

越水等による破堤の被害軽減技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 28

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、柿沼孝治、飛田大輔

【要旨】

気候変動の影響により、大規模な水害の発生が懸念されており、なかでも河川堤防の決壊による被害は甚大である。河川整備が進んだ近年でも堤防決壊の事例が見られており、堤防決壊による水害が生じている。これまで、破堤に関する研究は、様々な観点で進められており、実物大実験による破堤拡幅機構解明、堤防強化対策、樹林帯による氾濫流抑制対策に関する研究などが行われてきている。しかしながら、減災対策に関し、新工法の開発は少なく、いまだ十分に確立されていない現状である。本研究は、破堤拡幅後の水害被害軽減対策として、根固ブロックを用いて、破堤拡幅や氾濫流を抑制する工法を開発するものである。

キーワード：破堤、根固ブロック、千代田実験水路

1. はじめに

河川整備が進んだ今日でも、豪雨にともなう大規模な水害は各地で頻発し、河川堤防の決壊による水害被害が発生している。近年では、2012年7月の九州北部豪雨においても基礎地盤からのパイピングを主たる原因とする堤防決壊による水害が生じている¹⁾。

河川堤防の破堤に関しては、実物大実験²⁾³⁾による現象解明や越水強化対策⁴⁾などの検討がされており、島田らはそれらを体系的に整理している⁵⁾。藤田らは、洪水外力から水害被害の軽減にいたるまで、減災システム整備という観点から破堤現象に関する課題を整理し、破堤被害軽減の重要性を示した⁶⁾。一方、破堤拡幅後の被害軽減対策は、樹林帯による氾濫流抑制に関する検討⁷⁾などがあるが、減災対策に関し、新工法の開発は少なく、いまだ十分に確立されていない。

本研究は、破堤拡幅後の水害被害軽減対策として、根固ブロックを用いて、破堤拡幅や氾濫流を抑制する工法（以下、破堤拡幅抑制工）を開発するものである。

一般に、破堤後の緊急復旧対策工は、はじめに破堤口の拡大を防止する欠け口止め工、ついで破堤口の流速を低減し締め切る荒水止め工、その後破堤口を締め切るせめ工などを経て堤防復旧工事が行われる⁸⁾。一方、本研究では図-1に示すように、あらかじめ破堤が予測された時点、あるいは越水開始直後あらかじめ破堤箇所の下流側において、破堤が達する前にブロックを設置し破堤拡幅を抑制する。すなわち、破堤拡幅を防ぐための水防工法を兼ね備えた欠け口止め工であり、加えて緊急復旧対策工に繋がる工法と考えられる。

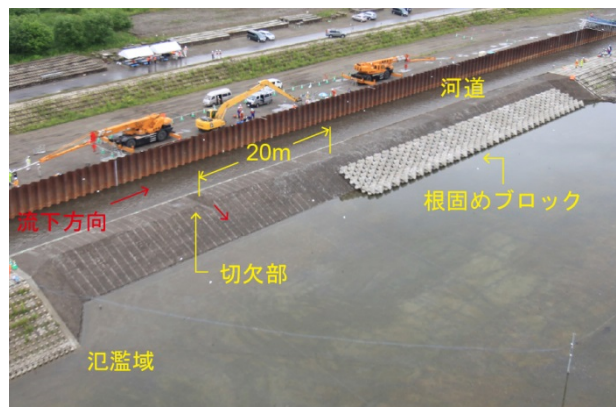


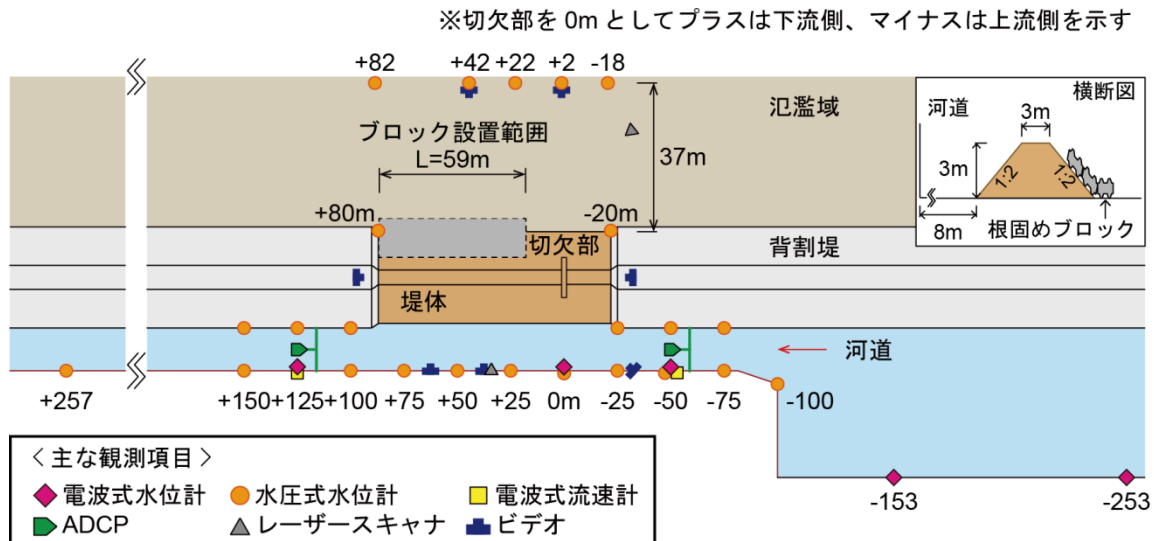
図-1 実験概要

早期に堤防の破堤口の拡大を防止することは、水害被害の軽減に対して大きな効果が期待される。一方、破堤口では、氾濫流の流速が大きく、氾濫流量も増加する厳しい流況となる。このような流況において、堤体の侵食防止や氾濫流の流勢を緩和させるための資材は、高流速の流水に耐えることに加え、資材の調達や施工が容易であることが求められる。したがって、本工法では、河岸保護のための投入資材として実績が高い2トン型の根固めブロックを使用することとした。

2. 実験概要

2.1 実験水路

実験水路諸元等及び主な観測項目を図-2に示す。実験水路は、越流に必要な水深を確保するため、鋼矢板を用いて30mある水路幅を8mに縮小し、下流端に堰上げ施設を設けた。河床勾配は1/500で整形した。



また、氾濫域については、千代田新水路側を利用することにより、横断方向に 80m 以上の広い氾濫域を設定し、地盤高は河道側とほぼ同じ高さとなるように整形した。破堤させる堤体は、現地採取土を用いて築造し、締固め度の平均は 90% 以上である。破堤実験区間を図-2 に示すように、高さ 3m、天端幅 3m、法勾配 (表裏) 2 割で整形し、破堤のきっかけとして深さ 0.6m の破堤箇所 (切欠部) を設けた。また、裸堤 (芝を張らない土堤) とし、河道内の流水による侵食を防ぐため、破堤実験区間の表法側に護岸ブロックを設置した。

堤体に用いた材料の粒度分布を図-3 に示す。凡例は、切欠部を 0m として下流側をプラス、上流側をマイナスで示す。採取深さは、天端と裏法肩の表層、天端から鉛直方向に 1m 毎に上層・中層・下層である。主に砂礫分の多い材料で構成されているが、土取場と上流側-2m の堤体下層は細粒分をやや多く含んでいる。

2. 2 実験方法

破堤拡幅後の堤体侵食について、実物大破堤実験⁹⁾では、氾濫流の主流部が裏法側にぶつかり、裏法側の堤体侵食ことが観察されている。また、藤田¹⁰⁾は、小縮尺模型実験により、破堤拡幅は裏法先からの土砂流送が支配的であるとし、移動限界粒径以上の石礫を裏法先の堤体に混入することにより、破堤拡幅速度を減ずる方法を示した。したがって、破堤拡幅を抑制するためには、堤体の侵食が先行する裏法側の侵食を防ぐことが必要であると考えられる。そこで、水理模型実験を用いた予備実験によるブロック配置の検討を行い¹¹⁾、ブロックの配置は図-2 に示すように裏法面 2 列、裏法

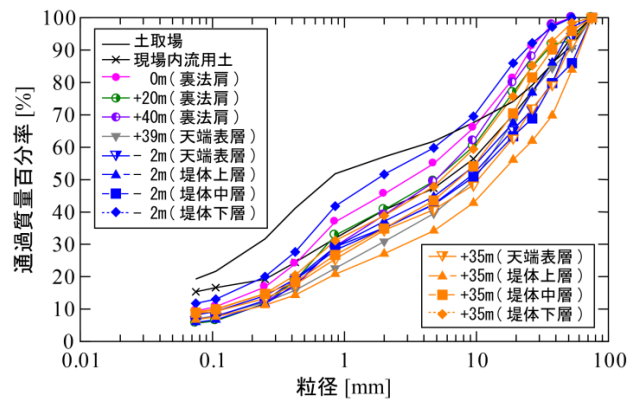


図-3 用いた堤体材料の粒度分布

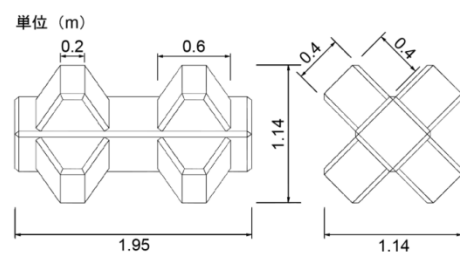


図-4 根固ブロックの形状

尻 1 列にブロックを配置し、裏法側の堤体侵食の防止や流速を低減できるようにした。設置位置は切欠部より下流側 20m とし、破堤拡幅が停止する状況までを確実に捉えることの出来るように、破堤実験区間の下流端まで縦断方向に約 59m 設置した。実験に用いた根固めブロックの諸元を図-4 に示す。重さは 2 トン、長さ 1.95m、幅 1.14m、高さ 1.14m であり、ブロック同士を噛み合わせることで安定しやすくなる形状である。

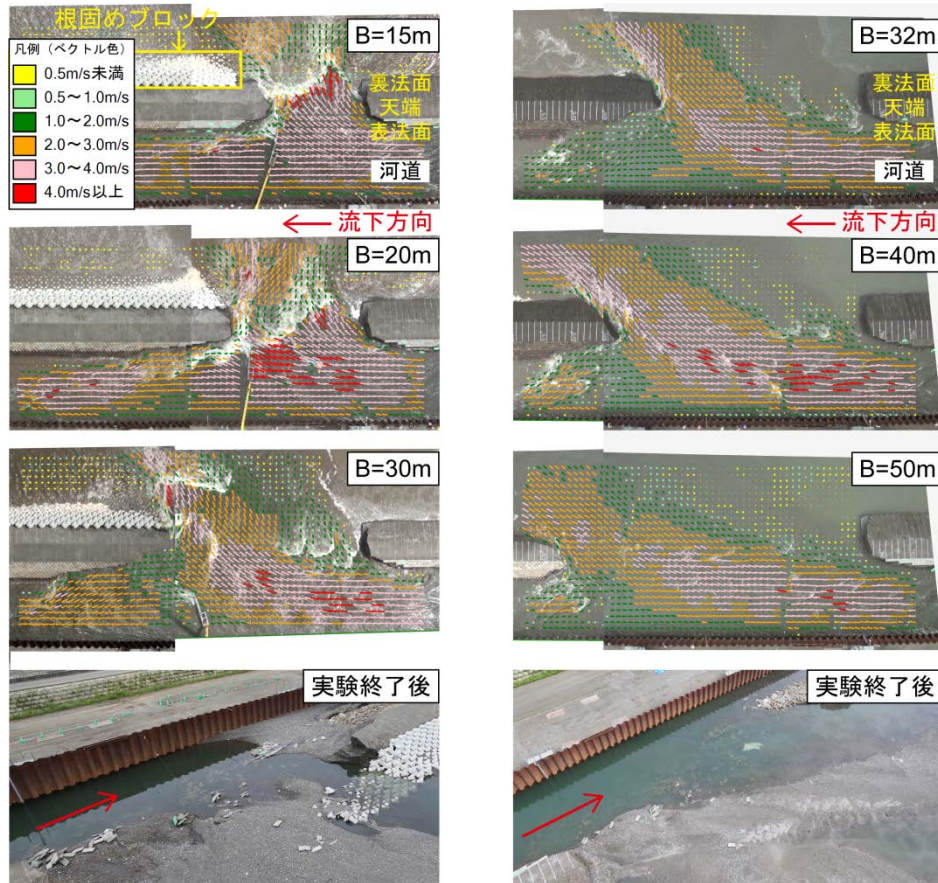


図-5 実験状況（左図：第1回実験、右図：第2回実験<再通水実験>）

主な観測は、図-2に示すとおり水位や流量・流速、実験状況の撮影である。なお、今回の実験では、堤体内部や基盤部を含めた破堤幅の抑制過程を把握するため、後述するように、特にブロック設置区間とその前後に加速度センサーを重点的に配置した。

通水方法は、一定流量 $70\text{m}^3/\text{s}$ となるようにゲート操作を行い、切欠部から越水させ、破堤幅の停止を確認した時点で通水流量を減少させ、実験終了とした。

3. 実験結果

3.1 実験状況

実験状況として、真上からのPIV (Particle Image Velocimetry) による流況観測結果を図-5、破堤幅の時間変化を図-6に示す。破堤幅は真上から撮影したビデオから0.5mピッチで読み取った天端中央の幅である。実物大破堤実験¹¹⁾でも観察されたように、主に下流側に破堤幅広げたため、ここでは切欠部より下流側の幅を示す。第1回実験の破堤幅は越水開始後、第2回実験は通水流量一定後である。

まず、第1回実験の流況について図-5に示すように、ブロック到達前（破堤幅15m）では、氾濫流の主流部

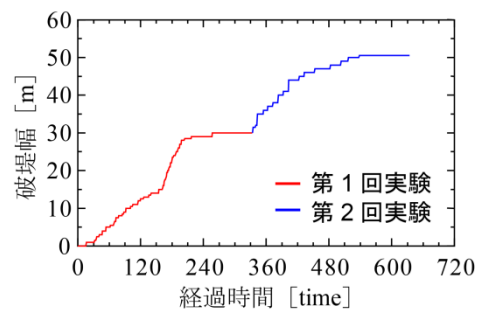


図-6 破堤幅の時間変化

がやや氾濫域下流側へ斜めに向いている。しかし、ブロック到達以降（破堤幅20m以降）では、河道縦断方向から氾濫域の方向となっている。

破堤幅の時間変化について図-6に示すように、越水開始後、約30分経過頃に下流側へ破堤幅ははじめ、約180分後にはブロック設置位置まで破堤幅した。その後、破堤幅約30mまで破堤幅したが、それ以上は破堤幅せず、約80分通水しゲートからの通水を停止した。実物大破堤実験¹¹⁾では破堤進行過程を4つのステップに分類している。これより、破堤幅を抑制した破堤幅20mから30mにかけての段階を推定すると、破堤幅が急激

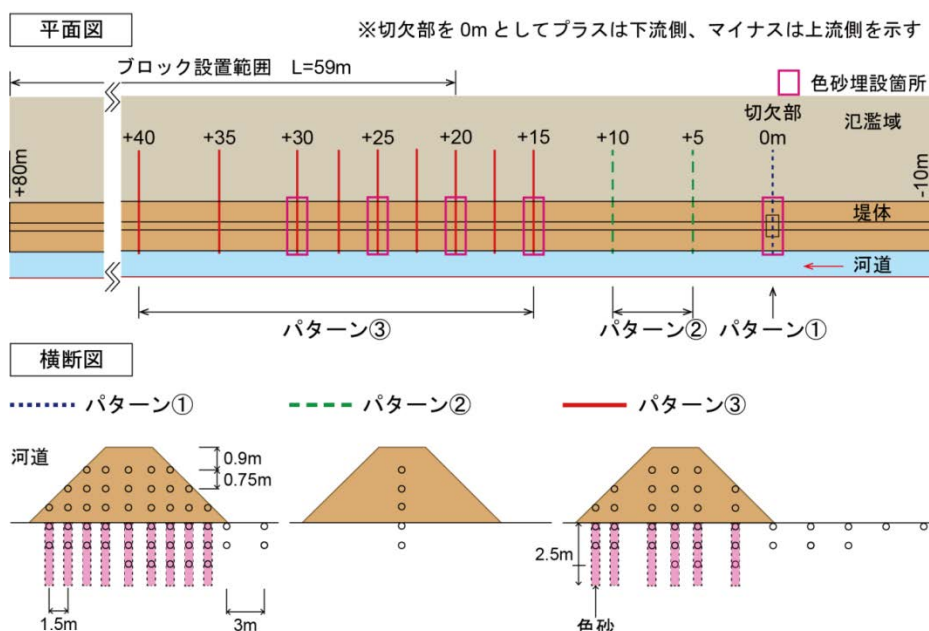


図-7 加速度センサーの配置図

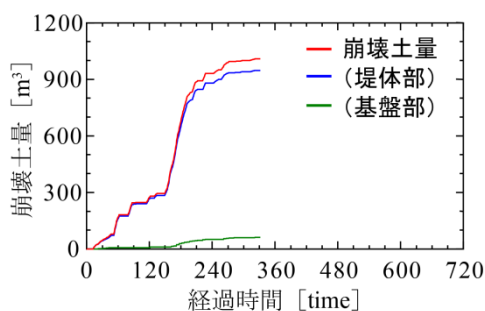


図-8 堤体崩壊量の時間変化

に進行するStep3に相当していることが分かる。

つぎに、ブロックを撤去し再通水した第2回実験の流況については図-5に示すように、氾濫流の主流部の向きは第1回実験の破堤拡幅が停止した30mに比べ、氾濫流下流側により大きく斜め方向である。

破堤拡幅は図-6に示すように、堤体の崩壊が再度進行し、破堤幅約50mまで拡幅した。その後、約120分通水し、破堤拡幅がほぼ停止したことを確認し、ゲートからの通水を停止した。

3. 2 堤体内部の崩壊状況

前述のように、堤防天端の破堤幅から破堤拡幅の抑制を推定した。しかし、破堤拡幅は水面下の堤体や堤体基盤部の侵食により進行していることが実物大破堤実験¹¹⁾により分かっている。そこで、図-7に示す堤体や堤体基盤部に設置した加速度センサーの流出結果を用いて、越水開始後の堤体崩壊量の算出を行った。そ

の結果を図-8に示す。崩壊土量は、図-7に示すセンサーの流出結果から求めた各区間断面積に、各測点間の距離を乗じ、平均断面法により算出した。崩壊土量は1分間隔とし、5分毎のデータを平均とした。なお、第2回実験の破堤区間では、計測可能期間の短いセンサー¹¹⁾を設置していることから、観測データが得られていない。

堤体崩壊土量の時間変化は図-8に示すように、越水直後の崩壊土量はわずかであるが、その後、破堤拡幅の進行にあわせて急激に崩壊量が增大し、ブロックに到達した約180分以降では減少していることが分かる。ところが、堤体基盤部は、ブロック到達以降に増大している。これは、図-7に示すように、ブロック到達前の区間では堤体基盤部にセンサーを密に配置していないため、堤体断面積を過小評価していると考えられる。破堤拡幅速度について、図-6に示す堤防天端と比べると、ブロックに到達した約180分経過後では、崩壊速度が顕著に遅くなっている。これは、ブロックが堤体や堤体基盤部を覆うことで土砂の流出を防いだと考えられる。

3. 3 水位の時間変化

図-9に河道と氾濫域及び裏法尻の水位観測結果を示す。水位は図-2に示す破堤実験区間の水位計を用いて平均水位とした。第1回実験(破堤幅30mまで)はゲート閉操作開始まで、第2回実験(破堤幅30m以降)は一定流量70m³/s到達以降を示す。

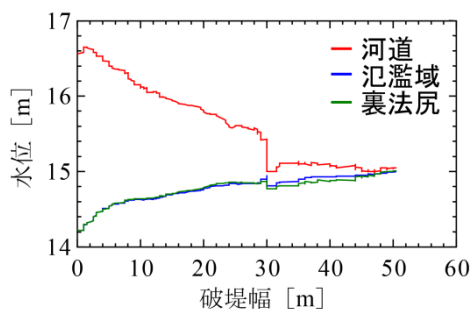


図-9 水位の時間変化

破堤幅が狭い段階では、河道水位が高く、河道と氾濫域の水位差が大きい。その後、破堤幅が広がるとともに、河道と氾濫域の水位差が小さくなる。再通水後の第2回実験（破堤幅30m以降）では、破堤幅の広がりとともに水位差が小さくなる。また、破堤幅が停止した破堤幅約50mでは、ほぼ河道と氾濫域の水位差が無くなる。

3. 4 破堤開口部からの氾濫流と流速の低減

破堤幅の抑制は、特に減災という視点では河道内から流出する氾濫流を抑制することが重要である。ここでは、図-10に示す氾濫流の流量変化と流速の低減効果を把握する。図-10上図に示す破堤幅毎の流量変化について、上流流量はゲートからの通水流量、下流流量は図-2に示す破堤実験区間の下流（切欠部から+125m）で観測した ADCP 観測流量とし、ゲート閉操作開始時刻までの流量を示す。本来ならば上流流量は、図-2に示す破堤実験区間の上流（切欠部から-50m）で観測した ADCP 観測流量を用いて稲垣らの手法¹²⁾を適用するべきである。ところが図-6に示すように第1回実験の長時間通水に伴い、図-2に示す切欠部上流の河道急縮部で大きく河床が低下し、第2回実験で ADCP 観測流量に大きなばらつきが見られた。したがって、本研究では上流流量はゲート流量を用いることとし、氾濫流量は上下流流量の時間差を考慮した差分で算出した。

氾濫流量は、破堤幅とともに増加し、再通水後と比べると、破堤幅を破堤幅 30m で止めることにより、氾濫流量が 30% 低減したことが分かった。

つぎに、ブロックを設置したことによる流速の低減効果を把握するため、ブロックの設置以外は同条件で行った、既往の破堤実験の Case1¹¹⁾と比較を行う。図-6に示す破堤幅がほぼ停止した破堤幅 30m 地点を比べると、ブロックがある場合は流水に対する抵抗が増加し、裏法面から裏法尻周辺にかけて表面流速が小さ

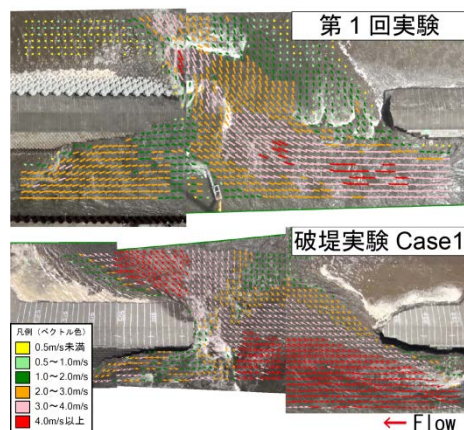
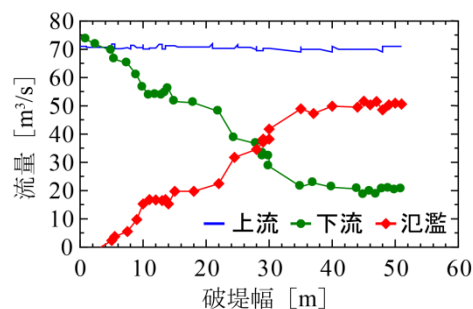


図-10 河道から流出する氾濫流

い傾向にある。なお、両実験で河道上流の流速に違いが見られるが、今回の実験では、前述のとおり河道急縮部で大きく河床が低下したことによるものと考えられる。

ブロック移動状況を把握するため、トータルステーションを用いて通水前後で平面計測を行った。ブロックの移動状況と第1回実験終了後の地形を図-10に示す。ブロック形状は四辺形として表し、移動距離はブロック端点の上下部の2点で計測した。計測の結果、最上流端の法面上段に配置した No.1 が最も大きく移動し、その平面移動距離は 6.94m である。これは、堤体の崩壊とともに不安定となったブロックが落下し、ブロック同士のかみ合わせが外れたことにより、氾濫域側へ転動したものと考えられる。これ以降の下流側では、それぞれのブロックに沈下や若干の移動が生じることにより、全体的な配列を乱しているが、ほぼ移動していないことが分かる。法尻部に配置したブロックは、堤体の崩壊に挙動を左右されず、加えて流水により下部の土砂が吸い出されるが、図-10右図に示すように河床の変化に追従し安定している。すなわち、法尻にブロックを配置することで、落下するブロックの移動を防ぎ、全体的な安定性を保てるため、群体として流水への抵抗となる。また、河床の低下により主流部の流路が固定化され、図-10右図に示すように破

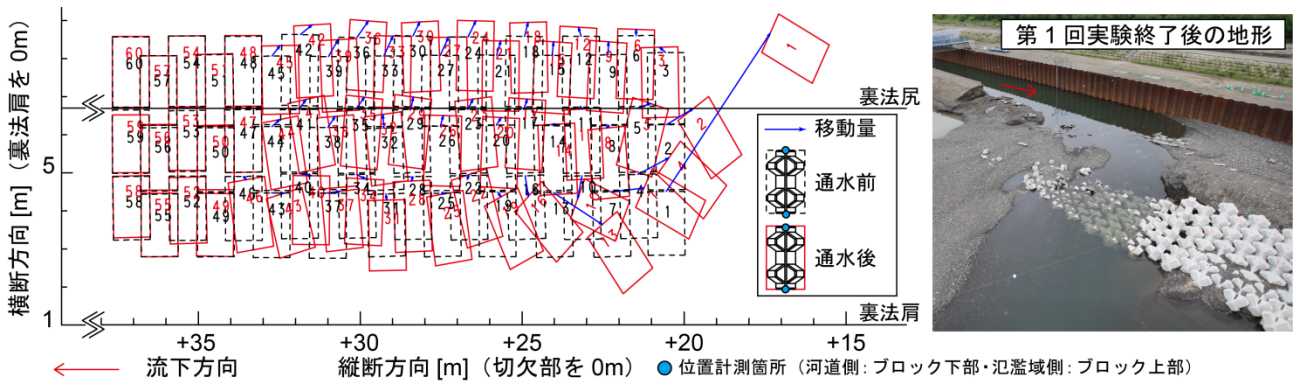


図-11 第1回実験終了後のブロックと地形の変化 (左図：ブロックの移動状況, 右図：実験終了後の地形)

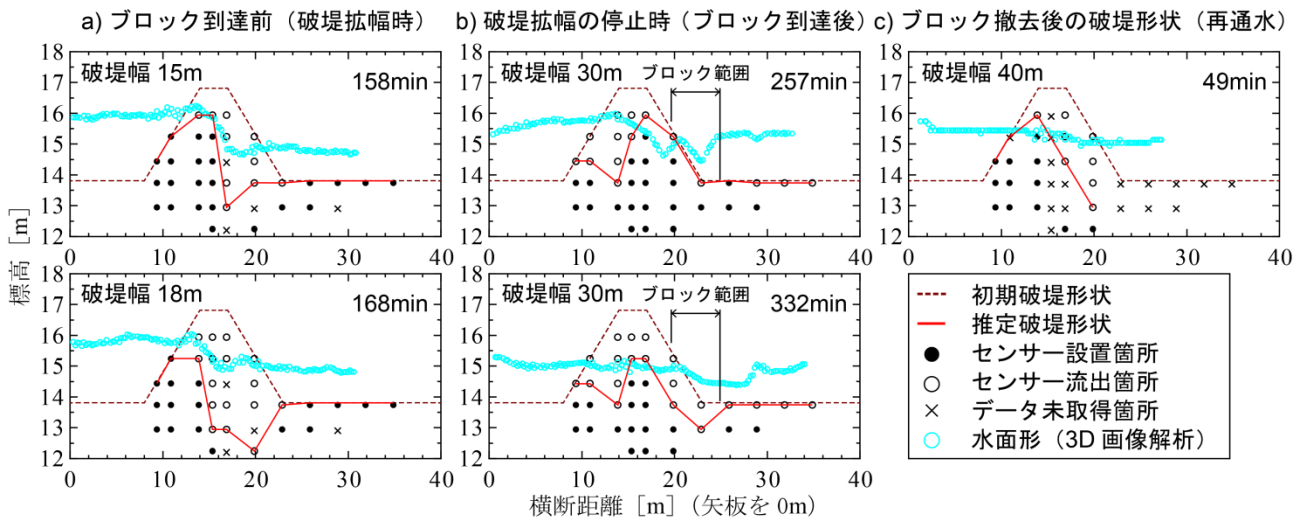


図-12 加速度センサーによる破堤拡幅過程の推定 (上図：センサー配置図, 下図：推定破堤形状)

堤部際からやや上流側に氾濫流量を集めるような流れとなったと考えられる。破堤拡幅に効果的なブロック個数については、破堤幅約30mで拡幅が停止したことやブロックの移動状況から、40個程度であると考えられる。なお、ブロックの氾濫流に対する移動限界や安定性及び流速の低減効果については今後の課題である。

3. 5 破堤拡幅の抑制過程

3. 5. 1 ブロック到達前 (破堤拡幅時)

はじめに、図-11a)に示す切欠部から15m下流に設置したセンサーの結果を用いる。破堤幅15mに到達した越水開始から158分後では、裏法側の侵食が先行し、さらに10分後には堤体基盤部の侵食が進んだ。河道と裏法側との水位差は1m程度である。このとき氾濫流の主流部は、前述のとおり氾濫域下流側やや斜め方向である。つまり、侵食の進んだ法尻周辺が起点となり、主流部が氾濫域下流側へやや斜め方向に集中したと考えられる。

3. 5. 2 破堤拡幅の停止時 (ブロック到達後)

ついで、ブロック到達後は図-11b)に示す破堤拡幅が停止した破堤幅約30m地点のセンサーの結果を用いる。破堤幅30mに到達した越水開始から257分後では、裏法側の侵食が進まず、一部、表法側の侵食が見られるも、破堤拡幅はほぼ停止している。さらに75分経過後も侵食は進まないが、ブロック下部の土砂が吸い出されるように、堤体基盤部が低下している。河道と裏法側との水位差については、ブロックによる水位の堰上げにより小さい。このように、裏法側へブロックを配置することで、裏法側の堤体と堤体基盤の侵食を防止や水面勾配を小さくし、前述のとおり主流部の向きを破堤拡幅方向から氾濫域側へ変化させることができるため、破堤拡幅の抑制に効果的である。

3. 5. 3 ブロック撤去後の再通水

その後、ブロック撤去後の第2回実験は、図-11c)に示す破堤拡幅速度が安定した破堤幅 40m 地点のセ

表一 実験結果のまとめ

項目	①破堤拡幅時 (ブロック到達前)	②破堤拡幅の停止時 (ブロック到達後)	③再通水実験の破堤拡幅時 (ブロック撤去)
水位	・ 河道水位が高く、河道と裏法側の水位差が大きい。	・ ブロックによる水位の堰上げにより、河道と裏法側の水位差が小さい。	・ 河道水位が低くなり、河道と裏法側の水位差が小さい（一方、裏法側の水深は大きい）。
流況	・ 氾濫流の主流部は、氾濫域下流側へ、やや斜め方向となる。	・ 氾濫流の主流部は、河道縦断方向から氾濫域の方向となる。 ・ ブロックがあることで、表面流速が遅い。(実物大破堤実験 ¹¹⁾ との比較)	・ 氾濫流の主流部は、氾濫域下流側へ、大きく斜め方向となる。
堤防の侵食	・ 主に裏法側が侵食される。	・ 主に表法側が侵食される。	・ 主に裏法側が侵食される。
基盤の侵食 (落掘)	・ 裏法側が大きく侵食される。 ・ 裏法側の侵食箇所を起点として、主流部が氾濫域下流側のやや斜め方向へ集中する。	・ 裏法側の侵食は小さい。 ・ 主流部の流路が固定化され、破堤部から氾濫域方向に氾濫流量を集めるような流れ。	・ 裏法側が侵食される。 ・ 裏法側の侵食箇所を起点として、主流部が氾濫域下流側の大きく斜め方向へ集中する。
実験後の破堤開口形状	・ 破堤部下流端は裏法側がやや斜めに開いた形状	・ 破堤部下流端は表法側が開いた形状	・ 破堤部下流端は裏法側が大きく斜めに開いた形状
ブロックの 効果		・ 裏法側の水位を堰上げる。 ・ 主流部を破堤拡幅方向から氾濫域側へそらし、破堤部の流速を低減させる。 ・ 堤防と堤防基盤部の侵食防止。 ・ 主流部の流路を固定化する。	

ンサーの結果を用いる。堤体の侵食は、再度、裏法側が先行し始める。河道と裏法側との水位差は、河道水位が低くなり、小さくなっている。一方、裏法面の水深は、破堤拡幅が停止した時に比べ大きいことが分かる。このとき氾濫流の主流部は、前述のとおり氾濫域の下流側に大きく斜め方向であり、この傾向はブロック到達前と同じである。

以上について、表一 1に①破堤拡幅時（ブロック到達前）、②破堤拡幅の停止時（ブロック到達後）、③再通水実験の破堤拡幅時（ブロック撤去）の3段階に分類し整理する。

4 まとめ

本研究では、破堤拡幅後の減災対策として、実際の根固めブロックと実物大実験により、破堤拡幅抑制工の実験を行い、破堤拡幅と氾濫流量を抑制することができた。破堤拡幅の抑制過程についてa)破堤拡幅の進行時とb)破堤拡幅の停止時に分類する。まず、a)破堤拡幅の進行時は、主に堤体の裏法側の侵食が先行して

進み、さらに堤防基盤部が大きく侵食される。そのため、河道からの氾濫流の主流部は、河道縦断方向から氾濫域下流側へ斜め方向となっていく。また、裏法面における水深は大きい。ついで、b)破堤拡幅の停止時は、ブロックが裏法側にあることで、堤体と堤体基盤部の侵食が防止される。そのため、裏法側の水深は小さくなり、加えて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も小さくなる。また、氾濫流の主流部を氾濫域方向へ変化させるとともに、ブロックの群体が流速を低減させる。これらが相まって堤体崩壊を防ぎ、破堤拡幅を抑制しているものと考えられる。このように、裏法側の侵食が先行する段階（Step3）¹¹⁾では、裏法側にブロックを配置することで破堤拡幅を効率的に抑制し氾濫流量を低減できると考えられる。ただし、本研究では、実物大破堤実験¹¹⁾の結果を踏まえ、破堤箇所の下流側にブロックを設置したが、川幅、洪水継続時間、堤体や地盤の材料特性及び地形等により、破堤拡幅が上流側に及ぶ可能性があるため、その設置位置については注意が必要である。

- 1) 甲斐浩幸, 渡部秀之, 江上綾子, 大塚健司, 中山修, 宮武晃司, 平田嘉之: 矢部川堤防決壊の被災メカニズムに関する考察, 河川技術論文集, Vol.19, pp.51-56, 2013.
- 2) 島田友典, 平井康幸, 辻珠希: 千代田実験水路における越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第54 巻, pp. 811-816, 2010.
- 3) 島田友典, 横山洋, 平井康幸, 三宅洋: 千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第55巻, pp. 841-846, 2011.
- 4) 例えば, 福岡捷二, 藤田光一, 加賀谷均: アーマレビー法尻工の水理設計, 水理講演会論文集, pp.365-370, 第31回, 1987.
- 5) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 辻珠希: 千代田実験水路における横断堤越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第53 巻, pp. 871-876, 2009
- 6) 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, 河川技術論文集, 第6巻, pp.1-6, 2000.
- 7) 例えば, 末次忠司, 舘健一郎, 小林裕明: 防災樹林帯による氾濫流制御に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, pp. 805-809, 1998.
- 8) 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, 1989.
- 9) 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: 国土交通省北海道開発局, 土木研究所寒地土木研究所, 平成24年10月.
- 10) 藤田裕一郎: 破堤部の拡大過程とその防止軽減に関する研究, 洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究, pp.107-125, 1986.
- 11) 飛田大輔, 渡邊康玄, 泉典洋, 武田淳史, 伊藤幸義, 横山洋, 根固ブロックによる破堤抑制効果の検討, 河川技術論文集, 第19巻, 2013.
- 12) 稲垣達弘, 島田友典, 横山洋, 三宅洋: 十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測, 河川技術論文集, 第17巻pp.371-376, 2011.

LEVEE BREACH CONTROL EXPERIMENT USING A FULL-SCALE LEVEE AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL FLUME

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

KAKINUMA Takaharu

TOBITA Daisuke

Abstract : For the purpose of mitigating flood damage by overflow from a levee breached, the authors conducted an experiment using the full-scale levee at the Chiyoda Experimental Flume on the Tokachi River. The scale of the flume is 1300m long and 30m wide, accompanying a flood area of 80m width. In the experiment works, a group of blocks were installed on the slope of the levee 20 m downstream from the artificial breach, and water was let flow from upstream. After the water was let flow, when the breach progressed downstream to the concrete armor blocks, the blocks protected the failure levee. The downstream progress of breach was expected to be arrested by the concrete blocks which were expected to weaken the inundation flow from the channel. The control effects by the concrete blocks were examined.

The authors concluded that placing concrete blocks on a downstream slope of levees can control levee breaches effectively.

Key words : Levee Breach, Concrete Blocks, Chiyoda experimental flume