

河床勾配と比高が破堤氾濫現象に与える影響

寒地土木研究所 寒地河川チーム ○神原 柚乃
寒地河川チーム 島田 友典
寒地水圏研究グループ 前田 俊一

近年、極端気象の頻発化に伴い、大規模な破堤氾濫被害が増加している。特に、天井川や急勾配河川では被害が甚大化するなど、地形条件が大きな影響を与えるため、これらの破堤氾濫特性を解明する必要がある。そこで、本論文では地形条件が堤防決壊や氾濫現象に与える影響を明らかにすることを目的に、代表的な地形条件である河床勾配と比高（河床高から堤内地地盤高を減じた値）に着目し、第一報としてiRIC（Nays2D Breach）を用いて数値シミュレーションを行った結果を報告する。

キーワード：堤防決壊、氾濫現象、流域治水、iRIC, Nays2D Breach

1. はじめに

近年、気候変動等の影響により大規模出水の頻度が増加しており、河川堤防の決壊が多数発生している。令和元年台風19号（令和元年東日本台風）による洪水では、**写真-1**¹⁾に示す千曲川の堤防決壊など計142か所の河川堤防が決壊し、約35,000haが浸水する被害が生じた²⁾。そのうち約8割は越水に起因するといわれており、越水による破堤氾濫被害を減少させることが求められている。

そのため、北海道開発局と寒地土木研究所では、実物大規模の実験が可能な千代田実験水路において越水破堤実験を実施し、破堤進行過程を明らかにしてきた³⁾。

また、昨今の水害の激甚化に伴い、国土交通省では流域全体で水害を軽減させる「流域治水」を推進している。そのため、河川管理者のみならず流域内の各主体（国・自治体・企業・住民等）への正確な水害リスク情報の提示が必要である。しかし、現行の治水経済調査マニュアル⁴⁾や浸水想定区域図作成マニュアル⁵⁾においては、氾濫流量を左右する最終破堤幅は、限られた過去の破堤事例から作成された川幅のみを変数とする経験式によって算出されている。また、破堤進行過程は河道内水位がHWLに達した後すぐに最終破堤幅の半分が破堤し、その後1時間かけて残りの半分が徐々に破堤するとの仮定に基づいており、破堤幅の実現象を十分に表しているとはいえない。そのため、破堤進行過程や、川幅以外の破堤氾濫現象に影響を与える要因を考慮し、より実災害に即した水害リスク評価を行うことが必要である。

このような背景から、破堤氾濫現象に各要因が与える影響を把握するために様々な研究が報告されている。

辻本ら⁶⁾は、河道形状（湾曲）や地形条件（比高）による破堤進行過程の違いを模型実験や数値計算を用いて検証した。その結果、河道湾曲部の内岸側と外岸側で破



写真-1 千曲川における破堤氾濫状況
（出典：国土地理院HP）

堤進行速度に違いはないが、外岸側が破堤した場合には破堤が上流方向にも進行することや、天井川の破堤では破堤進行が速く、さらに上流側の河道の河床洗堀も進むことを示した。島田ら⁸⁾は河道条件（川幅・河床勾配）による破堤進行過程の違いを模型実験や数値計算を用いて検証し、川幅と河床勾配に応じた破堤傾向を4種類に分類した。坂野⁹⁾らや鷺見ら¹⁰⁾は、河岸の樹林帯が破堤進行過程に与える影響を水理実験や数値計算で検証した。その結果、樹林帯を堤外地よりも堤内地に設置した方が氾濫流抑制効果が大きいことや、樹林帯の幅よりも密度の方が影響が大きいことを示している。また、石田ら¹¹⁾は平成28年の北海道豪雨時に破堤した空知川幾寅地区について再現計算を実施した。その結果、決壊箇所は1/180の急勾配であり、氾濫流が堤内地を河道に沿って流下したことを確認している。

しかしながら、堤内地の複数の地形条件が破堤氾濫に及ぼす影響は包括的に整理されていない状況である。

そこで本研究では、代表的な堤内地の地形条件である

表-1 計算ケースの水利諸元

ケース	河道		堤防		法勾配	氾濫域		流入量(m³/s)	等流水深(m)	フルード数
	勾配	川幅(m)	天端幅(m)	高さ(m)		勾配	比高(m)			
1	1/200	30	3	3	1:2	1/200	+1	508	2.7	1.1
2	1/200	30	3	3	1:2	1/200	0	508	2.7	1.1
3	1/200	30	3	3	1:2	1/200	-1	508	2.7	1.1
4	1/500	30	3	3	1:2	1/500	+1	321	2.7	0.7
5	1/500	30	3	3	1:2	1/500	0	321	2.7	0.7
6	1/500	30	3	3	1:2	1/500	-1	321	2.7	0.7
7	1/2000	30	3	3	1:2	1/2000	+1	161	2.7	0.4
8	1/2000	30	3	3	1:2	1/2000	0	161	2.7	0.4
9	1/2000	30	3	3	1:2	1/2000	-1	161	2.7	0.4
10	1/5000	30	3	3	1:2	1/5000	+1	102	2.7	0.2
11	1/5000	30	3	3	1:2	1/5000	0	102	2.7	0.2
12	1/5000	30	3	3	1:2	1/5000	-1	102	2.7	0.2

河床勾配と比高（河床高から堤内地地盤高を減じた値）に着目し、これら2種類の条件が破堤氾濫現象に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、数値シミュレーション（iRIC Nays2D Breach¹²⁾）を用いて基礎的な検討を実施した結果を報告する。

2. 方法

(1) 数値シミュレーション（iRIC Nays2D Breach）の紹介

本研究では、既往の千代田実験水路での実物大実験結果³⁾をもとに開発されたNays2D Breachを用いて数値シミュレーションを実施した。

Nays2Dとは、非定常平面2次元流れと河床変動計算の解析用ソルバであり、Nays2D BreachはNays2Dに破堤部分の侵食計算を組み込んだものである。破堤部分の計算では、堤体の崩壊量を既往の千代田実験水路の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を基に算出している。関係式は次式で表される。

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

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、 λ ：空隙率、 τ_* ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 α_* 、 β_* ：モデル定数である。現在、本シミュレーション方法においては、越水開始から破堤拡幅開始に至るまでの初期の堤体侵食過程は表現できない。そのため、破堤開始箇所の水位が2.7mになった時点で開始箇所から下流側に4mの区間の堤防高が河床高まで切り下がることとしている。

なお、本計算手法による破堤傾向の再現性については千代田実験水路を用いた現地実験や縮尺模型実験と比較し確認している^{3b)}。

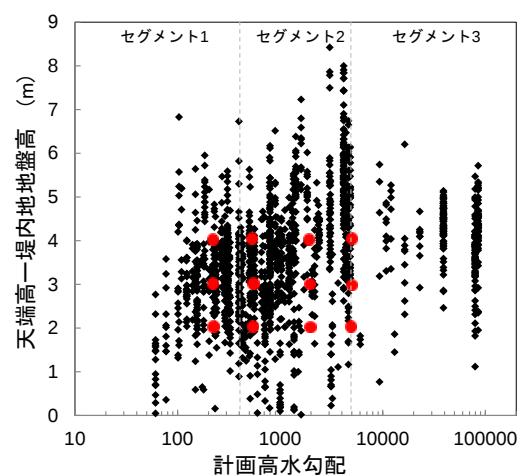


図-1 道内一級河川の地形条件
(出典：北海道開発局 HP)

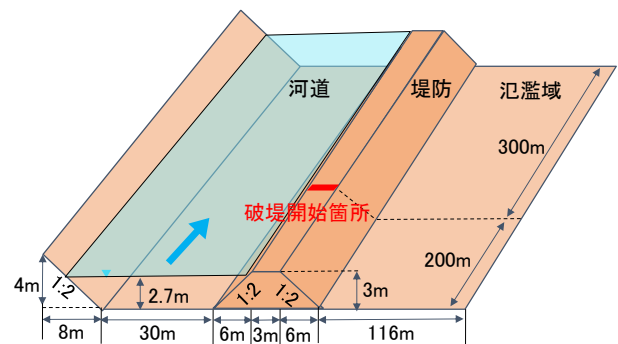


図-2 計算水路模式図

(2) 地形条件の設定

河床勾配と比高の計算条件を設定するにあたり、実河川の地形条件の整理を行った。図-1に北海道内の1級河川のうち北海道開発局のホームページ¹³⁾で公開されている河川区間の勾配（計画高水勾配）、天端高から堤内地地盤高を引いた値の関係を示す。この図を参考に、河床勾配はセグメント1相当の1/200、セグメント2相当の

1/500, 1/2000, セグメント3相当の1/5000の4種類, 比高は堤防高を3mとして河床高と堤内地地盤高が等しい ± 0 , 堤内地地盤高が河床高よりも+1m, 堤内地地盤高が河床高よりも-1m (天井川を想定) の3種類の計12ケース (図-1中赤点箇所) と設定した。

(3) 計算条件

表-1に各ケースの水利諸元を, 図-2に計算に用いた河川の模式図を示す。対象水路は単断面河道と破堤部 (縦断堤), 氾濫域からなる。河床勾配・比高以外の条件は千代田現地実験や既往成果との比較も念頭に同一条件とした。川幅は30m, 氾濫域幅は116m, 堤防の断面形状は高さ3m, 天端幅3m, 法勾配2割である。マンニングの粗度係数は0.023, 計算格子は2m $\times$ 2m, 計算区間は破堤開始箇所から上流200m, 下流300mの区間であり, 計算時間刻みは0.05秒とした。河床・堤体材料はいずれも粒形18mmの砂質土とした。河道下流端と氾濫域の上下流端と側方境界はいずれも自由流出とした。また, 流入量は各勾配の河道において, 河道内等流水深が2.7mとなるように設定した。計算時間は8時間である。

3. 計算結果

以下に各ケースの破堤氾濫状況を記す。また, 図-3に各ケースの代表的な破堤氾濫状況として, 破堤開始から4時間後の地形変化高 (上段) と流速分布 (下段) を示す。

(1) ケース1~3 (勾配1/200)

セグメント1相当の急勾配河川である。破堤拡幅過程の概要は, 既往の千代田実験水路での実物大実験³⁾と同様である。氾濫形態は流下型の傾向がみられる。河道内流速が大きく, 河道上流部において河床材料が洗掘されて河道下流部に土砂が堆積する。

a) ケース1 (勾配1/200・比高+1)

堤内地盤高が高いケースである。破堤開口部の堤内側よりも河道側下流半分に多く土砂が堆積することから, 氾濫流は破堤開口部全体から流出していることが見て取れる。

b) ケース2 (勾配1/200・比高 ± 0)

河床高と堤内地地盤高が等しいケースである。ケース1と異なり, 破堤開口部の河道側下流半分よりも堤内側上半分に多く土砂が堆積することから, 破堤開口部の堤内側上半分は死水域となり開口部下流半分から氾濫流が流出していることが見て取れる。堤内地では, 氾濫流の主流方向の両側に土砂が堆積し, さらに氾濫流速が大きいことから侵食を受け滞りが形成されたが, すぐに上流から運搬されてきた土砂により埋め戻された。

c) ケース3 (勾配1/200・比高-1)

河床高が堤内地地盤高よりも高い天井川のケースである。堤内外の水位差が大きく氾濫流速が大きい。そのため, 破堤開口部の河道側に土砂はあまり堆積せず, 開口部下流端付近から氾濫流が流出することから, 破堤口が急速に拡大し, 堤内地に多量の土砂が堆積する。また, 堤内地では, ケース2と同様に滞りが形成されるがすぐに上流から運搬されてきた土砂により埋め戻され, 滞りが下流部に平行移動していく様子が見られた。

(2) ケース4~6 (勾配1/500)

セグメント2相当の急勾配河川である。ケース1~3と同じく, 破堤拡幅過程の概要は既往の千代田実験水路での実物大実験³⁾と同様である。氾濫形態は流下型の傾向がみられる。河道内流速が大きく河道上流部の河床材料が洗掘されて, 河道下流部に土砂が堆積する。

d) ケース4 (勾配1/500・比高+1)

堤内地盤高が高いケースである。流速や堤内外の水位差が小さいため破堤氾濫は穏やかである。また, 開口部から流出せずに河道内を直進する流れの割合が大きく, 河道内下流部の流速が大きい状態が継続した。堤内地では, 氾濫流の主流方向に侵食を受け, その両側に土砂が堆積した。

e) ケース5 (勾配1/500・比高 ± 0)

河床高と堤内地地盤高が等しいケースである。破堤開口部上半分の堤内地側に土砂が堆積するため, 氾濫流が流出しづらく, 破堤開口部下流半分から氾濫流が流出し破堤が進行した。堤内地では, 氾濫流の主流方向に侵食を受け, その両側に土砂が堆積した。

f) ケース6 (勾配1/500・比高-1)

河床高が堤内地地盤高よりも高い天井川のケースである。ケース5同様, 破堤開口部上半分の堤内地側に土砂が堆積するが, 堤内外の水位差が大きい開口部全体から高速の氾濫流が流出した。開口部下流端付近では, 氾濫流は堤防法線に対して直交方向に流出した。破堤開口幅が100mを超えた後は氾濫流が開口部上半分と下流端の2手に分かれて流出した。

(3) ケース7~9 (勾配1/2000)

セグメント2に相当する。破堤拡幅過程の概要は, ケース1~6 (急勾配河川) での破堤状況と, ケース10~12 (緩勾配河川) での破堤状況の中間の形態を呈する。氾濫形態は流下型および拡散型の傾向がみられる。破堤開口部直下に落掘が形成される。

g) ケース7 (勾配1/2000・比高+1)

堤内地盤高が高いケースである。氾濫流は斜め下流方向に流出する。堤内外の水位差が小さく氾濫流速が小さいため, 堤内地に滞りの形成は見られなかった。

h) ケース8 (勾配1/2000・比高 ± 0)

河床高と堤内地地盤高が等しいケースである。氾濫流

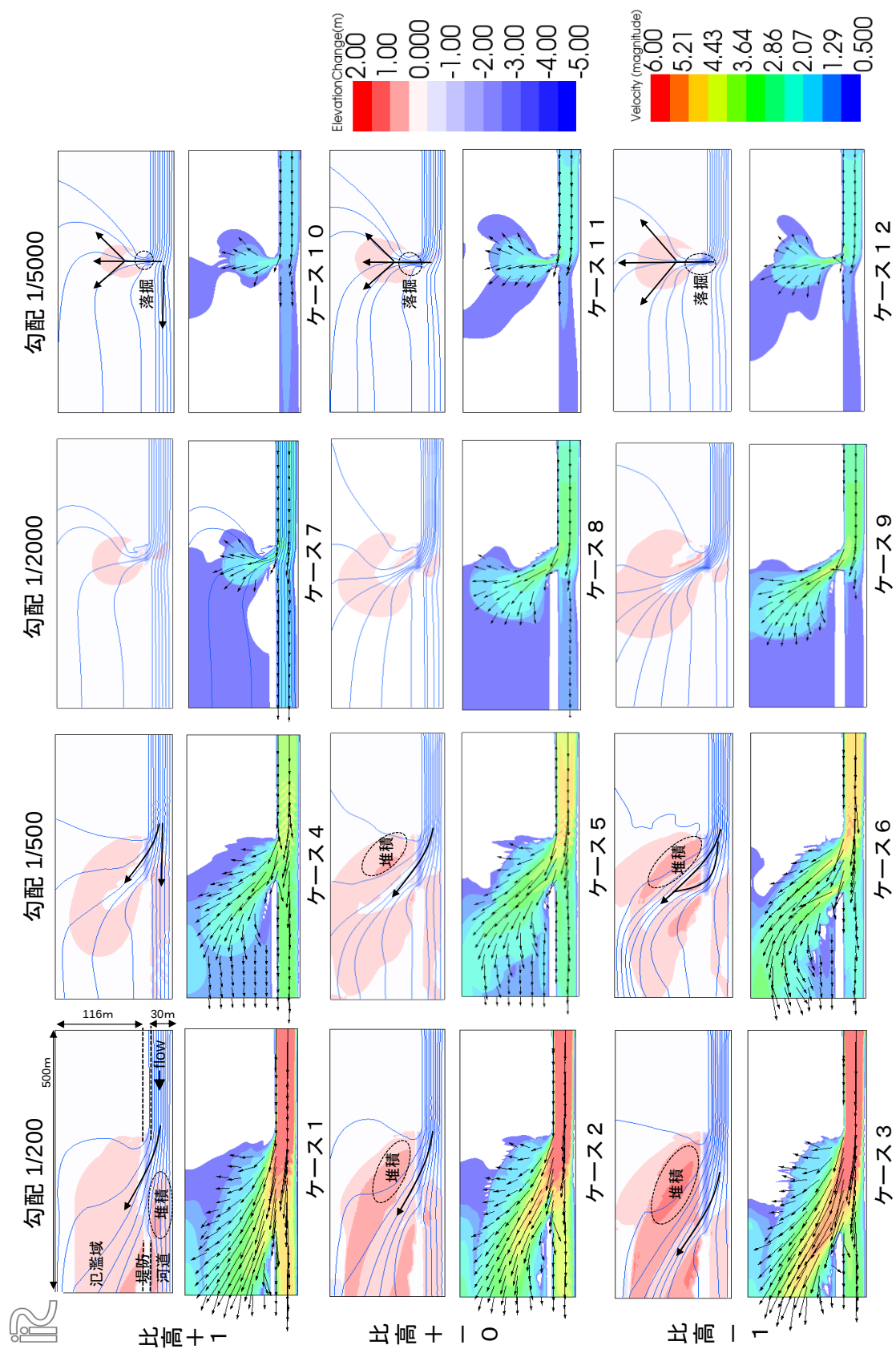


図-3 各ケースの破堤状況（上段：地形変化高・下段：流速）

は斜め下流方向に流出し、堤内地に滞筋が形成された。

i) ケース9 (勾配1/2000・比高-1)

河床高が堤内地地盤高よりも高い天井川のケースである。氾濫流は斜め下流方向に流出し、堤内地にケース8よりも大規模な滞筋が形成された。

(4) ケース10～12 (勾配1/5000)

セグメント3相当の緩勾配河川である。破堤進行過程の概要は、既往の千代田実験水路の縮尺模型実験⁹⁾での結果と同様であり、正面越流型の破堤形態をとる。破堤拡幅は30m程度で停止する。氾濫形態は拡散型の傾向がみられる。氾濫流は八方に広がり、堤内地の上下流方向がともに浸水した。氾濫破堤開口部直下に落掘が形成され、周囲に同心円状に土砂が堆積した。

j) ケース10 (勾配1/5000・比高+1)

堤内地盤高が高いケースである。氾濫流は正面越流して堤防法線に対して直交方向に流出するが、氾濫流速が小さく水深が浅い状態で拡散する。堤内外の水位差が小さいため、開口部から流出せず河道内を直進する流れの割合が大きくなる。

k) ケース11 (勾配1/5000・比高±0)

河床高と堤内地地盤高が等しいケースである。正面越流して氾濫流が堤防法線に対して直交方向に流出する。

l) ケース12 (勾配1/5000・比高-1)

河床高が堤内地地盤高よりも高い天井川のケースである。氾濫流は正面越流して堤防法線に対して直交方向に流出する。ケース10、11よりも堤内外の水位差が大きいいため、氾濫流速が比較的大きくなる。

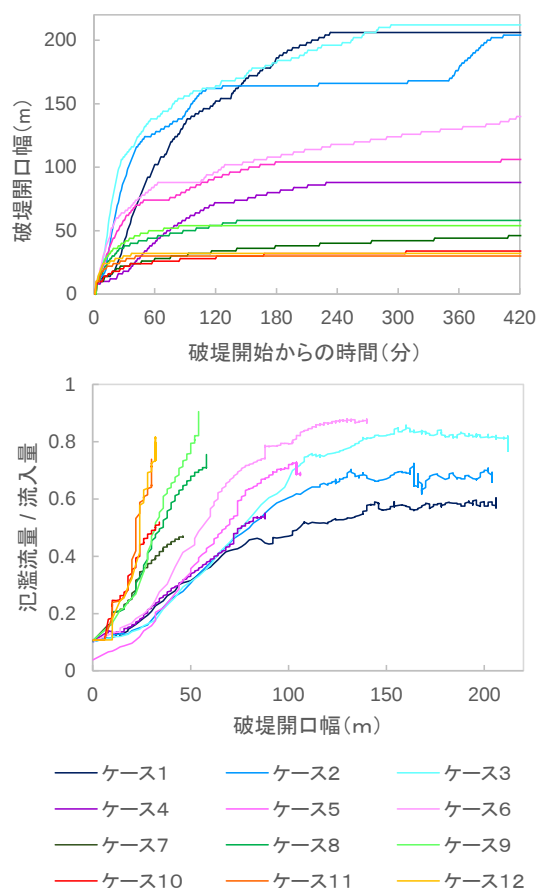


図-4 破堤開口幅と氾濫流量の関係
(上段：破堤開口幅の時間推移・
下段：流入量に対する氾濫流量の
割合)

4. 考察

上記の計算結果から各ケース間の結果を比較し、河床勾配と比高が破堤氾濫現象に与える影響を考察する。各ケースの破堤開口幅、流入量に対する氾濫流量の関係を図-4に示す。

(1) 破堤開口幅の時間推移

破堤開口幅は、同一の比高では河床勾配が急であるほど大きくなった。また、同一の河床勾配では破堤開始から120分程度は河床高が堤内地地盤高に比べて高いほど大きくなることが確認できた。ただし、120分以降では同様の傾向が見られなかった。この要因は、本計算条件において堤防の破堤開口幅の上限を220mと設定したことや、氾濫流が堤防法線に対して斜め下流方向に流出し、堤防が斜め方向に侵食されたことなどが考えられるが、本計算結果からは明らかにできない。そのため、今後破堤事例の分析や模型実験等を通して、本結果の検証をするとともに要因を明らかにする必要がある。

(2) 流入量に対する氾濫流量の割合

各破堤開口幅の時点での流入量に対する氾濫流量の割合は、同一の比高では河床勾配が大きいほど氾濫流量の割合が大きくなった。同一の河床勾配では破堤開口幅30m程度までは比高によらず概ね同一の値となった。30m以降は河床高が堤内地地盤高に比べて高いほど氾濫流量の割合が大きくなり、その差は破堤開口幅が大きくなるにつれて広がった。また、いずれのケースにおいても破堤開口幅が100m程度に達した後は、破堤拡幅が進行しても氾濫流量の占める割合がほとんど変化しなかった。この要因は、破堤開口幅が大きくなると河道内水位が低下することから、河道内と堤内地の水位差が小さくなり、氾濫流速が低下したことが考えられる。これは、島田ら⁹⁾が実施した水理模型実験ならびに数値計算とも同様の傾向であり、急勾配河川において同一の条件下では氾濫流量に一定の上限があり、比高がその一つの要因となりうると考えられる。

(3) 既往の経験式で算出した破堤開口幅との比較

現行の治水経済調査マニュアル⁴⁾や浸水想定区域図作

成マニュアル⁹⁾において用いられている既往の経験式をもとに算出した破堤開口幅の値と、本計算結果との比較を実施した。既往の破堤開口幅の経験式は合流点付近以外の場合次式で表される。

$$q_* = 1.6 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 62 \quad (2)$$

ここで、 y ：最終破堤開口幅（m）、 x ：川幅（m）である。経験式から算出した本計算条件における破堤開口幅は69mである。既往の経験式は破堤開始から1時間後に最終の破堤開口幅に到達するとしている。そのため、本計算結果の破堤開始から1時間後の破堤開口幅と比較すると、ケース1~3が経験式よりも過大、ケース5、6が概ね合致、それ以外が過小となっている。また、ケース4~6では1時間以降も破堤幅が継続し、最終の破堤開口幅は経験式よりも大きくなっていることが読み取れる。したがって、既往の経験式では本計算条件の破堤開口幅と合致しない部分がみられ、河床勾配や比高など川幅以外の変数も考慮した破堤開口幅の推定が必要であることが確認できた。

6. まとめ

代表的な地形条件である河床勾配と比高に着目して、これら2種類の条件が破堤氾濫現象に及ぼす影響を明らかにすることを目的に数値計算を実施した結果、以下の傾向がみられた。

- ・破堤開口幅は、同一の比高では河床勾配が急であるほど大きくなった。同一の河床勾配では破堤開始から120分程度は河床高が堤内地地盤高に比べて高いほど大きくなった。

- ・各破堤開口幅の時点での流入量に対する氾濫流量の割合は、同一の比高では河床勾配が大きいほど氾濫流量の割合が大きくなった。同一の河床勾配では破堤開口幅が30m程度までは比高によらず概ね同一の値となった。それ以降河床高が堤内地地盤高に比べて高いほど氾濫流量の割合が大きくなった。

- ・破堤開口幅が100m程度に達した後は、破堤幅が進行していても割合が変化しなかったことから、同一の条件下では氾濫流量に一定の上限値があると考えられる。

- ・河床高が堤内地地盤高に比べて低い方が破堤開口部付近の河道内外に土砂が堆積しやすく、また流速が小さい

ため堆積土砂の影響を受けて氾濫流向が支配されやすい。

- ・河床高が堤内地地盤高に比べて高い方が氾濫域の侵食量は大きい。急勾配の場合は上流側からの土砂によって埋め戻される。

このように、河床勾配や比高によって破堤氾濫現象に相違が生じることから、水害リスクの評価時にはこれらの地形条件を考慮することや、実災害時には地形条件に応じた応急対策等を実施する必要があると分かった。

また、これらは本計算条件下で得られた結果であり、今後さらなる実破堤事例の分析や水理模型実験を通して、検証を行う必要がある。それらをもとに、破堤氾濫現象に影響を及ぼす要因を分析し体系化することを通して、より実災害に即した水害リスクの評価を行っていききたい。

参考文献

- 1) 国土地理院, <https://www.gsi.go.jp/kohokocho/kakosai202001.html#taihu1> (参照日: 2024.01.10)
- 2) 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会: 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書, 2020.
- 3) 国土交通省北海道開発局, 寒地土木研究所: 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤幅過程に関する実験報告書, 2012.
- 4) 国土交通省: 治水経済調査マニュアル (案), 2020.
- 5) 国土交通省: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル (第4版), 2017.
- 6) 辻本哲郎, 鷺見哲也, 寺本敦子, 前田和: 破堤拡大過程と河川特性の関係について, 河川技術論文集, 第11巻, pp.121-126, 2005.
- 7) 辻本哲郎, 田代喬, Md.Serazul ISLAM, 吉池朋洋: 小規模実験による破堤に及ぼす河床高の影響検討-天井川区間の破堤災害のリスク-, 河川技術論文集, 第18巻, pp. 381-386, 2012.
- 8) 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.
- 9) 坂野章, 藤田光一: 堤防沿いの樹木群が破堤箇所の流れと河床変動に与える影響に関する実験, 土木学会第51回年次学術講演会, II-319, pp.638-639, 1996.
- 10) 鷺見哲也, 岸本雅彦, 辻本哲郎: 越流による破堤進行に及ぼす堤内地条件の影響, 土木学会河川技術論文集, 第10巻, pp.215-220, 2004.
- 11) 石田義明, 久加朋子, 清水康行: 2016年8月北海道豪雨における空知川幾寅地区の氾濫被害に関する調査および要因検証, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.73, No.4, I_1429-I_1434, 2017.
- 12) 破堤計算ソフト (Nays2D Breach), <https://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breach.html>, (参照日: 2024.01.10)
- 13) 北海道開発局河川管理課, <https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kan/kawa-kan/slo5pa000000zpx4.html>, (参照日: 2022.12.05)