

千代田実験水路における破堤拡幅抑制工実験

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

飛田 大輔¹・柿沼 孝治²・横山 洋³・武田 淳史⁴

Daisuke TOBITA, Takaharu KAKINUMA, Hiroshi YOKOYAMA and Atsushi TAKEDA

¹正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 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 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 工博 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

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

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, large-scale experiment, Chiyoda experimental flume*

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、小縮尺模型²⁾や実物大実験³⁾による現象解明や辻本らによる実災害への数値解析の適用⁴⁾とともに、越水強化対策⁵⁾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⁶⁾。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⁷⁾。また、高木らは水防工法に関し、月輪工の工学的な評価を行っている⁸⁾。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⁹⁾や破堤拡幅を考慮した水防林の効果の検討¹⁰⁾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

(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としては、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¹¹⁾。一方、破堤拡幅抑制工は、具体的には、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することにより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。

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、一級河川十勝川の水防備蓄資材として最も保有数が多く、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。

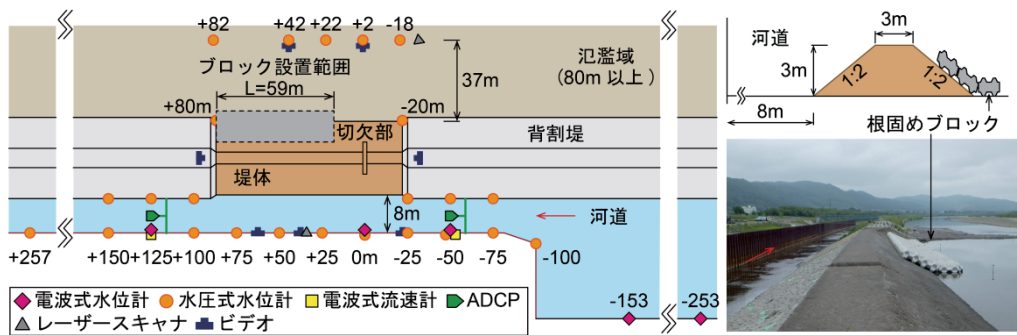


図-1 実験水路の概要

実験は、最初に実物大の河川堤防を用いて破堤拡幅を抑制するための実験を行った（以下、第1回実験）。つづいて、ブロックの破堤拡幅に対する効果を検証するため、第1回実験終了後の状態からブロックのみを撤去し、再度通水（以下、第2回実験）を行うことで破堤拡幅の抑制過程について検証を行った。

2. 実験概要

(1) 実験水路

実験水路諸元等及び主な観測項目を図-1に示す。実験水路は通水量に限界があり、そのままでは越流に必要な水深を確保できないことから、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。そのため、実河川と比べ、氾濫流が河道流へ及ぼす影響が大きくなる可能性がある。河床勾配は1/500で整形し、越水開始までの平均水深（目標）は2.7m、Fr数は0.47である。また、氾濫域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-1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-2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1mごとに上中下層である。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) 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³⁾では、氾濫流の主流部が裏法側にぶつかり、裏法側の堤体侵食と崩壊が先行することにより、破堤拡幅が進行している

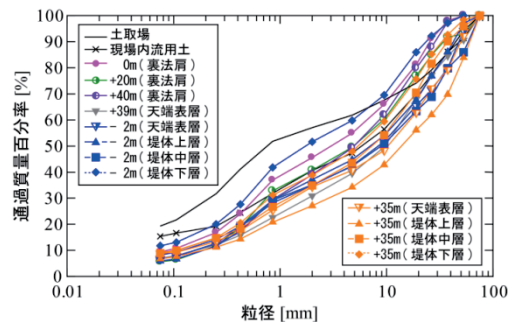


図-2 用いた材料の粒度分布

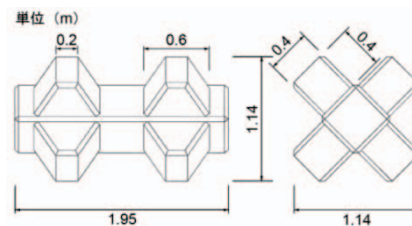


図-3 根固ブロックの形状

ことが観察されている。また、藤田¹²⁾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で、破堤拡幅速度を減ずる方法を示した。そこで、破堤拡幅の抑制には、堤体の侵食が先行する裏法側の侵食を防ぐことが重要であると考えた。まず、実物大実験の予備実験として、水理模型実験を用いたブロック配置の検討¹³⁾を行った。ブロックの配置は図-1に示すように裏法面2列、裏法尻1列とすることで、裏法側の堤体侵食の防止や氾濫流の流速低減が期待できる配置とした。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-3に示す。重さは2トン、長さ1.95m、幅1.14m、高さ1.14mである。表面には高さ0.4m、幅0.6m、厚さ0.4mの台形型をした脚部を有しており、ブロック同士を噛み合わせると安定しやすくなる形状である。

主な観測は、図-1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拡幅の抑制過程を把握するため、

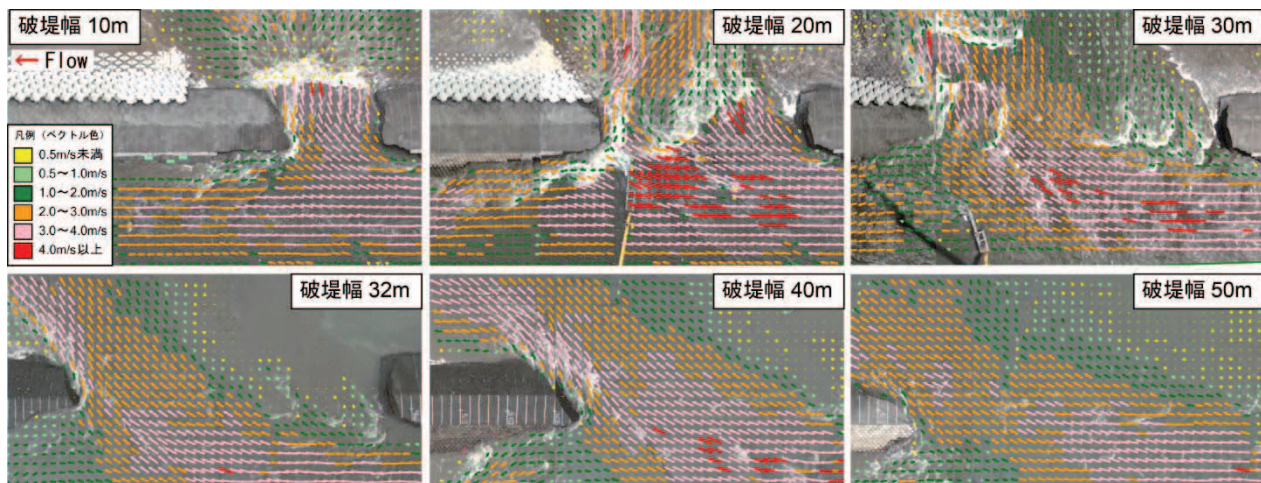


図-4 PIV流況観測結果（上図：第1回実験，下図：第2回実験）

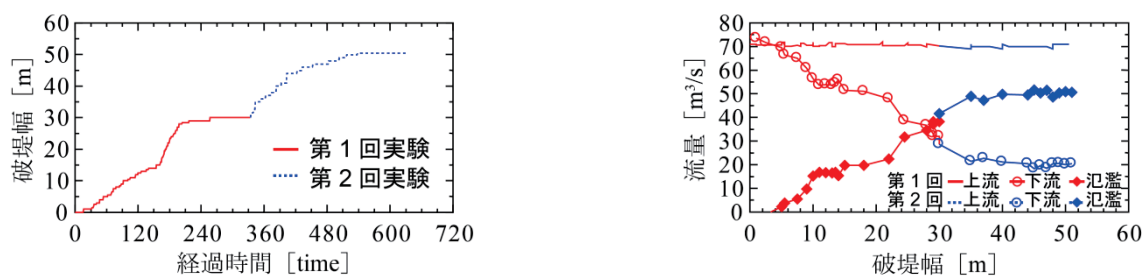


図-5 破堤幅の時間変化

後述するように、特にブロック設置区間とその前後において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、破堤拡幅が停止したこと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

(1) 破堤拡幅の時間変化

真上からのPIV (Particle Image Velocimetry) による流況観測結果を図-4、破堤幅の時間変化を図-5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³⁾でも観察されたように、破堤拡幅は主に下流側となったため、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回実験の流況は図-4に示すように、ブロック到達前（破堤幅 10m ）では、河道内から流れる氾濫流の主流部が、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である。破堤幅の時間変化は、図-5に示すように、越水開始後、約30分経過頃に下流側へ拡幅しはじめ、約180分後にはブロック設置位置まで拡幅した。その後、約 30m まで拡幅したが、それ以上は拡幅せず、約80分通水後に通水を停止した。実物大破

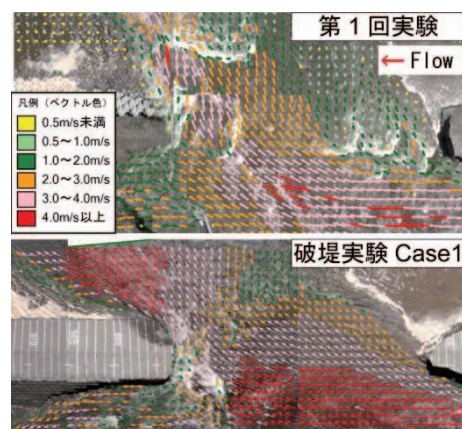


図-6 氾濫流の変化

堤実験³⁾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、破堤拡幅を抑制した幅 20m から 30m にかけての段階を推定すると、破堤拡幅が急激に進行するStep3に相当している。つぎに、第2回実験の流況は図-4に示すように、氾濫流の主流部の向きは第1回実験に比べ、氾濫流下流側により大きく斜め方向である。破堤幅は図-5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、通水を停止した。

(2) 破堤部からの氾濫流と流速の低減効果

破堤拡幅の抑制は、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-6に示す氾濫流の変化からブロックによる破堤

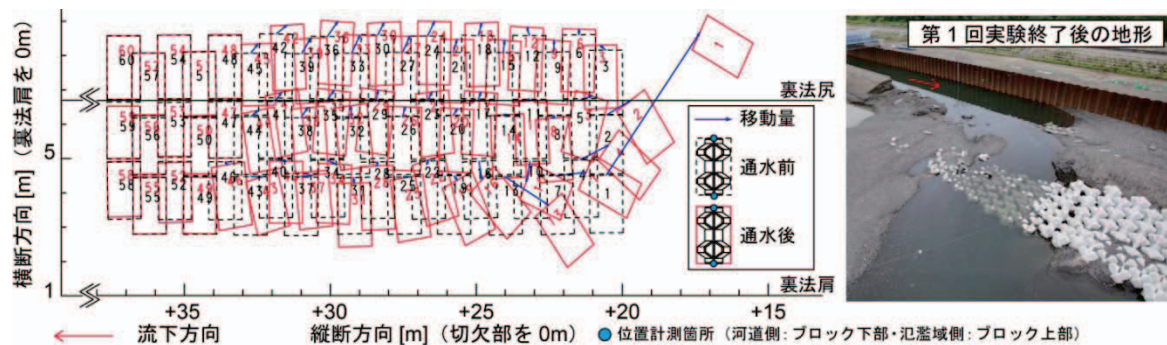


図-7 第1回実験終了後のブロックと地形の変化（左図：ブロックの移動状況，右図：実験終了後の地形）

抑制効果を把握する。まず、破堤幅毎の流量変化を図-6上図に示す。上流流量はゲートからの通水流量，下流流量は図-1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-1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¹⁴⁾を適用すべきである。ところが図-5に示すように第1回実験の長時間通水に伴い，図-1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。第1回実験では破堤幅とともに氾濫流量が増加している。第2回実験と比べると，破堤幅を破堤幅30mで止めることで，氾濫流量が約30%低減した。

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Case1³⁾と比較を行う。図-6下図に破堤幅約30mの比較を示す。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。

(3) ブロックの移動状況

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-7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

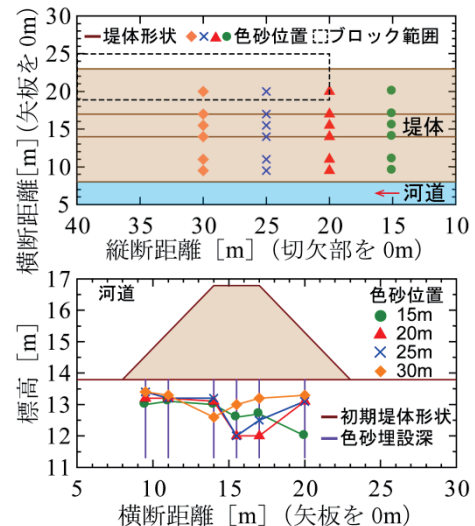


図-8 最大洗掘深の推定(上図：平面図，下図：横断面図)

配列を乱しているが，ほぼ移動していないことが分かる。法尻部のブロックは，堤体崩壊に挙動をされず，加えて流水により下部の土砂が吸い出されるが，図-7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-7右図に示すように破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。破堤幅に効果的なブロック個数は，破堤幅の停止状況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は今後の課題である。

(4) 色砂による最大洗掘深の推定

堤体基盤部に埋設した色砂の結果から，ブロック到達前後における，裏法側の最大洗掘深の変化を把握する。計測は第2回実験終了後であるが，第2回実験の堤体や堤体基盤部の侵食は，主に下流方向（切欠部から下流30m以降）で生じている。よって，第1回実験のブロック設置範囲の前後における破堤範囲（切欠部から下流30m迄）の堤体基盤部では，通水による侵食の影響が少ないもの

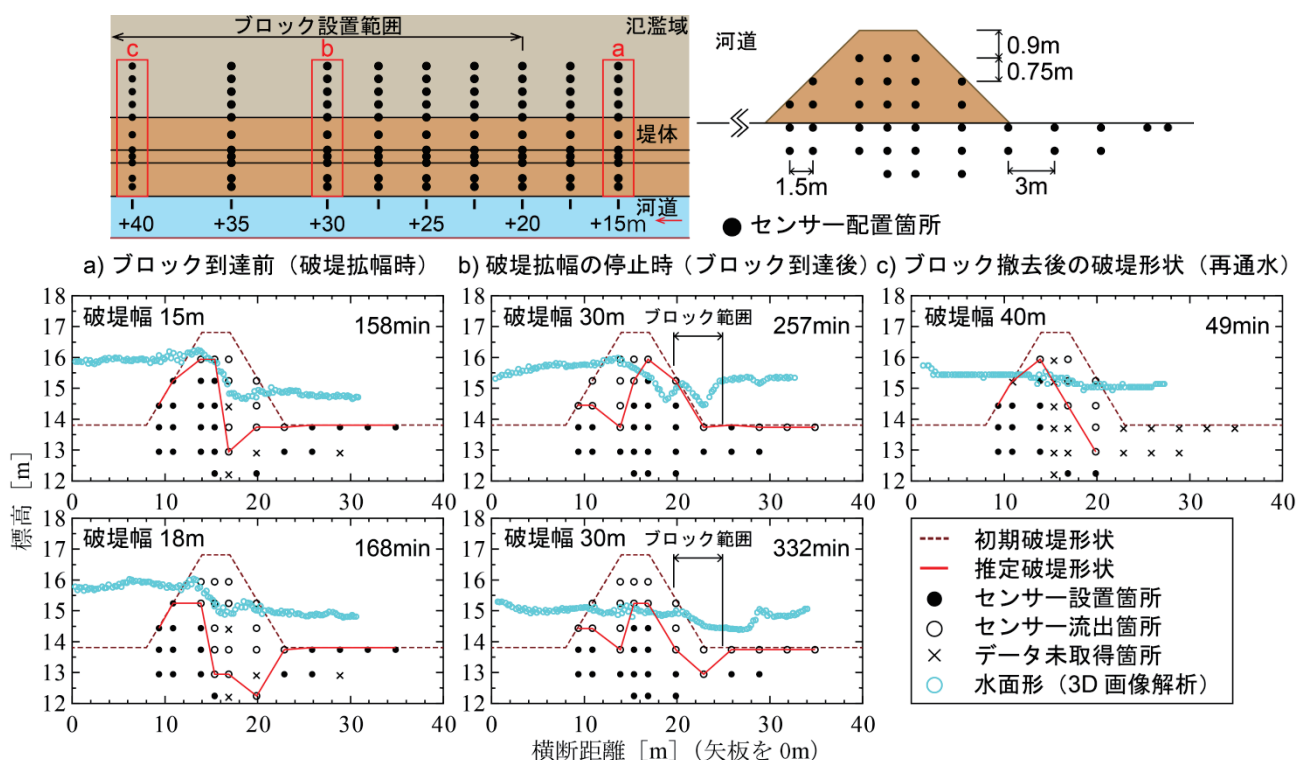


図-9 加速度センサーによる破堤拡幅過程の推定 (上図：センサー配置図, 下図：推定破堤形状)

として推定する。裏法側の洗掘について、ブロック到達前（破堤幅15m）は約1.8m掘れているが、ブロック到達後では約0.7mしか掘れておらず、ブロックによって裏法尻付近の侵食、いわゆる落掘の形成を防ぐことができたと考えられる。つまり、落掘は堤体の侵食が進行することにより形成されるため、堤体の裏法側の侵食や崩壊を防ぐことで破堤拡幅を抑制することが可能と考えられる。そこで、裏法側の破堤拡幅過程に着目し考察する。

4. 破堤拡幅の抑制過程

破堤拡幅過程について、破堤拡幅の進行時（ブロック到達前）、破堤拡幅の停止時（ブロック到達後）及びブロック撤去後の第2回実験（再通水実験）の3段階に分類する。ここでは、加速度センサーの流出結果を用いて水面下を含む堤体の侵食過程を推定する。図-9にセンサー配置図（上図）とそれぞれの段階における推定破堤形状を示す。配置図は、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。●印はセンサー設置箇所、○印は流出箇所、×印はデータ未取得箇所である。推定破堤形状は、図中の時刻において流出していたセンサー同士を結んだ。また、クレーン2台上空から撮影し、3D画像解析した水面形状についてもプロットした。

(1) ブロック到達前（破堤拡幅時）

はじめに、図-9a)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。

(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-9b)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ず、ブロック下部の土砂が吸い出され、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) 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-9c)に示す破堤拡幅速度が安定した破堤幅40m地点のセ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

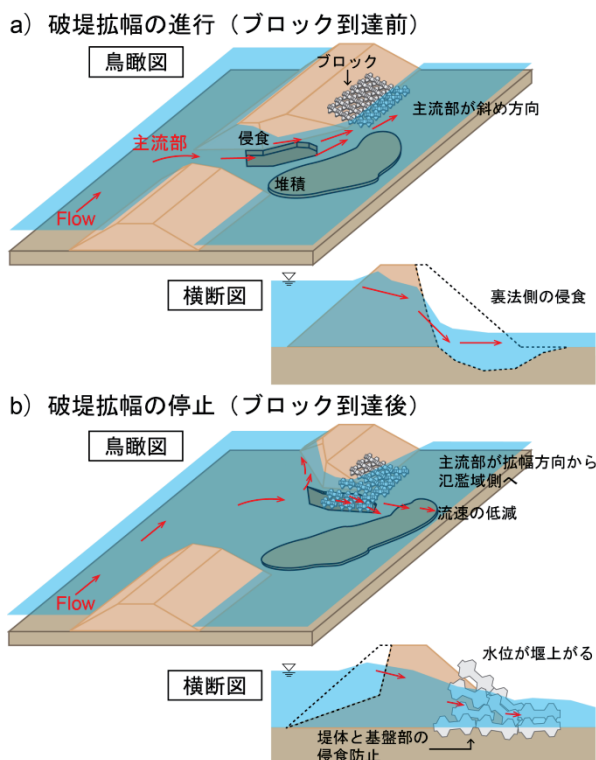


図-10 破堤拡幅抑制の過程（概念図）

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。

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。

本研究で得られた破堤拡幅の抑制過程を図-10に示す。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、堤防基盤部が大きく侵食される。そのため、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。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る。また、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。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する。よって、裏法側の侵食が先行する段階（Step3）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³⁾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、設置

位置については注意が必要である。

今後は、より厳しい流況で堤体崩壊過程の異なる段階やより少ないブロックで破堤拡幅を抑制する実験を行い、現場に適用可能な技術の確立を図っていく必要がある。

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実験検討会より、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) 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) 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、京大防災研究所年報、第27号B-2、pp.369-392、1894。
- 3) 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。
- 4) 辻本哲郎、北村忠紀、岸本雅彦：砂質堤防の破堤口拡大過程のシミュレーションと破堤水理、土木学会河川技術論文集、第8巻、pp.31-36、2002。
- 5) 例えば、福岡捷二、藤田光一、加賀谷均：アーメ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。
- 6) 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、水工学論文集、第53巻、pp.871-876、2009。
- 7) 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。
- 8) 高木不折、辻本哲郎、鷺見哲也、井関明子：パイピングによる破堤過程と「月輪工」の効果の評価、河川技術論文集、第5巻、pp.123-128、1999。
- 9) 末次忠司、館健一郎、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。
- 10) 秋山壽一郎、重枝末玲、岡村賢治、和田浩輔：拡幅プロセスを考慮した破堤氾濫流に対する水防林の減災効果、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.70、No.4、I_1531-I_1536、2014。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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。

(2014. 4. 3受付)