

破堤を伴う高流速条件下における 越水氾濫流量観測

(独)土木研究所寒地土木研究所 道東支所 ○稲垣 達弘
(独)土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム 柿沼 孝治
国土交通省北海道開発局帯広開発建設部 治水課 三宅 洋

千代田実験水路では、堤防の3次元越水破堤メカニズムの解明に向けた実スケールの破堤実験を行っている。破堤による外水氾濫は堤内地の浸水被害に直結するため、破堤実験では氾濫流量の詳細なモニタリングが重要となる。

本研究では、破堤を伴う高流速条件下において破堤部の上下流で電波式流速計による分単位の通過流量観測を行い、両者の収支から氾濫流量を計測した。観測地点における正確な通過流量を算出するため、ADCP実測値に基づく流速補正および摩擦速度分布を考慮した流水断面積補正を行った。

キーワード：千代田実験水路，氾濫流量，電波式流速計，ADCP

1. はじめに

千代田実験水路¹⁾は十勝川中流部の現河道内に築造された実物大水利実験施設であり、国土交通省北海道開発局と(独)土木研究所寒地土木研究所では2008年度から実スケールでの越水破堤実験を行ってきた²⁾³⁾。2010年度からは氾濫域まで考慮したより実現象に近い越水破堤実験を実施し⁴⁾、3次元越水破堤メカニズムの解明に向けた検討を進めている(図-1)。このなかで島田ら⁵⁾は破堤実験で観測した実際の氾濫流量を用いて、現在のハザードマップ作成時に用いられる破堤氾濫流量算出式の精度検証を行い、本間の修正公式によりその概算量を算出できることを明らかにしている。

破堤による外水氾濫は堤内地の浸水被害に直結することから破堤進行と氾濫流量の関係把握が重要であり、破堤実験では氾濫流量を詳細かつ正確に観測する事が求められる。

本研究は、破堤を伴う極めて複雑で高流速の条件下において、電波式流速計を用いて越水氾濫流量を連続的に観測し、ADCP実測値に基づく流速補正および摩擦速度分布を考慮した流水断面積補正を行った。本稿では、2011年4月の破堤実験(河道流量：約70m³/s)を対象に、氾濫流量の観測方法および流速・流水断面積補正の手法について実際の手順に基づき報告する。

2. 氾濫流量観測の概要

観測機器の配置を図-2に示す。図中央が河道であり堤防を挟んで右岸側が氾濫域である。河道幅は8mに設



図-1 千代田実験水路における越水破堤実験の様子

定しており、河岸形状は左岸側が鋼矢板の直立であり右岸側は土堤の2割勾配である。破堤実験における氾濫流量観測は、破堤の開始箇所として設けた低み(切欠)を基準として、上流へ50m、下流へ125m離れた地点における河道通過流量を、電波式流速計及びADCPを用いて各々観測し、上下流の流量差を氾濫流量とした。計測機器の概要を表-1、計測状況を図-3に示す。

(1) 電波式流速計

電波式流速計とは、上空から水面へ向け電波を放射し、ドップラー効果による反射波の周波数変化から表面流速を連続的に測定する非接触型の流速計である。

上流観測地点は水路を横断する人道橋上において左岸矢板から4m離れた位置の高欄に、下流観測地点では左岸矢板から4m張り出した単管パイプに各々1台の電波式流速計を上流へ向け設置し、河道中心部の表面流速

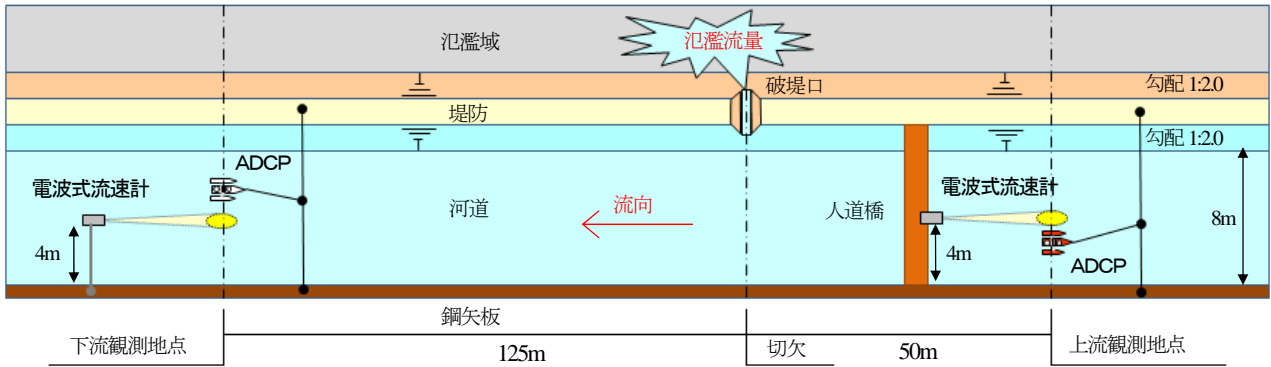


図-2 計測機器の配置

表-1 計測機器概要

ADCP	
機種名	RD Instruments社製 Workhorse
周波数・モード・層厚	1200kHz・12(ハイスピード)・10cm
GPS	NAVCOM社製 SF-2030M
電波式流速計	
機種名	横河電子機器社製 WJ-7661 [RYUKAN]
計測原理	マイクロ波のドップラー効果
周波数	24.15GHz (特定小電力機器)



図-3 計測状況(左:下流側, 右:上流側)

を計測した。データ取得間隔は1秒であるが生データでは情報が細かく数値の震幅が激しいため、5分間の移動平均で平滑化した後、1分間隔データを抽出した。

流量算出は、計測した連続流速に、横断測量と水位のデータから算出した1分間隔の流水断面積を乗じて連続的な流量ハイドロを作成した。なお、横断測量は通水前および通水後に実施したので、流量は通水前横断と通水後横断からそれぞれ算出した。

(2) ADCP

ADCPとは、超音波のドップラー効果を応用して河道断面内の流速分布を測定する流量観測機器である。ADCPは流速と一緒に河道の横断形状を測定することができる。

観測はADCP本体、GPS、無線データ転送装置を小型艇に搭載して水面に浮かべ、鉛直下方の流速分布と河床高を計測しながらワイヤで曳航し、河道を横断させることで河道断面全体の流速分布と流水断面積を得た。ADCPは機器の特性上、表層部と河床部の流速を取得できないので、流量算出ではADCPの附属ソフト(Win River)を用いてこれらを補間(水面部に第1層流速を付与、河床部に理論式:power curve fit⁶⁾を適用)した。

3. 観測結果

図-4に電波式流速計とADCPによる流量観測結果を示す。電波式流速計の流量が2つ存在するのは、前述のとおり、通水の前と後の横断測量データからそれぞれ流

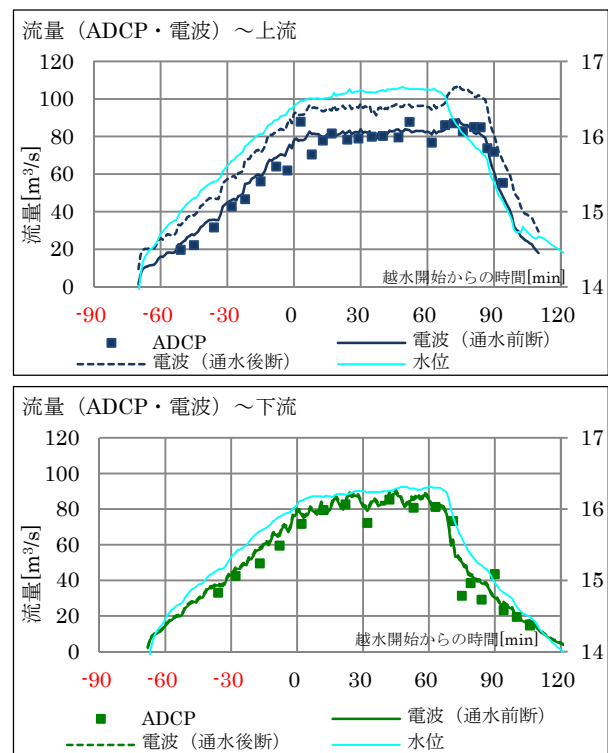


図-4 流量観測結果(上:上流側, 下:下流側)

量を算出しているからである。なお、本検討では、既往実験⁷⁾⁸⁾において従前手法と非常に近い流速を計測しており、流水断面積についてはリアルタイムデータを取得できるADCPの観測値を、流量、流速、流水断面積それぞれの真値として以降の議論に使用する。

上流では、ADCPに比べ電波式流速計の流量が通水の

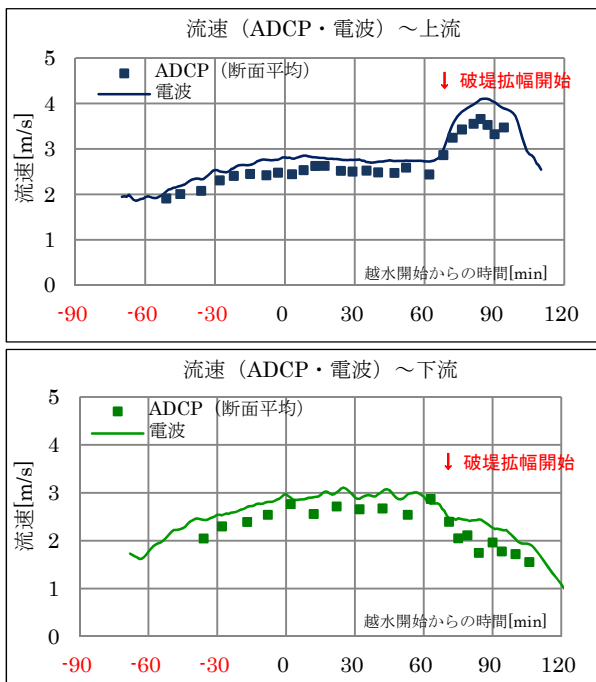


図-5 流速観測結果(上:上流側, 下:下流側)

前後ともに大きめである。また、水位と流量の関係に着目すると、破堤の進行に伴い越水開始後70分頃から水位が低下し始めるが、流量は90分後頃まで低下せず、逆に一時的に増加している様子が確認できる。

下流ではADCPに比べ電波式流速計の流量は僅かに大きいか概ね一致している。また、水位と流量は同じように推移している。

流量は流速と流水断面積の積であるため、差の要因を明らかにするためには、流量を流速と流水断面積に分離して比較する必要がある。

(1) 流速の比較

図-5に電波式流速計とADCPの流速を示す。電波式流速計の流速は、上下流ともに一様にADCP流速より大きい。電波式流速計を始めとする非接触型流速計は、河床や河岸との摩擦が少ない表面流速を計測しているため、流水断面全体の平均流速（以下、断面平均流速）を計測するADCPとの間にこのように差が生じると考えられる。

次に上流観測地点において、越水開始後70分ごろから急激に流速が増加しているのは、越水部の破堤拡幅が始まり、水路内をほぼ満水で流れる流水が水深のない氾濫域へ一気に流出したことで流水勾配が急になった影響によるものと考えられる。

(2) 流水断面積の比較

図-6に電波式流速計の流量算出に用いた2つの流水断面積と、ADCPによるリアルタイムの流水断面積を示す。通水の結果、上流観測地点では河床低下に伴い横断形状が図-7のように変化したため、電波式流速計の

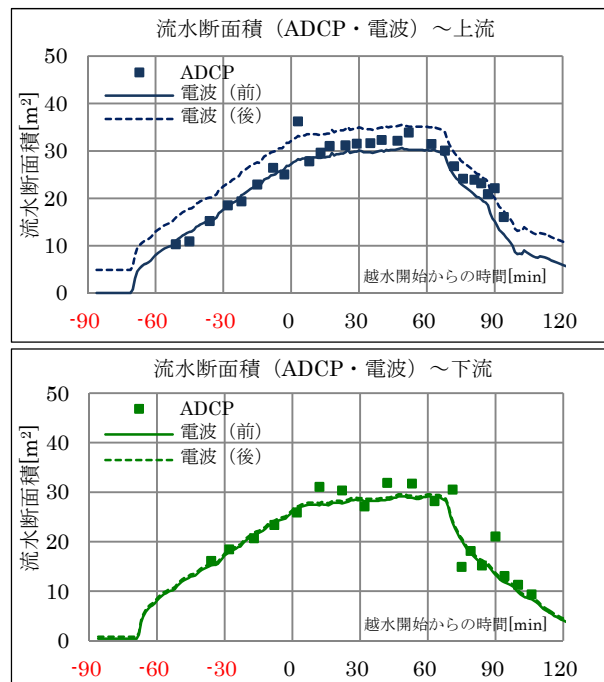


図-6 流水断面積(上:上流側, 下:下流側)

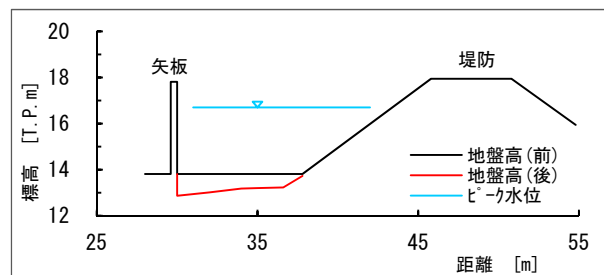


図-7 通水前後の横断面図(上流側)

流水断面積は通水前後で大きく異なる。ADCPとの比較では、越水開始まではADCPと通水前横断が一致しており、越水開始以降はADCPの断面積が徐々に通水前横断より大きくなり最後には通水後横断と一致している。これは、通水により河床が低下し流水断面積が増加する過程を、ADCPが捉えたものと考えられる。

一方、下流観測地点では通水前後で横断形状がほとんど変化しなかったため、通水前後の流水断面積の差はほとんど無い。ADCPとの比較では、中盤においてADCPのばらつきが目立つものの、全体的には概ね一致している。

4. 流速補正および流水断面積補正

電波式流速計を流量観測に用いる際には、計測した表面流速を流水断面全体の流速へ補正する必要がある。

また、流量算出に付与する流水断面積は、出水前後いずれかの横断測量データから算出するのが一般的だが、出水前と出水後で横断形状が大きく異なる場合には、出水初期には前横断を、出水後期には後横断を適用することでより正確な流量の評価が可能になると考

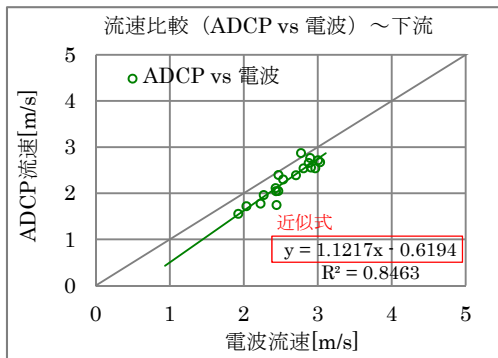
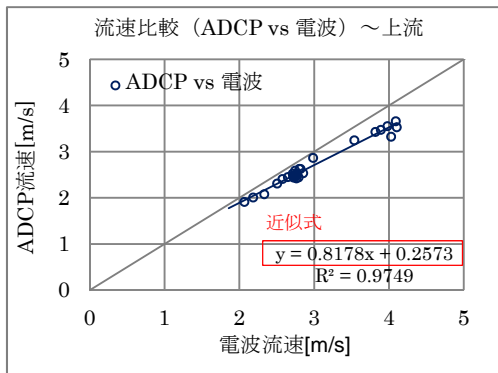


図-8 電波式流速計と ADCP の流速比較
(上:上流側, 下:下流側)

えられる。さらに前横断から後横断へ移行する過程を時系列で推定できれば、現実に近い流水断面積の再現が可能になる。以下に、流速補正と流水断面積補正の手法を整理した。

(1) 流速補正

既往の知見⁹⁾によると実河川における電波式流速計の流速補正係数は、0.85~0.90 程度に設定されており、表面浮子の更正係数 0.85 を適用する事例も多い。著者らの検討⁸⁾においても表面浮子の更正係数を適用し概ね±10%の精度で断面平均流速を評価できることを確認している。しかし、ここではより正確な流速補正を行う必要があるため、図-8 に示す ADCP と電波式流速計の流速比較から得た近似式により、個別に電波式流速計の流速補正を行った。流速補正の結果を図-9 に示す。上下流ともに ADCP 流速に一致した。

(2) 流水断面積補正

通水前後で大きな断面変化が生じた上流観測地点を対象に、流水断面積の変化過程を推定する手法を用いて流水断面積補正を行った。

通水前後における横断形状の変化は、流速の増加に伴い掃流力が増し、河床や河岸を形成する土粒子が移動したことにより生じたものと考えられる。土粒子の移動は摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時に発生し、移動量はその強さに依存すると仮定すれば、それらの数値から断面変化が生じた時間帯と変化量が推

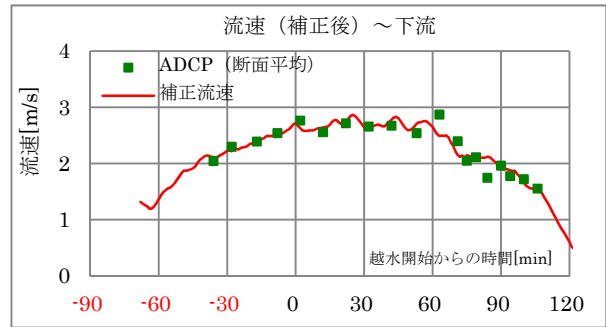
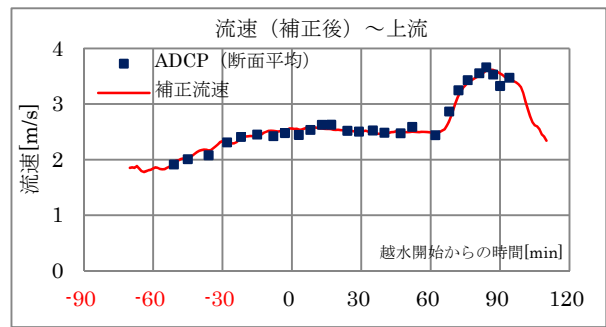


図-9 流速の補正結果(上:上流側, 下:下流側)

表-2 千代田実験水路の水力パラメータ

粗度係数 n	土粒子密度 $\rho_s [g/cm^3]$	水中比重 s	河床粒径 $d_{50} [mm]$	土堤粒径 $d_{50} [mm]$
0.024	2.63	1.63	14.7	2.7

定できる。

摩擦速度 $[u_*]$ 及び限界摩擦速度 $[u_{*c}]$ は式(1)、(2)により求めた。計算に用いるパラメータは表-2 に示す千代田実験水路の実測値とし、摩擦速度の計算に用いる流水勾配 $[I]$ は、連続流速が得られる電波式流速計の特性を活かし、式(3)によりエネルギー勾配 $[I_e]$ を算出し式(1)に付与した。

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (1)$$

$$u_{*c} = \sqrt{0.05sgd} \quad (2)$$

$$I_e = \left(\frac{nV}{h^3} \right)^2 \quad (3)$$

図-10 に、摩擦速度と限界摩擦速度の計算結果を示す。着色部は限界摩擦速度を超過する摩擦速度を現しており、摩擦速度が限界摩擦速度を超過している時間帯と摩擦速度の強さが分かる。堤防の破堤開始(越水開始か

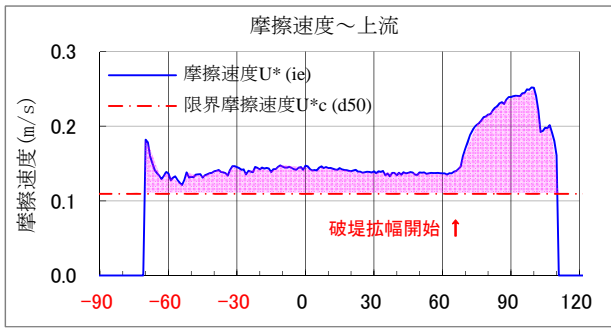


図-10 摩擦速度の時系列分布(上流側)

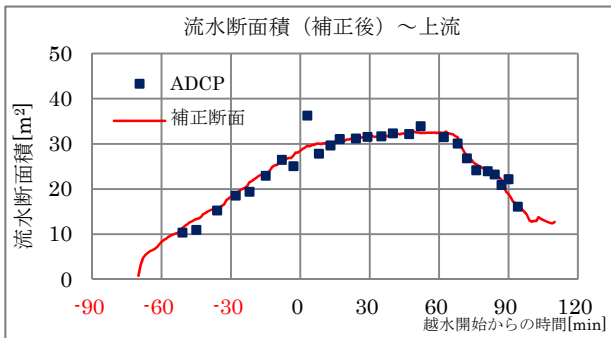


図-11 流水断面積の補正結果(上流側)

ら約70分経過時)と共に摩擦速度が急激に大きくなっている。ここで、摩擦速度が限界摩擦速度を超過した時刻に断面変化が始まり、限界摩擦速度を下回る時刻に全ての断面変化が終わると仮定し、超過量の累計(図-10における着色部全体に占める任意の時刻までの超過量の割合)を前後の流水断面積に加重配分して流水断面積を補正した。補正結果を図-11に示す。通水の初めから終わりまでADCPに概ね一致させることができた。

(3) 補正流量の算出

上記により補正した補正後流速と補正後流水断面積(下流側は通水前横断使用)を用いて流量を再計算した結果を図-12に示す。上下流ともにADCP流量に概ね一致する連続流量を再現できた。

5. 氾濫流量の算出

上下流流量の収支により、図-13のように氾濫流量を算出した。しかし越水開始前においても、常に上流流量が下流流量を上回っており、氾濫流量が計上される。これは流量観測位置が切欠位置から上流=-50m、下流=+125m 離れていることに起因するものと考えられ、越流量の推定には、単純に同時刻に計測した上下流量の差を用いた算出方法では正確な越流量を算出できないことが分かった。そこで、上下流間の流量ハイドロに約3分の遅れ時間があることから、これを切欠から流量観測地点までの距離で按分し、上流流量にマイナス1分、下流流量にプラス2分の時間差を配分してハ

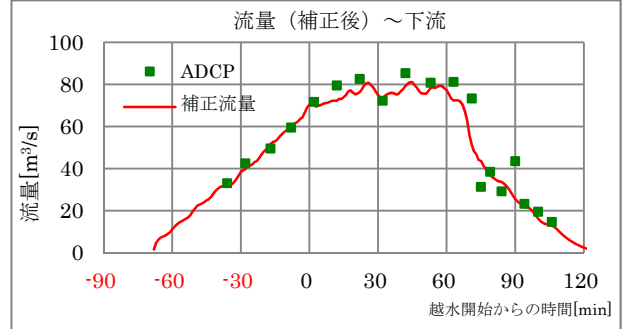
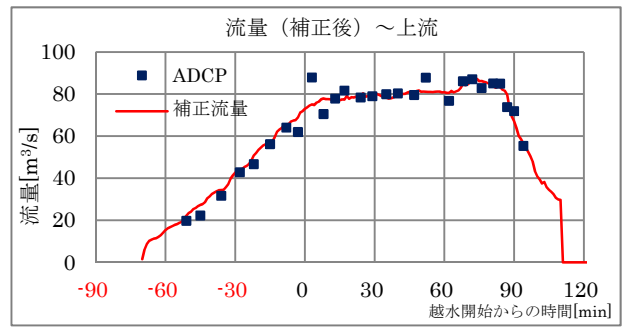


図-12 補正後流量(上:上流側, 下:下流側)

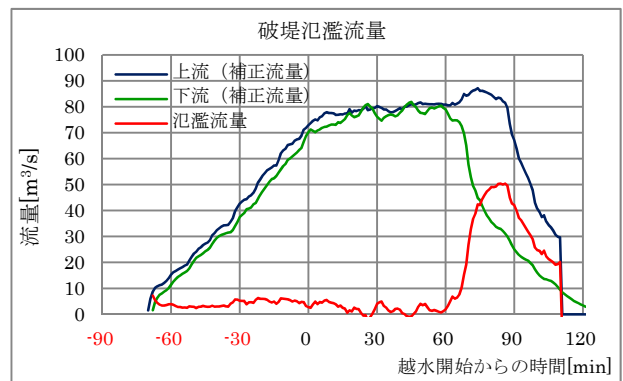


図-13 補正後流量(上:上流側, 下:下流側)

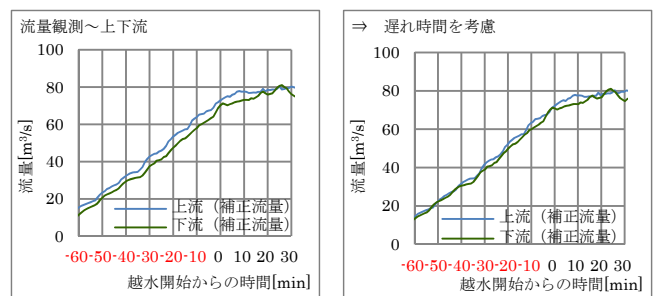


図-14 遅れ時間の調整(左:調整前, 右:調整後)

イドロをスライドさせることで、図-14のように上下流流量を調整した。

次に、上下流の観測地点間の河道内貯留水が破堤によって氾濫域へ流出することが考えられるため、貯留変化量を算出し氾濫流量に反映させた。貯留変化量とは、観測地点間の河道内に貯留される水の時間的な変化量である。破堤実験で観測した25m間隔の水位データを用いて1分間隔の貯留変化量を算出した結果を、図-15

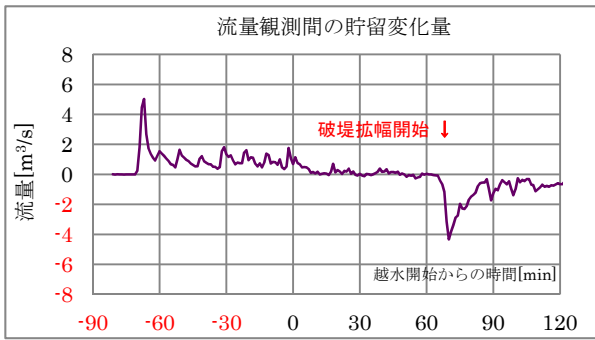


図-15 流量観測間の貯留変化量

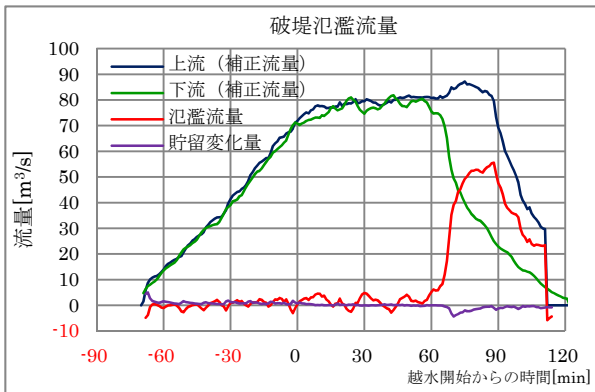


図-16 破堤氾濫流量(遅れ時間と貯留量を考慮)

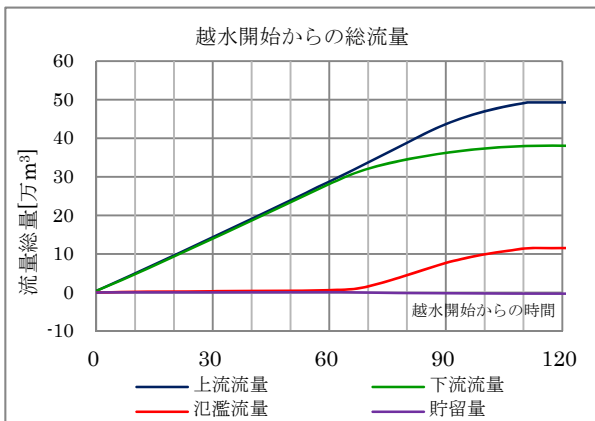


図-17 越水開始からの総流量

に示す。越水開始までは河道内の貯留が継続しており、破堤拡幅が始まる時刻（越水開始後70分）に貯留量がマイナスに転じていることから、河道内貯留量の変化を再現できていることが確認できる。

上下流流量の遅れ時間と、河道内貯留変化量を考慮した氾濫流量の計算結果を図-16に示す。越水開始時刻と氾濫流量が増加し始めるタイミングが一致し、破堤氾濫は越水開始から70分経過後に本格的に始まっている様子が確認できる。

最後に、越水開始からの総流量を図-17に示す。計算結果から、今回の実験では越水開始から実験終了までに上流から供給された総流量は約49万 m^3 であり、その

うち約38万 m^3 が下流へ流下し、約12万 m^3 が氾濫域へ流出したことが分かる。

6. おわりに

本研究で実施した破堤実験における氾濫流量観測の概要を以下に要約する。

1. 電波式流速計で計測した流速は ADCP の計測値に比べて一様に大きい、その要因は表面流速と断面平均流速の差と考えられる。ADCP 流速との相関から求めた近似式により電波式流速計の流速を補正した。
2. 通水断面形状が通水前後で大きく変化した上流観測地点については、摩擦速度の分布に基づいて前横断と後横断の流水断面積を連結させる手法により ADCP の実測値とほぼ等しい流水断面積を再現した。
3. 氾濫流量の算出に当たっては、破堤部上下流で観測した流量の単純な収支では正確な氾濫流量を評価できず、上下流間の遅れ時間と河道内貯留変化量を考慮することで精度の高い氾濫流量を算出できる。

参考文献

- 1) 千代田新水路の概要及び千代田実験水路, 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部, <http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/index.html>
- 2) 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横断堤越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第53巻, pp871-876, 2009.
- 3) 島田友典・平井康幸・辻珠希: 千代田実験水路における越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第54巻, pp811-816, 2010.
- 4) 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氾濫域を含む越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第55巻, pp841-846, 2011.
- 5) 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拡幅メカニズム, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp263-268, 2011
- 6) WinRiver 操作手順書, 株式会社SEA, pp31, 2005.
- 7) 稲垣達弘・島田友典・三宅洋: 千代田実験水路における新手法を用いた流量観測について, 平成22年度北海道開発技術研究発表会, 2011.
- 8) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋: 十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp41-46, 2011.
- 9) 深見和彦・今村仁紀・田代洋一・児玉勇人・中島洋一・後藤啓介: ドップラー式非接触型流速計(電波・超音波)を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～, 河川技術論文集, 第14巻, pp307-312, 2008.