の侵食過程は表現できない。このため、越水から破堤拡幅に至るこの間の過程を簡略化して破堤開始箇所の河道水深が 2.60m（切欠部の越流水深 0.10m 相当）に到達したのち、既往の千代田実験水路での破堤実験⁹⁾を参考に堤防の縦断方向 4m 区間が基盤高まで瞬時になくなるものとした。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^{8),9)}。

(3) 実験結果と計算比較

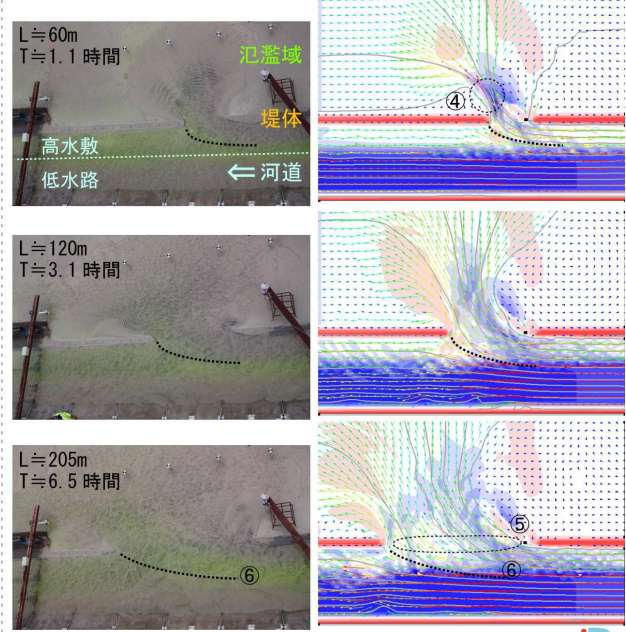
図-3 に代表的な実験流況とそれに対応する数値計算の結果を、図-4 に堤防天端の横断中央における破堤開口幅 L と氾濫流量 Q_{out} の時系列を示す。

ケース A ($Ib=1/5000$) では、①破堤開口部から氾濫域に向かって堤防に直角方向の正面越流破堤に近い形態で氾濫している。②破堤開口部の基盤洗掘についても堤防と直角方向に生じており、実験後に計測した最深部は開口部中央付近に基盤から 4m 程度であり計算結果と一致している。また③分岐流線位置については高水敷幅より

ケース A ($Ib=1/5000$)



ケース B ($Ib=1/1000$)



河床高 [m] -4 -2 0 2 4 流速 [m/s] 0 1 2 3 4 5

図-3 模型実験と計算結果の流況比較 (左写真: 実験流況, 右コンター: 数値計算)

拡がり, おおよそ河道中央付近に存在している。

ケース B ($Ib=1/1000$) では, ④破堤開口部から氾濫域に向かい斜め方向の流れが生じている。緩勾配のケース A に比べると⑤開口部の河床洗掘量は小さい。また⑥分岐流線位置は概ね高水敷幅程度であった。

いずれのケースも特徴的な現象, また破堤開口幅の拡がりに伴う氾濫流量の増加, 破堤拡幅速度の低減など, 時系列変化について良好に再現できており, Nays2D Breach は複断面河道形状においても破堤現象を表現できることが確認された。

なおこれらの破堤現象について, 河床勾配が急な場合は破堤開口部から氾濫域に斜め方向へ流出し縦断方向に拡幅進行, 緩勾配の場合は正面越流に近い氾濫流況となり, 開口部の落掘発達が顕著になるなど, 単断面河道で行った既往検討^{9), 10)}と比べて大きな相違は見られなかった。また分岐流線幅が高水敷幅以上になるなど, 模型施設の限界もあるため, 次項では実河川規模を想定し数値計算を用いて単断面と複断面の比較, 高水敷幅の相違が破堤現象に与える影響について検討を行う。

3. 河道横断形状が破堤拡幅現象に与える影響

(1) 河道横断形状の選定と計算条件

検証に用いる河道横断形状, および計算ケースを図-5に示す。単断面 (ケース 1) の形状選定にあたっては図-1を参考に川幅及び河床勾配の概ね中央値である 240m と 1/1000 とした。複断面の横断形状は図-1を参考に低

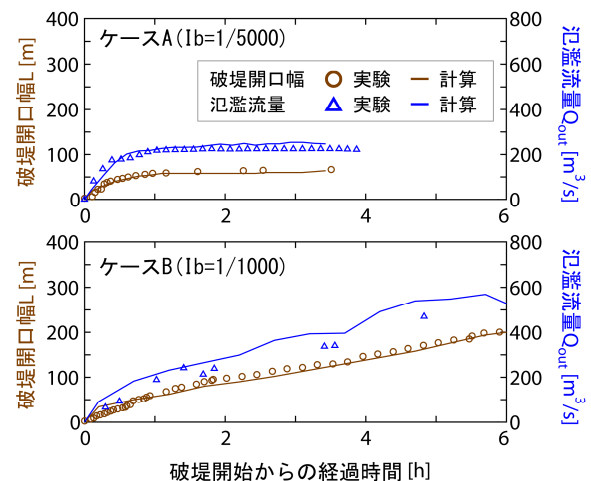


図-4 実験結果と計算結果の時系列比較

水路幅, および高水敷幅 80m (ケース 2) とし, 高水敷幅の違いが破堤現象に与える影響理解のため, 高水敷幅を 2 倍の 160m (ケース 3) と半分の 40m (ケース 4) とするが, 通水流量を複断面形状の 3 ケースで同一とするために低水路幅の横断位置を変えて設定した。また河床勾配の違いによる影響把握のため, 各断面形状で河床勾配 1/4000 についても検討した。なお勾配 1/1000 で通水時のフルード数は 0.50 であり, その半分である $Fr=0.25$ となる条件より 1/4000 を選定している。

通水流量は河道内の等流水深 2.7m を満たすように設定し定常流として与えた。計算時間については, 経験式による破堤開口幅の算出にあたり破堤開始から 1 時間で

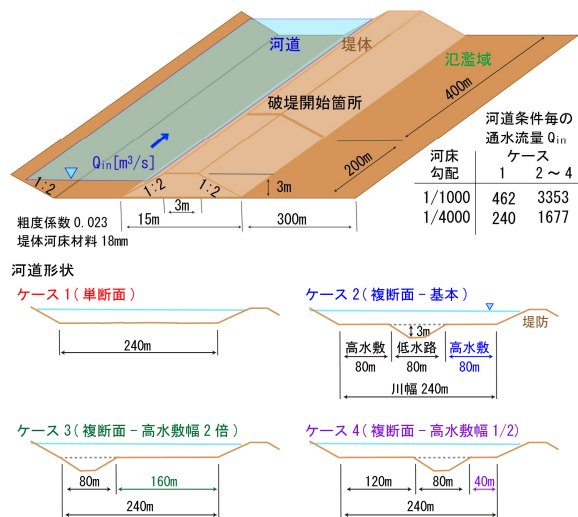


図-5 計算水路形状と計算ケース

最終破堤幅に到達すると仮定していること¹⁵⁾からも、それよりも長い時間として3時間まで計算を行った。その他の条件は図-5に示した以外は前述の再現性検証と同様である。

(2) 横断形状の相違による破堤現象

図-6に破堤開口幅 L 、縦断崩壊面積 AL (堤防天端の横断中央の測線における縦断崩壊面積)、氾濫流量 Q_{out} 、分岐流線幅 Be の時系列変化を、図-7に破堤開始から3時間後の流況及び河床形状の変化を示す。

a) 河床勾配 1/1000

単断面であるケース1について、氾濫流況は破堤開口部から氾濫域へと斜め方向に流出し、流れの速い箇所を中心として河床低下が生じている。この現象は高水敷のある複断面河道でも同様の傾向を示している。なお高水敷幅の狭いケース4では分岐流線幅が高水敷幅以上に広がっており、低水路から破堤開口部間の高水敷上が広い範囲で洗掘し、低水路内の流れも一部が破堤開口部へ向き、開口部周辺全体に速い流れが生じていることから、破堤部周辺に作用する外力が他ケースよりも大きくなると推察される。

時系列変化について被害規模に直結する氾濫流量について高水敷幅が狭くなるにつれ大きくなっている。開口部形状については破堤開口幅のみでは河床洗掘量の評価が出来ないため、縦断崩壊面積で比較すると高水敷幅が狭いケース4が最も大きく、分岐流線が高水敷幅以上に広がっていないケース2・3は概ね同程度であった。

b) 河床勾配 1/4000

単断面であるケース1について、氾濫流況は破堤開口部から正面越流に近い形態となり、また開口部の洗掘が勾配 1/1000 より大きいことがわかる。この現象は複断面河道でも同様の傾向を示している。なおケース2・4に

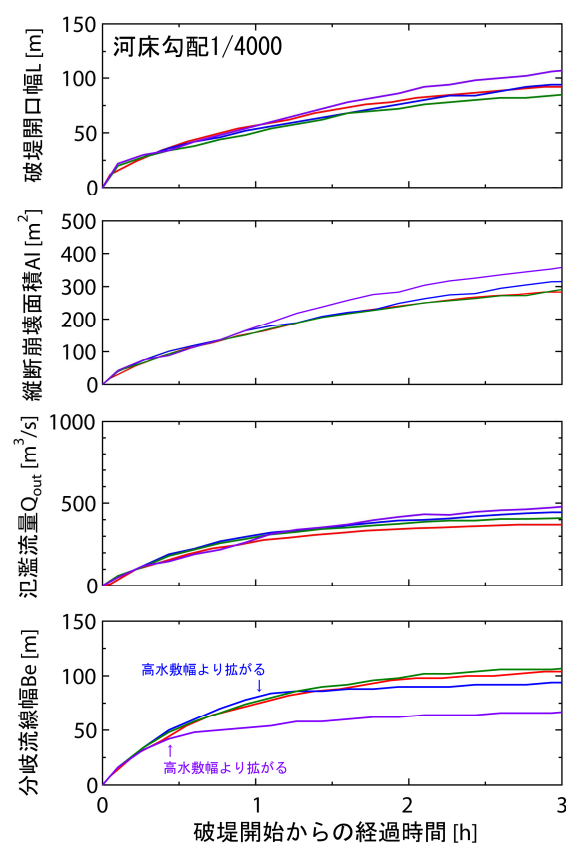
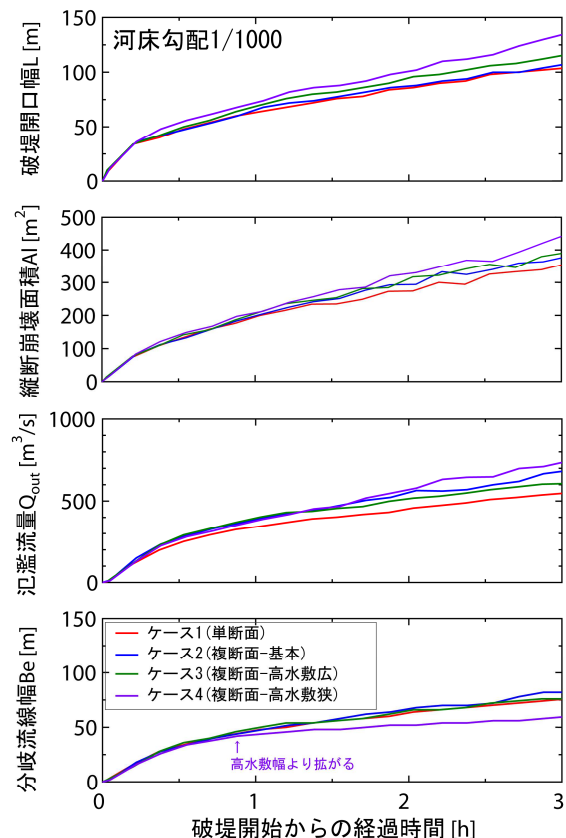


図-6 破堤進行過程の時系列変化

については分岐流線幅が高水敷幅以上に広がっており、特にケース4では低水路から破堤開口部にかけて高水敷上が全体的に低下して

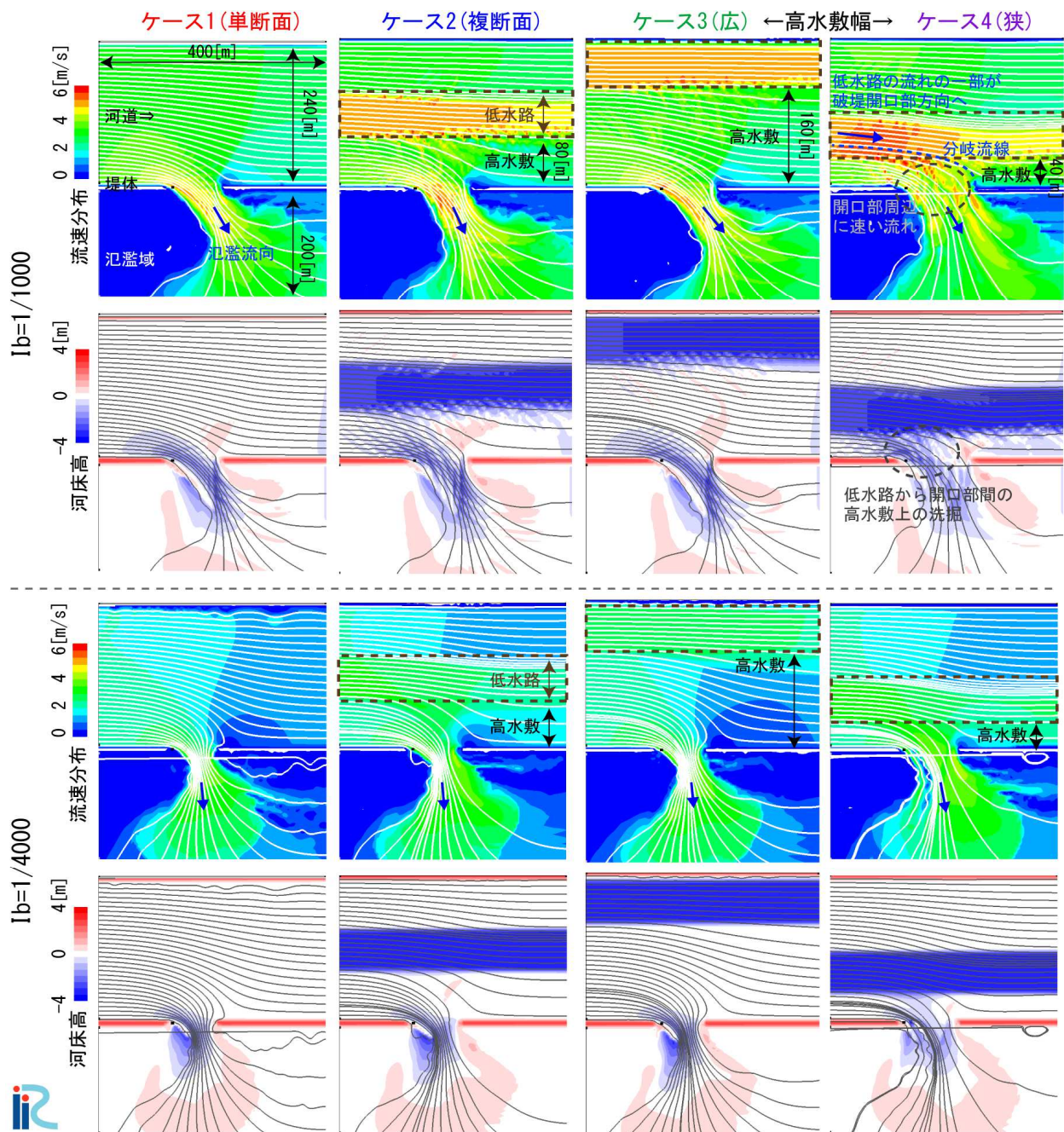


図-7 河道横断形状に応じた流況（上段）及び河床形状（下段）：破堤開始から3時間後

時系列変化について氾濫流量は高水敷幅が狭くなるにつれ大きくなっており、これは勾配が急である河床勾配1/1000と同様の傾向であった。

(3) 横断形状と破堤現象の関係

河川横断形状のうち単断面河道と複断面河道での破堤現象について比較を行った結果、河床勾配が急である場合は氾濫流況や河床洗掘は氾濫域に向かって斜め方向となる一方、河床勾配が緩い場合、氾濫流況や河床洗掘は正面越流に近くなり、また洗掘が急勾配よりも顕著となるなど、破堤進行過程については高水敷の有無にかかわらず共通した現象が多く見られた。これは千代田実験水

路での破堤実験で得られた様々な知見⁵⁾や、河道特性（川幅と河床勾配）に応じた破堤形態分類図の整理⁹⁾など、単断面河道での検討で得られた知見が複断面河道など様々な実河川においても適用できる可能性があると考えられる。さらに北海道開発局と寒地土木研究所で破堤現象の解析を踏まえ、破堤被害軽減に向けて様々な検討（破堤拡幅抑制工¹⁶⁾や破堤開口部の荒締切工法¹⁷⁾）を単断面河道の条件で進めているが、そこで得られた減災工法に関する知見について複断面河道においても活用できる可能性を示すものである。

高水敷の幅については、狭くなるほど（破堤拡幅に伴い分岐流線幅が高水敷幅以上になる条件）、どちらの河床

勾配でも氾濫流量が大きくなる傾向が見られる。これは破堤進行に伴う影響が低水路に及ぶことで、低水路から破堤開口部に向かう流れが生じ、破堤開口部周辺への外力が大きくなり、高水敷の洗掘や破堤拡幅を助長させる可能性があると考えられる。ここで高水敷幅の広狭の判断として分岐流線幅を考える必要があるが、これについて Nays2D Breach を用いることで、各河川事務所が管理する河川を対象に破堤拡幅の検討を行えば事前に把握することも可能であると考えられる。

4. 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 は複断面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。

- ・単断面と複断面河道において氾濫流況や破堤拡幅形態と比較したところ、河床勾配に応じて破堤進行過程が異なるなど定性的には同じ現象であり、既往の単断面での検討で得た知見を複断面河道にも活用できる可能性を示した。

- ・高水敷幅が分岐流線幅より狭い場合、氾濫流量が増大する危険性がある。

なお今回は河道横断形状の相違が破堤現象に与える影響把握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（直線河道、堤内外の比高差無、粗度係数一定、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再現等による検討が重要となる。

謝辞：本実験検討を行うにあたり、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，<http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/saigaikanren/saigai.html>

- 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) 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/ob/tisui/ctl1r0000002ul9.html>
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 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) 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。
- 11) 河川便覧 1994，国土開発調査会，pp.116，1994。
- 12) 渡邊康玄，山本昌慧，早川博，島田友典：縮尺の違いによる越流破堤実験の再現性の検討，土木学会論文集 B1（水工学），vol.68，No.4，I_1123-1128，2012。
- 13) 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。
- 14) iRIC，<http://i-ric.org/ja/>
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 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。

(2017.9.29 受付)

THE EFFECT OF CHANNEL CROSS-SECTION ON LEVEE BREACH PROCESSES

Tomonori SHIMADA, Yasuharu WATANABE, Hiroshi YOKOYAMA and Mitsuaki YONEMOTO

It is important to mitigate flood damage by overflow from a levee breached. The mechanism of levee breach has not been clarified. This study aims to clarify the effect of channel cross-section on levee breach processes by using a numerical model developed for levee breaches based on experimental results. The numerical results show that the mechanism of levee breach is qualitatively the same in single cross section and compound cross section.