

破堤氾濫流量の数値計算推定手法に関する研究

Numerical Simulation For Estimating Breach Flow

柿沼孝治¹・清水康行²・泉典洋²・木村峰樹³・井上卓也⁴・武田淳史⁵

Takaharu KAKINUMA, Yasuyuki SHIMIZU, Norihiro IZUMI,
Takaki KIMURA, Takuya INOUE and Atsushi TAKEDA

¹正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道大学 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³非会員 株式会社北開水工コンサルタント (〒080-0314 音更町共栄台西1 1丁目1)

⁴正会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁵非会員 北海道開発局 帯広開発建設部 (〒080-8585 帯広市西4条南8丁目)

Authors performed large-scale experiments of overtopping breach using an experimental flume located on the floodway of an actual river channel. By taking advantage of the scale of the flume, we monitored the levee breach process with state-of-the-art observation devices under highly precise hydraulic conditions. Four test cases with variations of inflow rate, levee material and levee shape were performed, and the levee breach were monitored quantitatively using acceleration sensors installed in the levee body. Authors attempted to reproduce the experiment results by a parameter equation method as well as a numerical modeling method, and identified merits and demerits of the both methods regarding the prediction capability of the overflow rate.

Key Words: levee breach, overflow rate, numerical simulation, sedimentation, iRIC

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨などによる災害が多発しており、河川の氾濫による大規模な水害の発生が懸念されているところであり、河川の整備が進んだ今日でもなお、堤防決壊等の事例が見られる。破堤による被害は甚大であり、河川管理者による河川整備と合わせて、自治体はハザードマップを公表するなど、被害の軽減に取り組んでいる。ハザードマップの基になる浸水想定区域図の作成にあたっては、河川整備状況と洪水規模に応じた氾濫計算を行う。このとき破堤による氾濫流量の推定が重要となる。また、現状のハザードマップは、堤防決壊による浸水イメージや浸水の時間変化が分かりづらいという課題があり、破堤状況に応じた氾濫流量の推定精度の向上が求められている。

数値計算による破堤氾濫流量の推定に関しては、辻本ら¹⁾は2次元浅水流を基礎とするモデルを実験及び実河川へ適用し、再現性を確認するとともに、破堤部の洗掘(落掘)の重要性を指摘している。また、破堤機構の解明に関して、北海道開発局と寒地土木研究所では、平成20年度から平成23年度にかけて、十勝川千代田実験水路

において実スケールの破堤拡幅実験を行い、破堤拡幅機構、破堤進行と水理量の関係などを明らかにした。本研究では、実スケール規模の実験で得られた破堤進行中の氾濫流量と破堤形状に観測結果に着目して、氾濫流量推定に関して数値計算の適用性について検討を行ったものである。

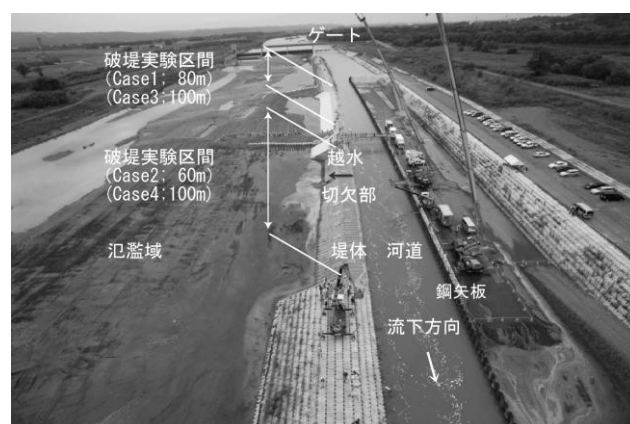


図-1 千代田実験水路全景

表-1 実験ケース

	堤体形状				水路幅	水面勾配 (目標)	通水流量 (目標)
	土質	高さ	天端幅	法勾配			
Case1	砂礫	3m	3m	1:2	8m	1/500	70m ³ /s
Case2						1/3500	35m ³ /s
Case3	細粒分	3m	6m	1:2	8m	1/500	70m ³ /s
Case4	砂礫						

2. 実験の概要

図-1に示す千代田実験水路において、堤防背後(図-1の左側)に広い氾濫域を設定し横越流の破堤実験を行った。実験は、表-1に示すとおり河道流量(フルード数)、堤体土質、堤体形状(天端幅)が異なる4ケースの実験を実施した。

ケース毎の実験水路平面図、及び実験堤防の断面図を図-2に示す。実験堤防は裸堤(芝を張らない土堤)とし、破堤実験区間において表法尻標高(以下「堤防敷高」という。)より上方の背割堤を実験条件にあわせて整形し、破堤のきっかけとして切欠き(深さ0.5m・上幅3m・下幅1m)を設けた。実験堤防の後背には、千代田新水路河道を利用した広い氾濫域(幅80m以上)を設定し、実験水路の下流端には所定の水位を確保するため堰上げ施設を設置した。なお、実験堤防は前年に盛土し、当年に場所を変えて2ケース実施した。また、Case3, 4では前年の結果を参考に実験区間を長く確保した。各ケースの観測機器配置図、及び主な観測項目、観測手法も図-2にあわせて示す。

通水は、切欠きからの越流水深が概ね30cmになるまで流量を増加させ、その後は一定流量となるように

ゲート操作を行い、破堤実験区間の大半が崩壊した時点でゲート閉操作を開始し徐々に供給流量を減少させ実験を終了した。

3. 実験結果の整理

(1) 実験状況

例としてCase2の実験状況を図-3に示す。越水開始直後に切欠き部の裏法面・裏法肩の侵食が始まり、次いで破堤が縦断方向に拡幅し始め、破堤拡幅の加速と氾濫流量の増加段階を経て、その後は破堤拡幅が減速するという過程をたどるが、飛田ら²⁾はこの破堤過程を4つのstepに分類した。堤体の崩壊機構は、まず堤体下層に流れが当ることによる侵食が進み、堤体の下層が侵食されることにより、支持力を失った堤体上層が自然崩落する様子が見られた。

(2) 実験結果

図-4に、ゲートからの通水量、切欠きから上流約50m位置の河道流量(以下「破堤上流流量」という。)及び切欠きから下流約100m位置の河道流量(以下「破堤下流流量」という。)、氾濫流量、切欠き位置の河道側および氾濫域側水位、破堤幅の時間変化についてケース毎に整理したグラフの一覧を示す。なお、点線はstep1～4の各破堤段階の境界を示す(ただし、Case1についてはstep3で堤防の大半が崩壊したためstep4の段階はない)。

通水量はゲート開度から算定し、また、破堤上流流量及び破堤下流流量は電波式流速計測定値から推定した断面平均流速に実験前の河道断面積を乗じて、また、氾濫流量は上下流の流量差に流量観測区間の水位変化から推定した河道貯留変化量を加味して算定した(氾

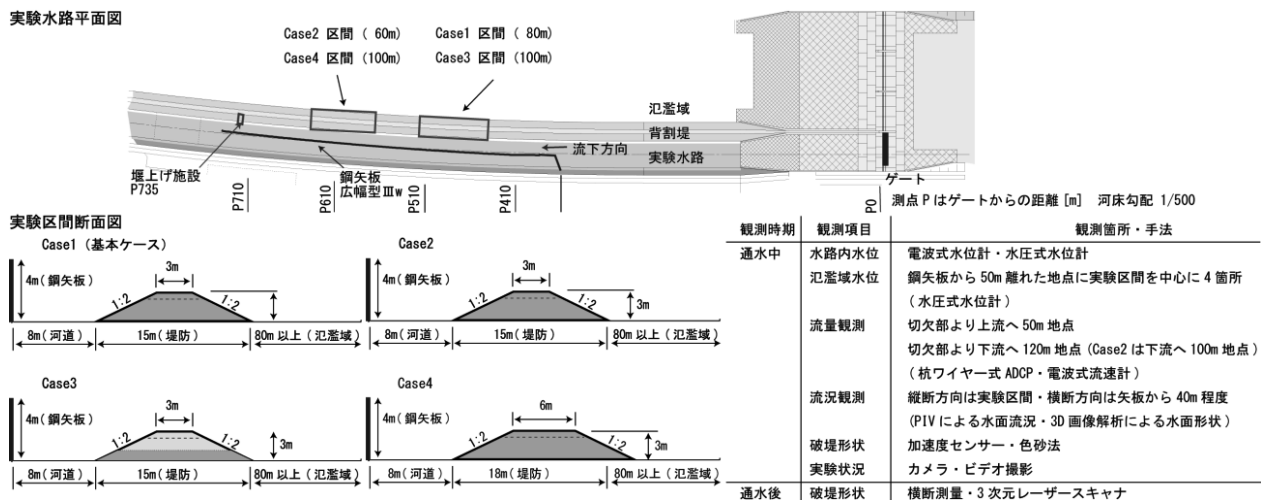


図-2 実験水路の諸元

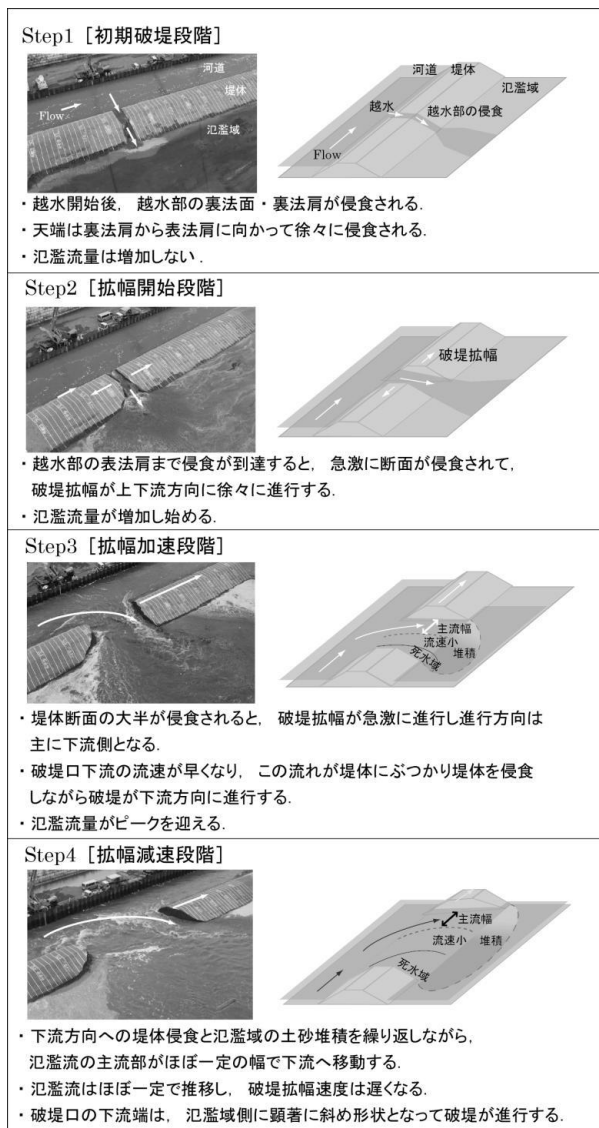


図-3 破堤段階の分類

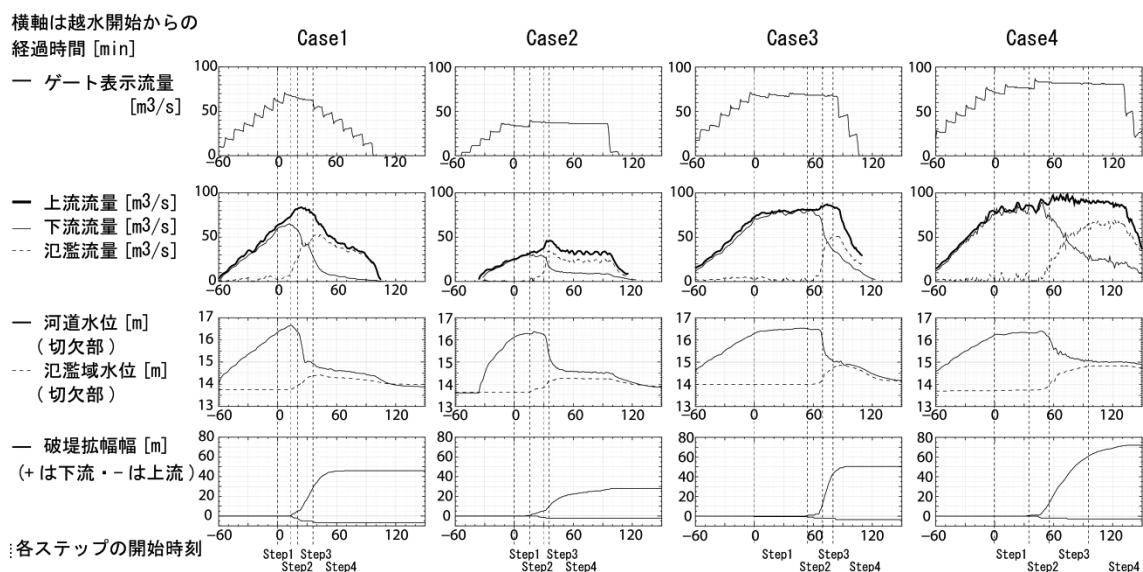


図-4 実験結果

氾濫流量=破堤上流流量-破堤下流流量+貯留変化量)。
河道水位と氾濫域水位は、切欠き部横断線上の左岸矢板護岸及び堤防法尻から氾濫域側におよそ30mの位置にそれぞれ設置した水位計の計測値から算定した。

まず、氾濫流量の時間変化の概要について述べる。
氾濫流量は越水初期段階にはほとんど増加せず、破堤拡幅が始まるstep2以降に増加し始める。step3になると急激に氾濫流量が増加し、破堤拡幅も加速し、河道水位と氾濫域水位の差は縮小する。step4では破堤拡幅は減速するものの進行しながら氾濫流量は一定で推移している。これは、今回の実験ケースでは、図-5に模式的に示すように、堤防崩壊、基盤の洗堀（落堀）、上流側死水域の落堀の埋戻しを繰り返しながら、氾濫流の主流が一定の幅で下流へ移動するためと考えられる。

次に、氾濫流量のピークに関係すると考えられる、step3において破堤上流流量がゲート流量を上回る現象について述べる。これは、破堤拡幅が進行し破堤口の水位が急激に低下するのに伴い河道の水面勾配が増大することで一時的に大きな流量が流下するためと考えられる。別の表現をすると、上流からの河道流量に加えて、急激な水位低下による河道貯留量の減少分が氾濫流として流出する不定流現象と考えることもできる。千代田実験水路は川幅水深比が約2.6と小さいため、河道流量に比べて河道貯留減少による氾濫流量増分の割合が大きい。特にCase2においては、この現象が顕著であり、破堤上流流量及び氾濫流量のピークが立っている。これは、Case2が他ケースに比べて通水量が小さく、堰上げにより所定の水位を確保したケースであることから、氾濫流量のうち河道貯留の流出量が大きな割合を占めているためと考えられる。

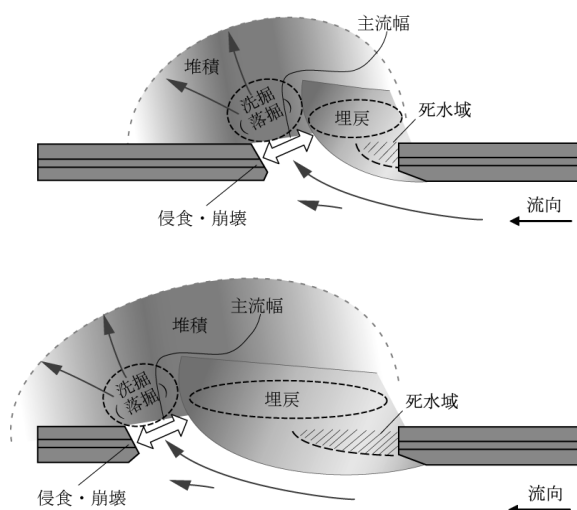


図-5 破堤拡幅過程

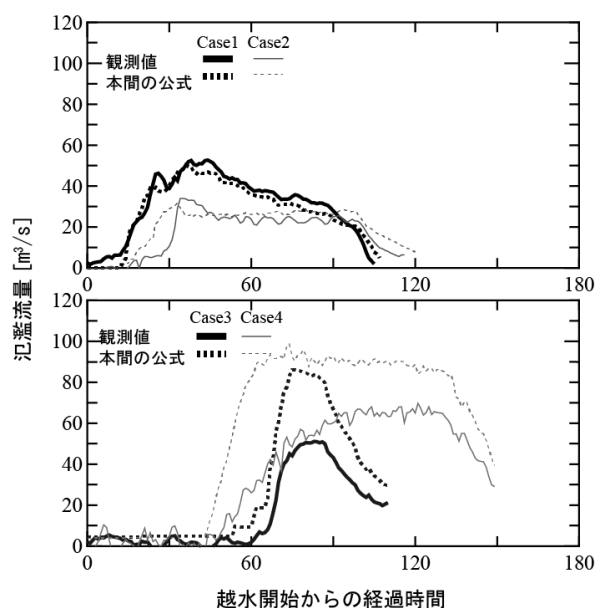


図-6 本間の修正公式による氾濫流量推定

4. 氾濫流量の推定手法の検討

(1) 越流公式を用いた氾濫流量の推定

島田ら³⁾は、Case1, 2について、土木研究所による本間の修正公式⁴⁾を適用した。完全越流で河床勾配 $I > 1/1,580$ のときの公式を(1), (2)に示す。

$$Q_0 = 0.35h_1\sqrt{2gh_1}B \quad (1)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = (0.14 + 0.19\log_{10}(1/I)) \times \cos(48 - 15\log_{10}(1/I)) \quad (2)$$

ここで Q_0 : 本間公式の越流量, Q : 修正された越流量, h_1 : 越流水深, g : 重力加速度, B : 破堤幅である。

島田らと同様の方法で4つのケースを整理し図-6に示す。なお、島田らは、実験前後の河道断面を各時刻の累積摩擦速度で加重平均して流量を算定したが、今

表-2 数値計算による氾濫流量推定 (中間段階)

破堤幅 (m)	上流端流量 (m³/s)	破堤地形	流砂条件	観測値 (m³/s)	計算値 (m³/s)
11	84 (上流流量)	簡易	固定	35.6	33.3
	62 (ゲート流量)	センサー			35.8
	62 (上流流量)	簡易			24.7
	62 (ゲート流量)	センサー			25.6
20	83 (上流流量)	簡易	固定	43	45.4
	62 (上流流量)	センサー			50.2
	62 (ゲート流量)	簡易			35.1
	62 (ゲート流量)	センサー			38.7
30	78 (上流流量)	簡易	固定	47.2	53.4
	62 (上流流量)	センサー			55.3
	62 (ゲート流量)	簡易			37.4
	62 (ゲート流量)	センサー			45
43	67 (上流流量)	簡易	固定	51	55.1
	62 (上流流量)	センサー			54.4
	62 (ゲート流量)	簡易			51.2
	62 (ゲート流量)	センサー			50

回は破堤実験に関する報告書⁵⁾と同様に実験前の河道断面を用いた。Case1, 2は再現性が良好なのに対して、Case3, 4では過大評価となった。この要因を次のように考えた。本間の修正公式では、観測水位と堤防敷高から

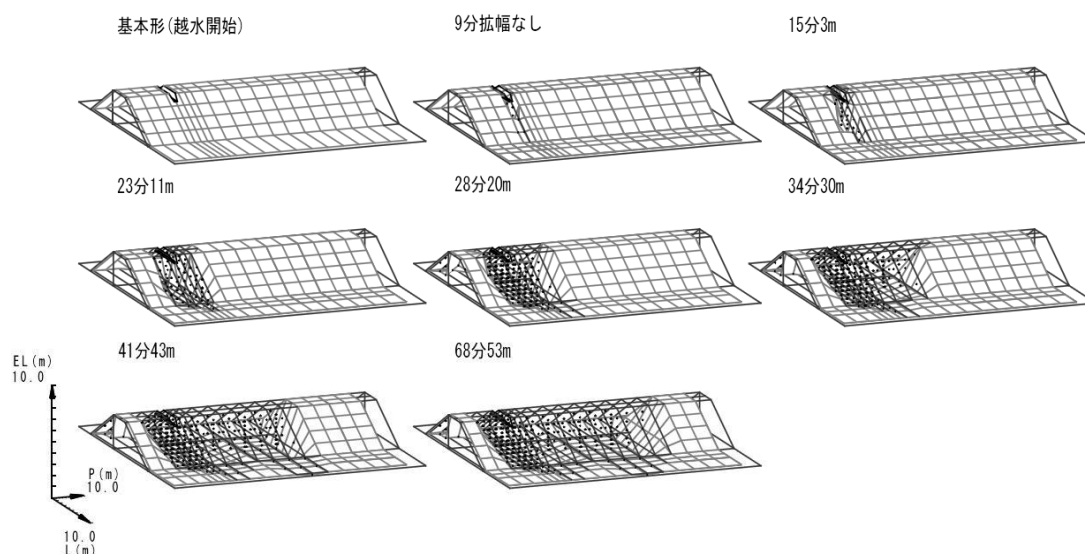


図-7 加速度センサーによる破堤形状の推定

算出した水深と破堤幅からなる矩形断面を設定している。一方実験では、Case1, Case2では破堤口に落掘が形成され堤防敷高以下まで侵食されたのに対して、Case3, Case4では明確な落掘が形成されなかった。このため、破堤口底部の標高（以下「破堤敷高」という。）の設定が重要な要因であると考えられる。

以上のことから、本間の修正公式の適用にあたっては、落掘が形成されない（破堤敷高が堤防敷高より高い）場合は、破堤断面の設定に留意が必要である。

(2) 数値計算モデルによる氾濫流量の推定

ここでは、清水らが開発したフリーソフトウェア iRIC⁶⁾ のNays2Dソルバーを用いて実験水路条件を再現して氾濫流量を計算した。Nays2Dソルバーは2次元浅水流を基礎とするモデルであるが、詳細は参考文献を参照されたい。なお、計算は、基本ケースとなるCase1を検討対象とする。

計算は大きく分けて3つの目的で行った。1つ目は、計算の上流端流量の設定値を検討するためゲート流量と各時点の破堤上流流量を与えたケース、2つ目は、破堤断面の影響を検討するため矩形近似断面と実際の破堤形状を用いたケース、3つ目は、河道及び氾濫域の地形の影響を検討するため通水後の測量地形と矩形近似断面を用いたケース、それぞれのケースについて氾濫流量の観測値と計算値を比較した。

a) 上流端流量、及び破堤断面による影響について

図-7に、堤体に設置した加速度センサーの流失時間から破堤形状の時間変化を推定した結果を示す。破堤前の水路地形に、推定した破堤形状の標高データのみ置き換えた地形（以下「センサー破堤地形」という。）を作成し氾濫流量を計算し、実験で観測された同じ経過時間における氾濫流量と比較した。なお、計算はすべて固定床とし、氾濫流量が安定するまで行った。実験では先述したように、ゲートから一定流量を放流した場合でも、破堤によって河道貯留が流出するときに一時的に大きな流量が生じた。このことを考慮して、計算の上流端流量として、各経過時間における破堤上流流量を与えたケースと、ゲート流量を与えたケースの2通り計算を実施した。さらに、堤防基盤の侵食が氾濫流量に与える影響を検討するため、各ケースの破堤幅で破堤断面が矩形となるように堤防敷高から上方を切り取った地形（以下「簡易破堤形状」という。）を用いた計算も行い、センサー破堤形状の計算結果と比較した。各計算ケースの条件及び計算結果を表-2に示す。

上流端流量の設定に関して、破堤初期においては破堤上流流量を与えたケースの方が再現性は良好であり、破堤後期になると、どちらの流量ケースも再現性が良

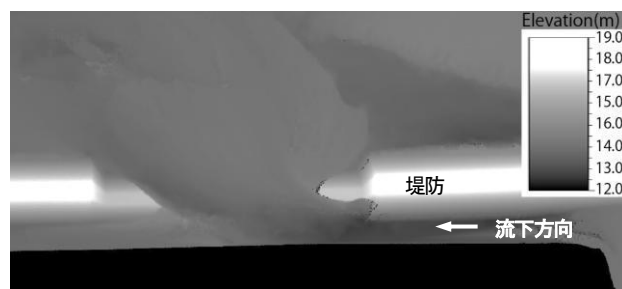


図-8 標高測量（Case1実験後）

表-3 数値計算による氾濫流量推定（最終段階）

破堤幅 (m)	上流端流量 (m ³ /s)	破堤地形	流砂条件	観測値 (m ³ /s)	計算値 (m ³ /s)
53 (最終)	62 (ゲート流量)	置換え	固定	52	42.5
		測量			47.9
		置換え	移動		50.0



図-9 数値計算結果（最終形状、移動床）

好であった。これは、破堤後期段階では河道貯留の効果が小さく破堤上流流量とゲート流量の差が小さいことが理由と考えられる。なお、破堤上流流量を与えたケースで全般的にやや過大評価となったが、これはセンサー破堤地形ではセンサー流失後の堆積が考慮できないため、破堤断面が少し大きめに見積もられることが理由と考えられる。

次に、破堤断面の設定に関して、破堤上流流量を与えた場合どちらの断面ケースでも再現性は良好であった。これに対して、ゲート流量を与えたケースでは、簡易破堤地形よりもセンサー破堤地形の方が再現性は良好であった。実務においては、上流端流量に河川流量を定常流として与える手法が通例であり、今回のゲート流量のケースに相当する。したがって、上記の結果より、実河川への適用にあたって、破堤断面に設定にあたって敷高の見積が推定精度に大きく影響することを示唆する。

b) 河道と氾濫域の地形による影響について

Case1の実験後（破堤幅53m）にレーザー測量を行い、河道、破堤口を含む堤防、氾濫域の標高を計測した。図-8に測量データから作成した陰影図を示す。この測量地形と、測量地形のうち堤防以外を初期地形に置換えた地形（以下「置換え地形」という。）の2

ケースで計算を行った。また後者の地形ケースでは、河道と破堤口及び氾濫域を移動床（未破堤部を固定床）とした計算ケースも行った。なお、上流端流量については、破堤終盤では氾濫流量がほぼ一定の定常状態だったことから、ゲート流量を与えた。各計算ケースの条件及び氾濫流量の計算結果を表-3に示す。3ケースを比較し、河床形状変化及び氾濫域地形変化が氾濫流量に与える影響に着目して考察する。

測量地形のケースでは再現性が良好だったのに対して、置換え地形のケースでは氾濫流量が過小評価となった。次に、置換え地形のケースを移動床で計算したケースでは、固定床のケースに比べて氾濫流量が増加し再現性が向上した。図-9に移動床ケースの計算後の地形を示すが、河道上流の河床低下、破堤口の深掘れ（落掘）、河道下流の堆積が発生しているのがわかる。これらの地形変化は測量地形にも概ね現れていることから、氾濫流量計算の再現性に影響することが示唆される。

6. まとめ

本件研究では、千代田実験水路における破堤実験結果に関して、氾濫流量と破堤形状、河道及び氾濫域の地形変化に着目して整理するとともに、既往の推定手法（本間の公式）や数値計算の再現性を検証し、氾濫流量の推定精度を向上に関する留意点を以下のとおりまとめた。

① 本間の修正公式による推定

- ・ 落掘が形成されないと予想される場合、精度が悪くなる可能性がある。

② 数値計算による推定

- ・ 河道流量の設定に関して、破堤初期は破堤上流流量を与えたケースの再現性が良好であり、破堤後期はゲート流量を与えたケースでも再現性は良好であった。
- ・ 破堤上流流量を与えたケースで全般的にやや過大評価となったが、これはセンサー破堤地形ではセンサー流失後の堆積が考慮できないため、破堤断面が少し大きめに見積もられることが理由と考え

られる。

- ・ 破堤断面の設定に関して、破堤上流流量を与えた場合どちらの断面ケースでも再現性は良好であった。これに対して、ゲート流量を与えたケースでは、簡易破堤地形よりもセンサー破堤地形の方が再現性は良好であった。
- ・ 堆積や落掘の影響について検討するため、堤防を固定床とし、河道、破堤口及び氾濫域を移動床として2次元計算河床変動したところ、概ね地形が再現でき氾濫流量の推定精度が向上した。

なお、本研究で得られた知見は、千代田実験水路の固有の特徴である急流礫河川で川幅水深比が小さいという条件下で得られたものである。したがって、河川下流域や大河川に適用する場合には十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 辻本哲郎，本守真人，安部友則，山田哲：氾濫シミュレーション手法の開発と東海豪雨災害の再現，2002河川技術論文集。
- 2) 飛田大輔，柿沼孝治，横山洋，武田淳史：千代田実験水路破堤幅実験に基づく堤体崩壊量の定量化 水工学論文集，第57巻，2013年2月 土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1225-I_1230, 2013.
- 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越水破堤幅メカニズム，河川技術論文集，第17巻，2011年7月，pp263-268, 2011.
- 4) 栗城稔，末次忠司，小林裕明，田中義人：横越流特性を考慮した破堤氾濫流量公式の検討，土木技術資料，第38巻，第11号，pp.56-61, 1996.
- 5) 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤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。
- 6) iRIC: <http://i-ric.org/ja/>

(2013. 4. 4 受付)