

堤防決壊の事例をもとに考察した 背水区間での堤防の決壊現象について

A STUDY ON THE LEVEE BREACH IN THE BACKWATER REACH BASED ON THE INVESTIGATION OF THE PAST CASES

前田俊一¹・島田友典²・矢部浩規³

Shunichi MAEDA, Tomonori SHIMADA and Hiroki YABE

¹正会員 寒地土木研究所 寒地水圏グループ (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²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)

³正会員 工博 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)

Although levees are breached in the backwater reach as well as in the normal flow reach and the damage resulting from a levee breach in the backwater reach of the main river can be as serious as that in the main river itself, few studies on the levee breach in the backwater reach has been conducted. Accordingly, we collected data of levee breaches in the backwater reach that occurred in recent years, classified the collected breaches into two types according to the direction of flooding water flowing out of the breached section and examined characteristics of each of the types and mechanism of widening of the levee breach opening in the backwater reach.

Key Words : levee breach, backwater

1. はじめに

平成30年7月豪雨では西日本を中心に甚大な洪水被害が生じたが、特に、高梁川水系の小田川の流域では、小田川やその支川の堤防が決壊した結果、倉敷市真備町では浸水が広範囲に及び51名が死亡した。これらの堤防の決壊原因として「バックウォーター現象」という言葉がマスコミで盛んに用いられ、背水区間での堤防決壊が注目された。背水区間での堤防決壊は過去にも、例えば、平成28年8月の北海道豪雨でも複数の箇所が発生しており、決して珍しい現象ではない。また、支川の背水区間での堤防決壊は本川（合流先河川）堤防の決壊と遜色のない氾濫被害をもたらした。

堤防の決壊現象に関するこれまでの研究は、自流水間を対象にしたものが大半であり、背水区間の堤防決壊の現象を扱った研究はほとんど無く、その特徴は明らかになっていない。そこで、本研究では、背水区間での堤防決壊の事例を収集して、その特徴を整理して分類するとともに、決壊口の拡幅機構の要因について考察を行った。

2. 背水区間での堤防決壊の事例

本章では、筆者らが今回の研究対象として収集した背水区間での堤防決壊の事例の特徴等を紹介する。

(1) 背水区間での 堤防決壊事例の収集

まず、平成30年7月豪雨や平成28年の北海道豪雨を中心に、背水の影響により堤防が決壊したと思われる事例を収集した。その上で、他の堤防決壊の影響を受けている等、当該箇所の堤防決壊現象が複雑になっていると思われる事例（例：小田川左岸3k400での堤防決壊）を検討対象から除外した。最終的な検討対象は表-1及び表-2の6事例である。

(2) 各事例の特徴

6事例の特徴や関連情報等を以下に記す。

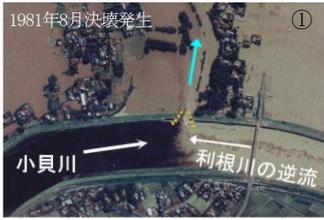
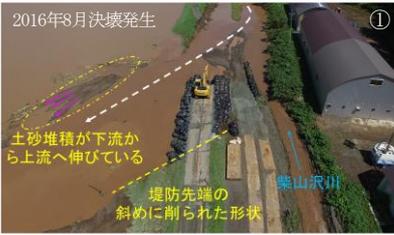
a) 小貝川

洪水時の小貝川と利根川の水の色が違うため、表-1の写真①から利根川の水の逆流する様子や氾濫流が決壊口から堤内に流入する様子がよくわかる。また、表面流速ベクトル図（表-1の図③）から、氾濫流の流向は堤防法線に対して概ね直角方向である。さらに、表-1の写真②から、落掘の長軸方向が氾濫流の流向と概ね一致していることがわかる。

b) 柴山沢川

表-1の写真②における青色の楕円内の2つの落掘の形

表-1 検討対象となった背水区間での堤防決壊の事例（その1）

河川名(水系名)	小貝川(利根川水系)	柴山沢川(常呂川水系)	東亜川(常呂川水系)
氾濫時及び水が引いた後の状況等	  	 	 
氾濫形態	非貯留型	貯留型	貯留型
川幅	190m*	20m ²	40m ⁹
決壊延長**	110m ¹	100m ³	50m ⁹
決壊時の 河川流量***	小貝川：10～70m ³ /s程度 利根川：5,000m ³ /s程度	柴山沢川：1m ³ /s程度 常呂川：1,500 m ³ /s程度	東亜川：0.5～9m ³ /s程度 常呂川：1,000～1,500m ³ /s程度
氾濫流の流向	堤防法線に対して概ね直角方向	—	—
堤内の地形変化	堤防法線に対して概ね直角方向に卓越	堤防法線に対して斜め上流方向に卓越	堤防法線に対して若干斜め上流方向に卓越
落掘(洗掘)	明瞭に見られる	2箇所見られる	若干見られる
表中の写真 及び図の出典	①～③：参考文献1)	①：参考文献3) ②：土木学会北海道豪雨災害調査団提供	①：国土地理院撮影 ②：国土交通省北海道開発局提供

※Google Earthの定規機能を使用して測定。 ※決壊延長はいわゆる被災延長であるため、決壊口に隣接して堤防が部分的に流出した部分も含む。 ※決壊時の河川流量とは、決壊した河川の決壊地点周辺及び合流先河川の合流地点周辺での決壊直後から決壊後10時間程度までの間の概ねの流量。各欄の下の河川は合流先河川である。流量の出典は国土交通省水文水質データベースまたは河川管理者からの提供。以上のことは表-2も同様。

状から、決壊口から斜め上流に向かって氾濫流が堤内に流出していたと考えられる。さらに、黄色の楕円で示した決壊口内の深掘れ箇所（緊急締切工事の現場代理人への聞取調査結果⁹⁾に基づく）、堤防先端の斜めに削られた形状（表-1の写真①）、上流側の落掘の形状及び緑色の楕円内の大きく折れ曲がったビニールハウスの骨組から、上流側の落掘が形成された時点では、写真中の赤矢印が主流部となる氾濫流が発生していたと考えられる。したがって、常呂川の水が逆流し、ビニールハウスの骨組を曲げるような勢いで堤内地に流れ込んだと推察される。常呂川の堤防調査委員会の報告書³⁾でも、表-1の写真①の黄色一点鎖線の楕円で囲った堤内地の土砂堆積状況から、「流向は下流から上流に向かっており、常呂川の背水による越水と判断できる。」と考察されている。

c) 東亜川

堤防決壊は背水区間の上流端付近で発生しており、表-1の写真①、②における堤内地の土砂の堆積・洗掘状況か

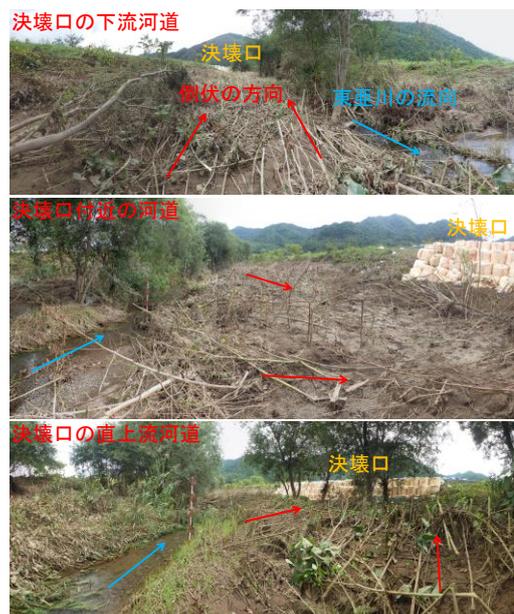
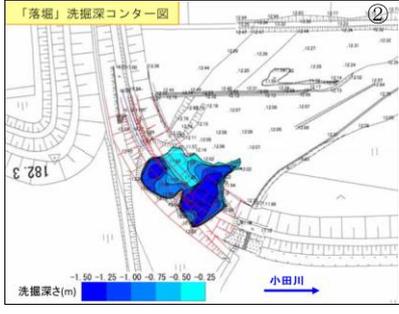
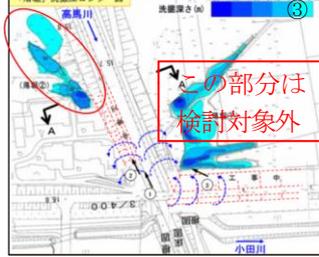


写真-1 東亜川の河道内植生の倒伏状況（北海道庁提供）

表-2 検討対象となった背水区間での堤防決壊の事例（その2）

河川名(水系名)	幾品川(斜里川水系)	小田川(高梁川水系)	高馬川(高梁川水系)
氾濫時及び 水が引いた後の 状況等	 	  ※図からは堤内地の地形変化の状況を読み取ることができないが、洗掘深が25cm未満の部分は着色されていない点に注意	   この部分は検討対象外
	氾濫形態	貯留型	—
川幅	80m ^④	210m [※]	12m [※]
決壊延長 [※]	30m ^④	55m ^④	55m ^④
決壊時の 河川流量 [※]	幾品川：不明 猿間川：150m ³ /s程度	小田川：— 高梁川：—	高馬川：— 小田川：—
氾濫流の流向	—	—	—
堤内の地形変化	堤防法線に対して概ね直角方向に卓越	堤防法線に対して概ね直角方向に卓越	堤防法線に対して斜め上流方向に卓越
落掘(洗掘)	見られない	ある程度見られる	ある程度見られる
表中の写真 及び図の出典	①, ②：北海道庁提供	①：国土地理院撮影 ②：参考文献⑤)	①：国土地理院撮影 ②, ③：参考文献⑤)

ら、氾濫流の流向は堤防法線に対して直角よりもやや上流方向と推察される。また、表-1の写真①から河道内に繁茂していたオオイタドリ（タデ科の大型の多年草）の倒伏範囲は、概ね常呂川の合流点付近から決壊口の直上流までに限定されている。決壊口よりも下流側は、常呂川からの逆流によって合流点付近から決壊口までの長い区間で上流側に倒伏しているが、決壊口よりも上流側は、決壊口に向かう順流によって決壊口近傍のみが下流側に倒伏している（写真-1）。このため、堤防決壊時の常呂川からの逆流による流体力は、オオイタドリがほとんど倒伏していない東亜川の流体力よりも大きかったと考えられ、その結果として、氾濫流の流向が堤防法線に対して若干上流方向に向いた可能性が考えられる。

d) 幾品川

表-2 の写真①, ②の堤内地の土砂堆積状況から、氾濫流の流向は堤防法線に対して概ね直角方向と推察されるが、落掘らしき洗掘は確認できない。

e) 小田川

表-2の写真①の落掘の形状から、氾濫流の流向は堤防法線に対して概ね直角方向と推察される。

f) 高馬川

表-2の写真①の落掘の形状及び図③の洗掘深コンター図から、決壊口から斜め上流に向かって氾濫流が堤内地に流出していたと考えられる。

3. 背水区間における決壊口の拡幅機構

本章では、6事例の特徴や自流区間での堤防決壊現象に関する研究成果を参考にして、想定され得る背水区間での決壊口の拡幅機構を説明する。

(1) 背水区間での堤防決壊の類型化

6事例を氾濫流の流向（小貝川以外は地形の変化から流向を類推）に着目して類型化すると、①堤防法線に対して斜め上流方向に氾濫流が流出する場合（3事例）と、②概ね直角方向に流出する場合（3事例）の2つに分類できる。ここで、①と②の特徴を見るために、6事例の川幅と決壊延長の関係を図-1に示す。川幅に対して①は決壊延長が大きく、②は決壊延長が小さい傾向にあること

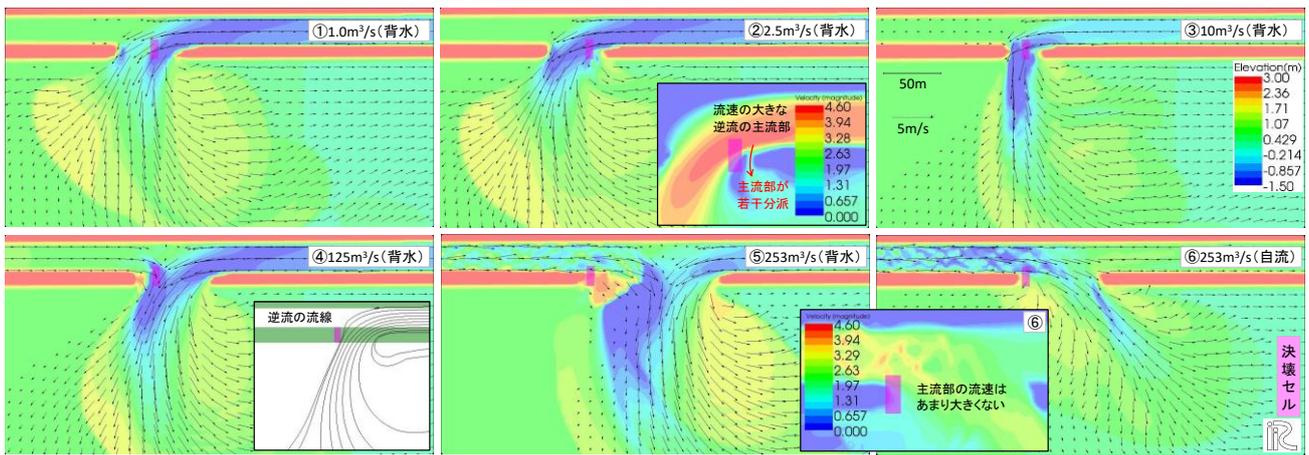


図-3 堤防決壊から5時間後の決壊口周辺の状況（氾濫流及び地形変化）

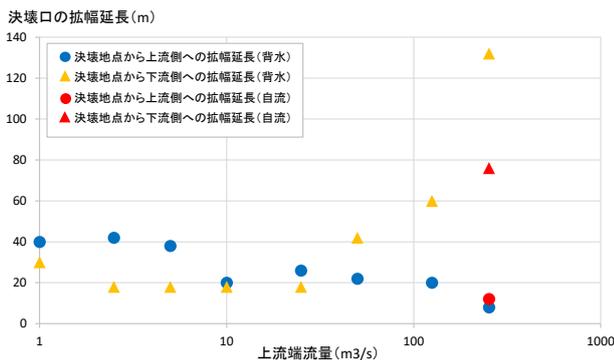


図-4 上流端流量と決壊延長の関係

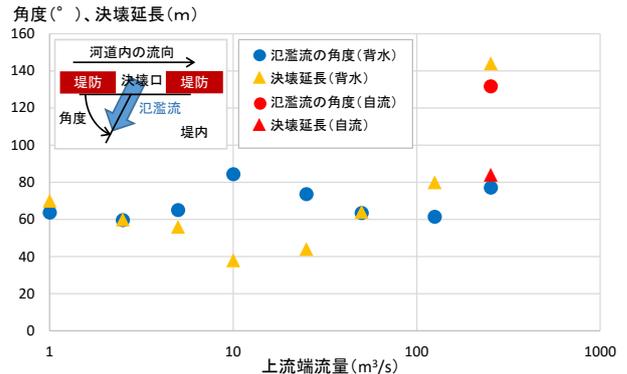


図-5 氾濫流の流向と決壊延長の関係

マンニングの粗度係数は全計算領域で0.035、堤体及び河床材料の粒径はともに25mmとした。境界条件は自流と背水の違いによる堤防決壊現象の違いを見るため、計算領域の下流端や側方の境界条件は自由流出で統一した。

また、堤防決壊地点は計算区間の中央に設定した（図-2）。背水による堤防決壊の場合、一定流量を上流端から与え続け、下流端水位を後述の堤防決壊水位（3.8m）よりも低い状態から徐々に上げて、下流端水位が堤防決壊水位に達した後は、その水位を保つこととした。自流による堤防決壊の場合、決壊地点で堤防決壊水位となる上流端流量（253m³/s）を与え続けた。以上により、自流による堤防決壊も背水によるそれも、決壊地点での水位が概ね同じ状態で堤防決壊を発生させることができ、背水影響の有無による堤防決壊現象の違いを見ることができる。また、計算時間は堤防決壊後5時間までとした。

なお、Nays2D Breachは、越水開始から決壊口の拡幅過程に入る直前までの堤体の侵食過程を表現できない。このため、この間の過程を簡略化し、堤防決壊地点の河川水位（背水による堤防決壊の場合は下流端水位）が堤防決壊水位に到達した後に、堤防を縦断方向に8mにわたり瞬間的に下刻決壊させるようにした（この8mの間を図-3では「決壊セル」と称している）。

計算ケースは、自流による堤防決壊1ケース（上流端流量253m³/s）と、背水による堤防決壊8ケース（上流端流量が1m³/s、2.5m³/s、5m³/s、10m³/s、25m³/s、50m³/s、125m³/s、253m³/s）の合計9ケースである。

(2) 計算結果及び考察

上記9ケースの内の主要な計算結果（計算終了時）を図-3に示す。決壊直後は1～125m³/sのケースでは、氾濫流が堤防法線に対して直角方向に流出して堤内の地形変化もその方向に進み、253m³/sの2ケースの氾濫流は若干上流側に流出したが、その後はケースごとに流況や地形の変化の傾向に違いが見られたので、以降で説明する。

a) 決壊口の拡幅機構

図-4に決壊地点から上下流方向への決壊口の拡幅延長（堤防天端中央での測定値）を示す。背水による堤防決壊では、上流端流量が小さいほど決壊口の上流側への拡幅延長が大きくなる傾向にある。これは、3.での考察（自流の流量が小さいほど、計算終了時点での順流と逆流の衝突地点の上流側への移動距離が大きくなるため、決壊口の上流側への拡幅の程度が大きくなる）と整合の取れた結果となっている。

一方で、上流端流量と下流側への拡幅延長の関係は明瞭ではなく、上流端流量が小さくても下流側への拡幅は一定程度進んでいる。この理由としては、253m³/sのケースを除き、決壊直後には氾濫流が直角方向に流出して上下流に概ね均等に拡幅が進むこと、流速の大きな逆流の主流部が決壊口の下流側堤防の先端近傍を通過するために、川表側を中心に下流側堤防の侵食が進むこと、さらに逆流の主流部が若干分派して下流側堤防を侵食することが考えられる（図-3②の流速コンター図）。また、上流端流量が125m³/s以上になると、順流と逆流の衝突地

点が決壊地点よりも下流に移動する（図-3④の逆流の流線図）ことによって下流側への拡幅が大きく進んでいる。

以上より、背水による堤防決壊では、順流と逆流の衝突地点の移動距離に応じた決壊口の拡幅と、上流端流量が小さくても一定程度進む決壊口の下流側への拡幅が、決壊口の拡幅現象を支配しているものと考えられる。

b) 氾濫流の流向及び決壊延長

図-5に氾濫流の流向（図-5に示すように、川裏法尻のラインを横切る氾濫流の主流部の角度を反時計回りで測定）と決壊延長の関係を示す。背水による堤防決壊では、上流端流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ の場合に決壊延長が最小となり、この時の氾濫流の流向は堤防法線に対して概ね直角となった。これ以外の場合の氾濫流の流向は程度の差こそあれ、全て堤防法線に対して斜め上流となった。この傾向は図-1で整理した結果（氾濫流の流向が堤防法線に対して斜め上流になると決壊延長が大きくなり、概ね直角方向になると決壊延長は大きくなり）と一致する。

また、 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下の範囲では、上流端流量が小さくなるに従って決壊延長が大きくなるとともに、氾濫流の流向もより上向きになる傾向を示しており、上流端流量が小さくなるほど逆流の流体力の影響が相対的に増して、氾濫流の流向がより上向きになった可能性が考えられる。

しかしながら、 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以上の範囲では、上流端流量が小さくなるほど決壊延長は小さくなるが、氾濫流の流向に一定の傾向を見出すことは難しい。特に、 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上では、決壊口は下流側により大きく拡幅するが（図-4）、氾濫流の流向が上流向きであり、拡幅の卓越方向と氾濫流の流向の関係は順流と逆流の流体力の大きさだけでは決まらない複雑な関係があると考えられる。

c) 自流による堤防決壊との比較

今回の計算結果から、背水による堤防決壊では、自流によるそれと比べて以下のような特徴があると考えられる。

- ①上流端流量がある程度増えると、自流による堤防決壊と同様に、決壊口が主に下流側に拡幅していくが、氾濫流の流向は堤防法線に対して斜め上流（自流の場合は斜め下流）である（図-3⑤、⑥）。
- ②氾濫流の主流部の流速がかなり大きい（例えば、図-3③、⑥の流速コンター図の比較）。これは各ケースの逆流の流量が約 $320\sim 540\text{m}^3/\text{s}$ もあり、自流のケースの $253\text{m}^3/\text{s}$ よりもかなり大きいためである。
- ③順流の流量の大小に依らず（除 流量が非常に大きい場合）、決壊口の下流側への拡幅はある程度進む（自流の場合は、決壊口の上流側への拡幅はあまり進まない）。
- ④順流の流量の大小により、決壊口の主要な拡幅方向が決まる（自流の場合は、常に主に下流側に拡幅）

5. まとめ

以下に今回の検討で得られた主な知見をまとめる。

- ・背水区間での堤防決壊事の事例を氾濫流の流向に着目

して分類すると、①堤防法線に対して斜め上流方向に氾濫流が流出する場合と、②概ね直角方向に流出する場合の2つに分類することができ、①は決壊延長/川幅が大きく、②は小さい傾向にある。これは、自流区間での氾濫流の流向と決壊延長の関係と同じである。また、数値計算によっても概ね直角方向に流出する場合の決壊延長は短くなることが示された。

- ・合流先河川からの逆流と支川の自流による順流の流体力の差の大きさが、氾濫流の流向や決壊口の拡幅に影響を与えている要因の一つと考えられる。
- ・背水区間での堤防決壊では、順流と逆流の衝突地点の移動距離に応じた決壊口の拡幅と、上流端流量が小さくても一定程度進む決壊口の下流側への拡幅が、決壊口の拡幅現象を支配しているものと考えられる。

本論文では決壊から5時間後の状況を検討対象としたが、今後は決壊現象の時間的な変化を追うとともに、河道諸元や境界条件等を変えた数値計算を行う予定である。また、水理模型実験も合わせて実施していきたい。

参考文献

- 1) 石塚隆勇ほか編修：災害復旧記録 昭和56年台風15号出水による小貝川高須地先（I） 昭和61年台風10号出水による小貝川赤浜・豊田地先（II） 小貝川災害復旧記録DVD（36min），社団法人関東建設弘済会，2009。
- 2) 前田俊一，島田友典：堤防決壊時における氾濫流がある中での緊急締切工事等の事例紹介（その1），寒地土木研究所月報，No.779, pp.27-44, 2018。
- 3) 常呂川堤防調査委員会：常呂川堤防調査委員会報告書，2017。
- 4) 前田俊一，島田友典：堤防決壊時における氾濫流がある中での緊急締切工事等の事例紹介と背水区間における緊急締切工事の留意事項，寒地土木研究所月報，No.791, pp.35-51, 2019。
- 5) 国土交通省中国地方整備局：高梁川水系小田川堤防調査委員会（配付資料），2018。
- 6) 島田友典ほか：川幅と河床勾配が破堤現象に与える影響，査委員会（第5回配付資料），土木学会論文集B1（水工学）Vol.73, No.4, I_1345-I_1350, 2017。
- 7) iRIC:<http://i-ric.org/ja/>
- 8) 柿沼孝治ほか：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) 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.745, pp.39-45, 2015。
- 10) 川幅と河床勾配が破堤現象に与える影響，土木学会水工学論文集，第61巻，2016。
- 11) 深澤アダム翔ほか：柴山沢川の背水による破堤機構と拡幅後の現象について，平成30年度 土木学会北海道支部論 論文報告集 第75号，2020。

(2019. 4. 2受付)