

実験研究長期計画を踏まえた千代田実験水路を活用した実験の方向性

国土交通省 北海道開発局
(国研)土木研究所 寒地土木研究所

1. 実験研究長期計画について
2. 近年の動向
3. 千代田実験水路での研究方針

- ・ 十勝川千代田実験水路 実験研究長期計画（平成20年4月、北海道開発局）では長期メインテーマが6項目挙げられている。そのうち「堤防・保護工の機能評価技術の向上」が優先度「○」として進められてきた。

長期メインテーマ	サブテーマ	優先度
実験研究テーマⅠ： 堤防・保護工の機能評価技術の向上	1.越水破堤に対するハード・ソフト対策技術の向上※1)	○
	2.保護工の適切な設計方法・評価方法の提案	
実験研究テーマⅡ： 治水と環境を考慮した樹木管理手法の確立	3.河道内樹木の治水への影響量の評価技術の向上	
	4.流木管理技術・対処技術の向上	
実験研究テーマⅢ： 流域の土砂管理の精度向上	5.河床材料の粒度構成変化機構の解明	
	6.出水時の河床波による洗掘深と抵抗則推定技術の向上	
実験研究テーマⅣ： 河道設計技術の向上	7.観測技術の向上	随時実施
	8.複断面を有する河道設計技術の向上	
	9.冬期結氷する河川の水理特性と治水施設の設計方法の確立	冬期実施
実験研究テーマⅤ： 洪水擾乱後の生態系変化の把握（新水路）	10.洪水攪乱が生態系に与える影響量の把握	新水路で実施
実験研究テーマⅥ： 水防技術・意識の向上	11.水防活動の場の提供	随時実施
	12.住民への河川講座の開催	随時実施
	13.行政機関職員の技術力向上	随時実施

十勝川千代田実験水路 実験研究長期計画（平成20年4月、北海道開発局）

※1) 長期計画概要版に研究事例として以下が示されている。

- ①越水破堤拡大メカニズムの解明
- ②氾濫流解析に必要な知見の提供
- ③合理的な堤防強化技術の検証
- ④ハザードマップ作製に必要な流出量の算出
- ⑤破堤に至る条件の整理
- ⑥堤防の不連続性に対する影響の把握

- これまで千代田実験研究では越水による破堤拡幅現象の理解のほか、破堤拡幅開始以降の被害軽減技術として、破堤拡幅抑制工や荒締切工の技術検討を行ってきた。

H27年9月関東・東北豪雨災害

H28年8月北海道豪雨災害

R01年7月東日本豪雨災害

H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 | H26 | H27 | H28 | H29 | H30 | R01 | R02 | R03 | R04 | R05

越水破堤の拡幅機構に関する実験

H20,21 予備実験
H22,23 本実験

H24 河床波実験

H30 北海道豪雨災害対応
決壊に対する表面粘性土
の効果検証実験

破堤時の被害軽減技術に関する実験

H25,26 破堤拡幅抑制工実験
H27 ブロックの転動実験
ブロックによる荒締切実験

H29 北海道豪雨災害対応
決壊部の緊急作業としての
ブロック投入の効率化実験

侵食による堤防決壊に関する実験

R02 急流河川の湾曲部における
堤防侵食に関するメカニズム把握実験
R03 堤防侵食に対する
高水敷保護工法の効果検証実験

■ 越水破堤の拡幅機構に関する実験



■ 破堤時の被害軽減技術に関する実験



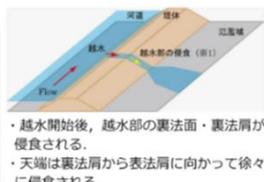
■ 侵食による堤防決壊に関する実験



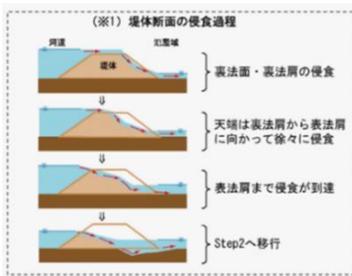
破堤口拡幅実験で得られた主な成果

- 千代田実験水路を用いた越水破堤実験では、①4つの段階を経て堤防決壊が進行すること、②無次元堤体崩壊量と堤防決壊部周辺の無次元掃流力の関係式を導出（破堤拡幅の定量記述）、③破堤拡幅計算ソフトの公開、④本ソフトを用いて河道特性（川幅、河床勾配）に応じて破堤拡幅特性が異なることなどを明らかにした。
- 一方でこれらの成果は砂礫を中心とした材料を対象とした実験から求められており、粘性土を含む粒度分布や基盤性状を対象とした場合の現象は明らかになっていない。
- また河道特性や氾濫形態など、破堤口拡幅に影響を与える支配的な要素は明らかになっておらず、破堤口拡幅を定量的に評価する実務的な技術として熟度の向上も重要。

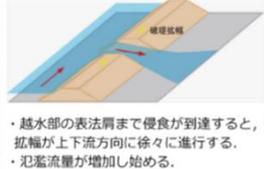
Step1 初期段階



・越水開始後、越水部の裏法面・裏法肩が侵食される。
・天端は裏法肩から表法肩に向かって徐々に侵食される。
・氾濫流量は増加しない。

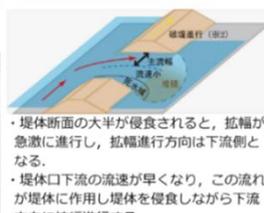


Step2 破堤拡幅開始段階

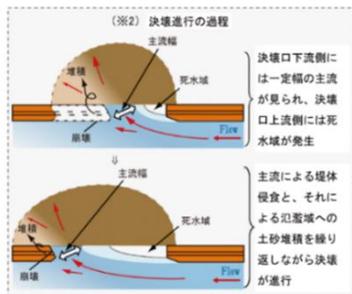


・越水部の表法肩まで侵食が到達すると、急激に断面が侵食されて、拡幅が上下流方向に徐々に進行する。
・氾濫流量が増加し始める。

Step3 破堤拡幅加速段階



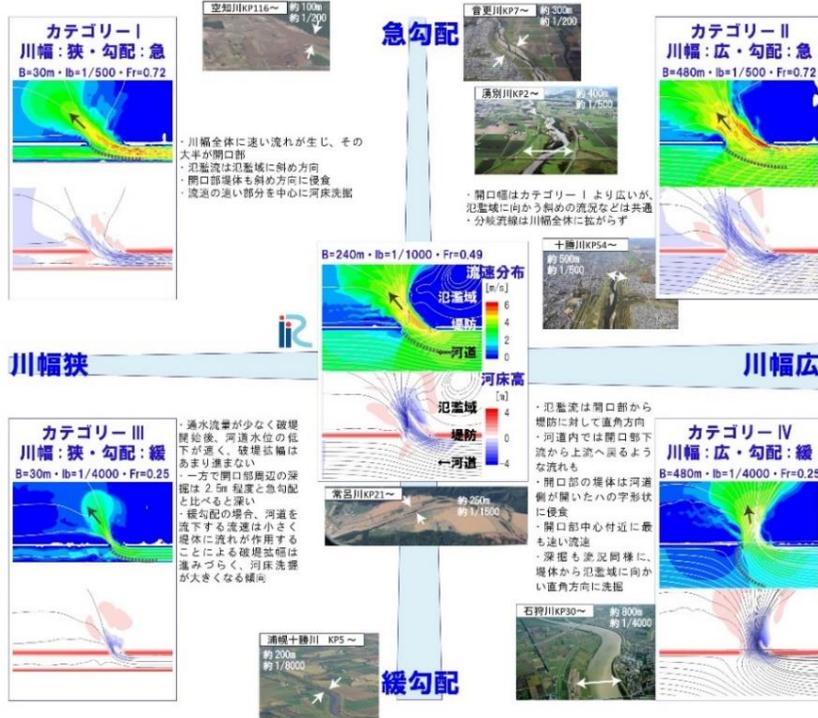
・堤体断面の大半が侵食されると、拡幅が急激に進行し、拡幅進行方向は下流側となる。
・堤体口下流の流速が早くなり、この流れが堤体に作用し堤体を侵食しながら下流方向に拡幅進行する。
・氾濫流量がピークを迎える。



・下流方向への堤体侵食と氾濫域の土砂堆積を繰り返しながら、氾濫流の主流部がほぼ一定の幅で下流へ移動する。
・氾濫流はほぼ一定で推移し、拡幅速度は遅くなる。
・破堤口の downstream 側は、河道から氾濫域側に向かい斜め方向の形状となり、拡幅が進行する。

①破堤拡幅進行過程

急勾配【氾濫流縦断方向卓越一破堤拡幅下流進行、裏法尻先行】
下流側裏法尻の破堤拡幅抑制制が効果的、決壊口流速が速く投入ブロック転動しやすい



川幅狭【水位低下早い→破堤拡幅しにくい】
被覆軽減には特に早期の破堤拡幅抑制が必要

川幅広【水位低下遅い→破堤拡幅しやすい】
破堤拡幅が長時間にわたって、破堤拡幅抑制効果が発現しやすい

緩勾配【氾濫流は開口部中央部分集中→表法の侵食先行、破堤形状、深掘顕著】
破堤開口幅は狭いが深掘により締切資材量が多く必要

④河道特性に応じた破堤拡幅現象の分類

発表件数

105件以上（うち査読付論文28件以上）

報告書等の公開

H24.10 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書を公開

H27.06 破堤計算ソフト（Nays2D Breach）を公開

H30.03 堤防決壊時に行う緊急対策工事の効率化に向けた検討資料（案）を公開

成果普及

土研主催：土研新技術ショーケース、新技術説明会、現地講習会、地整との意見交換会 等

他機関主催：震災対策技術展、建設技術展 等

マスメディア

H27.09 鬼怒川破堤時のニュース等（動画提供やインタビュー等）

R01.10 NHKクロースアップ現代（同時多発河川氾濫の衝撃） 等

雑誌

H29.06 日経コンストラクション（特集：河川法改正20年目の挑戦）

H31.03 日経コンストラクション（特集：「想定外」を迎え撃て）

R01.11 開発こうほう（北海道新時代） 等

その他

R01.06 全建賞受賞

（我が国の良質な社会資本整備の推進と建設技術の発展を促進するためにS28に創設された伝統ある賞）

鬼怒川破堤時のニュース等で紹介された番組例

- 09/12 情報7DAYS（TBS系）
- 09/13 Mr.サンデー（フジテレビ）
- 09/14 ニュースピア（KBC九州朝日）
- 09/14 キャスト（ABC朝日）
- 09/14 スーパーJチャンネル（テレ朝系）
- 09/14 モーニングバード（テレ朝系）
- 09/15 （テレビ東京）
- 09/18 関西情報ten（読売テレビ） 等



1. 実験研究長期計画について
- 2. 近年の動向**
3. 千代田実験水路での研究方針

- ・ 気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ、河川の流域のあらゆる関係者が協働して流域全体で行う治水対策、「流域治水」への転換が推進されている。
- ・ 治水計画を「気候変動による降雨量の増加などを考慮したもの」に見直し、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域と捉え、地域の特性に応じて、左下に示す①～③の対策をハード・ソフト一体で多層的に進めるとしている。



① 氾濫をできるだけ防ぐ・減らすための対策

集水域
 雨水貯留機能の拡大
 [県・市、企業、住民]
 雨水貯留浸透施設の整備、ため池等の治水利用

河川区域
流水の貯留
 [国・県・市・利水者]
 治水ダムの建設・再生、利水ダム等において貯留水を事前に放流し洪水調節に活用

[国・県・市]
 土地利用と一体となった遊水機能の向上

持続可能な河道の流下能力の維持・向上
 [国・県・市]
 河床掘削、引堤、砂防堰堤、雨水排水施設等の整備

氾濫水を減らす
 [国・県]
 「粘り強い堤防」を目指した堤防強化等

県：都道府県 市：市町村 []：想定される対策実施主体

② 被害対象を減少させるための対策

リスクの低いエリアへ誘導 / 住まい方の工夫
 [県・市、企業、住民]
 土地利用規制、誘導、移転促進、不動産取引時の水害リスク情報提供、金融による誘導の検討

氾濫域
浸水範囲を減らす
 [国・県・市]
 二線堤の整備、自然堤防の保全

③ 被害の軽減・早期復旧・復興のための対策

土地のリスク情報の充実
 [国・県]
 水害リスク情報の空白地帯解消、多段階水害リスク情報を発信

避難体制を強化する
 [国・県・市]
 長期予測の技術開発、リアルタイム浸水・決壊把握

経済被害の最小化
 [企業、住民]
 工場や建築物の浸水対策、BCPの策定

住まい方の工夫
 [企業、住民]
 不動産取引時の水害リスク情報提供、金融商品を通じた浸水対策の促進

被災自治体の支援体制充実
 [国・企業]
 官民連携によるTEC-FORCEの体制強化

氾濫水を早く排除する
 [国・県・市等]
 排水門等の整備、排水強化

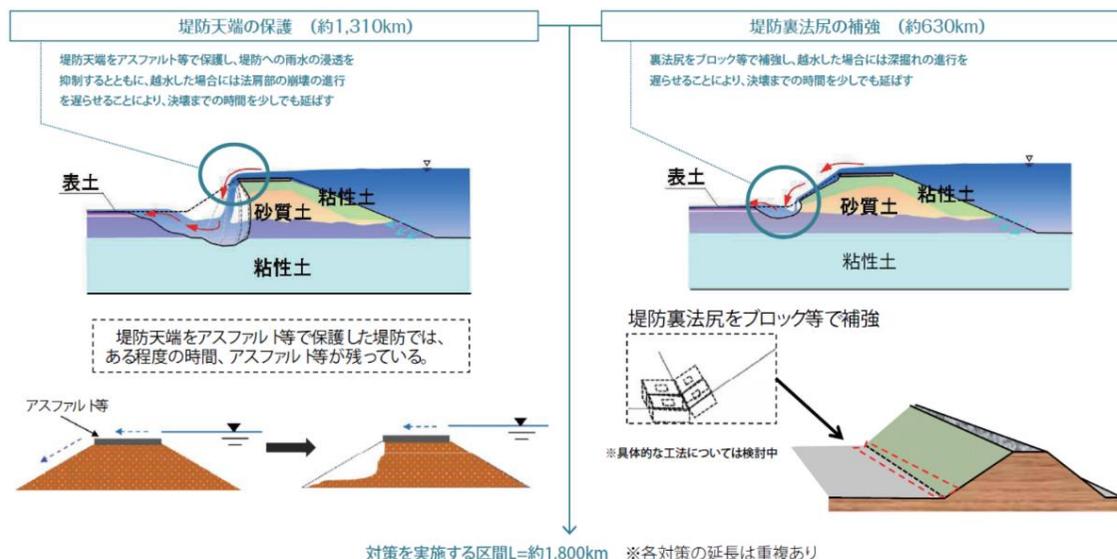
- ①【氾濫をできるだけ防ぐための対策】**
 氾濫を防ぐ堤防等の治水施設や流域の貯留施設等整備
- ②【被害対象を減少させるための対策】**
 氾濫した場合を想定して、被害を回避するためのまちづくりや住まい方の工夫等
- ③【被害の軽減・早期復旧・復興のための対策】**
 氾濫の発生に際し、確実な避難や経済被害軽減、早期の復旧・復興のための対策

「流域治水」の考え方

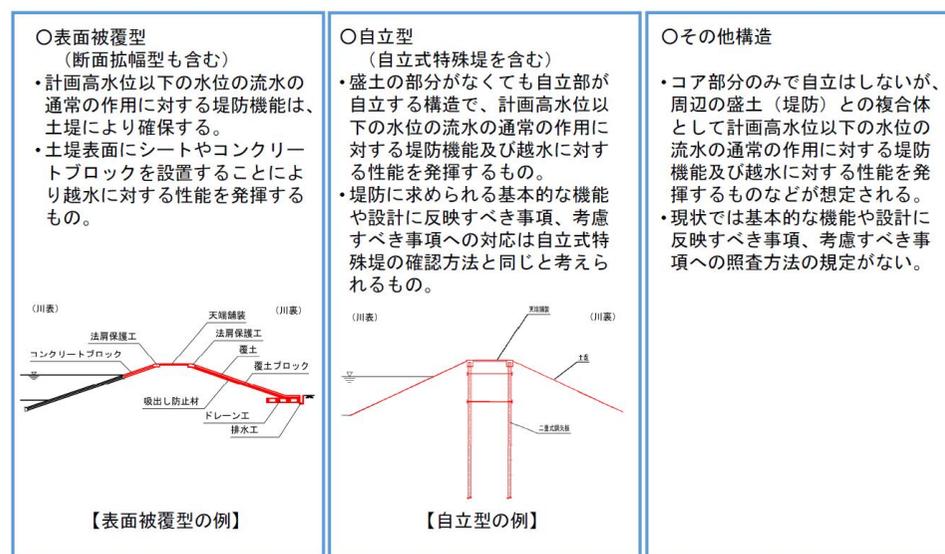
「流域治水」の施策のイメージ

国として「粘り強い河川堤防」を目指す

- このような中、国土交通省では洪水時の河川水位を下げる対策を今後の治水対策の大原則としつつ、緊急的・短期的な取り組みとして、氾濫リスクが高いにも関わらずその事象が当面解消困難な区域であって、河川堤防が破堤した場合に甚大な被害が発生するおそれがある区間において、
- 計画的な治水対策に加え被害をできるだけ軽減することを目的に、越水した場合であっても破堤しにくく、破堤するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果を発揮する粘り強い構造の堤防（以下、「粘り強い河川堤防」）の整備を危機管理対応として実施すべきとしている。
- 整備にあたっては越水に対して危機管理型ハード対策の概念を発展的に踏襲し、これを上回る効果を有する「粘り強い河川堤防」を目指すべきとしている。



危機管理型ハード対策 ～天端と裏法尻の補強～



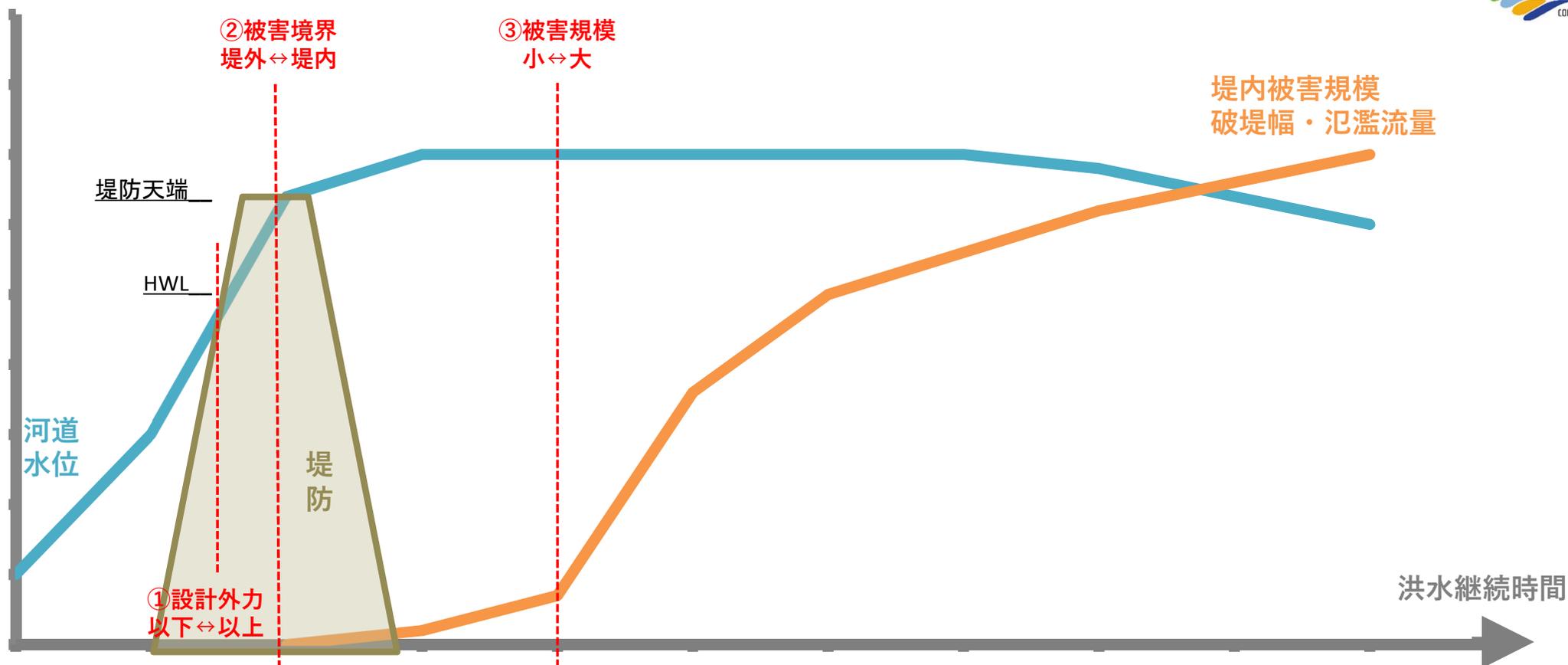
粘り強い河川堤防の技術開発の対象とする構造の想定
～表面被覆型、自立型、その他構造～

【参考文献】

- 水防災意識社会再構築ビジョン、国土交通省、2015。
- 河川堤防の強化に関する技術検討会、国土交通省、2022。

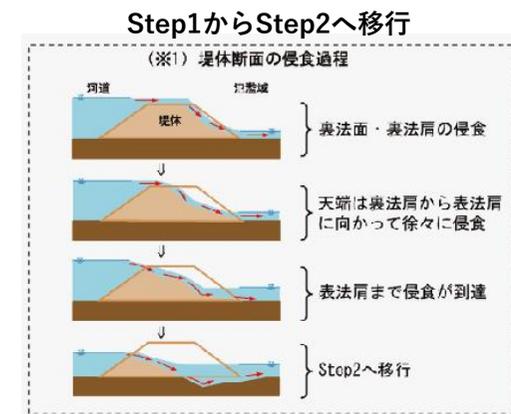
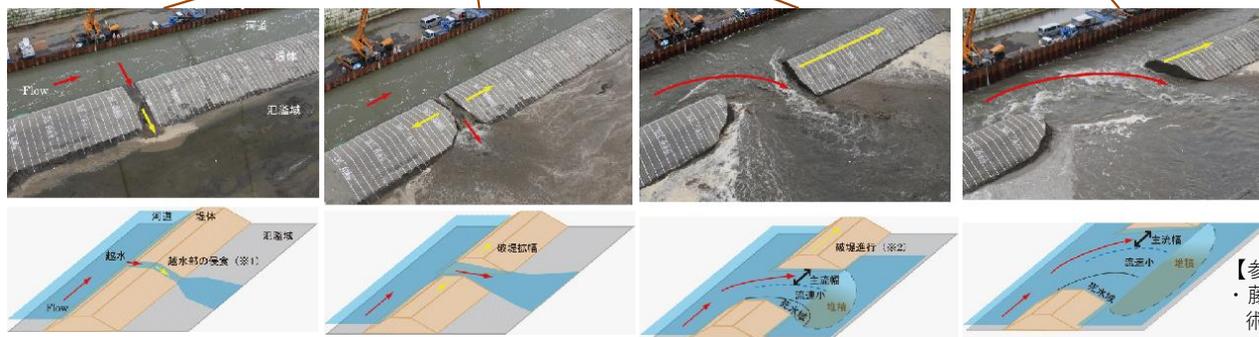
1. 実験研究長期計画について
2. 近年の動向
- 3. 千代田実験水路での研究方針**

河道水位上昇から堤内地災害に至る過程



被災Stage	Stage1 河道内	Stage2 越水、堤体欠損	Stage3 堤内地災害、一般への被害発生と拡大
---------	------------	----------------	--------------------------

破堤進行過程 (千代田越水破堤実験より)	Step1 越水・堤体侵食	Step2 破堤拡幅開始段階	Step3 破堤拡幅加速段階	Step4 破堤拡幅減速段階
-------------------------	---------------	----------------	----------------	----------------



【参考文献】
 ・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、土木学会河川技術に関する論文集、第6巻、pp.1-6、2000.11

破堤氾濫被害軽減に向けた技術検討・課題認識

対応策	越水させない 浸透破壊させない	堤体欠損させない 破堤拡幅に移行させない	破堤拡幅後も被害を拡大させない
-----	--------------------	-------------------------	-----------------

【①場所の予測】

- 越水箇所や破堤箇所の事前予測技術の開発
- 初動に貢献するセンサー類の開発など

【②水防活動】

- 越水対策の積土のうや漏水対策の月の輪工など
- 洪水被害の激甚化・頻発化、さらに水防団員の減少等、安全・効果的・効率的な工法の検討など

【③越水+飽和浸透】

- 越水に飽和浸透が加わった場合、被害発生時間のズレや被害規模の相違等、越水だけの場合と比べて現象の相違は？
- 飽和浸透が加わることで、現在の対策・施策に影響を及ぼすか？

【④越水想定外力】

- 30cm-3時間が基本
- 想定外力が異なる場合（越流水深、越水継続時間、発生頻度等の大小）、現在の対策・施策に影響を及ぼすか？

【⑤粘り強い河川堤防】

- 越水しても決壊しづらく、決壊までの時間を長くする
- 本省河川堤防の強化に関する技術検討会
- 表面被覆型や自立型等の技術公募もスタート、ただし裏法侵食～天端崩壊までの2次元的現象が対象
- 万が一、決壊し拡幅段階へ移行した場合、現在の対策工にバックアップ機能は期待できるか？

【⑥耐越水水防工法】

- 越水中を対象とした裏法面侵食を抑制する水防シート工法の開発

【⑦堤内地被害に切り替わるStage3へ移行する速度を低減】

- “⑤粘り強い河川堤防”等の実施箇所等で、万が一、堤防決壊に至ると圧倒的に被害規模が大きくなる
- 堤内地被害に切り替わるStage3へ移行するまでの時間を長くする
- Step2（破堤口拡幅開始段階）を対象とした現象理解と、移行速度低減技術を開発
- 被害規模を小さくするための最後の砦
- なお効果見込みの見立てが重要

【⑧破堤口拡幅過程の定量化】

- 千代田実験水路での越水破堤実験により、砂礫ではあるが堤体崩壊量と無次元掃流力の関係式を整理し、破堤口拡幅計算モデルを構築
- 本モデルを用いて川幅と河床勾配が破堤口拡幅現象に与える影響を整理
- しかし堤体材料は砂礫で、河道は直線水路が対象
- 粘性土を含む堤体や基盤材料、平面形状（湾曲部の内外岸等）、氾濫域地形や氾濫形態（流下型、貯留型、拡散型）、河道断面（高水敷幅等）の相違まで条件を拡張し、破堤口拡幅に与える影響の検討

【⑨破堤口拡幅推定式】

- 堤防決壊シミュレーションで用いる破堤口拡幅推定式は経験則から川幅のみで推定
- 近年の被災事例からこの推定式が過小・過大評価となる研究事例も
- “⑧破堤口拡幅過程の定量化”を踏まえ、ある地点で破堤したら堤内地にどのような被害が生じるかを推定できるように、破堤口拡幅推定式の改良
- 川幅に依存した経験式からの脱却（例えば川幅に加え河床、水面勾配や洪水継続時間、⑧で得られた寄与度の高いパラメータなど）

【⑩破堤氾濫被害の推定技術】

- ある地点で破堤した場合、氾濫域被害の見込みをシステムティックに推定可能な技術の開発
- ⑨による破堤口の拡幅や氾濫流量の推定をした上で、⑧の特性（河道形態、平面形状等）のほか、破堤口周辺や氾濫域の土地利用や地形等が被害に与える影響の理解
- 氾濫浸水だけでなく氾濫流がもたらす土砂・流木や高速の氾濫流による、土地侵食や家屋等への被害の理解と制御技術

【⑫破堤拡幅抑制工・荒締切工】

- 千代田実験水路等での実験により、Stage3における被害軽減技術の破堤拡幅抑制工を開発、一定の効果を確認
- 一方でどのタイミングで着手し、どのような河道特性等であれば効果が期待出来るか、さらに現場が労力とリスクを許容してもなお着手すべきかの目安が必要
- ブロック投入以外の新たな工法検討も

堤内被害規模
破堤幅・氾濫流量

被害規模を小さく

被害発生を遅く

【参考文献等】

- 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、土木学会河川技術に関する論文集、第6巻、pp.1-6、2000。
- 藤田光一：より良い研究となるための7つの点検、国総研レポート2015、国土技術政策総合研究所、2015。
- 藤田光一：現代河川工学-基本と展開-、技報堂出版、2023。

洪水継続時間

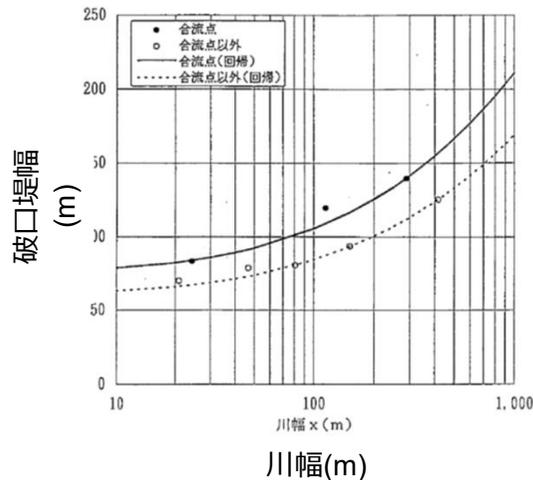
水害リスク評価の現状

- ・ 氾濫域の水害リスク評価には、河道と氾濫域の境界となる堤防が破堤し、そこから出ていく氾濫流量の見積もりが重要であり、そのためには破堤幅の見積もりが重要。
- ・ 氾濫シミュレーション等で使われている破堤幅の経験式は、HWLに到達と同時に瞬時に最終破堤口幅の1/2が破堤し、その後、1時間で最終破堤口幅に到達するとしている¹⁾。
- ・ 近年の破堤事例の整理では、経験式を大きく上回る破堤幅となっている事例も存在²⁾。
- ・ 川幅と河床勾配の相違に着目した感度分析では、川幅のほか勾配が急になるに従い破堤幅が広くなることなどを示した³⁾。
- ・ 水害リスク評価を正確に見積もるため、将来的には経験式の更新も重要。

破堤口幅を推定する経験式¹⁾

合流点
最終破堤口幅(m) = $2.0 \times (\log_{10} \text{川幅(m)})^{3.8} + 77$

合流点以外
最終破堤口幅(m) = $1.6 \times (\log_{10} \text{川幅(m)})^{3.8} + 62$



近年破堤事例での破堤口幅と経験式との比較²⁾

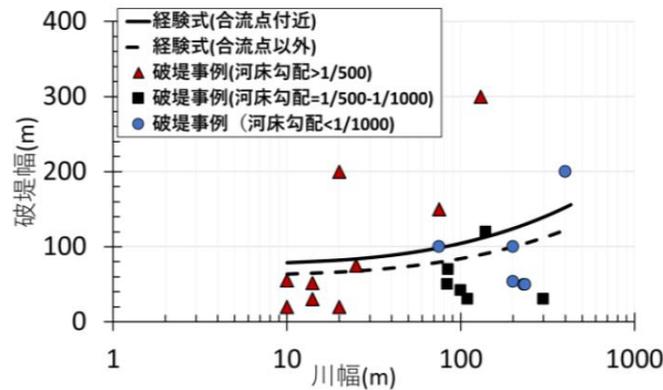
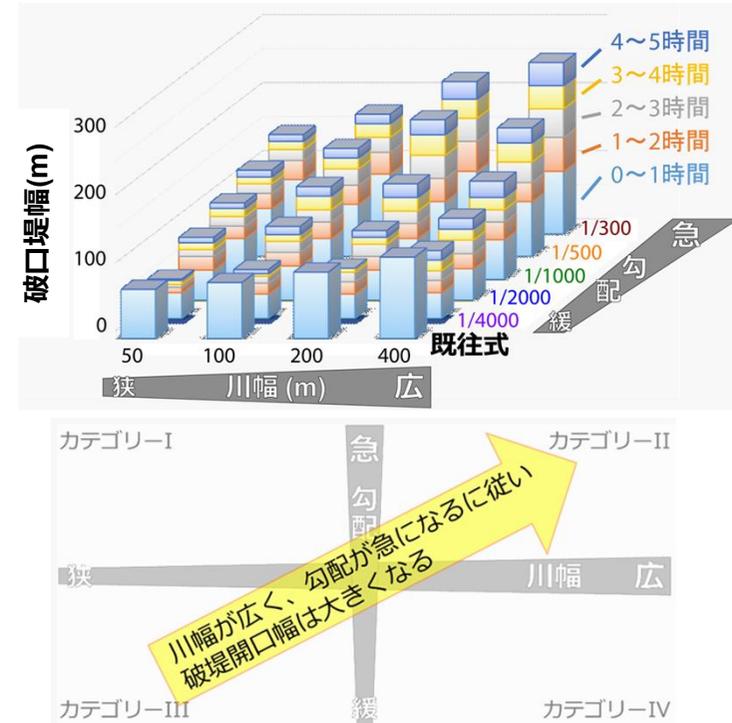


図-1 2000年以降の主な国内河川の破堤幅と川幅

感度分析例 (川幅と河床勾配の相違)³⁾



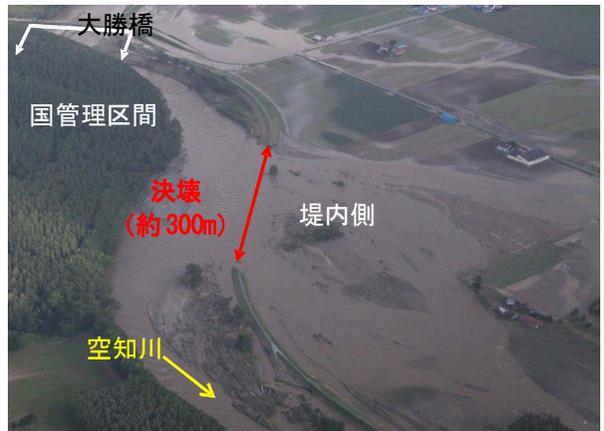
【参考文献】

- 1) 洪水浸水想定区域図作成マニュアル (第4版) 平成27年7月、国交省水国・国総研水害研究室国土交通省、2015.
- 2) 岩倉浩土、榎田真也：河川堤防の越水破堤・氾濫特性に及ぼす洪水流量の影響評価、土木学会論文集B1(水工学)、Vol76、No.2、I_913-I918、2020.
- 3) 島田友典：出水時の河道特性が破堤拡幅現象に与える影響に関する研究、北見工業大学、2019.

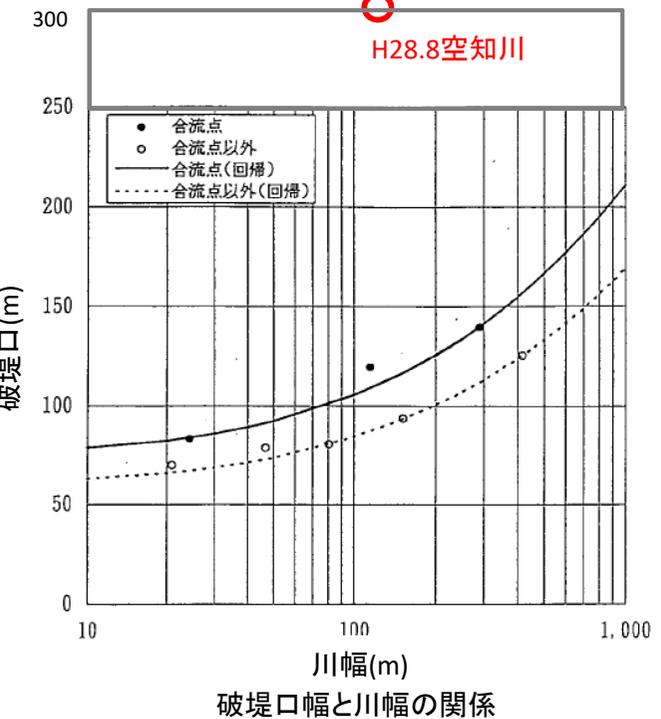
最近の特徴的な越水による堤防決壊事例

平成28年8月 石狩川水系空知川
(大勝橋下流左岸)

破堤口幅を推定する経験式と実災害での乖離

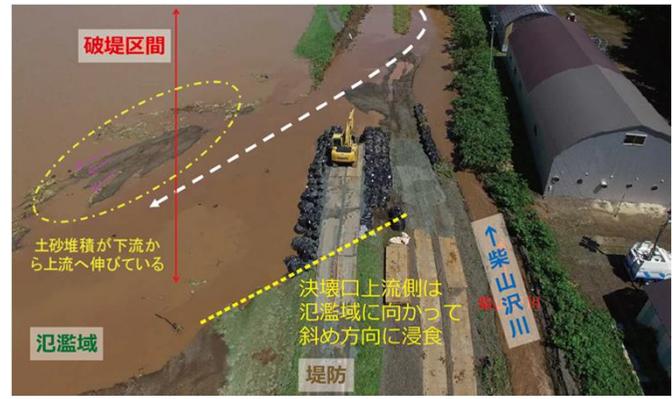


被災事例

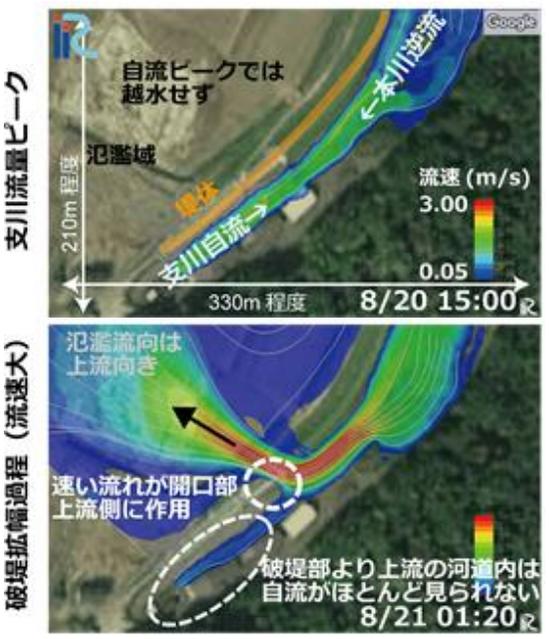


平成28年8月 常呂川水系柴山沢川

背水区間における破堤災害事例、上流に向かって氾濫していたと推測



被災事例



再現計算例

平成27年9月 利根川水系鬼怒川

高水敷が破堤氾濫被害に与える影響

落掘が形成されたが高水敷は洗堀されずに残ったことで、落掘と低水路の連結はなく、河道水位の低下に伴い氾濫が収束した可能性があったと考えられる。



出典：
 ・空知川堤防調査委員会報告書/空知川堤防調査委員会,平成29年4月
 ・氾濫シミュレーション・マニュアル(案),土木研究所資料第3400号,1996.
 ・常呂川堤防調査委員会報告書/常呂川堤防調査委員会,平成29年3月
 ・鬼怒川堤防調査委員会報告書/鬼怒川堤防調査委員会,平成28年3月
 ・出水時の河道特性が破堤拡幅現象に与える影響に関する研究/島田友典,2019年9月
 ・藤田光一：現代河川工学-基本と展開-,技報堂出版、2023.

実験研究長期計画を踏まえた位置付けの確認

- ・ 実験研究長期計画では、長期メインテーマとして「堤防・保護工の機能評価技術の向上」が、そのサブテーマとして「越水破堤に対するハード・ソフト対策技術の向上」が示されている。
- ・ 近年、洪水による被害がさらに頻発化・激甚化することが懸念されている中、「流域治水」への転換が推進されている。
- ・ 「流域治水」の考え方として、①堤防整備等による氾濫をできるだけ防ぐための対策、②氾濫した場合も想定し、被害対象を減少させるための対策、③氾濫発生に際し、被害の軽減・早期復旧・復興のための対策、が示されている。
- ・ ここで氾濫域の水害リスク評価には河道と氾濫域の境界となる堤防が決壊し、そこから出ていく氾濫流量の見積もりが重要である。
- ・ さらに氾濫の起こり方がどれだけ対処しやすいものになるか？の評価が重要である。
- ・ 以上のことから、堤体材料が砂礫で河道は直線水路が対象であったこれまでの成果も活用しつつ、様々な条件下（堤体材料、河道特性、氾濫域特性等）での破堤口拡幅特性の理解、またその特性を踏まえた被害軽減につながる技術に着目し、千代田実験水路を活用した研究を進めることとする。