

破堤時の氾濫流量ハイドログラフと破堤部周辺の流れ場の計測

広島大学大学院 学生会員 ○土谷直広
広島大学大学院 正会員 椿涼太
広島大学大学院 フェロー会員 河原能久

1. 序論

近年、全国各地において集中豪雨や台風により河川の洪水氾濫が多発しており、人命や資産に甚大な被害が生じている。従来、堤防は洪水時の氾濫を防ぐ目的で設けられるが、改修レベルの低い河川では破堤の危険性が高く、また改修が進んだ河川であっても計画値を超える外力の発生により堤防が決壊する懸念がある。今後、地球温暖化や異常気象により、予測を超えた大規模な洪水氾濫が発生する可能性はさらに増加すると予想され、氾濫域の危機管理対策は必要不可欠である。

破堤氾濫流による堤内地での被害を最小限にするために、まず氾濫シミュレーションを行い被害の定量化を行うことが重要である。破堤氾濫流量は氾濫シミュレーションを行う際の重要な境界条件となるパラメータであり、これにより堤内地での氾濫被害は大きく規定されるといっても過言ではない。しかしながら破堤氾濫は突発的であり、かつ水量の計測データが極めて少ないため、破堤氾濫現象の理解や氾濫流量の推定手法およびその精度については課題が多く残されている。

氾濫流量の研究において、これまでの計算では正面越流を対象とする本間の越流公式¹⁾が使用されてきた。しかし河道からの氾濫流は横越流での堤内地への流入であることから、土木研究所²⁾や秋山ら^{3,4)}は横越流の実験を行い、本間公式を修正改良している。また重枝ら^{5),6)}は概略的に算出できる修正した本間公式を用いず、非構造格子を用いて河道内と堤内地の流れを同時に計算し、得られた解析値と実験による越流・溢流氾濫流量を比較し、解析モデルの適用性を検証している。Rogerら⁷⁾は直線水路における破堤氾濫流量に関する実験を行い、解析モデルの検証を行っている。さらに、福岡ら^{8),9)}は常願寺川において直線・蛇行水路での現地氾濫実験を行い、洪水流の水面形の時間変化に着目し、水面形の時間変化と最終決壊幅を用いて二次元非定常解析を行い、氾濫流量ハイドログラフを評価する解析手法を提案している。

本研究では破堤氾濫流量を堰を用いて直接計測することで精度の高いデータを取得し、氾濫解析モデルの検証用のデータを得ることを目的とする。実河川の破堤現象は、河川流や堤防の構造などにも影響を受ける。これらの影響を含めた氾濫流量の推定法を確立することが本研究の最終目標である。

2. 実験方法

(1) 水路概要

図-1 に実験水路の概要および水位計測箇所を示す。水路は長さ 16.2m、幅 0.8m、蛇行度 1.10 の蛇行水路である。但し、 $x < 1.0\text{m}$ および $x > 14.7\text{m}$ は直線水路として

ている。水路側岸の堤防は塩化ビニル製であり、鉛直に固定している。流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直方向に z 軸を設定し、実験水路の下流 $x=15.5\text{m}$ 断面の河床高を $z=0.012\text{m}$ としている。水路床は平坦で滑らかであり、その勾配は 1/703 である。流量は $x=0\text{m}$ 断面より常時流量 $Q_{in}=15.0\text{L/s}$ を流入させている。下流端 $x=16.2\text{m}$ 断面には切欠き幅 0.36m の刃形四角堰を設けている。水路左岸の $7.65\text{m} < x < 8.05\text{m}$ の区間に破堤幅 0.4m の破堤ゲートを設けている。ゲートを手動で瞬時に開放することにより、破堤氾濫流を想定した実験を行う（瞬間破堤実験）。

また、実際の破堤幅は時間的に徐々に拡大するケースが多い。従って、より実河川の破堤現象に近づけるために、破堤を時間的に拡大させる装置を製作し実験を行う（破堤幅拡大実験）。また、最初の破堤を $t=0\text{sec}$ とする。

(2) 瞬間破堤実験

水路左岸の $7.65\text{m} < x < 8.05\text{m}$ に設けているゲートを手動で瞬時に開放する方法により実験を行う。図-1 に示す○印、×印、△印の箇所ポイントゲージおよびサーボ式波高計（KENEK 社製）を用いて水位計測を行っている。また、破堤ゲートの下流に設置した堰および下流端堰において、水位流量曲線を作成し、作成した水位流量曲線を用いてゲート開放後の非定常水位をサーボ式波高計で連続的な計測を行い、破堤流量および下流端流出流量を算出する。サンプリング間隔は 0.1 秒である。

なお計測は実験の信頼性を高めるために、同一条件下で 5 回を行い、アンサンブル平均を求めた。

更に、破堤部付近の流れ場の把握のために、破堤部周辺の上から HDD 記録型ハイビジョンデジタルビデオカメラ（SONY 製 HDR-SR8）を用いて動画の撮影を行う。撮影は撮影領域の上流から市販の墨液をトレーサとして散布しゲート開放前後の非定常状態で撮影を行う。

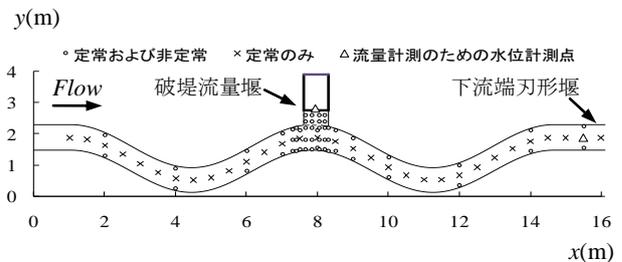


図-1 水路全体図と計測地点

(3) 破堤幅拡大実験

図-2 に装置の主要な構造を示す。この装置の堤防部分は3つに分割されており、中央が幅 20cm、左右が 10cm

ずつの合計幅 40cm の堤防となっている。堤防材料は実験水路の堤防および以前の破堤ゲートと同様に塩化ビニルで製作されている。

破堤幅の拡大順序は、中央部を開放した後、①上下流部を同時開放するもの、②上流部を開放したのち下流部を開放するもの、および③下流部を開放したのち上流部を開放するものの3通りとし、上下流部を同時開放するケースについては二段階目の開放時刻を 10 秒、30 秒、60 秒および 90 秒の四通りとし、計 6 ケースでの計測を行った。それぞれのケースにおいて 3 回実験を繰り返し、それらの平均値を求めた。またサンプリング間隔は 0.1 秒としている。

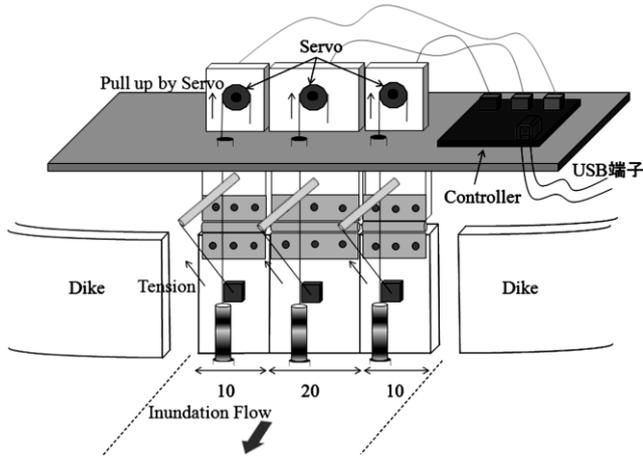


図-2 破堤幅拡大装置

3. 計測結果と破堤部周辺の流れ場

(1) 破堤部周辺の流速分布

PIV 解析を行い、流速ベクトル図を得た(図-3 参照)。破堤前での定常状態では、流速はほぼ均一で水路に沿った方向に水が流れている。破堤後では、河道内の主流はほぼ直線的に破堤ゲート断面へと進入し、特に破堤部に向かった流れは局所的に流速が大きくなっている。これは破堤部に伴って水面勾配が大きくなったためである。

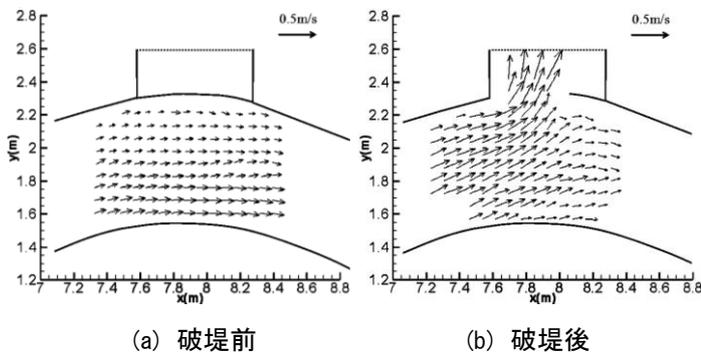


図-3 破堤部周辺の定常状態での流速ベクトル

(2) 破堤部周辺の水位分布

破堤部周辺における定常状態での水位のコンターを

図-4 に示す。破堤後は堤内地と堤外地の水位差によって射流が形成されている。そのため破堤部に向かう流れは流速が大きくなっていることは図-3 の考察にも合致する。また、破堤後においてわずかであるが A 点において局所的な水位上昇点が見られる。これは破堤部下流側の堤防切り欠き部が水衝部となっており、水位が上昇すると同時に流速も小さくなっている。

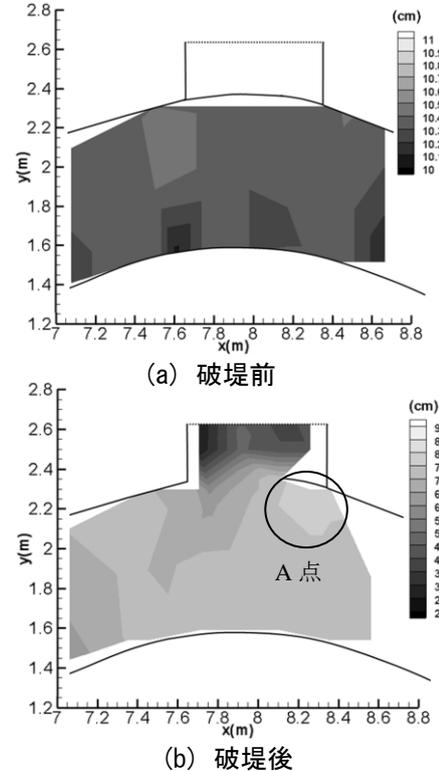


図-4 破堤部周辺の定常状態での水位分布

(3) 流量の時間的変化

破堤流量堰および下流端堰において、水位流量曲線から得られた流量ハイドログラフを図-5 に示す。破堤堰地点での流量 Q_b は破堤直後に上昇し、およそ $t=5\text{sec}$ 付近で流量の最大値を取る。また、下流端流出流量 Q_{out} において、破堤後初期では流入流量 $Q_{in}=15.0\text{L/s}$ がそのまま流出し、その影響が破堤後 $t=7\text{sec}$ から徐々に流量が減少していくことが確認された。

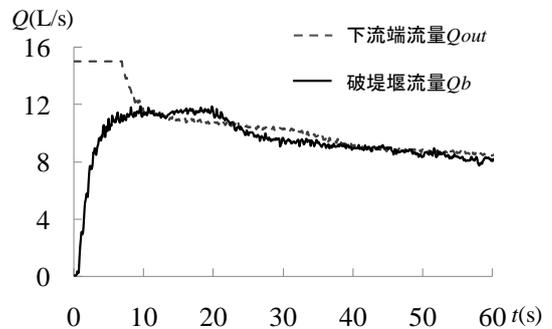


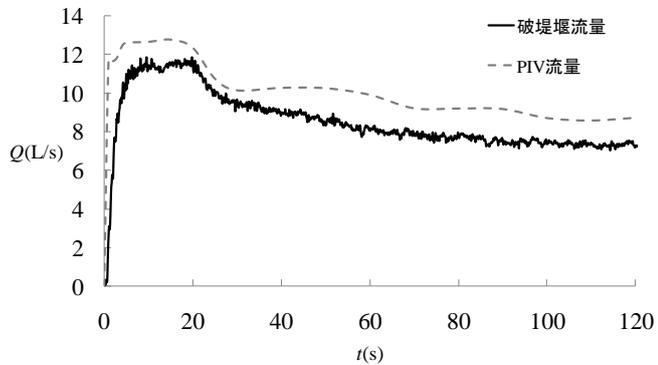
図-5 流量ハイドログラフ

(4) PIV の結果を用いた補正

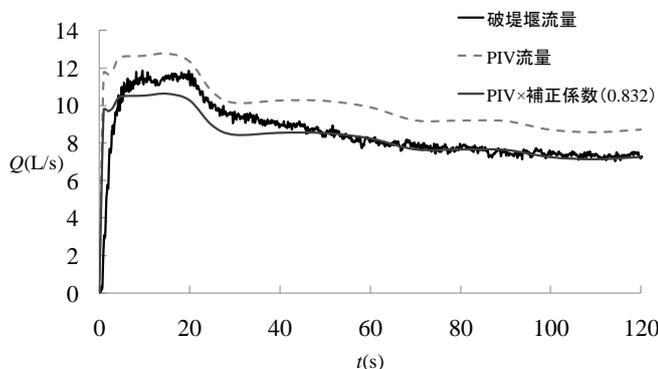
本実験では破堤流量を正確に計測するため堤内地にも流路を設けてあり、氾濫流が堰に到達するのに時間遅れが生じる。そのため、 $t=0\text{sec}$ からの堰での流量の挙動は破堤ゲートでの流量の挙動とは異なっているはずである。従って、破堤初期における流量の挙動を把握するため、PIV 解析から破堤断面の流速を取得し、流量ハイドログラフ (PIV 流量) を得る。図-6(a)に PIV で得られた流量ハイドログラフを示す。

図-6(a)の結果より、破堤直後の流量の上昇度合いは実験値である破堤堰での流量よりは大きくなっている。また、流量の挙動は概ね再現できているが、PIV からの流量算出では堰での流量より過大評価された結果となっている。これは PIV による流速ベクトルが過大評価されているためである。流れ場が複雑であり PIV による流速ベクトル取得が困難な破堤直後の非定常流れはともかく、少なくとも定常状態に落ち着いた状態 ($t=120\text{sec}$ 以降) では流量が同値になっていなければならない。そこで定常状態での流量を一致させるために $t=120\text{sec}$ 点での流量値から補正係数を算出し、PIV 結果に掛け合わせて考察することにする。図-6(b)に補正係数を考慮した流量ハイドログラフの結果を示す。

図-6(b)の結果より、補正係数を考慮すれば $t=50\text{sec}$ から定常に至る過程において実験値と概ね合致するが、 $t=5\text{sec}$ から $t=50\text{sec}$ までにおいては実験値より小さい値を示している。しかし、 $t=0\text{sec}$ から $t=5\text{sec}$ までにおいて PIV からの流量算出 (補正係数考慮) の方が過大評価されていることを考えれば、ほぼ堰での流量と合致していると考えてよい。



(a) PIV 流量算出比較



(b) 補正係数考慮

図-6 PIV 解析からの流量ハイドログラフ

4. 破堤パターン別の流量ハイドログラフ

本章では、図-2 で示した装置を用いて行った破堤幅拡大実験の結果を示す。

(1) 破堤時刻別の比較

図-7 に 2 段階目破堤時刻が異なる場合の流量ハイドログラフを示す。2 段階目の破堤時刻が 1 段階目の破堤から遅くなるにつれ破堤流量のピーク値が小さくなっていくのに加え、定常状態に至る時間も遅くなっていくことがわかる。そして、この結果から 2 段階目の破堤時刻が $t=90\text{sec}$ 以降であれば、流量値のピークや定常状態に至る時間は $t=90\text{sec}$ に 2 段階目の破堤をさせたときの場合とほぼ同様になると予想される。

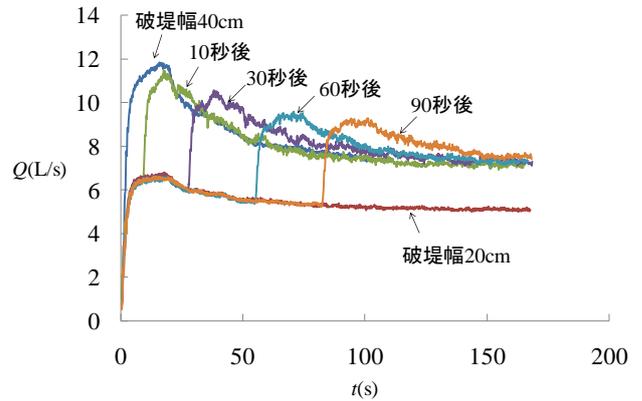


図-7 破堤時刻別の流量ハイドログラフ

(2) 破堤箇所別の比較

図-8 に 2 段階目の破堤箇所が異なる場合の流量ハイドログラフを示す。A 点では、2 段階目の破堤で下流側のゲートを開いた方が流大きな量が計測されている。また B 点では、3 段階目に下流側のゲートが開いた方が上流側ゲート開放よりも流量の上昇割合が大きい。以上より、いずれの場合においても下流側破堤が破堤流量に大きな影響を及ぼしていることが分かる。これは、図-4(b)の A 点に見られるように、破堤部下流の堤防切り欠き部が水衝部となって水位が周囲より大きくなっているため、その部分が破堤することにより破堤流量が大きく計測されているためだと考えられる。

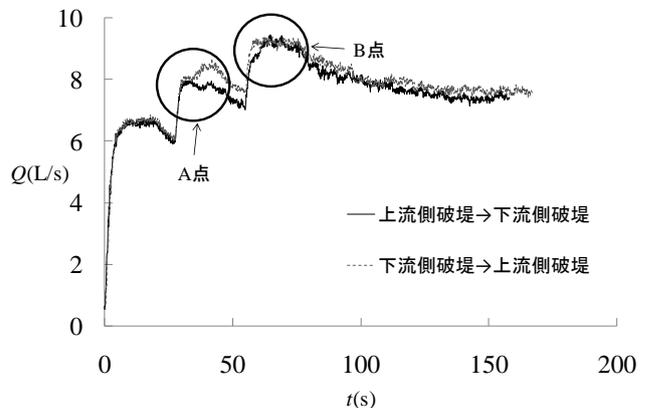


図-8 破堤箇所別の流量ハイドログラフ

5. 結論と今後の課題

(1) 結論

本研究では、大型蛇行実験水路を用いた破堤氾濫実験を行い、破堤氾濫流量ハイドログラフの挙動や、破堤時における破堤部周辺の流れ場の計測を行った。そのために、河道内および堤内地の水位の非定常計測、破堤堰流量ハイドログラフの取得、PIV解析による破堤氾濫流量ハイドログラフの評価、破堤部周辺の流速ベクトルの取得を行った。また、破堤幅や破堤位置を変化させて実験を行った。本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

- (1) 瞬間破堤による破堤氾濫実験において、破堤流量ハイドログラフ、破堤部周辺の流速ベクトル図、水位コンター図を得た。
- (2) 破堤幅拡大実験においては、破堤幅の時刻別拡大実験を4パターン、破堤幅の箇所別拡大実験を2パターン行い、破堤堰流量ハイドログラフを取得した。また破堤幅、破堤時刻、破堤箇所による流量ハイドログラフや河道内水位分布に明確な差が生じていることを確認した。
- (3) 破堤幅が拡大する実験より、最初の破堤から時間が経つほど氾濫流量（ピーク値、総流量ともに）が減少すること、また上流側が破堤する方が、下流側が破堤するより氾濫流量が小さいことを明らかにした。

(2) 今後の課題

本研究は大型蛇行水路を用いて破堤氾濫実験を行い、破堤部下流、水路下流端に設置した堰を用いて信頼性の高い流量データを得た。しかしながら、本研究の最終目標である氾濫流量の推定法を確立するまでには至っていない。従って、実河川における実用性を考慮し、河道内水位データから氾濫流量を推定することを今後の課題として挙げる。

謝辞：本研究は、実験水路等の製作において中国建設弘済会の山本博氏に尽力頂いた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 本間仁，安芸皎一：物部水理学，pp.215-315，岩波書店，1962。
- 2) 栗城稔，末次忠司，海野仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証ー，土木研究所資料，第3400号，1996。
- 3) 秋山壽一郎，重枝未玲，津崎周平：氾濫流量の評価と堤内物体群の影響，水工学論文集，第51巻，pp.523-528，2007。
- 4) 秋山壽一郎，重枝未玲，津崎周平：蛇行河川での溢水・越水氾濫流量とその予測に関する研究，水工学論文集，第52巻，pp.823-828，2008。

- 5) 重枝未玲，秋山壽一郎：ダイナミック氾濫解析モデルによる河川からの溢水・越水流量の予測，河川技術論文集，第11巻，pp.169-174，2005。
- 6) 秋山壽一郎，重枝未玲：河道・氾濫域包括解析による氾濫流量の評価と市街地破堤氾濫解析，土木学会論文集B，Vol.63，No.3，pp.224-237，2007。
- 7) Roger, S., Dewals, B., Erpicum, S., Schwanenberg, D., Schüttrumpf, H., Königeter, J. and Piroton, M. : Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows, Journal of Hydraulic Research, Vol.47, No.3, pp.349-359, 2009.
- 8) 福岡捷二，山崎憲人，黒田勇一，井内拓馬，渡邊明英：急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究，河川技術論文集，第12巻，pp.55-60，2006。
- 9) 安部友則，福岡捷二，塚本洋祐：破堤による氾濫流量ハイドログラフ計算法の構築と河川への適用方法の研究，土木学会論文集B，Vol.65，No.3，pp.166-178，2009。