

## 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：船木淳悟、柿沼孝治、飛田大輔

### 【要旨】

気候変動に伴う豪雨等による大規模な水害が頻発し、堤防決壊による水害被害は近年でも生じている。被害軽減のためには、破堤開口部の締切や破堤拡幅の抑制が重要ではあるが、その工法や資材の開発はまだまだ十分に確立はされていない。本報告では破堤後の被害軽減対策として、破堤拡幅抑制工の開発を目的に実物大規模である十勝川千代田実験水路を用いた実験を行った。実験では破堤拡幅が想定される区間にブロックを群体で設置することにより、破堤拡幅の進行速度を遅らせ、被害軽減につながる可能性を示した。

キーワード：破堤拡幅抑制、根固めブロック、十勝川千代田実験水路

### 1. はじめに

気候変動に伴い、豪雨による大規模な水害は世界各地で頻発し、堤防決壊による水害被害が生じている。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<sup>1)</sup>。また、国外では2013年のエルベ川においても堤防決壊が生じ、大規模な緊急締切対策を行っている<sup>2)</sup>。

河川堤防の破堤に関する研究は、現地実験<sup>3)</sup>や藤田らによる模型実験<sup>4)</sup>、辻本らによる実災害への数値解析の適用<sup>5)</sup>とともに、福岡らによる越水強化対策などの検討がされている<sup>6)</sup>。藤田<sup>7)</sup>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ている。その中で破堤被害軽減の重要性を示していることから、破堤現象を中心として河道と堤防、氾濫原を一体とした減災対策工法の整備は今後、極めて重要な課題と考えられる。

一方で破堤後の減災対策は、樹林帯による氾濫流抑制に関する検討<sup>8)</sup>や破堤拡幅を考慮した水防林の効果の検討<sup>9)</sup>、国外では破堤後の締切工法としてチューブを破堤開口部に投入し締め切る工法の検討<sup>10)</sup>などがあるが、新工法の開発は少ない。また Abdel Sattar<sup>11)</sup>は、破堤開口部にヘリコプターにより土のうを投入することで氾濫流を抑制する工法の模型実験を、Albers<sup>12)</sup>は、エルベ川の破堤事例をもとに、バージや土のうを破堤部の締切資材として用いることの効果を数値計算により検討している。しかしながら、破堤開口部では、水

理条件や堤防及び河床条件が時々刻々と変化しているため、これらに対して柔軟に対応する工法や資材の開発については、いまだ十分に確立されていない

本研究は、破堤後の水害被害軽減対策として、破堤氾濫流の抑制工法（破堤拡幅抑制工）開発を目的としている。破堤拡幅の早期段階で破堤進行を抑制することは、水害被害の軽減に対して大きな効果が期待されるが、破堤開口部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。そこで、一般的に水防資材として備蓄され、災害時には関係機関の協力のもと、迅速に調達することのできる根固ブロックを用いることとした。

一般的な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<sup>12)</sup>。一方、本工法では、あらかじめ破堤又は越水が予測される箇所の下流側にブロックを設置することで、破堤拡幅や氾濫流量を抑制するものである。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。

実験は、十勝川千代田実験水路<sup>13)</sup>に実物大の河川堤防を造成し、既報の実験<sup>14)</sup>に比べて、河道水位の高い

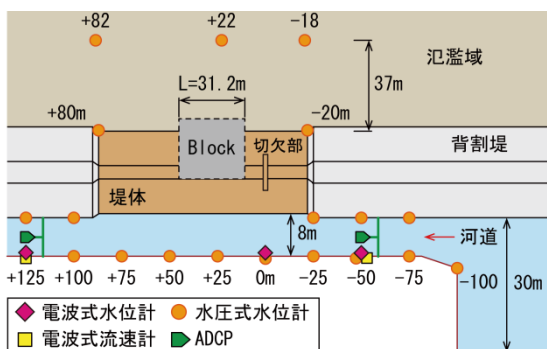


図-1 実験水路概要

(上図：通水開始直後の状況、下図：平面図)

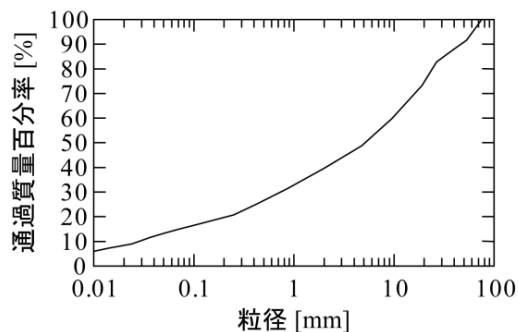


図-2 堤体と河床材料の粒度分布

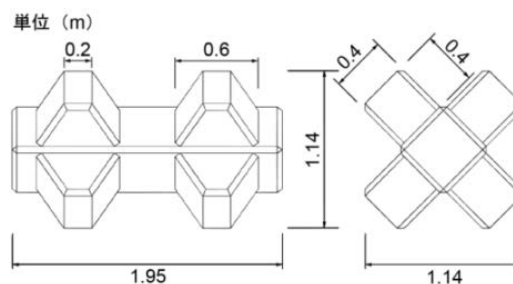


図-3 根固ブロックの形状

条件でブロックの効果が発揮する実験を行った。

## 2. 実験概要と結果

### 2.1 実験概要

実験水路の概要及び主な観測項目を図-1に示す。図中の各計測機器設置箇所は切欠部を0mとして下流側をプラス、上流側をマイナスで示す。実験水路は堤防越流に必要な水深を確保することを目的に、鋼矢板を用いて水路幅30mを8mに縮小し、下流端に堰上げ施設を設け等流状態とした。そのため、実河川と比べ、破堤幅の広がりとともに、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は2.7m、フルード数は0.47である。氾濫域は、横断方向に70m程度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、比高差は設けていない。

破堤させる堤体は、現地採取した材料を用いて堤体高3m、天端幅3m、法勾配(表裏)2割で100m築造し、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。堤体の締固め度の平均は90%以上である。堤体に用いた材料の粒度分布は図-2を示す。主に砂礫分の多い材料で構成されている。また、堤体は裸堤(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は、護岸ブロックを連節せずに設置した。

ブロックは、天端から裏法尻にかけて配置(天端2列、裏法面3列、裏法尻1列)することで、堤体侵食の防止や氾濫流の流速低減を期待した。設置位置は切欠部より下流側10mとし、設置延長は下流側へ縦断方向に31.2mとした。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2137kg、長さ1.95m、幅と高さは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。今回の実験では、144個のブロックを設置している。筆者ら<sup>15)</sup>の実験結果によれば、クレーンによるブロック1個当たりの設置時間(玉掛け~玉外しまでの工程)は、理想状態の作業条件で3分程度であり、今回の実験におけるブロックの設置に必要な所要時間は48分程度となる。

通水方法については、上流ゲートから一定流量70m<sup>3</sup>/sとなるように通水を行い、切欠部から越水させた。なお、河道への人工的な給砂は行っていない。

### 2.2 観測概要

主な観測は、図-1に示すとおりである。水位や流量・流速を計測するとともに、破堤開口部の水面形や堤体内部の崩壊状況を加速度センサーにより計測している。

水位は、電波式及び水圧式水位計で計測した1分毎の値（5秒毎にデータを取得し、60秒平均を1データとしている）である。流量は、破堤実験区間の上下流において、ADCP (Teledyne RD Instruments社 ADCP1200kHz) を観測船に設置して行った。観測中は測定精度が低下した場合については、菅野ら<sup>16)</sup>を参考にVTG情報による補正を行った。

流速は、破堤実験区間の上下流地点で、電波式流速計 (WJ7661 RYUKAN) で計測するとともに、PIV解析を行った。PIVに用いる動画は、クレーン車を用いて上空約52mの位置から垂直に撮影を行った。画像解析の解析精度向上等を目的として、トレーサー（緩衝材のECO SOFT）の散布を行った。標定点としては、水路や堤防などにロープやボールを設置している。解析結果の精度については、切欠部から上流50m地点の電波式流速計で測定した値と比較した。その結果、概ね同様の値を示していることを確認している。

破堤部周辺の水面形については、クレーンを用いて、上空約52mからカメラ2台により、1分間隔で垂直撮影（ステレオ撮影）した。標定点は、前述のPIVと同じものを用いている。カメラは有効画素約1510万画素であり、偏光フィルターを装着し、水面の乱反射を軽減している。解析結果の精度については、撮影した30ケースの残差を求めたところ、測量した標定点と解析結果の座標値の差は、平均で0.033mである。

堤体や基盤部の崩壊過程は、加速度センサーをブロック設置区間とその前後の堤体内に重点的に配置し、計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破堤幅の時間変化

実験中に真上から撮影した状況を図-4に示す。図中に越水開始からの経過時刻と破堤幅(天端中央間の幅)を示す。なお、破堤幅Lは切欠部より上流方向の破堤幅Luと下流方向の破堤幅Ldに区分している。越水開始後、切欠部ではヘッドカット (Headcut) のような侵食断面となり、表法肩へ侵食が拡大していく。その後、切欠部より下流方向へ拡幅し始め、13分後にブロック設置位置まで到達し、70分後にはブロック設置末端まで拡幅した。その後、破堤拡幅がブロック設置範囲 (Ld=10~31.2m) を超えたため、ゲートからの通水を止めている。

今回の実験 (以降、CaseA) とブロックを設置せず同条件で行った島田ら<sup>17)</sup>の実験結果 (以降、Case1) とを比較する。図-5に破堤幅の時間変化を示す。Luは

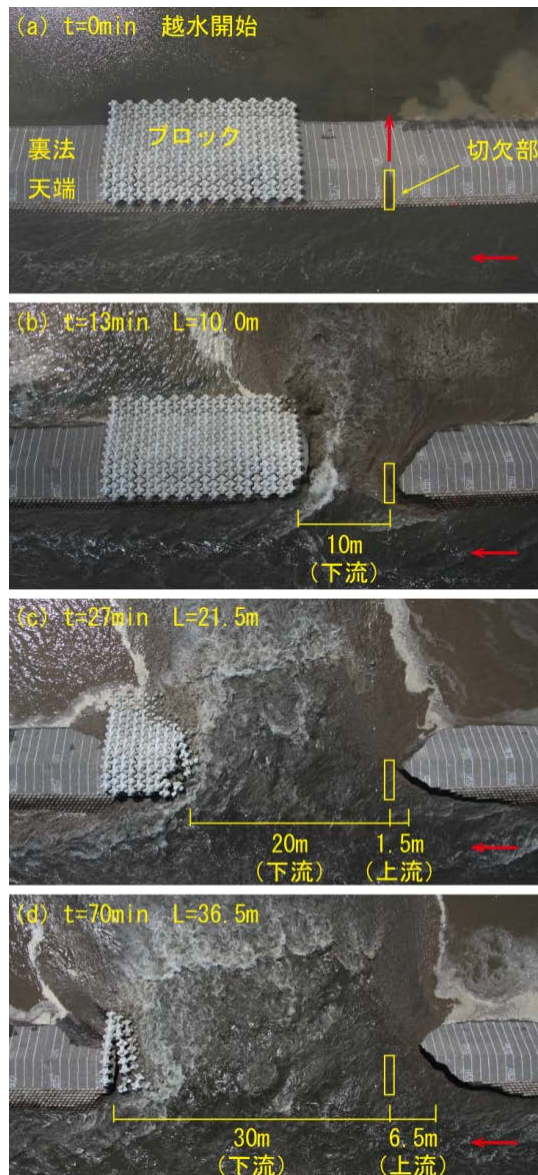


図-4 実験状況

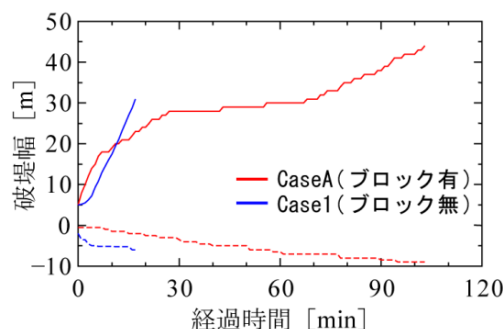


図-5 破堤幅の時間変化

マイナス、Ldはプラスで示す。CaseAはCase1に比べ、切欠部の高さが0.1m低く、越水開始から切欠よりLd=5m程度まで拡幅する時刻に違いが見られた。よっ

て、ここでは、Ld=5m到達時刻以降を比較した。図中の破堤幅は、動画より0.5mピッチで読み取っている。なお経過時間は実験を終了するにあたり、通水を止めるためのゲート閉操作を開始するまでの時刻を示す。下流方向への拡幅Ldについて、ブロックの効果が見られるLd=20mまでの時刻においては、破堤拡幅速度は概ね同様である。Ld=20m以降では、ブロックがあることで破堤拡幅速度が低下したことが確認出来る。Case1ではLd=20m~31mまで拡幅する所要時間は7分であったが、ブロックを設置した今回の実験では62分であった。このことから、ブロックを堤防上に設置することで、下流方向に破堤拡幅する所用時間を長くする効果があることが分かった。

### 3. 2 水理量の平面分布

Case1では前述のとおり、ブロックを堤体上に設置することでLd=20m以降で下流方向へ破堤拡幅する所用時間が長くなった。そこで、ブロックの効果が見られたLd=30m到達時における破堤部周辺の水理量を整理した。図-6に流速、水深、無次元掃流力の平面分布を示す。横断方向の範囲は、表法面中央から裏法尻である。流速 $u$ はPIVによる表面流速である。水深 $h$ はステレオ画像解析による水位 $H$ と図-7に示す加速度センサーの流出結果（Ld=30m到達時刻に流出したセンサー標高Hz）より、 $h=H-Hz$ から求めた。等流状態は成り立たないが、破堤部周辺の土砂の移動しやすさを把握するため、無次元掃流力を前述の流速 $u$ と水深 $h$ からマンニングの式を適用し、(1)式より求めた。

$$\tau_* = \frac{sd}{hi_e} = \frac{n^2 u^2}{s d_{50} h^{1/3}} \quad (1)$$

ここで、 $s$ :砂粒の水中比重、 $d$ :砂粒の粒径（図-2及び堤防から採取した平均値10.1mm）、 $h$ :水深、 $ie$ :エネルギー勾配、 $n$ :粗度係数（実験水路の値、0.023）、 $u$ :流速を示す。ただし、ブロック上面と河床では粗度が異なるが一定値としている。

流速について、天端間の分布を見てみると破堤口の下流端Ld=30mに比べ、Ld=10m~20m付近が相対的に流速の速い主流部となっていることが分かる。これは図-6の破堤口の下流端で見られるように、堤防上から落下したブロックが積み上がることで、流水に対する抵抗が増加し、流速が遅くなったことが分かる。水深については天端間に比べ、裏法側が深い傾向になっている。また、Ld=10m~20mの水面下にはブロックがあるが、破堤口下流端に比べ、水深が深いことからブロック下

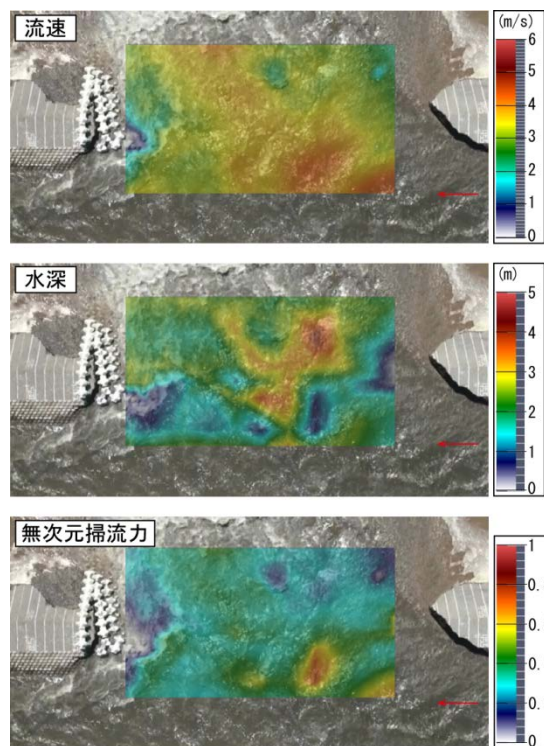


図-6 破堤拡幅抑制時の水理量平面分布

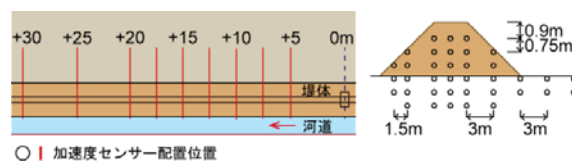


図-7 加速度センサーの配置図

部の土砂が吸い出され河床高が低下したと考えられる。流速と水深の傾向より、氾濫流は破堤口下流端Ld=30mに比べ、Ld=10m~20m付近に多く分流していると推察される。また無次元掃流力の結果からも、土砂の移動についてはLd=10m~20m付近が大きいと推察される。よってブロックの効果により、破堤口下流端Ld=30mでは氾濫流が抑制されていると考えられる。

### 3. 3 実験後の地形

実験終了後における河道と堤体の侵食、堤体や河道内から氾濫域へ流出した土砂の堆積状況を図-8に示す。下図に実験終了後にレーザースキャナと横断測量によって計測した初期河床高と実験終了後の標高差を示す。破堤拡幅速度が低下したLd=20m付近では非堆積域が形成され、その上下流側は堆積域である。氾濫流の流出はこの領域で多かったと考えられる。河道については上流側の河床が大きく洗掘され、氾濫域は土砂が広く分散している。一方、河道下流側では土砂が堆積している。これは破堤開口部にブロックがあるこ

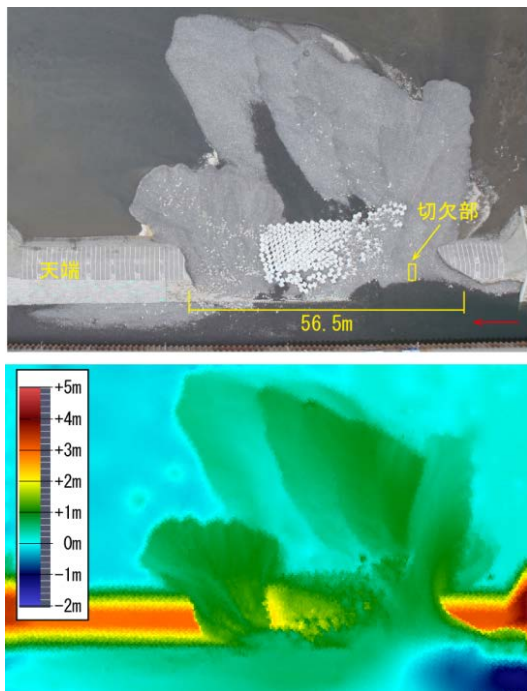


図-8 実験終了後の地形  
(上図：上空写真、下図：初期河床高との差)

とで、河道上流側で洗掘された土砂が氾濫域へ流出を抑制し、下流側へ流送された可能性がある。よって、破堤口下流側の河道側では、ブロックが無い場合に比べ、河床高が高くなることで水位が高くなったことが推察される。そこで、CaseAとCase1の河道の河床高、破堤幅毎の河道の平均水位を比較する。

図-9に実験終了後の横断測量結果から求めた河道中央の河床高を示す。切欠部より上流側はマイナス、下流側はプラスを示す。図-10に破堤実験区間における破堤幅毎の水位の平均値を示す。図-1に示す水圧水位計と電波式水位計から求めた。前述のとおり、破堤開口部にブロックがあるCaseAではブロックを設置していないCase1に比べ、 $L_d=10\text{m}$ 以降の河床高は高い。河道と氾濫域の水位についても、CaseAはCase1に比べ、高いことが分かる。土砂の堆積に加えブロックの抵抗により水位が高く保たれたと推察される。

このように破堤幅に関し河道水位は外力として大きく作用する。よって、今後は河道水位や落掘領域、堤体高などの堤体条件から、破堤幅の抑制効果を定性的に評価していく必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、実物大の堤防を越水破堤させ、破堤箇所より下流側の堤防上にあらかじめ設置したブロック

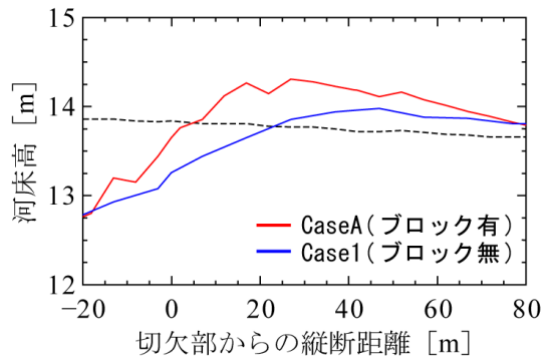


図-9 河道中央における河床高の比較

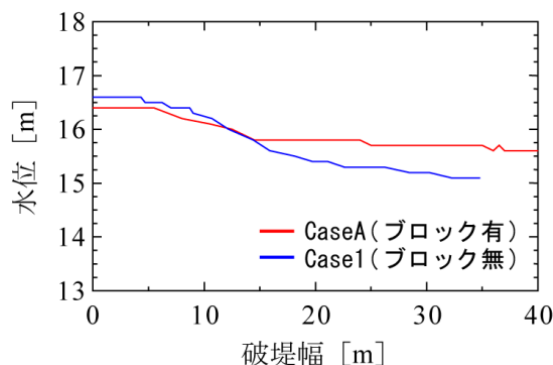


図-10 河道水位の比較

による破堤幅の抑制効果について検証を行った。

天端から裏法尻にかけてブロックを設置することで、ブロックを設置しない場合に比べ、破堤幅の進行時間を遅らせることが分かった。

しかし、川幅や洪水継続時間、堤体や地盤の材料特性及び地形諸条件等により、破堤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。また出水時の堤防は長時間にわたって河川水位の高い状態が続くことや、降雨の継続によりぬかるんだ状態になると想定されることから、実際の水防活動への適用には注意が必要である。

今後は、効率的に破堤幅・氾濫流量を抑制することが出来るように、河道条件や堤内地の地形条件、ブロックの効率的な設置条件など、縮尺模型実験や柿沼と清水による、破堤幅の数値計算モデル<sup>20)</sup>を用いて検証していく予定である。

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、Vol19、pp.51-56、2013.
- 2) T.S.Albers., 2014, Emergency closure of dike breaches, The effect and applicability of emergency measures, Master-thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineer
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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) 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.
- 9) 秋山壽一郎、重枝未玲、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.
- 10) U.S. Army Engineer Research and Development Center , 2011 : Rapid Repair of Levee Breaches, SERRI Report 81000-01.
- 11) Ahmed M. Abdel Sattar, Ahmed A. Kassem and M. Hanif Chaudhry, F.ASCE : Case Study: 17th Street Canal Breach Closure Procedures. J. Hydraul. Eng., 10.1061/ASCE0733-94292008134:111547.
- 12) 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.
- 13) <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/zi/zi0.htm>
- 14) 飛田大輔、柿沼孝治、横山洋、武田淳史：千代田実験水路における破堤拡幅抑制工実験、河川技術論文集、Vol.20、pp.51-56、2014.
- 15) 飛田大輔、柿沼孝治、武田淳史、島田友典：千代田実験水路における根固ブロックを用いた破堤拡幅抑制工実験、第33回日本自然災害学会学術講演会、pp131-132、2014.
- 16) 菅野裕也、萬矢敦啓、深見和彦：実河川洪水時におけるADCPを用いた流量観測の信頼性・適用性向上のための一考察、平成22年度国土交通省国土技術研究会、2010.
- 17) 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氾濫域を含む越水破堤実験、水工学論文集、Vol.67、No.4、I\_841-I\_846、2011.
- 18) 山坂昌成、久保田勝：急勾配流路の氾濫流とこれに伴う土砂流出、河川技術論文集、第8巻、pp.225-230、2002.
- 19) Nagy, L. (2006). "Estimating Dike Breach Length from Historical Data" Periodica Polytechnica, Serial Civil Engineering, Vol. 90, No. 2, pp. 125-139.
- 20) Kakinuma. T. and Y.Shimizu : Large-Scale Experiment and Numerical Modeling of a Riverine Levee Breach. J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000902. p.04014039.

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

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2012-2016

**Research Team** : River Engineering Research Team

**Author** : FUNAKI Jungo

MAEDA Syunichi

SHIMADA Tomonori

**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 10 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 breache flow effectively.

**Keywords:** Levee Breach, Concrete Blocks, large-scale experiment, Chiyoda experimental channel