

破堤幅拡大を伴う破堤氾濫流に関する実験的研究

河原能久¹・椿涼太¹・土谷直広¹・吉田晋²

¹ 広島大学大学院, ² 西日本旅客鉄道株式会社

概要

急激な破堤では、堤内地に洪水流が一気に押し寄せることとなり、氾濫原の地形特性と相乗して高流速の氾濫・急激な水位上昇を引き起こす。中山間地のような地域での洪水被害の予測・評価を正確に行うためには、このような急激な破堤現象を把握する必要がある。そこで、本研究では、急流河川における急激な破堤の発生時の流れの特徴および氾濫流量についてその非定常性を含め、実験的に検討することとした。このような急激な破堤氾濫流の流れ構造を、精度よく実験的に把握するため、氾濫流量計測の算定や段階的破堤の機械化による再現性確保などを試みた。得られた結果を基に、急激な破堤時の開口部付近の流況や氾濫流量および河道内の非定常特性について考察を行った。

実験により破堤幅拡大パターンによる氾濫流量ハイドログラフの特徴的な挙動を、河道内の非定常流れと関連付けて説明した。また、急激な破堤流れの特性を利用した破堤幅拡大時の氾濫流量の算定方法を提案した。

目的

氾濫流量の評価を行う上では、破堤部の形状を境界条件や規定パラメータとして利用される事が多い。このような取り扱いとして、本間の越流公式およびその修正式(東根1996, 秋山2008)、破堤部周辺の河道領域を検査領域とした運動量および質量保存則を用いた評価(山根2002)、破堤部を含む流れを浅水方程式により評価する試み(秋山2010)がなされている。これらの取り組みにより、破堤部形状や流れ条件の影響をより直接的に評価することによる経験定数の排除が進みつつある。これらの評価は主に定常状態を想定して構築されているが、流れの非定常性を利用して氾濫流量を推定する手法の提案もなされている(福岡2006, 安部2009)。ところが、急激な破堤現象については、検討例があまりなく(吉田10破堤部)、その取扱法は明らかではない。しかし、急激な破堤では、堤内地に洪水流が一気に押し寄せることとなり、氾濫原の地形特性と相乗して高流速の氾濫・急激な水位上昇を引き起こす可能性がある。中山間地のような地域での洪水被害の予測・評価を正確に行うためには、このような急激な破堤現象を把握する必要がある。そこで、本研究では、急流河川における急激な破堤の発生時の流れの特徴および氾濫流量についてその非定常性を含め、実験的に検討することとした。

実験概要

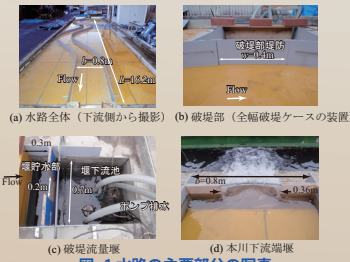


図-1 水路の主要部分の写真

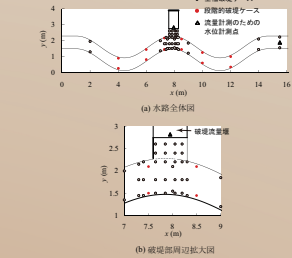


図-2 水路の概要と計測地点の配置

実験水路は長さ16.2m、幅0.8m、蛇行度1.10の蛇行水路である。水路床は耐水ベニヤ板を張り付けており、河床勾配は約1/703である。水路側岸の堤防は塩化ビニル製で作成した。

水路上流では、ポンプからの流入水を上流槽に導き、段落ち部により完全越流させて流入させている。水路左岸に幅0.4mの破堤部を設けており、機械制御により堤防の開放を行う。破堤部の堤内地側では、氾濫水を流量堰に誘導し、堰上流での水位を計測することで氾濫流量の算定を行った。本川の下端端は幅0.36mの方形四角堰を設置し、流出流量の算定に利用した。

表-1 破堤フラップの開放パターン (数字は開放時刻で単位は秒)

ケース名	中央部 (20cm幅)	上流部 (10cm幅)	下流部 (10cm幅)
Case 1a	0	0	0
Case 1b	0	-	-
Case 2a	0	10	10
Case 2b	0	30	30
Case 2c	0	60	60
Case 2d	0	90	90
Case 3a	0	30	60
Case 3b	0	60	30



図-3 破堤機構

破堤部は、中央部(20cm)および上下流部(それぞれ10cm)の3つのフラップにより構成されている。それぞれのフラップの開放を、サーボモーターを介してコンピュータで制御することで破堤パターンを変化させた。

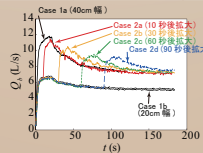


図-4 同時開放時の 実測氾濫流量ハイドログラフ

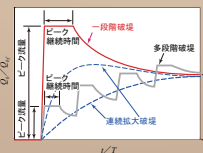


図-5 破堤パターンと氾濫流量ハイドログラフの関連に関する概念図

実験結果

Case 1a, 1bともに、破堤開始直後に氾濫流量が急増し、t=20sまで増加が続く。t=20sを過ぎると、氾濫流量が低下し転じて一定流量に漸近していく。破堤前は定常流れであるため各断面の通過流量は同一であり、破堤後に比べ河道内の水位は全体的に高い。破堤直後では、破堤部で流量が水路外へ流出することで、水路の流量バランスが崩れ、上下流に負の段波が発生する。この段波が発生している間は、破堤部へ流れが集中して、破堤部の水位は定常状態から少し低下した一定範囲に保たれる。その後、破堤部での流量の流出の影響が蛇行水路全体に及ぶと、破堤部への流れの集中効果は解消されて破堤部付近の水位が低下していき、最終的には、定常状態に落ち着く。

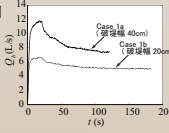


図-4 Case 1の実測氾濫流量ハイドログラフ

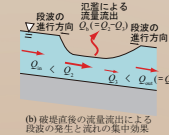
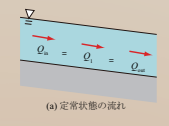


図-5 負の段波による流れの集中の概念図

一段階破堤および多段階破堤では、破堤幅拡大が起きるたびに、破堤幅および破堤周辺の水深によって規定されるピーク流量が発生し、次に、氾濫流量が減少していき流入流量と流出流量が合う定常流量に至る。破堤幅が連続的に拡大していく場合を考察すると、段階的破堤に起因するピーク流量は発生せず、連続的に定常流量へと漸近する。逆に言えば、急激な破堤幅拡大では、同じ最終破堤幅での連続的な破堤に比べ、破堤初期の氾濫流量の増加が速いだけでなく、その破堤初期において大きなピーク流量を発生させることとなる。よって、急流河川における急激な破堤氾濫による被害を評価する上では、このような氾濫初期の氾濫流量の非定常特性を十分配慮した解析を実施しなければ氾濫初期の水位上昇や道路上の流速などを過小評価する恐れがある。

氾濫流量推定

一次元の連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q \quad (1)$$

を利用する。ここに、 A :断面積, t :時刻, Q :流量(=vA), x :流下方向座標, q :単位長さあたりの横流出に伴う流量損失である。

破堤初期では、破堤の河道の上下流部への影響は限定的であり、洪水流れ自体の非定常性が弱いと仮定すれば、水路上部および下流部での通過流量は、水路への流入流量と同一と見なせる。式(1)を上流部(in)から下流部(out)まで積分すると次式を得る。

$$\int_{in}^{out} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx = - \int_{in}^{out} q dx \quad (2)$$

ここで、左辺第二項は、積分により上流部および下流部の流量 Q_{in} , Q_{out} により評価でき、また右辺は総氾濫流量を Q_b とおくことで、次式ようになる。

$$\int_{in}^{out} \frac{\partial A}{\partial t} dx + Q_{out} - Q_{in} = -Q_b \quad (3)$$

ここで、水路上部および下流部での通過流量は、定常流を仮定すると、 $Q_{in} = Q_{out}$ となり、河道内滞留量の時間変化(体積変化)より、氾濫流量の算定ができる。

次に、破堤直後を除くと、破堤の影響が水路全体に及んでおり、下流端流出流量 Q_{out} が流入流量 Q_{in} とは一致しない。ここにおいて、破堤部付近の水位変化に関連付けて破堤流量 Q_b を推定することを考える。破堤開始直後(t=0s~4s)の流量は前述の水面形により算定されている。また実験では破堤部外側で射流状態となっていることから、完全越流公式あるいは四角堰の流量公式の形である

$$Q_b = A \sqrt{2g} B h^{3/2} \quad (4)$$

を利用する。ここで開口部幅 B を係数 A にまとめたものを新たな係数 C として、

$$Q_b = C \sqrt{2g} B^2 h^{3/2} \quad (5)$$

という形とし、この係数 C を破堤開始直後の水面形により算定された氾濫流量と、開口部付近の平均的水深を h として決定する。ここで開口部付近の平均的水深は、開口部上下流の $x=7.5m, 8.5m$ の二断面の右岸・左岸の計四点の水深を利用した。

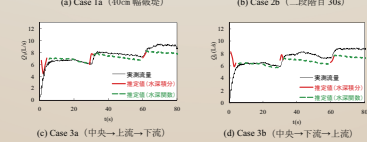
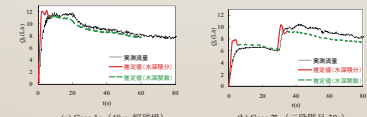


図-8 氾濫流量推定

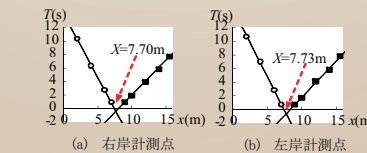


図-9 段波の到達時間から破堤時刻・位置の推定

このような手順で、破堤直後から、段波が水路上下流端に到達するまでの4秒間での破堤氾濫流量の変化量を算定したものを図-8の破堤開始直後(t=0s~4s)の太線で示している。また、破堤直後以降の流量推定結果を図-8の点線に示した。

破堤位置および時刻については、ここでは、既知として与えたが、各水位計測点での水位の急変時刻をその計測点の流下方向距離とあわせてプロットして、その交点を求めることで算定できる(図-9)。

本研究で得られた主要な結論

- (1) 破堤幅拡大パターンを8ケース設定して、破堤流量ハイドログラフを取得した。さらに、そのハイドログラフの特徴的な挙動を、河道内の非定常流れと関連付けて説明した。
- (2) 急激な破堤流れの特性を利用した破堤幅拡大時の氾濫流量の算定方法を提案した。多段階破堤では、二段目以降について推定流量の過小評価傾向が認められた。