

河川堤防の破堤拡幅に対する 根固めブロックの効果に関する研究 —千代田実験水路における破堤拡幅抑制工実験について—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○飛田 大輔
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 柿沼 孝治
北海道開発局 帯広開発建設部 治水課 武田 淳史

国内最大の河川水理実験施設である十勝川千代田実験水路を用いて、破堤幅の拡幅と氾濫流量を抑制するための破堤拡幅抑制工実験を行った。実験は、実物大の河川堤防を用いて越水破堤させ、2トンの根固めブロックを堤防上に設置することで、破堤拡幅の進行を抑制するものである。これにより氾濫被害の軽減を図る工法開発を行う。

実験の結果、破堤拡幅が進行し、氾濫流がブロックの群体に達すると氾濫流の流勢が緩和されることで、破堤拡幅の進行と氾濫流量を抑制することができた。

キーワード：減災、破堤、根固めブロック、十勝川千代田実験水路

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などの検討がされており、島田ら⁴⁾はそれらを体系的に整理している⁵⁾。藤田、諏訪は、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、根固めブロックを用いて、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に

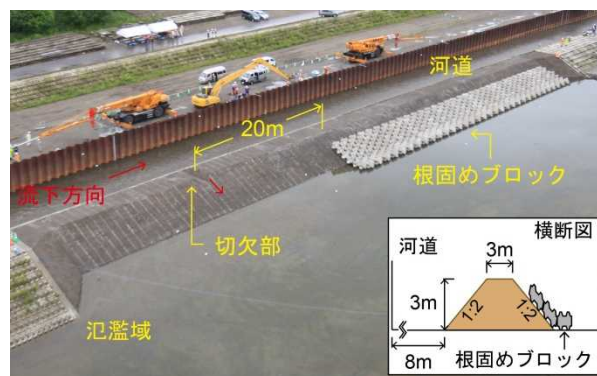


図-1 実験状況（越水開始前）

破堤箇所の下流側において、破堤の進行が達する前にブロックを設置することで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、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

(1) 実験水路

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。河道の河床勾配は 1/500 で整形した。氾濫域は、横断方向に 80m 以上を確保し、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、締固め度は平均 90% 以上である。堤体は、高さ 3m、天端幅 3m、法勾配 2 割で整形し、破堤のきっかけとして深さ 0.6m の切欠部を設けた。また、芝を張らない土堤とし、流水による侵食を防ぐため、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で示す。主に砂礫分の多い材料で構成されている。

(2) 実験方法

破堤拡幅後の堤体侵食は、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⁹⁾。藤田¹⁰⁾は、小縮尺模型実験を用いて、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、破堤拡幅を抑制するためには、裏法側の侵食を防ぐことが効果的と考え、水理模型実験を用いた予備実験でブロック配置の検討¹¹⁾を行った。その結果、図-1 に示すように裏法面 2 列、裏法尻 1 列に配置することで堤体侵食や氾濫流の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約 59m 設置した。実験に用いたブロック諸元を図-3 に示す。重さは 2 トンであり、噛み合わせで安定しやすくなる形状である。

主な観測は、水位や流量流速である。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、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。

通水は、流量 70m³/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。

実験は、破堤の進行がブロックの位置まで到達した際、ブロックがあることで破堤拡幅を抑制することを期待するものであり、その効果検証を行う（第 1 回実験）。また、ブロックの効果を確認するため、堤体に設置したブロックを撤去し、破堤拡幅の変化について検証を行う第 2 回実験（再通水）を行った。

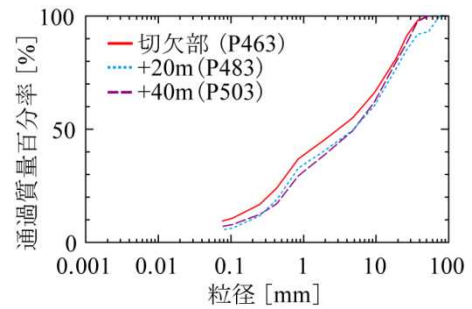


図-2 堤体の粒度分布

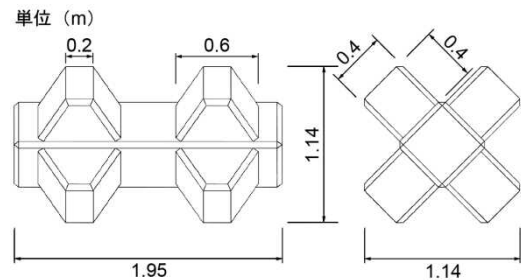


図-3 実験に用いた根固めブロック

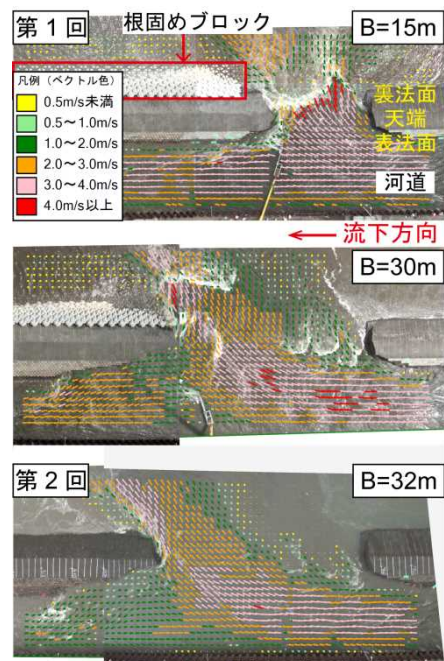


図-4 氾濫流況 (PIV解析)

3. 実験結果と考察

(1) 実験状況

クレーンを用いて真上から流況を撮影し、PIV (Particle Image Velocimetry) 解析した結果を図-4に示す。第1回実験の氾濫流の主流部は、ブロック到達前 (破堤幅15m) では、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に偏流している。ブロックを撤去し再通水した第2回実験の流況では、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となっている。

(2) 破堤幅の時間変化

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動画を0.5mピッチで読み取った天端中央の幅である。破堤拡幅は、主に下流側に進行したため、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回実験は通水流量が一定到達後である。第1回実験では、越水開始から約30分経過後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。約260後に破堤幅約30mまで拡幅したが、それ以上は拡幅せず、約80分通水しゲートからの通水を停止した。ブロック撤去後の第2回実験では、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。

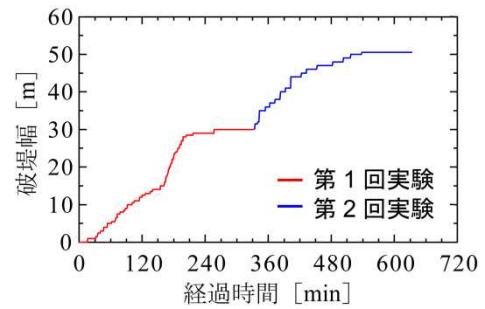


図-5 破堤幅の時間変化

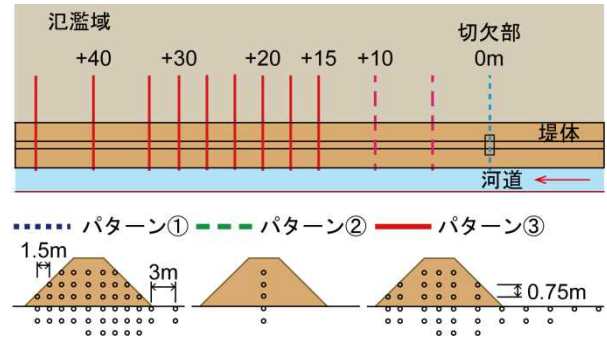


図-6 加速度センサーの配置図

(上：平面図、下：横断面図)

(3) 堤体内部の崩壊状況

破堤拡幅の変化については、前述のとおり、天端幅の時間変化から推定した。しかし、破堤拡幅は水面下の堤体や堤体基盤部の侵食を伴いながら進行している。そこで、図-6に示す堤体や堤体基盤部に設置した○で示す加速度センサーの流出結果を用いて、越水開始後の崩壊土量の算出を行った。結果を図-7に示す。崩壊土量は、図-6に示す加速度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、計測可能時間の短いセンサーを設置していることから、観測データが得られていない。

崩壊土量は図-7に示すように越水直後はわずかであるが、その後、破堤拡幅の進行にあわせて急激に崩壊量が増大し、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、基盤部の崩壊土量は、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に示す天端幅の時間変化と比べると、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。

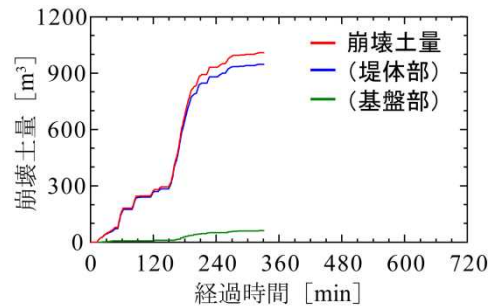


図-7 崩壊土量の時間変化

(4) 実験終了後の地形と土砂堆積

図-8に実験終了後の河道や堤体の侵食状況、堤体及び河道内から氾濫域へ流出した土砂の堆積状況を示す。第1回実験では、破堤部上流の河床が大きく洗掘され、氾濫域には土砂が広く分散していることが分かる。堤体の侵食形状については、下流側の開口形状は表法側が斜め形状に大きく削れ、河道側に土砂が堆積している。氾濫流の主流部は非堆積域となっており、その方向は河道に直交する横断方向となっている。主流部の上流側は堆積域であるが、下流側は非堆積域が形成されている。第2回実験では、下流側の開口形状は裏法側が大きく斜め形状に大きく削れている。また、主流部は氾濫域下流側に大きく斜めに向き、下流側に堆積域が形成され、第1回実験に比べ氾濫土砂の拡散範囲が広がっている。

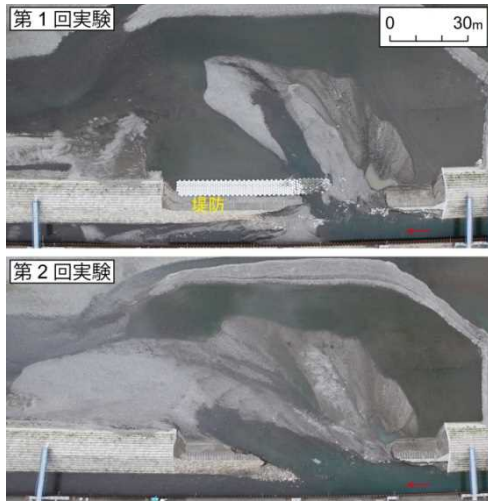


図-8 実験終了後の地形

(5) 氾濫流量の低減効果

破堤幅の抑制においては、河道内から流出する氾濫流量を抑制することが重要である。そこで、氾濫流量の変化を整理する。氾濫流量を図-9 に示す。上流流量はゲートからの通水流量、下流流量は破堤実験区間の下流側（切欠部から 125m 下流側）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。また、上流流量と下流流量の時間差を考慮した。本来、上流流量は破堤実験区間の上流（切欠部から 50m 上流側）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。ところが第1回実験の長時間通水に伴い、切欠部上流の河道で大きく河床が低下し、第2回実験の ADCP 観測流量に大きなばらつきが見られた。そのため、本研究では上流流量はゲート流量を用いることとした。

第1回実験の氾濫流量は、時間の経過（破堤幅）とともに増加しており、前述の図-5 に示す破堤幅の変化に比例している。ブロック撤去後に再通水を行った第2回実験と比べると、破堤幅の進行を破堤幅 30m（約 260 分経過後）で止めることで、氾濫流量が約 30%低減された。

裏法尻に設置したブロックが氾濫流量に及ぼす影響について整理を行った。図-10 に破堤幅と単位幅当りの氾濫流量比の関係を示す。ブロックを設置せず同一条件で行った既往の破堤実験³⁾と比較を行う。単位幅当りの氾濫流量比は、次式(1)より求めた。

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{Q_2/W}{Q_1/B} \quad (1)$$

ここに、 q_1 は上流流量と川幅（水路幅）の比、 q_2 は氾濫流量と破堤幅の比、 Q_1 :上流流量、 Q_2 :氾濫流量、 B

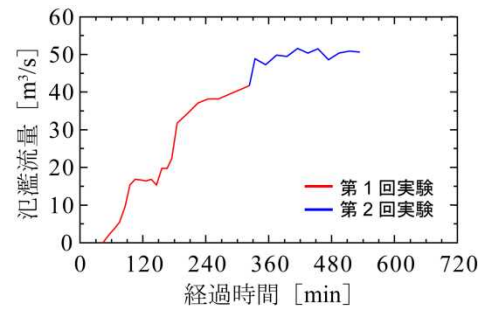


図-9 氾濫流量の時間変化

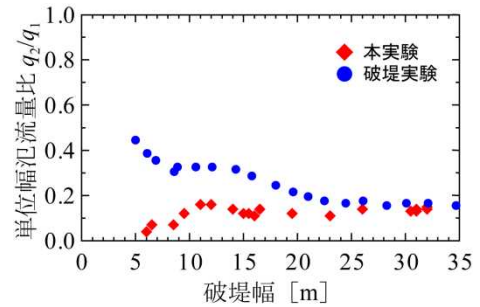


図-10 単位幅当りの氾濫流量比

B :川幅（水路幅）、 W :破堤幅（天端中央）である。破堤実験の場合、破堤幅が 10m 程度までは、破堤幅が広がるとともに氾濫流量比が小さくなる。しかし、本実験の場合、氾濫流量比が大きくなる傾向となった。これは、破堤実験のこの範囲では、堤防基盤（天端中央）より 2m 以上の洗掘が発生していることが確認されている³⁾。そのため、単位幅当りでは氾濫流量比が小さくなると考えられる。一方、本実験では、堤防基盤より深く洗掘されず、氾濫流量比が小さくなっている。破堤幅 10m 以降、破堤実験では 20m 以降で、氾濫流量比はほぼ一定となっている。本実験のブロックは幅 20m から設置している。よって、破堤幅の進行時においては、ブロックがあることで、氾濫流量の流出低減には至っていないことが分かる。

(7) 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の移動距離を計測した。図-11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約7m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。これより下流側のブロックは、全体的な配列をやや乱しているが、河床に沈み込み群体として動い

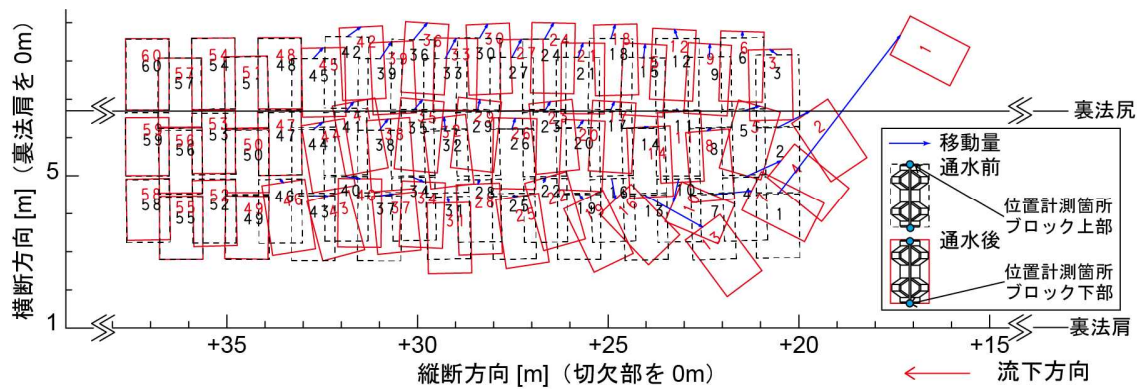


図-11 ブロックの移動状況 (第1回実験)

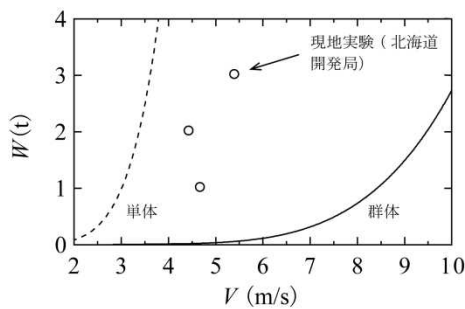


図-12 移動限界流速とブロック重量の関係 (長方形ブロック¹³⁾と現地実験¹⁴⁾)

ていない。破堤幅に効果的なブロック個数については、破堤幅約30mで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。

ブロックの移動は、流体力による滑動と転動に対する安定性を検討する必要がある。そこで、本実験におけるブロックの移動限界について、護岸の力学設計法¹³⁾に示される(2)式により、大略的に把握する。

$$W > \alpha \left(\frac{\rho_w}{\rho_b - \rho_w} \right)^3 \cdot \frac{\rho_b}{g^2} \cdot \left(\frac{V_d}{\beta} \right)^6 \quad (2)$$

ここに、 W はブロックの空中重量、 ρ_w は水の密度、 ρ_b はブロックの密度、 g は重力加速度、 V_d はブロックに作用する流速である。 α はブロックの形状に係わる無次元定数、 β は群体配置したときの割引係数である。ブロック重量と流速の関係を(2)式と α 、 β を用いて、図-12に整理した。本実験で用いたブロック形状は、長方形に類型されることから、 $\alpha=1.18$ 、 $\beta=2.81$ とした。また、参考として、北海道開発局¹⁴⁾が実物のブロックを低水路内に4種類のブロックを設置して行った転動実験の結果を○で示す。流速は、ピーク流量時の計算による平均流速である。

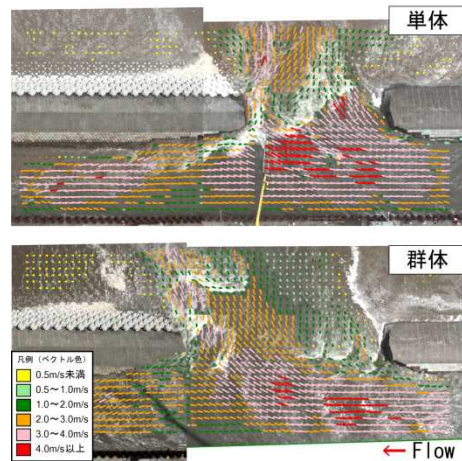


図-13 ブロック移動時の流況

No.1ブロックの落下直前(単体)と破堤幅抑制時(群体)における主流部の流況を図-13に示す。これより、図-12に示した移動限界時の流速と比較を行う。なお、図-12は静止状態からの移動限界流速である。それぞれ主流部の流速は、3m/sから4m/s程度である。図-12に示すように、今回用いたブロックに近い長方形ブロック2トンの移動限界流速は3m/sから4m/s程度である。本実験は落下状態からブロックが移動しており、初期状態に違いはあるが、概ね一致する。また、北海道開発局の現地実験とも概ね一致していると考えられる。群体は、図-12の流速から推測すると、ブロックはほぼ移動しないことが分かる。ただし、 α 、 β はブロックにより異なるため、水理模型実験により、かみ合わせ効果などによる流速の割引率を検討する必要がある。

4. 破堤幅抑制メカニズムについて

破堤幅過程について、破堤幅の進行時(ブロック到達前)、破堤幅の停止時(ブロック到達後)

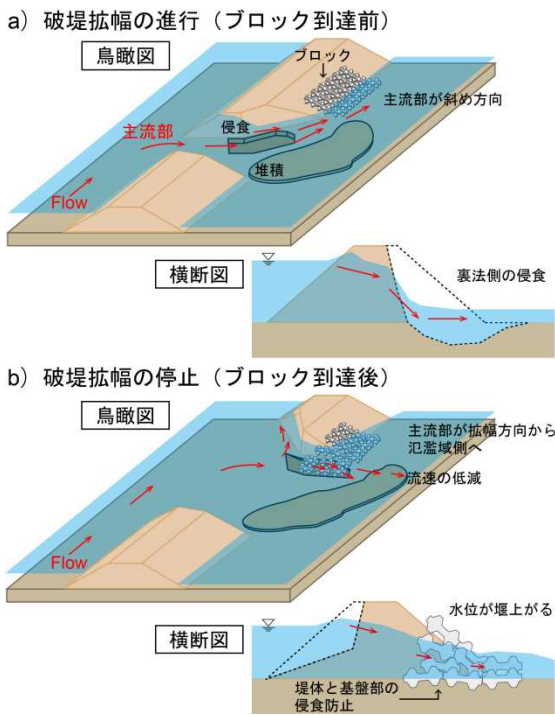


図-14 破堤拡幅抑制メカニズム（概念図）

に分類すると図-14となる。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考えられる。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、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。

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) 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, 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.
- 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.
- 13) 改定 護岸の力学設計法, 財団法人国土開発技術センター, 山海堂, 2007.
- 14) 増田懋隆, 上月武, 後藤哲: 護岸根固工に関する調査研究, 土木試験所月報, 1974.

(2019年6月訂正)