

北陸の急流河川における破堤事例の整理(その2)

内堀 伸吾・小林 崇・斎藤 充・杉崎 亮太・徳島 美幸
利根川 哲朗・長谷川 賢市・堀内 崇志・南 健二

専門技術研究会（急流河川）

専門技術研究会（急流河川）では、北陸3河川における過去の破堤事例について、平成24年度より既往文献等から情報を収集・整理し、その特徴をとりまとめ、平成25年度事業研究発表会で報告している。

本報告は、氾濫シミュレーション、平面2次元流況解析等の水理解析を用いて、破堤氾濫について、その特性を検証し、破堤する危険性が高い箇所を抽出する。さらに、破堤リスクの高い箇所における氾濫シミュレーションを実施し、破堤の特徴をより明らかにすることで、急流河川対策における課題を整理する。

キーワード 急流河川、破堤、氾濫解析、流況解析、危険箇所

1. はじめに

近年、規模が大きく広域に影響が及ぶ自然災害が頻発し、災害対策の必要性、緊急性が従前にもまして大きくなっている。一般的に災害対策はハード整備とソフト対策に分類され、想定を超える災害の発生や財政事情等を踏まえると、両者をバランス良く整えていくことが求められているが、我が国ではハード整備は依然十分とは言いがたく、まだまだ必要であることは論を待たない。

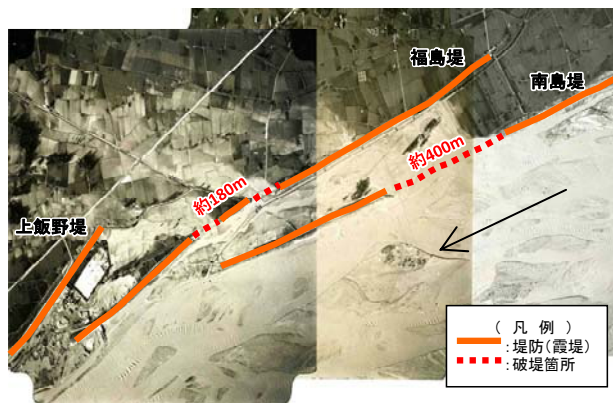
また、災害対策を時間軸で見ると、事前、最中、事後の三つのフェーズに分けられる。事前では、ハード整備のほか、ソフト面ではハザードマップなどの警戒避難態勢の確立や訓練など、災害が発生する前から準備対応することにより災害を防ぐ、あるいは減災に資する対策がある。最中では、災害の種類により限定的ではあるが、例えば、水害では洪水が増加し堤防が決壊しつつある最中における被害の拡大を防ぐ水防活動や避難救助があり、さらに、事後対策として二次災害の防止のためのハード、ソフトがあり、各々のフェーズに応じた的確な対応、措置が図られることが重要となる。

これらを実現化するためには、災害事象の時空間的変化の把握が必要不可欠で、過去の災害事例の分析が最も効果的かつ確実な方法であることは言うまでもない。

北陸地方を代表する急流河川の破堤氾濫は、地域に甚大な影響を与えることが過去の事例から見ても明らかで、急流河川が被災・破堤に至る場合の対応は、その時間的早さも相まって、より迅速かつ的確な対応が求められる。北陸の急流河川の破堤実績は、河川整備や水防活動の効果もあってか、過去50年の範囲では、写真1-1に示すとおり、昭和44年洪水の黒部川、常願寺川、平成7年

姫川の3例である。時間の経過とともに、携わった先人が少なくなっていること、関係資料が散逸すること等を踏まえ、専門技術研究会（急流河川）では、平成24年度より急流河川の破堤の特徴の分析に取り組み始め、平成25年度に中間報告¹⁾を報じている。

本報告では、前報告において得られた知見を踏まえ、氾濫シミュレーションや平面2次元流況解析などにより、破堤の特徴を明らかにするものである。



S44年 黒部川 R6.4k (福島)



S44年 常願寺川 R17.8k (岩崎野)



H7年 姫川 R2.6k (上刈)

写真1-1 急流河川の破堤状況

2. 急流河川における破堤実績^{1) 2)}

1) 黒部川 (昭和 44 年洪水)

黒部川では、昭和 44 年 8 月 11 日洪水により、右岸 8.1K の南島で 400m、二番堤の福島で 2 箇所 180m 破堤した。愛本基準点で 14 時 45 分にピーク流量 5,661m³/s を記録したもので、観測史上最大である。破堤は、記録より 16 時 50 分といわれており、愛本基準点のハイドロから推定すると、ピーク流量発生から約 2 時間後となる。

破堤地点は常にお筋があたる水衝部であった。堤防の前面に 100m 程度の高水敷があり、天端幅は 14m と定規断面を満足していたが、木工沈床、空石張護岸が被災して破堤に至っている。また、堤防裏法尻で一部漏水が生じ、30 分程で一気に破堤に至ったと記録されている。

写真 2-1 に破堤状況を示すが、氾濫流が右岸扇状地を流下し、浸水面積約 1,050ha、家屋全半壊 7 戸、家屋浸水 846 戸の被害に及んだ。



①南島堤護岸の洪水状況

②南島堤護岸の欠壊状況



③南島堤護岸の破堤状況

写真 2-1 南島堤護岸の破堤状況 (S44. 8. 11)

2) 常願寺川 (昭和 44 年洪水)

常願寺川では、昭和 44 年 8 月洪水により、右岸 17.8K の岩峠野で約 280m 破堤している。幸いにも堤防が破堤した区間には二番堤があり、氾濫流が堤内地に被害を及ぼすことはなかった。

破堤は、記録より 11 日 14 時 50 分といわれており、ピーク流量発生から約 3 時間後となる。また、破堤地点の最高水位は、HWL を超過していたが、左岸側は流速も緩やかで、水深も 1.0m 程度で、かなりの偏流が生じていたとのことである。

破堤地点の天端幅 9.0m、余裕高 2.0m で HWL 以下が練石張、HWL 以上が空石張であり、十字ブロック (4 t) が根固工として幅 10.2m で敷設してあった。河床勾配は 1/49 と急峻で、洪水前に基礎高 (HWL - 4.5m) まで河床洗掘が進んでいたことが確認されている。写真 2-2 及び図 2-1 に示すとおり、聞き取りによれば、主流が右岸側の上滝床固の元付工に激突、オーバーフローして元付工の下流部の護岸が破壊、侵食され、約 10 分程で

約 280m の堤防が破堤に至ったとの話である。

これらの現象から堤防破堤のメカニズムとしては、洪水の主流が土石を伴い、元付工を溢流して、河床洗掘により根固工を流失し、あわせて堤防法面を破壊して、いっきに元付工下流堤防が決壊・流失したと考えられる。

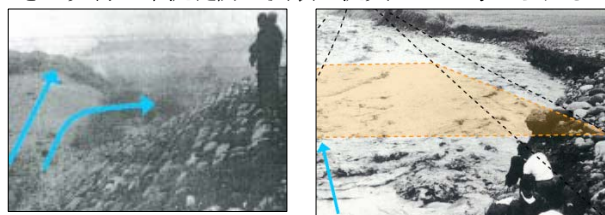


写真 2-2 岩峠野堤護岸の破堤状況 (S44. 8. 11)

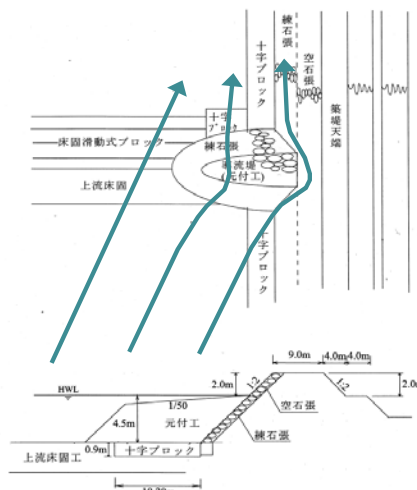


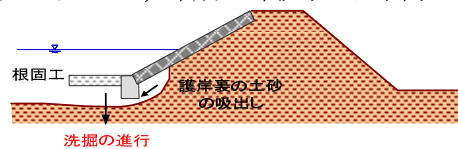
図 2-1 上滝床固右岸側の平面図・横断面

3) 姫川 (平成 7 年洪水)

姫川では、平成 7 年 7 月洪水により、右岸 2.6k の上刈で 67m 破堤している。その被害は、浸水面積 24ha、家屋損壊 1 戸、家屋浸水 2 戸であった。

11 日 15 時から 17 時までの水位上昇は破堤地点上流の観測地点山本で 1.6m となっており、18 時にはピーク流量規模の流量を観測した。破堤は、その 2 時間半後に確認されている。

破堤直後の調査結果によると、護岸は計画河床より 1m 下がりの根入れがあったが、平成 7 年洪水では水衝部となり計画河床高より約 1.7m 洗掘されている。ピーク時には、



洗掘の進行

11m/s 程度の流速が発生したと予想され、図 2-2 に示すとおり、①6t の根固めブロックは重量不足で流失した。

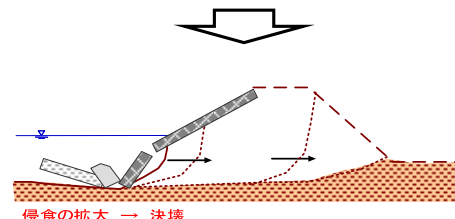


図 2-2 姫川の破堤メカニズム

その後、②根固め工の保護を失った護岸基礎が流失し、

③法覆工の背面土砂が吸い出され、法覆工の幅方向に4m以上の空洞が生じた。④法覆工の自重により曲げ応力が護岸の耐力を上回った結果、法覆工が倒壊して、⑤破堤へと至ったものと推察されている。

3. 破堤リスク要因と課題

3-1 破堤要因

1) 破堤地点の特性

洪水特性や河道特性、護岸耐力の観点から、表 3-1 に示すとおり、3河川の破堤地点の特性を比較する。

洪水特性については、既往最大洪水やピーク流量 2～3 時間後の侵食破堤などの共通要素が挙げられる。特に、流量規模は、その増大により、流体力や掃流力、高水位継続時間も増大することから、河床洗掘等に影響を及ぼす重要な要素である。過去 50 年においては、既往最大洪水である S44 洪水の黒部川及び常願寺川、H7 洪水の姫川で破堤し、それ以外の洪水では破堤しておらず、全川を通してみれば、これらの洪水規模が破堤の条件と考えられる。

河道特性については、破堤地点の河床勾配は約 1/50～1/100 と極めて急流である。また、湾曲外岸及び砂州の固定化による水衝部や洪水時の砂州の発達、水みち形成による水衝作用の増大なども挙げられ、破堤の原因の一つと考えられるが、必ずしも破堤に至るものではない。

護岸耐力については、根固工の木工沈床や重量不足、基礎工の根入れ不足、法覆工の空石張などの問題点が挙げられる。

表 3-1 破堤地点の特性

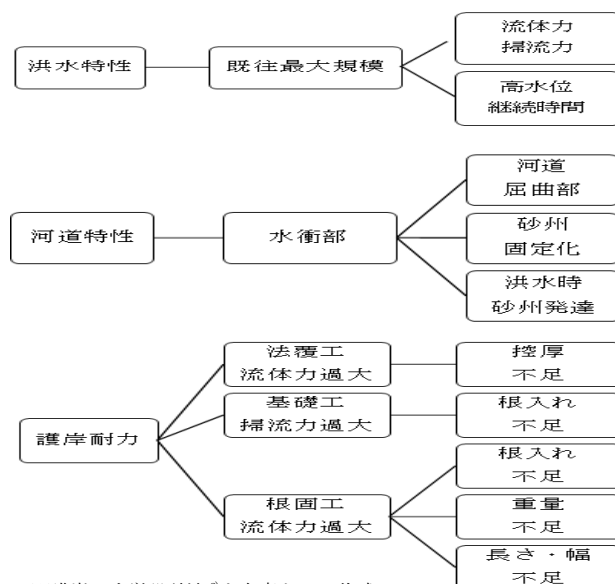
破堤地点の特性	黒部川 S44	常願寺川 S44	姫川 H7	特徴等
洪水特性	ピーク流量 既往最大	5,661m ³ /s 既往最大	3,975m ³ /s 既往最大	4,400m ³ /s 既往最大
	比流量	8.3m ³ /s・km ²	11.6m ³ /s・km ²	6.3m ³ /s・km ²
	ピーク水位	HWL+0.8m	堤防高以下	HWL+0.6m
	水位上昇	1.0m/h	1.7m/h	0.8m/h
	破堤時刻	洪水ピーク 2 時間後	洪水ピーク 3 時間後	洪水ピーク 2.5 時間後
	継続時間	13 時間	7 時間	5 時間
河道特性	河床勾配	1/76	1/49	1/117
	ピーク水深	約 4m	約 5m	約 5.7m
	摩擦速度	0.72m/s	0.99m/s	0.69m/s
	代表粒径	80mm	69mm	125mm
	水衝部	常時	洪水時	常時
	河道線形	湾曲外岸	直線	湾曲外岸
	砂州	-	洪水時発達	常時固定化
護岸耐力	法覆工	空石	練石 控厚 0.4m	練石 控厚 0.4m
	基礎工 根固工	木工沈床 河床洗掘	十字 4t 河床洗掘	十字 6t 河床洗掘

2) 破堤要因の分析

破堤に影響を及ぼす要因について、洪水特性、河道特性、護岸耐力³⁾の観点より整理して、図 3-1 に示すとおり、侵食破堤の Fault Tree Analysis を作成した。

洪水特性については、既往最大洪水規模の流体力（揚力、抗力）や掃流力、高水位継続により、激しい河床洗掘や侵食を引き起こし、破堤に至ったものと考えられる。河道特性については、湾曲外岸や砂州の固定化、川幅の変化による水衝部、洪水時の砂州の発達による水衝作用の増大などが挙げられる。護岸耐力については、洪水外力との相対関係にあり、設計上の平均的な外力に対する耐力が確保されていても、砂州の発達による偏流や構造物回りの激しい局所洗掘などにより、瞬間的に大きな外力が働く恐れも有り得る。

こうした複合的要因が作用する場合には、特に激しい河床洗掘とともに、護岸耐力を上回る外力が働くリスクを考慮しなければならない。



※護岸の力学設計法³⁾を参考として作成

図 3-1 侵食破堤の Fault Tree Analysis

3-2 破堤リスクが高いと思われる箇所

1) 大きな外力継続による影響

護岸が受ける流体力は、流速の 2 乗や投影面積に比例する。流速は外力の主たるパラメータである。一方、河床の石礫が受ける掃流力 ($\rho u_*^2 = g H I$) は、河床洗掘等の指標であり、水深と河床勾配 (= エネルギー勾配) に比例する。このことは、これまで現場で注視されていた河床勾配のみならず、水深と河床勾配が同じウェットで重要であることを意味する。

3-1 で述べたように、破堤要因は大きな外力継続による洗掘や侵食等によるものであり、ピーク流量 2～3 時間後に破堤している。特に洗掘深等は掃流力や時間に比例することが考えられるため、掃流力式を構成する H I

と高水位継続時間の関係性を整理して図 3-2 に示した。

侵食破堤した 3 洪水は、 $HI \geq 1/21$ (摩擦速度 $u_* \geq 0.69\text{m/s}$)、高水位継続時間 ≥ 5 時間の領域となる。なお、常願寺川では、 $HI \geq 1/50$ で短時間の洪水でも河岸侵食が発生し、 $HI \leq 1/150$ では長時間の洪水で河岸侵食が発生している。

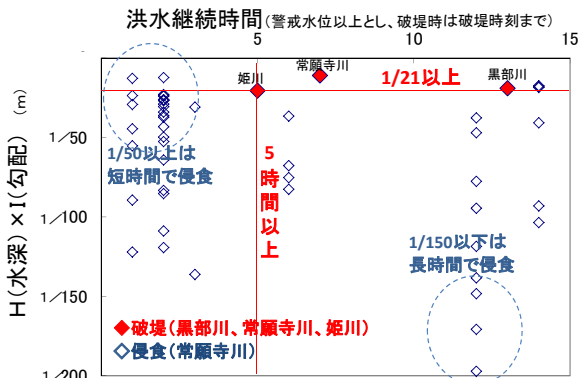


図 3-2 破堤・侵食と HI・高水位継続時間の関係

2) 河道法線形に支配される流水

姫川の破堤地点の解析結果による流速分布と破堤後の状況については、図 3-3 に示し、黒部川の河道法線形と S44 洪水氾濫流の状況については、図 3-4 に示すが、姫川、黒部川の破堤地点において共通する点は、堤防法線の屈曲部において、破堤が生じていることである。

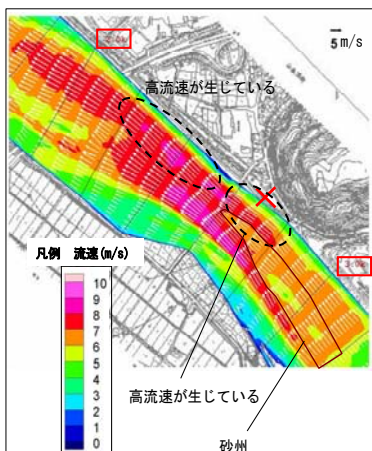


図 3-3 姫川流況解析の流速分布

急流河川は網状流路を形成し、幾重ものミオに沿って流水が偏流・乱流するが、流量規模が大きくなると堤防法線に沿って直進する流れに変化する。

河道断面一杯に流れ、直進する流水は、屈曲部の堤防を直撃して堤防を破壊するのである。護岸の根入れを深くし、根固め工を敷設していると言えども、流量上昇時に水衝部が深く掘られ乱され、その後、流量がピークに近くなった時に一斉に流されると考えられ、洪水時の深掘れはこれ以上となる恐れは潜在する。出水時において注視すべき箇所である。



図 3-4 黒部川法線形と S44 氾濫流

3) 砂州の発達による水衝部への影響

常願寺川の昭和 44 年 8 月出水では、図 3-5 に示す昭和 43 年の横断測量結果から、出水前に既に護岸の基礎付近まで河床の洗掘が進行していたと推定される。このように河床洗掘が進行している状態で、土石を伴ったエネルギーの大きな流水が護岸に衝突することで、護岸崩落が生じたと考えられる。

また当時の聞き取り調査によれば、右岸側の水位は上滝床固横堤 (HWL 高) を越えていたのに対し、左岸側は流速も緩やかで水深も 1.0m 程度で、偏流が生じていたものとされる。偏流の要因は、写真 3-1 に示すように、上滝床固の上流 18.7k 付近の狭窄部より下流において、左岸側が急激に拡幅していることで、流速が低減し、それに伴い左岸側へ土砂堆積が促進され、洪水流が右岸側へと寄せられたことが関係していると考えられる。

常願寺川の昭和 44 年 8 月出水では、出水前に既に護岸前面の洗掘が進行していたと推定されるが、出水前に洗掘が進行していなくても、比高差の大きな砂州が発達している場合、偏流が生じやすく、河岸や堤防に洗掘・侵食の力が大きく作用することで被災が生じる可能性が高くなると考えられる。

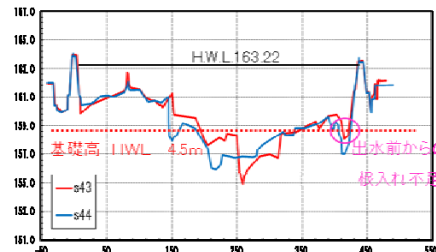


図 3-5 S43 年 常願寺川横断面 (岩峠野 17.7k)



写真 3-1 S43 年 常願寺川河道平面形状 (岩峠野)

4) 護岸耐力による影響

護岸の基礎が浅く、①根固工の屈撓性を考慮しても根入れの浅い区間、②根固水制が河床から露出している区間、③現況河床勾配より護岸勾配の急な区間などは、洪水外力に対して護岸耐力が相対的に不足する。

また、根固ブロックの重量不足や法覆工の控厚不足なども留意すべき点である。

1)~3) の複合的な要因により、破堤リスクが顕在化しないよう、維持・監視が求められる。

3-3 破堤時の被害ポテンシャル

1) 黒部川における氾濫シミュレーション⁴⁾

昭和 44 年洪水の黒部川破堤地点で破堤した場合の影

響について、現況河道で氾濫シミュレーションを用いて評価する。河道及び流域形状は、浸水想定区域図策定時(平成 14 年)の地形データを使用し、1/100 確率規模の洪水ハイドロ(宇奈月ダムでの洪水調節)で試算している。

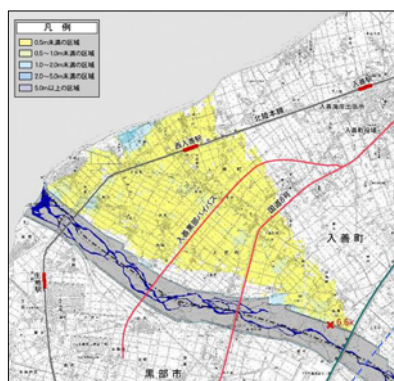


図 3-6 黒部川氾濫シミュレーション結果

図 3-6 に示す。黒部川の同地点で破堤した場合、その被害規模は、浸水面積約 1,294ha、家屋浸水 1,367 戸に及ぶ。

比較のため、昭和 44 年破堤時の氾濫流の再現計算を行った。既往文献やヒアリング結果から当時の浸水範囲、氾濫流速等を整理し、再現を実施している。なお、30cm 以上の湛水は、実績の氾濫範囲と概ね一致、最大湛水深は破堤付近直下流を除き、実績の湛水深とも概ね一致していることを確認している。

図 3-7 は、破堤 1 時間後の氾濫流の拡散状況を両者比較したものである。計算条件等が異なり一概に言えないが、氾濫流の拡散速度が鈍る傾向が見られた。

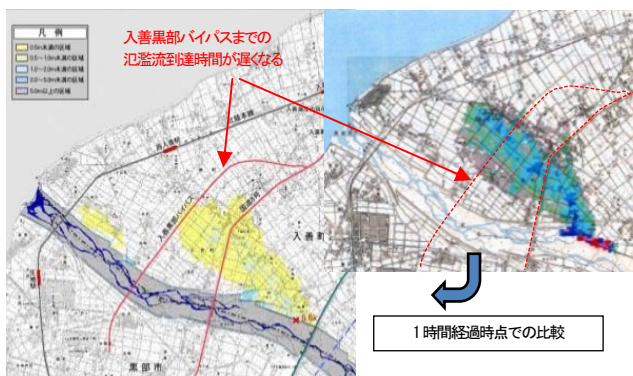


図 3-7 同一経過時刻における黒部川の S44 再現計算(右)と氾濫シミュレーション結果(左)

2) 姫川におけるシミュレーション⁶⁾

(i) 氾濫シミュレーション

平成 7 年洪水の姫川破堤地点で破堤した場合の影響について、現況河道で氾濫シミュレーションを用いて評価する。

図 3-8 に示すとおり、河道及び流域形状は、浸水想定区域図策定時(H20)

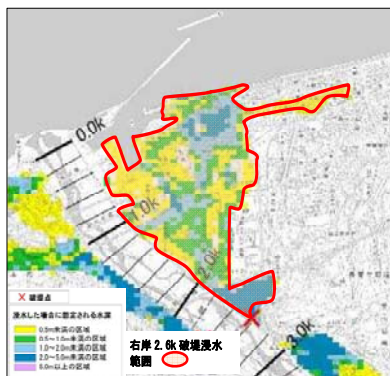


図 3-8 姫川氾濫シミュレーション結果

の地形データを使用し、推定ピーク流量 $4,400\text{m}^3/\text{s}$ のハイドロで試算している。姫川の同地点で破堤した場合、その被害規模は、浸水面積約 186ha、家屋浸水 950 戸に及ぶ。これは、2.3)で述べた被害実績よりも、格段に大きくなっている。

この理由としては、①実績と試算の破堤タイミングが異なり、試算のほうが破堤時の流量が大きいこと(実績はピーク流量 2 時間半後の減水時の破堤で、試算はピーク破堤)、②実績に比べて試算の破堤幅が 5 倍以上であること、③実績では、破堤後の水防活動等で約 380 個ものブロック投入により、流向を制御して被害の軽減を図ったこと等が挙げられる。

(ii) 高水敷部切り下げのシミュレーション⁶⁾

姫川の破堤事例では、砂州の固定化等に伴う対岸への流速増大が課題と考えられることから、その影響を把握するため、図 3-9 に示すとおり、平面 2 次元流況解析を実施した。 $4,400\text{m}^3/\text{s}$ 流下時で、左岸高水敷は水没せず、右岸側に流水が集中し、護岸前面の流速の増加を確認している。その対策として、左岸高水敷部の河道整正を実施し、流下能力不足解消と水衝部緩和の効果を図ることを河川整備計画で位置付けている。

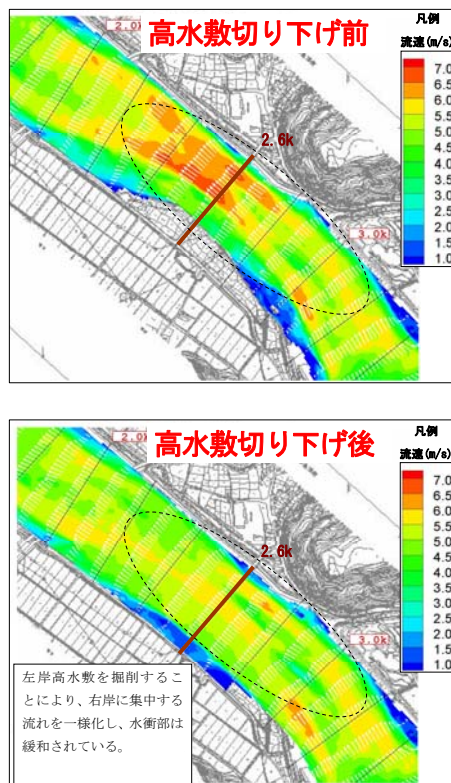


図 3-9 姫川高水敷切り下げ前(上)と切り下げ後(下)の流速分布

3) 常願寺川における氾濫シミュレーション⁵⁾

昭和 44 年洪水での常願寺川破堤地点の堤防は、護岸は HWL まであったが、基礎付近まで河床洗掘が進んでおり、砂州発達に伴う偏流による根固工の流失や堤防法面の破壊に起因する破堤であった。

このような被災は、常願寺川にあってどこでも起きる恐れがある。特に、縦断勾配が急から緩へと変化する9K前後は、砂州の移動・発達とともに、掃流力による侵食（ $H I > 1/50$ ）も懸念される区間であり、3-2で述べた破堤のリスクが高い場所である。そこで、富山市の都市機能の中枢が集中する左岸側、10.0K地点で破堤した場合の影響を氾濫シミュレーションにより試算した。

河道及び流域形状は、それぞれ平成20年、19年の地形データを使用し、1/150確率規模の洪水ハイドロで試算している。図3-10に試算結果を示すが、その被害規模は浸水面積768ha、家屋浸水5,675戸、想定被害額は約660億円に及ぶ激甚災害である。

出水時に転石が多く、過去より土石を伴う流水による護岸崩壊が懸念されてきた常願寺川では、今後も同様な事象に備えた永続的な注視が必要である。

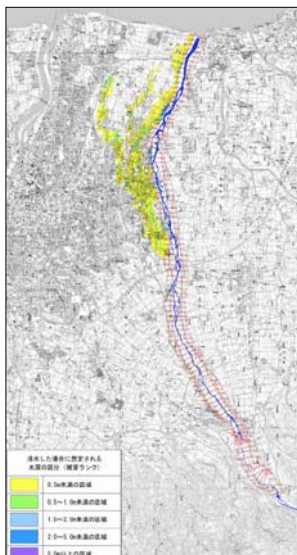


図3-10 常願寺川氾濫シミュレーション結果

3-4 急流河川対策の課題

1) ハード整備・ソフト対策

真に最大の課題は、破堤の回避である。急流河川は洪水外力が大きく一旦破堤するとその被害は甚大であるため、管理水準及び社会通念に照らして是認し得る安全性を備える必要がある。また破堤に至る時間が極めて短い。このため、施設耐力の向上、被災を一部受けても機能を保持する堤防、破堤時のバックアップとなる二線堤機能、外力低減に資する平面・縦断計画及び河道管理、被災の早期発見、減災機能、機械化水防などが論点となる。

急流河川対策にあたっては、安全性や経済性、整備工期・手順、環境面を総合的に勘案し、ハード整備・ソフト対策の両者をバランス良く組み合わせて、治水システム全体の信頼性を確保する必要がある。

2) 被害最小化の視点

破堤の回避には、破堤の要因を分析して、災害対策の時間軸（事前・最中・事後）の各フェーズにおける的確な対応が求められる。

破堤の要因は、3-1で述べた大きな掃流力と高水位継続、湾曲外岸や砂州の固定化による水衝部、洪水時の砂州の発達による水衝作用の増大、構造物回りの激しい局所洗掘・侵食、護岸耐力不足などで占められている。

各フェーズにおける対応としては、破堤しにくく、破堤を少しでも遅らせるという視点が求められる。例えば、

既往事例では、ピーク流量2～3時間後で破堤している。超過洪水リスクが高まっている現状において、仮に破堤は避けられないものとするれば、この破堤時間を少しでも延ばす視点が大切である。3-3 2)に示したように、破堤を遅らせることで洪水流量や氾濫流が低減し、氾濫被害も激減することや、水防活動体制や避難時間を確保することなども考えられる。

3) 今後の課題

越水破堤に比べて侵食破堤は、理論的に未解明な点が多い。特に、急流河川は、降雨、水位、流量という要素に加え、さらにエネルギー、土砂移動、時間軸が加わり、その現象は複雑である。しかも、急流河川の破堤事例は乏しいことから、現場での実現象の把握とデータの蓄積及び継承が大切となる。

今後は、他の急流河川の破堤事例を含め、データを蓄積し、破堤特性を検証して、破堤の特徴をより明らかにしていくことが考えられる。

4. おわりに

「災害は忘れた頃にやってくる」という名言がある。姫川の破堤実績から、もう20年になろうとしている今、ゲリラ豪雨など異常な気象が頻発するなか、いつどこで予期せぬ事態が襲ってくるかわからない。想定外ではすまされないことを肝に銘じて、迎えたくない非常時に備えたい。そのためには、過去の事実や先人の経験を少しでも理解するとともに、記録として保存し、記憶として継承していくことが重要である。技術は進歩している。過去の記録に新たな技術を付加することにより、新たな発見が期待される。

最後に、本報告をとりまとめるにあたって、指導助言いただいた先人に対して感謝する。

参考文献

- 1) 専門技術研究会（急流河川）：北陸の急流河川における破堤事例の整理，H26.7
- 2) 専門技術研究会（急流河川）：北陸の急流河川の歩み（平成編），H23.3
- 3) (財)国土技術研究センター：護岸の力学設計法，H11.2
- 4) 黒部河川事務所：黒部川整備基本方針・整備計画検討業務報告書，H15.3
- 5) 富山河川国道事務所：常願寺川急流河川対策検討業務報告書，H24.3
- 6) 高田河川国道事務所：姫川水系河川整備計画検討業務報告書，H26.3