

河川堤防の荒締切工法に関する模型実験

MODEL EXPERIMENTS ON TEMPORARY BREACH CLOSURE FOR LEVEES

島田友典¹・前田俊一¹・柏谷和久²・横濱秀明³

Tomonori SHIMADA, Shunichi MAEDA, Kazuhisa KASHIWAYA and Hideaki YOKOHAMA

¹正会員 土木研究所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 土木研究所寒地土木研究所水環境保全チーム (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³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)

Damage mitigation can be expected by temporarily closing the levee breach and reducing the amount of flood water exiting the breach. Model experiments were done using three types of models based on assumed closure techniques. The speed of work progress for temporary closure became slow after some portions of the breach were closed, because riverbed degradation occurred near the temporary closure. The riverbed degradation made it difficult to reduce the sectional area of the flow at the levee breach. The experiment demonstrated that by controlling riverbed degradation, the amount of flood water could be effectively reduced, which enabled efficient progress in closure work.

Key Words: Temporary breach closure, Damage mitigation

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、大規模な水害発生リスクが高まってきており¹⁾、河川の堤防整備が進んだ今日でもなお、堤防決壊の事例が見られている。近年でも2015年9月の関東・東北豪雨では鬼怒川において越水に起因するとされる堤防決壊が生じ、広範囲で長時間にわたる浸水や家屋の倒壊流失など甚大な被害をもたらした²⁾。このような事象は鬼怒川特有のものではなく、全国の主要な河川で同様に発生する可能性があり、堤防整備途上区間はもちろんのこと、整備が完了した区間であっても堤防決壊による甚大な被害が発生する危険性が高まることが予想されている³⁾。

このような中、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するとしている⁴⁾。

一方で堤防が決壊に至った場合、破堤開口部を締め切るなどの緊急復旧工事が必要となる。近年では2015年10月の台風23号に伴う降雨により北海道オホーツク管内で堤防決壊が生じた際、破堤開口部から氾濫が続いていた中で締切作業が行われた事例⁵⁾はあるが、水理条件を基に緊急復旧工法について検討した事例は少ない。飛田ら

は過去の実災害時の緊急復旧対策事例や研究事例などについてレビューを行っている⁶⁾。これによると締切工法に関する技術的事項や留意事項について体系的に取りまとめたマニュアル⁷⁾はあるが、締切に伴う地形や水理条件、及びこれらの時系列変化、また締切実施による減災効果について述べたものなどはほとんどなく、破堤氾濫中に安全で効率的・効果的に締め切ることが出来る可能性も含め今後の検討が必要であると言える。

国土交通省北海道開発局と土木研究所寒地土木研究所では堤防決壊時における被害規模の最小化を目的に、水防備蓄資材である根固ブロックを用いて破堤拡幅進行速度を低減することで氾濫流量の増加抑制を期待する技術開発に取り組んでいるところであるが^{8) 9)}、2015年度からはこれと並行し堤防拡幅後の破堤氾濫流量を低減させるための技術検討（破堤開口部を早急に締め切るための荒締切工など）を開始したところである。

破堤氾濫流量低減の技術検討を行うにあたり、堤防決壊後の河道水位が高く、堤内側に氾濫流量が流入しているような条件下で、既存の複数の締切技術を想定した荒締切模型実験を行った。本論文では実験結果を整理し、荒締切作業開始から完了までどのような現象が生じ、どの程度の減災効果が期待できるかを明らかにした。また効果的な減災に向けて荒締切方法に関する基礎的な検討を行った。

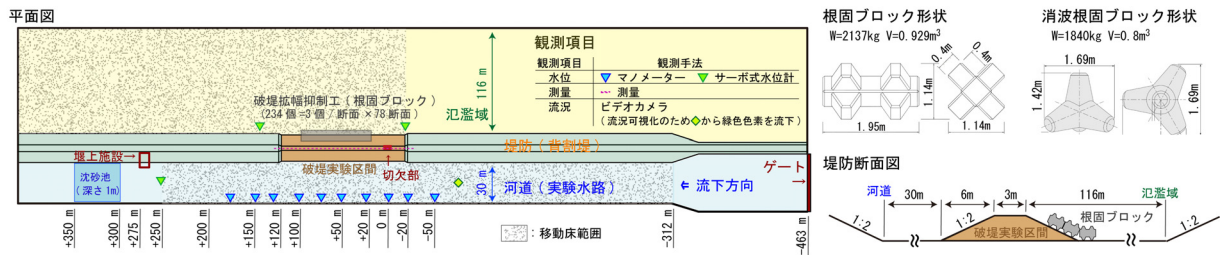


図-1 実験水路・観測概要

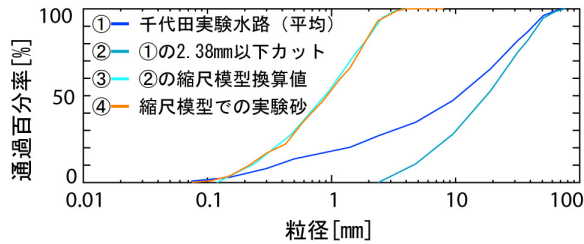


図-2 実験で用いた材料の粒度分布

2. 実験概要

(1) 実験水路・観測概要

緊急復旧対策技術を現場で活用するには重機オペレーションも含めた検討が不可欠である。そのため実物大規模実験の活用も念頭に、千代田実験水路¹⁰⁾の縮尺1/20模型¹¹⁾を用いて実験を行った。実験に用いた縮尺模型を図-1に示す。なお実物大規模の実験結果との比較も見越して、水路諸元や水理量、時間などフルード相似則とし、実験結果を含め全て現地規模に換算した値を示す。

実験区間の河道幅は30m、氾濫域幅は116m、河床勾配は1/500であり、ハッチ部分は深さ3.8mの移動床としている。破堤実験区間は延長140m、高さ3m、天端幅3m、裏表法勾配2割とし、破堤のきっかけとして切欠(深さ0.6m・上幅2.0m・下幅0.8m)を設けている。

実験に用いた材料の粒度分布を図-2に示す。実験砂は千代田現地実験の浮遊成分である2.38mm以下をカットした粒径加積曲線の1/20になるようにした混合砂を用いた。現地の堤防は細粒分を含んだ若干の粘着性がある材料のため、坂野が用いた手法¹²⁾を参考に堤体材料の体積に対してベントナイトを15%配合したものを用いた。

主な観測は図-1に示すとおりである。使用した観測機器・手法については既往の実験で確立したものと同様であり、詳細はそちらを参照してもらいたい⁸⁾¹¹⁾。

(2) 緊急復旧工法の実施概要

a) 越水破堤～破堤拡幅抑制まで

既往実験⁸⁾を参考に破堤拡幅抑制工のブロックを切欠の下流20m地点以降の裏法尻中心に設置した。通水は上流ゲートから供給流量315m³/sの定常流とした。実洪水

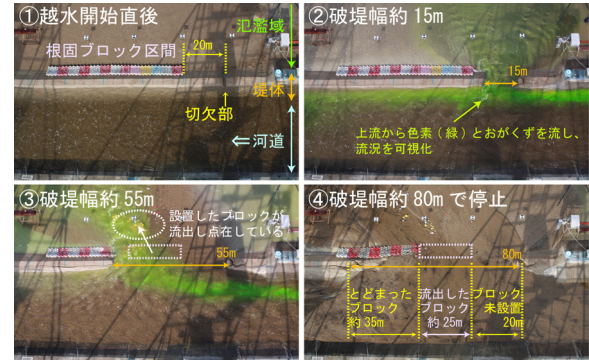


図-3 破堤拡幅抑制までの状況(ケース1)

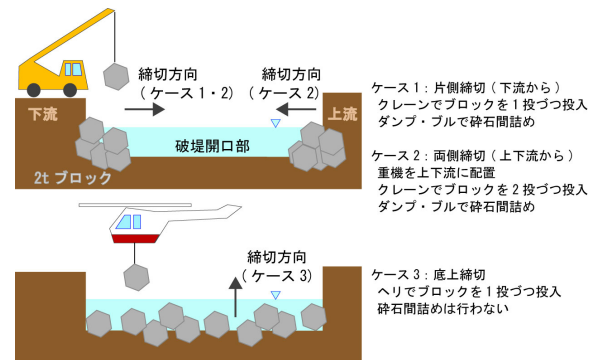


図-4 荒締切工法の想定イメージ¹³⁾¹⁴⁾

ではハイドロ等を考慮する必要があるが、今回の実験では河道水位が高い状態で早急に締め切ることを念頭に置いていることからピーク流量継続とした。

図-3に越水から破堤拡幅が停止するまでの実験状況を示す。後述する全ケースとも切欠きから概ね80m地点まで破堤拡幅したのちに停止しており、この状態から荒締切実験を開始した。なお抑制工による破堤拡幅停止のメカニズムなどは筆者らの文献を参考にされたい⁸⁾⁹⁾。

b) 荒締切開始～完了まで

破堤拡幅の停止を確認したのち、荒締切作業を開始した。想定した荒締切工法は既存技術を参考¹³⁾¹⁴⁾に図-4に示す3ケースで実験を行った。

ケース1は破堤開口部の上下流から同時に重機侵入が困難である場合などを想定し、破堤開口部下流の片側から荒締切を進めた。ブロック投入はクレーンの作業半径を考慮して重機前方5m程度の範囲における水面からブ

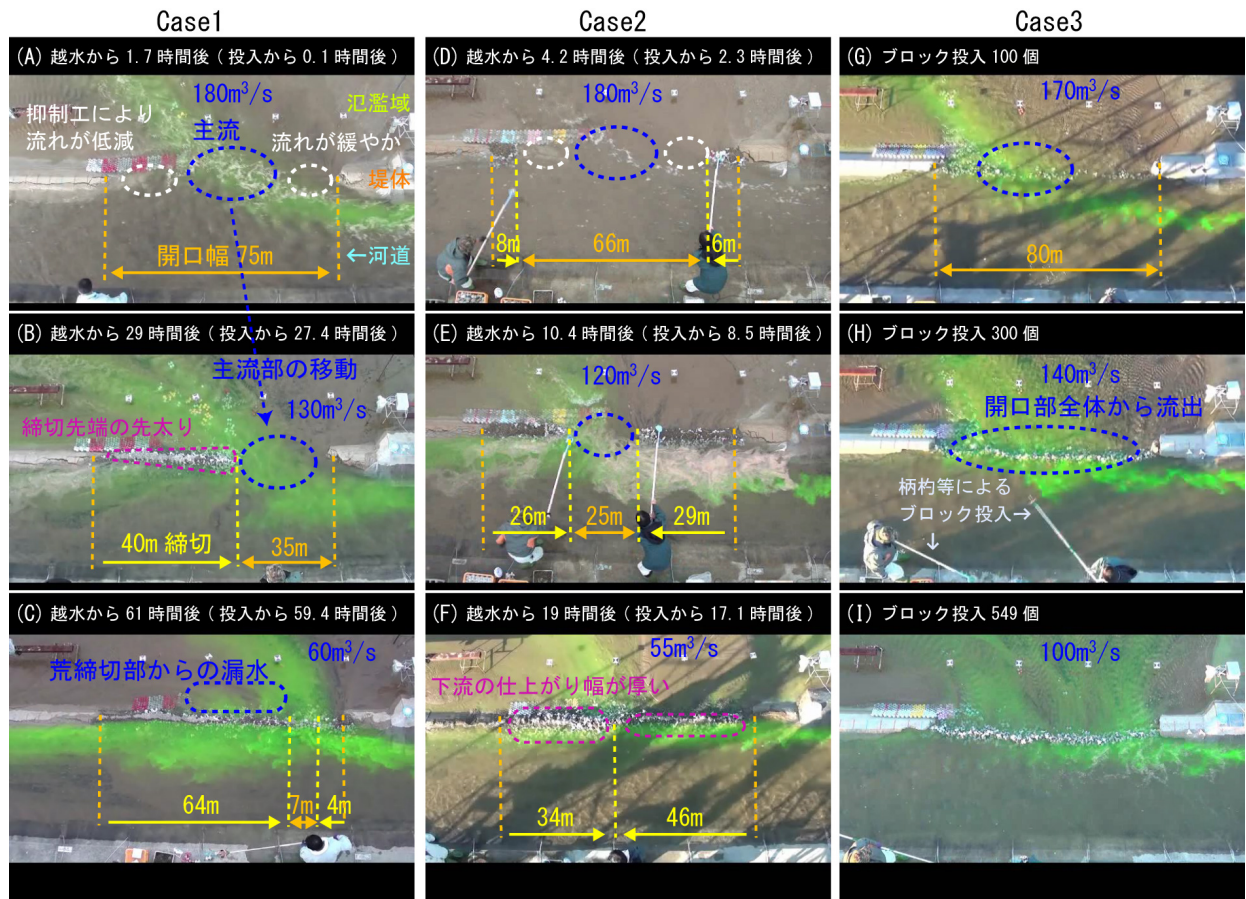


図-5 実験状況

ロックが出るまで行った。次にダンプ・ブルを想定した砕石投入により間詰めを行い、概ね重機が前進するための足場が出来たのち再度ブロック投入を行い、これを繰り返しながら開口部の荒締切を進めた。ブロックは図-1に示した2t根固めブロックと2t消波根固ブロックを併用し、千代田実験水路の現地実験の結果¹⁵⁾を参考に現地時間で3分おきに1個ずつ投入した。間詰め材は割栗石を想定し砕石粒径 $d_{50}=130\text{mm}$ としダンプで2分に1回(5.5m³)のペースで作業を進めた。

ケース2は破堤開口部の上下流から重機の侵入可能である場合を想定し、破堤開口部上下流の両側から同時に荒締切を進めた。さらにブロック連結等により2個ずつ投入可能であると想定し、ブロック投入ペースはケース1の4倍(2個/箇所×上下流2箇所)にあたる。これは既存のクレーンによる締切方法では最速の方法の一つであると考えられる。

ケース3は破堤開口部に重機が近づけない場合などを想定し、ヘリ等による空中からのブロック投入により荒締切を進めた。投入方法・位置の違いによる現象把握を目的に、ケース1・2のように開口部周辺の際から進めるのではなく、開口部全体を面的に底から積み上げるように投入を行った。ただし間詰めは困難であると考えて砕石投入は行っていない。なおブロック投入は既往検討を参考に3分に1個とした¹⁴⁾。

3. 実験結果

上空から撮影した実験状況のうち代表的な時間帯を図-5に、各観測の時系列結果を図-6に示す。図-6の上段は破堤開口幅と上下流別の荒締切が進んだ距離を、中段は氾濫流量とその累積値を示す。氾濫流量は上流供給量から水路下流流量(下流水位から $H-Q$ より)の差より算出している。併せて荒締切による減災効果把握のため、荒締切を行わなかった場合の累積氾濫流量を氾濫流量ピークが継続すると仮定して推定している。下段は上下流別の投入ブロック個数と砕石回数、及び最終投入量を示す。

(1) ケース1 (下流より片側締切)

(A)は開口幅75m、氾濫流量は180m³/s程度である。緑色の色素の状況より氾濫流は開口幅全体を均一に流れずに主流部が存在していると推定できる。これは既往の実験結果と同様の傾向⁶⁾である。なお抑制工が存在しない場合、この主流部が開口部下流の堤体にぶつかることで破堤拡幅が進行していくが、堤体下流側に抑制工ブロックが存在することで、堤体にぶつかる流速が低減し破堤拡幅進行が抑制されている⁸⁾。また開口部の上流側は流れが緩やかであり、主流部は開口部中央付近から下流側に位置している。

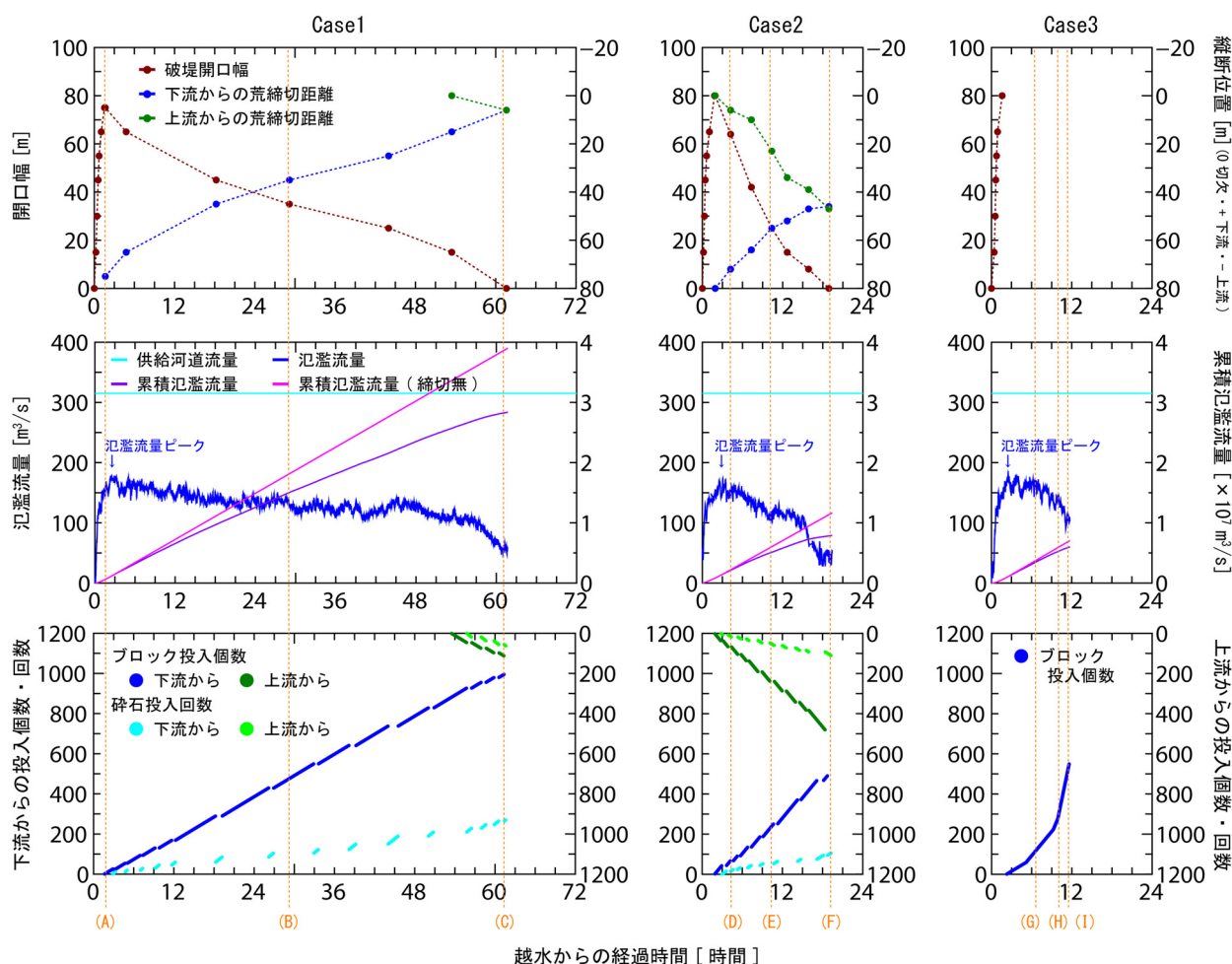


図-6 各種観測結果

(B)は開口幅35mと荒締切を半分程度まで進めたが氾濫流量は $130\text{m}^3/\text{s}$ 程度とピークに対し3割弱程度の低減である。色素による目視ではあるが、主流部は荒締切が進むにつれ、その幅を大きくは変えずに上流に移動しているようである。また荒締切の先端が先太りしている様子がわかる。これは荒締切部分に流れがぶつかり、その周辺の河床洗掘が生じることで、荒締切に必要な資材投入量が増加しているためと考えられる。

なお開口幅20m程度になった時点では主流部が開口部上流に到達し上流部堤体の侵食が確認されたため、上流部堤体保護のため上流からの荒締切も行っている。

(C)は開口幅7m、氾濫流量は $60\text{m}^3/\text{s}$ 程度である。間詰めは行っているが土砂などの投入はしていないことから、完成した荒締切部からの漏水が確認できる。

荒締切完了時点における累積氾濫流量は、荒締切を行わなかった場合と比べて3割程度の低減効果があったが、締切に要したブロック個数は1107個、砕石投入回数は333回、所要時間は投入開始から60時間程度であり効率的に作業を進めるための工夫が必要である。

(2) ケース2（上下流より両側締切）

(D)は開口幅66m、氾濫流量は $180\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、

ケース1(A)と同様に開口幅の中央付近に主流部が位置している。この時点では上流より下流からの荒締切距離が少し長い、これは抑制工により既に存在しているブロックが荒締切に寄与しているためと考えられる。

(E)は開口幅25mと荒締切を2/3程度まで進めているが、氾濫流量は $120\text{m}^3/\text{s}$ 程度とピークに対し3割強の低減である。なおこの時点で氾濫流量は開口幅全体を流れているようである。

(F)は開口幅0mと荒締切は完了したが $55\text{m}^3/\text{s}$ 程度の漏水が確認できる。

荒締切完了時点における累積氾濫流量は、荒締切を行わなかった場合に比べて3割程度の低減効果があったが、ブロック投入個数は計970個、砕石投入回数は215回、投入開始からの所要時間は17時間程度であった。上下流から概ね半数ずつを投入しているが、荒締切の仕上がり延長は上流45mに比べて下流は34mと短く、また仕上がり幅も厚くなっている。これは上流に比べて下流側では氾濫流の流れがぶつかり河床洗掘が生じたことで投入量が増加し、効率的に荒締切を進めることが困難であったためと考えられる。これは氾濫流況に応じた投入方法の工夫により、効率的に荒締切を進めることが出来ることを示唆している。

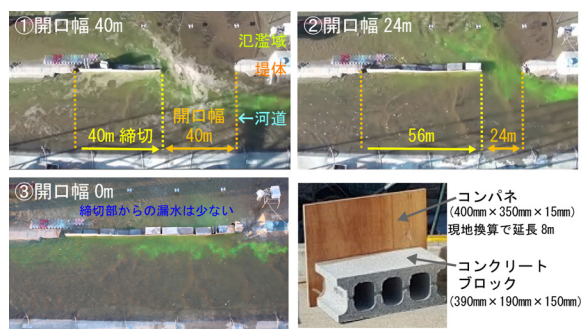


図-7 荒締切部の漏水を軽減した実験

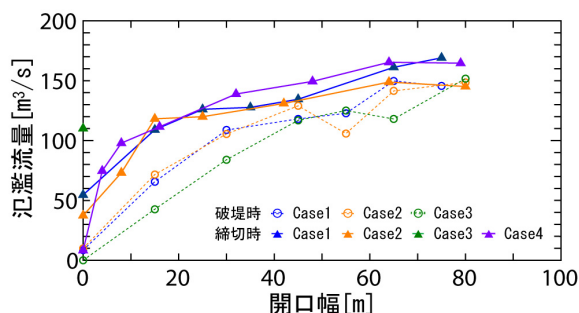


図-8 開口幅と氾濫流量

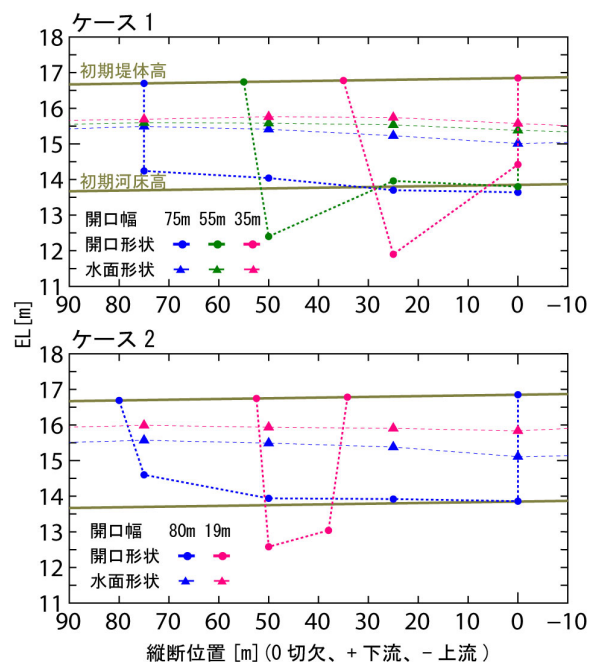
(3) ケース3 (底上締切)

ブロックを100個投入した(G)では氾濫流量は $170\text{m}^3/\text{s}$ 程度とほとんど低減していない。最初の100個は流況を見つつ氾濫流量の多くを占めると考えられる主流部分にブロックを投入することで効果的な氾濫流量の低減を狙ったが、その効果を確認することはできなかった。

ブロックを300個投入した(H)では氾濫流量が $140\text{m}^3/\text{s}$ 程度とケース1(B)と概ね同程度であるが氾濫流の流況が異なる。(B)では開口幅35mを中心に、(H)では初期開口幅80m全体を流れている。これは開口部全体にブロックを面的投入することで流れが一部に集中せず、また碎石による間詰めを行っていないためと考えられる。

ブロックを549個投入した(I)時点で開口部全区間において概ねブロックが水面から出たため実験を終了している。最終的な氾濫流量は $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度と他ケースに比べて多いが、これは間詰めを行っていないためと考えられる。一方でブロック投入個数は他ケースに比べると半数程度である。これはヘリ投入を想定しているため荒締切の上で重機が作業するために必要な天端幅を確保する必要がなかったことや、前述のように氾濫流の流れを一部に集中させなかったことで河床洗掘が低減できたためと考えられる。

なお投入ペースは後半になるほど早くなっているが、これは屋外実験であり天候等を考慮し複数日にわたった実施が困難になったためである。実験概要で述べたように1個3分での投入ペースを続けていれば、投入完了まで概ね26時間程度を要していたと考えられる。



4. 氾濫流量が低減しづらい要因の考察

開口部の締切を進めることで氾濫流量の低減を確認できたが、図-6の(B)(E)でも示したように荒締切が半分程度進んだ状態でも、氾濫流量の低減量は締切を進めた割合に比べると少なかった。この要因を明らかにすることで効果的な荒締切につながる可能性があると考えられるため、本項ではこの要因について検討を行う。

(1) 荒締切部からの漏水影響

図-6よりケース1・2のように間詰めを行った場合でも荒締切完了後、 $50\text{m}^3/\text{s}$ 程度の漏水が確認できる。荒締切の途中段階も含めどの程度の漏水があり、それが氾濫流量低減に与える影響を把握することを目的に、図-7に示すようにコンクリートブロックとコンパネを用いて荒締切部からの漏水を可能な限り許さないように締切の実験ケース4を行った。代表的な開口幅における流況を示すが、開口幅0mの時点でも多少の漏水はあるものの、ケース1・2と比較するとその量は少なかった。

図-8に開口幅と氾濫流量の関係を示す。これより、どのような方法で荒締切を進めた場合でも開口幅と氾濫流量の関係は概ね一定であった。これは荒締切部からの漏水が多少、存在しても開口部を狭くすることを優先的に進めることが氾濫流量の低減には効果的であることを示唆するものである。

またケース1・2の破堤進行時と荒締切時を比較すると、同じ開口幅であっても、破堤進行時よりも荒締切時の氾濫流量が多いことがわかる。これは見た目の開口幅が同じであっても、破堤進行時と荒締切時では河床低下等により、開口部断面形状に相違があることが考えられる。

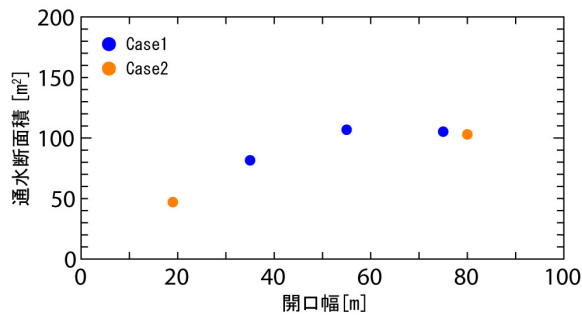


図-10 開口幅と通水断面積

(2) 荒締切時における開口部形状変化

ケース1・2では破堤拡幅が停止した時点、また荒締切中に数回、通水を止めながら開口部の河床形状を計測している。図-9に開口部の河床縦断形状とそれぞれの開口幅時点の河道左岸の縦断水位を示す。なお破線は計測点を直線補間している。両ケースともに破堤拡幅停止時点では初期河床より下の河床洗掘はほとんど見られない。

一方で荒締切を進める場合、下流から荒締切を進めたケース1では荒締切の前面が河床洗掘しており、最大で2m程度ほどの河床低下が確認できる。これは前述のように完成した荒締切部に流れがぶつかっているためと考えられる。またケース2も同様で上下流から荒締切を進めた場合も開口部の河床低下が生じていたことがわかる。

図-10に開口幅と開口部の通水断面積(河床形状と水面形より推定)を比較したものを示す。開口幅が狭くなるにも関わらず、河床低下及び水位上昇により、特に荒締切作業の前半部分では通水断面積がほとんど変化しておらず、これが図-8に示したように開口幅を狭くした割合に対して氾濫流量が低減しづらかった要因の一つと考えられる。

これは開口部の河床低下を抑制しながら作業を行うことで(例えばケース3の併用)、効率的に荒締切を進めることができ、氾濫流量を効果的に低減できる可能性を示すものである。しかし副作用として狭くなった開口部が高流速となることも考えられ、その場合、投入したブロックが転動流出するなど、荒締切を進めることが困難となる可能性もある。

5. まとめ

以下に今回、得られた知見を簡潔に示す。

- ・水位が高い状況であっても荒締切により開口幅を狭くすることで氾濫流量を低減できる可能性を示した。
- ・荒締切を進めるにつれ破堤開口部の河床低下が大きくなり、これを抑制する工夫をすることで効率的に氾濫流量を低減できる可能性がある。
- ・限られた河道条件ではあるが、上記のことが明らかになった一方、現行の施工方法では相当な時間がかかるこ

とが予想され、現場で活用するにはオペレーションの手順・安全性も含めた更なる工夫と検討が必要である。

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) 気候変動に適應した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適應策のあり方について(中間とりまとめ)、国土交通省、2015。
- 2) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会報告書、国土交通省関東地方整備局、2016。
- 3) 大規模氾濫に対する減災のための治水対策小委員会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～答申、社会資本整備審議会、2015。
- 4) 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。
- 5) 渡邊康玄、早川博、川口貴之、西村弘之、相澤哲也：2015年10月台風23号による網走周辺の被災状況報告、土木学会北海道支部、第72号、B-11、2015。
- 6) 飛田大輔、柏谷和久、柿沼孝治、島田友典、伊藤幸義：河川堤防の締切工に関する簡易模型実験、土木学会年次学術講演会、第70回、2015。
- 7) 財団法人国土開発技術研究センター：堤防決壊部緊急復旧工法マニュアル、1981。
- 8) 島田友典、飛田大輔、前田俊一、柏谷和久、伊藤幸義、横濱秀明：根固ブロックを用いた破堤氾濫流量抑制の基礎実験、地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、第3回、pp.20-23、2015。
- 9) 島田友典、飛田大輔、前田俊一、柏谷和久、横濱秀明：千代田実験水路における破堤拡幅進行時の氾濫流量抑制実験、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.72, No.4, I_1159-1164、2016。
- 10) 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、<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/-chiyoda/zi/zi0.htm>
- 11) 伊藤幸義、島田友典、横山洋、坂野章、茂木映治：模型事件による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討、河川技術論文集、Vol.16, pp.371-376、2010。
- 12) 坂野章：樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討、国土交通省国土技術政策総合研究所、2003。
- 13) 堤防決壊部緊急復旧工法マニュアル、財団法人国土開発技術センター、1981。
- 14) ヘリコプターによるブロック投入工法運用マニュアル(案)、北陸技術事務所、2011。
- 15) 島田友典、前田俊一、横濱秀明：十勝川千代田実験水路における荒締切に関する基礎実験、年次学術講演会、第71回、2016。投稿中

(2016. 4. 4受付)