

## 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、桃枝英幸

### 【要旨】

近年の集中豪雨などによる大規模出水により、水害発生リスクが高まってきている。特に、堤防決壊は、氾濫流による甚大な被害が生じることが想定される。本研究は、既往の横越流破堤実験の知見を利用し、破堤が予測された時点で根固ブロックを堤防部周辺に設置して破堤拡幅や氾濫流を抑制する工法を提案するものである。また、より確実な技術確立を行うためには、実スケール実験を行うことが有効であり、本成果はそのための実験に向けた基礎資料を得るものである。実験結果から、破堤拡幅速度や氾濫量について、破堤部周辺に設置したブロックにより抑制効果が確認できた。また、抑制に効果的な配置方法や数量などの条件を整理することができた。

キーワード：破堤抑制効果、根固ブロック、千代田実験水路

### 1. はじめに

近年、台風や局所的な集中豪雨などによる出水により、大規模な水害発生リスクが高まってきており、河川の整備が進んだ今日でもなお、河川堤防の決壊事例が多数発生している。特に、河川堤防の決壊は氾濫域に人口や資産が集中しているため、破堤氾濫流による甚大な水害被害が生じることが想定されることから、これまでの予防対策に加え、万が一水害が発生した場合でも被害を最小限にとどめるための減災対策の強化が必要である。

これまで、破堤現象に関しては、現象解明に関する研究とともに、実物大模型を用いた堤防の越水強化対策<sup>1)</sup>や樹林帯などによる氾濫流抑制対策<sup>2)</sup>などの研究が行われてきている。しかしながら、これら堤防強化や破堤氾濫流に対する抑制技術などの防災・減災技術はいまだ十分に確立されていない現状である。

本研究は、実スケールによる破堤実験での破堤拡幅現象に関する知見<sup>3)</sup>を用いて、縮尺模型実験により、破堤被害軽減に効果的な対策工を検討するものである。特に、堤防決壊時において、早期に破堤氾濫流を抑制することは、被害や復旧費用の軽減に対して大きな効果が期待される。したがって、緊急の水防活動時において、資機材の入手が容易で迅速な施工が可能であり、さらに氾濫流による堤防の侵食や氾濫流の流勢を防止又は緩和させる必要がある<sup>4)</sup>。本研究では、対策工として実際の水防資材として多く備蓄され一般に流速の低減効果のある根固ブロックを用いて、破堤口の拡大抑制や破堤氾濫流を抑制する水防工法を提案するもの

である。ここでは、破堤が予測された時点で、破堤箇所の下流側において、破堤が達する前に堤防部周辺に設置する方法について検討を行った。なお、破堤現象は、土砂の侵食や崩壊、掃流現象により進行することからも、粒径等のスケールの影響を受けないことが重要であり、より確実な破堤抑制工の技術確立を行うためには、実スケールの実験が有効であり、そのための実験に向けた基礎資料を得るものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験水路

実験に用いる縮尺模型を図-1に示す。十勝川千代田実験水路での実スケールの実験を見越して、同水路の縮尺1/20で実験を行うこととした。千代田実験水路は上流ゲートから実験水路及び新水路合流部下流までで模型延長840cmとなるが、ここでは、再現区間として上流部の430cm区間を示す。河道幅は40cm、氾濫域の幅は580cmである。河床高と氾濫域の地盤高は、現地の計画河床高に合わせ、ほぼ同じ高さで水平に整形し、勾配は1/500である。河道の粗度は、フルードの相似則に合うように粗度(粗度係数  $n=0.014$ )を調整した。実験水路と氾濫域のうち、図-1に記したハッチング範囲までを深さ1.9cmまでの移動床とした。なお、現地の鋼矢板についても、凹凸状況を再現している。破堤させる堤防の形状や材料は、既往の破堤実験<sup>3)</sup>と同条件とした。堤防は、裸堤(芝を張らない土堤)とし、高さ15cm、天端幅15cm、法勾配2割(表裏法両方)で形成し、破堤のきっかけとして深さ5cmの切欠

部を設けた。また、現地の破堤実験区間の表法面には、流水による堤防の侵食を防ぐための護岸ブロックが設置してあるが、縮小模型では表法面に透明ラッカーズプレーを吹き付け乾燥固定させた。

堤防と移動床範囲に用いる材料の粒度分布を図-2に示す。実験砂は、現地の浮遊成分である2.38mm以下をカットした粒径加積曲線を1/20の粒径加積曲線になるような混合砂を用いた。現地の堤防は、細粒分を含んだ若干粘着性がある材料であるため、坂野<sup>3)</sup>が用いた手法を参考に、堤防材料の体積に対してベントナイトを10%配合したものをを用いた。なお、堤防には破堤幅の読み取り線を横断方向に25cm間隔で水性スプレーにより入れた。

観測項目は、ブロックを設置した破堤部周辺の水理量や破堤幅を把握するため、水位や流速を計測するとともに、ビデオカメラによる破堤拡幅過程やブロックの移動状況の撮影、PIVによる流況の測定を行った。

## 2.2 実験条件

縮小模型に用いる水理量のスケール換算は、フルードの相似則で1/20とした。上流からの通水流量は一定で39l/s(現地70m<sup>3</sup>/s)とし、破堤口拡大の停止が確認できるまで通水することとした。

実験に用いるブロックは、北海道の一級河川で普及している水防備蓄資材のうち、2t型の根固ブロックを

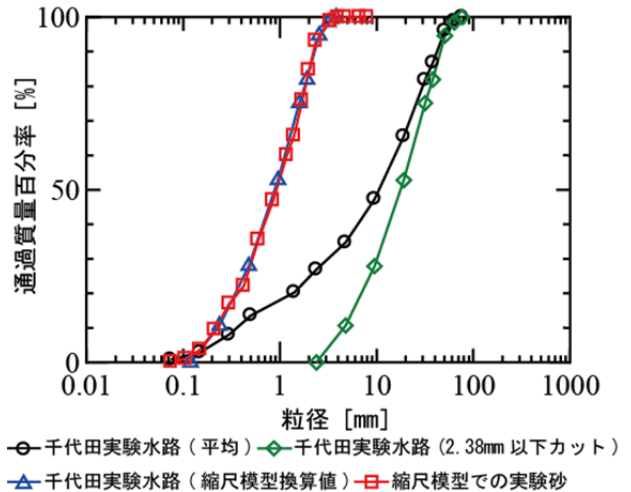


図-2 材料の粒度分布

選定し、図-3に示すように1/20縮小模型を50個製作した。ブロックの形状は、表面に突起部を有し、噛み合わせが良いものである。

実験は、既往の破堤実験で、破堤の拡幅が始まると、破堤のきっかけとなる切欠部から主に下流方向に破堤進行することが観察されている<sup>3)</sup>ことを踏まえ、図-1のように、ブロックを切欠部下流の堤防部周辺に群体としてあらかじめ設置しておく。破堤が進行し、氾濫流がブロック群に達すると氾濫流の流勢がブロックにより緩和され、破堤口の拡大が抑制されることを検証する。

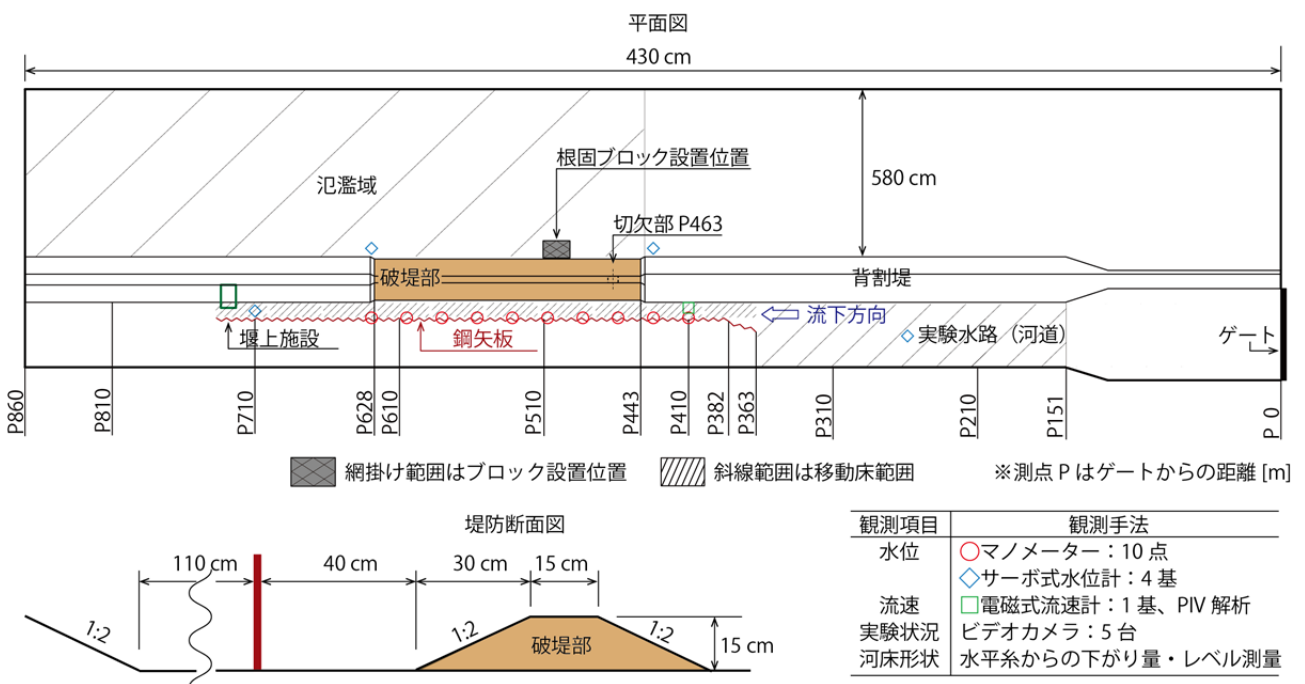


図-1 実験水路の概要 (千代田実験水路の縮尺1/20)

実験条件を表-1、ブロック設置方法の定義を図-4に示す。ここで、表-1の各値はフルードの相似則に基づき20倍の現地換算した値とし、これ以降は、実スケールでの実験の基礎資料とするため、全て現地換算値を用いて評価することとする。ブロックの設置条件について、設置位置は前述のとおりであり、各ケースとも、全てのブロック同士を噛み合わせて配置し、積み方は一層積みとした。Case4及びCase5の連結とは、隣接するブロックを2個噛み合わせ、針金を用いて連結固定し、重量を2倍としたことを意味する。ブロックの縦断敷設幅と横断敷設幅は、図-4に示すように、水平距離である。また、ブロックの配置方向は、河道の流下方向に対してブロックの長手方向が堤防法線に対して直交する方向とした。

実験は、ブロックの設置位置や個数、連結の有無など様々な組み合わせがあることから、破堤口の拡大抑制効果の高い条件を絞りながら進め、全10ケースを行い、破堤口の拡大状況やブロックの挙動観察に加え、数値シミュレーションによる流況の検討を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 根固ブロックの挙動

真上から撮影したデジタルカメラによる、各ケースの実験終了後の破堤形状と氾濫域へ移動したブロックの状況を、表-2に示す。ここで、ブロックの移動は、配置箇所から氾濫域側へ移動したのみ計測し、ほぼ同じ場所で沈降したものは除くこととした。ブロックの移動状況について、ブロックが多く移動したケースは、Case2及びCase3であり、設置したブロック20個のうち、それぞれ11個、14個が移動した。両ケースの設置条件をみると、設置位置はそれぞれ20m、30mであり、配置は、Case2で天端と裏法のみ、Case3では、裏法と裏法尻である。個数は20個であり、連結はしていない。両ケースの移動過程は、天端と裏法に配置したブロックが堤防土塊とともに水中に落下し、氾濫流により氾濫域側へ転動を繰り返した。また、裏法尻のブロックは、ブロック同士の噛み合わせが外れたのち、転動するのが観察された。ブロックの移動が少ないケースはCase1及びCase4からCase10であった。ブロックの配置がCase7やCase10のように裏法や裏法尻周辺の地盤部へ多く配置している場合には移動が少ない。Case6では、裏法尻周辺の地盤部に設置したブロックが、天端より落下し氾濫域側へ転動するブロックを捕捉し、移動を防ぐことが確認できた。また、設置個数がCase8のように、連結していないものの30個以上で

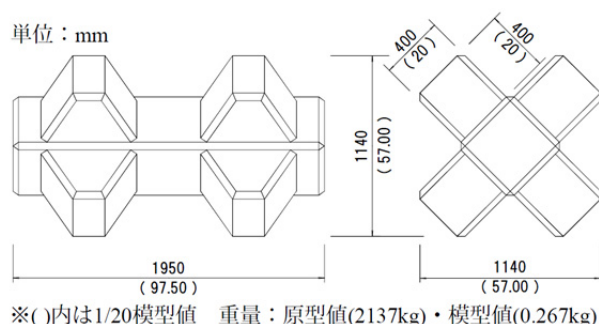


図-3 根固ブロックの形状

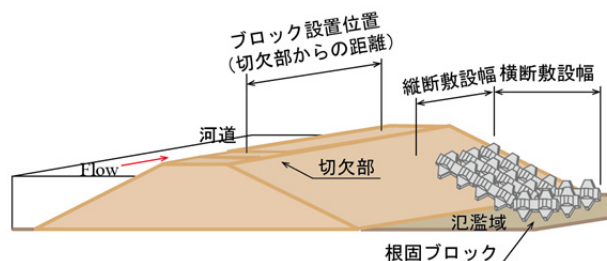




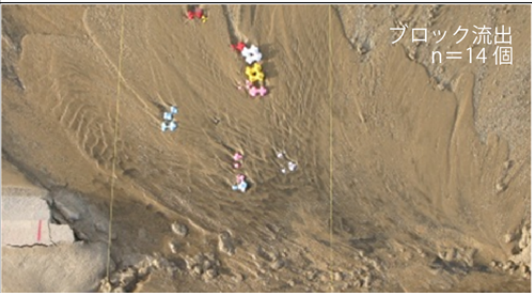



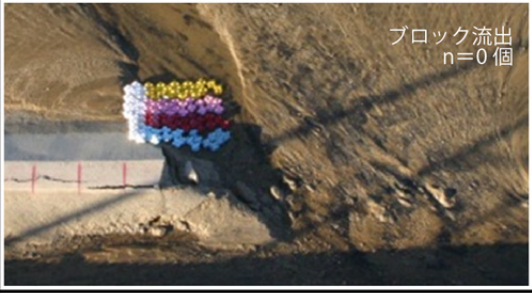


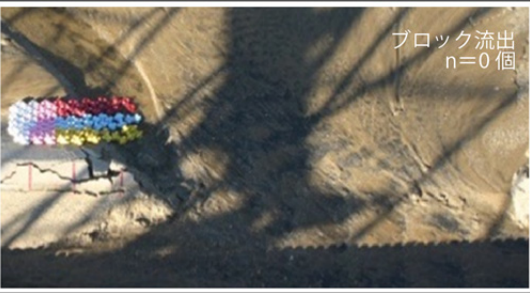
図-4 根固ブロック配置の定義

縦断方向に多く配置したものは移動が少ない。一方、Case4やCase5は移動の多いケースと同様に20個ではあるが、両ケースともブロック同士を連結固定し重量を2倍にしており、ほぼ移動していないことを確認した。ブロックの移動状況の違いについて、移動が少ないケースは、ブロック30個以上の群体の場合であり、設置位置が破堤口から遠く、配置は裏法から裏法尻周辺の地盤部に多く設置した場合である。なお、20個以下でも連結により、氾濫域側への移動を防ぐことができた。

表-1 実験条件

ケース	Case1	Case2
ブロック設置状況		
位置(m)・個数(個)	20(m)・20(個)	30(m)・20(個)
連結の有無	連結なし	連結なし
縦断・横断敷設幅(m)	4.60(m)・8.45(m)	4.60(m)・8.85(m)
ケース	Case3	Case4
ブロック設置状況		
位置(m)・個数(個)	30(m)・20(個)	30(m)・20(個)
連結の有無	連結なし	2個連結
縦断・横断敷設幅(m)	4.60(m)・8.45(m)	5.50(m)・8.45(m)
ケース	Case5	Case6
ブロック設置状況		
位置(m)・個数(個)	40(m)・20(個)	30(m)・50(個)
連結の有無	2個連結	連結なし
縦断・横断敷設幅(m)	4.60(m)・10.95(m)	9.00(m)・10.95(m)
ケース	Case7	Case8
ブロック設置状況		
位置(m)・個数(個)	40(m)・50(個)	40(m)・30(個)
連結の有無	連結なし	連結なし
縦断・横断敷設幅(m)	11.60(m)・8.45(m)	9.00(m)・6.50(m)
ケース	Case9	Case10
ブロック設置状況		
位置(m)・個数(個)	35(m)・50(個)	45(m)・50(個)
連結の有無	連結なし	連結なし
縦断・横断敷設幅(m)	15.10(m)・6.50(m)	15.10(m)・6.50(m)

表-2 実験終了後の破堤形状とブロックの移動状況

ケース	Case1	Case2
実験終了後の状況	 <p>ブロック流出 n=0個</p>	 <p>ブロック流出 n=11個</p>
ケース	Case3	Case4
実験終了後の状況	 <p>ブロック流出 n=14個</p>	 <p>ブロック流出 n=2個</p>
ケース	Case5	Case6
実験終了後の状況	 <p>ブロック流出 n=2個</p>	 <p>ブロック流出 n=3個</p>
ケース	Case7	Case8
実験終了後の状況	 <p>ブロック流出 n=0個</p>	 <p>ブロック流出 n=1個</p>
ケース	Case9	Case10
実験終了後の状況	 <p>ブロック流出 n=3個</p>	 <p>ブロック流出 n=0個</p>

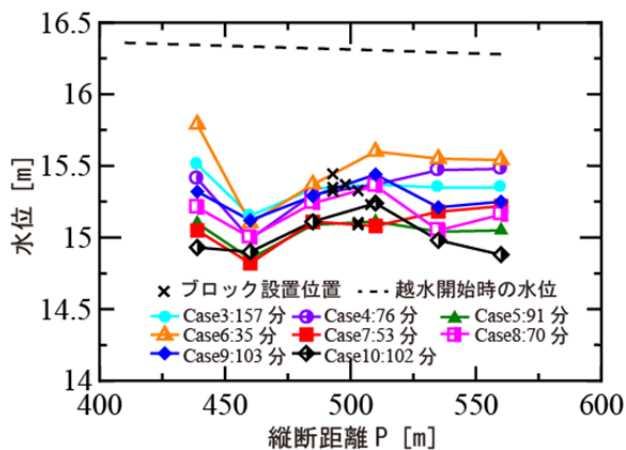


図-5 河道水位

### 3. 2 破堤口の拡大状況

ブロックによる破堤口の拡大抑制効果について、表-2に示すように、Case7・Case8・Case10では破堤口拡大の停止を確認することができた。破堤口の拡大を停止できたCase7と拡大抑制効果の低かったCase1を比較した例を写真-1に示す。ここで、写真には越水開始からの経過時間を示す。両ケースの実験条件の違いは、表-1に示すように、ブロックの設置位置と個数(縦断敷設幅)である。また、両ケースともブロックは移動していない。堤防の侵食状況について、抑制効果の低いCase1では、氾濫流がブロック設置位置に到達後、約8分後にブロック設置範囲を氾濫流が通過したが、破堤口の拡大を停止できたCase7では、約143分後においても、ブロック設置範囲より堤防の侵食は進まず、ブロック30個程度の位置で破堤口の拡大が停止した。また、そのときの堤防形状については、Case1では(A)のように堤防の破堤口の堤防形状が流下方向に対して垂直形状であるが、破堤口の拡大を停止できたCase7では(B)のように斜め形状である。

### 3. 3 破堤口の水位

ブロック設置位置に氾濫流が到達した時刻の河道水位を図-5に示す。水位は、鋼矢板沿いに設置したマンメーターの読み取り値である。なお、Case1及びCase2では計測していない。計測した全てのケースで、切欠部 P463 前後で水位が低下し、ブロック設置位置周辺では水位が上昇している。ブロック設置位置が30mのCase3などに比べ、さらに下流に設置したCase7などでは、設置位置前後の河道水位が低い傾向にある。破堤口の拡大を停止できたCase7・Case9・Case10につ

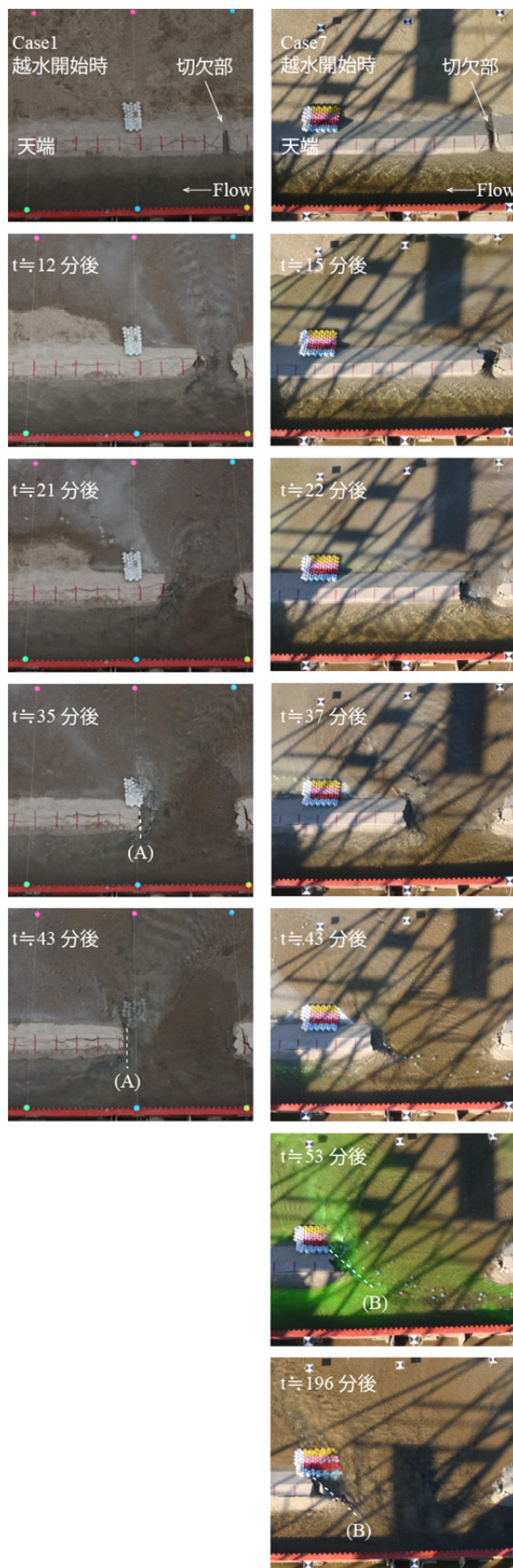


写真-1 破堤口の拡大状況 (Case1・Case7)

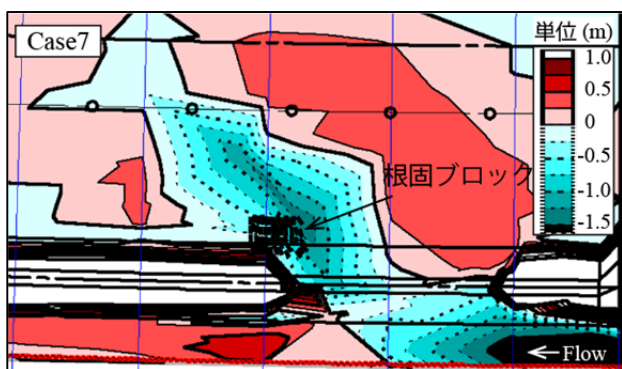


図-6 実験終了後の地形

いて着目すると Case9 を除き、破堤口周辺の河道水位が低い段階で破堤幅の抑制効果が高いことが分かる。

### 3. 4 実験終了後の地形

実験終了後の地形のうち、破堤口の拡大を停止できた Case7 を一例として図-6 に示す。ここで、初期河床高を 0m として、洗掘がマイナス、堆積がプラスである。土砂の洗掘・堆積について、既往の破堤実験では、河道上流側が大きく洗掘され、河道と堤防部から流出した土砂が氾濫域に同心円状に広く堆積していることが観察されている<sup>3)</sup>が、本研究では、ブロックを堤防部周辺に設置したことにより、氾濫流の流れの向きが破堤口の下流端から上流側に離れ、氾濫域の上流側に深い洗掘(落掘)が生じている。これにより土砂は、氾濫域上流側に主に堆積している。また、ブロック下部の状況については、氾濫流による局所洗掘により、土砂が吸い出され、ブロックは沈降しているが、河床形状の変化に追従していることが分かる。

### 3. 5 破堤部周辺の流速

ブロック設置位置 40m における破堤部周辺の表面流速ベクトルを図-7 に示す。ここで、ブロックを設置していない既往の破堤実験<sup>3)</sup>と Case7、数値シミュレーションにより Case7 を再現した結果を用いて、破堤部周辺の流況を比較した。数値シミュレーションは、iRIC<sup>6)</sup>の平面 2 次元ソルバー Nays2D を用いて、移流計算は CIP 法、計算メッシュは 1m 格子で、固定床計算を 3600 秒まで行った。再現範囲は、実験区間前後 P400 から P650 の 250m、氾濫域は 80m である。また、ブロックの再現は表-1 に示す敷設幅のうち、地盤部と裏法から地盤部に沈降した上流側の一部を再現したものであり、図-3 に示すブロック高相当を初期の地盤高より高くしたものである。粗度係数については、河道

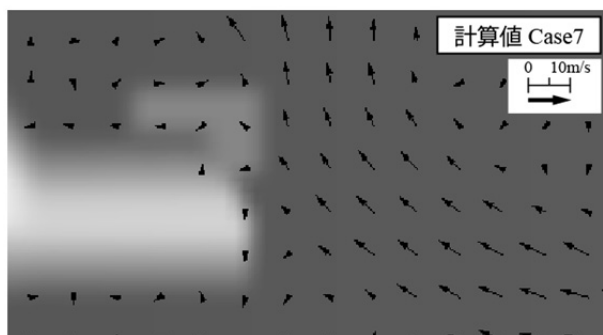
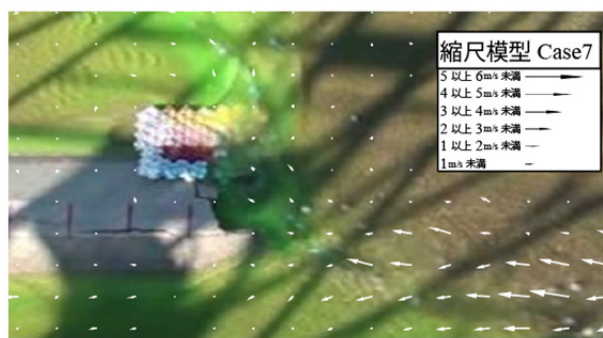
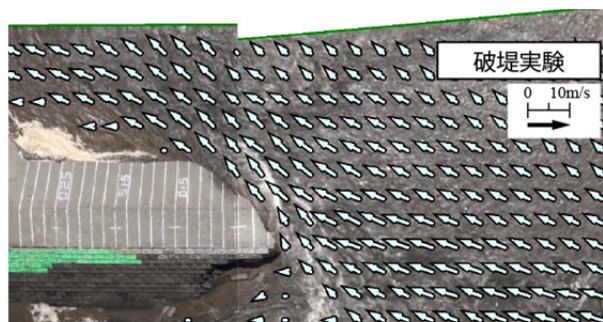


図-7 破堤部周辺の流速分布の比較

から氾濫域で  $n=0.023^3)$ 、ブロックの範囲は護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル<sup>7)</sup>によって求めた相当粗度( $ks=5.594m$ )を用いて、 Manning・ストリクラーの式により求めた  $n=0.545$  とした。

破堤部周辺の流況について、破堤部の裏法尻周辺の地盤部にブロックを設置した Case7 では、既往の破堤実験<sup>3)</sup>と比べ、破堤口から氾濫域に向かう大きい流速がブロック上流側に向き、破堤部下流端にぶつかる流れやブロック上部の流れは小さい流速となっている。また、再現計算では固定床であり、氾濫域上流側に堆積や河道の洗掘は再現していないが、流れの向きや流速の大きさは概ね同様の傾向となった。これにより、破堤口の拡大を停止できたケースでは、堤防部周辺にブロックがあることにより、ブロックによる流速の緩和効果によって、堤防の侵食が低減されていると考えられる。

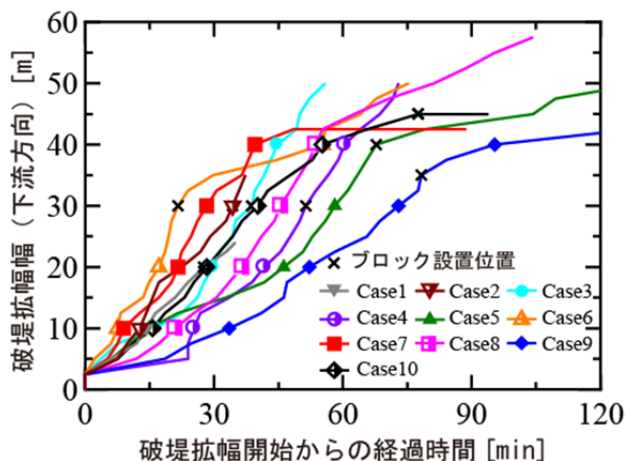


図-8 破堤口拡大の時間変化

### 3. 6 破堤口拡大の時間変化

動画から読み取った天端中央の破堤拡幅幅(下流方向)の時間変化を図-8に示す。ここで、横軸は破堤拡幅幅からの経過時間である。また、図中のバツ印は、ブロック設置位置に破堤口が到達した時刻である。各ケースとも、一旦、破堤拡幅が始まると、ケース毎のばらつきはあるものの、拡幅速度は概ね一定で推移している。ブロック設置位置まで破堤口が到達した時刻以降の拡幅速度については、Case1からCase4を除く全てのケースで低下し、破堤拡幅が抑制されていることを確認できた。破堤口の拡大を停止できたCase7・9・10のうち、特にCase7・10では、ブロック設置位置から2~3mで破堤口の拡大が停止し、抑制効果が高いことが分かった。また、Case5・6・8では破堤口がブロック到達から一定時間の間、拡幅速度が低下し、特にCase5の抑制効果は大きく、ブロックによる拡幅速度の低減させる効果があった。前述のとおり、堤防部周辺にブロックがあることにより、ブロックによる流速の緩和効果があることから、破堤口の拡大速度も同様に緩和されていることが分かる。

## 4 まとめ

千代田実験水路の縮尺1/20の模型を用いて、根固ブロックによる破堤抑制工実験を行い、ブロックによる破堤口の拡大抑制効果について検討し、破堤抑制に効果的な条件について以下のとおり整理した。

(1) ブロックの安定性は、天端から裏法にかけて配置した場合に比べ、裏法から裏法尻周辺の地盤部にブロックを群体として多く設置するほうが、ブ

ロックの転動による移動が少なく安定していた。また、ブロック同士を連結固定することにより、さらに安定するなど、ブロックの配置方法や連結によりブロックの移動状況に違いがあった。

- (2) 破堤口の流況は、ブロック設置範囲ではその抵抗により、氾濫流の流勢が緩和されるとともに、流れの向きが破堤部の下流端から上流側に離れていくことが観察された。
- (3) 破堤口の拡大抑制効果について、破堤口周辺の河道水位が低い段階で抑制効果が高く、ブロック群(30個程度以上)を堤防部周辺に縦断方向に配置することにより、堤防の侵食低減効果を確認できた。
- (4) 破堤拡幅速度について、破堤口がブロック先端部に達すると、破堤口拡大速度は低下し、破堤が抑制されていることを確認できた。

本研究によって、ブロックによる破堤抑制については、破堤氾濫流や破堤部周辺の水理量(水位や流速など)の外力などが大きく影響を及ぼしていることが把握できた。したがって、今後は、本研究での傾向を踏まえ、破堤部周辺の水理量を、より詳細に計測し、それらを定量的に把握する必要があるため、実スケールの実験を行い、より確実な破堤抑制工の技術確立を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 例えば、藤田光一、末次忠司、諏訪義雄、東高德、白土正美、郡司篤、最上谷吉則：透水性(排気性)材料を用いた堤防裏法越水強化工法の水理的評価と技術的位置づけについて、河川技術論文集、第7巻、pp. 109-114, 2001.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 5) 坂野章：樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討、土木技術資料、2002.
- 6) iRic, <http://i-ric.org/>
- 7) 護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル：財団法人土木研究センター、平成15年7月.



## A STUDY ON LEVEE BREACH MITIGATION EFFECT OF CONCRETE BLOCK FOOT PROTECTION

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2012-2016

**Research Team** : River Engineering Research Team

**Author** : ITO Akashi

KAKINUMA Takaharu

TOBITA Daisuke

MOMONOE Hideyuki

**Abstract** : The purpose of this study is to evaluate countermeasures of mitigating levee breach progress and reducing overflow rate. The concept of the countermeasure is to utilize concrete blocks installed on the levee ahead of breaching and expect these blocks to be collapsed and protect the edge of the breached levee. Upon considering this concept, authors referred to the findings of previous side-overflow breach experiments performed in the Chiyoda experiment flume, where the mechanism of breach process was clarified under highly reliable observation conditions. Therefore authors performed levee breach experiments in the 1/20 scale model of the Chiyoda experiment flume for various conditions, such as installation locations, numbers, or arrangements of the blocks.

The experimental results highlighted the behavior of the collapsed blocks, effectiveness for mitigating the breach progress, and hydraulic characteristics around blocks. Considerations such as the optimal arrangement of blocks and the number of blocks to be used were also clarified.

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