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）

平成 30 年 3 月

国土交通省 北海道開発局

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

堤防決壊時に行う緊急対策工事の効率化に向けた検討アプローチ

近年の堤防決壊現場では、どのような対策工事が行われていたのか

1. 災害事例から得られた知見と課題

- 堤防決壊時の対応工事事例をレビュー ⇒ 「1.1 堤防決壊時における災害対応事例」
- 以降の検討につながるポイントを整理 ⇒ 「1.2 事例から得られた知見と課題」

⇩

堤防が決壊すると、どのように壊れるのか

2. 堤防決壊メカニズム

- 堤防決壊事例の分類 ⇒ 「2.1 堤防決壊事例」
- 十勝川千代田実験水路などを用いた堤防決壊現象の理解 ⇒ 「2.2 堤防決壊実験」
- 数値計算で河道条件による決壊現象を分類 ⇒ 「2.3 河道特性に応じた堤防決壊現象の分類」

⇩

堤防決壊時には、どう対策すれば良いのか

3. 堤防決壊メカニズムに応じた災害対応の考え方

- 堤防決壊現象の分類に応じた対応策を提案 ⇒ 「3.1 堤防決壊現象の分類に応じた対応方針」
- 堤防決壊口の拡幅を抑える工法の実験結果を紹介 ⇒ 「3.2 破堤拡幅抑制工」
- 実験で判明した荒締切の効果と留意点を説明 ⇒ 「3.3 荒締切工」

⇩

緊急対策工事では、重機と資材は何を使うと良いのか

4. 資機材の検討

- ブロック投入実験のサイクルタイム計測結果を紹介、重機の特徴を整理 ⇒ 「4.1 重機」
- 実験結果を交えてブロックの特徴を整理、転動流出を防止する方法を提案 ⇒ 「4.2 資材」

⇩

効率的な荒締切を実施した場合の減災効果はどれくらいなのか

5. 実河川の堤防決壊を想定したケーススタディ

- 本資料で提案した効率的な荒締切を実施した場合の減災効果をシミュレーション

堤防決壊時に行う緊急対策工事の効率化に関する10項ポイント

堤防決壊メカニズムについて

① 川幅と河床勾配によって**堤防決壊現象を大きく分類**できる。川幅が狭い場合は氾濫水が流出し河道水位が下がることで決壊口が拡幅しにくいが、川幅が広い場合は河道水位が下がらないため決壊口が拡幅しやすい。勾配が急な河川の場合は決壊口の拡幅が下流側に進むが、勾配が緩い場合は決壊部の河床洗掘が顕著となる。

堤防決壊メカニズムに応じた対策方針について

② **勾配が急な河川での荒締切**は決壊口の拡幅が主に下流側に進むので、下流側は欠口止め工で抑制しながら可能であれば漸縮工を行い、上流側は漸縮工を行うと効果的である。川幅が広い場合は決壊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。さらに、破堤拡幅抑制工を施工することにより拡幅の進行を抑えられる場合がある。

③ **勾配が緩い河川での荒締切**は上下流側から漸縮工を行うと効果的である。川幅が広い場合など決壊後も河道の水位が下がりにくい状況では、決壊口中央の河床洗掘が顕著となるため注意が必要である。

④ **荒締切による氾濫流量の低減効果**は堤防決壊部に投入したブロック数に応じている。多くのブロックを迅速に投入することが堤防決壊時の氾濫被害軽減に直結する。

⑤ **せめ工段階**ではブロック投入数に対して河床洗掘が発生し、投入したブロックの多くが沈下・埋没する可能性がある。このようなロスも見込んだ資材準備計画が必要である。

緊急締切作業で使用する重機について

⑥ **バックホウ**は不整地でも作業可能で、土工作業だけでなく資材の吊作業もできるため、堤防決壊時の対策工事で多く使われている。緊急対策工事ではバックホウを使用して早期着手することが有効な手段の１つである。

⑦ **クレーン**は重量のあるブロックを吊れるが、安定した幅広の足場が必要なこと、小回りが利かないことから、締切作業の初期段階では、堤防上での締切作業よりも後方での資材の移動などへの活用が期待される。

⑧ **不整地運搬車**はダンプトラックより調達が困難であるが、悪路での資材運搬が可能なこと、運転台が回転できるものは車輌転回が必要ないことから、堤防決壊現場内で使用すると効果的である。

緊急締切作業で使用する資材について

⑨ **コンクリートブロック**は形状によって水中投入時の施工性に特徴がある。立体型は水中で転動しやすいがかみ合って安定的に積み上がりやすい。一方、平型は水中で転動しにくいが積み上げるのに多数必要になるなどの特徴がある。備蓄ブロックの特性を理解して緊急対策工事に挑むのが良い。

⑩ ブロックの転動・流出を防止するためには**ブロックの連結や補助工法の併用**が効率的な場合がある。

はじめに

河川整備が進んでいる現在においても、平成 24 年の矢部川、平成 27 年の鬼怒川、同じく平成 27 年の網走川水系サラカオーマキキン川・女満別川、平成 28 年の北海道豪雨災害の際の空知川上流、常呂川水系柴山沢川など、北海道内を含め全国で堤防決壊による浸水被害が発生している。

堤防決壊で堤内地が広範囲・長時間にわたり冠水すると流域の生活・産業に大きな影響が生じる。さらに、気候変動による河川の洪水流量の増大も懸念される中、堤防決壊による被害の最小化は河川防災の喫緊の課題のひとつである。

堤防決壊時の緊急対応として、決壊口を迅速に締め切り氾濫被害を最小化する対策が行われているが、堤防決壊時の迅速な対策技術の向上を進めることが、堤防決壊に対する被害軽減につながる。堤防決壊時の迅速な対策工事では、荒締切などの作業をいかに効率的に行うことができるかが重要である。堤防決壊地点を事前に予測することは現状では難しいため、堤防決壊現場の近くですぐに用意できる機材と資材を用いて緊急対策工事をせざるを得ない。そのため、緊急対策工事の効率化に向けては、身近にある資機材を使用した施工方法を確立しておくことが有効となる。

堤防が決壊した直後は河川水位がまだ高い状態であることが想定されるが、できるだけ氾濫被害を減らすためには、十分な安全管理の上、河川水位が高いときから荒締切工事を行い河川からの氾濫量を低減する必要がある。また河川水位が下がってからでも、さらに連続する降雨による次の出水に備えるためにも迅速な荒締切工事は必要となる。

本検討資料は、河川特性に応じて堤防決壊時の緊急対策工事の効率化を考える際に必要となる締切に関する留意点や、重機作業、使用する資機材の適応性について検討した内容を示したものである。特に、河川水位が高い状態で効率的に荒締切工事を行うことは、現場での安全性も同時に考えると明快な手法の提案は困難な面が多い。しかしながら、各河川事務所が堤防決壊時の緊急対策シミュレーションなどを実施する際の参考として本検討資料を使用することで、図らずも堤防決壊に際した場合に少しでも有効な方法を選択し現場ごとの減災につながることを期待して、現時点で可能な方法について検討しとりまとめたものである。

なお、本検討資料は現時点での検討成果をとりまとめたものであり、不足している内容や新たな知見を適宜更新していくものである。

目　次

1. 災害事例から得られた知見と課題---------- 1
1.1 堤防決壊時における災害対応事例---------- 2
1.2 事例から得られた知見と課題---------- 9
2. 堤防決壊メカニズム---------- 11
2.1 堤防決壊事例---------- 12
2.2 堤防決壊実験---------- 16
2.2.1 千代田実験水路における堤防決壊実験 ---------- 16
2.2.2 模型実験による堤防決壊実験 ---------- 21
2.3 河道特性に応じた堤防決壊現象の分類---------- 24
3. 堤防決壊メカニズムに応じた災害対応の考え方---------- 26
3.1 堤防決壊現象の分類に応じた対応方針---------- 27
3.2 破堤拡幅抑制工---------- 29
3.3 荒締切工---------- 35
3.3.1 模型実験による荒締切の効果 ---------- 35
3.3.2 実物大のせめ工実験 ---------- 38
3.3.3 模型実験によるせめ工実験 ---------- 43
4. 資機材の検討---------- 45
4.1 重機---------- 46
4.1.1 ブロック投入実験 ---------- 46
4.1.2 効率的な重機の選定 ---------- 50
4.2 資材---------- 57
4.2.1 ブロックの特性 ---------- 57
4.2.2 補助工法 ---------- 64
5. 実河川の堤防決壊を想定したケーススタディ---------- 65
6. 本資料作成の参考にした文献等---------- 70

1. 災害事例から得られた知見と課題

近年の北海道内における堤防決壊時の緊急対策工事事例を整理し、復旧工事の効率化につながるポイントを抽出する。

さらに、緊急対策工事から得られた知見と課題を整理する。

1.1 堤防決壊時における災害対応事例（流路の切替工事も含む）

(1) 平成 28 年 8 月　石狩川水系空知川

南富良野町幾寅地区では空知川の堤防が 2 箇所決壊した。

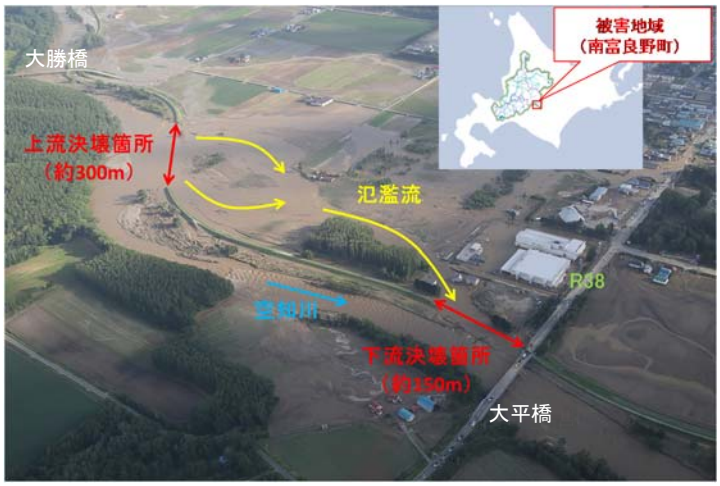


写真 1.1　空知川の氾濫状況

1）上流側

【災害概要】

平成 28 年 8 月 31 日深夜から未明にかけて大勝橋から下流に 450m ほど離れた左岸堤防が決壊し、最終的な決壊幅は約 300m となった。

【復旧工事の概要】

バックホウが水の引いた箇所を通って堤防決壊箇所に到達し、氾濫流のある中、地耐力を確認しつつ深掘れ箇所を避けながら周辺の土砂を寄せ集めて小堤防を造成し、9 月 2 日 0 時頃に締め切ることができた（写真 1.2）。

小堤防で氾濫を止めた後、元の堤防法線上に仮堤防を築堤するため、右岸側の砂州と左岸側の陸上の両方からブロックと土砂で締切作業を進め、主流路を閉じた（写真 1.2）。締切部の決壊幅が狭まると土砂が流されるようになったので、ブロックと流木を積み上げて土砂を投入することで締切作業を完了することができた。土砂の運搬・投入には、車体上部が回転する不整地運搬車を使用した（写真 1.3）。

写真 1.2　小堤防の法線

写真 1.3　不整地運搬車による土砂投入

2）下流側

堤防決壊時の締切工事の事例ではないが、クレーンとバックホウを使用して橋台背後の洗掘について応急復旧工事を行った。

【災害概要】

平成 28 年 8 月 31 日深夜から未明にかけて太平橋の直上流の左岸堤防が決壊し、太平橋の橋台背後が洗掘を受けた（写真 1.4）。

【復旧工事の概要】

橋台背後の洗掘を止めるため、太平橋上に設置したクレーンで根固めブロックを左岸側の道路上に降ろし、バックホウのバケットで橋台背後に押し落とした（写真 1.5）。橋台背後の洗掘を止めてから、袋詰め根固めと砕石で応急復旧を行った（写真 1.6）。太平橋の応急復旧は約 12 時間で完了した。

写真 1.4　太平橋左岸橋台背後の洗掘

写真 1.5　バックホウによるブロックの押し落とし

写真 1.6　太平橋橋台背後の応急復旧

(2) 平成 28 年 8 月　常呂川水系柴山沢川

【災害概要】

平成 28 年 8 月 21 日未明から早朝にかけて堤防が決壊した。堤防決壊箇所は 2 条 7 号区間上流端近傍の左岸堤防であり、既存の道路から柴山沢川の堤防を 30m ほど下流に進んだ地点であった（写真 1.7、写真 1.8）。最終的な決壊幅は約 100m となった。

【復旧工事の概要】

荒締切工事は 22 日の朝から開始した。荒締切工事はバックホウを用いて行い、大型土のうの積み上げを先行させてから大型土のうの間に砕石を投入する手順で、堤防決壊口の上流側から進めた（写真 1.9）。

大型土のうを投入しても深みに沈んでしまい締切作業が進まなかったため、ボートを使って堤防決壊部の水深を確認したところ（写真 1.10）、上流端の約 10m の区間が深掘れしていたが、それより下流側は堤内地盤高程度であることがわかった。

荒締切は 26 日に完了した。

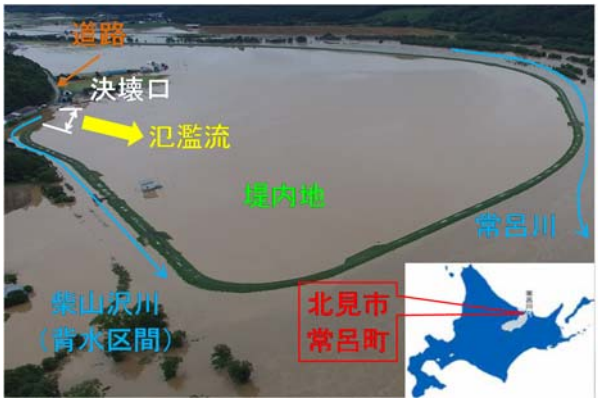


写真 1.7　柴山沢川の氾濫状況

写真 1.8　柴山沢川の堤防決壊状況

写真 1.9　バックホウによる大型土のう設置

写真 1.10　ボートによる深掘れ部の調査

(3) 平成 27 年 10 月　網走川水系サラカオーマキキン川

【災害概要】

平成 27 年 10 月 9 日未明から明け方にかけて、道道 248 号の住吉 1 号橋から下流に約 35m 離れた右岸堤防が決壊した（写真 1.11）。最終的な決壊幅は約 30m となった。

【復旧工事の概要】

9 日 12 時頃から大型土のうによる荒締切作業を開始した。

堤内側の道路を使って大型土のうを運び、その先はバックホウを 3 台使用してバケツリレーのように大型土のうを堤防決壊部に投入した（写真 1.12）。

大型土のうを安全に水中に投入できるように、堤防決壊部に配置したバックホウにはアタッチメントとしてグラップルを装着した（写真 1.13）。決壊口の下流側の堤防にグラップルが届くようになってから、堤防決壊口が下流側に広がるのを防ぐため、堤防決壊口の下流側に大型土のうを投入した。

荒締切は同日の 18 時頃に完了した（写真 1.14 は翌朝の状況）。

写真 1.11　サラカオーマキキン川の堤防決壊状況

写真 1.12　大型土のうのバケツリレー

写真 1.13　大型土のうの投入状況

写真 1.14　大型土のうによる締切が概ね完了した状況

(4) 平成 27 年 10 月　網走川水系女満別川

【災害概要】

平成 27 年 10 月 8 日 16 時頃に、国道 39 号線の女満別橋から上流に 40m ほど離れた左岸堤防が決壊した（写真 1.15）。最終的な決壊幅は約 35m となった。

【復旧工事の概要】

災害発生から 3 時間後の 19 時頃から荒締切作業を開始し、バックホウを用いて割石（200kg～500kg）を堤防決壊口へ投入した。

堤防決壊箇所の天端幅は約 3m しかなかったため（写真 1.16）、当初はダンプトラックで運んだ割石を国道近くの堤防天端上に放出し、バックホウにより国道と決壊口の間を往復して割石を投入した（写真 1.17）。割石の投入により下流側への堤防決壊口の拡幅が停止した後、ダンプトラックが決壊口まで安全に進入できるように、砕石を用いて堤防天端幅を約 4m まで拡幅した（写真 1.18）。

堤防決壊口中央付近の深掘れを防ぐため、割石は下流側から中央部の広い範囲に投入した。バックホウのアームが堤防決壊口上流側の堤防に届くようになった段階で、堤防決壊が上流側に広がらないように、堤防決壊口の中央部に投入した割石の一部をすくい上げて上流側の堤防決壊部に投入した。

荒締切作業は翌朝に完了した。

写真 1.15　女満別川の堤防決壊状況(1)

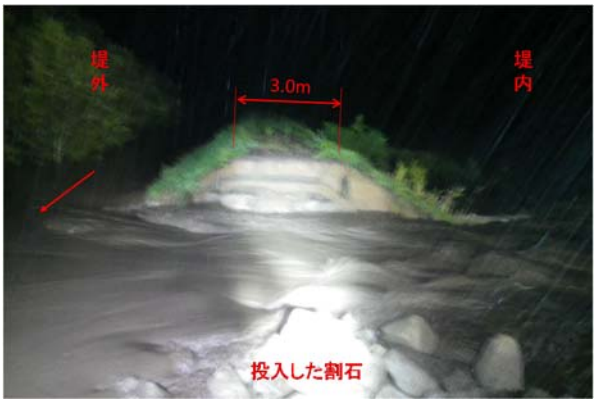


写真 1.16　女満別川の堤防決壊状況(2)

写真 1.17　締切工事着手直後の状況

写真 1.18　天端拡幅後の状況

(5) 平成 14 年 10 月　十勝川千代田新水路

堤防決壊時の締切工事の事例ではないが、流路を切替えるために緊急的に締切工事を行った。

写真 1.19　工事中の千代田新水路への洪水流入状況（10 月 3 日 7:45 撮影）

【災害概要】

平成 14 年 10 月 2 日 5 時 40 分頃に、工事中であった千代田新水路の遮水矢板が越流で折れ曲がり、洪水流の大半が千代田新水路に流入した。

【復旧工事の概要】

流れを本川に戻すため、本川分流部付近で 10 月 10 日から荒締切を開始した（写真 1.19）。荒締切は本川上流から着手し、中割石でマウンドを造成して根固めブロックで保護しながら、下流に向かって締切を伸長した。

締切がある程度進んだところで、大型クレーンの作業が可能な幅広ヤードを締切部の先端に造成し、中割石やブロックなどの資材を下流側に運び渡した。決壊幅が狭くなるにつれて流速が速くなり、流れが対岸を侵食しながら決壊部が逃げていったので、大型クレーンで運び渡した資材で下流側を固めながら主に上流側から締切を伸長した（写真 1.20）。

流速が速くなる閉塞時（せめ工段階）では中割石やブロックが流出するようになったため（写真 1.21）、クレーンを使用して港湾工事で使用される 10t の大型ふとんかごを決壊口の上下流側に積み上げ、バックホウを用いて一度に押し出し、若干残っていた隙間にふとんかごを追加投入した（写真 1.22～写真 1.25）。

荒締切が完了したのは 10 月 17 日であり、締切延長は約 170m であった。

写真 1.20　締切作業状況

写真 1.21　せめ工前

写真 1.22　大型ふとんかごの積み重ね状況

写真 1.23　大型ふとんかごの押し出し作業開始

写真 1.24　大型ふとんかごの押し出し作業終了

写真 1.25　ふとんかごの追加投入による隙間の閉塞

1.2 事例から得られた知見と課題

【使用する重機】
バックホウは迅速な調達が可能で、使い勝手が良い。
クレーンは初動には向かないが、資材の移動などに使用すると有効である。
不整地運搬車は堤防決壊現場のような悪条件で使用すると有効である。
【締切資材】
せめ工段階など高流速の場合には、締切に必要な資材重量は大きくなる。
【締切方法】
荒締切を片側から進めると、決壊口の反対側の堤防の崩壊が進行する場合がある。

前節で紹介した災害対応事例から得られた知見と課題について、(1)重機、(2)資材、(3)締切方法に分類して以下に記載する。

(1) 緊急対策工事に使用する重機

1) バックホウ

- 前節で紹介した全事例でバックホウが使用されていた。
- バックホウは迅速な調達が容易であり、短時間の内に現場で実際に使用することができた。
- バックホウは狭い堤防上や不整地での作業が可能である。
- バケットを用いた投入作業だけでなく、クレーン機能による吊作業や、アタッチメントをグラップル（P5 写真 1.13 参照）に変えることによる把持作業など、使い勝手が良い。
- 緊急対策工事の初期段階では、バックホウで欠口止め工などの荒締切作業を進めることが有効である。

2) クレーン

- クレーンは 3t 以上の重い資材を離れた場所に移動することができるので、このような機能が必要となる場合にはクレーンを使用する。
- クレーンは工事着手に時間を要するため、緊急対策工事でクレーンの使用が予測される場合にはクレーンヤードの造成を行い、適切なタイミングでクレーンを使用できるようにするのが良い。

3）不整地運搬車

・ 不整地運搬車は軟弱地など走行性の良くないところでも走行できる。
・ 車体上部が回転するタイプはバックで進む必要が無いので、現場条件によっては使用すると効果的である。
・ ダンプトラックと比べて調達が困難であるため、事前に管内の保有台数や所在地を把握しておくことが重要である。

(2) 資材

・ せめ工段階を除くと、中小河川の事例では投入資材の流出はほとんど発生しなかった。
・ 中小河川では河川規模に応じて決壊口内の流速・水深・流量が小さくなると考えられることから、ある程度の重さのある資材は流出しにくい傾向にある。
・ せめ工段階のように決壊口の流体力が増える場合には、荒締切に必要となる資材の重量は大きくなる。

(3) 締切方法

・ 荒締切を片側から実施すると、決壊口の反対側の堤防の崩壊が進行する場合がある。
・ 堤防決壊部に落掘（氾濫流による深掘れ）が発生し、投入した資材が水面下に沈んで締切作業が進まないことがある。
・ せめ工段階の河床洗掘を防止するため、早い段階で締切資材を決壊口の中央部周辺に投入することが有効である。

2. 堤防決壊メカニズム

堤防決壊事例の分析、実物大規模の堤防を用いた越水による堤防決壊実験および縮尺模型による河道特性を変えた堤防決壊実験、さらに破堤計算モデル「Nays2D Breach」を用いた数値計算により、河道特性と堤防決壊現象の関係を整理する。

2.1 堤防決壊事例

堤防決壊現象と河道特性には密接な関係がある。 勾配が急な河川の堤防が決壊すると、決壊口が下流側に拡幅進行する傾向にある。 勾配が緩い河川の堤防が決壊すると、堤防決壊口の中央部に速い流れが発生する傾向にある。

近年の堤防決壊事例について、川幅と計画高水勾配に着目して整理し図 2.1 に示す。同図には、河川整備基本方針で公表されている全国一級河川の基準地点および主要地点も示す。これより、堤防決壊要因によらず川幅の広狭、勾配の緩急と様々な河道特性において堤防決壊が生じていることがわかる。

堤防決壊現象と河道特性には密接な関係があると考えられ、勾配が急な河川の堤防が決壊すると決壊口が下流側に拡幅進行する傾向にあり、勾配が緩い河川では堤防決壊口の中央部に速い流れが発生する傾向にある。

勾配が急な河川の堤防決壊事例、勾配が緩い河川の堤防決壊事例、背水区間の堤防決壊事例を以降に紹介する。

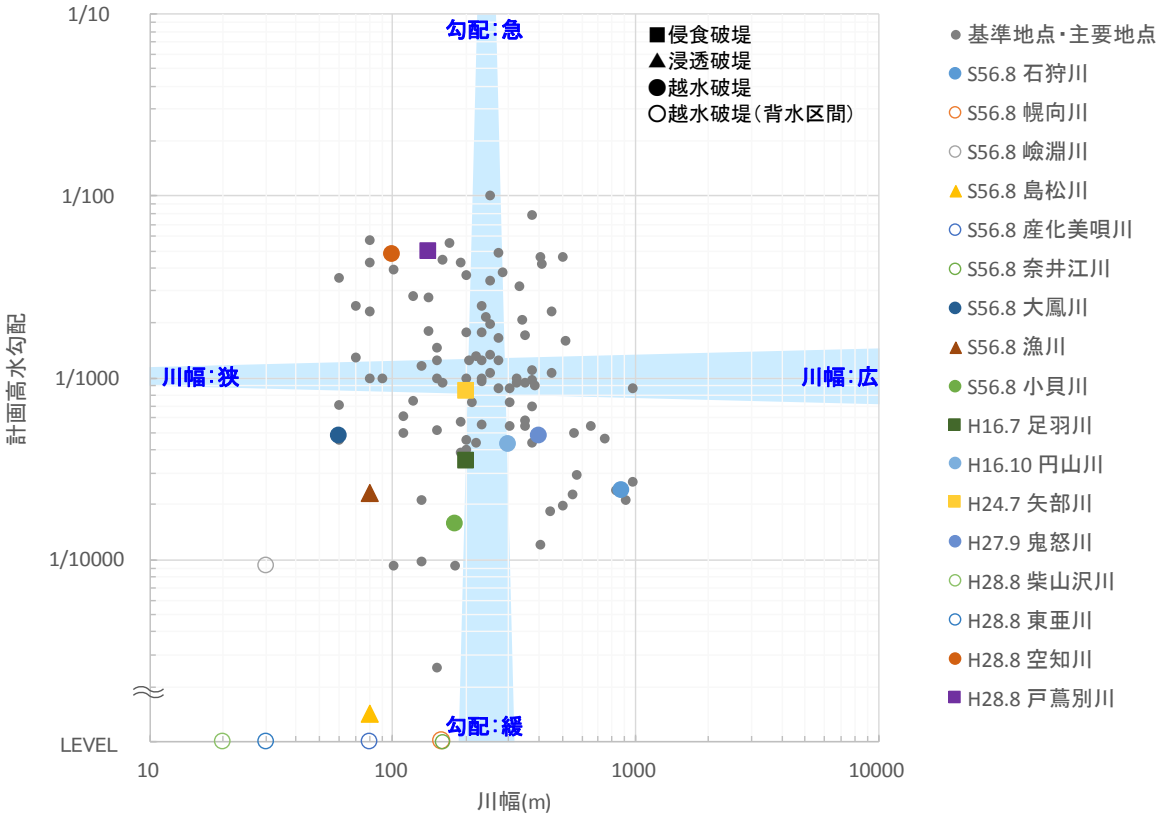


図 2.1 既往堤防決壊事例における川幅と計画高水勾配の関係

(1) 勾配が急な河川の堤防決壊事例（H28.8 石狩川水系空知川）

石狩川水系空知川では、平成 28 年 8 月 31 日未明から明け方にかけて幾寅築堤 KP117.0 付近（大勝橋下流左岸）、KP116.1 付近（太平橋上流左岸）の 2 箇所の堤防決壊が発生した。空知川幾寅地区の計画高水勾配は 1/210 程度（河床勾配 1/180 程度）、川幅は 100m 程度である。

上流側の決壊箇所（大勝橋下流左岸）は決壊幅が約 300m であった。決壊口の上流部付近において堤外側から堤内側への越水が発生し、川裏法面が洗掘したことが決壊原因の一つと推定されている。堤防決壊部の下流側の堤体断面は河道から氾濫域に向かって斜めに侵食されており、決壊口が下流方向へ拡幅したと考えられている。

写真 2.1　石狩川水系空知川の堤防決壊状況

(2) 勾配が緩い河川の堤防決壊事例（S56.8 石狩川）

石狩川では昭和 56 年 8 月 6 日 1 時頃に下新篠津築堤美原 37 線付近で溢水が開始し、2 箇所 370m に渡り堤防決壊した。石狩川下新篠津の計画高水勾配は 1/4000 程度、川幅は 900m 程度である。

堤防決壊時の映像を見ると、河川の上下流から決壊部に向かって氾濫水が流れており、河道側に向かって開くハの字型に侵食し、決壊口中央が主流となっている状況がわかる。

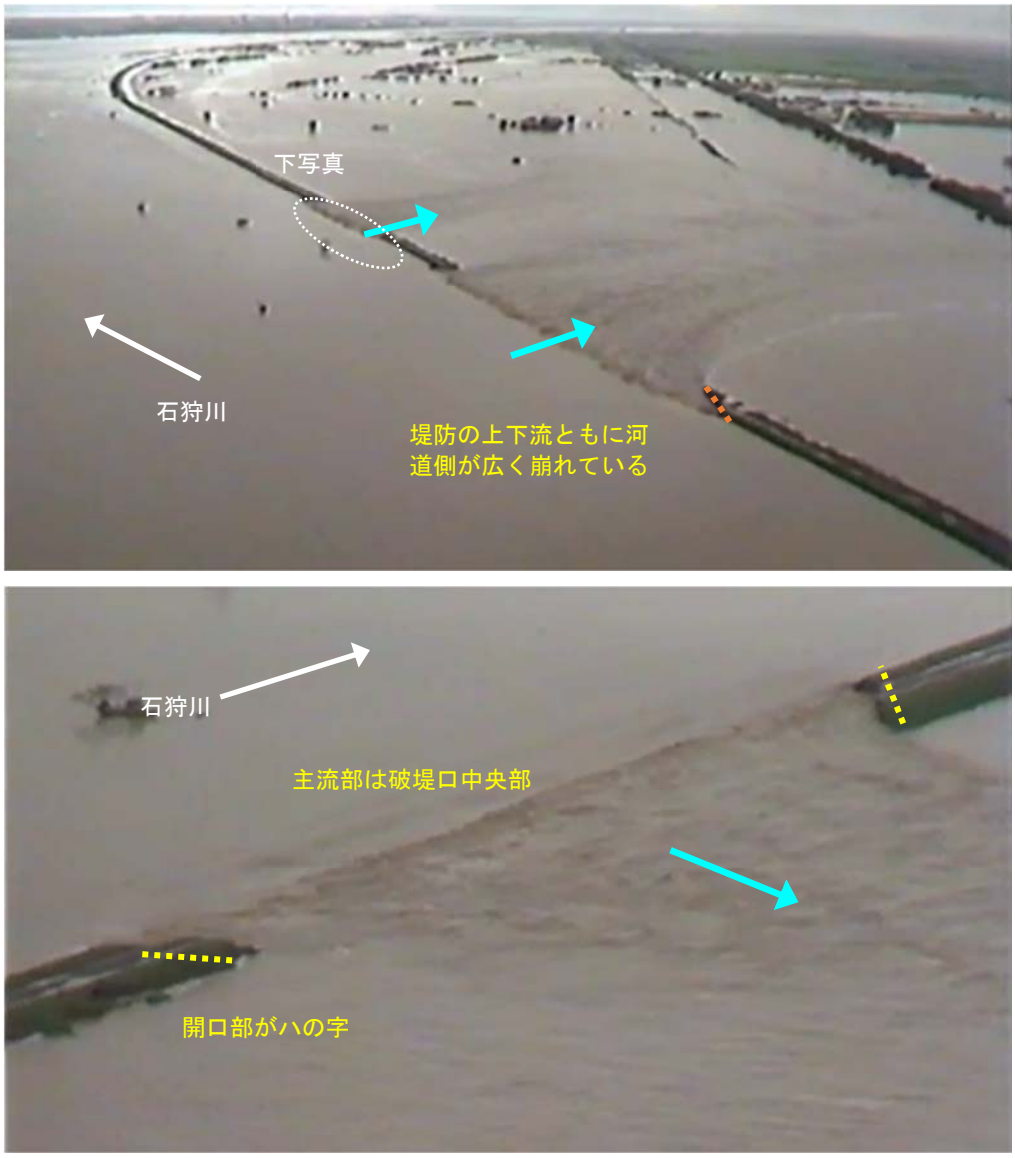


写真 2.2　石狩川の堤防決壊状況

(3) 背水区間の堤防決壊事例（H28.8 常呂川水系柴山沢川）

常呂川水系柴山沢川では、平成 28 年 8 月 20 日深夜から早朝にかけて、堤防が約 100m に渡って決壊した。柴山沢川の堤防決壊箇所は常呂川の背水区間に当たるため計画高水勾配は LEVEL であり、川幅は 20m 程度である。

柴山沢川の合流先である常呂川からの背水による水位上昇で越水し、堤防決壊したと推定されている。堤防決壊幅は、堤防決壊発見後から水位が低下するまでの間、ほとんど広がらなかった。

写真 2.3　常呂川水系柴山沢川の堤防決壊状況

2.2 堤防決壊実験

【川幅】
川幅が広くなると、河道水位は低下しづらくなり、堤防決壊幅や氾濫流量は大きくなる。
【河床勾配】
河床勾配が緩くなると、堤防決壊幅は拡がりづらいが、落掘の規模が大きくなる。

2.2.1 千代田実験水路における堤防決壊実験

堤防決壊メカニズムの解明を目的に、実物大規模の堤防を越水により決壊させる実験を千代田実験水路で実施した。千代田実験水路は十勝川中流部にある千代田新水路の一部を利用した実河川スケールの実験施設であり、延長は 1,300m、水路幅は 30m、河床勾配は 1/500 である。堤防の基本形状は高さ 3m、天端幅 3m、法面勾配 1:2.0 である。

写真 2.4　実験全体風景

(1) 実験の概要

堤防決壊実験は表 2.1 に示す 4 ケースを実施した。Case1 を基本として、Case2 は水面勾配が緩くフルード数が小さい場合、Case3 は堤体材料がシルト質の場合、Case4 は堤防天端幅が広い場合について、堤防決壊の進行過程に着目して実験を実施した。

表 2.1　実験ケース

	堤体・水路形状					目標水理量	
	土質	高さ	天端幅	法面勾配	水路幅	水面勾配	通水流量
Case1	砂礫	3m	3m	1:2	8m	1/500	70m³/s
Case2						1/3500	35m³/s
Case3	細粒分 (下層1m砂礫)					1/500	70m³/s
Case4	砂礫		6m				

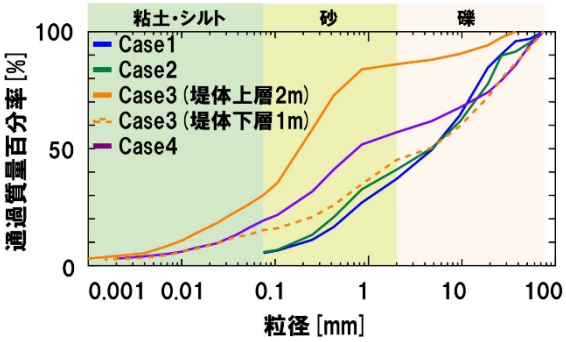


図 2.2　堤体に用いた材料

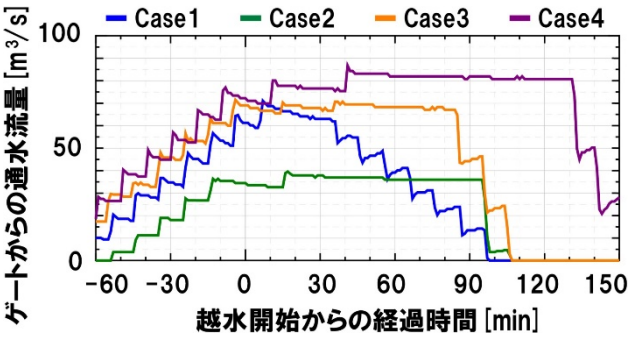


図 2.3　通水量

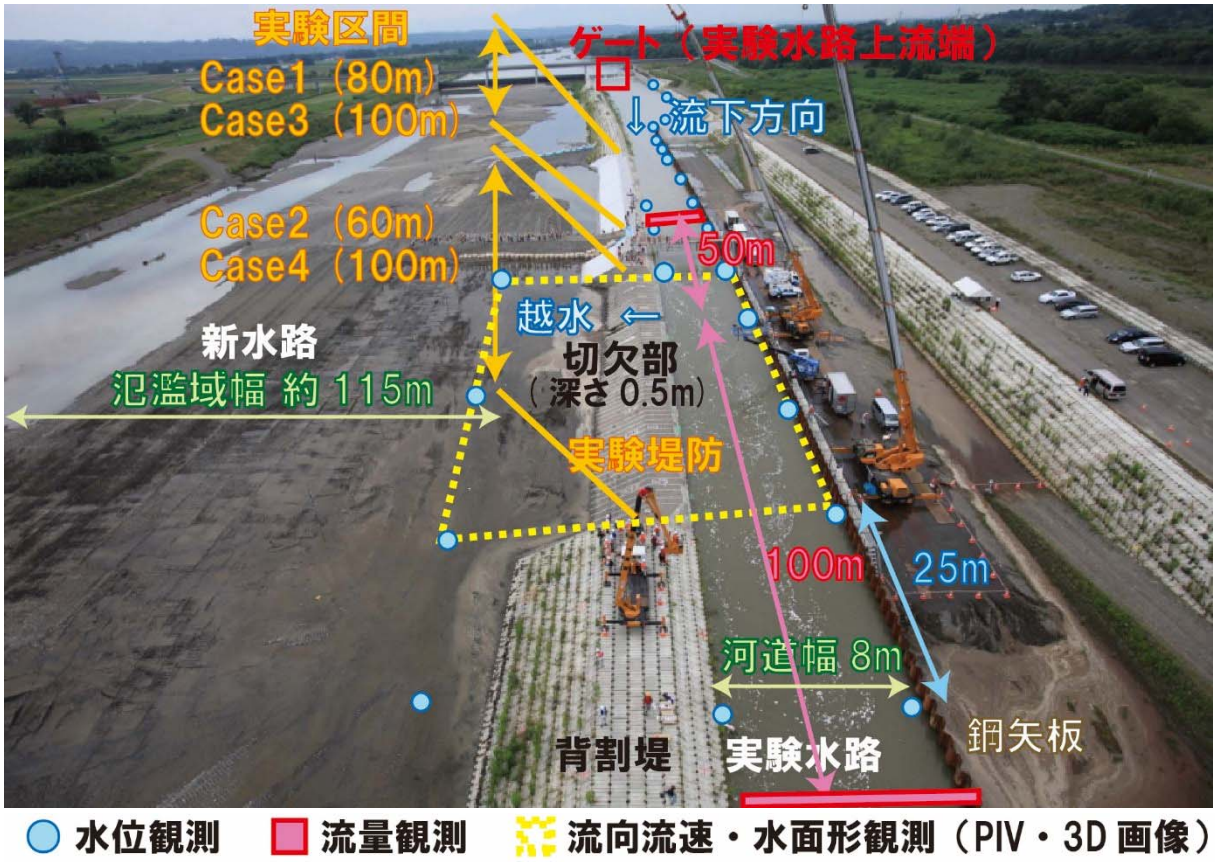


写真 2.5　実験中の主な観測項目（写真は Case2）

(2) 実験の状況

越水初期段階では氾濫流量はほとんど増加しないが、堤防決壊拡幅が始まると氾濫流量の増加が始まる。また、一旦堤防決壊拡幅が始まると、堤防決壊拡幅が急速に進行することがわかった。

堤体土質に細粒分を使用した Case3 は越水開始後から堤防決壊拡幅開始に至るまでの所要時間が長いこと、水面勾配が緩くフルード数が小さい Case2 は拡幅が上下流方向にほぼ対称に進むが通水流量が少ないため堤防決壊の拡幅速度が小さいことなど、堤体材料や堤体のボリュームおよび水面勾配などの違いにより堤防決壊進行状況に違いがあることがわかった。

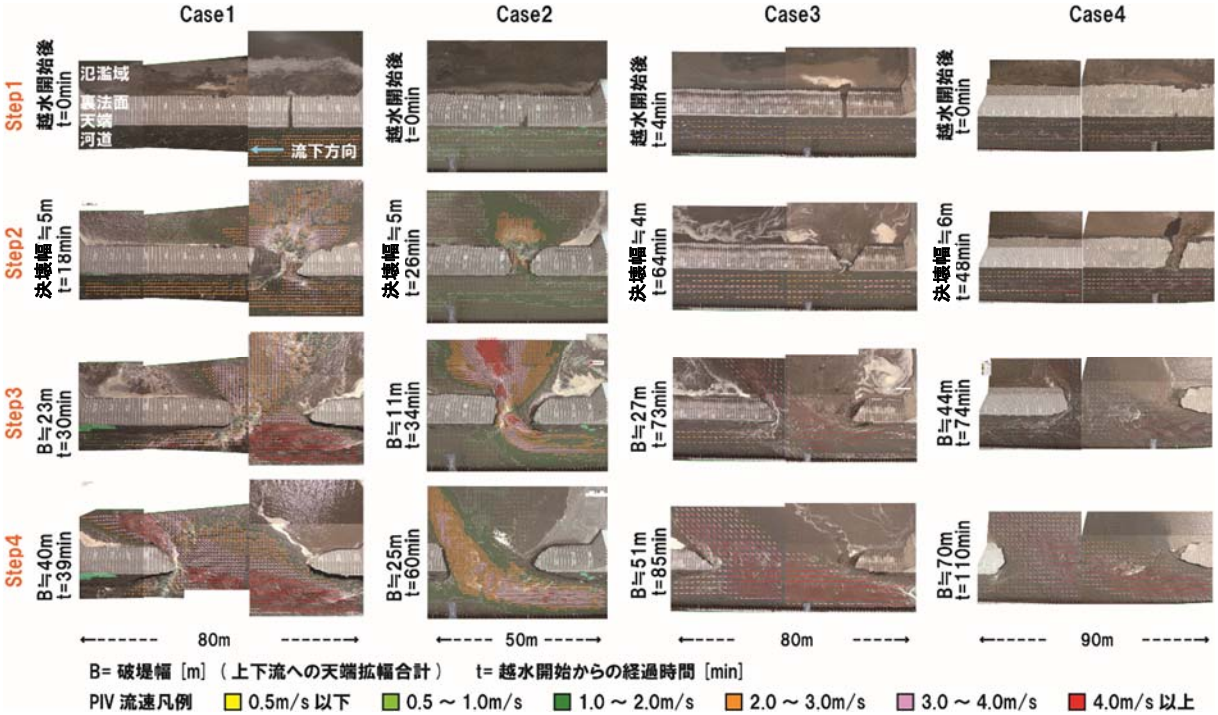


写真 2.6　堤防決壊の進行過程

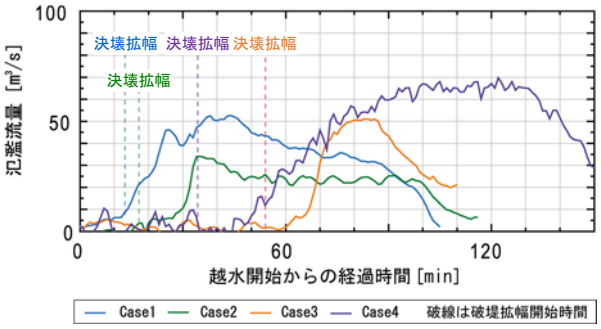


図 2.4　氾濫流量の時間変化

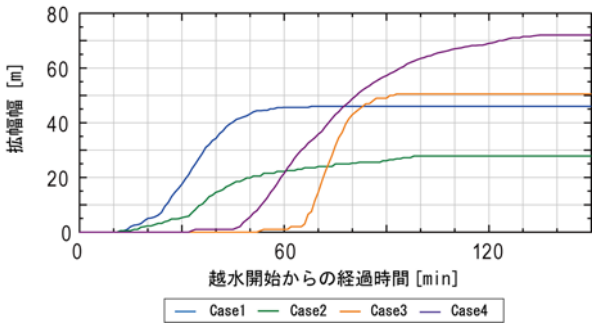


図 2.5　堤防決壊幅の時間変化

(3) 堤防決壊拡幅の進行過程に関する考察

堤防の天端から越水した後、4 つの段階を経て堤防決壊が進行することがわかった。

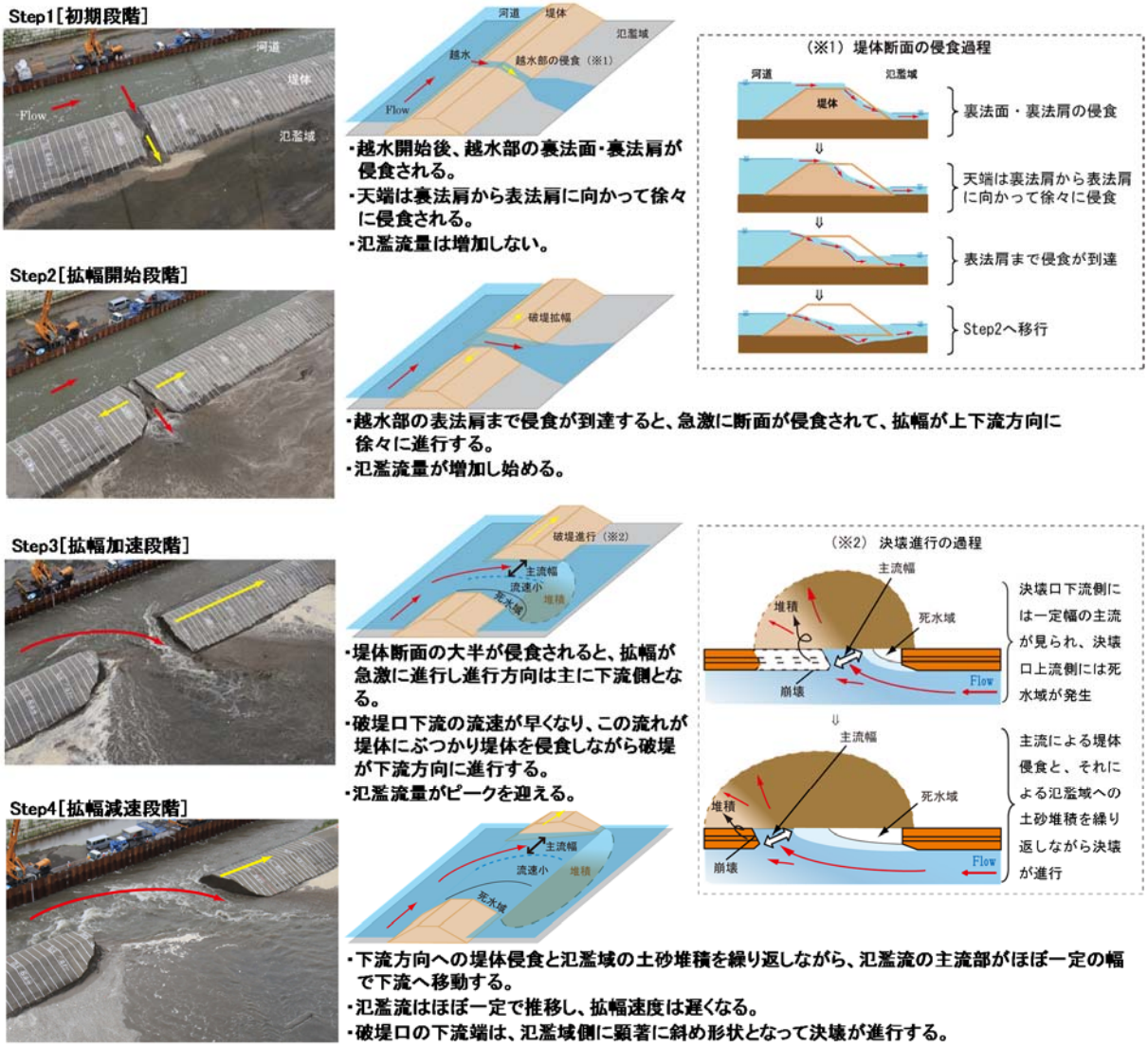
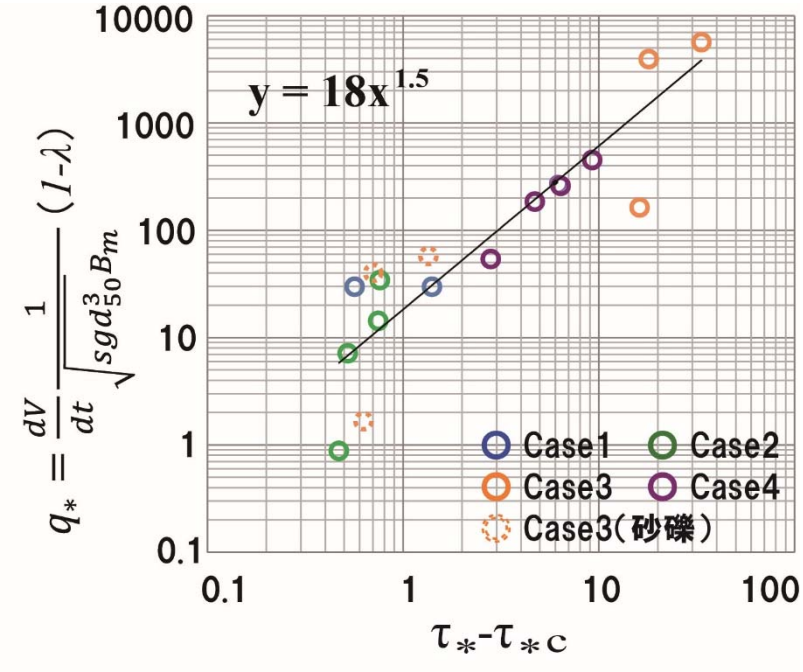


図 2.6　堤防決壊の進行過程

堤防決壊の拡幅過程においては、堤体崩壊は氾濫流による堤体の掃流現象として捉えられ、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を掃流砂量式に近い次式で表すことができた。

$$q_* = 18(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5}$$



ここで、τ*：堤体決壊部に作用する無次元掃流力、τ*c：無次元限界掃流力、q*：無次元堤体崩壊量、V：堤体崩壊量、s：砂粒の水中比重、g：重力加速度、d50：砂粒の 50%通過粒径、Bm：堤体下幅、λ：空隙率を表す。

図 2.7　無次元堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力

2.2.2 模型実験による堤防決壊実験

(1) 模型実験概要と実験ケース

千代田実験水路では、川幅や河床勾配を変化させた実験は困難であるため、国土技術政策総合研究所（つくば市）にある千代田実験水路の縮尺模型実験水路を用いて、川幅と河床勾配を変えた堤防決壊実験を実施した。なお、実物大規模の実験結果との比較のため、以降に示す 1/20 縮尺模型実験については、水路諸元、水理量、時間をフルード相似則で全て現地規模に換算している。

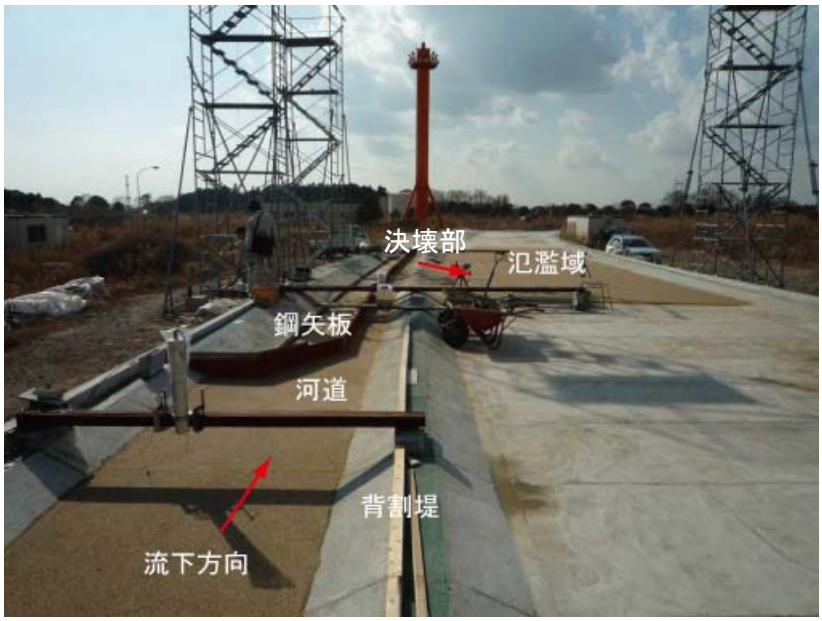


写真 2.7　つくば市にある縮尺模型（現地の 1/20）

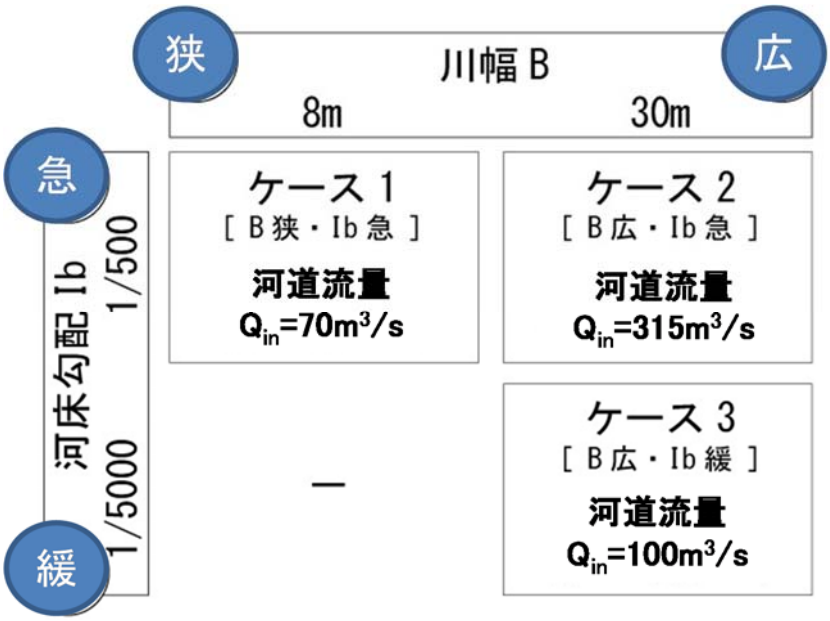
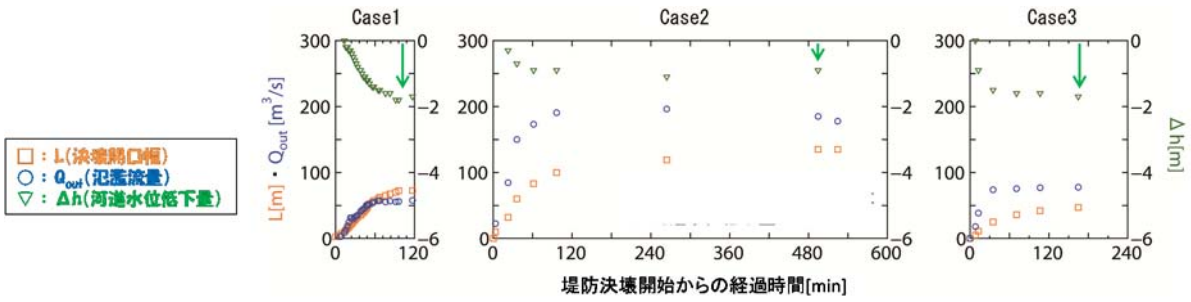


図 2.8　模型実験ケース

(2) 実験結果

堤防決壊幅と氾濫流量の時系列を図 2.9 に示す。また、実験時の流況と通水後の形状を写真 2.8 に示す。これらより、川幅と河床勾配により堤防決壊現象が異なることがわかった。

- 川幅を広くした場合、河道水位は低下しづらくなり、堤防決壊幅や氾濫流量は大きくなる。
- 河床勾配を緩くした場合、決壊幅は拡がりづらい一方で、堤体周辺の河床低下（いわゆる落掘）の規模が大きくなる。



	Case1	Case2	Case3
最終決壊幅	73m	135m	47m
最終決壊幅/河道幅	9.1	4.5	1.6
氾濫流量	58m³/s	178m³/s	78m³/s
河道流量	70m³/s	315m³/s	100m³/s
氾濫流量/河道流量	83%	56%	78%

図 2.9　堤防決壊幅と氾濫流量

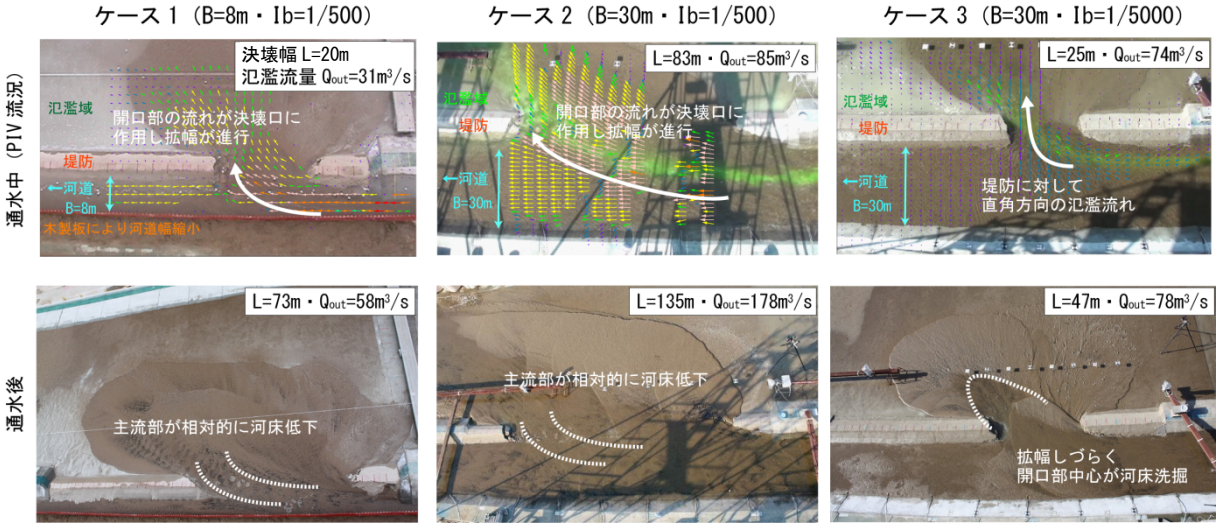
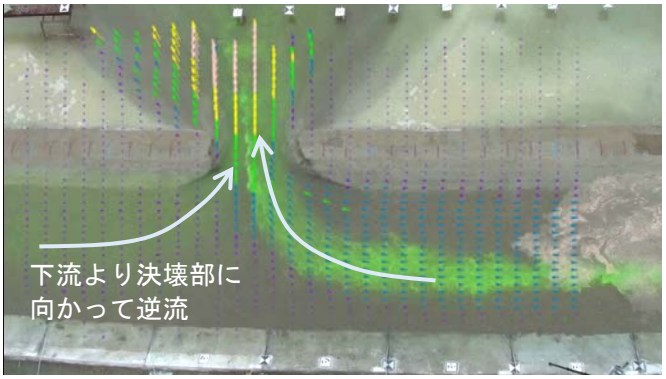


写真 2.8　実験時の流況と通水後の形状

ケース 3 について、堤防決壊初期段階では正面越流に近い形態であったが、堤防拡幅に伴い急激な水位低下が生じた。本川下流区間のような緩勾配河川では氾濫した場合も水位低下はあまり生じないと考えられる。そこで、本川下流区間を想定し、河道形状等はケース 3 と同条件とし、写真 2.9 に示すように河道下流端に給水を行うことで、堤防拡幅が進行しても河道水位が低下しない条件で実験を行った。

写真 2.10 に実験状況を示す。越水初期ではケース 3 と同様の現象であったが、堤防決壊拡幅が始まって以降も河道水位が低下せず、下流より開口部に向かう逆流の流れが生じた。また開口部中央に速い流れ集中し、開口部中央にケース 3 より深い河床洗掘（いわゆる落掘）の発生が確認された。

写真 2.9　下流からの給水状況



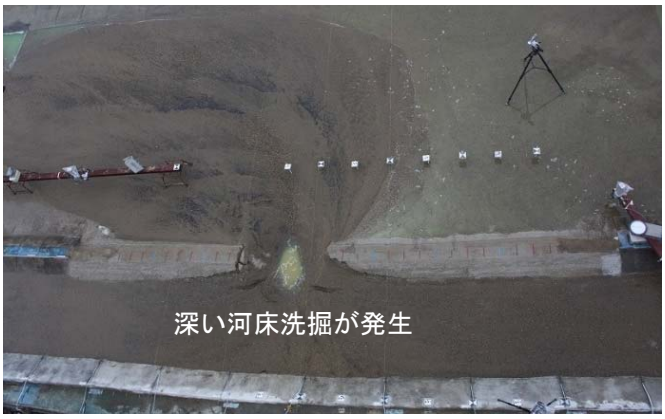


写真 2.10　実験時の流況と通水後の形状

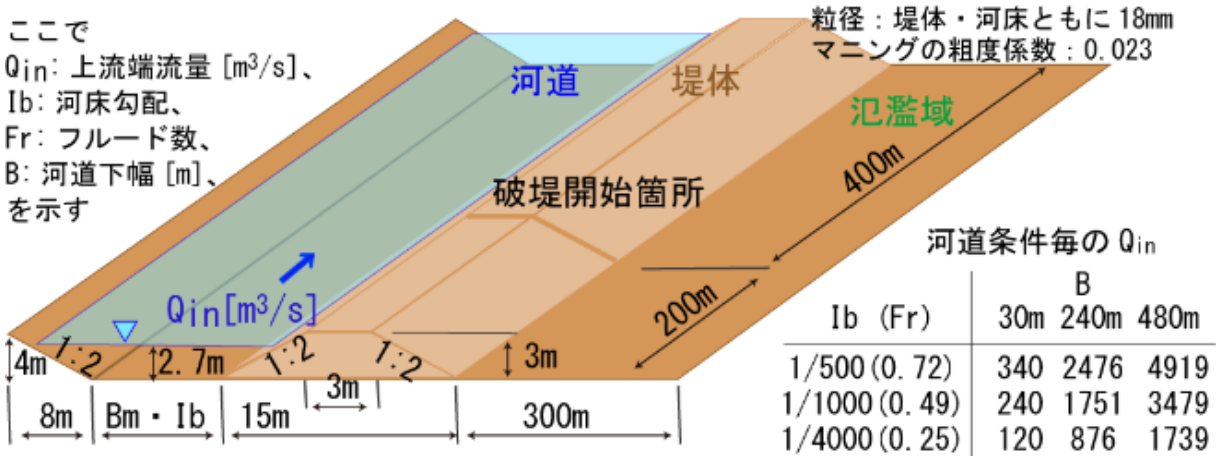
2.3 河道特性に応じた堤防決壊現象の分類

【川幅】
川幅が狭い場合は堤防決壊幅が拡幅しにくいが、川幅が広い場合は堤防決壊幅が拡幅しやすい。
【河床勾配】
河床勾配が急な場合は堤防決壊口の拡幅が下流方向に進行するが、河床勾配が緩い場合は堤防決壊部の河床洗掘が顕著となる。

(1) 計算条件

千代田実験水路および縮尺模型実験で得られた知見の一般化を図ることを目的に、破堤計算ソフト「Nays2D Breach」注) を用いて、河道条件が堤防決壊現象に与える影響を検証した。

検証に用いた河道条件および計算条件は図 2.10 に示すとおりとした。河道特性は河川整備基本方針にある基準・主要地点における川幅と河床勾配（図 2.1 参照）を参考に、これらを包括できるように選定した。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。計算時間については、前節に示す実験結果などからも洪水継続時間に応じて拡幅進行すると考えられるため、ここでは決壊開始から 3 時間として比較を行った。



河道条件毎の Qin

Ib (Fr)	B 30m	240m	480m
1/500 (0.72)	340	2476	4919
1/1000 (0.49)	240	1751	3479
1/4000 (0.25)	120	876	1739

図 2.10　計算水路形状と計算ケース

注）「Nays2D Breach」の堤防決壊過程の再現性については、前述までの実験結果と比較を行い確認している。

(2) 計算結果

計算終了時点の流況と河床形状の結果を図 2.11 に示す。川幅および勾配に応じて堤防決壊現象が異なることから、平常時から管理河川の特性を理解し、堤防が決壊した場合の現象を事前に想定しておくことが重要である。

【川幅】

川幅が狭い場合は決壊部からの氾濫により河道の水位低下が生じやすく、決壊部の拡幅は進行しにくい。

川幅が広い場合は河道の水位低下が生じにくいため決壊部の堤内外の水位差が大きくなり、決壊幅も大きくなる。

【河床勾配】

河床勾配が急な場合は決壊部の流速が大きく、氾濫流況は氾濫域に向かって斜め方向となり、下流への拡幅が卓越する。

河床勾配が緩い場合は堤防に対して直角に氾濫する流況となり、決壊部中央の流速が大きく、決壊部中央付近に深掘が生じる傾向がある。

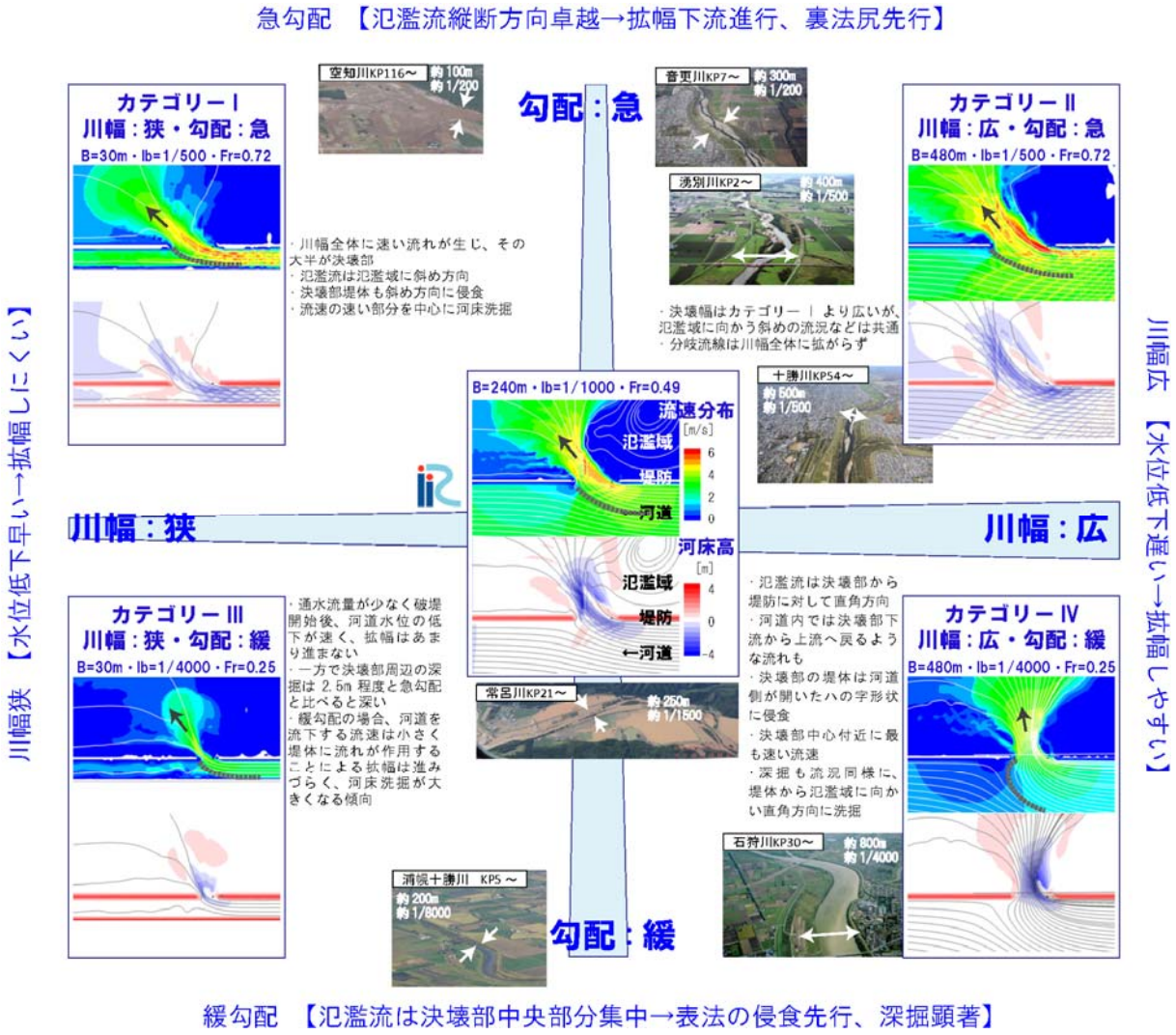


図 2.11　河道特性に応じた堤防決壊現状の分類

3. 堤防決壊メカニズムに応じた災害対応の考え方

河道特性で分類される堤防決壊現象に応じて、効果的な対応方針を示す。

さらに、荒締切の各段階（欠口止め工、漸縮工、せめ工）を想定した実験結果および荒締切の留意点を示す。

3.1 堤防決壊現象の分類に応じた対応方針

【川幅】

川幅が狭い場合は、水位上昇から低下までの時間が短くなることが想定されるため、氾濫被害軽減のためには緊急対策工事に迅速に着手することが重要である。

川幅が広い場合は、決壊拡幅の進行が継続しやすく、氾濫流量も比較的大きくなることから、対策の実施による減災効果が発揮されやすい。

【勾配】

勾配が急な場合は、決壊口の拡幅が下流側に進むので、下流側は欠口止め工で抑制しながら可能であれば漸縮工を行い、上流側は漸縮工を行うと効果的である。

勾配が緩い場合は、上下流側から漸縮工を行うと効果的である。また、決壊部中央付近の河床洗掘が進行していることが想定されるため、注意が必要である。

前章に記載した堤防決壊現象の分類図（図 2.11）を参考に、河道特性に応じた減災方法に関する考え方を図 3.1 に示す。

【川幅】

川幅が狭い場合は短時間のうちに決壊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。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、特に資材運搬なども含めた検討が極めて重要である。

川幅が広い場合は河道水位が低下しづらいことから、決壊拡幅の進行が継続しやすく、氾濫流量も比較的大きくなることから、対策の実施による減災効果が発揮されやすい。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する場合があるので注意が必要である。

【河床勾配】

河床勾配が急な場合は堤防決壊口の拡幅が下流方向に進行するため、堤防決壊口の下流側では拡幅抑制のために欠口止め工や破堤拡幅抑制工を実施すると効果的であり、可能であれば漸縮工まで行うのが良い。一方、堤防決壊口の上流側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。

河床勾配が緩い場合は速い流れが堤体に直接作用しないため、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、決壊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。

【共通事項】

決壊部の流速が高速になる場合は、根固ブロックを使用する際に転動流出しないような工夫（重い資材を使用、資材の連結、補助工法の併用など）が必要である。特に、川幅が広く河道の水位が低下しづらく堤内外の水位差が大きい場合や、河床勾配が急な場合には、決壊口の流速が速くなることに留意すべきである。

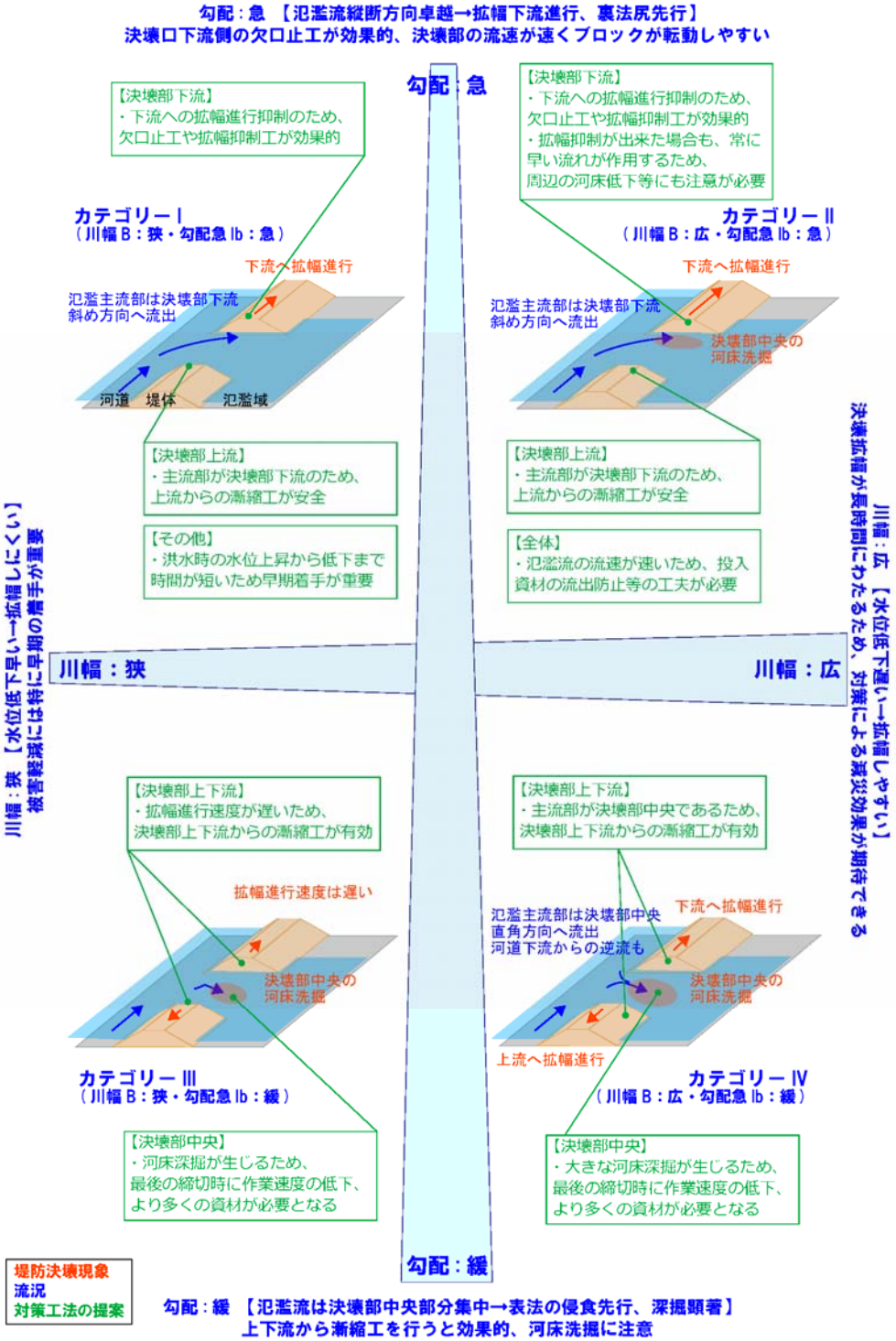


図 3.1　河道特性・堤防決壊現象の分類に応じた被害軽減対策工法

3.2 破堤拡幅抑制工

破堤拡幅抑制工は水防工法を兼ねた欠口止め工であり、堤防決壊口の拡幅の進行が予測される地点の下流側にブロックを設置して決壊口の拡幅を抑制する工法である。

破堤拡幅抑制工の効果を期待できるのは、堤防決壊口が下流側に拡幅進行する勾配が急な河川の場合である。

(1) 破堤拡幅抑制工の概要

破堤拡幅抑制工は、堤防決壊が発生し、決壊口の拡幅が予測された時点で、堤防決壊箇所において、堤防決壊口の拡幅を抑制するためにブロックを設置する工法である。すなわち、堤防決壊の拡幅を防ぐための水防工法を兼ね備えた欠口止め工であり、加えて緊急復旧対策工につながる工法である。

破堤拡幅抑制工は堤防決壊口の拡幅進行をブロックで抑制する工法であるため、効果を期待できるのは、堤防決壊口が下流側に大きく拡幅する勾配が急な河川の場合である。

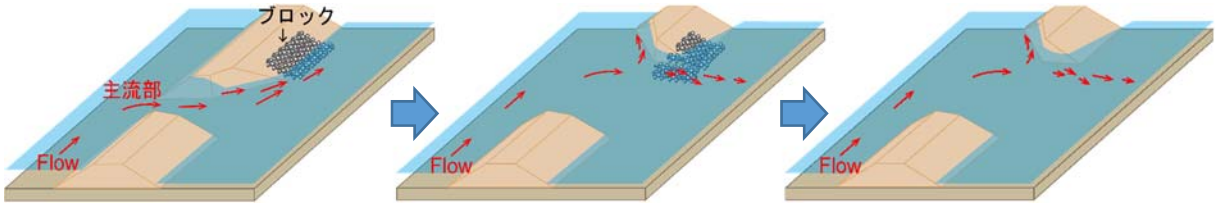
破堤拡幅抑制工は、堤防決壊口の拡幅に応じて施工する必要があり、洪水継続時間、堤防決壊口の拡幅進行速度、ブロック設置に要する時間などを考慮して採用するか判断する。

写真 3.1　破堤拡幅抑制工の設置例

(2) 破堤拡幅抑制工の実験概要

堤防決壊拡幅後の水害被害軽減対策として、堤防決壊拡幅や氾濫流を抑制する工法を開発するため、千代田実験水路で現地実験を行った。

現地実験では、堤防決壊開始箇所の下流側 20m の位置にあらかじめブロックを配置して堤防決壊の拡幅進行を抑制する実験を行った。加えて、ブロックを撤去後再通水し、堤防決壊が再度進行することを確認して抑制工の効果を把握した。



・堤防決壊箇所から下流 20m の法尻にブロックを 3 列設置
・堤防決壊の拡幅を抑制できるか確認

・堤防決壊の拡幅が進行
・堤防の決壊拡幅がブロック位置で停止

・ブロックを撤去して再通水
・ブロック撤去による堤防決壊進行を確認

図 3.2　破堤拡幅抑制工実験の概要

(3) 実験結果

堤防決壊開始箇所から下流 30m 位置で堤防決壊拡幅が停止した。その後、ブロックを撤去した状態で再通水を行い、堤防決壊拡幅が約 50m まで達すると、堤防決壊拡幅の進行が停止した。ブロックがあることで堤防決壊の拡幅進行を抑制できることが確認できた。

また、氾濫流量については、堤防決壊幅 30m に抑制することで約 30%低減した。

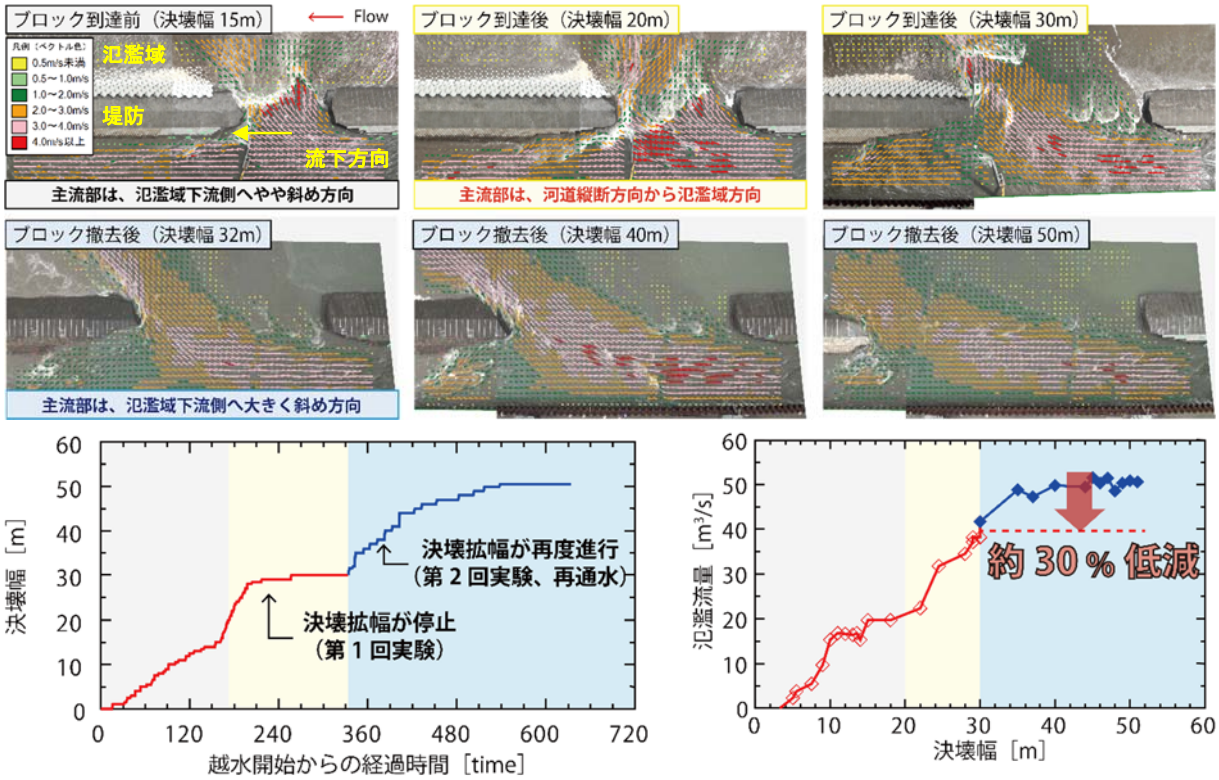


図 3.3　堤防決壊部の流況と堤防決壊の時間変化

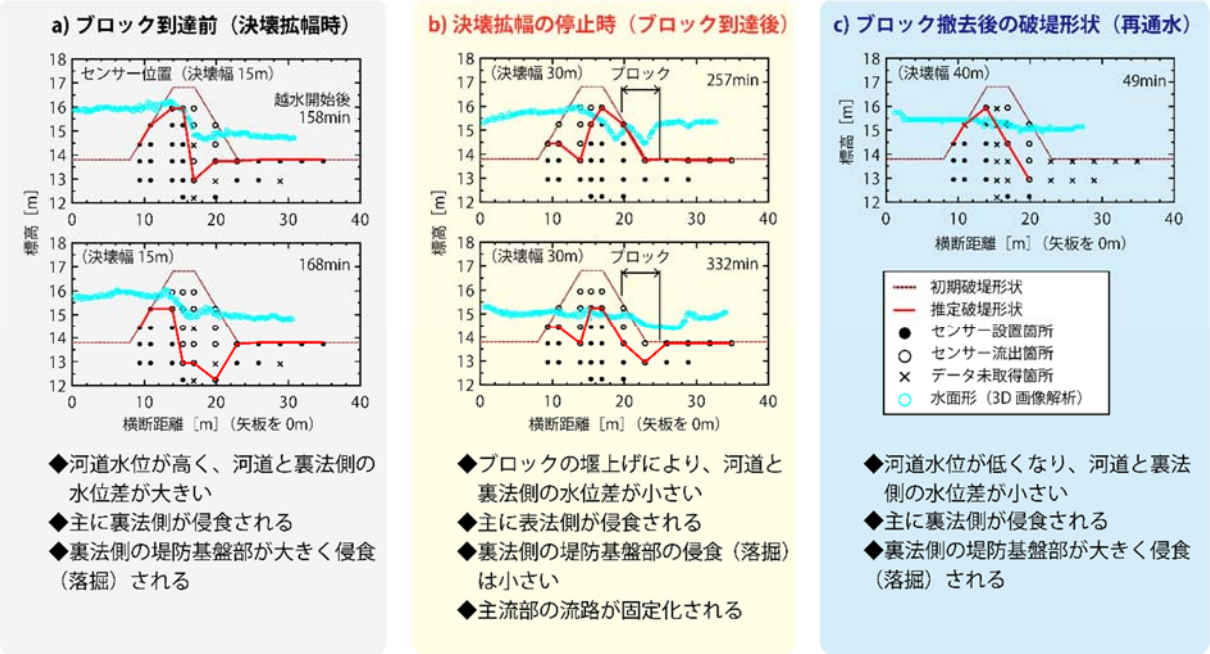


図 3.4　堤防決壊拡幅の抑制過程

裏法尻にブロックを配置することで、堤防崩壊に伴い落下するブロックの移動を防ぎ、全体的な安定性を保つことができるため、群体として流水への抵抗となった。堤防決壊拡幅に効果的なブロック個数は、堤防決壊拡幅の停止状況やブロックの移動状況から、今回の条件では 40 個程度であると考えられる。

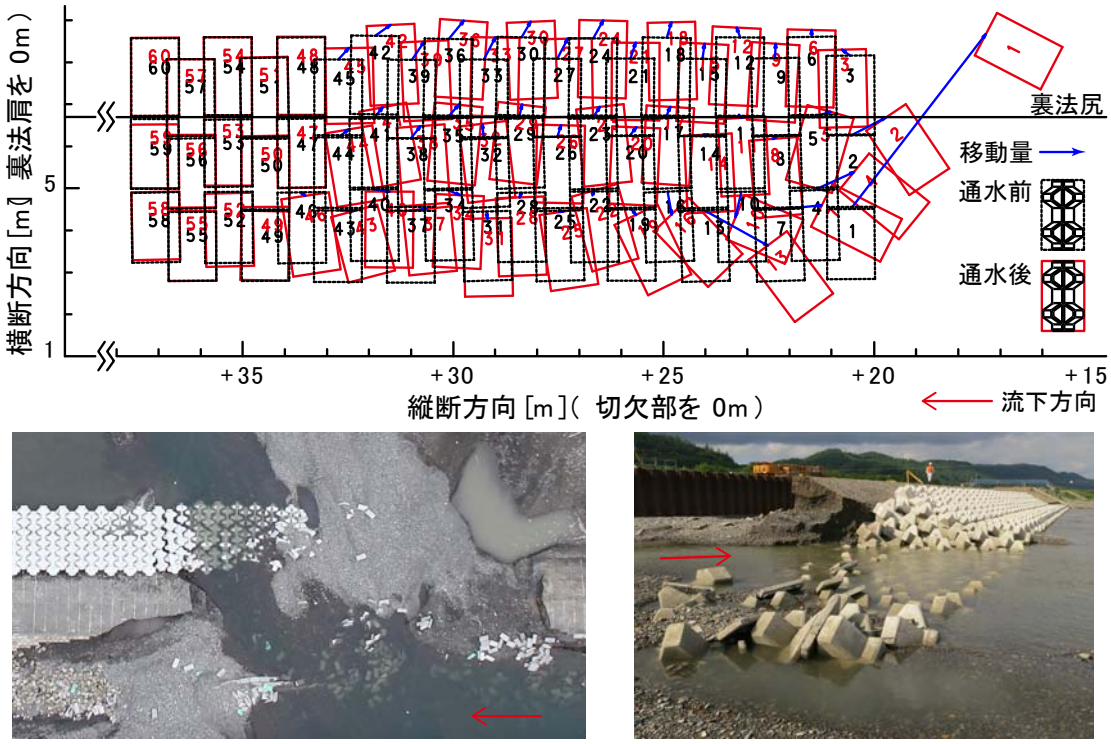


図 3.5　ブロックの移動状況と実験終了後の地形

(4) 破堤拡幅抑制工のメカニズム

① 堤防基盤の侵食

・ ブロックにより裏法側の堤防と堤防基盤部の侵食が防止される。

② 水面勾配・掃流力の緩和

・ ブロックによる水位の堰上げにより河道と氾濫域の水位差が小さくなる。

・ 水面勾配や水深が小さくなり、無次元掃流力が低下する。

③ 流向・流速の緩和

・ ブロックが裏法側の水位を堰上げ、河道から裏法側にかけての水面勾配が小さくなるため、氾濫流の主流部は河道縦断方向から氾濫域の方向となり、流れが遅くなる。

・ 主流部の流路が固定化され、氾濫域方向に氾濫流量を集めるような流れとなる。

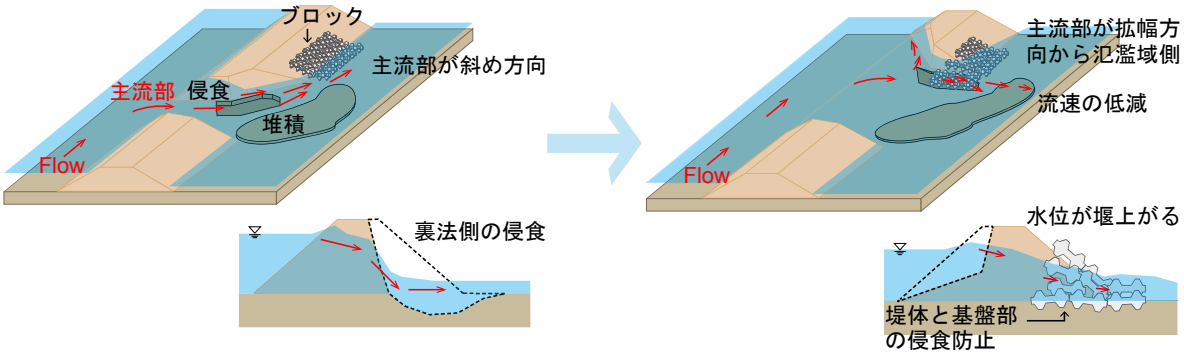
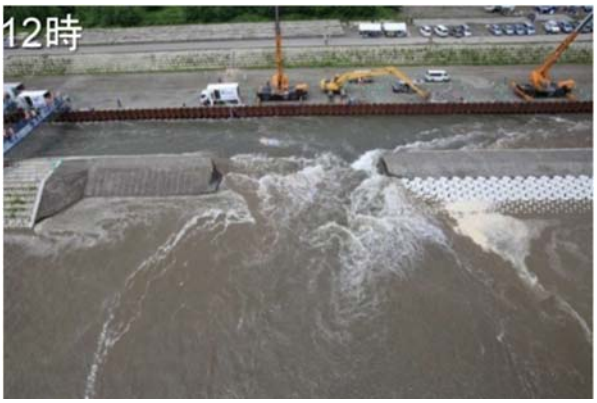


図 3.6　破堤拡幅抑制工のメカニズム

越水開始
ブロックの上流側の切欠き部から越流が始まる

決壊幅約 5m
決壊拡幅が下流側に広がる

決壊幅約 16m
決壊拡幅がさらに広がりブロック上流端付近まで到達

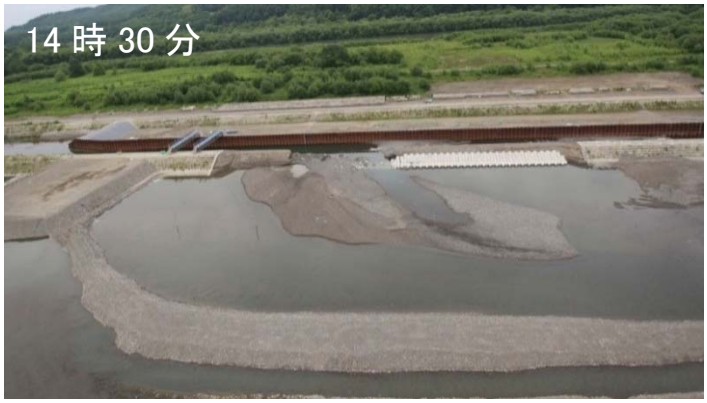


決壊幅約 20m

決壊がブロック先端に到達

ブロックの上流部が一部流出

写真 3.2　破堤拡幅抑制工実験状況(1)



決壊拡幅の進行が停止したため通水終了

ブロックを撤去し通水開始

再度破堤が進行

決壊幅が 50m に達した時点で拡幅が停止

通水終了

写真 3.3　破堤拡幅抑制工実験状況(2)

3.3 荒締切工

堤防決壊部にブロックを投入し荒締切を行うことで氾濫流量を低減することができ、氾濫流量の低減率はブロック投入数に応じている。 荒締切を行い決壊幅が狭まるにつれて、流速の上昇および河床低下が生じる。

3.3.1 模型実験による荒締切の効果

(1) 模型実験の概要

荒締切による氾濫流量の低減効果を把握することと、荒締切方法の違いによる現象の相違を確認することを目的に、模型実験を実施した。模型実験は千代田実験水路の縮尺 1/20 模型を用いて行った。なお、水路諸元や水理量、時間などはフルード相似とし、現地規模に換算した値を記載する。

模型の河道幅 30m、河床勾配 1/500 とし、模型の堤防は高さ 3m、天端幅 3m、法勾配 2 割とした。堤防には越水させるための切欠きを設け、切欠きから下流側 20m～100m 区間に破堤拡幅抑制工のためのコンクリートブロックを設置した。

模型実験では定常流量 315m^3/s を通水し、越水により堤防を決壊させ、堤防決壊の拡幅が停止した後に荒締切を実施した。

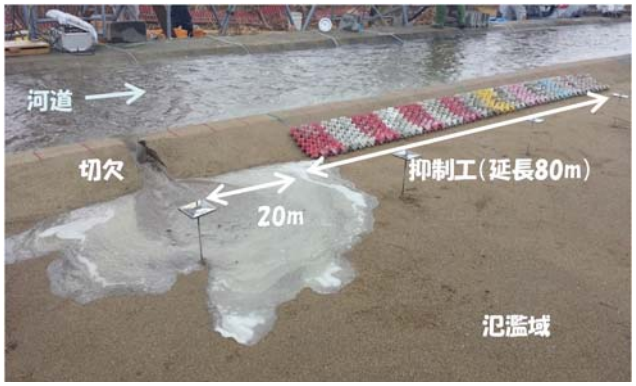


写真 3.4　堤防からの越水状況

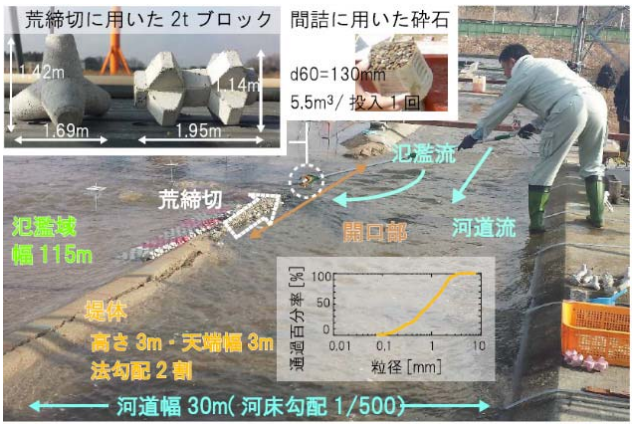


写真 3.5　荒締切実験の状況

荒締切工法は図 3.7 に示す 3 ケースで行った。ケース 1 は決壊部下流から、ケース 2 は決壊部上下流からブロックを投入した。ケース 3 は早期に重機が近づけない場合の想定や河床洗掘の防止による氾濫流量の低減効果の確認を目的に、空中からヘリなどにより決壊部河床全面にブロック 200 個を先行投入し、その後ケース 2 同様の手順で荒締切を行うものとした。荒締切はコンクリートブロックと砕石を投入することで行い、ブロックは 3 分に 1 回投入、砕石は 2 分に 1 回投入した。

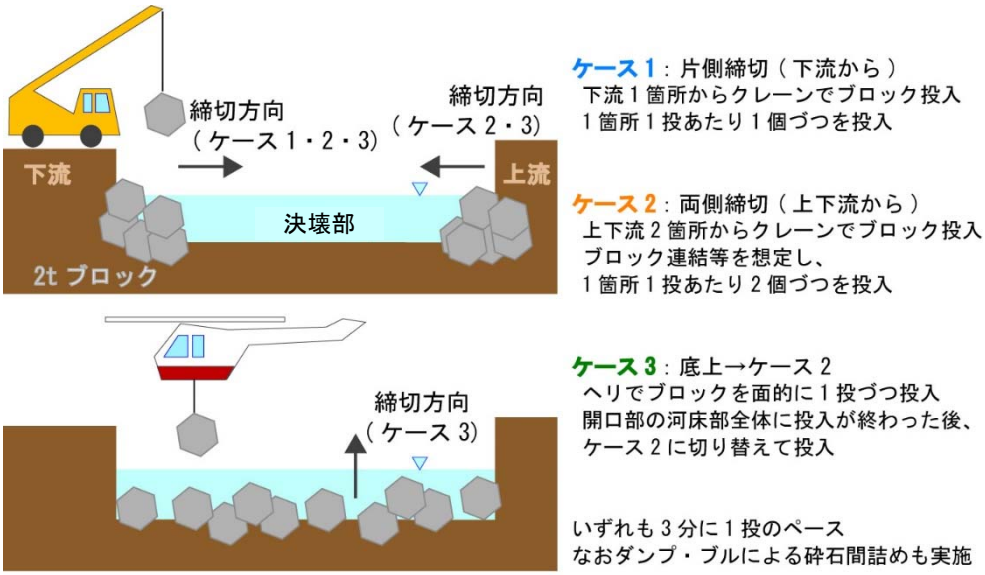


図 3.7　荒締切工法のイメージ

(2) 実験結果

1) 荒締切の進行状況

各観測結果を図 3.8 に示す。

ケース 1 は最もブロック投入ペースが遅く、累積氾濫流量は荒締切を行わなかった場合に比べると 3 割程度の低減効果はあったが、80m の堤防決壊部を締め切るまでに投入したブロックは 1000 個程度、所要時間は 60 時間程度を要した。なお、決壊幅 20m 程度になった時点で主流部が決壊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もブロックを投入した。

ケース 2 はケース 1 の 4 倍のペースでブロックを投入しており、締切に要した時間はケース 1 の 1/4 程度である。累積氾濫流量は締切終了時の締切未実施時刻と比べると 3 割程度の低減効果であり、またケース 1 の締切終了時の累積氾濫流量と比べると 8 割程度を低減する効果があった。

ケース 3 はブロック投入の最初の 200 個は決壊部河床全体に面的投入したためブロックは水面下にあり、見た目の決壊幅は変わっていないが、最終的な累積氾濫流量の低減効果などはケース 2 と概ね同程度であった。

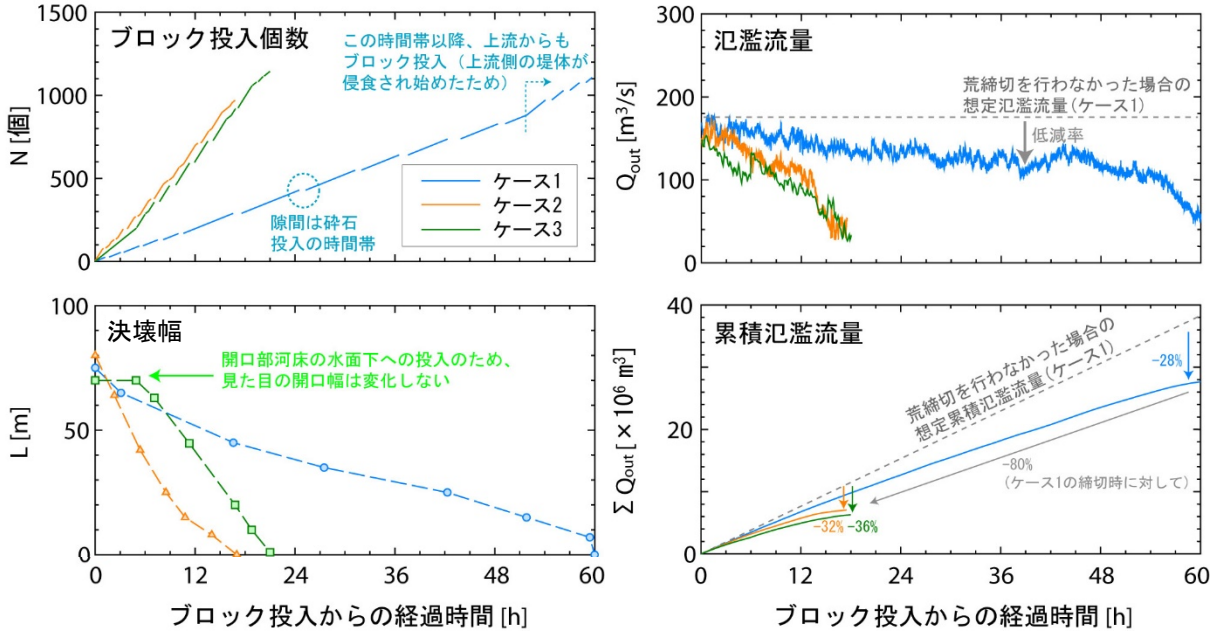


図 3.8　各種観測結果

2）氾濫流量低減率

ブロック投入個数と氾濫流量低減率の関係を図 3.9 に示す。これよりブロックの投入位置によらず投入個数に応じて氾濫流量が低減していることがわかる。決壊拡幅が進行した後では締切手順の違いによらず、迅速なブロックの投入が被害軽減に直結することを示していると考えられる。

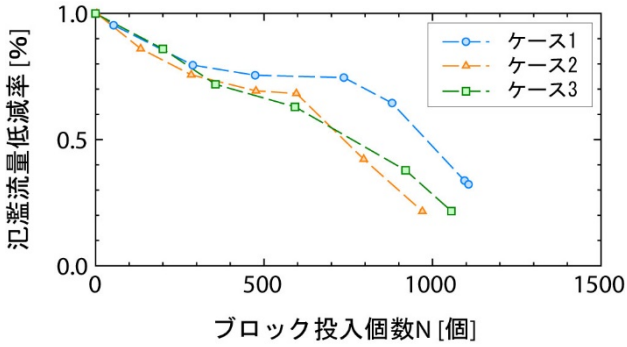


図 3.9　ブロック投入個数と氾濫流量低減率

3.3.2 実物大のせめ工実験

(1) 実験概要

1) 荒締切実験の概要

前述の模型実験では、堤防決壊から荒締切までの一連の実験を行い、資材の投入に応じて氾濫流量が低減することなどが明らかとなった。一方で、実際の重機を用いて多くのブロックを投入できるかなど、検証すべき点が多い。そこで、十勝川千代田実験水路において、荒締切の最終段階のせめ工を想定し、実際の重機とブロックを用いた実験を行った。鋼矢板を用いて実験水路幅を 8m と狭くした状態で、この河道部分を堤防決壊部と見立ててブロックを投入した。

実験中の通水流量は概ね 20m^3/s を一定流量とした。

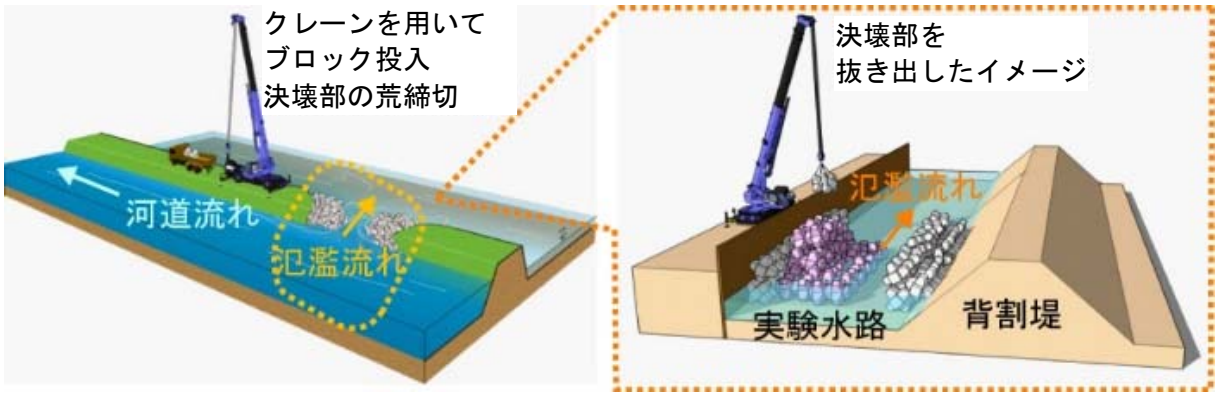


図 3.10　実験イメージ

2) ブロック投入方法の概要

ブロック投入は 65t ラフタークレーンを用いてオートフックを使用するほか、空中で切離投入が可能な異形ブロック投入安全装置を使用して行い、決壊部中央を最後に締切るように河道両側から投入を行った（写真 3.6）。

オートフックによる投入では、ブロック重量のうちクレーンにかかる荷重が 500kg 以下になるとワイヤーが外れる仕組みになっているため、吊り上げたブロックを投入済のブロック上に着底させて荷重を下げる動作を行う必要がある。そのため、水面より上にブロックが出ている場所にしか投入はできず、また着底時にはブロックが流されないように注意する必要がある。

空中切り離しによる投入は、空中でブロックを切り離す際の反動によりクレーンが横転する懸念があるため、実験では国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所が開発した異形ブロック投入安全装置の貸与を受けて実験を行った。

オートフックによるブロック投入状況　　異形ブロック投入安全装置によるブロック投入状況

写真 3.6　ブロック投入方法

(2) 実験結果

1) 実験概況

図 3.11(上段)に時系列の水位変化とブロック投入状況を、図 3.12(左)に上空から撮影した実験状況を示す（図 3.11(ア)～(オ)の水位と図 3.12(a)～(h)の実験状況を参照）。

(a)～(b)のうち(ア)では水面より上にブロックが出ておらず、オートフックでの投入が困難なため、異形ブロック投入安全装置を用いて投入を行った時間帯である。(イ)に示すように投入に伴い上流の水位が徐々に上昇していることがわかる。

(ウ)に示すように投入間隔が空き水位上昇が止まっているが、これは(b)～(c)の間で水面より上にブロックが出てきたためオートフックでの投入が可能と判断し、投入を中断し異形ブロック投入安全装置から切り替えを行ったためである。装置の切り替えに要した時間は 15 分程度であった。

(d)～(f)のうち(エ)はオートフックによる投入である。(オ)では投入を中断しているが、これは着底させたブロックが水中に転がり落ちた際、投入済のブロックとの間にワイヤーが挟まり、その対応に要した時間である。オートフックは投入済みのブロックに着底させる必要があることからも、実災害時の流れがある中での投入には細心の注意が必要である。

(f)～(h)のうち(カ)では着底させようとするブロックの周辺の水位・流速上昇などにより、オートフックを用いた投入がこれ以上は危険と判断をしたため、異形ブロック投入安全装置に切り替えて、(キ)のように最後まで実験を行った。

なお、ブロック投入に要するサイクルタイムは「4.1.1 ブロック投入実験」に記載する。

2) 締切に伴う流況変化

図 3.12(左)に荒締切に伴う決壊幅、図 3.12 (中央)にPIV観測による平面流況を示す。決壊部中央付近の流速は締め切りに伴い流速が上昇している。図 3.11(下段)にこれらの時系列を示すが、最も決壊部が狭くなった(g)では最大3m/sまで流速が上昇していたことがわかる。これは、実際の締切作業においても決壊部を狭くするに従い流速の上昇が想定され、流況に応じたブロック投入位置の選定やブロックの転動などに留意する必要があることを示している。

3) 締切に伴う河床変化

ブロック投入箇所の河床に加速度センサーを埋設し、河床洗掘状況の観測を行った。図 3.12(右)は加速度センサーの記録より判読したセンサー流出のタイミングであり、各時刻におけるセンサー流出は、その時刻に少なくともセンサー流出深まで河床洗掘が生じていたことを意味する。ブロック投入開始直後から河床洗掘が生じており、投入数に応じて徐々に洗掘が進んでいる。(c)～(f)の間ではセンサーの流出は確認できないが、図 3.11(下段)に示すように決壊部の最大流速は2.7m/s程度の一定で推移していた時間帯であり、最大流速が再上昇した(g)で再びセンサー流出が確認できることからも、締切の進捗に伴う流速の上昇に伴い河床洗掘が進行した可能性があると考えられる。

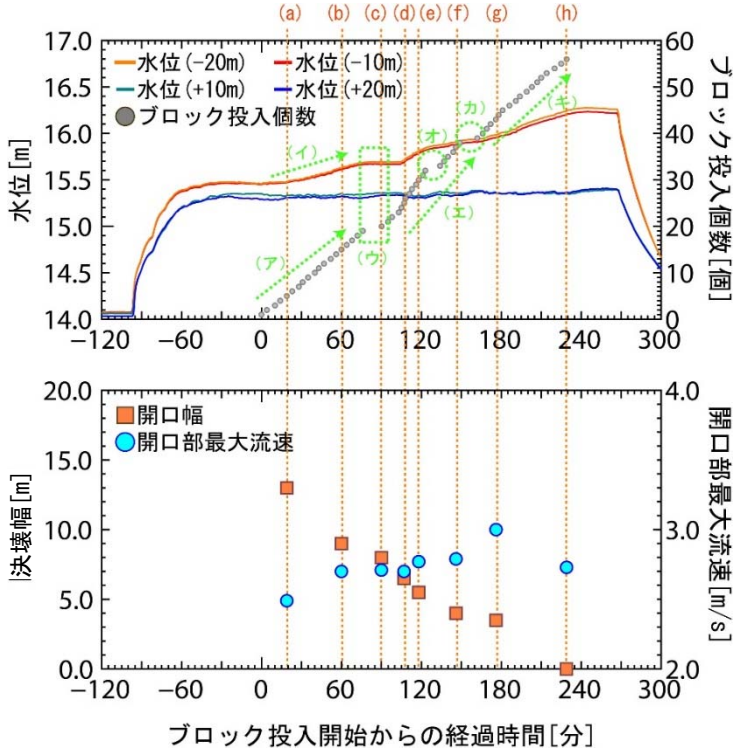


図 3.11 (上段)水位変化とブロック投入個数
(下段)決壊幅と決壊部の最大流速

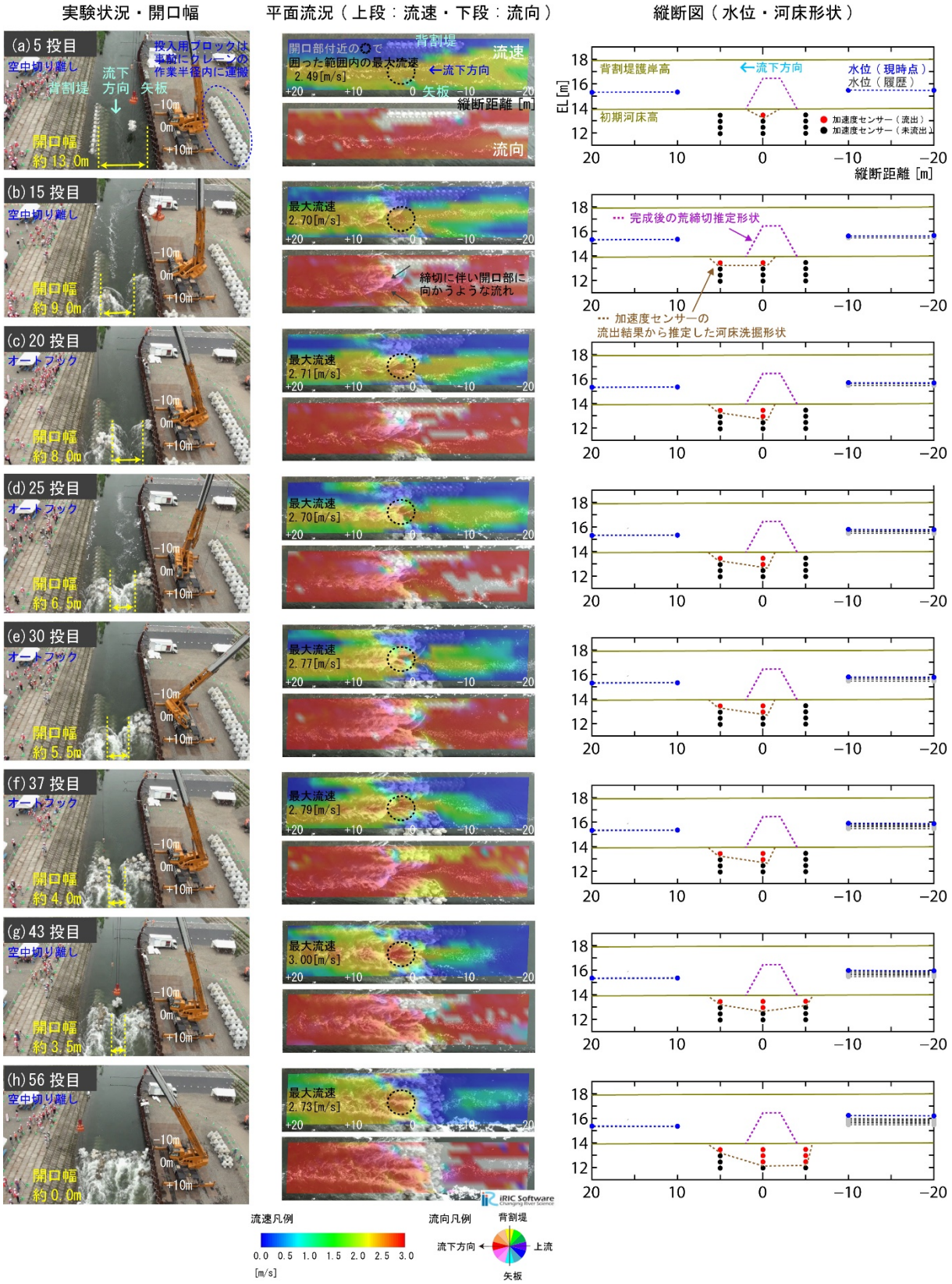


図 3.12 （左）実験状況・締切決壊幅 （中央）流況
（右）河道中央の水位・河床変化縦断図

4）締切完成形状

写真 3.7 に締切完成後の形状を示す。完成した締切高は 2.5m 程度であったが、河床には同程度の最大洗掘深（図 3.12(右)56 投目参照）が発生した。また、投入したブロック 56 個に対して初期河床より上に存在したブロックは 30 個程度、初期河床以下は 26 個程度であった。今回の実験では投入した個数の半分程度は締切高に寄与せず埋没していたと考えられ、荒締切実施に必要なブロック数量を備蓄するにあたっては、このような洗掘によるロスも見込んだ計画準備を立てる重要性を示唆するものである。また、投入地点の河床低下を抑制しつつ荒締切を進めることが出来れば、効率的な荒締切につながる可能性があることを示すものでもある。

今回の実験では砕石などによる間詰めを行っていないが、ブロック同士がかみ合うことで高さの確保が出来ており、荒締切の空体積 100m³ 程度に対して河床上にあるブロックは 30 個程度と、空隙が目立っている(空隙率 70%程度)。

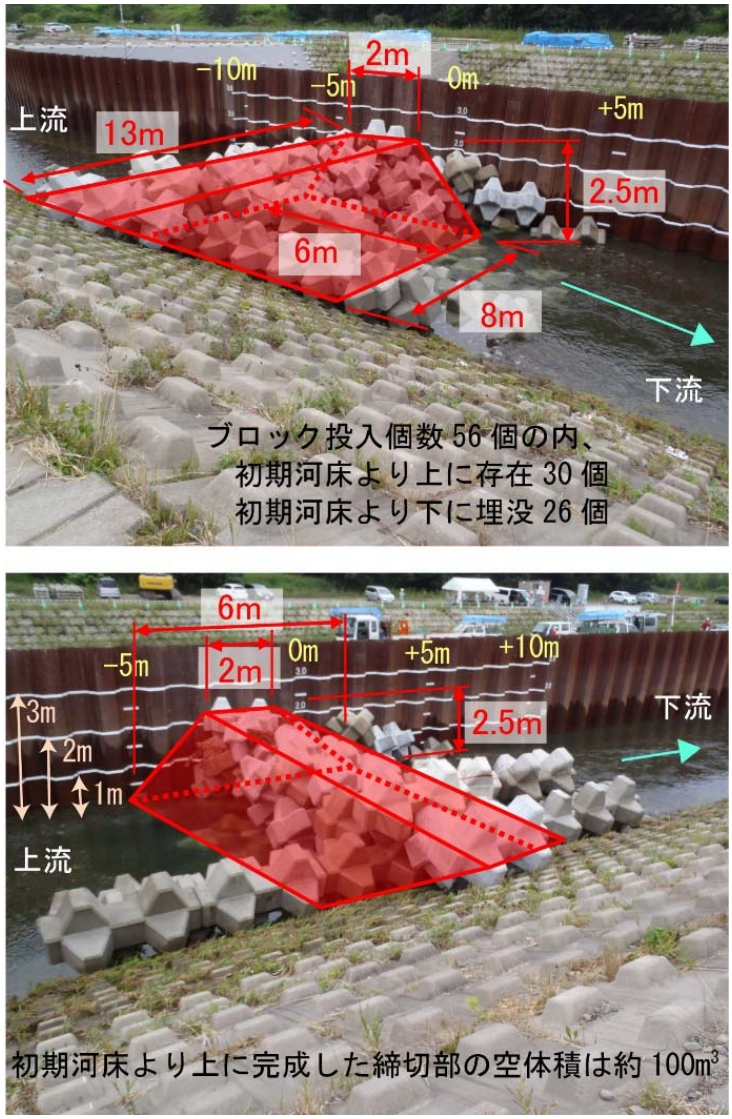


写真 3.7　荒締切の完成形状

3.3.3 模型実験によるせめ工実験

(1) 実験概要

「3.3.2 実物大のせめ工実験」では、実験水路内に投入したブロックの半分程度が沈下し、結果として荒締切に必要となるブロック数が増加した。そこで、投入した資材が沈下せずに積み上げられる荒締切手順を検証するため、模型実験を行った。

模型実験では、通水中の二次元水路を堤防決壊部と見立て、資材の投入順序を変更して荒締切の効果を検証した。縮尺 1/20 とし、資材を 3 分間隔（現地換算）で投入した。

表 3.1　締切実験ケース

	資材の積み方
ケース 1	1 層目　　：立体型ブロック 2 層目以降：立体型ブロック
ケース 2	1 層目　　：平型ブロック 2 層目以降：立体型ブロック
ケース 3	1 層目　　：袋詰め根固め 2 層目以降：立体型ブロック

立体型ブロック

平型ブロック

袋詰め根型め

写真 3.8　締切資材

(2) 実験結果

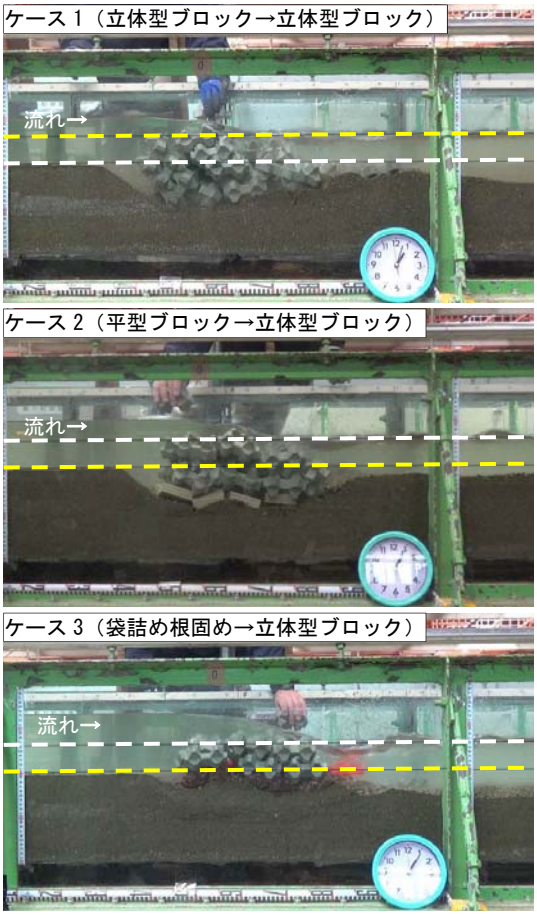
実験結果を写真 3.9 と図 3.13 に示す。

ケース 1 の荒締切の初期段階は、立体型ブロックの脚の間に生じる局所流で土砂が動き、沈下しやすい。荒締切が進むと上流側の水位が上昇することでブロック域に急な水面勾配がつき、ブロックの下から土砂が抜け出しやすくなる。

ケース 2 の荒締切の初期段階も沈下するが、沈下量としては小さい。荒締切が進むと、ケース 1 と同様にブロックの下から土砂が抜け出しやすくなる。最終的な洗掘深さはケース 1 と同程度となった。

ケース 3 の荒締切の初期段階も沈下するが、沈下量としては小さい。荒締切が進むと、河床の洗掘とともに袋詰め根固めも変形するために土砂の抜け出しを防ぎ、最終的な洗掘深は 3 ケースの中で最も小さく、上流側の水位も最も高くなった。

このことから、袋詰め根固めは河床洗掘を抑制する効果を有しているものと考えられ、荒締切作業では袋詰め根固めを先行して投入することで決壊部の河床低下を抑制できる可能性がある。



白破線：初期河床
黄破線：初期水位

写真 3.9　最終的な荒締切形状

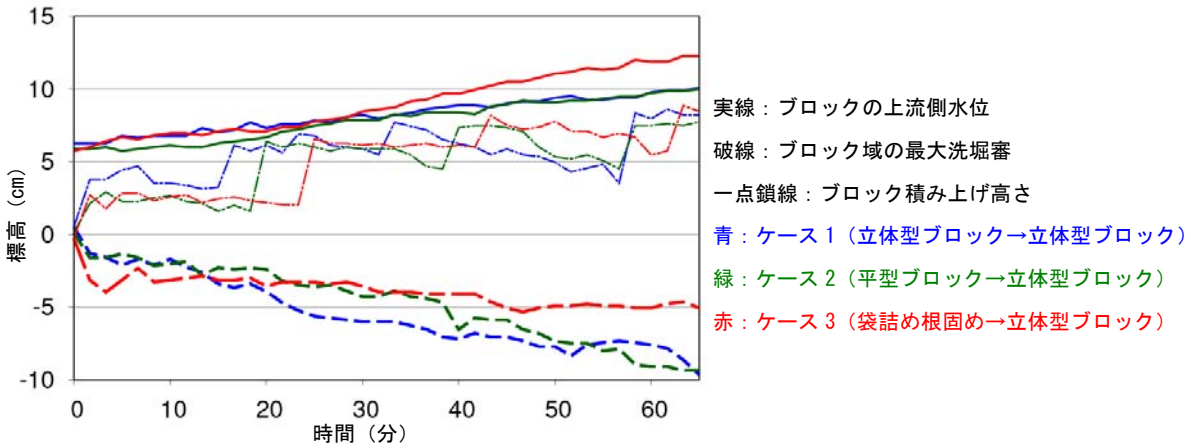


図 3.13　荒締切に伴う水位上昇と洗掘深

4. 資機材の検討

緊急対策工事の参考になるように、重機によるコンクリートブロック投入時間を計測した結果を示し、緊急対策工事で使用する重機の特徴を整理する。

また、コンクリートブロックの特徴と流水中へ投入したブロックの挙動特性を整理し、ブロックの転動流出を防止する補助工法を紹介する。

4.1 重機

堤防決壊部を想定した水中へのブロック投入速度は概ね以下の通りである。

- クレーン：約 3 分/個
- バックホウ：約 2 分/個
- 不整地運搬車：約 0.5 分/個

バックホウは比較的容易に調達可能であり迅速な着工が可能であることに加え、資材投入速度も速いため、最大限活用することで緊急対策工事の効率化が期待できる。

4.1.1 ブロック投入実験

(1) ブロック投入実験の概要

堤防決壊時の災害対応事例（「1. 災害事例から得られた知見と課題」参照）より、緊急対策工事の早期着手にはバックホウが有効であることが明らかとなったが、作業計画を立てる際には資材投入に要する時間の把握が重要である。河川護岸工事などにおける根固め資材設置の日当たり施工量は、土木工事標準積算基準書などで整理されているものの、災害時を想定していない。そこで、千代田実験水路において、堤防決壊時の荒締切作業を念頭に、決壊口を想定した箇所に複数の工法で根固めブロックを投入し、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。

(2) 実験ケース

投入方法は機材の調達の可能性などを考慮して写真 4.1 に示す 6 ケースとした。

ケース 1 およびケース 2 はせめ工実験（「3.3.2 実物大のせめ工実験」参照）で実施したものであり、ケース 1 はクレーンに異形ブロック投入安全装置を取り付けた場合、ケース 2 はクレーンにオートフックを取付けた場合である。

ケース 3 からケース 5 はバックホウを用いてブロックを投入した場合である。ケース 3 は堤防天端上で作業員による玉掛け・玉外し作業を行い、バックホウのバケットでブロックを決壊口に押し出した。ケース 4 はバックホウにオートフックを取付け、作業員による玉外し作業を省略して堤防天端上にブロックを降ろし、バケットでブロックを決壊口に押し出した。ケース 5 は堤防決壊部の斜面にブロックを着底させて、決壊口に直接投入した。

ケース 6 は不整地運搬車を使用する場合であり、不整地運搬車が堤防決壊口に接近し、ダンプアップによりブロックを直接投入した。

ケース１　クレーン＋ブロック投入装置

　クレーンに異形ブロック投入安全装置を取り付け、水路内にブロック投入
（ブロック 37 個の投入時間を計測）

ケース２　クレーン＋オートフック

　クレーンにオートフックを取り付け、水路内にブロック投入
（ブロック 19 個の投入時間を計測）

ケース３　バックホウ玉外し+押出

　バックホウの玉外しで法先にブロックを降ろし、バケットで水路内に押し落とす
（ブロック 12 個の投入時間を計測）

ケース４　バックホウ＋オートフック＋押出

　バックホウにオートフックを取り付け、法先にブロックを降ろし、バケットで水路内に押し落とす
（ブロック 6 個の投入時間を計測）

ケース５　バックホウ＋オートフック直接

　バックホウにオートフックを取り付け、水路内にブロックを直接投入
（ブロック 5 個の投入時間を計測）

ケース６　不整地運搬車ダンプアップ

　不整地運搬車がダンプタップを行い、ブロックを水路内に直接放出
（ブロック 2 個の投入時間を計測）

写真 4.1　ブロック投入ケース

(3) 実験結果

ブロック投入に要した時間を平均し、ブロック 1 個当たりに換算した結果を図 4.1 に示す。

クレーンを用いてブロック投入した場合は 3 分/個程度、バックホウを用いてブロック投入する場合は 2 分/個程度であり、バックホウを用いるほうがブロックを速く投入することができた。今回の実験では重機の準備時間を考慮していないが、災害事例を見ても、クレーンは着工するまでに時間を要する一方、バックホウは比較的容易に調達可能であり迅速な着工が可能である。さらに不整地でも比較的容易に進入可能であり、資材を速く投入することができる。このため、バックホウを最大限活用することで緊急対策工事の効率化が期待できる。なお、ケース 2 およびケース 5 のオートフックによる直接投入では、投入済みのブロックと投入したブロックの間にワイヤーが絡まるケースが発生した。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も、オートフックによる直接投入を行う際は、ブロックの着底位置の選定に関する留意点など、より慎重な作業が必要である。

不整地運搬車のブロック投入時間は 0.5 分/個程度だが、堤防決壊部まで近接する必要があり、ブロックが決壊口に落ちずに止まった場合は作業を中止してブロックの押し出しが可能なバックホウなどの重機との入れ替え作業を行う必要がある。

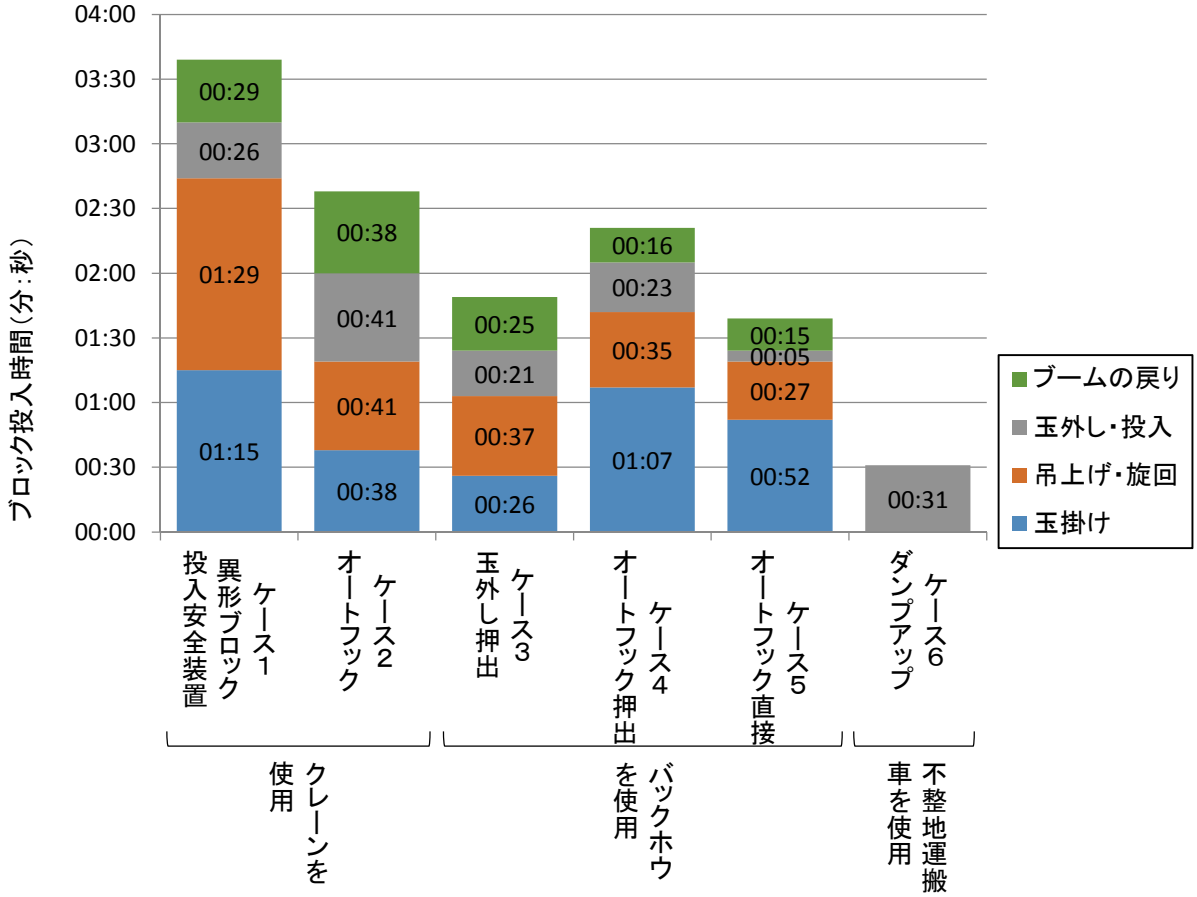


図 4.1　ブロック投入平均時間（1 個当たり）

【コラム】グラップルを装着したバックホウによる大型土のう投入速度

平成 27 年 10 月のサラカオーマキキン川の堤防決壊現場では、バックホウのアタッチメントにグラップルを装着し、大型土のうを投入することで緊急締切工事を実施した。緊急締切工事の状況を撮影したビデオを基に、グラップルによる大型土のうの投入速度を計測し整理した。

ビデオを基に投入速度を計測できた大型土のうの数は 71 袋であり、投入速度は平均で 0.4 分/個程度であった。

なお、グラップルには木材用とコンクリートブロック用があり、サラカオーマキキン川の緊急締切工事で使用されたグラップルは木材用である。コンクリート用のグラップルは木材用に比べて調達が困難なことが多く堤防決壊時の緊急対策工事で用意することは難しいかもしれないが、使用することができればブロック投入効率の向上が期待できる。

写真 4.2　サラカオーマキキン川における大型土のう投入状況

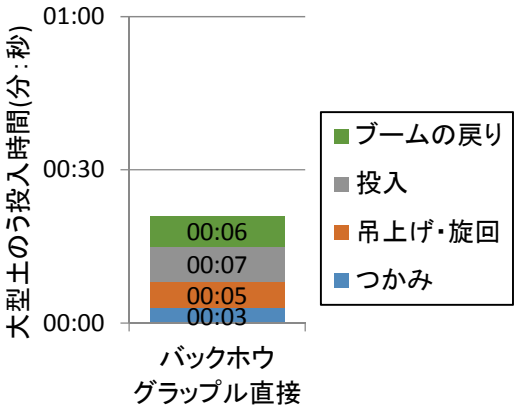
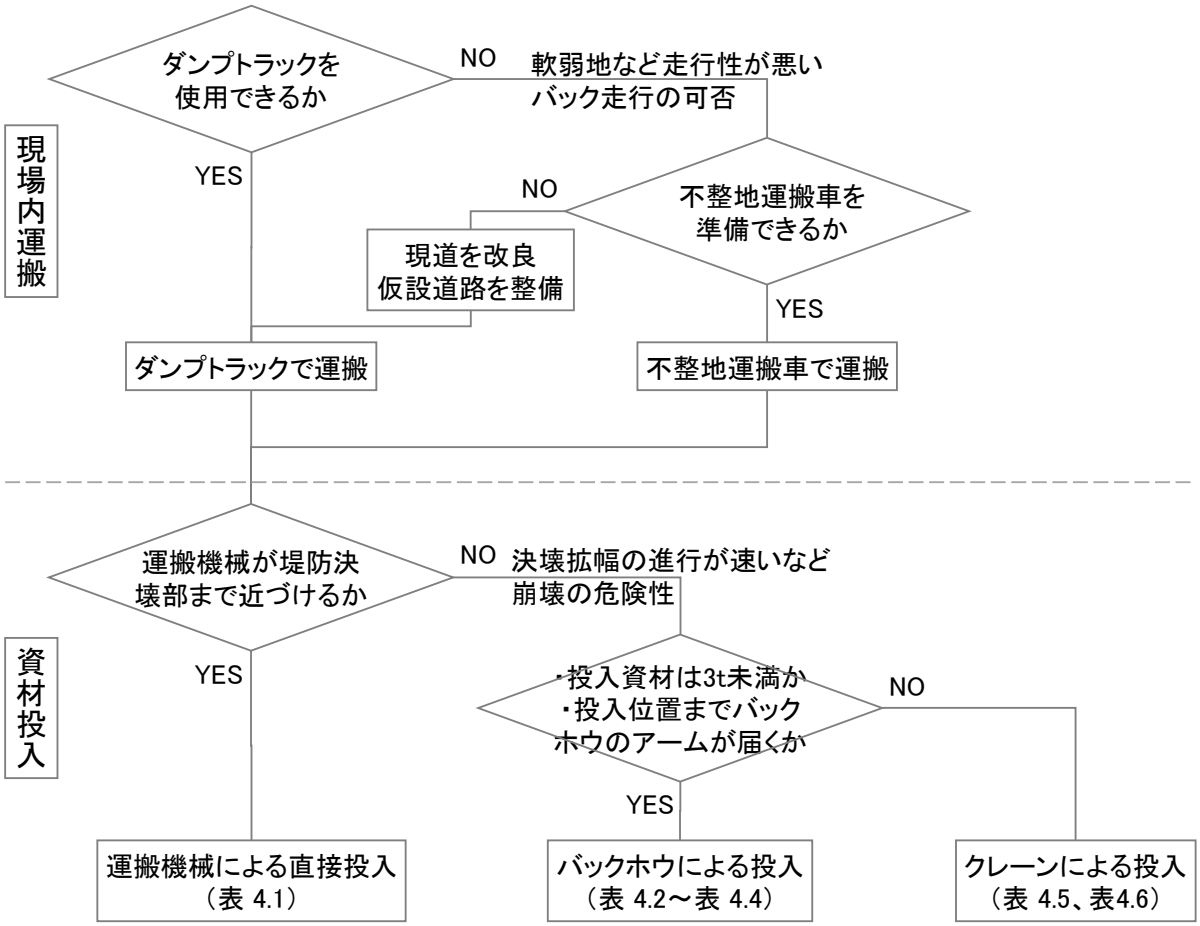


図 4.2　大型土のう投入平均時間（1 個当たり）

4.1.2 効率的な重機の選定

堤防決壊による被害を軽減するためには、現場ですぐに用意できる重機を用いて速やかに緊急対策工事に着手するべきであるが、使用する重機を選択できる場合には、緊急対策工事を効率的に行うことができる重機および施工方法を選定する。参考として、使用重機の選定フローを図 4.3 に示す。同フローは、施工効率が高いと考えられる重機から選定できるものとしてある。また、それぞれの工法について表 4.1～表 4.5 にまとめた。



注 1 バックホウによる投入では、ブロックを把持できるグラップルがあれば、作業効率および安全性が向上する（表 4.4）。

注 2 バックホウまたはクレーンによる投入では、ブロックの玉外し作業を省略できるオートフックがあれば、安全性が向上する（表 4.3、表 4.6）。

図 4.3　緊急対策工事で使用する重機の選定フロー

表 4.1　運搬機械（不整地運搬車、ダンプトラック）によるブロックの直接投入

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td>ダンプアップによる投入</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の説明</td><td>
ブロックを積載した不整地運搬車が堤防決壊口に接近し、ブロックをダンプアップして堤防決壊口に直接投入する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">利点</td><td>ブロック運搬とブロック投入を同一機械で行うことができるので、作業効率が良い。
不整地運搬車は軟弱地など走行性の良くないところでも資材運搬することができる。さらに、車体上部が回転する不整地運搬車は、堤防決壊箇所まで前進しその場で旋回できるので、安全性が高い。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">施工条件</td><td>気象</td><td>気象の影響を受けにくい。</td></tr>
<tr><td>地耐力</td><td>地耐力が比較的悪い条件でも作業が可能である。</td></tr>
<tr><td>支障物</td><td>ダンプアップを行える空間があれば作業できる。</td></tr>
<tr><td>作業幅</td><td>不整地運搬車の走行に必要な幅員を確保する必要がある。</td></tr>
<tr><td colspan="2">注意点</td><td>不整地運搬車がダンプアップでブロックを放出すると荷台を損傷する可能性があり、注意が必要である。
不整地運搬車が堤防決壊口に近接する必要があり、堤防決壊口の拡幅が進行している場合や堤防決壊口が崩壊する恐れのある場合には採用できない。
ブロックが決壊口に落ちずに止まった場合は、ブロックの押し出しが可能なバックホウなどの重機との入れ替えが必要となる。
ダンプトラックを使用してブロックを直接投入する場合は、十分な地耐力が必要であることに加え、ブロック投入箇所までバックで走行しなければならず安全管理に注意が必要である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">【参考】
ブロック投入速度</td><td>0.5 分/個程度</td></tr>
</table>

表 4.2　バックホウによるブロックの投入(1)

		玉外し・押出
工法の説明		 クレーン機能付バックホウで堤防決壊口にブロックを投入する。ブロックは作業員による玉掛け作業で吊上げ、玉外し作業で堤防決壊口の法肩部に降ろす。その後、ブロックをバケットで押し堤防決壊口に転がし落とす。
利点		比較的容易に調達可能であり機動性に優れているバックホウを使用してブロックを投入できるため、迅速な対応が可能となる。 玉掛け・玉外しは一般的な吊荷作業で行われる方法であり、どこの現場でも可能と考えられる。 砕石によるブロックの間詰めを行う場合も同一のバックホウを使用することが可能であり、機械の入替えを省略することができる。
施工条件	気象	気象の影響を受けにくい。
	地耐力	地耐力が比較的悪い条件でも作業が可能である。
	支障物	バックホウのアームの可動空間があれば作業できる。
	作業幅	バックホウが作業できる幅があれば良い。
注意点		作業員が堤防決壊部で玉外し作業をする必要があるが、堤防決壊部は脆く崩落することもあり得るため、堤防の先端部から少し離れたところにブロックを降ろすと良い。 標準的なバックホウの吊能力は 2.9t であるため、それ以上に重量があるブロックを扱うことはできない。 ブロックを遠くに投入することはできない。
【参考】 ブロック投入速度		1.8 分/個程度

表 4.3　バックホウによるブロックの投入(2)

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>オートフック</th></tr>
<tr><td colspan="2">工法の説明</td><td>
クレーン機能付バックホウにオートフックを取付けて堤防決壊口にブロックを投入する。ブロックの玉掛け作業は作業員が行うが、オートフックは着底するとワイヤーが自動的に外れるため、作業員による玉外し作業を省略することができる。ブロックは決壊口に直接投入するか、又は堤防天端上に一旦降ろしてからバケットで転がし落とす。</td></tr>
<tr><td colspan="2">利点</td><td>比較的容易に調達可能であり機動性に優れているバックホウを使用してブロックを投入できるため、迅速な対応が可能となる。
作業員による玉外し作業を省略することができるため、安全性に優れている。
砕石によるブロックの間詰めを行う場合も同一のバックホウを使用することが可能であり、機械の入替えを省略することができる。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">施工条件</td><td>気象</td><td>気象の影響を受けにくい。</td></tr>
<tr><td>地耐力</td><td>地耐力が比較的悪い条件でも作業が可能である。</td></tr>
<tr><td>支障物</td><td>バックホウのアームの可動空間があれば作業できる。</td></tr>
<tr><td>作業幅</td><td>バックホウが作業できる幅があれば良い。</td></tr>
<tr><td colspan="2">注意点</td><td>オートフックを堤防決壊現場で用意できる場合に限られる。
堤防決壊口にブロックを直接投入する場合には、ワイヤーがブロックに絡まないように注意が必要である。ワイヤーがブロックに絡まると重機が転倒する危険性がある。
標準的なバックホウの吊能力は 2.9t であるため、それ以上に重量があるブロックを扱うことはできない。
ブロックを遠くに投入することはできない。</td></tr>
<tr><td colspan="2">【参考】
ブロック投入速度</td><td>1.7 分/個程度（決壊部に直接投入）
2.4 分/個程度（堤防天端に降ろしてから転がし投入）</td></tr>
</table>

表 4.4　バックホウによるブロックの投入(3)

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td>グラップル</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の説明</td><td>

バックホウのアタッチメントにコンクリートブロック用グラップルを取付けて堤防決壊口にブロックを投入する。作業員による玉掛け・玉外し作業を省略し、ブロックを水中に直接投入することができる。</td></tr>
<tr><td colspan="2">利点</td><td>作業員による玉掛け・玉外し作業を省略することができるため、安全性に優れている。
バックホウのアームの届く範囲であれば、任意の位置にブロックを投入することができる。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">施工条件</td><td>気象</td><td>気象の影響を受けにくい。</td></tr>
<tr><td>地耐力</td><td>地耐力が比較的悪い条件でも作業が可能である。</td></tr>
<tr><td>支障物</td><td>バックホウのアームの可動空間があれば作業できる。</td></tr>
<tr><td>作業幅</td><td>バックホウが作業できる幅があれば良い。</td></tr>
<tr><td colspan="2">注意点</td><td>コンクリートブロック用グラップルは調達が困難なことが多く堤防決壊現場で用意できない可能性が高い。
標準的なバックホウの吊能力は 2.9t であるため、それ以上に重量があるブロックを扱うことはできない。
ブロックを遠くに投入することはできない。
砕石によるブロックの間詰めを行う場合は、バケットを装着したバックホウと入れ替える必要がある。</td></tr>
<tr><td colspan="2">【参考】
ブロック投入速度</td><td>0.4 分/個程度※</td></tr>
</table>

※ H27 サラカオーマキキン川における大型土のう投入速度であり、コンクリートブロックを扱う際は、これより投入速度が遅くなる可能性がある。

表 4.5　クレーンによるブロックの投入(1)

		異形ブロック投入安全装置
工法の説明		 クレーンに異形ブロック投入安全装置を取り付けて堤防決壊口にブロックを投入する。
利点		クレーンの規格にもよるが、重量の大きいブロックを遠くまで投入することができる。 作業員による玉外し作業が不要で、任意の地点にブロックを投入することができる。
施工条件	気象	風速の制限を受ける。
	地耐力	クレーンが走行できるだけの地耐力が必要であり、アウトリガーを張り出す際には敷鉄板などを敷設する必要がある。
	支障物	架空線などの障害物がある場合に制限を受ける。
	作業幅	アウトリガーを張り出せるだけの作業幅が必要になる。
注意点		現場条件によっては用意作業に時間を要し、迅速な対応が困難になる場合がある。 異形ブロック投入安全装置を堤防決壊現場で用意できる場合に限られる。 砕石によるブロックの間詰めを行う際には、重機の入替えが必要になる。
【参考】 ブロック投入速度		3.7 分/個程度

表 4.6　クレーンによるブロックの投入(2)

		オートフック
工法の説明		 クレーンにオートフックを取り付けて堤防決壊口にブロックを投入する。
利点		クレーンの規格にもよるが、重量の大きいブロックを遠くまで投入することができる。 作業員による玉外し作業を省略することができるため、安全性に優れている。
施工条件	気象	風速の制限を受ける。
	地耐力	クレーンが走行できるだけの地耐力が必要であり、アウトリガーを張り出す際には敷鉄板などを敷設する必要がある。
	支障物	架空線などの障害物がある場合に制限を受ける。
	作業幅	アウトリガーを張り出せるだけの作業幅が必要になる。
注意点		現場条件によっては用意作業に時間を要し、迅速な対応が困難になる場合がある。 オートフックを堤防決壊現場で用意できる場合に限られる。 堤防決壊口にブロックを直接投入する場合には、ワイヤーがブロックに絡まないように注意が必要である。ワイヤーがブロックに絡まると重機が転倒する危険性がある。 砕石によるブロックの間詰めを行う際には、重機の入替えが必要になる。
【参考】 ブロック投入速度		2.6 分/個程度

4.2 資材

コンクリートブロックは予め設置されたものに比べて水中へ投入した場合は転動しやすい。 堤防決壊口の流速が速くブロックが流される恐れのある場合は、重い資材を使用するか、又はブロックの連結や、ブロックの転動流出を防止する補助工法の併用を考える。

4.2.1 ブロックの特性

(1) ブロックの形状および重量による特徴

1) 概要

堤防決壊時に行う緊急対策工事では、水防資材として備蓄されているコンクリートブロックを使用することになる。基本的には重量の大きなコンクリートブロックは流されにくいが、重すぎると一度に多くのブロックを運搬できず、投入作業に大型重機が必要になるなど、作業効率が悪くなる。効率よくブロックを積み上げて荒締切を進めるためには、ブロックの形状も重要である。

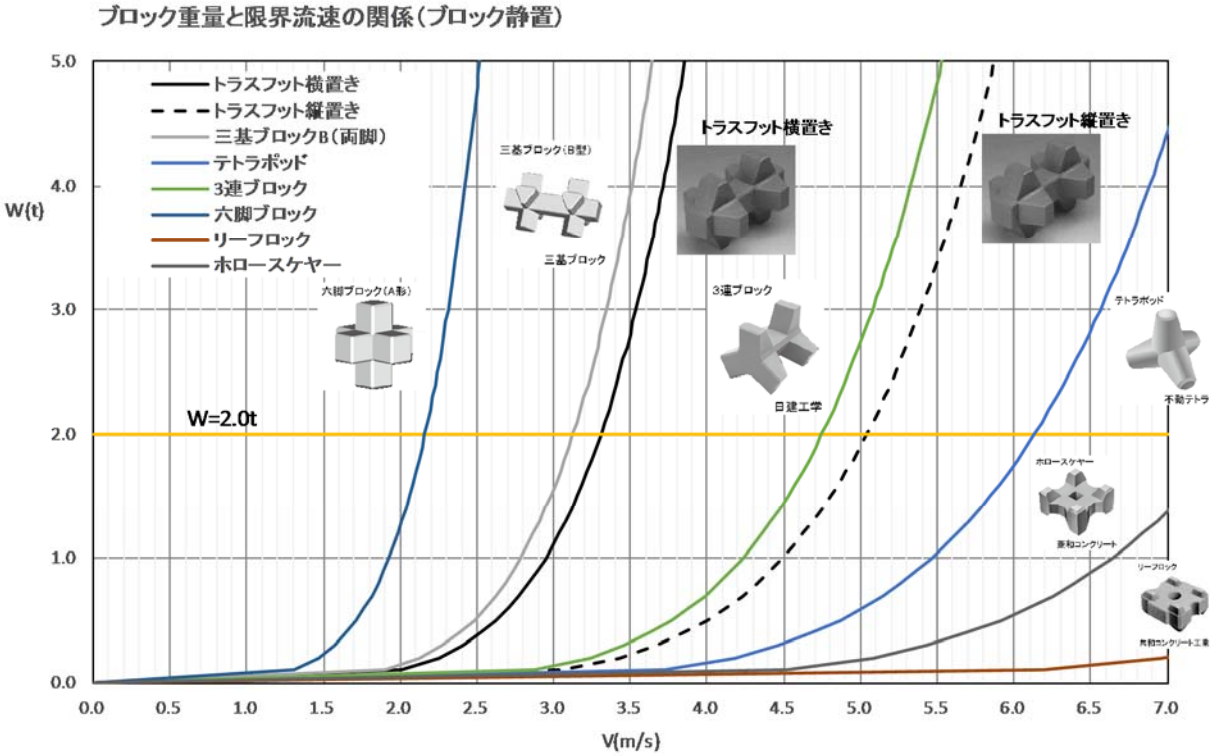
写真 4.3　水防資材用備蓄ブロック

2）形状および重量によるブロックの特徴

ブロックの形状による特徴としては、立体型は重心が高いため平型より水中で転動しやすい。一方、平型は立体型より転動・流失しにくいが、積み重ねるのに多数のブロックが必要となる。なお、立体型でも転動しにくい形状のブロックもある。

ブロック重量と流水中での移動限界流速の関係は、重量、形状（抗力係数と投影面積）によって求めることができる。さらに、静置状態の場合より流水中に投入した場合のほうが、移動限界流速が小さくなることに注意が必要である。緊急締切作業を効率的に進めるためには、備蓄しているブロックの特性を把握し、効果的に用いることが重要である。

参考として、ブロックの種類によるブロック重量と移動限界流速の関係を図 4.4 に示す。なお、同図はブロック静置状態のものであり、投入時にはこれより移動限界流速が下がる。



簡単のため、効力 D を$D=\frac{\rho_w}{2}AC_Du^2$、重量 w を$W=\rho_w gV$（ただし$\rho$w：水の密度、A：ブロックの流下方向の投影面積、u：設計流速、g：重力加速度、V：ブロックの体積）として、D=W を転動限界と仮定して作図

図 4.4　ブロックの種類によるブロック重量と限界流速の関係（ブロック静置）

(2) 水中へ投入したブロックの挙動特性

1) 実験概要

図 4.4 はブロック静置状態でのブロック重量と移動限界流速の関係であるが、災害時は流れのある中にブロックを投入することになる。そこで、流れのある中へ投入したブロックの挙動特性を把握するため、1/1、1/5、1/20 の縮尺でブロック転動実験を実施した。実験で使用したブロックは、北海道開発局が水防資材として備蓄しているブロックのうち、保有数が最も多いトラスフット 2t 型（立体型コンクリートブロック）とした。実験ではブロック単体を投入するケースと、転動流出しない工夫としてブロック 2 個を連結して投入するケースを行った。

写真 4.4　ブロック転動実験の様子

写真 4.5　ブロック 2 個連結状況

2）実験結果

静止状態（横置き）におけるトラスフット 2t 型の転動限界流速は 3m/s 程度であるが（図 4.4 参照）、水中へ投入した場合、流速が 2.4m/s を超えると停止率は大幅に低下することがわかった。一方、ブロック 2 個を連結することで、単体と比較して停止率は大幅に改善する結果となった。

実際の堤防決壊現場においても、投入するブロックが転動流出してしまう場合は、連結したブロックを投入することでブロックの転動流出を防止できる可能性がある。

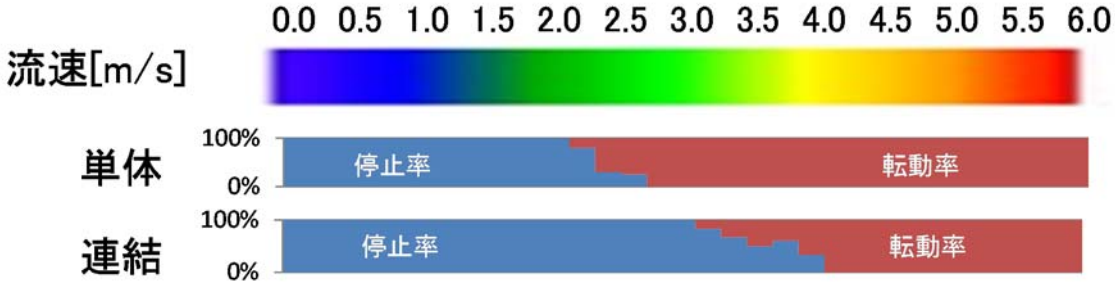


図 4.5　流速とブロック停止率・転動率の関係

【コラム】流水中に投入したブロックの耐流速性

流水中に投入したブロックの耐流速性について、模型実験を行い確認した。

流水中に投入したブロックは、静置状態で置かれたブロックが移動する流速より遅い流速で流出する傾向にあり、ブロックの耐流速性は 4 割程度低下した。

なお、図中の流速は静置状態におけるブロック上端の位置の流速であり、投入時の流速も同じ位置の流速を示している。

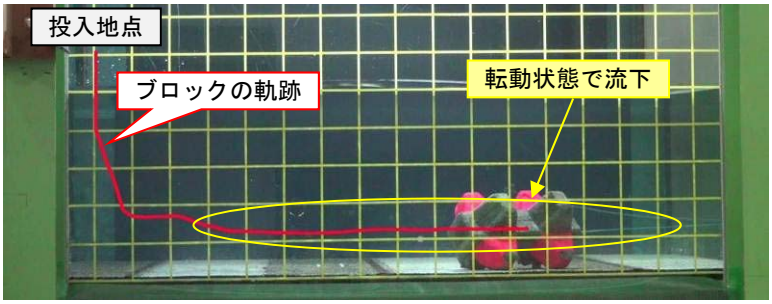


写真 4.6　流水中に投入したブロック転動実験の状況

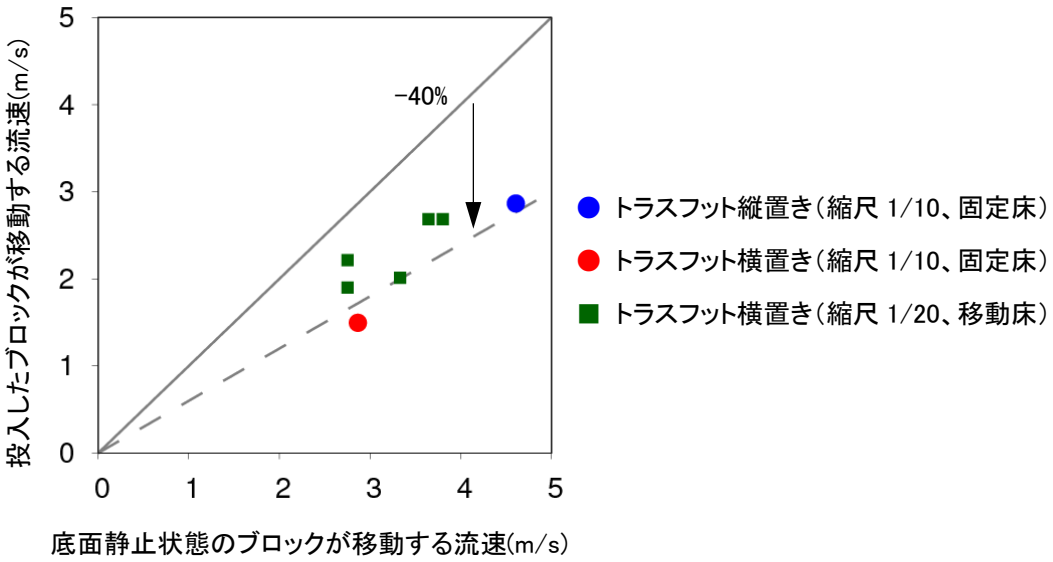


図 4.6　ブロック移動限界の投入による影響

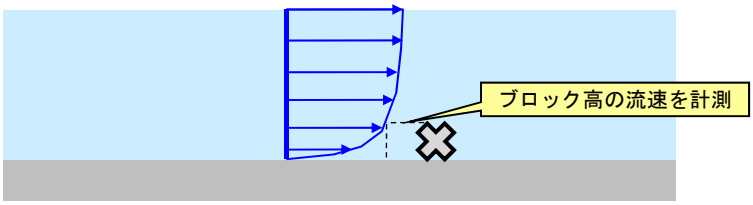


図 4.7　流速の計測位置

【コラム】水位差がある場合のブロックの耐流速性

荒締切を進めることで、荒締切位置を境界として河川側と氾濫域側に水位差が生じることから、水位差がある場合の耐流速性について、模型実験を行い確認した。

実験の結果、水位差がある場合のブロックの耐流速性は 2 割程度低下した。堤内外に水位差が生じるとブロックは移動しやすくなるが、これがせめ工を難しくしている要因でもある。

なお、図中の流速は静置状態におけるブロック上端の位置の流速である。

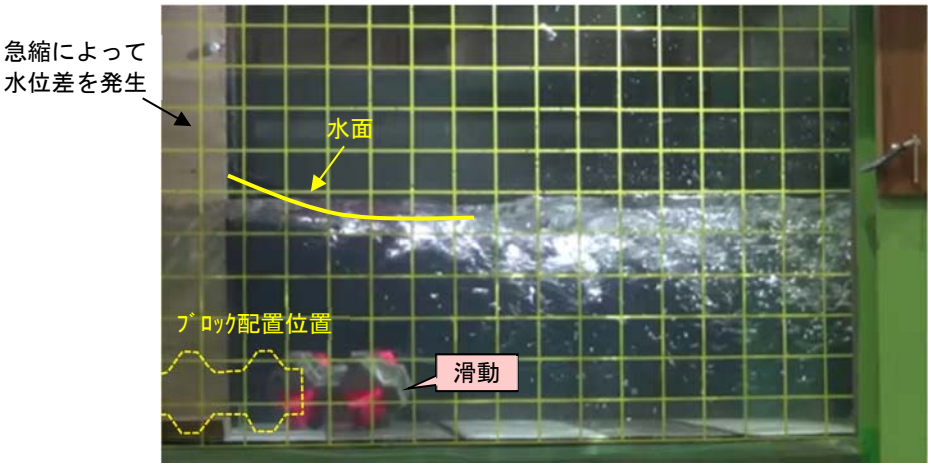


写真 4.7　水位差がある場合のブロック転動実験の状況

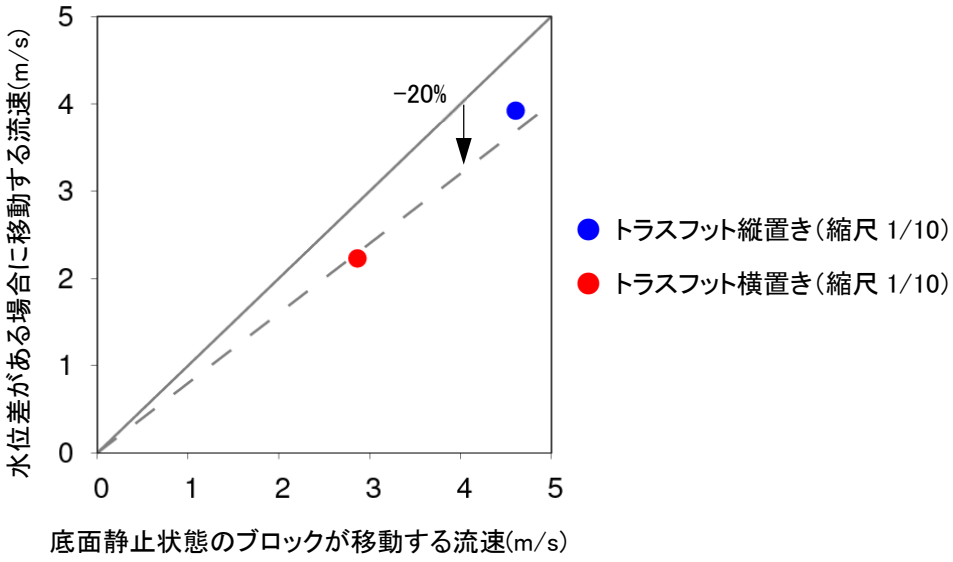


図 4.8　ブロック移動限界の水位差による影響

【コラム】水位差がブロック転動限界に及ぼす影響

ブロック前後の水位差有無の条件においてブロックに作用する抗力を計測した結果、水位差の発生により、作用流速が同程度でもブロックに作用する抗力が増加することが明らかとなった。これは、ブロック前後の水位差が静水圧の差となり、ブロックを押し流す力となるためである（図 4.10 の青矢印の力）。

これより、一様流を想定した場合に作用するブロックを押し流す力（図 4.10 の緑矢印の力）と比較して大きな力が河床付近のブロックにかかり、ブロックが流出しやすくなる可能性があるので注意が必要である。

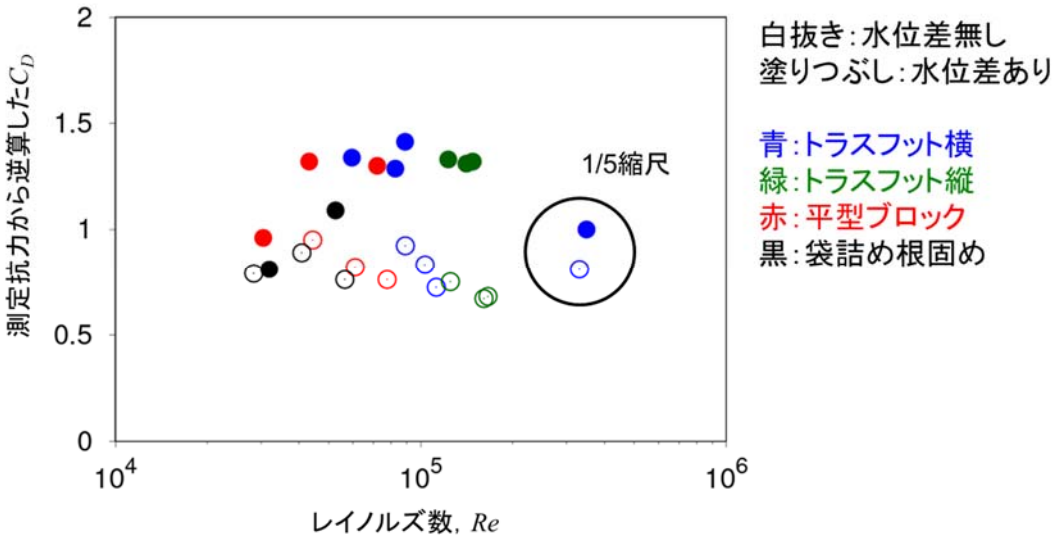


図 4.9　水位差が物体抗力に与える影響

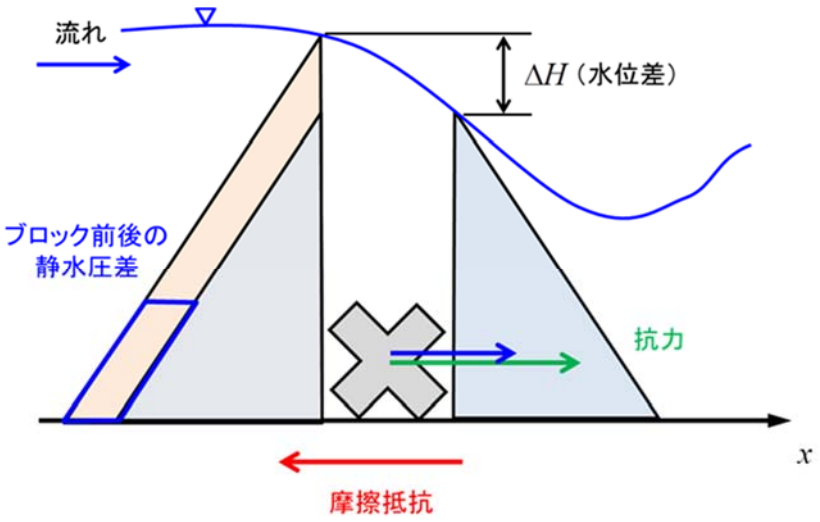


図 4.10　水位差がブロック転動限界に及ぼす影響

4.2.2 補助工法

せめ工段階など決壊部の流速が速くブロックが流される恐れのある場合は、重い資材の使用、ブロックの連結や補助工法の併用など、ブロックの転動流出を防止する対策を取ると有効である。ここでは、ブロックの転動流出を防止する補助工法の１つである「鋼組工」について紹介する。

(1) 目的

鋼組工を予め投入することで、後から流水中に投入したブロックを受け止め、転動流出を防止するための補助工法であり、ブロックに先行して堤防決壊部に投入する。

(2) 構造

鋼組工の構造は、横軸部の両側に十字型の脚部を取り付け、脚部１本の長さを伸ばした形状をしている。鋼組工はH鋼などの一般的な鋼材を堤防決壊現場で組み立てて製作することを想定しており、組み立ておよび投入にはクレーンやバックホウなどを使用する（写真 4.8）。

(3) 使用方法

① ブロックの転動流出を防止するため、ブロックに先行して鋼組工を投入する。

② 鋼組工がブロックを止めるきっかけとなり、その後に投入するブロックは流出せずに積み上がる。

③ ブロックが水面上まで積み上がったら、砕石などで閉塞する。

(4) 確認実験

鋼組工の効果を確認する模型実験では、鋼組工がブロックを止めるきっかけとなり、その後に投入したブロックは転動せずに積み上がった（写真 4.9）。

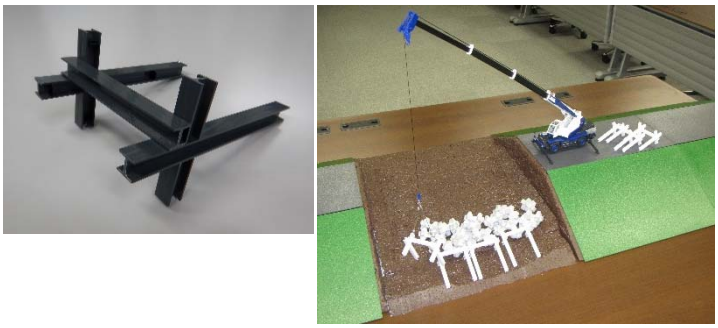


写真 4.8　鋼組工の模型写真

写真 4.9　鋼組工の模型実験の状況

5. 実河川の堤防決壊を想定したケーススタディ

前章までで得られた成果を基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した結果を紹介する。

堤防が決壊した場合の氾濫被害を軽減させるためには、堤防決壊幅が大きく広がる前に、いかに早く荒締切工事に着手できるかが重要となる。

工事前の準備も含めて荒締切工事を効率的に行うことで、氾濫被害を軽減させることが期待できる。

現場条件で漸縮工が難しいと判断される場合には、欠口止め工に専念する。

(1) ケーススタディの検討条件

前章までで提案した効率的な対策工事を行った場合の被害軽減効果を確認するために、破堤計算モデル「Nays2D Breach」を用いて、実河川の堤防決壊を想定した机上シミュレーションを行った。なお、このシミュレーションは様々な仮定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当てはまるものではないが、概ねの作業イメージや効果を共有するのに有効なものである。

ケーススタディでは、減災対策を行わない場合、荒締切のコンクリートブロック投入にクレーンを使用する場合とバックホウを使用する場合の 3 ケースについて、欠口止め工まで実施する場合と漸縮工まで実施する場合のシミュレーションを行った。対象地点は十勝川水系の 2 地点を選定し、検討条件は表 5.1 に示すとおりとした。

表 5.1　ケーススタディの検討条件

	資材投入に主にクレーンを使用	資材投入に主にバックホウを使用
堤防決壊地点	十勝川水系の水位流量観測所付近の堤防 2 地点 ・千代田観測所 ・音更観測所	同左
数値計算方法	「Nays2d Breach」を使用	同左
計算に用いるハイドロ	各観測所で H28.8 に観測された実績ハイドロ	同左
着工までに要する時間	堤防決壊から 4 時間後 ・堤防決壊確認～連絡　：60 分 ・資機材準備、運搬　　：60 分 ・資材仮置きヤード整備：60 分 ・資材投入準備　　：60 分	堤防決壊から 3 時間後 ・堤防決壊確認～連絡　：60 分 ・資機材準備、運搬　　：60 分 ・資材仮置きヤード整備：60 分
荒締切の構造	締切天端幅：6m 構成資材　：コンクリートブロック、砕石、敷鉄板	締切天端幅：4m 構成資材　：コンクリートブロック、砕石、敷鉄板
使用機械	ブロック投入：クレーン 砕石投入　　：バックホウ 敷鉄板敷設　：クレーン付トラック	ブロック投入：バックホウ 砕石投入　　：バックホウ 敷鉄板敷設　：クレーン付トラック
施工速度	ブロック投入：3 分/個 砕石投入　　：0.6m^3/分 敷鉄板敷設　：4 分/枚	ブロック投入：2 分/個 砕石投入　　：0.6m^3/分 敷鉄板敷設　：4 分/枚

(2) ケーススタディの結果

1) 欠口止め工まで実施する場合

- 堤防決壊幅が大きく広がる前に荒締切工事に着手することができれば、氾濫被害を軽減させることが期待できる。つまり、工事前の準備も含めて、いかに早く荒締切工事に取り掛かることができるかが重要となる。
- 欠口止め工を行い堤防決壊の拡幅進行を抑制するだけでも、氾濫被害の軽減効果を得られる場合がある。現場条件で漸縮工が難しいと判断される場合には、洪水が収束するまでの間、欠口止め工で堤防決壊口の拡幅進行を抑制することに専念することも考慮するべきである。

表 5.2　欠口止め工まで実施した場合の効果

対象地点	氾濫終了時点の堤防決壊幅			累積氾濫量		
	対策無し	クレーン使用	バックホウ使用	対策無し	クレーン使用	バックホウ使用
千代田観測所	195m (100%)	165m (85%)	135m (69%)	855 万 m^3 (100%)	740 万 m^3 (87%)	655 万 m^3 (77%)
音更観測所	72m (100%)	52m (72%)	48m (67%)	192 万 m^3 (100%)	122 万 m^3 (63%)	111 万 m^3 (58%)

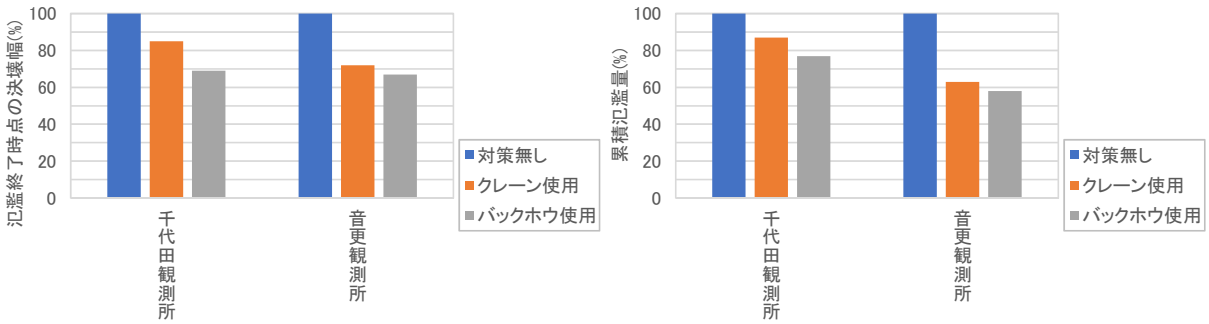


図 5.1　欠口止め工まで実施した場合の効果
(左)氾濫終了時点の堤防決壊幅 (右)累積氾濫量

※ 図表中の%は、対策工を行わなかった場合を 100%として算出

・ 欠口止め工を早期に実施することで、浸水面積の縮小により被害額が小さくなるとともに、浸水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つながることも期待できる。

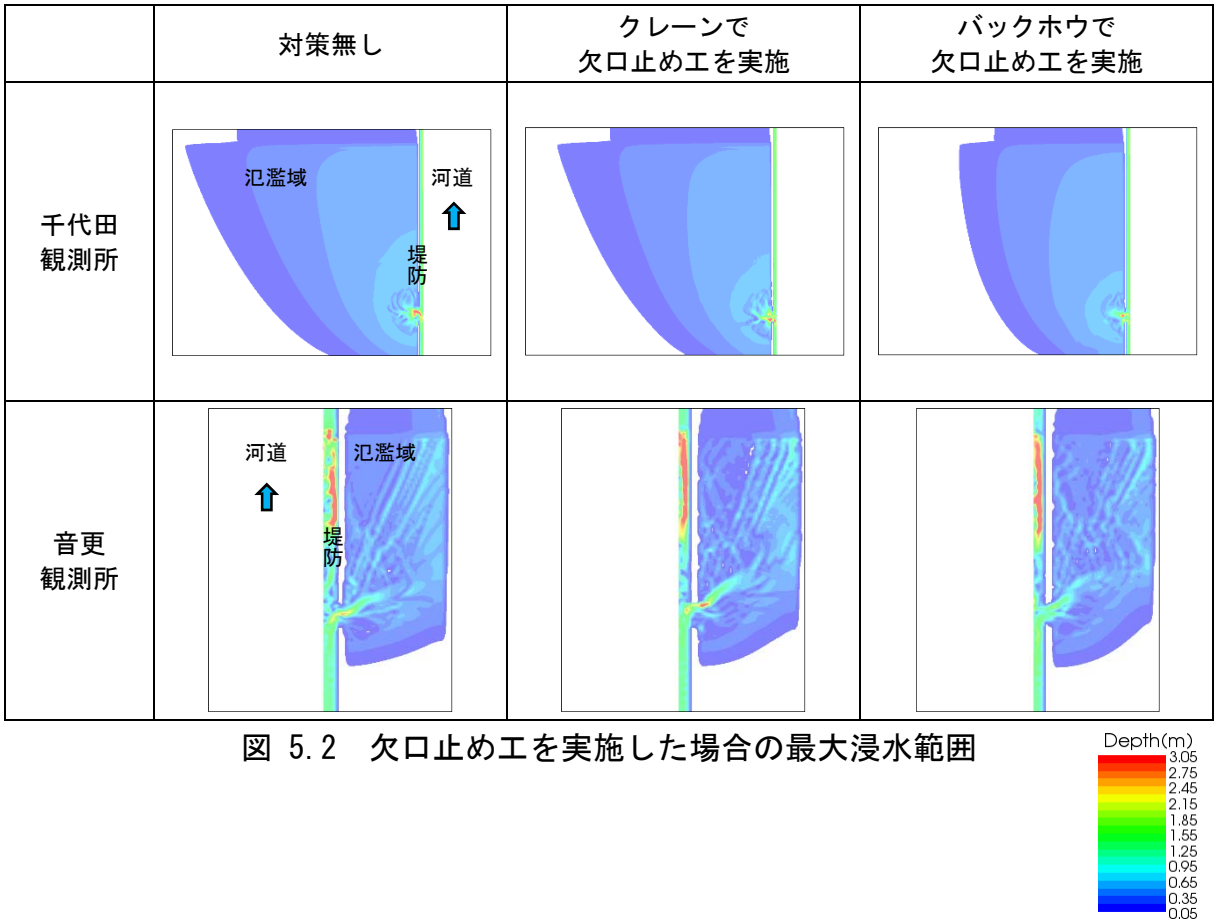


図 5.2　欠口止め工を実施した場合の最大浸水範囲

(3) 漸縮工を実施する場合

・ 漸縮工を行うことで氾濫被害を軽減させることが期待できるが、荒締切工事を効率的に行うことで被害軽減効果はさらに大きくなると考えられる。

表 5.3　漸縮工を実施した場合の効果

対象地点	氾濫終了時点の堤防決壊幅			累積氾濫量		
	対策無し	クレーン使用	バックホウ使用	対策無し	クレーン使用	バックホウ使用
千代田観測所	195m (100%)	145m (74%)	100m (51%)	855 万 m^3 (100%)	728 万 m^3 (85%)	629 万 m^3 (74%)
音更観測所	72m (100%)	10m (14%)	0m (0%)	192 万 m^3 (100%)	105 万 m^3 (55%)	81 万 m^3 (42%)

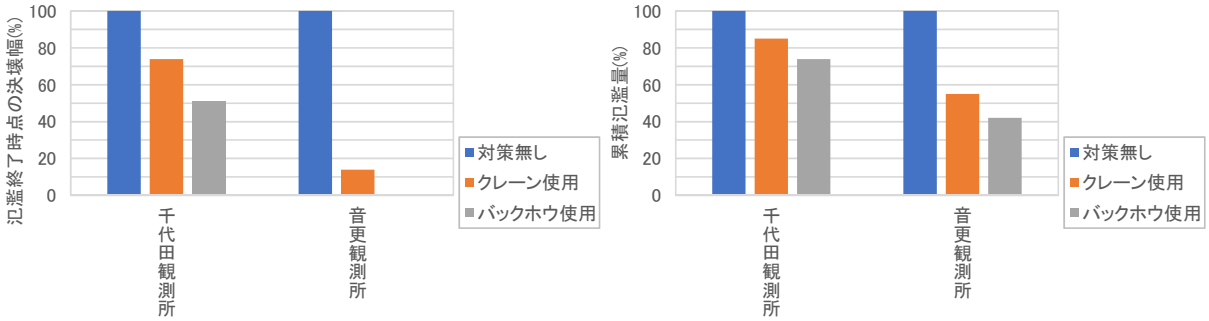


図 5.3　漸縮工を実施した場合の効果
(左)氾濫終了時点の堤防決壊幅 (右)累積氾濫量

※ 図表中の%は、対策工を行わなかった場合を 100%として算出

6. 本資料作成の参考にした文献等

本検討資料の作成にあたり参考にした文献等を紹介する。

「1. 災害事例から得られた知見と課題」

・ 建設省河川局：災害堤防の締切工法研究曾報告書，社団法人日本河川協会，1954.

・ 締切工法研究会：応急仮締切工事，社団法人全国防災協会，全国海岸協会，1963.

・ 東京消防庁・多摩川水防記録誌編集委員会編：濁流に挑む―多摩川決壊と水防活動記録―，東京法令出版，1975.

・ 土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団：2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団報告書，2016.

・ 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工事等の事例紹介（その 1），寒地土木研究所月報，第 779 号，2018.

・ 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工事等の事例紹介（その 2），寒地土木研究所月報，第 780 号，2018.

・ 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工事等の事例紹介（その 3），寒地土木研究所月報，第 781 号，2018.

「2. 堤防決壊メカニズム」

・ 藤田裕一郎，田村多佳志，村本嘉雄：河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験的研究，京都防災研究所年報，第 27 号 B-2，pp. 362-392，1894.

・ 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，土木学会河川技術論文集，第 6 巻，pp. 1-6，2006.

・ 吉川勝秀：河川堤防学，技報堂，pp. 98，2008

・ 国土交通省北海道開発局，独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：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，2012.

・ 柿沼孝治，飛田大輔，横山洋，井上卓也，武田淳史：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.

・ 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. 740，pp. 36-45，2015.

・ 服部敦，森啓年，笹岡慎吾：越水による決壊までの時間を少しでも引き延ばす河川堤防天端・のり尻の構造上の工夫に関する検討，国土技術政策総合研究所資料第911号，2016.

・ 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.

・ 島田友典，渡邊康玄，岡部博一，岩崎理樹，中島康博：河床勾配と川幅に応じた破堤拡幅現象の分類，土木学会河川技術論文集，第23巻，pp.411-416，2017.

「3. 堤防決壊メカニズムに応じた災害対応の考え方」

・ 建設省河川局，土木施設災害復旧工法研究会：土木施設災害復旧工法解説編，山海堂，1977.

・ 財団法人国土開発技術センター：堤防決壊部緊急復旧工法マニュアル，1989.

・ 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20巻，pp.515-520，2014.

・ 島田友典，前田俊一，柏谷和久，飛田大輔，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，土木学会地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集，第3回，I-4，2015.

・ 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.

・ 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巻，pp.379-384，2016.

・ 島田友典，前田俊一，柏谷和久，中島康博：十勝川千代田実験水路における河川堤防荒締切工に関する基礎実験，寒地土木研究所月報，第760号，pp.41-46，2016.

「4. 資機材の検討」

・ 山本晃一，林建二郎，関根正人，藤田光一，田村正秀，西村晋，浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数，および相当粗度の計測方法について，水工学論文集，第 44 巻，pp.1053-1058，2000.

・ 財団法人土木研究センター:護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル(第2版)，2003.7

・ 国土技術研究センター編：改訂護岸の力学設計法，山海堂，2007.

・ 山本太郎,東海林勉,土屋大輔,伊藤幸義,川邊和人,島田友典：洪水の流水中にブロックを投入した際の転動しやすさに関する水理実験と力学的考察，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71，No.4，I_517-I_522，2015.

・ 山本太郎，東海林勉，飛田大輔，島田友典：破堤時の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 巻，pp.357-360，2016.

・ 島田友典，横山洋，米元光明：十勝川千代田実験水路における河川堤防決壊時の効率的な荒締切工に関する現地実験，寒地土木研究所月報，第 776 号，2018.

・ 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平成 29 年度論文概要集，第 74 号，2018.

おわりに

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繋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。

本検討資料を作成するにあたり、十勝川千代田実験水路等実験アドバイザー委員会ならびに十勝川千代田実験水路等実験検討会より数多くのご指導やご助言を頂いた。また、実物大のせめ工実験およびブロック投入実験の実施にあたり、一般社団法人帯広建設業協会に多大なるご協力を頂いた。ここに、ご協力いただいた各委員および一般社団法人帯広建設業協会に深く感謝の意を表する。