

## 第Ⅱ部 千代田実験水路における越水破堤実験

第Ⅱ部では、千代田実験水路で実施した越水破堤実験について述べる。

第4章では、千代田実験水路の概要について紹介する。

第5章では、実験に先立ち、堤体内部の破堤進行過程を計測する手法の選定について述べる。

第6章・第7章では、各種計測手法の確認及び基本的な破堤進行過程の把握を目的に実施した予備実験について述べる。

第8章では、以上により得られた知見を踏まえて実施した本実験について述べる。

ここで、実験の流れを整理するため、予備実験や本実験の概要と目的を述べておく。あらかじめ、堤体内部の破堤進行過程を計測する手法の選定を行ったうえで、予備実験により各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握を行い、そこで得られた知見によって本実験の実験条件を決定した。

### 【予備実験】

千代田実験水路における越水破堤実験は、前例のない規模の実スケール実験である。このため、まず、各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握を目的に、千代田実験水路において予備実験を行った。予備実験は、正面越流及び横越流で破堤実験を行い、このうち横越流破堤実験に関しては、堤体材料の違いによる2ケースで行った。

### 【本実験】

予備実験で得られた計測手法や条件設定等に関する知見を踏まえて、千代田実験水路において、広い氾濫域を設定した横越流の破堤実験を行った。実験は、河道流量(フルード数)、堤体材料、堤体形状(天端幅)の違いによる4ケースで行った。

なお、千代田実験水路における今回の実験の目的は、越水破堤現象のうち破堤拡幅機構の解明が主であることから、破堤位置については、毎回設定した箇所から破堤拡幅が始まるように切欠部分を設けている。また、堤体の植生(芝)について、今回のように短期間で実験を繰り返す場合、芝の育成条件を均一に保つことが困難であり、また、越水時の植生による定量的な評価<sup>3)</sup>は難しいことから、堤体は裸堤(芝を張らない土堤)とするなど条件を限定した実験をおこなっている。そのため、特に越水初期から破堤拡幅が開始するまでの現象については、芝等で防護された通常の堤体とは異なることに注意を要する。

また、本実験において氾濫域は、千代田新水路側を利用することにより広く設定しているものの、通水流量に限界があり、必要な水深を確保するために河道幅に制約がある。そのため、実河川と比べ、氾濫流が河道流へ及ぼす影響が大きくなる可能性がある。

## 第4章 千代田実験水路の概要

国土交通省北海道開発局では、一級河川十勝川において、治水安全度を向上させることを目的に起伏式ゲートを4門配置した十勝川千代田新水路を建設し、2007年4月より運用を開始している。写真-14、図-25に示す千代田実験水路は、十勝川千代田新水路の一部を活用し、実河川スケールで様々な実験・研究を行う施設であり、延長1300m、幅30mの国内最大規模の実物大河川実験水路<sup>18)</sup>である。



写真- 14 千代田実験水路

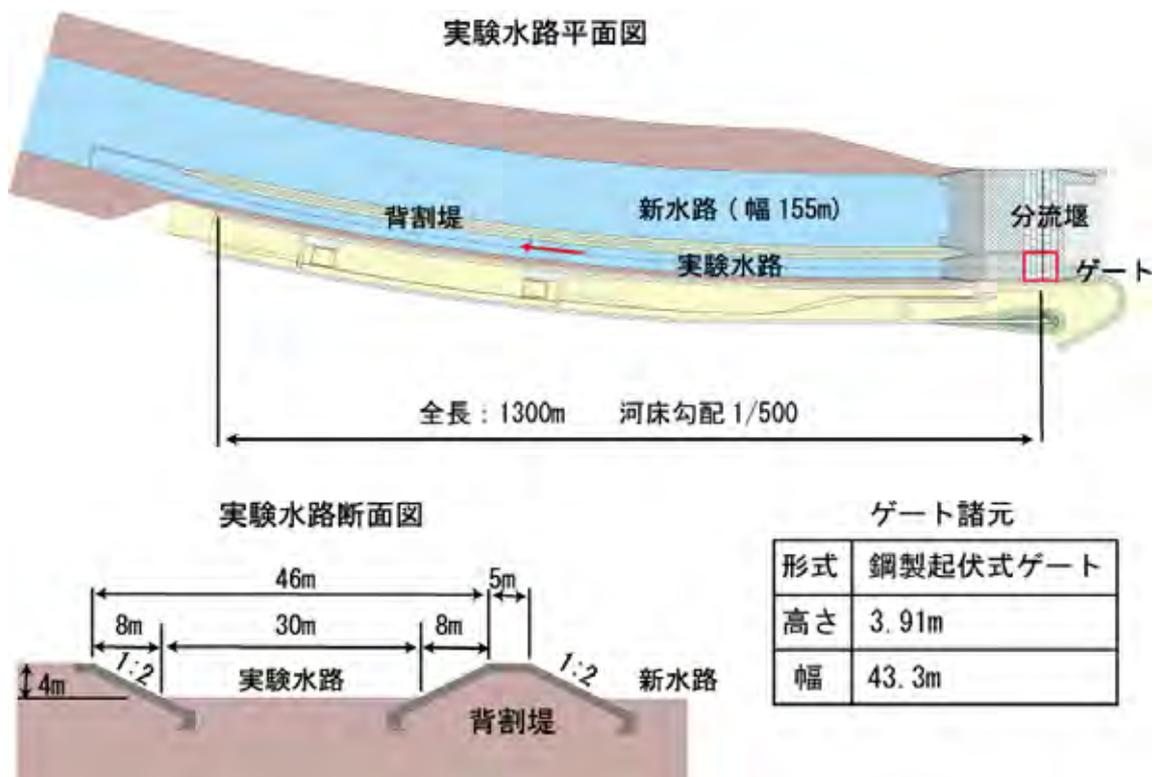


図- 25 千代田実験水路の概要



写真- 15 ゲートからの通水状況

写真- 15 に示すように、実験水路上流端の分流堰の起伏式ゲートを開閉操作することにより十勝川から流量の一部を実験水路内へ供給することで、流量を制御した実験が可能である。なお、予備実験により  $120\text{m}^3/\text{s}$  までゲートの流量精度を確認済みである。

## 第5章 破堤進行過程の計測手法

破堤実験を実施するにあたっては、破堤進行過程を捉えるための様々な計測を実施する必要がある。これまでの研究において、水位や流速、実験終了後の地形、破堤形状などの計測手法についてはある程度の実績があるが、破堤進行中の堤体内部の崩壊状況を時系列で計測する手法については事例がない。このため、実験に先立ち、計測センサーの選定及び室内実験水路での検証を行った<sup>19)</sup>。



写真- 16 使用したセンサー

表- 5 センサー諸元

	加速度センサー	水温センサー
製造会社	米国オンセット社	
型番	UA-004-64	UTBI-001
計測範囲	±3G	-20℃~30℃(水中)
精度	±0.075G	±0.2℃
分解能	0.025G	0.02度
時間精度	±1分/月	±1分/月
寸法/重量	58×33×23mm/18g	30×40×17mm/23g
メモリ	64k(3軸で21800点)	64k(42000点)

### (1) センサーの選定

流水下にある堤体の不可視部分の形状を計測するためには、無線式又は自記式で防水性能を有するセンサーが必要とされる。また、破堤進行過程を時系列で把握するためには、堤体内に数多くのセンサーを設置する必要がある。そのため、センサーの選定にあたっては、小型・安価・大量設置が可能であることを基本として、複数種のセンサーを総合的に検討した。無線式センサーは受信チャンネル数に制限があり、大量設置には適していないことから、自記式加速度センサー及び自記式水温センサーを選定した。

選定したセンサーを写真- 16 に、諸元を表- 5 に示す。加速度センサーは、センサー設置箇所が崩壊し流出することで発生する加速度を感知、また、水温センサーは横山らの手法<sup>20)</sup>を参考に、センサー設置箇所が崩壊し流出することで生じる堤体内と流水の温度の違いによる水温変化を感知するものと考えた。それぞれの計測値を時系列で記録し、値の大きな変化点から設置箇所の崩壊時刻を把握しようとするものである。データ取得間隔はそれぞれ1秒毎とした。

また、センサーはいずれも取得データをセンサー内メモリに書き込む自記式であるため、実験終了後にセンサーを回収しデータを取得する必要があることから、センサーが流出後、速やかに浮上するように写真- 16 に示すとおり、浮力を持たせる加工を行った。



写真- 17 室内実験の状況

## (2) 実験概要

室内実験は寒地土木研究所が所有するガラス製直線水路(幅 1.0m×高さ 1.0m×長さ 23m)を用いて行った。写真- 17 に示すように水路内の一部区間の全幅に盛土することにより堤体を造成し、側面から流出状況が目視できるようにセンサーを配置した。実験は堤体上流部に一定時間堪水させたのち流量を増加し、正面から越流させて破堤させ(全 4 回:加速度及び水温センサー各々の使用累計数 26 個)、目視により流出を確認した時刻とセンサーの感知した時刻を比較することで、センサーの精度の検証や千代田実験水路での適用の可能性を確認した。

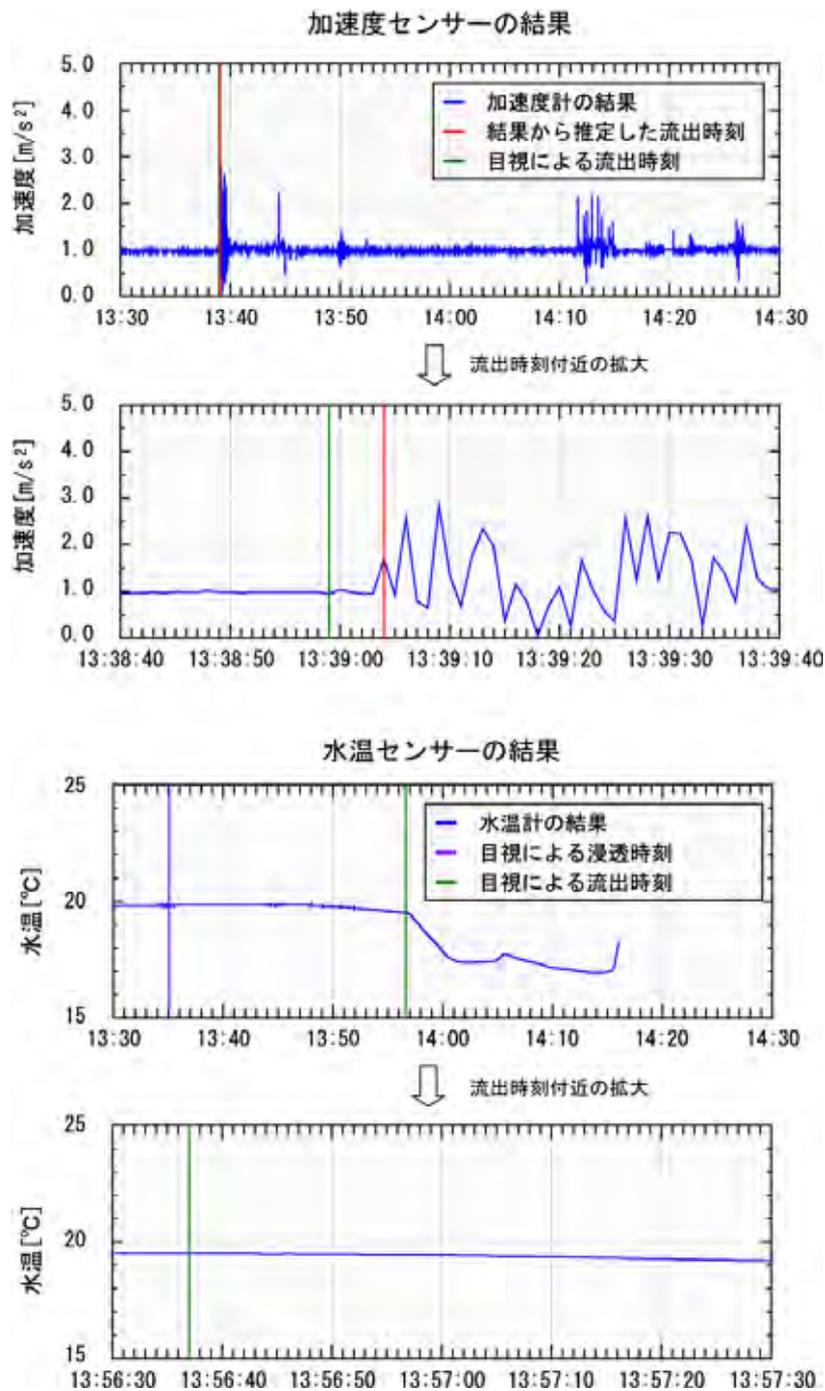


図- 26 加速度及び水温センサーの記録結果

### (3) 実験結果

図- 26 に加速度及び水温センサーが堤体の崩壊を感知した流出時刻の結果を示す。加速度センサーの結果の縦軸は加速度、横軸は時刻を表す。水温センサーの結果の縦軸は水温、横軸は時刻を表す。加速度センサーは目視による実流出時刻の 5 秒後に反応したことが確認できる。一方、水温センサーは堤体内への流水の浸透の影響を受け徐々に反応が始まり、流出時刻付近で再度反応を示しているが、秒単位での明確な流出時刻の推定は困難である。

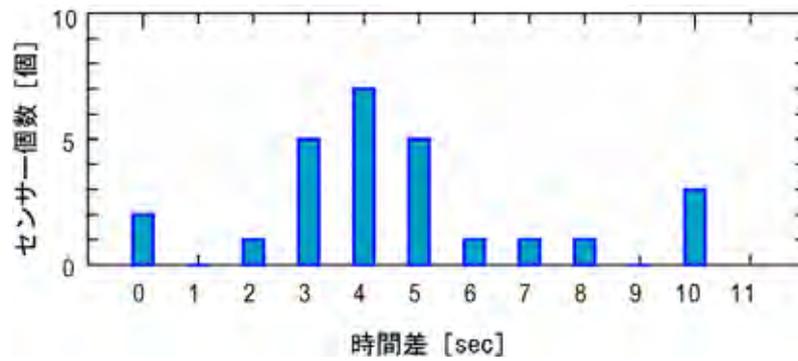


図- 27 目視と加速度センサーの流出時刻の時間差分布

千代田実験水路は屋外での実験であるため、通水中の気温変化や降雨等の気象条件より未崩壊箇所でも水温センサーが反応する可能性も考えられ、崩壊時刻を精度良く推定することが求められる今回の実験には、水温センサーは適していないと判断した。

次に、加速度センサーの精度検証を行う。図- 27 は目視による流出時刻と加速度センサーの感知から推定した流出時刻の差を示したものである。累計 26 個のセンサーの時間差は 0 秒から 10 秒の範囲内であった。よって、数秒単位の時間差で破堤時刻が推定可能であり、破堤進行過程を精度良く計測できると考えられ、今回の実験には、加速度センサーを採用することとした。



写真- 18 改良型加速度センサー

表- 6 センサー諸元

改良型加速度センサー	
製造会社	株式会社環器
計測範囲	±2G
測定精度	±1%FS以内(20°C)
分解能	0.02G
時間精度	±1分/月
寸法/重量	φ53×115mm/170g
メモリ	E <sup>2</sup> P-ROM(3軸で12時間129600点) 24時間指定(オプションメモリ増設時)

#### (4) 改良型加速度センサー

これまで述べてきた加速度センサー(ここでは初期型と呼ぶ)は、計測間隔を1秒間とすると6時間程度の記録しかできず、実験の開始直前に設置を行う必要があった。しかし、堤体内部のセンサーについては、実験開始直前ではなく、あらかじめ設置を行なっておかなければならないため、長時間計測できることが求められる。そのため、1ヶ月程度の記録が可能となるよう加速度センサーの改良を行った。

改良型加速度センサーを写真- 18 に、諸元を表- 6 示す。なお、改良型センサーでは、センサーの保護管に塩化ビニール管を用いることにより浮力を持たせた構造とした。また、センサー流出後に回収が行いやすいように、蛍光色の着色により視認性を高めた。

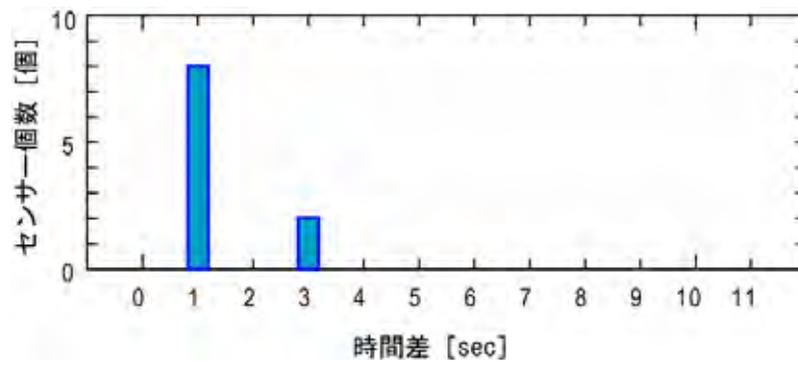


図- 28 目視と改良型加速度センサーの流出時刻の時間差分布

改良型加速度センサーの精度検証についても、初期型加速度センサーと同様の方法で実施した(全 1 回:センサーの使用個数 10 個). その結果について図- 28 に示す. 目視と改良型加速度センサーによる流出時刻の時間差については、1 秒から 3 秒以内の範囲内にあり、精度に問題はなく、採用できると判断した.

次章以降の実験では、初期型及び改良型のそれぞれのセンサーの特性を踏まえ、設置箇所に応じて両方を組み合わせて配置することとした.

## 第6章 予備実験（正面越流）

### （1）実験概要

千代田実験水路における越水破堤実験は、規模が大きく観測が広範囲であり、また、破堤拡幅現象を把握するための計測項目が多岐にわたるなど、前例のないスケールの実験である。このため、まず予備実験として、計測範囲・項目等の確認や基本的な破堤進行過程の把握を目的に、写真-19に示すように、千代田実験水路に横断方向に設置した堤防に対して正面から越流させる破堤実験を行った。

なお、これまでも実スケールで正面越流の破堤実験は行われている<sup>2)</sup>が、既往の実験では、越水による堤防法面の侵食を主な検討対象としており、破堤の拡幅過程については検討されていないため、今回の実験はそれを明らかにできるよう、条件設定や計測を行った。



写真- 19 予備実験（正面越流）の状況

表- 7 実験条件

堤体・水路形状					通水 流量 (目標)	実験 実施日
土質	高さ	天端幅	法勾配	水路幅		
砂礫	2.5m	2m	1:2	30m	20m <sup>3</sup> /s	2008年8月

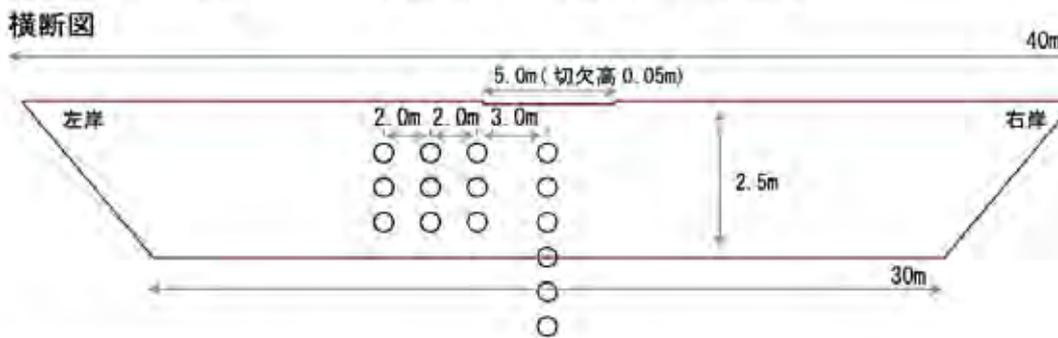
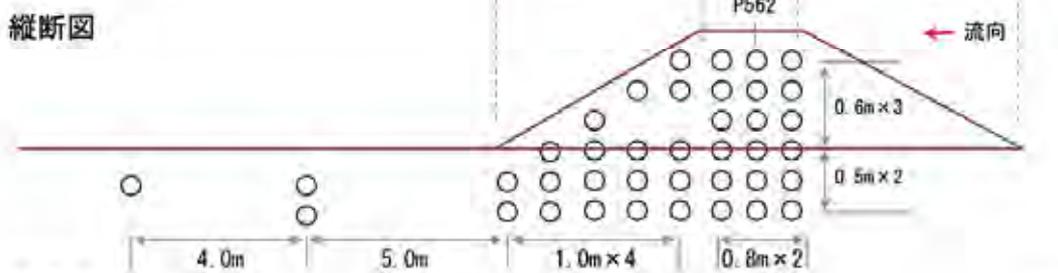
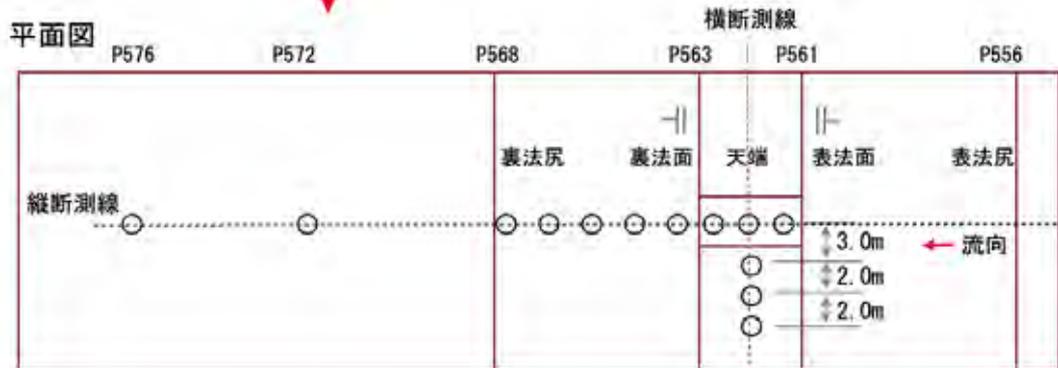
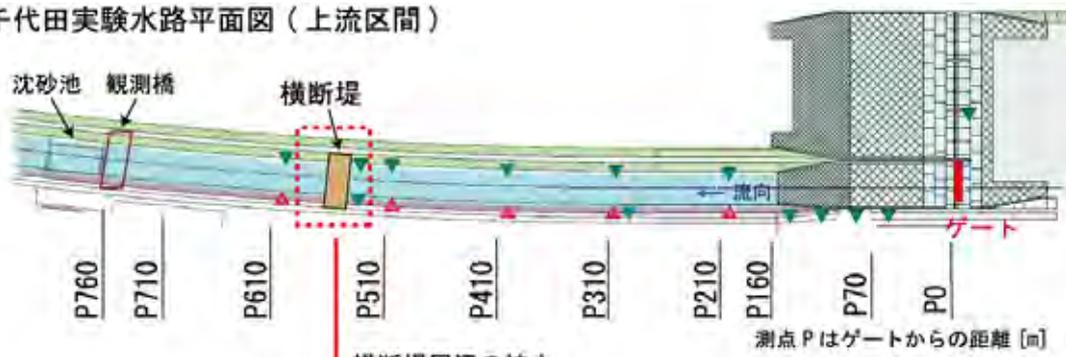
#### a) 水路形状・実験条件

実験状況を写真- 19, 実験条件を表- 7, 実験水路の諸元等を図- 29 に示す. 破堤させる堤体は, 裸堤(芝を張らない土堤)とし, 高さ2.5m, 天端幅2m, 法勾配2割の横断堤を水路全幅(下幅30m, 上幅40m)に造成した. また, 破堤のきっかけとして, 天端中央に幅5m, 深さ0.05mの切欠を設けた. 用いた堤体材料の粒度分布は図- 30の通りである. 堤体の粒径 $d_{50}$ は12.8mmであり, 実験水路の河床材料と概ね同じ値である.

#### b) 計測方法

通水中の主な観測は図- 29に示すように, 水位計による水位観測, 加速度センサーによる破堤形状の時系列計測であり, 通水後には3次元レーザースキャナによる破堤部周辺形状の測量を行った. また, 実験状況を記録するため様々なアングルからカメラやビデオカメラを用いて実験状況の撮影を行った.

千代田実験水路平面図（上流区間）



主な観測項目

観測時期	観測項目	観測箇所・手法
通水中	水路内水位	▲ 電波式水位計 ▼ 水圧式水位計
	破堤形状	○ 加速度センサー
	実験状況	カメラ・ビデオ撮影
	破堤部周辺水面形状	ステレオ写真撮影 3次元測量
通水後	破堤形状	3次元レーザースキャナ

図- 29 実験水路概要・観測手法

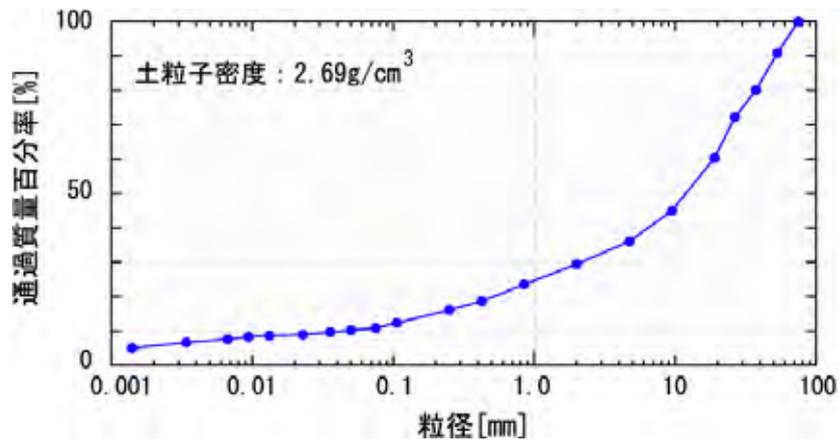


図- 30 堤体材料の粒度分布

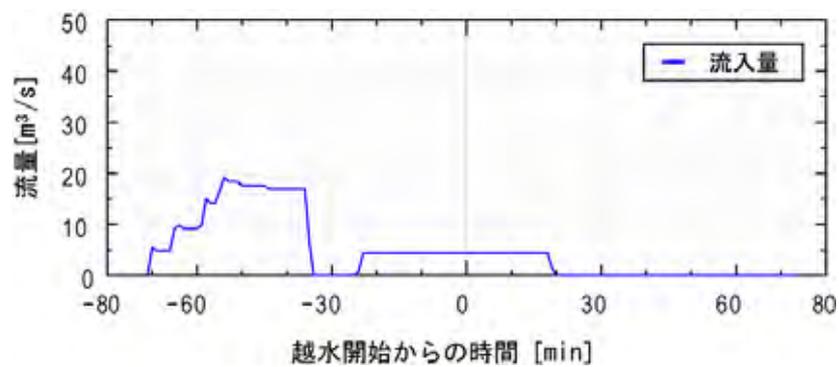


図- 31 通水流量の時間変化

### c) 通水方法

建設省土木研究所(現(独)土木研究所つくば中央研究所)の越水堤防調査最終報告書(解説編)<sup>2)</sup>によると、過去の越水破堤実績から、破堤時における越流水深の目安を 30cm としている。そのため、本実験においても、越流水深の目安を 30cm とした。

まず、横断堤の上流側に一旦湛水させ、切欠きからの越流水深が概ね 30cm となるように  $4\text{m}^3/\text{s}$  を通水して越流破堤させた後、横断測線方向への破堤拡幅が概ね落ち着いた時点で実験を終了する。ゲートからの通水流量の時間変化を図- 31 に示す。なお、越流開始時刻は切欠部より越流が始まった時刻とした。

## (2) 実験結果

### a) 実験状況

写真-20は実験時に撮影したビデオ画像である。堤体からの越水開始の30秒後に切欠部の裏法面にガリ侵食が見られる。越水開始から2分後には裏法面の侵食が鉛直方向に進行し、天端部の侵食が開始している。また、越流とガリ侵食は裏法面全体に広がっている。3分後には切欠中央部分が概ね侵食され氾濫流量が徐々に増え始め、4分後には切欠部の堤体が概ね全崩壊し、両岸方向へ破堤が拡幅していく。10分後にはさらに破堤拡幅が進行し、氾濫流量が大きくなっている。

越水開始後の  
経過時間 [min] 正面からの撮影

t=0.5min



t=2min



t=3min



t=4min



t=10min



左岸からの撮影



写真- 20 実験状況

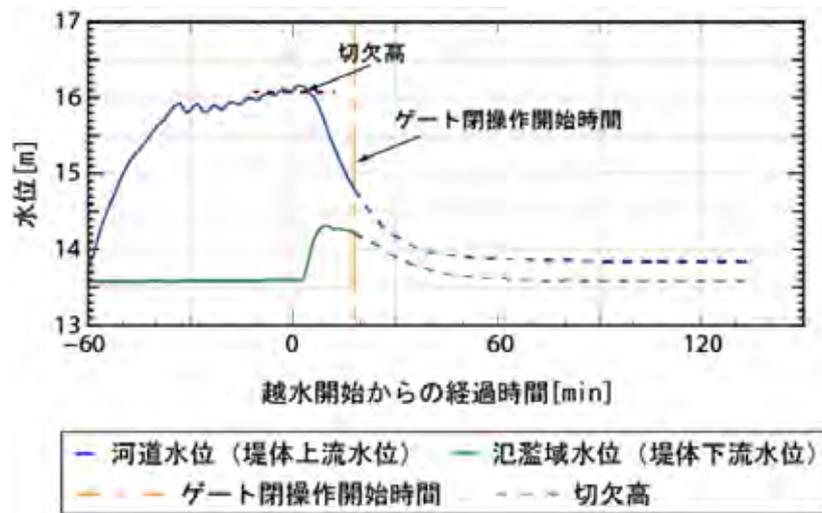


図- 32 横断堤の上流水位と下流水位

### b) 水位・流量観測結果

横断堤中央における上下流の水位観測結果を図- 32 に示す。河道水位(堤体上流水位)及び氾濫域水位(堤体下流水位)は、ともに電波式水位計で観測した1分毎の値である(5秒毎にデータを取得し、60秒平均を1データ)。点線は切欠高、一点鎖線はゲート閉操作開始時間を表す。越流水深は30cmを目安としていたが、結果として最大越流水深が6cm程度で破堤に至った。

観測結果より、越水開始4分後から、破堤に伴う氾濫流による河道水位の低下と氾濫域水位の上昇が見られる。



図- 33 氾濫流量の算定

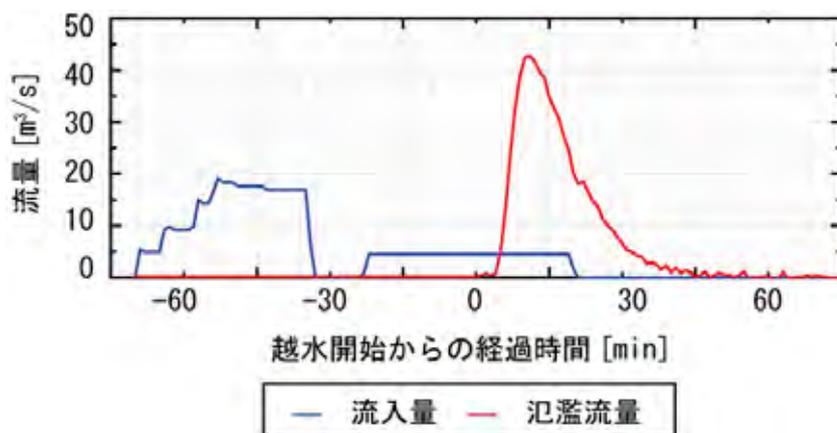


図- 34 氾濫流量の時間変化

次に、氾濫流量について図- 33 に示すように、ゲートからの水路内流入量と横断堤上流部の水位から求まる湛水量を用いて、(1)式より堤体からの氾濫流量を推定した。

$$Q_{out}(t) = Q_{in}(t) + (V_{-}(t-1) - V_{-}(t))/\Delta t \quad (1)$$

ここで  $Q_{out}$ : 氾濫流量,  $Q_{in}$ : 流入量,  $V$ : 横断堤上流部の湛水量,  $t$ : 現時刻,  $t-1$ : 現時刻より 1 分前,  $\Delta t$ : 水位計データの時間間隔 (1 分) である。

図- 34 に(1)式より求めた氾濫流量を示す。越水開始後しばらくして、破堤の拡幅に伴い氾濫流量が急激に増加し、およそ 10 分後にピークを迎えた後、水位が低下し氾濫流量も減少する。なお、水路内推定流速は概ね 7cm/s (湛水時の水路内横断面積と通水流量  $4\text{m}^3/\text{s}$  より算出) であり、実験状況から流水による堤体表法面の侵食等が見られなかったことから、水路内流速による破堤への影響はなかったと考えられる。

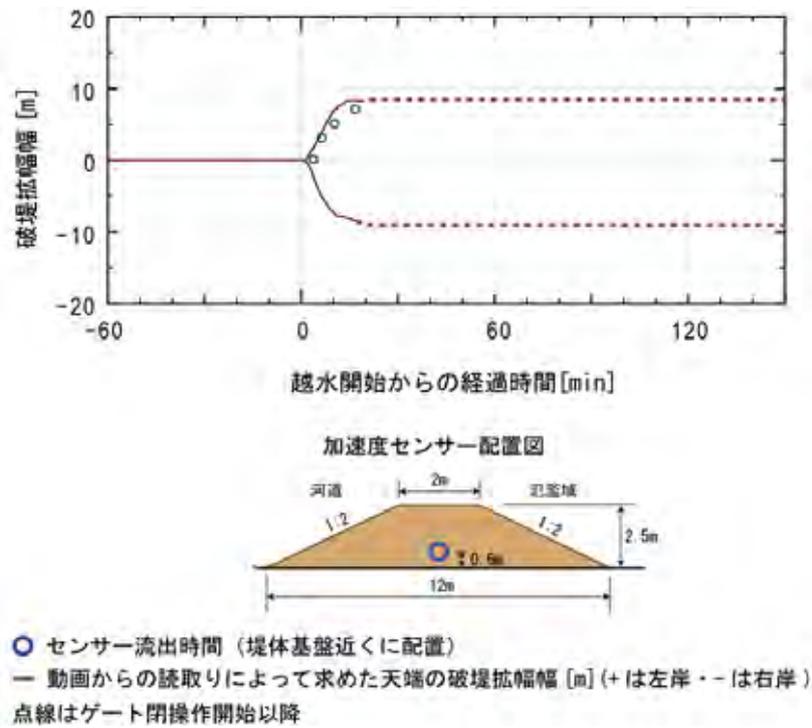


図- 35 破堤拡幅幅の時間変化

### c) 破堤拡幅幅

図- 35 に真上から撮影した動画から読み取った堤体天端中央の破堤拡幅幅と加速度センサーの流出時刻から求めた堤体中央基盤近くの破堤拡幅幅を示す。これより、水面より上の堤体上部と不可視部分である水面より下の堤体下部の崩壊過程を比較することができる。

まず、天端の破堤拡幅幅について、前節で述べたとおり越水開始直後は、裏法面や天端の侵食が先行するため破堤拡幅には至っていないが、一旦破堤拡幅が始まると天端の拡幅速度は概ね一定で推移している。

次に、動画から読み取った堤体天端中央の破堤拡幅幅と加速度センサーの流出時間から求めた堤体中央基盤近くの破堤拡幅幅の時間変化を比較すると、両者は概ね一致しており、堤体上部と下部がほぼ同時に拡幅していることが分かった。

#### d) 破堤進行過程

##### ・ 破堤拡幅開始前

図-36・図-37の左図は加速度センサー記録から推定した縦断測線上の破堤進行過程である。センサー設置箇所の流出時刻を用いて、越水開始30秒後から10分後までの1分毎の破堤進行過程を推定している。なお、センサー間は直線補間としている。

越水開始30秒後から2分後にかけて、裏法面部全体と裏法肩付近が侵食される。次に、2分後から3分後の間では、天端箇所において下流側から順次鉛直方向下方にむかって侵食が進み、越水開始4分後では、法面部は河床高まで全て侵食され、河床高より上の堤体が概ね全崩壊している。越水開始4分後以降については、法尻付近において、河床高より低い部分も流出しており、切欠部の堤体が概ね全崩壊する頃より落ち掘れの形成が始まっている。

##### ・ 破堤拡幅開始後

図-36・図-37の右図は、同様に加速度センサー記録から推定した横断測線上の破堤進行過程である。なお、中心より右岸側にはセンサーを配置していないが、実験状況の目視観測で左右岸ほぼ対称に侵食が進んでいたことを確認していることから、左岸の結果を用い、左右対象として右岸の破堤進行過程を推定している。

切欠部の堤体が概ね全崩壊した時間以降に両岸方向に向かって天端の拡幅が広がっていることが分かる。また、撮影された動画を見ると、堤体下部が侵食されることにより堤体上部が塊となり崩落する過程を繰り返しながら、破堤拡幅が進行している様子が確認された。

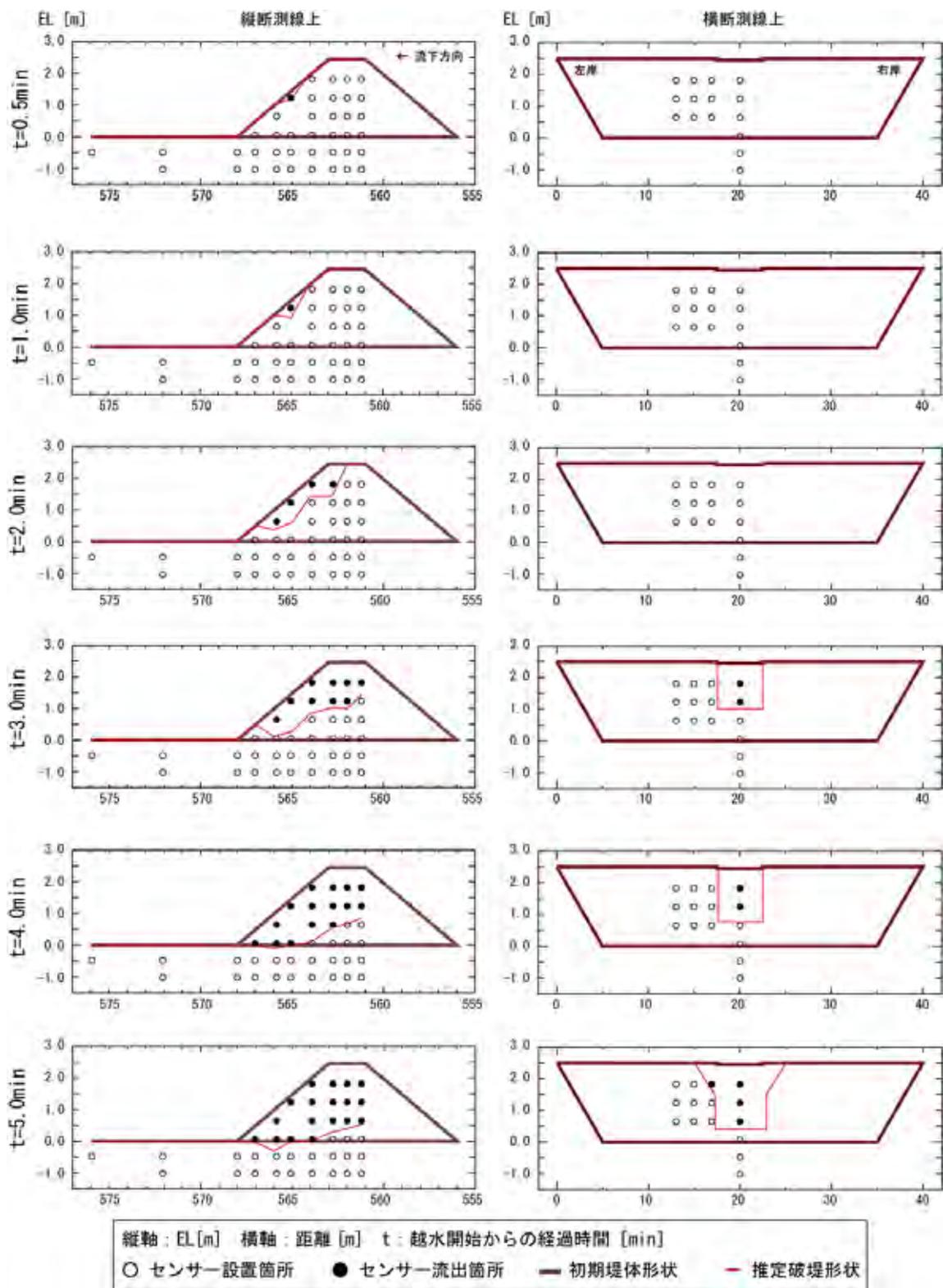


図- 36 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (1)

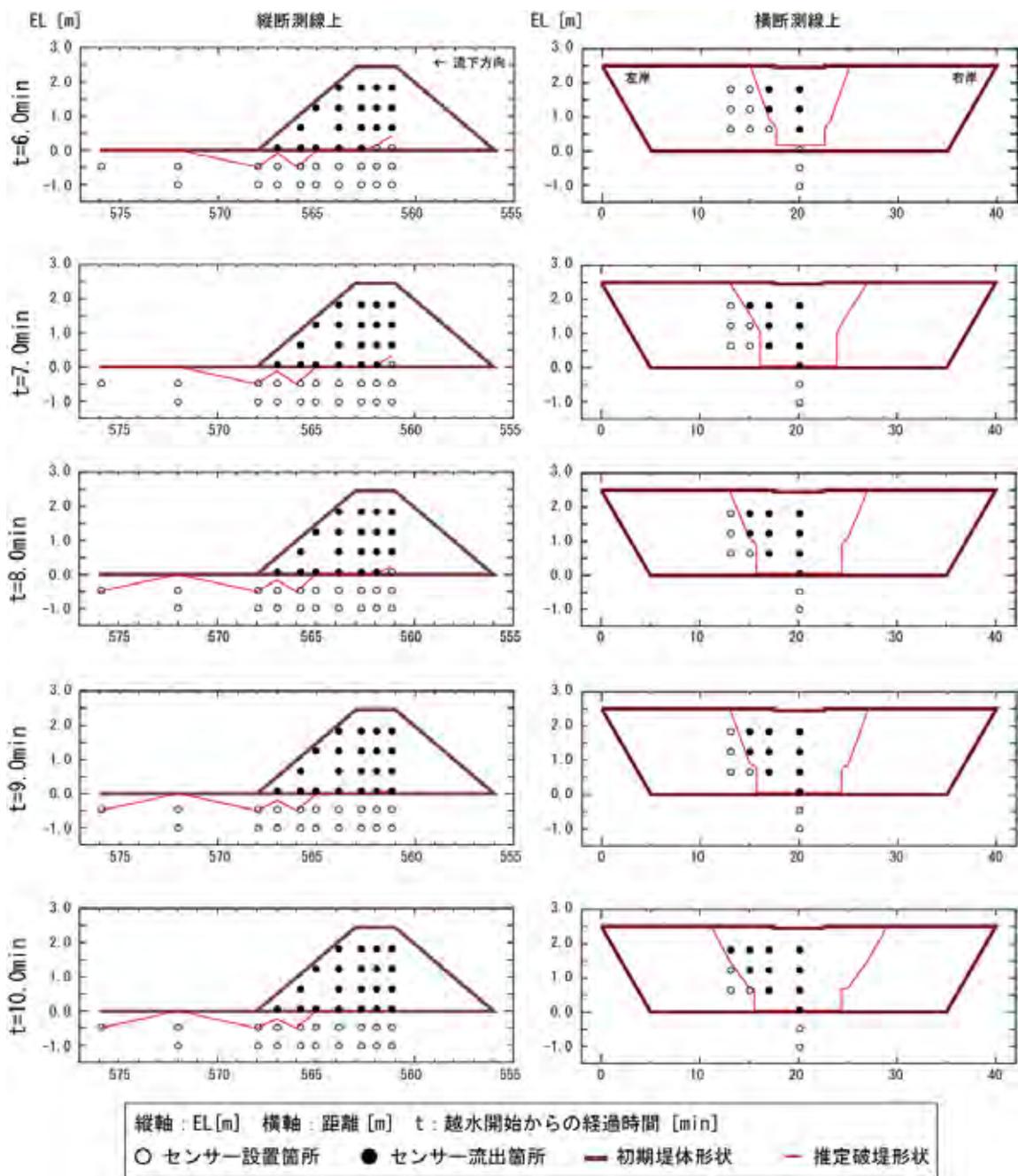


図- 37 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (2)

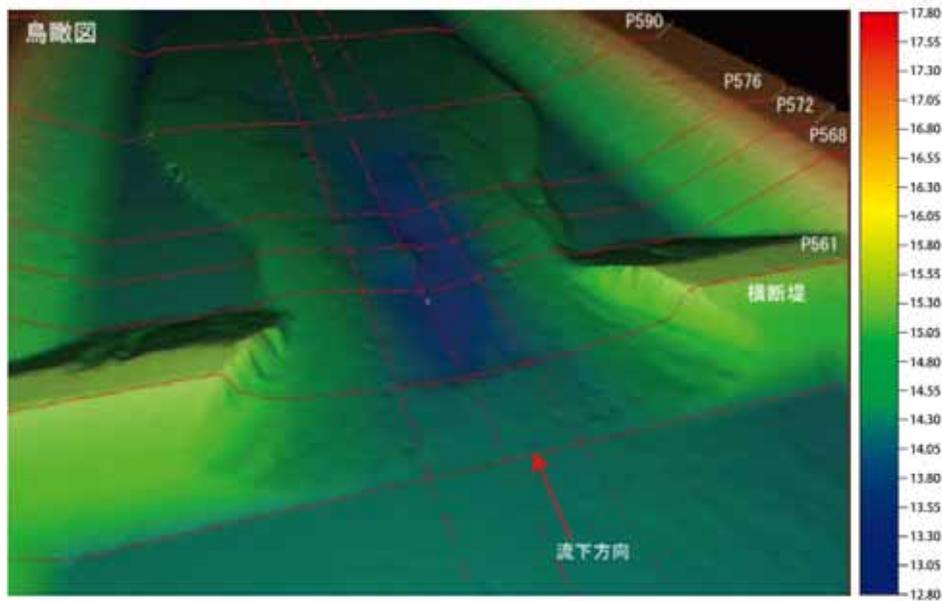
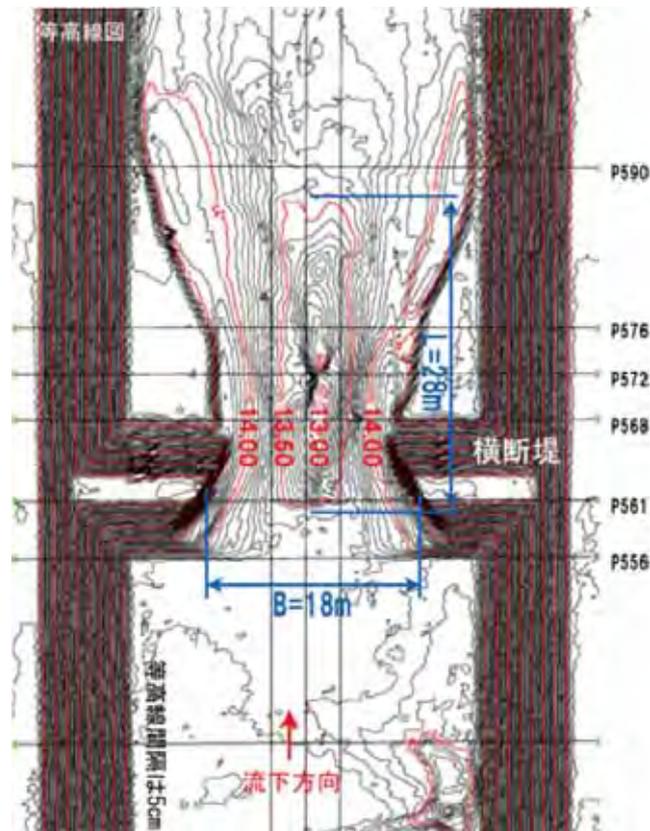


図- 38 通水終了後の地形形状

### e) 通水終了後の地形

図- 38 は通水終了後の河床形状について、3次元レーザースキャナ、及び洗掘箇所 の 堪水部 ではトータルステーション(トランシットと光波測距儀を一体化した測量機器)を用いて計測した結果である。堤体の破堤部開口形状は表法側が大きく開いた八の字をしており、また、落ち掘れの最大洗掘深の発生箇所は等高線の絞り込まれた裏法尻近傍にある。これは、既往の室内実験結果<sup>7)</sup>と同様の傾向を示した。

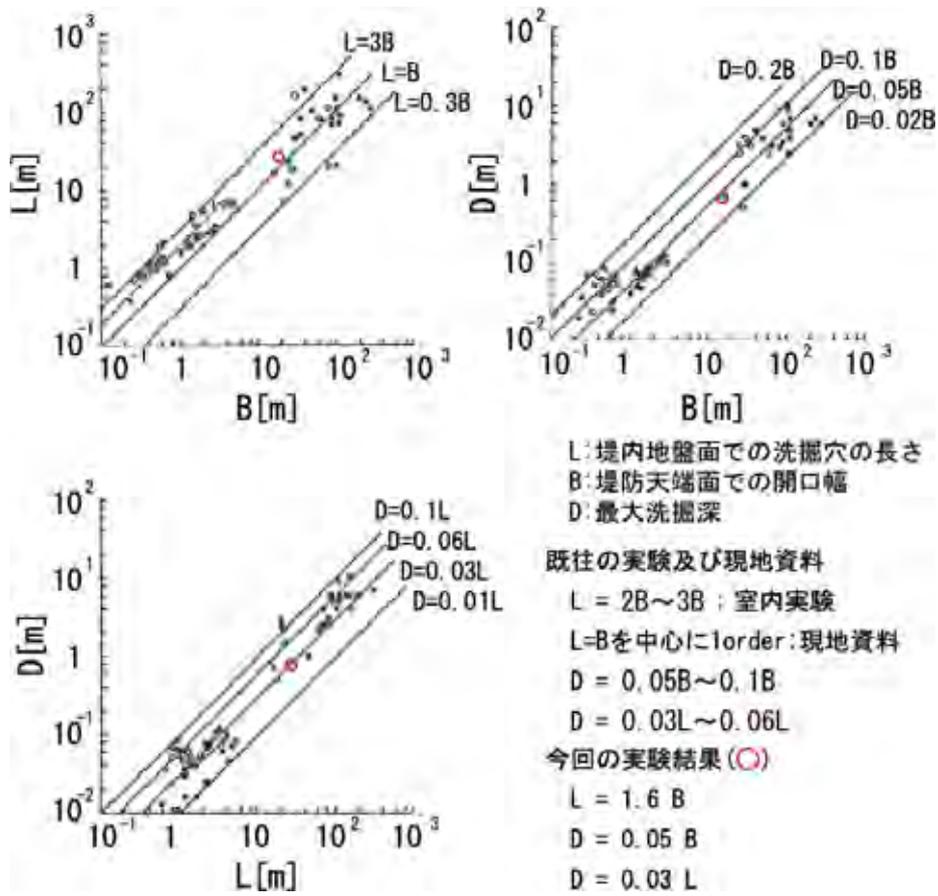


図- 39 破堤部の形状特性の検討<sup>7)</sup>

図- 38 に示すとおり、落ち掘れの形状は、延長( $L$ )は約 28m、最大洗掘深( $D$ )は約 0.8m、堤体の天端開口幅( $B$ )は約 18m である。図- 39 は、これらの結果を既往の室内実験及び現地資料から得られている形状特性<sup>7)</sup>と比較したものであるが、結果は既往結果の範囲内となっている。

## f) 実験のまとめ

千代田実験水路において、予備実験として、各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握等を目的に正面越流の破堤実験を行った。

破堤進行中の堤体の崩壊状況を時系列に計測する手法として、堤体内部に加速度センサーを設置して、センサーの流出より堤体崩壊状況を感知する手法を確立した。

基本的な破堤進行過程として、越水箇所の上法侵食が主である過程を経た後に、表法肩に侵食が達して堤体の大半が崩壊すると、破堤拡幅が開始し、侵食・崩落を繰り返しながら両岸方向へ破堤拡幅が進行することが確認された。また、破堤箇所の洗掘による落ち掘れの形状特性が既往の室内実験結果等と同様の傾向を示すことが確認された。

なお、既往の研究では、実験施設の制約上、両岸方向への拡幅や氾濫流が制限されているが、今回の実験では両岸方向に十分な幅をとっており、破堤後の拡幅過程や氾濫流の状況を捉えることができた。

この実験は正面越流の破堤実験だったため、破堤拡幅はほぼ左右対称に進行したが、実際の破堤現象は横越流で発生するため、氾濫流が堤体軸と直交せず破堤拡幅が上下流方向に非対称に進む可能性がある。これについては、横越流による予備実験を行い確認することとした。

## 第7章 予備実験（横越流）

### （1）実験概要

実河川の越水破堤は、河道流のある横越流状態で発生するため、次章で述べる千代田実験水路の越水破堤実験も横越流状態で実施するが、ここで、横越流の破堤実験に関しても、前章の正面越流の予備実験と同様に、各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握等を目的とした予備実験を実施した。実験は、写真- 21 に示すように、千代田実験水路において、水路に縦断方向に設置した堤防に対して横越流による破堤実験を行った。ここでは、堤体材料の相違による基本的な破堤状況の違いの把握を目的に、表- 8 に示すように、堤体材料が異なる 2 ケースで実験を行った。



写真- 21 予備実験（横越流）の状況

表- 8 実験条件

	堤体・水路形状						通水 流量 (目標)	実験 実施日	
	土質	高さ	天端幅	法勾配	水路幅	水面勾配 (目標)			
Case A	砂礫	2.5m	3m	1:2	4m	1/500	50m <sup>3</sup> /s	2009年	4月
Case B	細粒分								6月

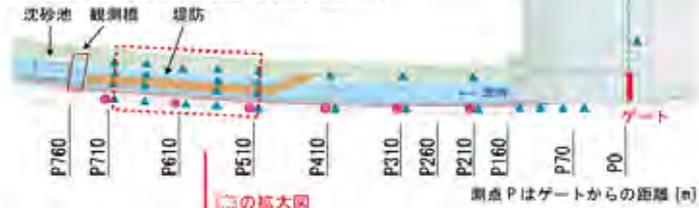
#### a) 水路形状・実験条件

実験水路の状況を写真- 21, 実験条件を表- 8, 実験水路の諸元等を図- 40 に示す. 破堤させる堤体は, 裸堤(芝を張らない土堤)とし, 千代田実験水路内に高さ 2.5m, 天端幅 3m, 法勾配 2 割の縦断堤を造成し, そのうち 80m を破堤区間として横越流により破堤させる実験を行った. 非破堤区間には表・裏法にビニールシートを設置している.

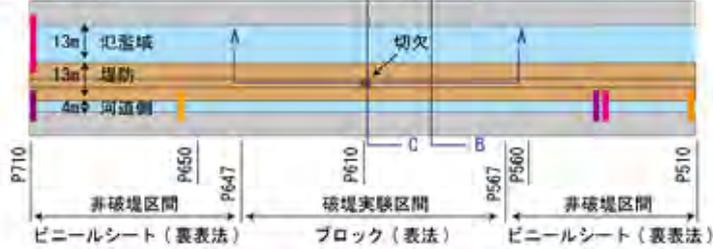
破堤のきっかけとして深さ 0.5m の切欠を設けた. なお, 横越流での破堤現象について上下流方向へ拡幅するのか, もしくは下流方向のみへ拡幅するかなど不明であったため, ここでは, 破堤実験区間の中心に切欠を設けた.

用いた堤体材料は図- 41 に示す通りであり, 細粒分(粘土・シルト)が CaseA では 15%程度, CaseB では 67%程度である. ただし, CaseB については, 千代田実験水路の地下水位が高く, 地盤からの湧水により細粒分が流出する可能性があるため, 河床から0.6mまではCaseAの材料(細粒分の少ない礫質土)を用いて造成した. なお, 今回の実験は越水破堤拡幅現象を対象としており, 河道内の流水による堤体侵食を防ぐために破堤実験区間(80m)の表法側にはブロックを設置した.

### 千代田実験水路平面図（上流区間）



### 拡大平面図



### A断面（縦断面：堤防天端中央）



### B断面（横断面：一般部）



### C断面（横断面：切欠部）



### 主な観測項目

観測時期	観測項目	観測箇所・手法
通水中	水路内水位	● 電波式水位計 ▲ 水圧式水位計
	流量観測	Case A (ADCP・電波式流速計)
	流量観測	Case B (ADCP) Case B (電波式流速計)
	破壊形状	○ 加速度センサー（配置詳細は下記）
	実験状況	カメラ・ビデオ撮影
通水後	破壊形状	3次元レーザースキャナ

### 加速度センサーの配置パターン

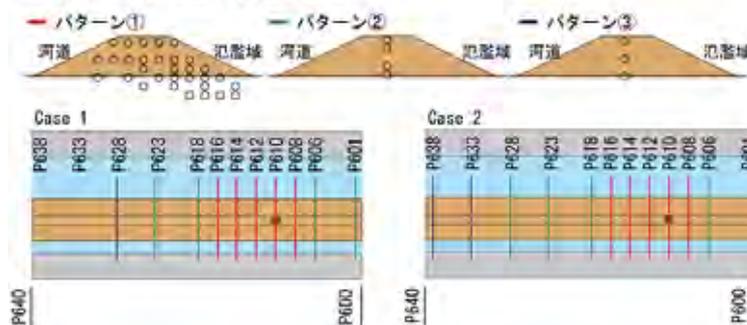


図- 40 予備実験（横越流）の実験水路・観測手法

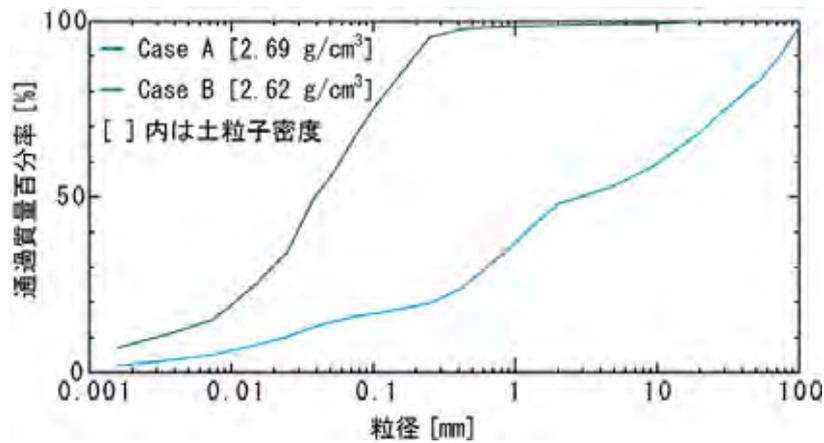


図- 41 堤体材料の粒度分布

表- 9 電波式流速計と ADCP の諸元

観測機器	電波式流速計	観測機器	ADCP
社名	横河電子機器株式会社	社名	米RD Instruments社
型名	WJ7661	モデル	モニター
計測原理	マイクロ波のドップラー効果	周波数	1200kHz
使用電波	NON 24.15Ghz 7mWtyp	測流範囲	最大±20m/s
計測範囲	0.5m/s~20m/s	最大測定レンジ	1200kHz: 20m
測定精度	±計測値の2%	長期測定精度	±0.25%又は±2.5mm/s
分解能	0.01m/s	分解能	1mm/s
計測時間間隔	1,2,5,10,20,60,秒から選択	最小Ping発信間隔	2Hz~5Hz(設定による)

## b) 計測方法

通水中の主な観測は図- 40 に示す通り、水位観測(水位計(写真- 22・写真- 23 参照))、実験状況撮影(カメラ・ビデオ)、破堤形状の時系列計測(加速度センサー)である。また、通水後には 3 次元レーザースキャナによる破堤部周辺形状の測定を行った。

流量観測は、水面下の流速・河床高を計測する ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 観測船(表- 9・写真- 24 参照)及び表面流速を計測する電波式流速計(表- 9・写真- 25 参照)を用いて行ったが、その方法は次の通りである。河道からの氾濫流量の推定にあたっては破堤区間の上下流流量の差より算出を行うため、詳細な時系列流量データが必要となる。ADCP を用いた場合、水路横断方向への移動を繰り返しながら観測を行い、河床形状や通水断面内の詳細な流速を計測することは可能であるが、連続的なデータ取得は困難である。そこで、電波式流速計を用いて、河道の中央部における表面流速データ(1 秒毎にデータを取得し 60 秒平均を 1 データ)を通水断面積に乗じて流量を算出した。通水断面積は、通水中に大きな河床低下が見られたことから、通水初期は通水前の断面を、通水後期は通水後の断面を適用した。電波式流速計と ADCP から求めた流量観測結果の比較結果を図- 42 に示す。電波式流速計と ADCP の同時刻における流量値は概ね一致していることから、ここでは、連続的にデータが取得できる電波式流速計を用いて算出した流量値を採用することとした。



写真- 22 電波式水位計



写真- 23 水圧式水位計



写真- 24 ADCP 観測船



写真- 25 電波式流速計

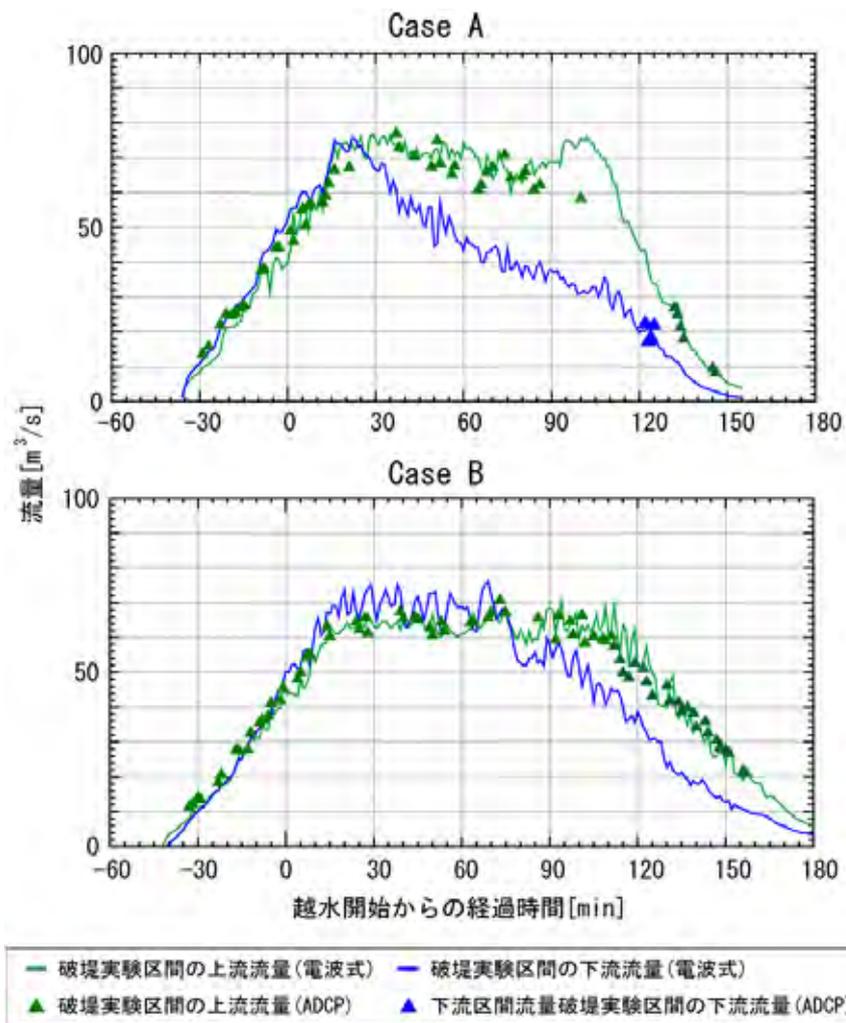


図- 42 電波式流速計と ADCP から求めた流量の比較

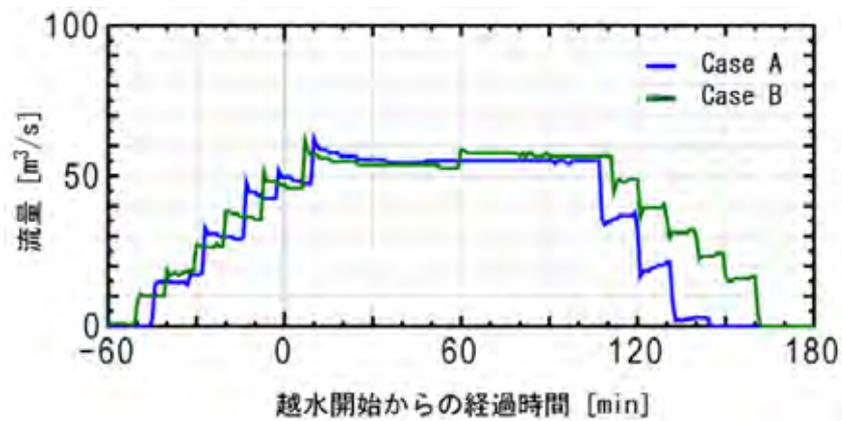


図- 43 通水流量の時間変化

### c) 通水方法

通水は前章と同様に越流水深の目安を 30cm として行った。まず、切欠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通水流量を減少させ実験終了とする。

ゲートからの通水流量の時間変化を図- 43 に示す。目標流量 ( $50\text{m}^3/\text{s}$ ) に到達後、ゲート上流の低下背水の影響により通水流量が下がったため、ゲート操作を行いながら流量を増加させ、概ね一定流量を通水した。なお、ゲート閉操作を行った以降は、通水流量の低下時間に相違が見られるため、以下の実験結果の比較はゲート閉操作の開始までを対象とする。

## (2) 実験結果

### a) 実験状況

写真- 26・写真- 27 に、実験中に撮影したビデオ画像を示す。CaseA・Bともに越水開始後、裏法面や裏法肩の侵食が始まっており、この時点では両ケースにおいて大きな差異は見られない。その後、天端は裏法肩から表法肩へ侵食が進行し、切欠部(測点 P610)を中心とした堤体の侵食が確認できるが、砂礫の多い堤体材料を用いたCaseAと比較して、細粒分の多い堤体材料を用いたCaseBはそれに要する時間が長く、切り立った形状となり滝のように越流水が流れ落ちることで、裏法面がハの字状に侵食している。越流状態は、前章で述べた予備実験(正面越流)の結果と同様に、堤体に対して垂直方向に流れており、この時点では破堤拡幅は見られない。

破堤拡幅が始まったのはCaseAでは越水開始からおよそ30分後、CaseBではおよそ75分後であり、この時間以降、越流状況は堤体に対して垂直方向から斜め方向へと変化しており、急激に下流への破堤拡幅が進行している。なお、今回の実験ではCaseA・Bとも上流方向への破堤拡幅はほとんど見られなかった。

Case A



Case B

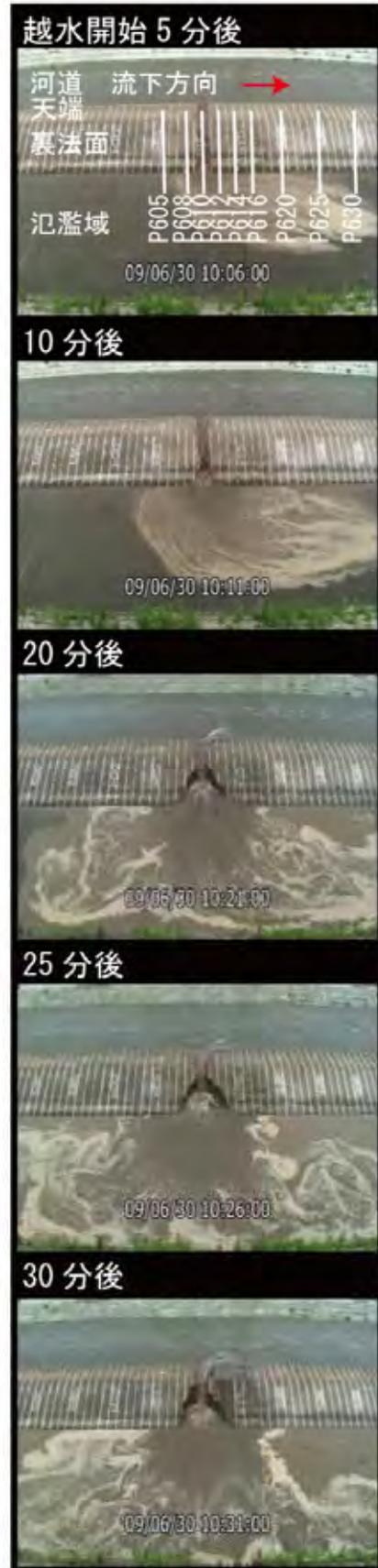
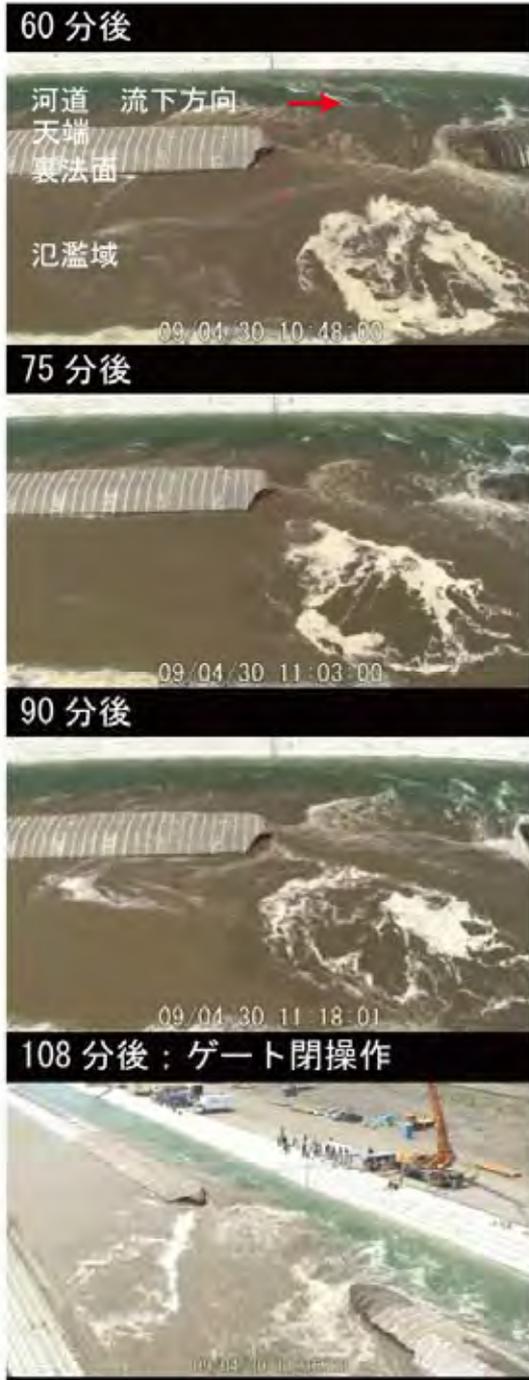


写真- 26 実験状況 (1)

Case A



Case B



写真- 27 実験状況 (2)

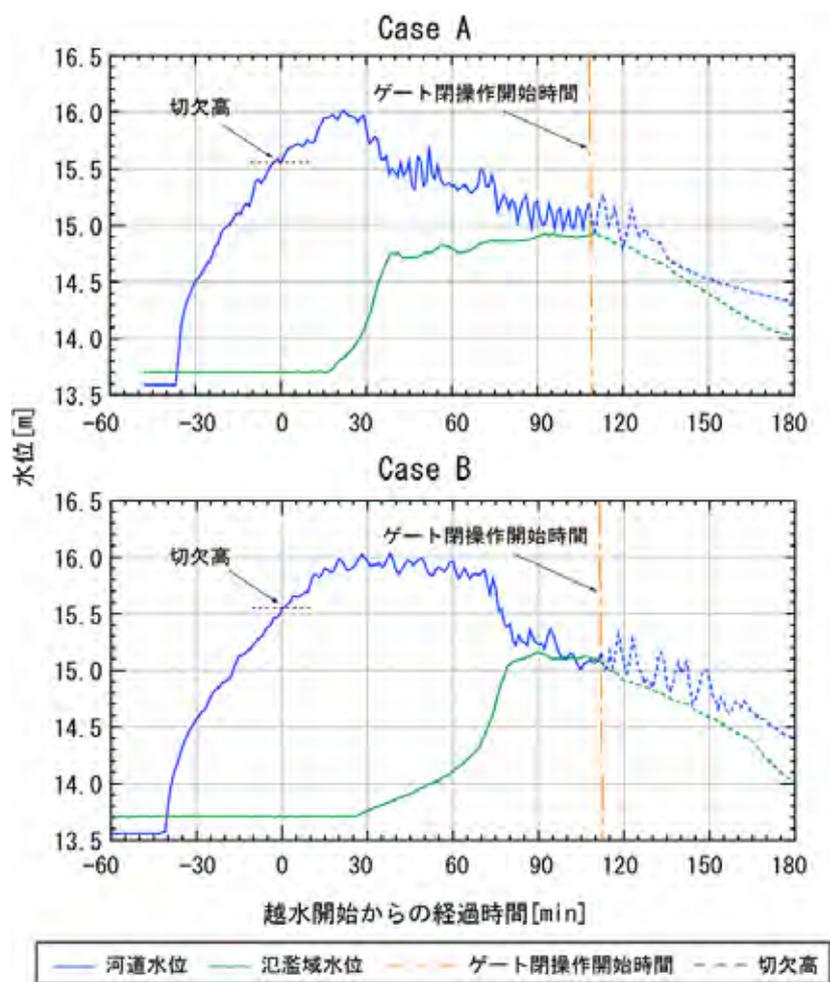


図- 44 河道と氾濫域の水位

### b) 水位観測結果

切欠部(測線 P610)の河道と氾濫域の水位観測結果を図- 44 に示す。河道水位は電波式水位計で観測した 1 分毎の値である(5 秒毎にデータを取得し, 60 秒平均を 1 データ)。氾濫域水位は水圧式水位計で観測した 1 分毎の値である(5 秒毎にデータを取得し, 60 秒平均を 1 データ)。点線は切欠高, 一点鎖線はゲート閉操作開始時間を表す。

最大越流水深は 50cm 程度まで上昇し, その後一定水位が継続しているが, CaseA は越水開始からおよそ 30 分後, CaseB はおよそ 75 分後から急激な水位低下が見られる。これは, 前述のとおり, 破堤拡幅が進行していく時間帯であり, 急激な氾濫流量増加によるためである。ここで, CaseA・B の主な相違点は河道と氾濫域の水位差の変化状況である。CaseA では河道水位の低下開始後, 徐々に水位差が縮まっているのに対し, CaseB では河道水位の低下開始後, すみやかに水位差がなくなっている。なお, 両ケースとも破堤拡幅の途中で河道水位と氾濫域水位の差が無くなるが, これは, この実験においては氾濫域幅が狭く, 氾濫域が湛水し, 氾濫流が拘束されていることが要因である。

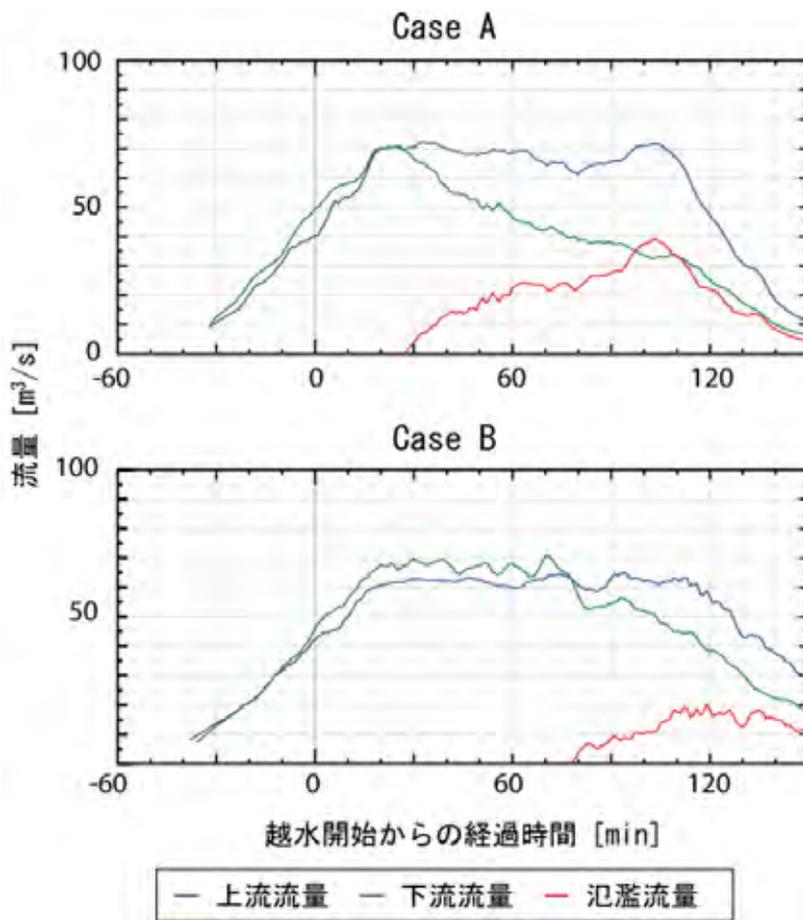


図- 45 破堤実験区間の上下流の流量

### c) 流量観測結果

実験では破堤実験区間の上流と下流で流量観測を行っており、その流量の差より推定した氾濫流量を図- 45 に示す。前述のビデオ画像や水位観測結果と同様に、破堤拡幅が進行していく時間帯から氾濫流量が急増していることが分かる。

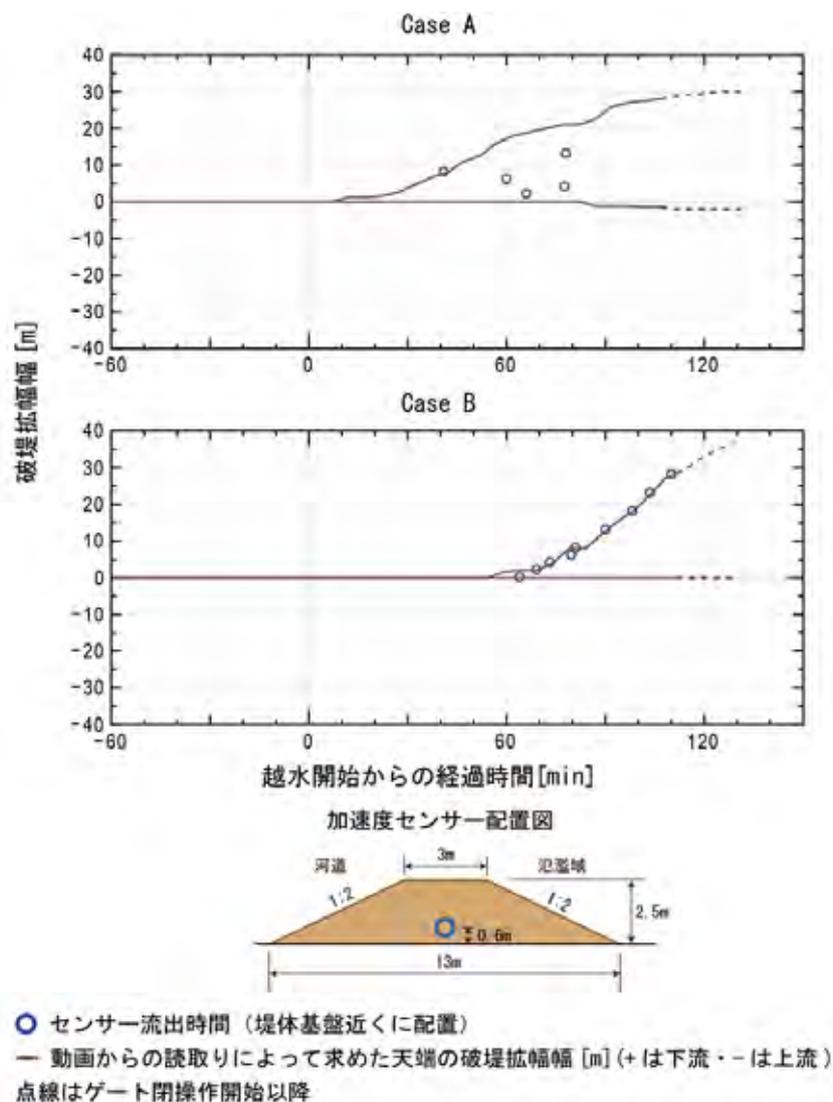


図- 46 破堤拡幅幅の時間変化

#### d) 破堤拡幅幅

図- 46 に真上から撮影した動画から読み取った堤体天端中央の破堤拡幅幅と加速度センサーの流出時間から求めた堤体中央の基盤近くの破堤拡幅幅の比較を示す。

まず、天端の破堤拡幅進行過程は、前節でも述べたとおり、越水開始直後は裏法面や天端の侵食が先行するため破堤拡幅には至っていないが、一旦破堤拡幅が始まると、天端の拡幅速度は概ね一定で推移している。ここで、CaseB（細粒分の多い堤体材料）は、CaseA（砂礫分の多い堤体材料）に比べ、破堤拡幅が始まるまでの時間が長かった。これは、土質の相違によるものと考えられ、既往事例<sup>2)</sup>と同様に細粒分が多い堤体の場合、破堤拡幅開始までの時間が長くなると考えられる。一方で、一旦破堤拡幅が始まると、その拡幅速度はCaseBの方が速かった。

また、CaseA では、基盤に近い部分の堤体について堤体上部より遅れて侵食されながら拡幅が進行していたと推定できる。

## e) 破堤進行過程

### ・ 破堤拡幅開始前

図- 47～図- 50 に加速度センサーの記録から推定した堤体の横断面(左図)と縦断面(右図)における破堤進行過程を示す。これは、堤体内部の崩壊状況について、縦軸を水路河床基準高 0m とし、センサーの設置位置とその流出状況をプロットしたものである。なお、縦断方向の破堤拡幅進行過程については、センサーの配置箇所の流出状況に加え、天端の崩壊状況についてのビデオ画像からの読み取り結果も用いて推定した。

CaseA は、越水開始から 25 分後まで裏法肩から裏法面にかけて侵食が見られ、さらに、天端も概ね一定の速度で裏法肩から表法肩へ侵食していく様子が分かる。越水開始 30 分後には、天端全体、堤体断面の大半が侵食され、これ以降、下流方向への破堤拡幅が始まっている。

CaseB は、越水開始後、裏法肩から裏法面にかけて侵食が見られ、天端も裏法肩から表法肩へ侵食しているが、CaseA と比較し天端の侵食速度は遅く、切り立っている状態である。越水開始から 75 分後に天端全体、堤体断面の大半が侵食され、これ以降、下流方向への破堤拡幅が始まっている。

CaseA・B とともに切欠部の断面の大半が侵食された以降に拡幅が始まっており、これは前章で述べた予備実験(正面越流)の結果と共通の現象であった。また、CaseA・B では越水開始から破堤拡幅が始まるまでの時間に違いが見られ、CaseB(細粒分の多い堤体材料)は CaseA(砂礫分の多い堤体材料)に比べて、破堤拡幅開始までの所要時間が長かった。

### ・ 破堤拡幅開始後

図- 47～図- 50 に示すように、CaseA・B とともに前述の通り、切欠部の堤体断面の大半が侵食された以降に下流方向に向かって天端の拡幅が広がっている。

また、CaseB は、CaseA に比べ破堤拡幅開始までの所要時間は長いですが、破堤拡幅の進行速度は速いことが分かる。

CaseA では、基盤に近い部分の堤体が、堤体上部より遅れて侵食される形で破堤拡幅が進行している。

## f) 通水終了後の地形

図- 51・図- 52 は通水終了後の河道・氾濫域の地形形状について、3 次元レーザースキャナ及び洗掘箇所の堪水部ではトータルステーションを用いて計測した結果である。

両ケースとも堤体の破堤部開口形状は、表法側が大きく開いた八の字をしている。また、落掘は発生しておらず、これは氾濫域が拘束されていることがひとつの要因であると考えられる。

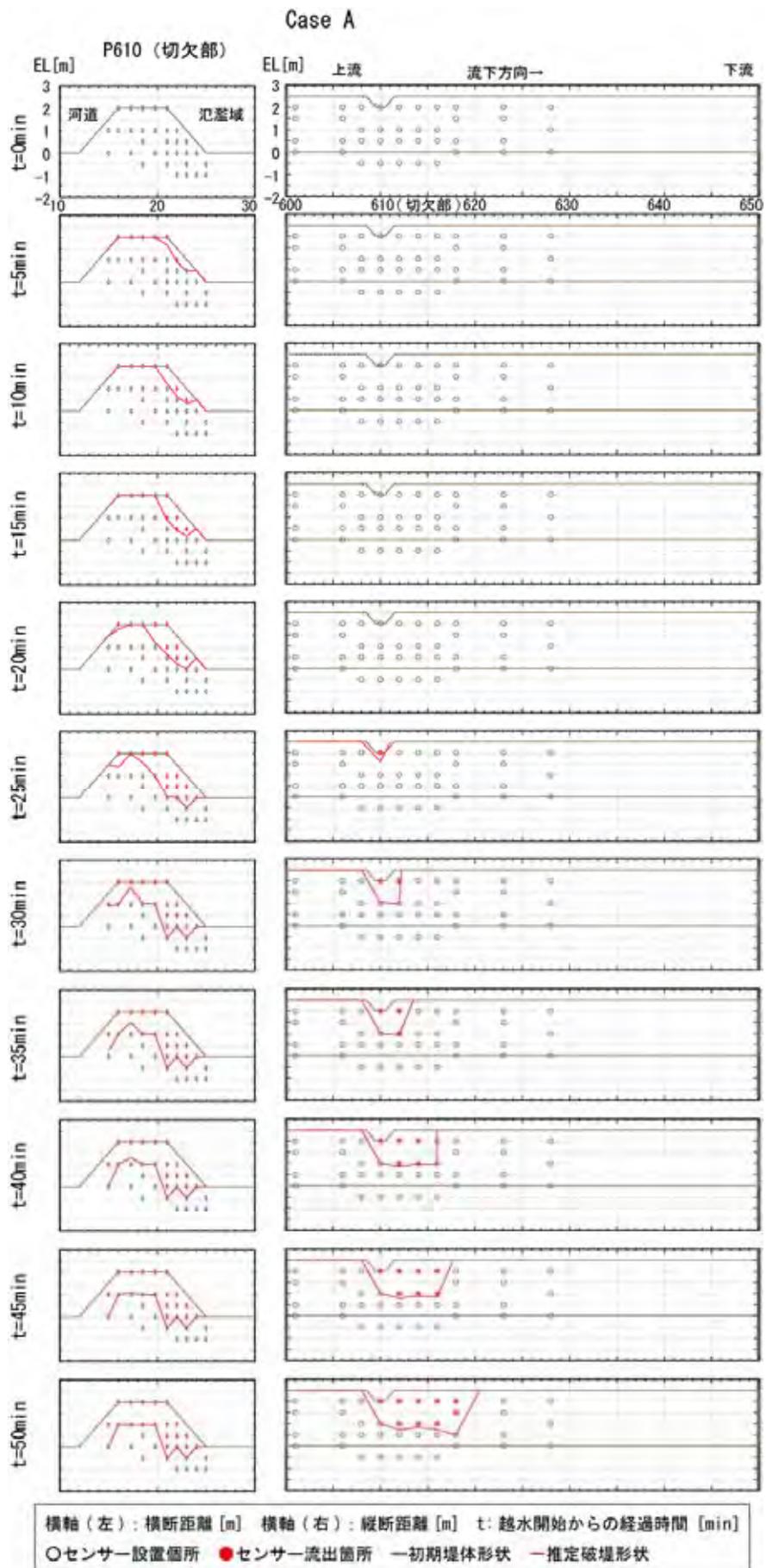


図- 47 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (Case A) (1)

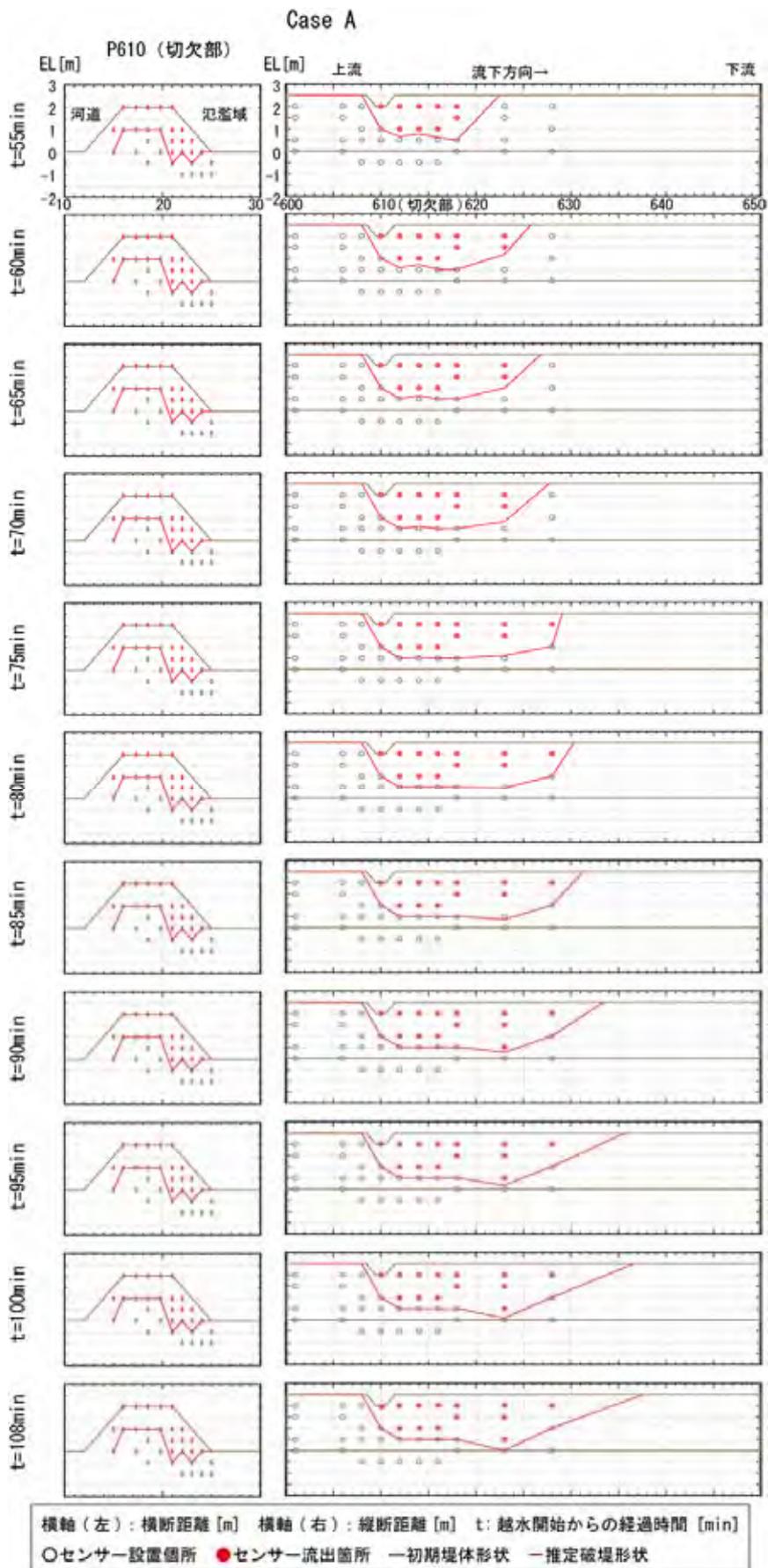


図- 48 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (Case A) (2)

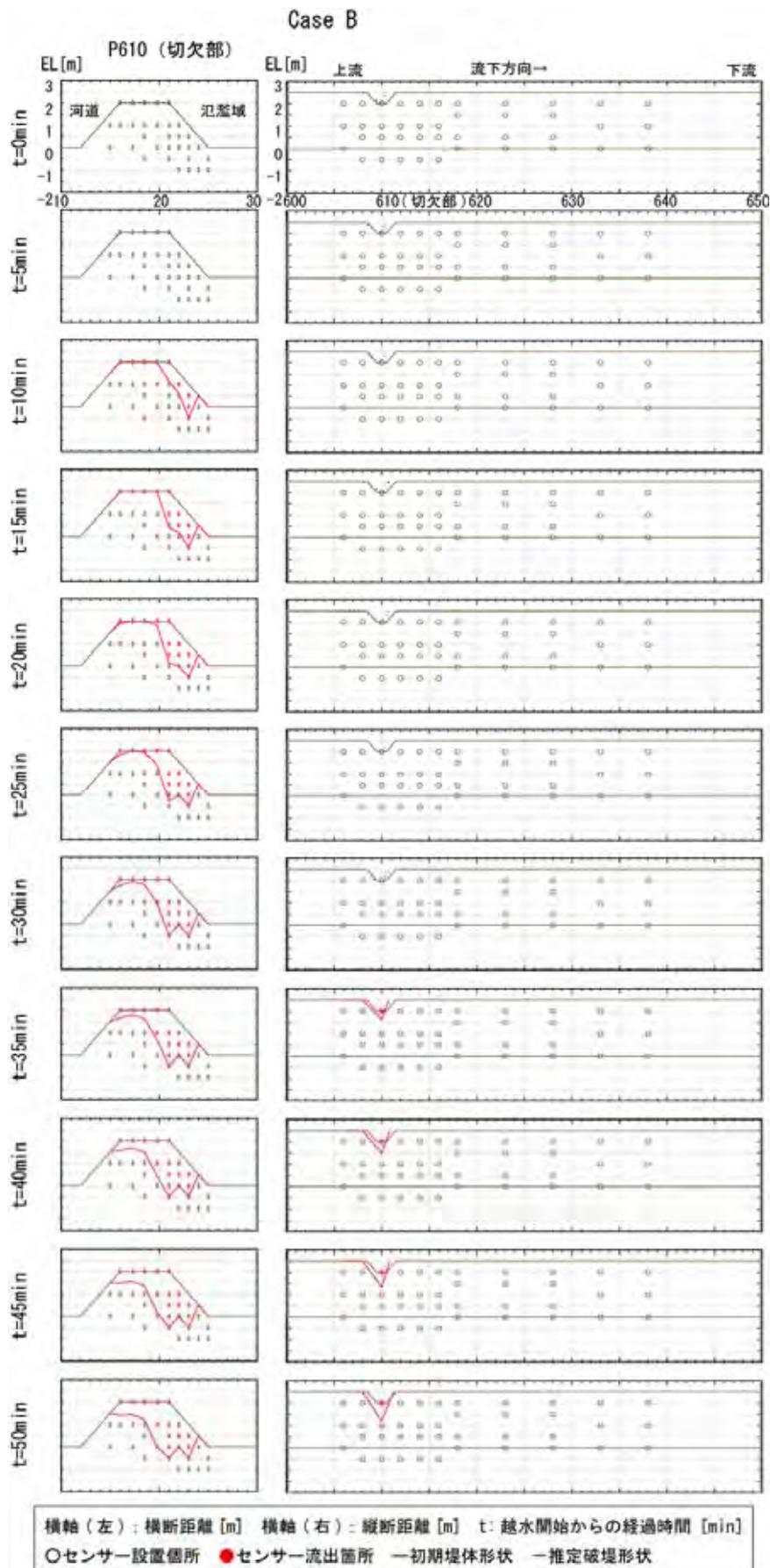


図- 49 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (Case B) (1)

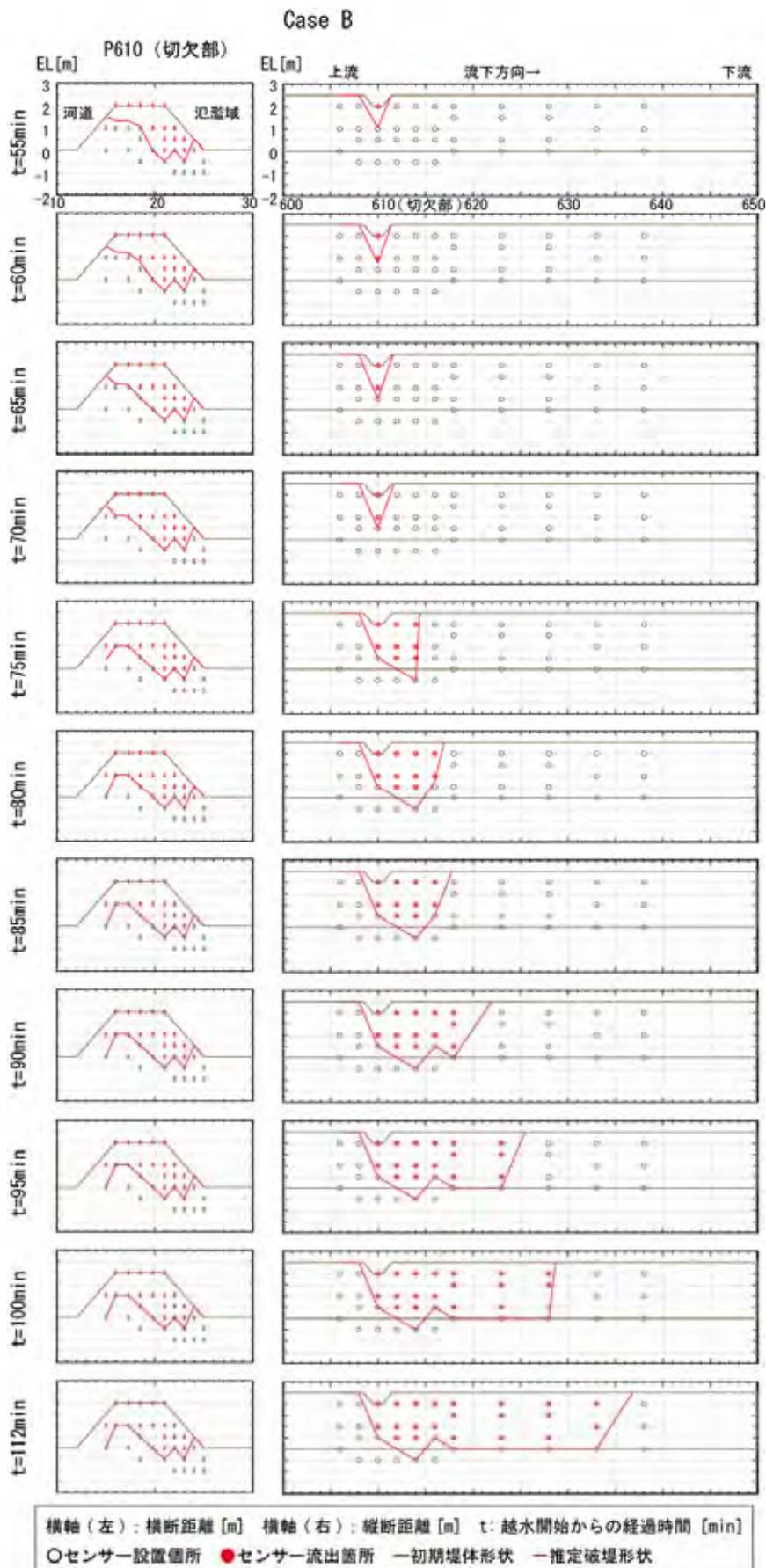


図- 50 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (Case B) (2)

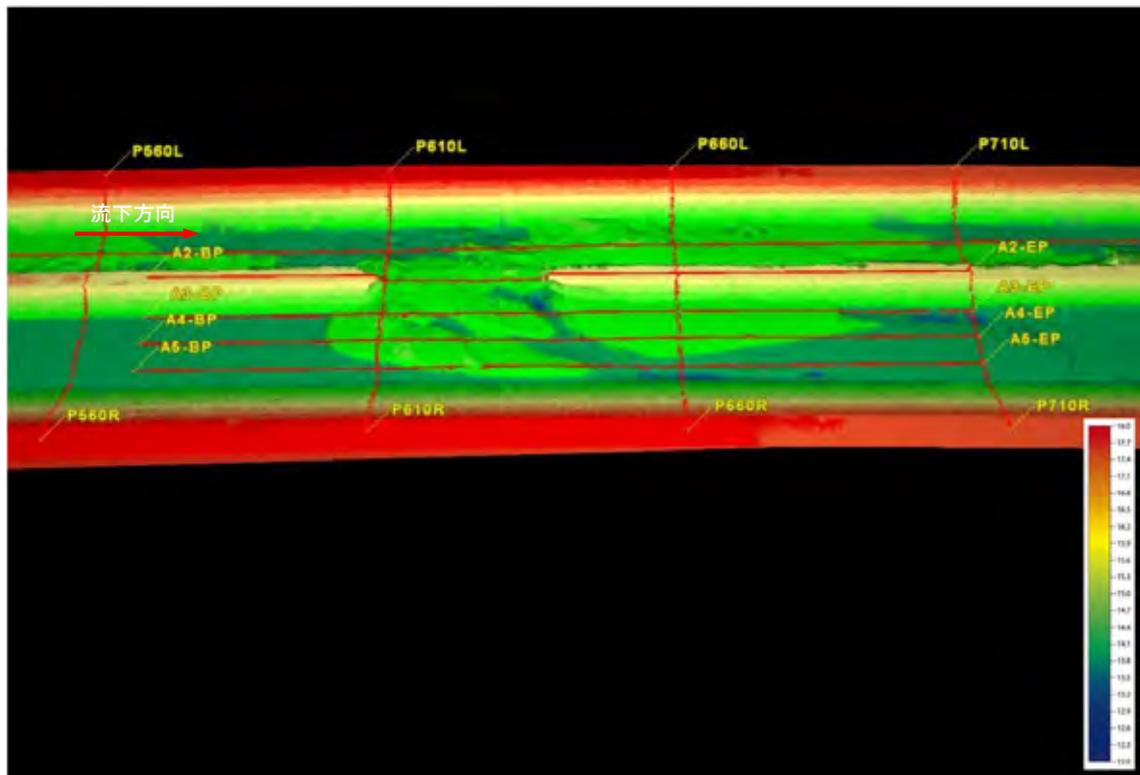
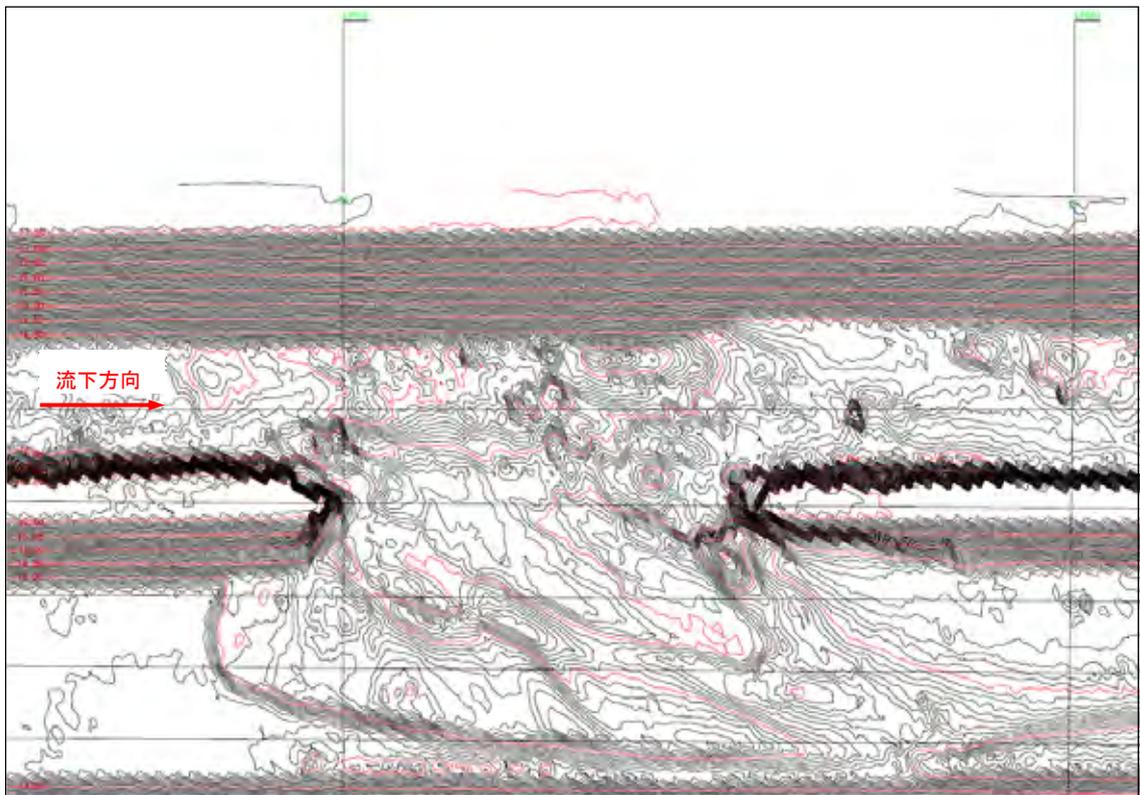


図- 51 通水終了後の河道・氾濫域の地形形状 (Case A)

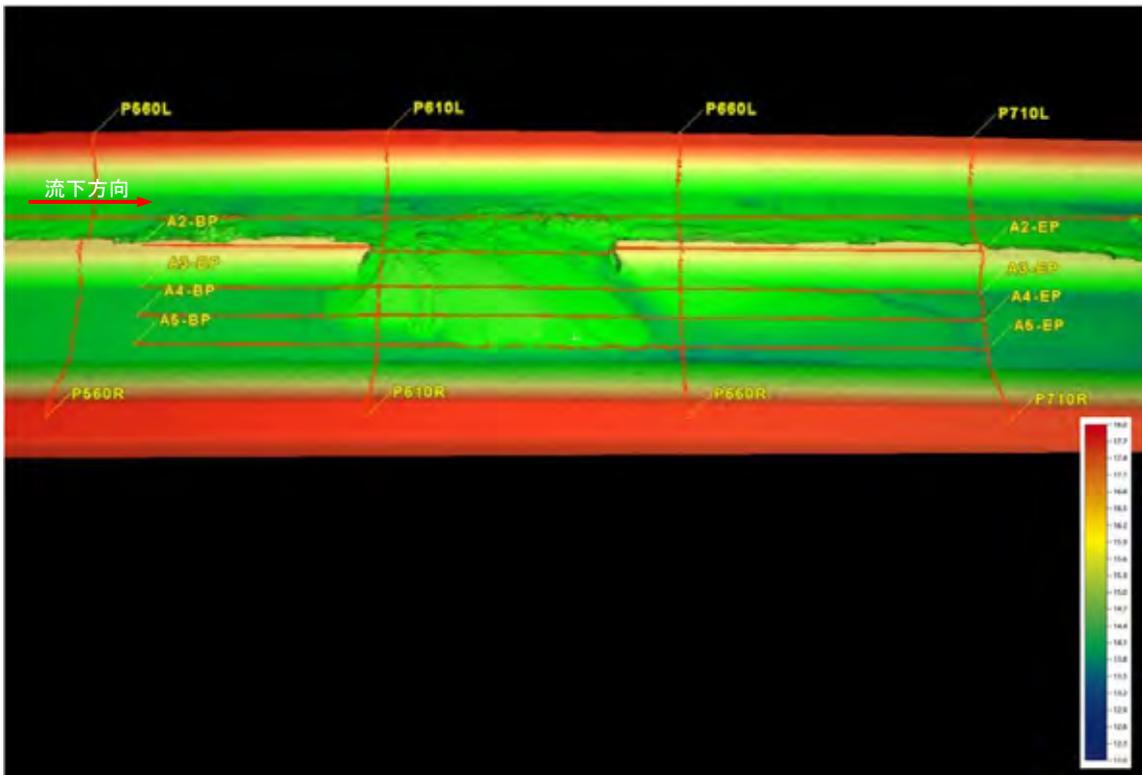
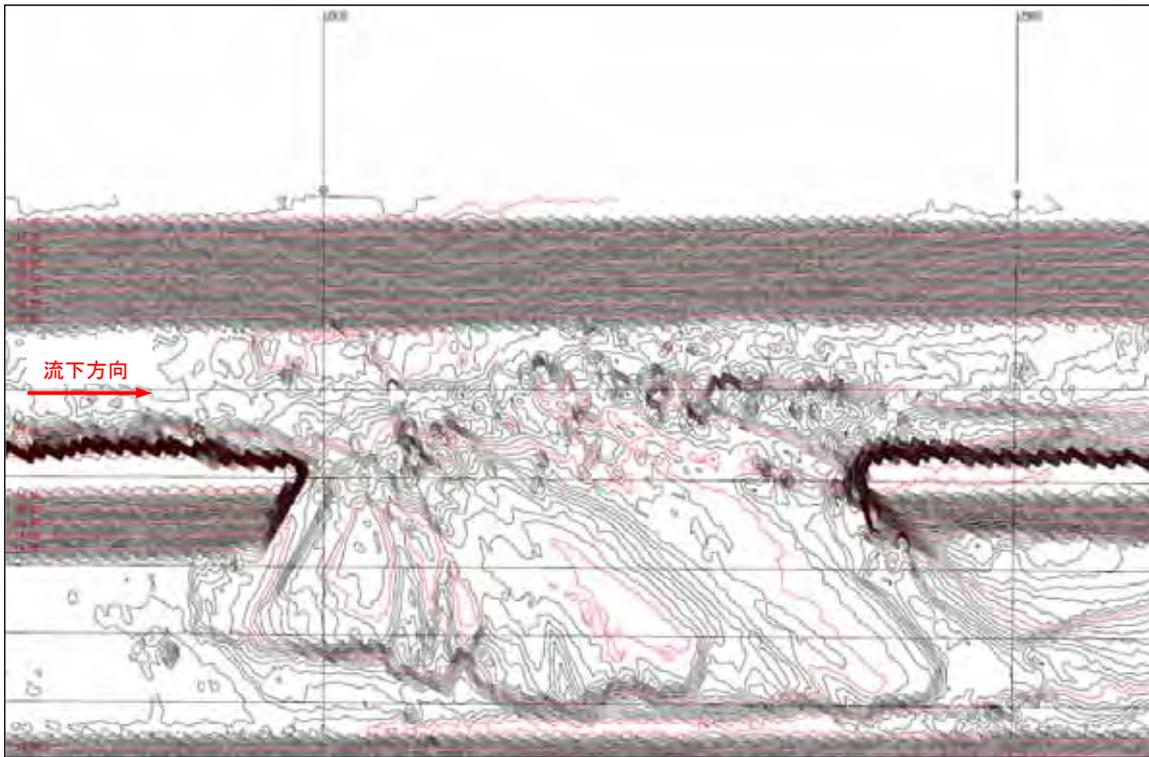


図- 52 通水終了後の河道・氾濫域の地形形状 (Case B)

## g) 実験のまとめ

千代田実験水路において、予備実験として、各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握等を目的に、千代田実験水路に縦断方向に設置した堤体(堤体材料が異なる2ケース)で横越流の破堤実験を行った。

流量計測手法に関しては、電波式流速計を用い、通水中の河床変化を考慮して通水前後の断面形状を適用することで、より正確に時系列の流量観測ができることを確認した。

基本的な破堤進行過程に関しては、破堤の初期段階では越水部の裏法面侵食が主で、破堤が拡幅しないこと、その後、表法肩に侵食が達して堤体断面の大半が崩壊すると、下流方向に破堤拡幅が進行することなどが確認された。

堤体材料の相違による破堤進行過程の違いについては、以下のことが確認された。細粒分の多い材料の堤体のケースは、砂礫の多い材料の堤体のケースに比べ、越水開始から破堤拡幅が始まるまでの所要時間が長かったが、一旦破堤拡幅が始まると、破堤拡幅の進行速度は速かった。また、砂礫分の多い材料の堤体のケースは、基盤に近い部分の堤体が上部に遅れて侵食される形で破堤拡幅が進行した。

なお、この実験は、実験水路内に縦断堤を設置し河道と氾濫域に分けたため氾濫域幅が狭く、破堤幅が10~20m程度になると氾濫域が湛水し、氾濫流が拘束されていたため、破堤進行過程に影響を及ぼしていたと考えられる。このため、次に行う本実験では、氾濫流を拘束しないように広い氾濫域を設定することとした。