

堤防決壊時に行う緊急締切作業の 効率化に向けた技術検討

STUDY ON TEMPORARY BREACH CLOSURE FOR LEVEES

島田友典¹・横山洋²・山本太郎³・友田隆啓⁴・米元光明⁵

Tomonori SHIMADA, Hiroshi YOKOYAMA, Taro YAMAMOTO, Takahiro TOMODA and Mitsuaki YONEMOTO

¹正会員 寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 寒地土木研究所寒地河川チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 工博 一般財団法人北海道河川財団 (〒060-0807 北海道札幌市北区北7条西4丁目5-1)

⁴非会員 一般財団法人北海道河川財団 (〒060-0807 北海道札幌市北区北7条西4丁目5-1)

⁵非会員 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部 (〒080-8585 北海道帯広市西4条南8丁目)

It is important mitigating flood damage by overflow from a levee breached. Damage mitigation can be expected by temporarily closing the levee breach and reducing the amount of flood water exiting the breach. However, the method has not been clarified. We collected cases of breach closure at the time of disaster, and conducted experiment on flood defense methods. We showed to clarify the effect of channel width and channel bed profile on levee breach processes by using a numerical model to simulate levee breaches based on results of the experiments. And we showed the idea of damage mitigation measures.

Key Words: Levee breach process, Efficient breach closure for levees

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²⁾。堤防決壊時における被害軽減については堤防決壊までの時間を引き延ばすような質的向上に関する技術検討や、堤防決壊に至った場合でも可能な限り被害を最小限に抑える技術検討が必要である。

前者については、例えば国土交通省は平成32年度を目途に粘り強い構造の堤防（堤防の天端保護や裏法尻補強により、越水から決壊までの時間を少しでも引き延ばす）など、危機管理型ハード対策を全国で実施しているところである³⁾。

後者については、決壊直後のような河道水位が高い状況であっても早期に決壊開口部を締切ことが出来れば氾濫流量の低減により被害軽減につながることを期待できる。また河道水位低下後であっても連続降雨による次の出水に備えるためにも迅速な締切作業は重要である。しかしながら、緊急時に行う性質であるため使用できる資材や工法の制約があること、発生頻度が少なく知見が十

分に蓄積されていないこと、また河川特性に応じた堤防決壊現象自体が不明であることなどからも技術開発が進んでおらず、減災技術の確立が急務である⁴⁾。

このような中、北海道開発局と寒地土木研究所では、実物大規模である十勝川千代田実験水路⁵⁾を用いた堤防決壊実験や、実験より得た知見を用いて開発した数値計算モデル⁶⁾を活用することで堤防決壊現象を明らかにし⁷⁾、さらに決壊後の被害軽減のため氾濫流量を低減させる技術検討⁸⁾、¹⁰⁾、効率的な資材投入方法に関する検証¹¹⁾、¹²⁾、¹³⁾等、系統立てた研究を進めている。

本報告では、近年の堤防決壊時の緊急対応例を踏まえ、これまで進めてきた研究を総合的に取りまとめることで、堤防決壊時における被害軽減技術について提案することを目的としている。

2. 堤防決壊時の緊急対応事例より得られた知見

堤防決壊時の被害軽減技術の研究を進めるにあたり、災害時の対応事例から得られる知見は多い。北海道においても2016年8月に半月のうちに3個の台風が連続して上陸するなど道内各地で大雨となり、複数の河川において



図-1 北海道内における堤防決壊時の緊急対応工事の一例

堤防決壊が生じるなど甚大な被害をもたらした²⁾。一方で決壊口から氾濫流がある中で緊急締切工事等を行った事例もあることから、河川管理者・災害対応業者への聞き取りを行い、事例から得られた知見を元に課題を抽出し、課題解決につながるポイントの整理を行った¹⁴⁾。

(1) 緊急対応工事の事例

図-1に近年の北海道内における堤防決壊時の緊急対応工事を行った事例の一例を示す¹⁴⁾。

①は十勝川本川と千代田新水路の間にある中島部分が決壊し、開口部に激しい流れが生じている様子である。開口部上流側から荒締切を進めるうちに開口部下流側の侵食が始まったため、資材投入を上下流両側から切り替えた。また、せめ工段階で高流速となり根固ブロックが流出したため、10tの大型ふとんかごを用いて一気に閉塞させる工夫などを行った事例である。

②はバックホウにアタッチメントとしてつかみ装置であるグラップルを装着することで効率的に締切作業を行うことが出来た事例である。

③は災害発生3時間後の19時からバックホウによる資材投入作業に着手している。その後、天端幅を3mから4mに拡幅したことでダンプトラックによる決壊口近郊までの資材運搬も可能となり作業効率が向上した事例である。

④は資材を開口部に投入しても水面下に沈み締切作業が進まなかったため、深掘形状を計測することで、施工計画の見通しを立てた事例である。

⑤は緊急対応工事においてバックホウが多く使用されている事例である。バックホウは③のように早期着手可能なことや、トラフィカビリティの問題から他重機が進入困難な条件下でも作業が出来るという強みがある。

表-1 事例収集より得られた主な知見

	得られた知見・課題と解決に向けた検討事項
使用重機	<p>【クレーン】</p> <ul style="list-style-type: none"> 重量のある資材を遠方まで吊作業ができ既往手法として検討されていた 一方、足場造成等の準備作業が必要となり着手に時間を要する <p>【バックホウ】</p> <ul style="list-style-type: none"> 土だけでなく資材の吊作業ができる 比較的、容易に調達可能であり、不整地でも作業が出来るため早期着手が可能 ⇒吊上重量や作業半径に制限はあるが、緊急時における早期着手にはバックホウが有効
資材投入	<p>【投入方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> バックホウによる吊作業のほか、アタッチメント等の活用により投入効率が向上 ⇒複数の投入方法をサイクルタイムや安全面も含めて整理することで、現場作業の選択肢が増える
作業手順	<p>【堤防決壊形状の考慮】</p> <ul style="list-style-type: none"> 片側から締切を進めると反対側の堤体が侵食されるなど、作業手順の工夫が必要 開口部深掘を把握することで効率的な作業計画につながった事例もある 河道特性の違いによる堤防決壊現象を理解しておくことで効率的な作業手順の検討が可能 ⇒事前に管理する河川がどのような堤防決壊形状となるか理解できれば、事前の資材準備を含め効率的な締切作業の検討につながる

(2) 事例収集より得られた知見と課題解決の検討事項

緊急対応工事の事例より得られた知見と課題、及び課題解決に向けたポイントについて表-1に示す。

これより緊急対応工事の早期着手には既往手法であるクレーンよりもバックホウが有力であること、バックホウによる資材投入工法をサイクルタイムや安全面も含めて検討しておくこと、また管理する河川が堤防決壊時にどのような現象が生じるかを事前に理解することで、より実現象に近い堤防決壊時の緊急対策シミュレーションが可能になることなどが期待できる。以降ではこれらの課題解決に向けた検討を行う。

3. 資材投入の効率化に向けた重機作業の検討

緊急対応工事の早期着手にはバックホウが有力であることが緊急対応工事の事例から明らかとなったが、作業計画を立てるには資材投入に要する時間の把握が重要である。河川護岸工事等における根固資材投入の日当り施工量は整理されているものの¹⁵⁾、災害時を想定してはいない。そこで十勝川千代田実験水路において堤防決壊時の荒締切を念頭に、決壊口を想定した箇所にバックホウを用いて複数の工法で根固ブロックを投入し、工法の相違が作業効率に与える影響について検証実験を行った¹²⁾。

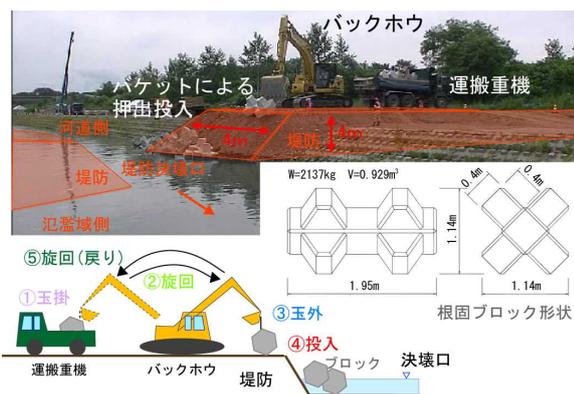


図-2 投入実験の概要と用いたブロック諸元



図-3 投入実験の状況

(1) ブロック投入実験の概要

図-2に決壊口へのブロック投入作業の概要、およびブロックの諸元を示す。ブロックは河岸保護のため投入資材としても実績が高い根固めブロックのうち、北海道開発局が最も多く備蓄している水防資材ブロックを用いた。実験は図-3に示す工法を組み合わせた4ケースとし、投入方法の相違が作業効率に与える影響の把握を行った。

ケース1・2は一般的なワイヤーロープを用いて玉掛けを行い、玉外しは決壊口付近の堤防天端で人手により行った。投入はバケットでブロックを決壊口方向に押し出すが、ケース1では1個ずつの投入とし、ケース2は運搬重機に積載したブロック（ダンプトラックの場合は3個）を全て決壊口付近の堤防天端に並べた後、連続して押し出しを行った。

ケース3・4は汎用性が低いオートフックを用いた。ブロックを着底させるとワイヤーが自動で外れる仕組みであり玉外しは決壊口近傍に作業員が近付く必要がないため、安全性向上が期待できる。ケース3の投入はケース1と同様にバケットによる押し出し、ケース4は決壊口斜面部に着底させることで玉外し作業を省略するとともに、直接投入が可能となるため作業効率の向上が期待できる。

(2) ブロック投入実験の結果

図-4にブロック投入に要した時間を平均しブロック1個当りに換算した結果を示す。

基本となるケース1は110秒/個、連続投入としたケース2は103秒/個であり、まとめて投入することで1個当たり10秒程度の短縮となっている。

オートフックを用いた場合、ケース1と比較して押し出しであるケース3は128秒/個と20秒程度の延長、直接投入であるケース4は99秒/個と10秒程度の短縮であり、効率的になることを期待したが、大幅な時間短縮とはなっていない。これは玉掛けに要する時間がワイヤーロープに比べて30秒程度、多く要していたためであり、今後はオートフックを用いた玉掛作業の訓練等により作業効率の向上が期待できると考えられる。

なおオートフックを用いた場合、開口部付近での作業

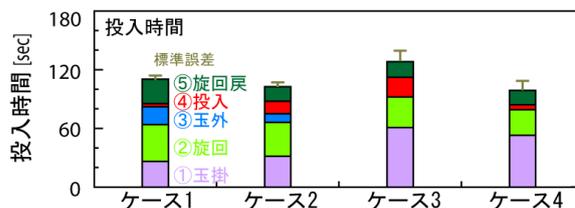


図-4 ブロック投入平均時間（1個当たり）

員による作業が不要となるため安全性向上の面では有効である。一方でケース4の直接投入では、投入済みの積み上がったブロックと投入したブロックの間にワイヤーが絡まったケースがあった。復旧作業が遅れるだけでなく、重機転倒などの危険性があることから、オートフックによる直接投入を行う際には、投入したブロックの着底位置も想定しながらの作業が必要である。

現地実験を行った結果、バックホウを用いた資材投入では更なる効率化も期待できるが、現状でも2分/個程度で試算することが可能であると考えられる。

4. 堤防決壊現象を考慮した緊急対応工事の提案

堤防決壊現象と河道形状には密接な関係があると考えられる。図-5は堤防決壊状況の一例であるが、空知川は河床勾配が急であり開口部下流の堤体断面は河道から氾濫域に向かって斜めに侵食、下流方向へ拡幅進行したと考えられている。一方、産化美唄川は合流する本川の影響で出水時の水面勾配が非常に緩く河道側に向かってハの字型に侵食、開口部中央が主流となっている。また前述のように決壊開口部での深掘れが生じている事例もある。よって堤防決壊現象に応じて緊急対応工事を行うことが効率化に向けて重要であると考えられる。

ここでは千代田実験水路における破堤実験で得られた知見をもとに開発した破堤拡幅計算モデル「Nays 2D Breach⁶⁾」を用いて、河道条件が堤防決壊拡幅現象に与える影響を明らかにし、さらに得られた知見を元に被害軽減のための減災工法に関する考え方を示す⁸⁾。

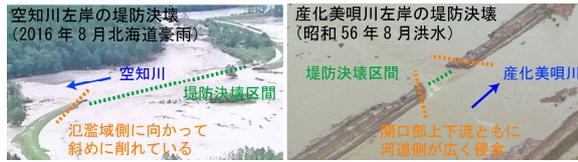


図-5 河道特性に応じて異なる堤防決壊現象

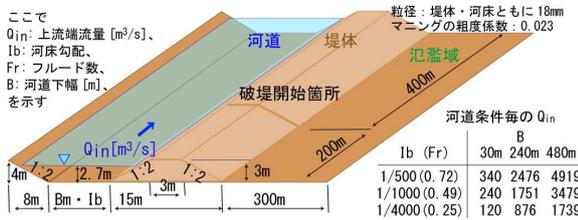


図-6 計算水路形状と計算ケース

(1) 河道条件が堤防決壊現象に与える影響

a) 計算モデルの概要

Nays2D Breachの基本となるモデルは2次元浅水流河床変動計算モデルiRIC Nays2D¹⁶⁾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⁷⁾を組み入れてモデル改良を行ったものである⁶⁾。

b) 計算条件

検証に用いた河道条件、計算条件は図-6に示すとおりである。河道形状は北海道の一級河川の河川整備基本方針¹⁷⁾にある基準・主要地点における川幅と河床勾配を参考にこれらを包括できるように選定した。またその他の条件は千代田実験水路での破堤実験等、これまでの検討を参考とした^{7), 8)}。境界条件は河道については下流端を自由流出とし上流端からは河道内流量の等流水深2.7mを満たすように決定し定常流として与えた。氾濫域は下流端・側方を自由流出とした。計算格子は2m×2m、計算時間刻みは0.05秒とした。計算時間について、堤防決壊シミュレーション等では決壊開始から1時間で最終開口幅に到達すると仮定していたが¹⁸⁾、実験結果等からも洪水継続時間に応じて拡幅進行していたため⁷⁾、ここでは決壊開始から3時間とした。

c) 計算結果

図-7に計算終了時点の流況と河床形状の結果を示す。

河床勾配の相違について、勾配が急な場合には氾濫流況は氾濫域に向かい斜め方向となり下流方向への拡幅が卓越する。勾配が緩いでは堤防に対して直角方向の氾濫流況となり開口部中央の流速が大きく、また開口部中央付近に深掘が生じる傾向がある。

川幅の相違について、狭い場合には河道水位の低下が早く開口部の拡幅はしづらい。川幅が広い場合には河道水位低下が遅く、堤内外の水位差が保たれており開口部を流れる流速も大きく、開口幅も大きくなる。

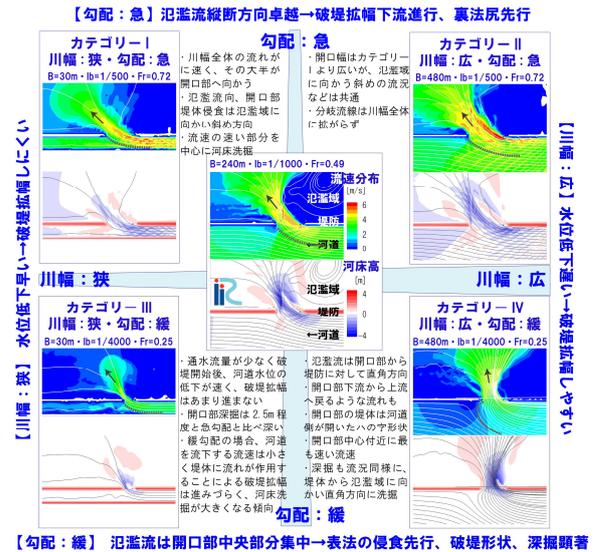


図-7 河道形状に応じた堤防決壊現象の分類

(2) 堤防決壊現象に応じた減災工法

北海道開発局と寒地土木研究所では堤防決壊時の被害軽減に向けて決壊口拡幅抑制工（根固ブロックを用いて拡幅進行速度を低減し氾濫流量の増加抑制を期待する技術⁹⁾）や、堤防決壊後の氾濫流量を低減させる技術（開口部を早急に閉塞するための荒締切工など¹⁰⁾）の研究を進めている。ここでは堤防決壊現象の分類を参考に、河道形状に応じた減災工法に関する考え方を図-8に示す。

カテゴリIでは氾濫流の主流が開口部下流側であり、堤防決壊拡幅も下流方向への進行が主である。そのため下流側では拡幅抑制のため欠口止工や拡幅抑制工を、上流側では流れが緩やかなため漸縮工で荒締切を進めると効率的であると考えられる。一方で短時間のうちに開口幅が川幅以上となるため、河道内流量の大半が氾濫流として流出する。そのため拡幅抑制工を行う場合、決壊開始地点から相当近く（例えば川幅程度）で抑制しなければ、被害軽減効果が発揮されない可能性がある。また上流域河川に相当すると考えられるため、水位上昇から低下までの時間が短くなることから如何に早く緊急工事に着手できるか、特に資材運搬等も含めた検討がきわめて重要である。

カテゴリIIでは氾濫流の主流箇所や下流への拡幅進行が主であるなど、進行過程や対策工法の考え方はカテゴリIと同様である。一方で川幅が広く河道水位も低下しづらいことから、決壊拡幅幅が大きく氾濫流量の増加も考えられるため、対策による減災効果が期待できる。一方で流速が本事例では4m/s以上となるため、根固ブロックを用いる場合には、転動流出しないような工夫、例えば資材の連結や流出防止補助工法¹⁹⁾などが必要である。また拡幅抑制が出来た場合にもその周辺の激しい流れにより河床洗掘が進行しないか注意が必要である。

カテゴリIIIでは他に比べると拡幅しづらいが河床洗掘が進行している可能性があり投入すべき水防資材が

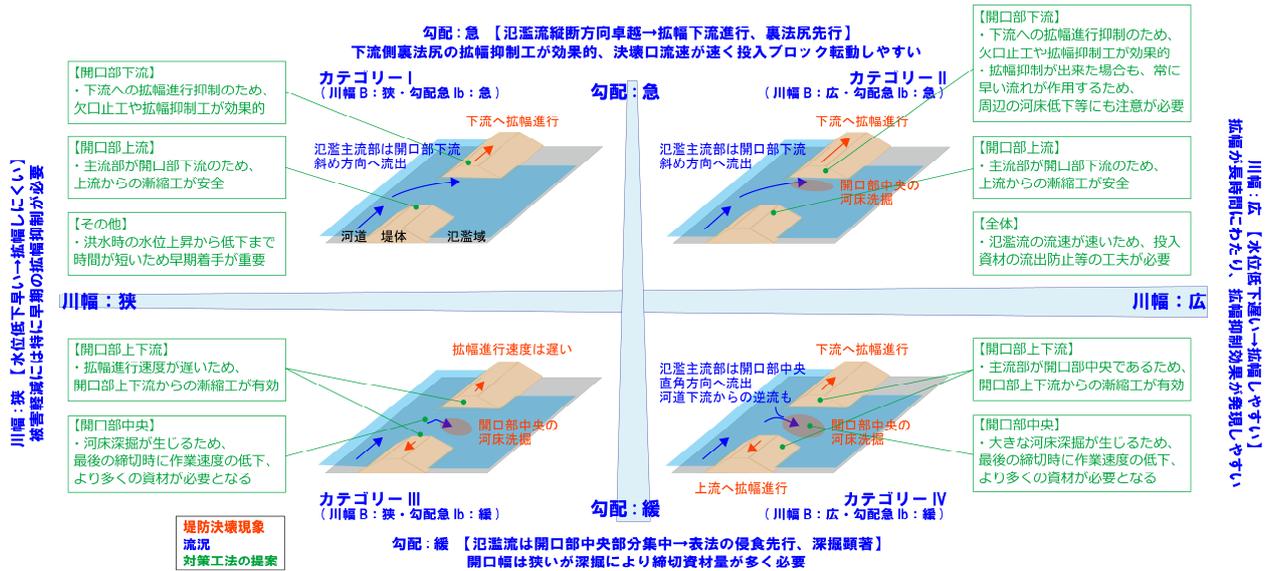


図-8 河道形状・堤防決壊現象の分類に応じた被害軽減対策工法

不足しないように事前に投入想定数などの計画を立てた上で作業を進める必要がある。

カテゴリIVでは正面越流に近い形態であり、氾濫流の主流は開口部の中央に位置する。急勾配のように堤体に直接、速い流れが作用しないため拡幅抑制工の効果は低いと考えられるが、締切工を上下流側から進めると効果があると考えられる。また開口部中央付近の河床深掘が深くなっていることも考えられるため、資材準備を含めた作業計画にも十分な検討が必要であるとともに、締切を進めるにつれ開口部中央の流速が速い区間に近づくため、更なる河床洗掘の助長や資材流出等にも注意が必要であり、特に最後の締切る段階、いわゆるせめ工の実施が困難となることも想定される。

5. 実河川堤防決壊を想定したシミュレーション

ここまでで得られた成果を元に実河川を想定した堤防決壊シミュレーションを行い、提案した被害軽減対策工法の実施による減災効果について試算を行う。

(1) シミュレーション概要

堤防決壊シミュレーションの想定内容を表-2に示す。十勝川中流域のある観測所地点を対象とし、平成28年8月北海道災害時の水位データを参考にハイドロを与えて、はじめに対策を行わないケースとして前述同様に堤防決壊の計算を行った。

次に減災対策を行うケースでは表-3を参考に、従来工法では決壊開始から4時間後、提案工法では3時間後に工事着手することで拡幅進行が抑制できるとし、計算では着手時間以降について堤体を固定床として計算を行った。なお今回は抑制工・欠口止工までを対象としている。

表-2 堤防決壊シミュレーション想定内容

河川名	十勝川水系 十勝川
決壊位置	左岸 中流部
決壊規模	Nays2D Breachによる計算
破堤進行時間	
決壊要因	越水 (H.W.L到達時点)
河道特性 堤体特性	
想定ハイドロ	

表-3 堤防決壊シミュレーション緊急対策の内容

	従来工法	提案工法
概要	決壊確認後、ブロックによる拡幅抑制工を実施	
資材	根固ブロック2t型	
投入	クレーン	バックホウ
施工速度	1個/3分	1個/2分
着手までに要する時間	決壊から4時間後 決壊確認-連絡1時間 資材準備運搬1時間 仮置ヤード整備1時間 資材投入足場準備1時間	決壊から3時間後 決壊確認-連絡1時間 資材準備運搬1時間 仮置ヤード整備1時間

(2) シミュレーション結果

図-9は計算結果のうち、浸水深0.5m以上(床上浸水と床下浸水の境界)の浸水範囲が最大となる時刻を抜き出している。これより対策を行わない場合は決壊から3時間後に浸水面積が最大となっている。一方で対策工を

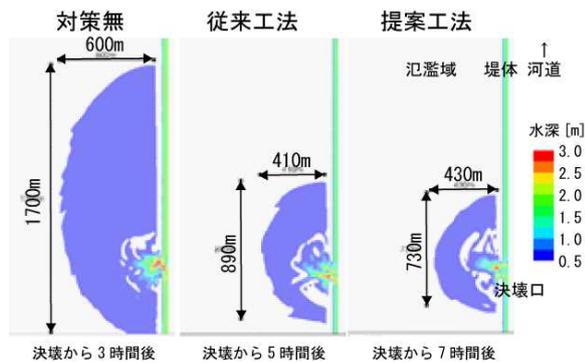


図-9 最大浸水範囲の比較 (水深0.5m以上)

行った場合は、従来工法では5時間後に、提案工法では7時間後に浸水面積が最大となっており、また浸水深0.5m以上の浸水面積も小さくなっている。これは浸水面積の縮小により被害額が小さくなるとともに、到達時間が遅くなることで堤防決壊時における避難時間の確保にもつながる可能性を示唆する。

なお本シミュレーションは様々な過程の基に検討したものであり、実際の堤防決壊現場にそのままあてはまるものではないことに注意が必要である。また今回は欠口止工の減災効果の比較までであるが、今後は荒締切工まで含めた減災効果についても評価を行う必要がある。

6. まとめ

本報告では堤防決壊時における被害軽減技術の提案を目的に事例収集、現地実験、数値計算を行い次のことが明らかとなった。①災害事例収集より早期着手にはバックホウが有力である。②現地実験より資材投入に要する時間の目安(2分/個程度)を示した。③数値計算より河道形状に応じて決壊現象を分類し、現象に応じた被害軽減対策の考え方を示した。④数値計算より提案工法を実施することで被害規模軽減につながる可能性を示した。

なお、これまでの研究成果は「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)」に取りまとめており、普及を図る予定である。

堤防決壊という甚大な災害が発生した場合、少しでも被害軽減につなげる工夫は重要であるが、現場ごとに条件は異なり明快な手法の提案は困難な面が多い。しかしながら各河川系事務所が堤防決壊時の緊急対策シミュレーション等を実施する際の参考として本検討資料を使用されることで、少しでも堤防決壊時の被害軽減につながることを期待する。

謝辞: 本実験を行うにあたり、十勝川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) 例えば 国土交通省北海道開発局：平成28年夏の大雨による被災状況等について，2017。
- 3) 水防災意識社会再構築ビジョン，国土交通省水管理・国土保全局，2015。
- 4) 平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会：平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方，2017。
- 5) 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/kds/chiyodashi/nsuiro/ctll1r0000002ul9.html>
- 6) 破堤計算ソフト(Nays2D Breach)，<http://river.ceri.go.jp/contents/tool/nays2d-breach.html>
- 7) 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：国土交通省北海道開発局，寒地土木研究所，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) 飛田大輔，柿沼孝治，柏谷和久，武田淳史：千代田実験水路における根固めブロックによる破堤氾濫流の抑制効果，土木学会河川技術論文集，第21回，pp.377-382，2015。
- 10) 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。
- 11) 島田友典，岡部博一，中島康博：河川堤防荒締切工に関する基礎実験，平成28年度国土交通省国土技術研究会，安心安全II，pp.122-127，2016。
- 12) 島田友典，横山洋，米元光明：堤防決壊時における効率的な荒締切工に向けた現地実験，国土交通省北海道開発局平成29年度技術研究発表会，第61回，防-33，2018。
- 13) 山本太郎，友田隆啓，島田友典，村椿俊幸：破堤決壊部へのブロック投入を想定した重機作業のサイクルタイム計測実験，土木学会北海道支部論文報告集B-59,2018。
- 14) 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荒締切工事等の事例紹介(その1)，寒地土木研究所月報，第779号，pp.27-44，2018。
- 15) 土木工事標準積算基準書：国土交通省大臣官房技術調査課
- 16) iRIC，<http://i-ric.org/ja/>
- 17) 河川整備基本方針・河川整備計画，国土交通省，http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html
- 18) 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，第3400号，1996。
- 19) 山本太郎，東海林勉，飛田大輔，島田友典：破堤時の荒締切で投入するブロックの流出を防止するための鋼組工に関する試行模型実験，土木学会河川技術論文集，第22回，pp.357-360，2016。

(2018. 4. 3受付)