

河川堤防の越水破堤現象のうち
破堤拡幅機構に関する実験研究報告書
(案)

平成24年3月

国土交通省北海道開発局
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

はじめに

現存する河川の堤防は、過去の被災の状況に応じて嵩上げ、腹付け等の補強・修繕工事を重ねてきた結果の姿であり、通常起こり得る現象に対しては経験上安全な断面形状及び構造となっていると考えられている。このことを踏まえ、河川管理施設等構造令においては、堤防は、「計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とするものとする」とされているところである。

一方、近年の地球的規模の気象変動に伴い、いわゆるゲリラ豪雨等の異常気象がここ北海道においても頻発しており、河川堤防に対して、「計画高水位以下の流水の通常的作用」を超える外力が働くことが想定しうる状況にある。折しも、昨年3月に発生した東日本大震災においては、地震による液状化で堤防が被災したり、河川を遡上した津波の外力により多くの箇所破堤が生じたところである。このように、計画を超える外力の発生による破堤は避けられないものであり、河川堤防の破堤機構の解明は、水害被害の軽減に向けて喫緊の課題となっている。

十勝川中流部に位置する千代田実験水路は、国内最大規模の実物大河川実験施設として、堤防破壊のプロセス、河床変動などの土砂移動、河道内樹木の密度と洪水時の抵抗、多自然型工法や樹木・植生などによる堤防や河岸の保護機能等を解明し、安全で安心できる国土づくりや美しい国土づくりに資する成果を得ることを目的として、平成19年に完成した施設である。

本報告書は、平成20年度から平成23年度にかけて実施した河川堤防の越水破堤現象のうち、破堤拡幅機構に関する各種実験及び検討の成果をとりまとめたものである。本報告書の成果が頻発している水害被害の軽減、及びさらなる河川技術の発展に資することを切に希望するものである。

目 次

目 次

第 I 部越水破堤現象をとりまく環境	5
1. 近年の実破堤事例	6
2. 越水破堤現象に関する既往研究	6
3. 研究過程と本報告書の内容	7
第 II 部十勝川千代田実験水路における破堤実験	9
4. 十勝川千代田実験水路の概要	10
5. 堤体崩壊履歴計測実験(室内実験)	11
(1) センサーの選定	11
(2) 実験概要	11
(3) 実験結果	11
6. 予備実験1(河道流無・正面越流)	13
(1) 実験概要	13
a) 水路形状・堤体条件	13
b) 計測方法	13
c) 通水方法	13
(2) 実験結果	13
a) 実験状況	13
b) 破堤進行過程(堤体浸食)	14
c) 破堤進行過程(破堤拡幅)	15
d) 最終形状	16
7. 予備実験2(河道流有・横越流・氾濫域無)	18
(1) 実験概要	18
a) 水路形状・堤体条件	18
b) 計測方法	18
c) 通水方法	18
(2) 実験結果	19
a) 実験状況	19
b) 水位観測結果	20
c) 流量観測結果	20
d) 破堤進行過程(堤体浸食)	21
e) 破堤進行過程(破堤拡幅)	21

8. 本実験(河道流有・横越流・氾濫域有)	25
(1) 実験概要	25
a) 水路形状・堤体条件	25
b) 計測方法	25
c) 通水方法	25
(2) 実験結果	27
a) 実験状況	27
b) 水位観測結果	32
c) 流量観測結果	32
d) 破堤進行過程(堤体浸食)	32
e) 破堤進行過程(破堤拡幅)	32
9. 破堤拡幅機構	36
(1) 破堤拡幅開始以前	36
(2) 破堤拡幅開始以降	37
a) 堤体崩壊量の算出	38
b) 堤体周辺水理量の算出	38
c) 堤体浸食量の推定	38
第 III 部現地実験以外の検討	42
10. 縮尺模型実験	43
(1) 再現性の検証実験	43
a) 模型水路の概要	43
b) 模型実験の条件	45
c) 模型実験の状況	47
d) 破堤拡幅の再現性	49
e) 氾濫流量の再現性	52
(2) 河道形状相違による破堤実験	61
a) 実験条件	61
b) 水路幅と水路勾配別破堤状況	61
c) 崩壊と無次元掃流力	65
第 IV 部まとめ	69

第I部

越水破堤現象をとりまく環境

第I部では現在の越水破堤現象をとりまく環境について概略を紹介する。

1章では近年の越水破堤事例について紹介する。

2章では越水破堤現象に関する既往の研究事例のレビューを行う。

3章ではこれらの背景のもと、本研究の目的・研究過程を明記する。

表-1 近年の破堤に伴う災害事例

年月	被災地	災害内容	災害要因
2000年9月 ²⁾	愛知県庄内川	庄内川支川の新川での破堤	破堤原因は越水破堤と浸透破堤の複合。決壊した堤防の本体は砂礫で構成。透水性高く、堤防天端は舗装されていない。改訂された高水基本計画に基づく改修が進展していない状況で被災。
2004年7月 ³⁾	新潟県刈谷田川・五十嵐川	信濃川支川の刈谷田川・五十嵐川における破堤、護岸の破損	河川の未改修区間で治水の安全度が低い区間の破堤。簡易推定法(痕跡からの推定)及び不等流解析により、洪水の最大ピークは $1900m^3/s$ 、越流水深 $20\sim 30cm$ 。五十嵐川の満杯流量を約2割上回る。五十嵐川諏訪地区の破堤は破堤延長 $117m$ であり、破堤原因は基礎地盤が砂礫であり、洪水により水位上昇、高い水圧により水が浸透・噴出して堤防が陥没したため。刈谷田川の中ノ島地区の破堤延長は $50m$ であり、破堤原因は破堤部が蛇行の水衝部であり、水流が集中。
2004年10月 ⁴⁾	兵庫県円山川・出石川	台風23号豪雨による越水破堤(図-1)	立野(円山川の破堤部)の最大流量は $4200m^3/s$ で現況流下能力を1割超えたため越水。その後、裏法侵食と浸透によって破堤した。鳥居(出石川の破堤部)の最大流量は $1000m^3/s$ で現況流下能力を2割超えたため越水し破堤。破堤地点は外水の水衝で越流水が裏法尻で集中しやすいため、侵食を促進させた。



図-1 円山川の破堤状況(国土交通省 HP より)

1. 近年の実破堤事例

近年、台風や集中豪雨などに起因する豪雨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、堤防の決壊事例も見られるようになってきている。堤防決壊による被害は甚大であり、過去の事例ではその8割以上が越水に起因するものであるとされている¹⁾。

表-1に近年の破堤に伴う災害事例の一部を要因とともに示す。どの事例においても破堤により甚大な被害を被っており、防災対策を進めるとともに減災対策を進めることが求められている一方、越水破堤現象は未解明な部分が多い。

2. 越水破堤現象に関する既往研究

越水破堤現象に関する研究は様々な手法で進められており、それらを整理したものが表-2である。研究手法を大別すると実験・現地調査・数値計算となる。

まず実験による手法は2次元の実験と3次元の実験に二分できる。2次元の実験(堤外河川の流れを考慮しない正面越流)は更に実物大実験(以下、実スケール)と縮尺模型実験(以下、スケールモデル)に分類でき、3次元の実験(堤外河川の流れを考慮した横越流)はスケールモデルのみである。

次に現地調査による手法は最終的な破堤形状等のみ把握可能であり、その過程を解明することは困難である。

表-2 越水破堤に関する既往の研究事例

研究手法	規模	キーワード	研究事例調査	研究概要	成果概要	課題点
実験	実物大	越水破堤メカニズム	現地破堤実験 ⁵⁾	越流の耐侵食性に関する実物大研究	芝堤の耐侵食強度の評価, もぐら穴弱部部の侵食形態	破堤の3次元的拡大現象
		耐越水化対策	越水対策実験 ⁶⁾	様々な耐越水工法の比較検討	土堤の破壊メカニズムの解明, 危険度別耐越水対策工法の選定方法提案	越水堤防化する必要のある範囲の選定方法
		越流部水理特性	越流時の水位・流速計測 ⁶⁾	上記の耐越水化対策実験に併せて実施	2次元の越流水理特性の把握	3次元の越流特性は不明
	縮尺模型	越水破堤メカニズム	遠心模型実験 ⁷⁾	遠心模型による越流破壊実験	縮尺模型での堤体内の流れが再現可能	相似性について研究が必要
			堤防決壊口拡大状況 ⁸⁾	縮尺模型による堤防決壊口の拡大状況再現実験	堤防決壊後の拡幅速度と水理現象の把握	研究事例が少ない
		耐越水化対策	特殊な耐越水化対策 ⁹⁾	堤防法尻の新たな保護工	洗掘防止と氾濫防止を考慮した新たな保護工の提案	費用対効果等, 今後実用に向けての検討が必要
		越流部水理特性	坂路がある堤防の越流特性 ¹⁰⁾	裏法側に坂路がある場合の流れの集中を実験	3箇所の流れの集中箇所が発生, 補強方法を提案	研究事例が1ケースのみ
			堤防越流水理特性 ¹¹⁾	2次元実験による越流水理特性把握	底面圧力・流速分布・レイノルズ圧力分布の特性把握	越流時の裏法部における水理特性を精度よく再現計算できるモデルの検討が必要
			平面的越流特性 ¹²⁾	河川堤防からの越水状況を再現する計算モデルの構築	SU-FUF-2DF ダイナミック氾濫解析モデルで良好に再現	実スケール等での検討が必要
氾濫拡散状況	樹木郡による被害軽減効果 ¹³⁾	樹木郡による破堤決壊幅抑制効果の検討実験	樹木郡を堤内地に設置することにより堤防決壊幅を抑制することを確認	樹木郡の具体的な管理指針が必要		
調査	被災時	被災事例・要因分析	水害レポート ¹⁴⁾	現地被災事例の収集と要因分析	現地での被災事例・効果的な堤防強化方法の提案	被災時のリアルタイムな外力情報は事後調査のみでは把握困難
			災害調査方法 ¹⁵⁾	越水破堤被災後調査と外力解析	被災後痕跡調査でも定量的に出水時の外力推定が可能	他河川への汎用のための追加調査必要
数値計算	越水破堤メカニズム	破堤拡大過程 ¹⁶⁾	破堤拡大過程の計算モデルの開発	破堤決壊口の拡大状況・落掘・土砂堆積状況の再現	実物大での検証が必要	
		越流破壊 ¹⁷⁾	堤防越流破壊現象の計算モデル化・越水外力を増大させる要因解析	拡張 MPS 法により単純な条件下なら破堤現象の再現可能, 越水外力へ影響を与える要因解析	基礎研究段階	
	氾濫解析	実洪水を再現した氾濫解析モデル ¹⁸⁾	数値計算による洪水氾濫状況の再現	氾濫解析モデルの提案	破堤箇所境界条件等は不明	

最後に数値計算による手法は既往の実験や現地調査の結果との比較は可能であるが、実スケールでの3次元的な破堤の拡がり過程やその時の水理特性が明らかになっていないため、比較検証を行うデータの蓄積がモデル精度の向上には重要である。

3. 研究過程と本報告書の内容

前述の実破堤事例、既往研究レビューからも明らかのように、越水破堤現象は実災害を時系列で観測することは非常に困難であり、特に実スケールでの破堤拡幅メカニズムについて未解明部分が多い。よってこれらを時系列で現象把握・データ蓄積が出来れば今後の研究発展にとっても非常に重要であると言える。そしてこれらが明らかになることで、破堤後における堤防復旧等の危機管理技術の向上、ハザードマップの精度向上など、その成果を行政を還元することも期待できる。

これらの背景のもと、以下のフローに従って研究を行った。

平成 20・21 年；計測技術検討

特に不可視部分である堤体内の崩壊履歴を追跡するため、室内実験と以下の予備実験を通じて堤体崩壊履歴計測技術の確立を目指した。

平成 20 年；予備実験 1(河道流無・正面越流)

現地における大規模実験では観測範囲が広範囲であり、また越水破堤現象の計測項目が多岐にわたる。そこで、比較的、計測が行いやすい正面越流において実験を行い、計測手法の確認、堤体崩壊履歴計測技術の現地適用性の確認を行った。

平成 21 年；予備実験 2(河道流有・横越流・氾濫域無)

河道流のある横越流とすることで、より実現象に近い条件下での実験を行い、特に初期段階の越水破堤現象の把握や、破堤拡幅に伴う高流速・複雑流況下での計測手法の確立を目指して実験を行った。

平成 22・23 年；本実験 (河道流有・横越流・氾濫域有)

氾濫域まで含め、より実現象に近い条件を実験を行った。また本実験の結果を用いて破堤拡幅過程の検討を行うことから、河道内流況、堤体土質、堤体形状を変更し、全 4 回の実験を実施した。

平成 22・23 年；縮尺模型実験

現地実験ではより多くの条件下での実験が困難であることから、破堤本実験の再現性確認などを目的に縮尺模型実験を実施した。

本研究の目的は破堤拡幅過程の現象把握・検討が主目的であることから、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(幅 1m 程度)を設けており、また堤体は裸堤としている。よって特に越水初期から破堤拡幅開始までの現象については、今回の千代田実験水路内という非常に限られた条件下での結果であることに注意が必要である。

本報告書は平成 20 年度からの実験内容を対象としている。ただし、主要な結果を抜き出して整理し検討を行っているため、実験により得た全てのデータを網羅していないことをお断りしておく。なお全実験データ・計測方法等については、本報告書とは別に「北海道開発局帯広開発建設部；千代田実験水路，平成 22～23 年度，破堤実験データ集(案)」に収録されているので、より詳細なデータについてはこちらを参照願いたい。

第II部

十勝川千代田実験水路における破堤実験

第II部では十勝川千代田実験水路で実施した破堤実験について述べる。

4章では十勝川千代田実験水路の概要について紹介する。

5章では破堤拡幅現象を把握するための計測技術について紹介する。

6章・7章では計測技術の検証等を目的に実施した予備実験の結果について報告する。

8章では予備実験で確立した計測手法を用いて、氾濫域を考慮した本実験の結果について報告し、9章ではこの結果を用いて破堤拡幅現象について検討を行う。

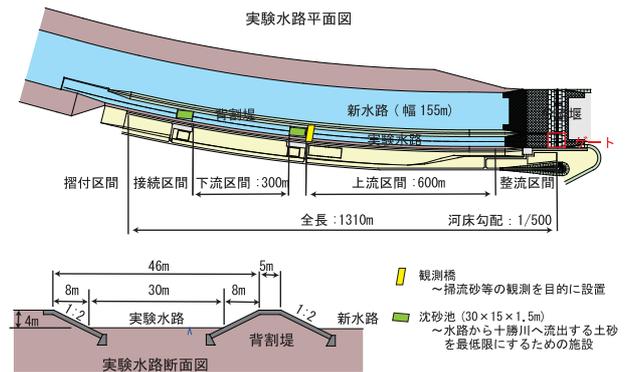
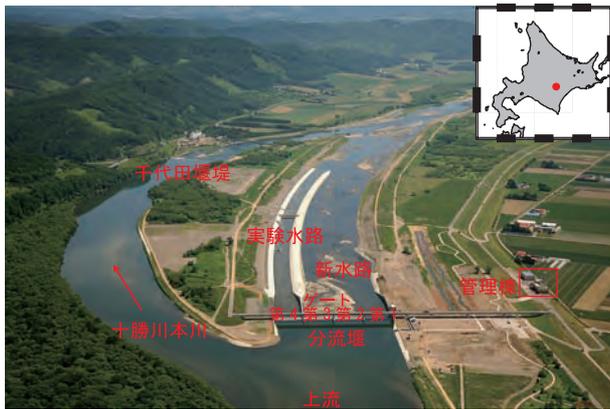


図-2 千代田新水路および実験水路



図-3 ゲートからの通水状況

4. 十勝川千代田実験水路の概要

国土交通省北海道開発局では北海道の一級河川である十勝川において、治水安全度を向上させることを目的に日本最大となる起伏式ゲートを4門配置した千代田新水路を施工し、2007年4月より運用を開始している。図-2に示す十勝川千代田実験水路（以下、千代田実験水路）は千代田新水路の一部を活用することで、人工洪水による実験を行うことができる日本初となる実物大河川実験水路である¹⁹⁾。

図-3に示すように実験水路上流端には起伏式ゲート（転倒式；高さ3.91m・幅43.3m）が配置され、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が可能である。通水にあたっては十勝川本川にある千代田堰堤（図-2）からの農業用取水位の確保が優先されるため、十勝川の流況に応じて実験水路へ供給できる流量は制限されてくる（ゲート制限操作として課せられている）。また、制限操作内であった場合でも、ゲート開度状況によりゲート背面水位が下がり続けることにより、水路内への供給流量が安定しないことも考えられる。なお、実験水路は治水施設の一部であり、大規模出水時には実験水路も治水のための運用操作となることから、実験水路として通水可能な最大流量は $170\text{m}^3/\text{s}$ となっている。



	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°C~30°C(水中)
精度	±0.075G	±0.2°C
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)

図-4 選定したセンサー

5. 堤体崩壊履歴計測実験 (室内実験)

千代田実験水路を用いた破堤実験を行うにあたり、重要且つ課題となるのは破堤進行過程を時系列で精度良く把握することである。水路の上流から流量を供給するためのゲートは操作規則上、すぐに通水を止めることが出来ないため、破堤進行中にその過程を計測する必要がある。この計測技術を確認することで、今までは未解明であった不可視部分の堤体内部も含めた崩壊過程や、時系列での堤体崩壊量の推定が可能となる。計測手法の選定とその精度把握を目的に複数種のセンサーを用いて室内実験を行った²⁰⁾。

(1) センサーの選定

計測手法として図-4に示したセンサーを選定した。各センサーを堤体内に設置し、加速度センサーは設置箇所が破堤し流出することで発生した加速度を感知、水温センサーは設置箇所が破堤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と考え、それぞれの値を時系列で記録し、値の大きな変化点から設置箇所の侵食時刻を把握しようとするものである。データ取得インターバルはそれぞれ1秒毎とし、加速度センサーは重力加速度も感知することから3軸方向の加速度を取得し、得られたデータを合成加速度として扱うこととした。また共に取得データはセンサー内メモリに書き込む自記式であり、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、図-4に示した通りセンサーが流出後、速やかに浮上するように加工を行った。

なお加速度及び水温を計測出来るセンサーは種々あるが、千代田実験水路では堤体内に数多く設置する予定であることから、小型・無線・安価であることを基本とし総合的に判断し選定を行った。

(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水路(幅1.0m×高さ1.0m×長さ23m)を用いて行った。図-5に示したように水路内の堤体造成箇所全幅に盛土し、センサーを側面から流出状況が目視できるように配置した。実験は堤体上流部に一定時間、湛水させたのち流量を増加し破堤させ(全4ケース:各センサーの使用累計数26個)、目視により流出した時刻とセンサーの記録時刻を比較することで、センサーの精度検証・現地での適用の可能性を確認した。

(3) 実験結果

一例として各センサーの結果を図-6に示す。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。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、流出時刻近辺で再度、反応を示しているが秒単位での流出時刻推定は困難である。

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・降雨等の気象条件より未破堤箇所でも水温センサーが反応する可能性が考えられ、また破堤時刻の推定は数分単位が限界であることから、今回の実験目的には不適合であると判断された。

次に加速度センサーの精度検証を行う。図-7は加速度センサーの目視による流出時刻と、センサーが記録した

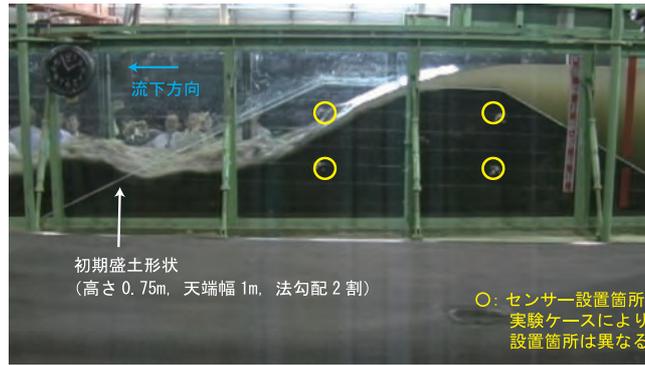
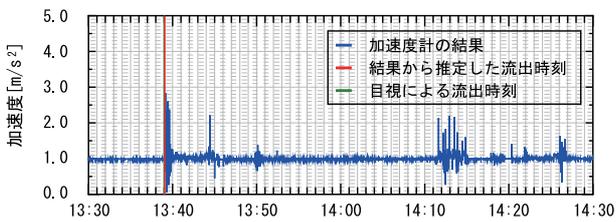
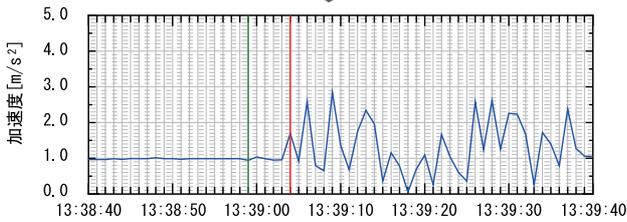


図-5 室内実験の状況

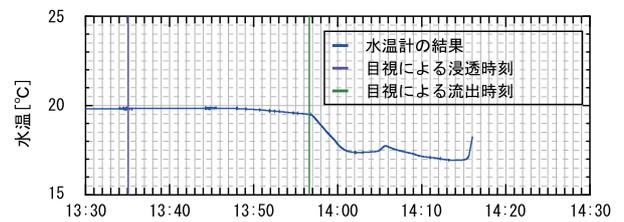
加速度センサーの結果



↓ 流出時刻の拡大



水温センサーの結果



↓ 流出時刻の拡大

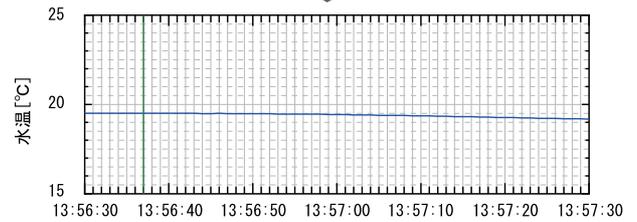


図-6 室内実験結果の一例

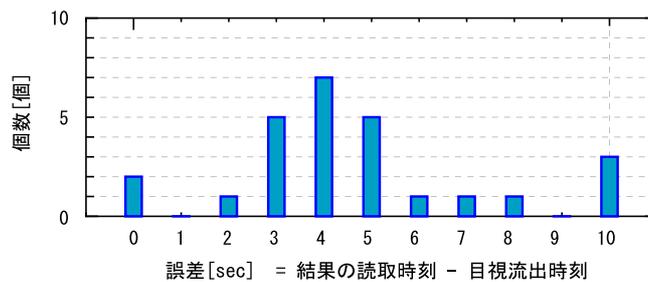


図-7 加速度センサーの誤差分布

データから推定した流出時刻の誤差を示したものである。これより数秒単位の誤差での破堤時刻推定が可能であると考えられ、予備実験では加速度センサーをメインとし、現地での適用性確認実験を行うこととした。



図-8 予備実験 1 の様子

6. 予備実験 1(河道流無・正面越流)

(1) 実験概要

千代田実験水路における実験は非常に規模が大きく観測が広範囲であり、また越水破堤現象を計測するために計測項目が多岐にわたることから、予備実験 1 では計測機器の機能検証や計測手法の確立を目指した。図-8 に示すように千代田実験水路内に横断堤を造成し、比較的、計測が行いやすい正面越流による破堤実験を行った²⁰⁾。

a) 水路形状・堤体条件

実験水路の形状を図-9 に示す。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)において造成した。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。用いた土砂は千代田新水路工事で発生した残土であり、土質試験結果は図-10 の通りであり、実験水路河床材料と概ね同じ土質である。

b) 計測方法

通水中の主な観測は図-9 に示すように、水位計による水位観測、堤体崩壊履歴計測実験(室内実験)より選定した加速度センサーによる破堤形状の時系列計測、通水後には三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・ビデオカメラを用いた実験状況撮影を行った。

c) 通水方法

通水は高さ 2.25m(堤防天端より 0.25m 低い)まで湛水させ 10 分間、ゲートからの通水を停止した後、 $4\text{m}^3/\text{s}$ を通水し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した(図-11)。ここで通水流量 $4\text{m}^3/\text{s}$ は過去の事例⁶⁾等から判断して決定した(越流量と越流水深の関係から切欠箇所での越流水深は概ね 25cm 程度)。なお通水再開時の水路内推定流速は概ね $7\text{cm}/\text{s}$ (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)、また実験状況から流水による堤防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。

(2) 実験結果

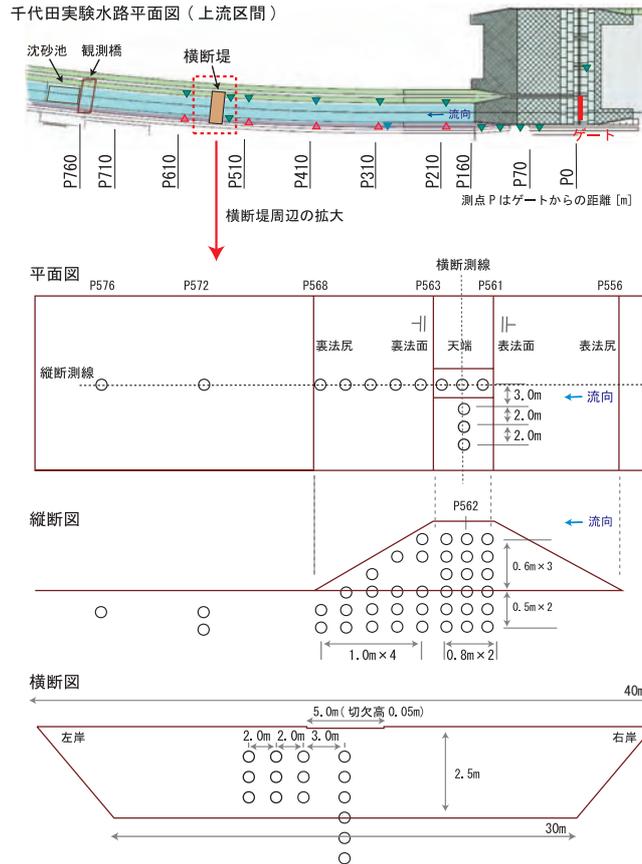
a) 実験状況

ゲートからの水路内流入量と堤防上流区間の水位結果を用いて、(1) 式より堤防からの越流量を推定した。

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

ここで Q_{out} :越流量, Q_{in} :流入量, V :横断堤上流部の湛水体積, Δt :水位計データは 1 分毎なので 60sec である。図-11 に (1) 式より求めた越流量を示す。

図-12 は実験時に撮影したビデオ画像である。堤防からの越水開始は 10 時 16 分頃からであり、越流開始直後である時刻 A では裏法面全体にガリ侵食が見られる。時刻 B は越水開始から 2 分後であり、裏法面の侵食が鉛直



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	▲ 定点水位計（電波式） ▼ ダイバー式水位計（水圧式）
	破堤形状履歴	○ 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	堤防・落堀形状	3次元レーザーキャナ

図-9 予備実験 1 の実験水路概要

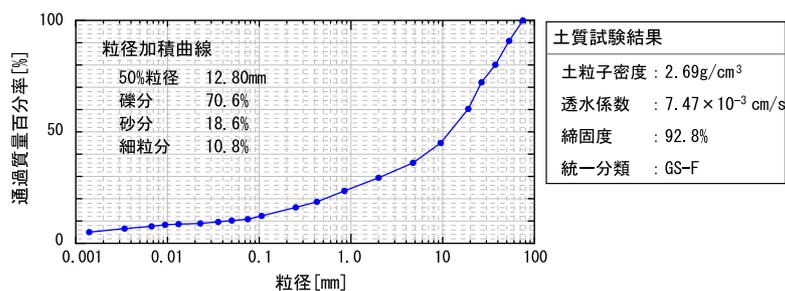


図-10 堤体材料の粒度分布

方向に進行し、また天端部侵食が開始している。時刻 C は越水開始から 4 分後であり、縦断測線上の堤防部分が概ね全崩壊しこれ以降、横断測線方向へ破堤が拡幅していく。時刻 D は越流開始から 10 分後であり、越流量ピーク (42.7m³/s) をむかえている。

b) 破堤進行過程 (堤体侵食)

図-13 の左はセンサー設置箇所の破堤時刻を用いて、時刻 A ~ D における 1 分毎の破堤進行過程を推定したものである。なおセンサー間は直線補間としている。

越水開始から時刻 B にかけて、裏法面部全体と裏法肩付近が崩壊している。次に時刻 B ~ C の間では天端箇所

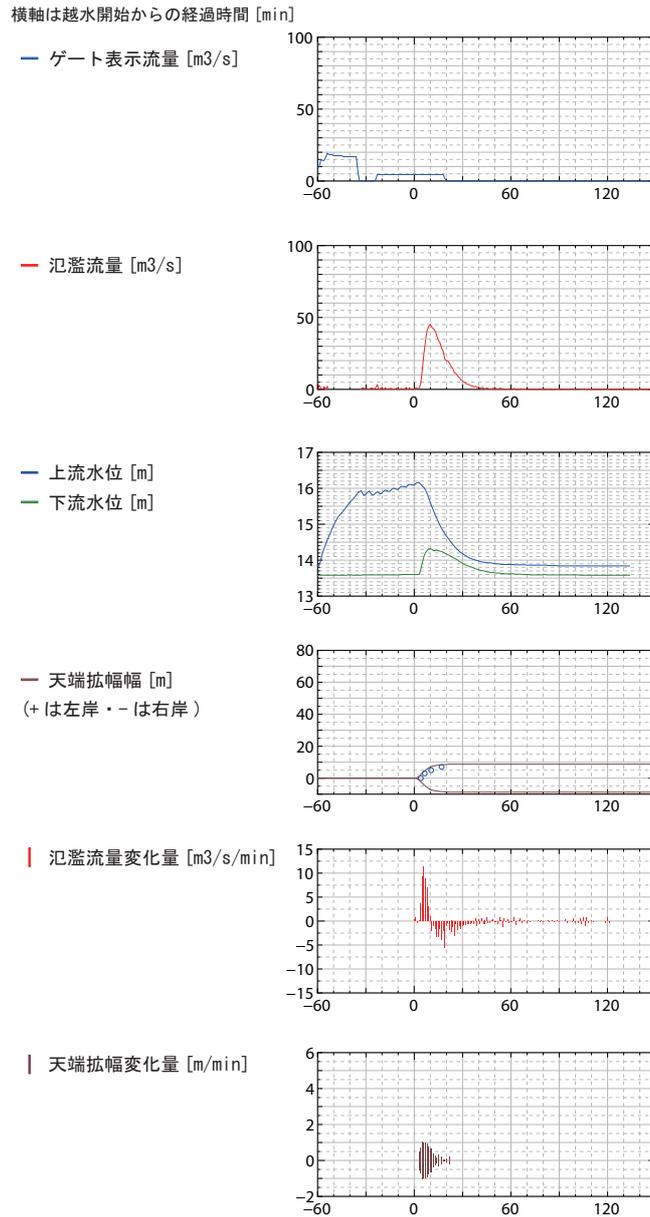


図-11 観測データ時系列 (予備実験 1)

において下流側から順次、鉛直方向下方にむかって崩壊が進み、時刻 C で河床高より上の堤体部分の大半が崩壊している。またこの時間帯のうちに、法面部は河床高まで全て崩壊している。時刻 C 以降については天端箇所についても河床高まで下流側から順次崩壊している。更に法尻から下流では河床高より低い部分についても流出しており、時刻 C 前後、つまり縦断測線上の堤防崩壊が概ね終了する時刻前後より落ち掘れの形成が始まったと推定することができる。

c) 破堤進行過程 (破堤拡幅)

図-13 の右はセンサー記録を用いた横断測線上の破堤進行過程である。表記方法については縦断測線方向の結果と同じである。なおセンターより右岸側にはセンサーの配置はしていないが、実験状況の目視観測で左右岸対称に崩壊が進んでいたことを確認していることから、左岸の結果を用いて右岸の崩壊過程を推定している。

堤防センターに配置した No.2 において天端より 2m 程度崩壊が進んだ後、No.11 の崩壊が開始している。No.11 が天端より鉛直方向下方 2m 程度崩壊が進んだ後、No.12 の崩壊が開始している。また両箇所とも天端から鉛直方向下方 1.5m 程度はほぼ同時期に崩壊している。実験時、及び撮影状況からも横断方向への破堤の拡がり過程は次のことが言える。例えば No.11 に注目すると、近傍の No.2 の下層が削られることにより不安定となり、No.11 の



図-12 実験状況 (予備実験 1)

上部が塊となり崩壊，次に No.11 の下層が削られることにより不安定となり，No.12 の上部が塊となり崩壊，といったことを繰り返しながら破堤拡幅が進行していると言える。

d) 最終形状

図-14 は実験終了後の形状を三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。堤防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り，既往の室内実験結果⁸⁾と一致している。

図-14 より，落ち掘れの形状は延長 L が約 28m，最大洗掘深 D が約 0.8m，また堤防の天端開口幅 B が約 18m である。図-15 はこれらの形状特性を既往の室内実験 (最終破堤形状に至るまでの実験過程も含む)，及び現地資料 (実災害時)⁸⁾について比較したものである。今回の実験結果を比較するとその範囲内に収まっていることがわかる。

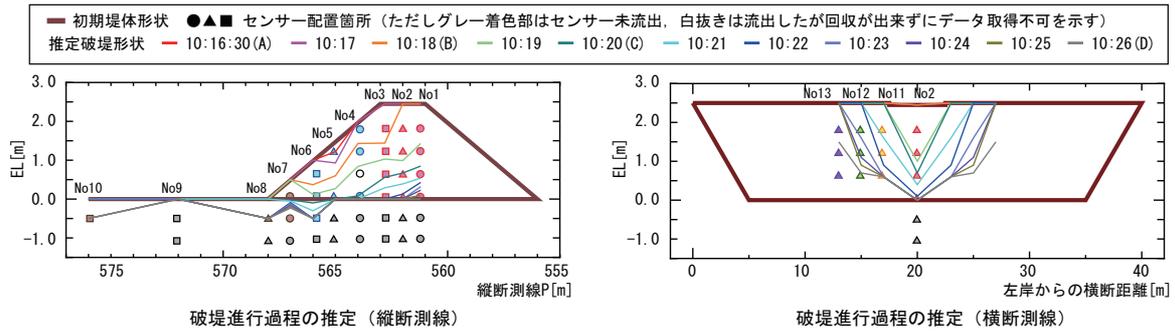


図-13 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (左; 縦断測線上・右; 横断測線上)

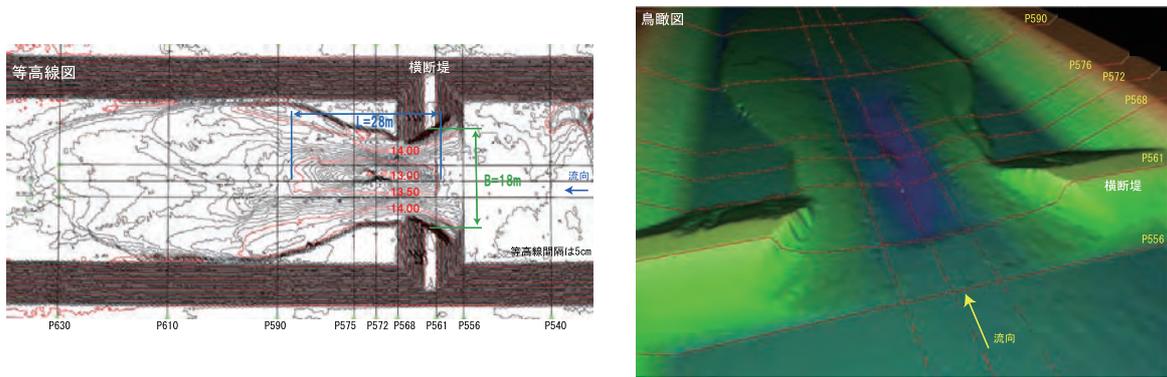


図-14 実験終了後の堤防・落ち掘れ形状

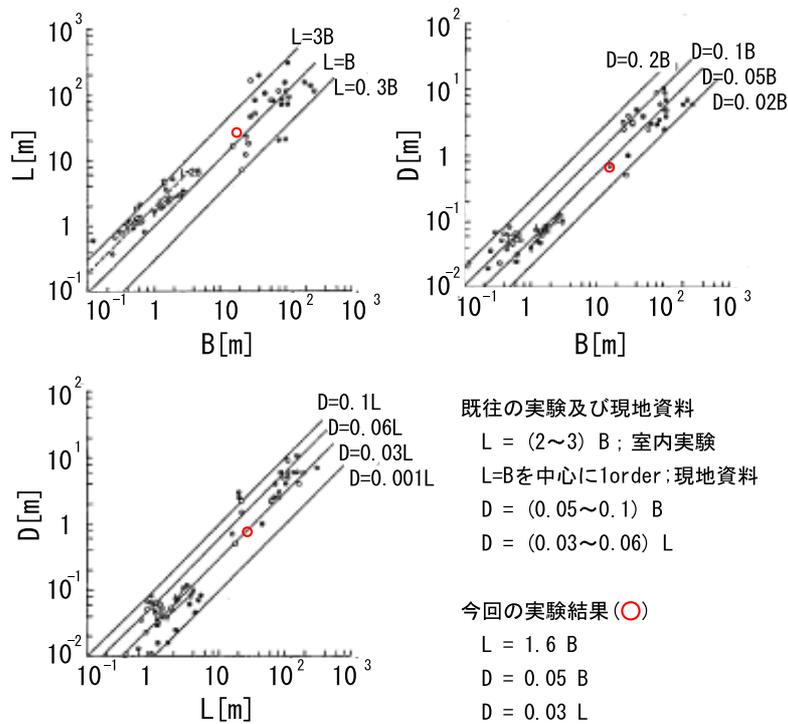


図-15 落ち掘れの形状特性⁸⁾



図-16 予備実験 2 の様子

表-3 電波式流速計の諸元

社名	横河電子機器株式会社
型名	WJ7661
計測原理	マイクロ波のドップラー効果
使用電波	NON 24.15GHz 7mWtyp
計測範囲	0.5m/s ~ 20m/s
測定精度	± 計測値の 2%
分解能	0.01m/s
計測時間間隔	1,2,5,10,20,60 秒から選択

7. 予備実験 2(河道流有・横越流・氾濫域無)

(1) 実験概要

予備実験 2 では破堤初期段階の現象把握や、高流速下での計測手法の確立を目指して実験を行った。図-16 に示すように、河道流のある横越流による破堤実験とし氾濫域は考慮していない。

a) 水路形状・堤体条件

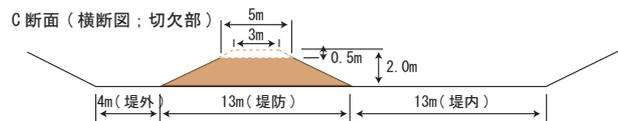
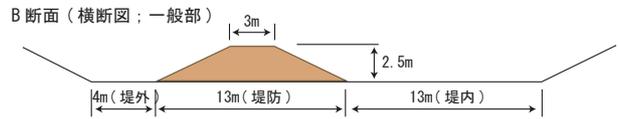
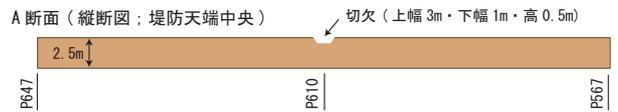
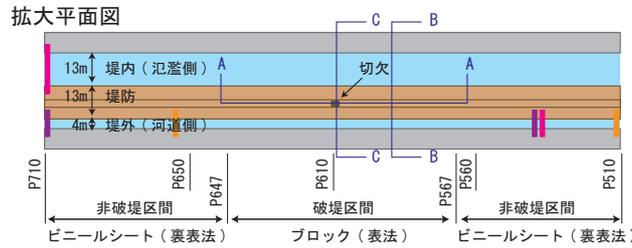
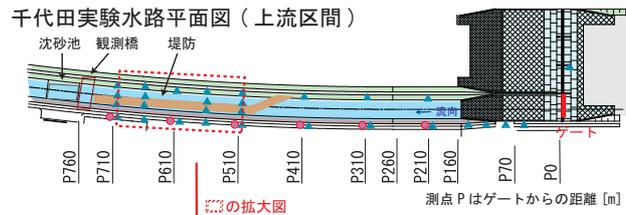
実験水路の形状を図-17 に示す。千代田実験水路内に堤防(高さ 2.5m, 天端幅 3m, 法勾配 2 割)を造成し、堤外河川流れを考慮した横越流による破堤実験を 2 回実施した。破堤のきっかけとして切欠(深さ 0.5m, 上幅 3m・下幅 1m)を設けた。なお横越流での破堤現象について上下流へ拡幅するのか、もしくは下流のみへ拡幅するかなど不明であったため、破堤区間の中心に切欠を設けている。用いた堤体材料は図-18 に示す通りであり、細粒分(粘土・シルト)が Case1 では 15%程度、Case2 では 67%程度である。ただし Case2 については施工上、河床から 0.6m は Case1 の材料を用いて造成している。

なお通水による堤防侵食を防ぐために破堤区間(P567~P647)の表法側にはブロックを、非破堤区間には表・裏法にビニールシートを設置した。

b) 計測方法

通水中の主な観測は図-17 に示す通り、水位観測(水位計)、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)、流量観測(杭ワイヤー式 ADCP・電波式流速計)である。流量観測について、予備実験 1 から新たに表-3 に示した電波式流速計を用いており、その観測手法と流量算出方法については次の通りである。

堤防からの越流量推定にあたっては破堤区間の上下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うためリアルタイムでの河床形状、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横断方向の中央部における表面流速データ(データ計測インターバルは 1 秒毎とし、60 秒平均を 1 データ)を取得し、この流速データに通水断面積(水位計及び通水前後の河床形状より算出)を乗じることで、時系列流量の算出を行った。ただし、水面部 1 点での流速データを用いていることから、ADCP 観測より得られた流量データと比較し、必要に応じて補正を行う必要がある。



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	● 定点水位計 ▲ ダイバー式水位計
	流量観測	Case1 (ADCP・電波式流速計)
	流量観測	Case2 (ADCP) Case2 (電波式流速計)
	破堤形状	○ 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	破堤形状	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

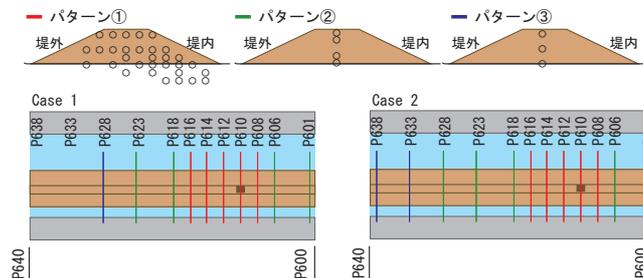


図-17 予備実験2の実験水路概要

c) 通水方法

通水は切欠からの越流水深が概ね 30cm(過去の事例⁶⁾等から判断して決定) 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った。ゲートからの供給流量を図-19 に示す。破堤実験区間の大半が崩壊・破堤拡幅した時点で供給量を減少させ実験終了とした。

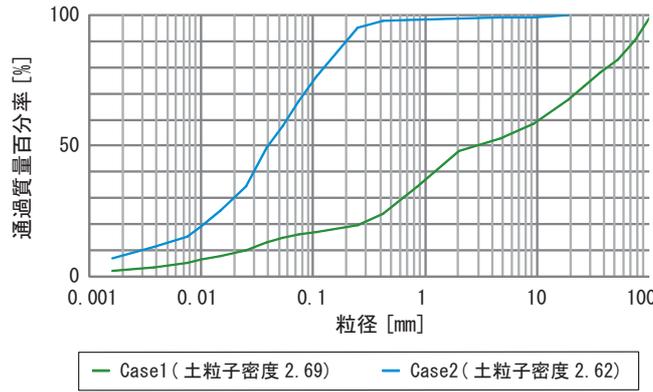


図-18 堤体材料の粒度分布

なおゲート閉操作を行った以降、供給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までを対象とする。

(2) 実験結果

a) 実験状況

図-20 に実験中に撮影したビデオ画像を示す。Case1・2ともに越水開始後、裏法面・裏法肩の侵食が始まっており、この時点では両 Case において大きな差異は見られない。この次に天端は堤内から堤外へ侵食・後退が進行し、切欠部分を中心とした堤体の崩壊が確認できるが、Case1 と比較して Case2 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崩壊している。越流状態は予備実験 1 の正面越流と同様に堤防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 Case1 では越水開始からおおよそ 30 分後、Case2 ではおおよそ 75 分後であり、この時間以降、越流状況は堤防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始まっている。なお、今回の実験では Case1・2 とも上流への破堤拡幅は見られなかった。

b) 水位観測結果

切欠部横断面 P610 の堤外(千代田実験水路左岸)と堤内(千代田実験水路右岸)の水位観測結果、その水位差(堤外水位-堤内水位)を図-19・図-21 に示す。堤外水位について、越水開始時間と切欠部の高さを水位が上回る時間が一致しており、Case1・2 とも堤防造成工事の精度管理は良好であると言える。

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、Case1 は越水開始からおおよそ 30 分後、Case2 はおおよそ 75 分後より急激な水位低下が見られ、前述の実験概況画像より破堤拡幅が進行した時間帯と一致している。また特に堤外側の水位低下後は水位変動が激しく振動しており、破堤により河道内にその影響があったことが推定できる。

ここで Case1・2 の相違点は堤内外の水位差変化である。Case1 では堤外水位の低下後、90 分後まで徐々に水位差が縮まっているのに対し、Case2 では堤外水位の低下後、すみやかに水位差がなくなっている。この現象は破堤進行過程において水理量が異なることを示しており、後述する破堤拡幅過程において単純な土質の相違のみで論じることは出来ないと考えられる。

c) 流量観測結果

破堤区間の上下流で行った流量観測の結果を図-19 に示す。前述の通り、電波式流速計を用いた場合、流速に通水断面積を乗じることで連続した流量の算出が可能となるが、通水中の断面変化等までは考慮が出来ないため、ADCP を用いた流量観測結果と比較を行った。これより両者の同時刻における流量値は概ね一致していることから、電波式流速計を用いて算出した流量値が採用できると判断した。

次に流量観測より得られた破堤区間上流流量と下流流量の差より、越流量を算出したものを図-19 に示す。水面振動が激しく、推定した越流量値にも振動が見られるが、ここでは観測値より算出した値をそのまま記載している。傾向として前述の実験概況画像、水位観測結果と同様に、破堤拡幅が顕著に見られる時間帯から、越流量が急増していることがわかる。

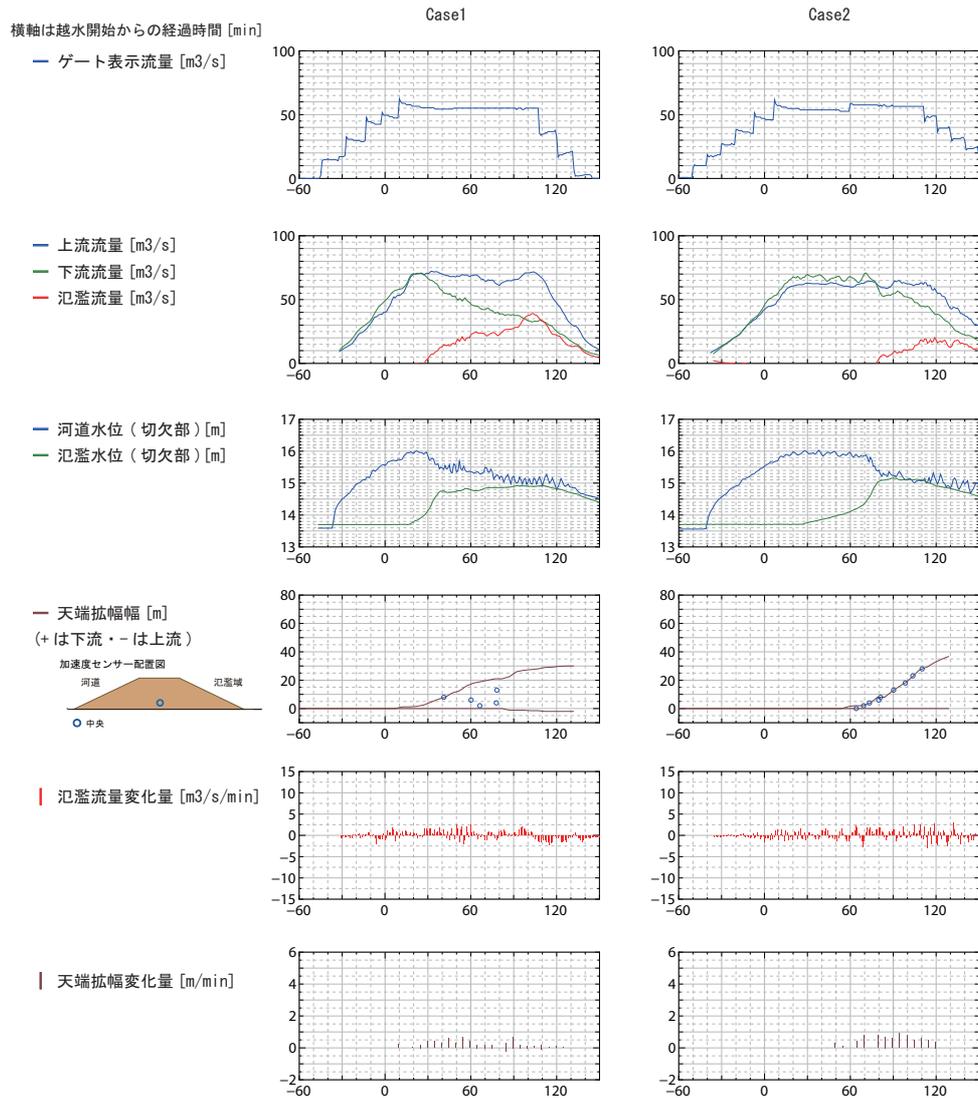


図-19 観測データ時系列 (予備実験 2)

d) 破堤進行過程 (堤体侵食)

図-22 に加速度センサーの記録から推定した切欠部断面における破堤進行過程の一例を示す。

まず Case1 について、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、天端も概ね一定の速度で堤内側から堤外側へ侵食していく様子わかる。越水開始 30 分後、天端全体の崩壊、また堤体断面の大半が崩壊し、これ以降、下流への破堤拡幅が始まっている。

次に Case2 について、越水開始後、裏法肩から裏法面にかけて侵食が見られ、天端も堤内側から堤外側へ侵食しているが、Case1 と比較し天端の後退速度は遅く、切り立っている状態である。越水開始から 75 分後に天端全体の崩壊、堤体断面の大半が崩壊し、この時間以降、下流への破堤拡幅が始まっている。

Case1・2 とともに同様の過程を経ており、また予備実験 1 と同様であった。以上より少なくとも破堤初期段階では 2 次元実験 (正面越流) の成果を用いることが可能であると言えそうである。

e) 破堤進行過程 (破堤拡幅)

図-19 は堤防内部の崩壊を把握するため、堤防天端中央の縦断測線上に配置したセンサーの記録より判読した破堤時刻と、天端拡幅幅をビデオ画像から 5 分毎の値を読み取ったものである。堤防内部の崩壊は縦軸を水路河床基準高 0m とし、センサーの設置高とその流出時刻をプロットしたものである。Case1・2 とともに前述の通り、堤体の切欠断面の大半が崩壊した時間以降に下流に向かって天端の拡幅が広がっている。また堤体内部の崩壊については Case1 では、堤体の上部が先行して下流側へ拡幅しそれに遅れる形で堤体下部が拡幅している。一方で Case2

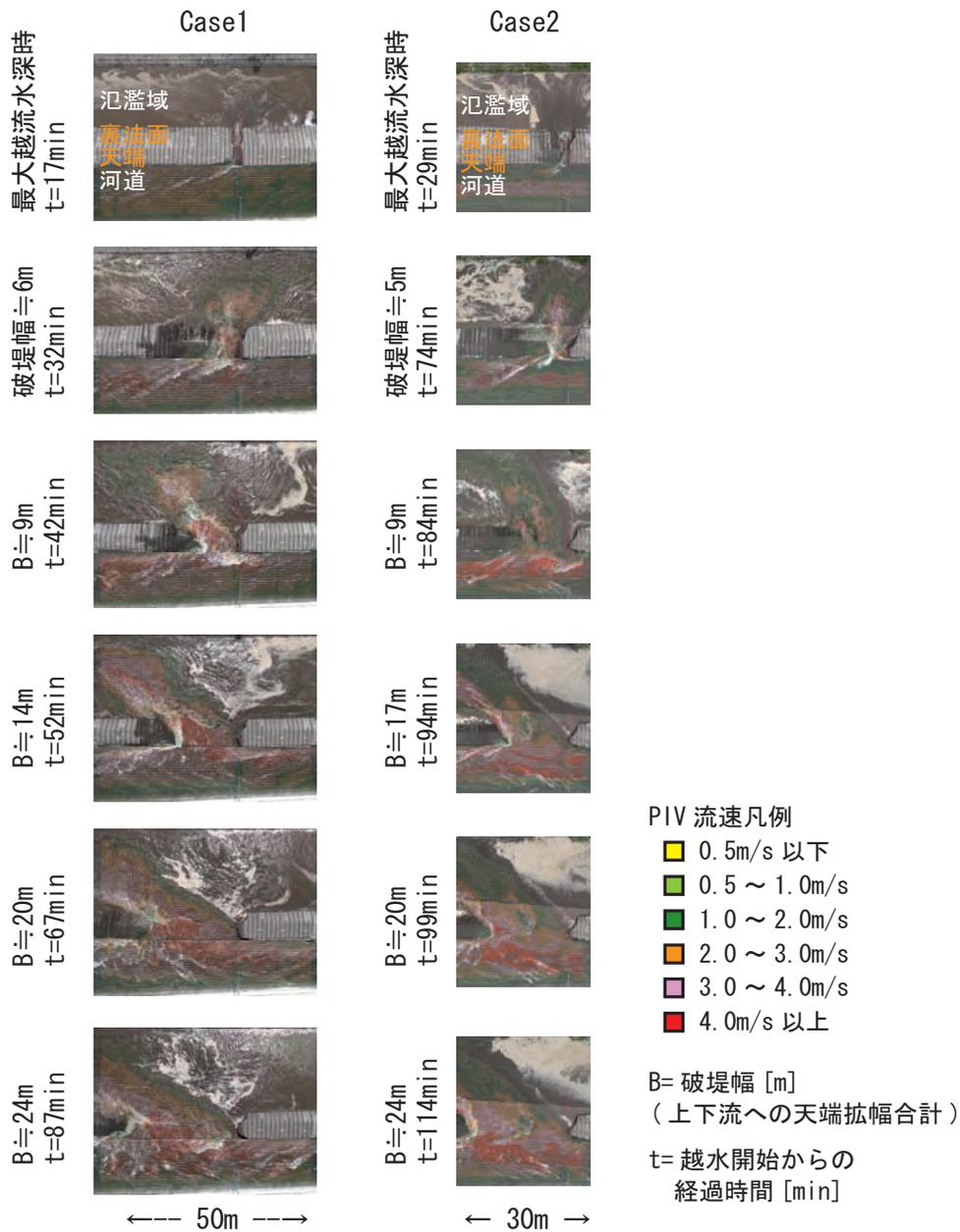
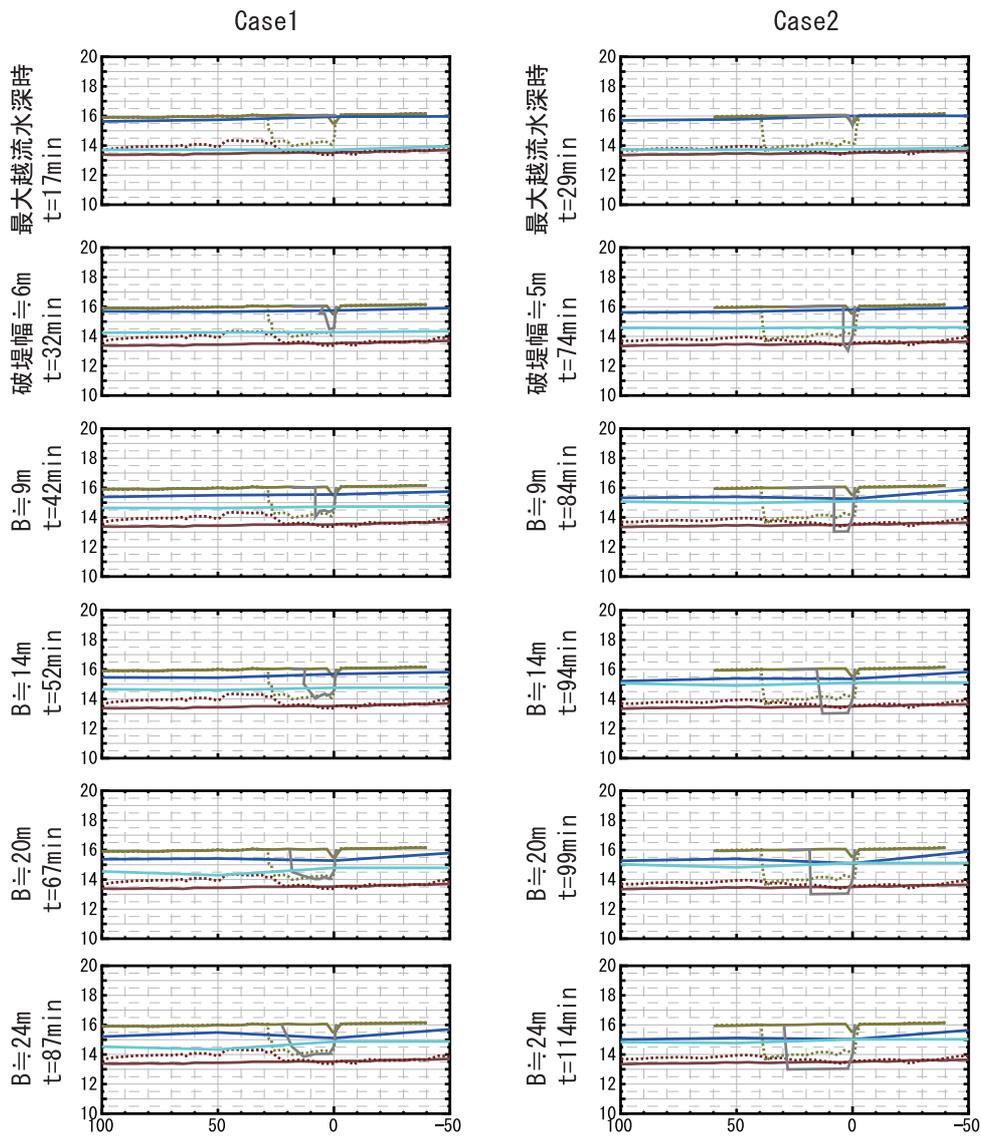


図-20 実験状況 (予備実験 2)

では、天端の拡幅と同様の速度で堤体上部から下部までが同時に拡幅していることがわかる。

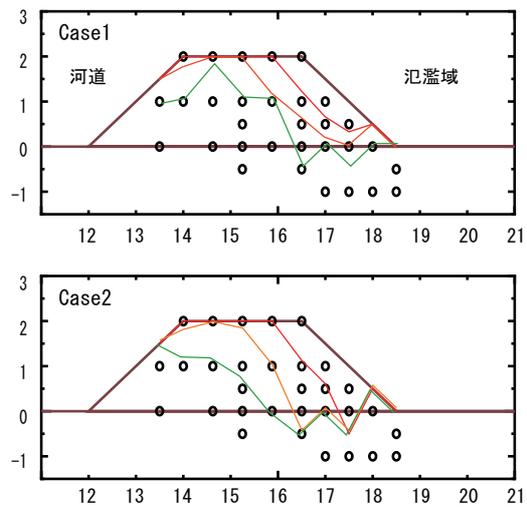
なお破堤幅 10 ~ 20m 程度では両 Case とともに堤内外の水位差はほとんどなくなっており、また予備実験 2 では特に破堤初期段階の現象を見る目的からも設定した破堤区間が短いこともあり、破堤拡幅過程の検討については次項の本実験の結果を用いて検討を行う。



横軸；縦断距離 [m] (切欠部を 0 とし下流へプラス)
縦軸；EL [m]

- 堤体天端中央形状 (実験前)
- - 堤体天端中央形状 (実験後)
- 堤体天端中央形状 (表示時刻時)
- 河道中央河床高 (実験前)
- - 河道中央河床高 (実験後)
- 河道水位 (表示時刻時)
- - 氾濫水位 (表示時刻時)

図-21 通水前後の縦断形状と水位・破堤形状時系列 (予備実験 2)



横軸；横断距離 [m] 縦軸；EL[m] (河床高を 0m)

— 堤体初期形状
● センサー設置個所

	Case1	Case2	
—	t=10min	t=10min	越水初期
—	t=20min	t=30min	
—	t=30min	t=60min	破堤拡幅開始

図-22 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定

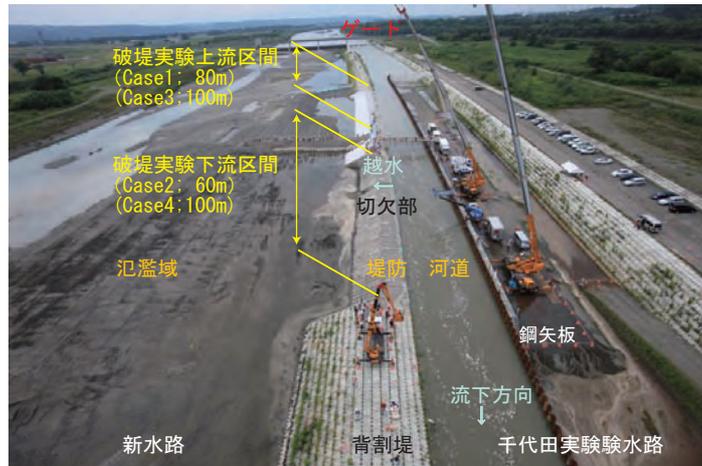


図-23 本実験の様子 (Case2)

8. 本実験 (河道流有・横越流・氾濫域有)

(1) 実験概要

本実験では図-23 に示すように河道流有・横越流・氾濫域まで考慮した実験を行い、破堤拡幅過程を明らかにするため、実験区間を可能な限り長くし、より実現象に近い条件下で実験を行った。また本実験結果を用いて破堤拡幅過程の検討を行うため、河道内流況、堤体土質、堤体形状を変更し全4回の実験を実施した。

a) 水路形状・堤体条件

実験水路の形状を図-24 に示す。千代田実験水路は融雪時期に常時、通水可能な流量が $75\text{m}^3/\text{s}$ 程度であることから必要な水深を確保するため、河道は鋼矢板を用いて実験水路幅 30m から 8m に縮小した。堤体は背割堤 (高さ 4m・天端幅 5m・法勾配 2 割) を破堤実験区間について削り取り、高さ 3m・天端幅 3m・法勾配 2 割に整形し、破堤きっかけとして切欠 (深さ 0.5m・上幅 3m・下幅 1m) を設けた。氾濫域は新水路 (水路幅 80m 以上) を利用した。

図-25 に実験条件を示す。Case1 を基本ケースとし、Case2 は河道流況 (下流端を堰上げ通水流量を半分程度とし水面勾配を緩く、フルード数を小さく)、Case3 は堤体土質 (細粒分が最も多い)、Case4 は堤体形状 (天端幅を 2 倍) の相違に着目して実験を行った。

図-26 に堤体の土質試験結果の内、粒度分布を示す。Case3 については現地の施工上、堤体の下層 1m 分については砂礫材による盛土とし、その上 2m を細粒分の多い土砂で施工している。なお堤体基礎地盤部については土質試験を行っていないが、Case1・2・4 の砂礫に近いものであった。

実験スケジュールは 2010 年 4 月に上流区間で Case1、8 月に下流区間で Case2 を実施した。実験後に再度、同箇所にて築堤を行い 2011 年 4 月に上流区間で Case3、6 月に下流区間で Case4 を実施した。

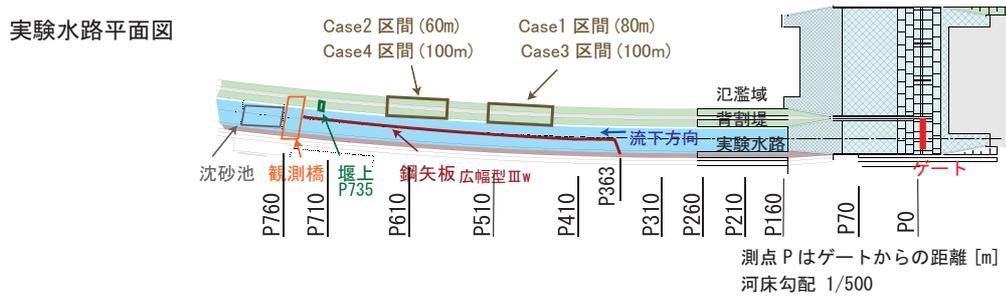
b) 計測方法

主な観測項目・観測箇所は図-24 に示す通りである。使用した観測機器・手法については、越水破堤予備実験 1・2 で確立したものと同様である。

c) 通水方法

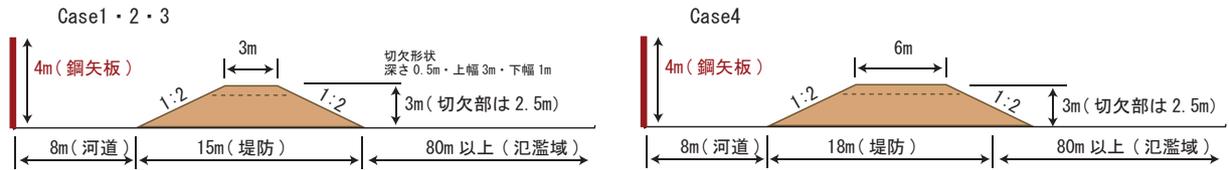
通水は切欠からの越流水深が概ね 30cm (過去の事例⁶⁾ 等から判断して決定) になるまで流量を増加させ、その後は一定流量となるようにゲート操作を行った。ゲートからの供給流量を図-27 に示す。破堤実験区間の大半が崩壊・破堤拡幅した時点で供給流量を減少させ実験終了とした。

Case1 は他 Case より破堤実験区間が短く、供給流量が安定する前に実験区間の大半が崩壊したため、越水開始から 40 分程度、経過後にゲート閉操作を始めている。Case2、Case3 は設定した流量に到達後、ゲート背面水位の低下に起因し供給流量が下がったため、ゲート操作を行いながら、概ね一定流量を通水した。Case4 は水路下流



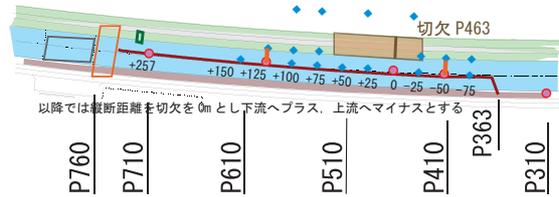
実験水路平面図

実験区間断面図

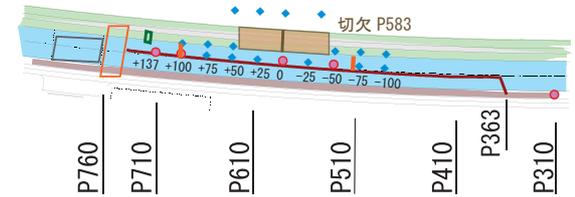


観測機器配置図

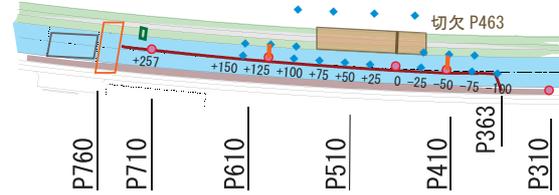
Case1: 実験区間 (P445-525)



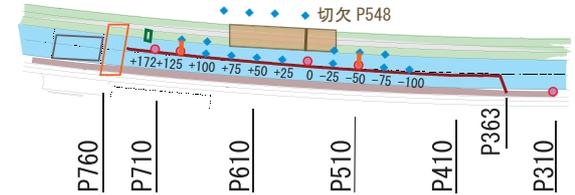
Case2: 実験区間 (P543-627)



Case3: 実験区間 (P445-545)



Case4: 実験区間 (P525-625)



観測時期	観測項目	観測箇所・手法
通水中	水路内水位	● 定点水位計・◆ ダイバー式水位計
	氾濫域水位	鋼矢板から50m離れた地点に実験区間を中心に4箇所(◆ダイバー式水位計)
	流量観測	切欠部より上流へ50m地点 切欠部より下流へ120m地点 (Case2は下流へ100m地点)
	流況観測	(杭ワイヤー式 ADCP・電波式流速計) 縦断方向は実験区間・横断方向は矢板から40m程度 (PIVによる水面流況・3D画像解析による水面形状)
	破堤形状 実験状況	加速度センサー・色砂法 カメラ・ビデオ撮影
通水後	破堤形状	横断測量・3次元レーザースキャナ

図-24 本実験の実験水路概要、及び観測概要

端の堰上げ施設周辺の河床低下により、十分な越流水深を得ることが出来なかったため、 $80\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで流量を増加させている。

	目標 流量	堤体条件			実験 実施	築堤後の 経過年数
		土質	高さ	天端幅 法勾配		
Case1	70m ³ /s	砂礫	3m	3m 1:02	2010年	4月
Case2	35m ³ /s					8月
Case3	70m ³ /s	細粒分	6m		2011年	4月
Case4		砂礫				6月

図-25 実験条件

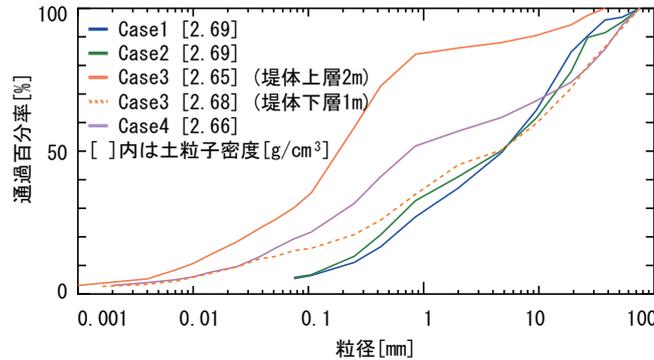


図-26 堤体材料の粒度分布

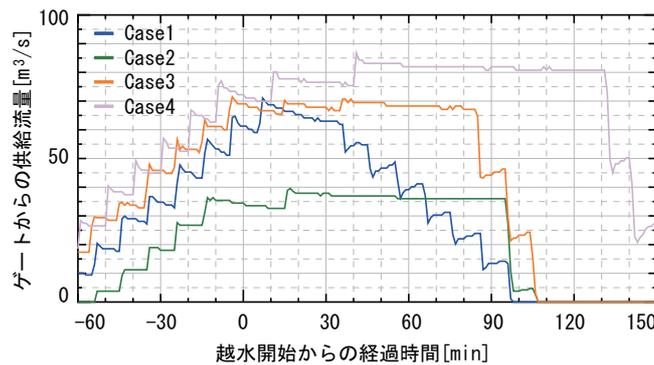


図-27 ゲートからの供給流量

(2) 実験結果

a) 実験状況

図-28・図-29 は上空より撮影した代表的な破堤幅毎の実験状況 (PIV 観測) である。また図-30・図-31 は各 Case の時系列観測結果を示す。上段よりゲート供給流量、破堤部上下流流量と氾濫流量、切欠横断面部の堤内外水位、堤防天端開口幅、堤体崩壊・基盤侵食量、氾濫流量変化量、天端拡幅変化量、堤体崩壊・基盤侵食変化量である。

ここでは図-28・図-29 の実験状況の写真と、図-30・図-31 の上から 4 段目の堤防天端開口幅を用いて実験状況の概況を述べる。この堤防天端開口幅のグラフより千代田実験水路内という、きわめて限られた条件下ではあるが、実験終了までに 5 つの Step を経て進行していることがわかる。以下では Step 毎にその概況を述べる。

[Step1；破堤拡幅開始まで]

越水開始した後に裏法面の侵食、裏法肩の侵食が見られる。天端は氾濫域から河道に向かって徐々に崩壊している様子が見られるが、天端中央における破堤拡幅は起こっていない。また河道から切欠部に向かう流れは見られず、破堤拡幅を伴わない正面越流に近い状態であり、これはどのケースにおいても同様に見られた現象であった。

[Step2；破堤拡幅が徐々に進行]

破堤部周辺から開口部に向かう流れが見られるが、河道全体には影響を与えていない。開口部周辺流れは水面

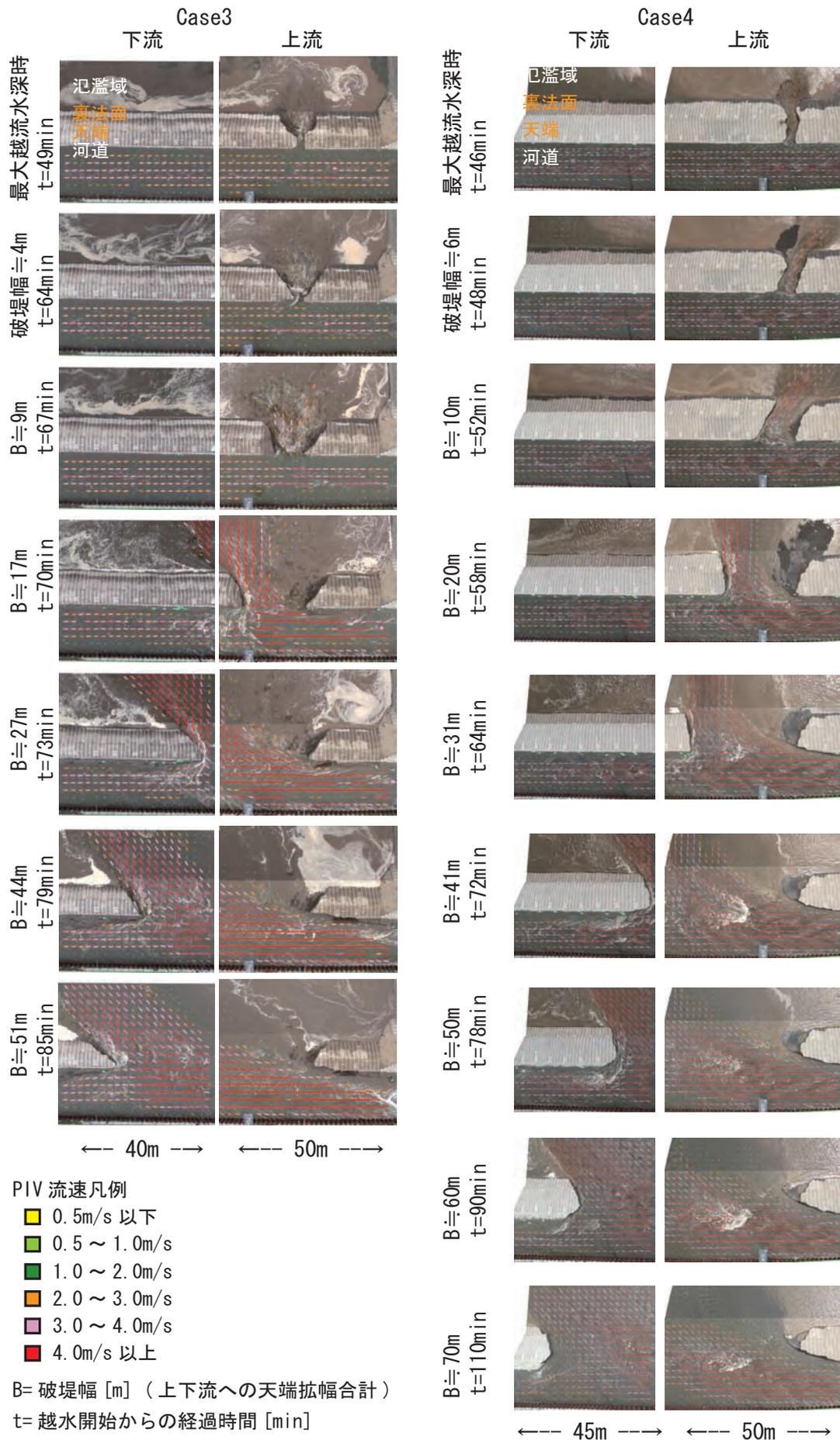


図-29 実験状況 (Case3・4)

横軸は越水開始からの経過時間 [min]

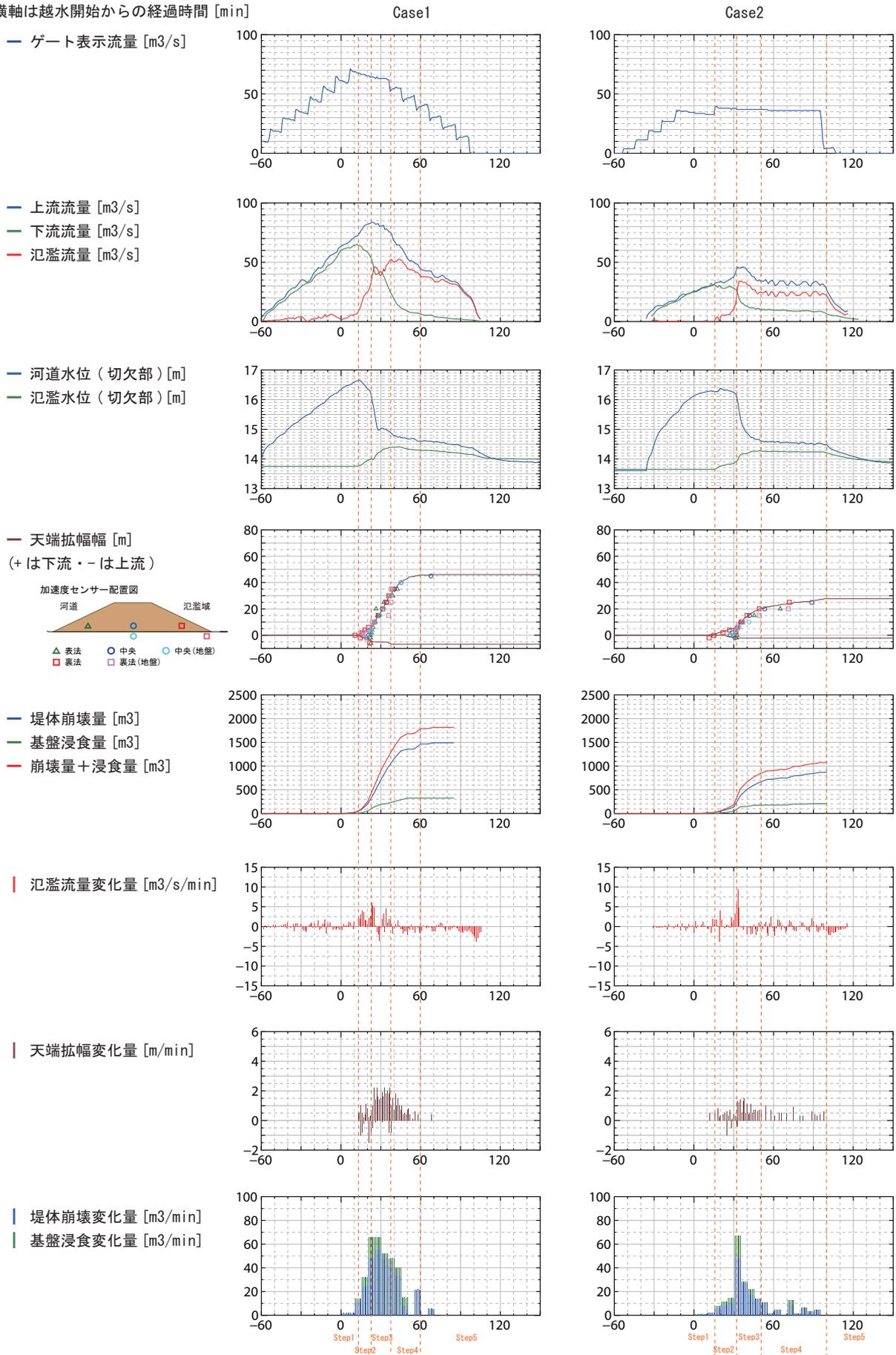


図-30 観測データ時系列 (Case1・2)

横軸は越水開始からの経過時間 [min]

— ゲート表示流量 [m³/s]

— 上流流量 [m³/s]

— 下流流量 [m³/s]

— 氾濫流量 [m³/s]

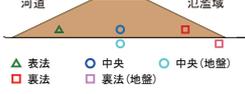
— 河道水位 (切欠部) [m]

— 氾濫水位 (切欠部) [m]

— 天端拡幅幅 [m]

(+ は下流 ・ - は上流)

加速度センサー配置図



— 堤体崩壊量 [m³]

— 基盤浸食量 [m³]

— 崩壊量+浸食量 [m³]

| 氾濫流量変化量 [m³/s/min]

| 天端拡幅変化量 [m/min]

| 堤体崩壊変化量 [m³/min]

| 基盤浸食変化量 [m³/min]

Case3

Case4

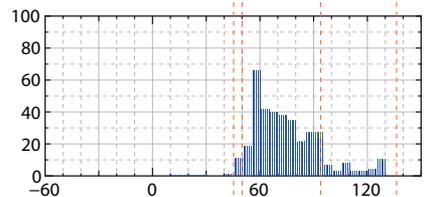
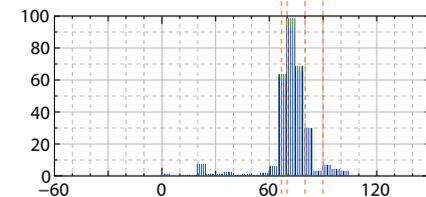
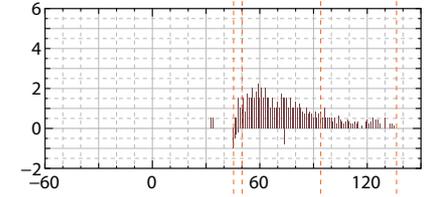
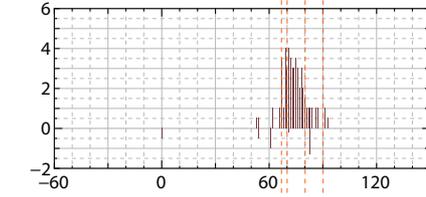
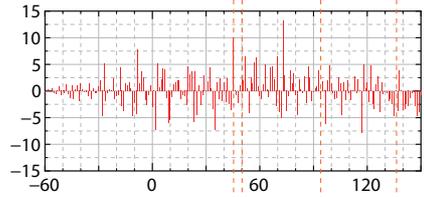
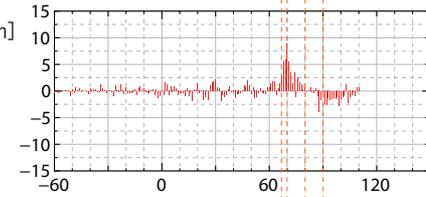
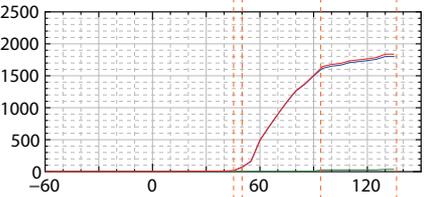
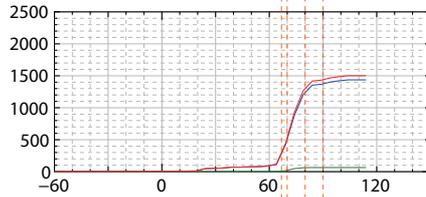
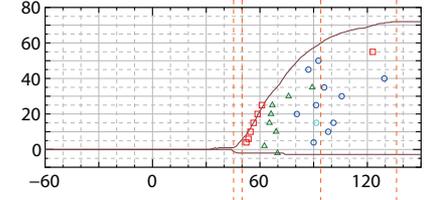
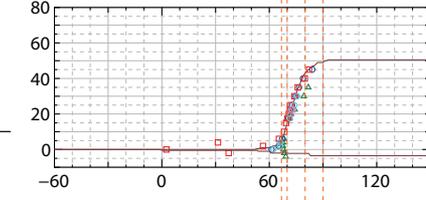
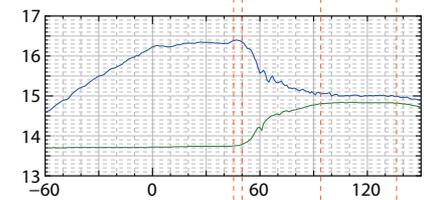
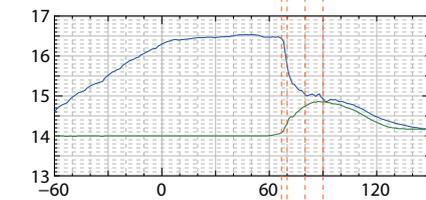
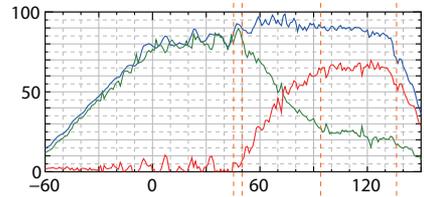
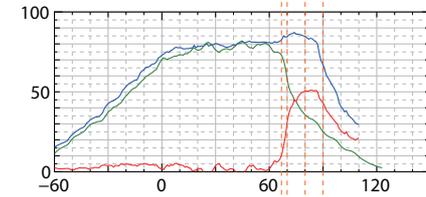
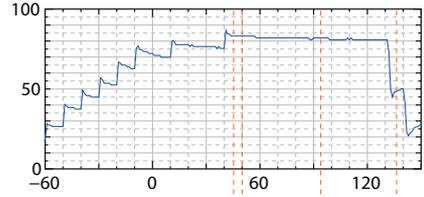
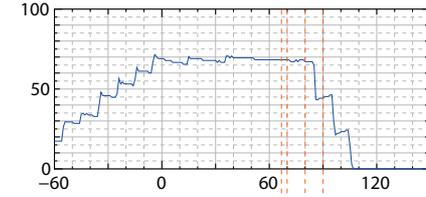


図-31 観測データ時系列 (Case3・4)

勾配の緩い Case2 では開口部の上下流から流れ込んでいるが、それ以外の Case では上流からの流れ込みが大半を占めている。

また Case4 では天端幅が他 Case の倍と広く、河道から氾濫域までの堤体通過距離が長い為、河道からの流れが堤体開口部の下流端にぶつかり、その流れがはね返って上流に向くことで、開口部自体も上流に向いている。

[Step3；急激に破堤拡幅が進行]

Step3 以降、破堤拡幅速度が急激に早くなり、また下流への拡幅がほとんどを占める。流況は河道全体から開口部に向かって流れおり、その流速も 4m/s 以上と非常に激しい様子がわかる。また破堤拡幅が進行しているが、その開口幅全体に均一な流れではなく、開口部の下流側を中心とした主流が見られ、この流れが堤体にぶつかりながら破堤が進行しているようである。

[Step4；破堤拡幅速度の低下]

Step3 と比較すると破堤拡幅速度は遅くなっている。また破堤開口部の下流端は Step3 までは比較的、堤防に対して直角であったが、Step4 では裏法面が先行して削れ、氾濫域側に斜めの形状となって破堤が進行している。

[Step5；破堤拡幅の停止]

実験水路の流量を供給するゲートからの供給量停止に伴い、破堤拡幅は停止する。

b) 水位観測結果

図-32・図-33 に代表的な破堤幅に対応する水路左岸と氾濫域の水位、通水前後の河道平均河床高、天端中央における堤体の縦断崩壊履歴、実験中の最大洗掘深を示す。

最大越流水深 (=水路左岸水位-堤防切欠高) は Case1 で 33cm、Case2 で 28cm、Case3 で 23cm、Case4 で 15cm であった。

破堤幅 10 から 20m 程度になると Case4 を除いて切欠部を中心として河道全体の水位低下が見られ、流れが一気に破堤開口部に向かっていることが考えられる。一方、Case4 はこの時点ではほとんど水位低下をしておらず、堤体崩壊過程が他のケースと異なっていたと考えられる。

c) 流量観測結果

図-30・図-31 に破堤部上下流の流量観測結果と氾濫流量を示す。観測流量については通水前後において大きく河床低下が見られたため、稲垣らの手法²³⁾により通水中の河床低下も考慮し流量を算出した。また氾濫流量は破堤部上下流の流量差と、流量観測区間の水位結果を用いた貯留変化量を考慮し氾濫流量 (=上流流量-下流流量+貯留変化量) を算出した。

越水初期段階では越流量はほとんど増えていないが、破堤拡幅が始まると氾濫流量の増加が始まる。Case1 と Case3 についてはゲート閉操作の開始に伴い氾濫流量の低下が始まっている。Case2 と Case4 については破堤拡幅が進行しているにもかかわらず氾濫流量は一定で推移している。これは破堤開口部の拡幅に追従する形で氾濫する主流幅はほぼ一定であるためと考えられる。

d) 破堤進行過程 (堤体侵食)

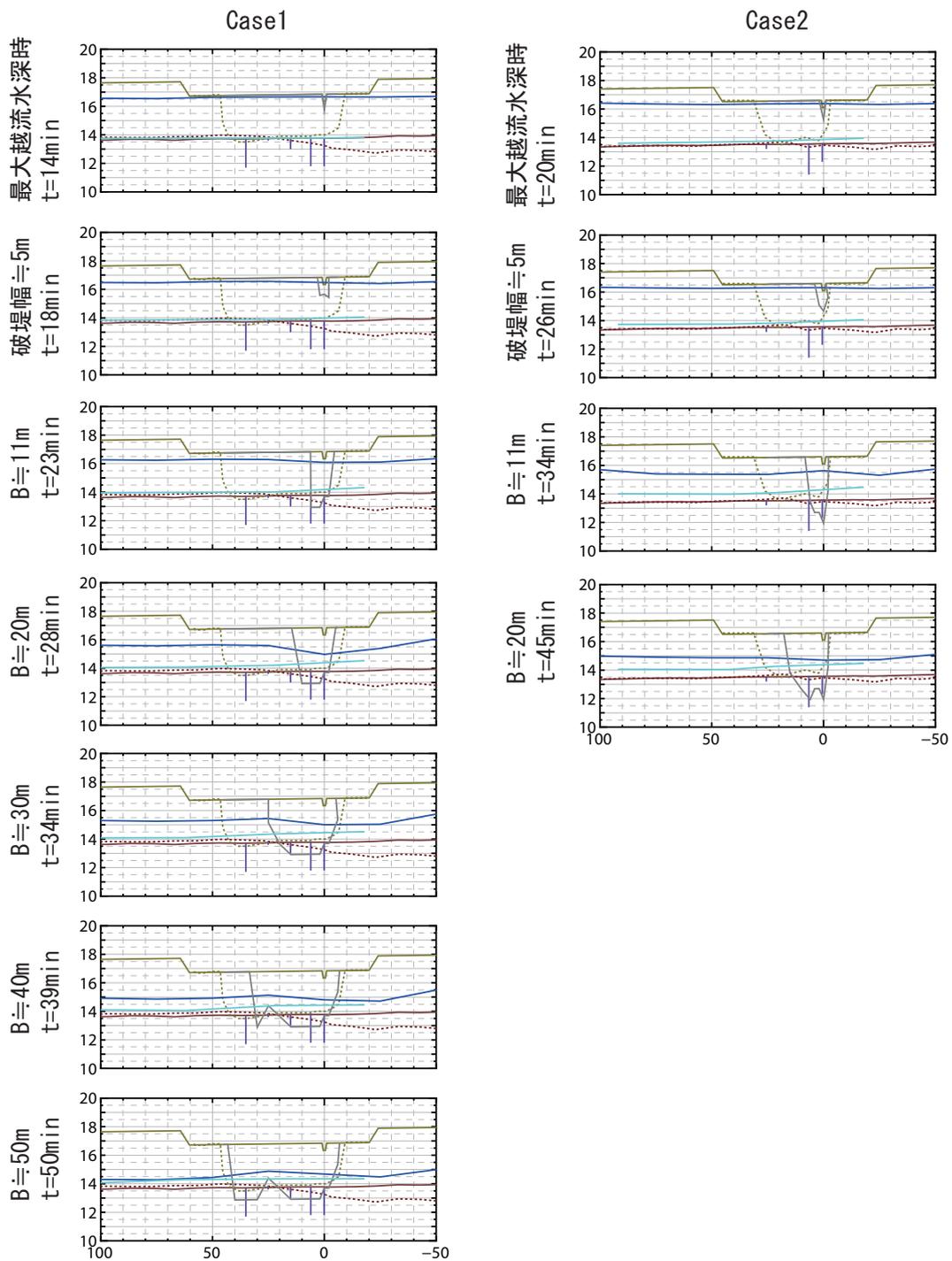
図-34 に加速度センサーの記録から推定した切欠部断面における破堤侵食過程を示す。どのケースにおいても越水開始後、裏法面の侵食、天端の裏法肩から表法肩へ侵食していく様子がわかる。そして表法肩まで侵食が進行した後、Step2 の破堤拡幅が始まる。この現象は予備実験 1、予備実験 2 と同様の結果であり、越水開始から破堤拡幅開始までは同様の現象として扱うことが可能であると言えそうである。

e) 破堤進行過程 (破堤拡幅)

図-30・図-31 に画像から読み取った堤防天端中央の破堤拡幅進行過程を示す。また堤体下層 (河床から上方へ 0.6m)、及び地盤内 (河床から深さ 0.15m) に設置した加速度センサーの流出結果を併記してある。これより不可視部分である崩壊過程を推定することが可能となる。

まず堤防天端中央による破堤拡幅進行過程について、越水開始後、裏法面や天端の侵食が先行し、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。

堤体内部の崩壊に着目すると、Case1・2・3 は各断面について概ね同時に崩壊しているようであるが、Case4 のみ傾向が異なっている。つまり堤体上層が先行して崩壊し、その 30 分程度後に堤体下層が遅れて崩壊しているようである。これは単に天端拡幅の見ただけでなく、内部崩壊量まで考慮しないと破堤拡幅速度の推定が困難であることを示唆している。



横軸；縦断距離 [m] (切欠部を 0 とし下流へプラス)
縦軸；EL [m]

- 堤体天端中央形状 (実験前)
- - 堤体天端中央形状 (実験後)
- 堤体天端中央最大浸食深 (色砂)
- - 堤体天端中央形状 (表示時刻時)

- 河道中央河床高 (実験前)
- - 河道中央河床高 (実験後)

- 河道水位 (表示時刻時)
- 氾濫水位 (表示時刻時)

図-32 通水前後の縦断形状と水位・破堤形状時系列 (本実験 Case1・2)

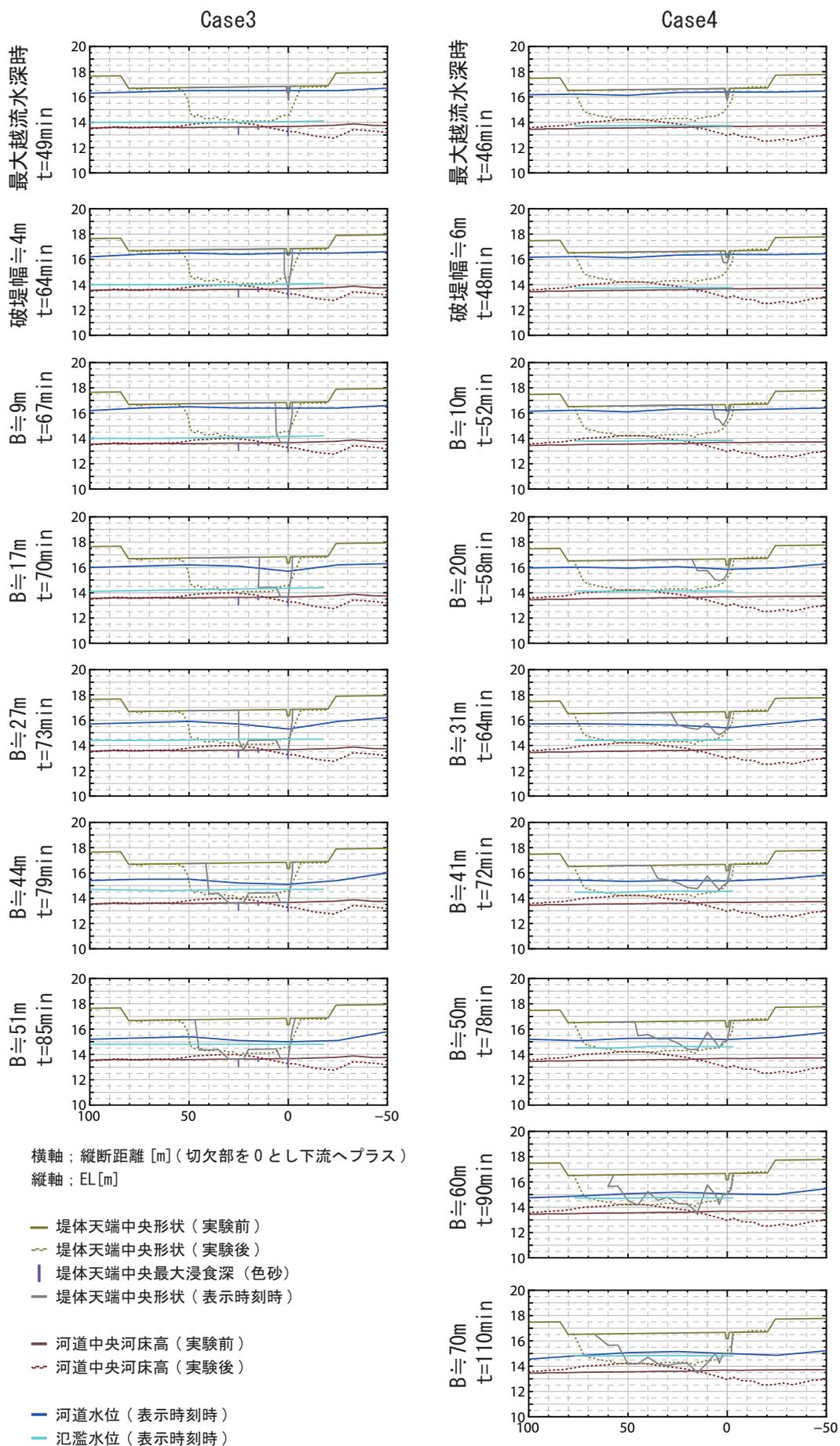
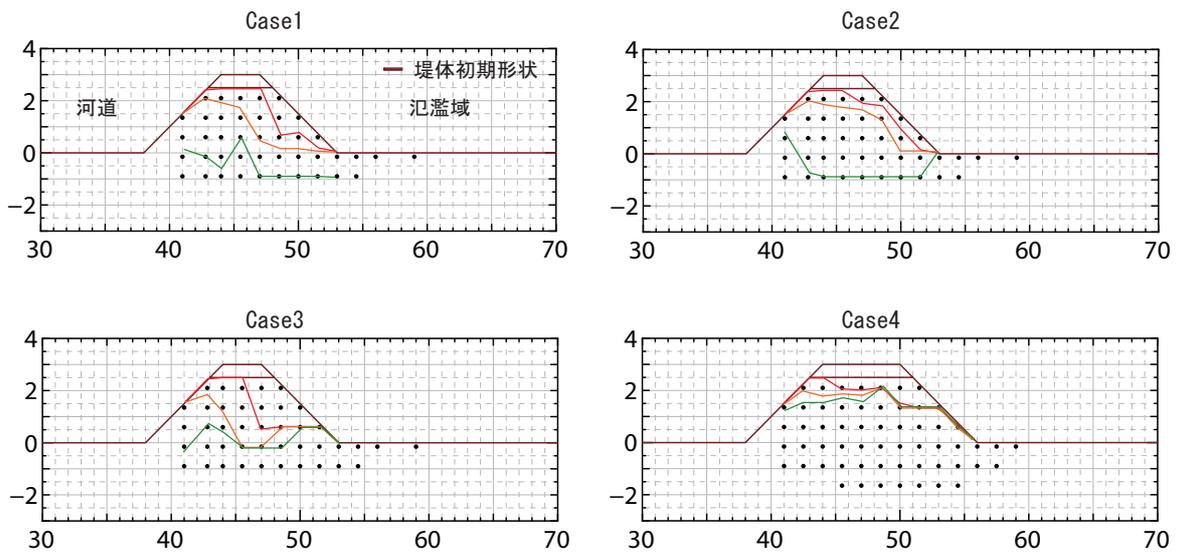


図-33 通水前後の縦断形状と水位・破堤形状時系列 (本実験 Case3・4)



横軸；横断距離 [m]

縦軸；EL [m] (河床高を 0m)

	Case1	Case2	Case3	Case4
— Step1 経過途中	t= 8min	t=11min	t=46min	t=47min
— Step1 から Step2 へ	t=14min	t=17min	t=65min	t=55min
— Step2 から Step3 へ	t=23 min	t=32min	t=70min	t=60min

図-34 加速度センサー記録を用いた切欠断面部の堤体侵食過程の推定

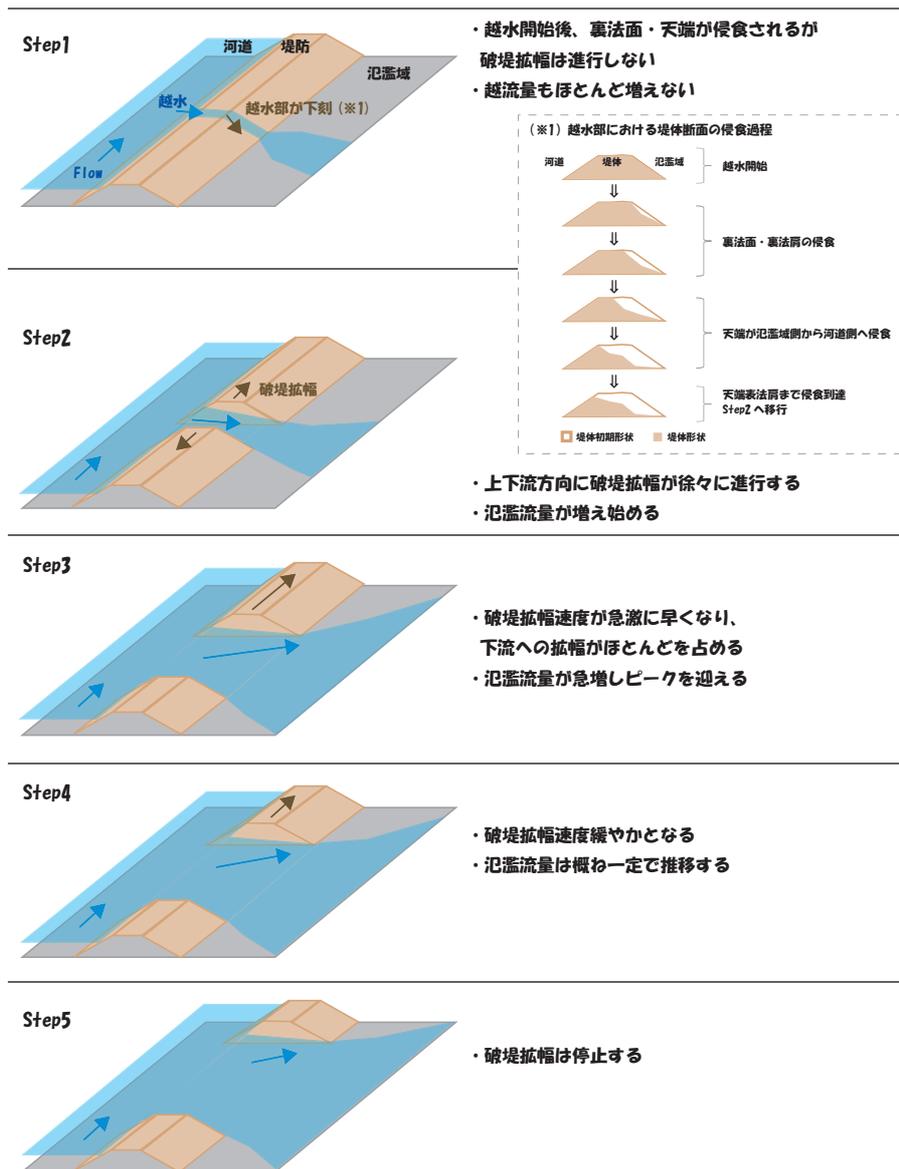


図-35 破堤進行過程概略図

9. 破堤拡幅機構

第I部の既往研究レビューで述べたように、越水破堤に関する研究は様々な観点・手法で進められているが、その知見が実現象のどの部分を表現し、どこまで再現性があるのかは明らかになっていない。また実際の破堤災害を想定した際、特に重要となるのは破堤拡幅速度がどの程度かを見積もることである。

千代田実験水路内という限られた条件下ではあるが、破堤実験の結果より、図-35に示すプロセスで越水破堤現象が進むことが明らかとなった。

以下では破堤拡幅が始まるまでと、破堤拡幅の開始以降に分類して検討を行った。

(1) 破堤拡幅開始以前

今回の実験結果から、越水初期段階は破堤拡幅の伴わない正面越流破堤に近い現象であった。そこで建設省土木研究所(現(独)土木研究所つくば中央研究所)による正面越流破堤実験結果⁶⁾と、本実験結果を比較する。

報告書⁶⁾によると堤体の崩壊を表す指標として単位幅侵食量を、外力の指標として累積越流量を用いた評価を行っており、今回の実験でも破堤初期段階において同様の評価を行う。

単位幅侵食量は図-34に示したように、加速度センサーの結果から推定した切欠部断面での堤体崩壊量を用い

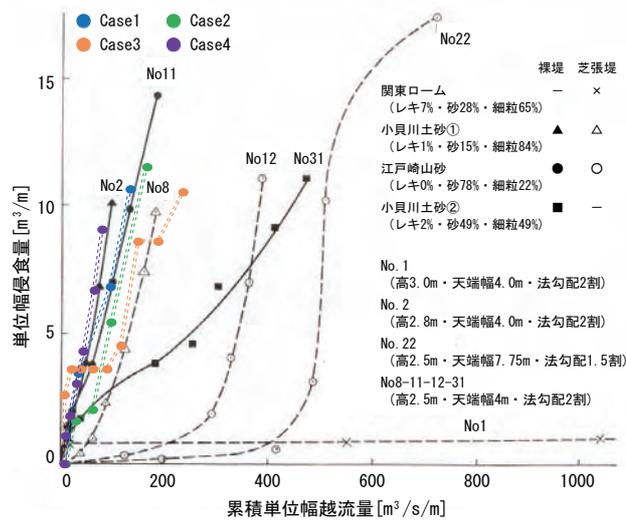


図-36 単位幅侵食量と累積単位幅越流量⁶⁾

た．越流量は図-30・図-31 から判読が困難であるが，破堤拡幅を伴わない正面越流に近い現象であったため，ここでは堤体からの越流水深を用いて本間の越流公式²⁴⁾を用いて算出した．

図-36 は既往の結果⁶⁾に，今回の実験結果を重ね合わせたものである．土質相違や堤体形状相違など条件が異なっているが，今回の実験結果では4ケースともほぼ同様の傾向を示しており，裸堤であるNo.2やNo.11と概ね一致している．なおNo.31も裸堤であるが浸食速度が遅いようである．これは報告書⁶⁾によると，かなりよく締固まった粘性土に近い土であったようであり，他の多くの実験もNo.11に近い傾向を見せていたようである．これより破堤初期段階については，既往の正面越流実験による知見を用いることが出来る可能性がある．

(2) 破堤拡幅開始以降

実際に破堤災害が起こった場合，破堤拡幅速度・拡幅継続時間・最終破堤幅を把握することは，住民避難や災害復旧等の面からも非常に重要である．

現在，ハザードマップ作成には氾濫シミュレーションマニュアル(案)など²⁵⁾²⁶⁾が用いられている．これによると最終破堤幅は合流点付近の場合は(2)式，合流点付近以外の場合は(3)式，急流河川の場合は(4)式で算定されるように河幅のみに依存している．

$$B = 2.0 * (\log_{10} X)^{3.8} + 77 \quad (2)$$

$$B = 1.6 * (\log_{10} X)^{3.8} + 62 \quad (3)$$

$$B = X \quad (4)$$

ここで、 B :破堤幅(天端中央における破堤幅)[m]、 X :川幅(堤防の川表法肩間の距離)[m]である．また破堤後，瞬時に最終破堤幅(上式の B)の1/2が破堤し，その後1時間かけて最終破堤幅まで拡大するものとし，また破堤幅の拡大速度は一定と仮定している．これは実災害等からの経験式であり，水理学的な意味は持ち合わせていない．しかし実際には洪水規模・継続時間や破堤開口部周りの水理量に左右されると考えるのが自然であり，破堤拡幅現象と何らかの水理量とを関連時付けることは非常に重要である．

以下では実験結果を用いて破堤開口部周辺の無次元掃流力を用いて破堤拡幅速度の検討を行った．

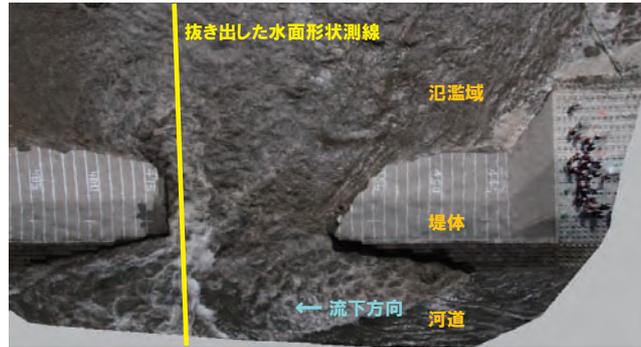


図-37 水理量の設定箇所 (図は Case1 の $t=25\text{min}$)

a) 堤体崩壊量の算出

図-30・図-31 より例えば Case4 では堤防天端は見た目上、破堤拡幅が進行していても、不可視部分は遅れて崩壊していることがわかった。これより単純に堤防天端の拡幅を推定するだけでは不十分であり、ここでは破堤開口部を通過する氾濫流量により、どれだけの土砂が堤体から流出したか、堤体崩壊量を用いて評価を行うこととする。

堤体崩壊量は堤体内に設置した加速度センサーの結果を用いて、堤体・基礎地盤の崩壊量の算出を行い、その結果を図-30・図-31 に示す。これより単位時間あたりの崩壊量 dV/dt を算出した。

b) 堤体周辺水理量の算出

破堤拡幅進行は図-28・図-29 に示したように、開口部下流端に流れがぶつかることで進行しているようである。よって可能な限り破堤口近傍の水理量を用いることが望ましい。

今回の実験では PIV による流速、3D 画像解析による水面形状を得ている。そこで図-37 に示すように、破堤開口部近郊の水理量を用いる。

PIV による流速と 3D 解析による水面形状のデータ取得時間が一致するのは各 Case で数カットであるが、その結果を図-38 に示す。

破堤拡幅進行は図-28・図-29 に示したように、特に裏法を先行して侵食していることから、裏法面での水理量を用いて堤体開口部に作用する無次元掃流量力 τ_* を (5) 式より算出した。

$$\tau_* = \frac{\rho n^2 u^2}{s d_{50} R^{1/3}} \quad (5)$$

ここで ρ :水密度, n :粗度係数 (ここでは実験水路の値 0.023), u :破堤開口部流速, s :砂粒の水中比重, d_{50} :粒径, R :径深 (ここでは破堤開口部水深) を示す。なお Case3 については堤体の上層と下層で土質が異なるが、ここでは上層の粒径等を採用している。

c) 堤体浸食量の推定

単位時間あたりの崩壊量 dV/dt と堤体に作用する無次元掃流量力 τ_* の関係を既往の掃流砂量式や泉らの手法²⁷⁾を参考に (6) 式のように整理を行った。

$$q_* = \frac{dV/dt(1-\lambda)}{\sqrt{sgd_{50}^3} \cdot B_m} = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (6)$$

ここで λ :空隙率, B_m :堤体下幅, τ_{*c} :無次元限界掃流量力, $\alpha_* \cdot \beta_*$:係数を示す。なお B_m について、本来は流下方向に対して横断方向の長さを取るべきであるが、図-28・図-29 や後述する縮尺模型実験結果からもわかるように、破堤拡幅が進行しても主流となる有効幅は概ね一定となり、またそのオーダーは数 m から十数 m 程度であることから、ここでは堤体形状相違も考慮し、便宜的に堤体の下幅を採用している。

(6) 式を用いて実験結果をプロットしたものが図-39 である。これより基本の Case1 に対し、河道内流況を変えた Case2, 堤体土質を変えた Case3, 堤体形状を変えた Case4 のどのケースにおいても概ね同様の結果を示している。

あくまで千代田実験水路という限られた条件下での4ケースのみの結果ではあるが、破堤開口部周辺の水理量を用いることで堤体崩壊量の推定が可能となり、これより破堤拡幅速度を推定するモデル化が可能であると言える。

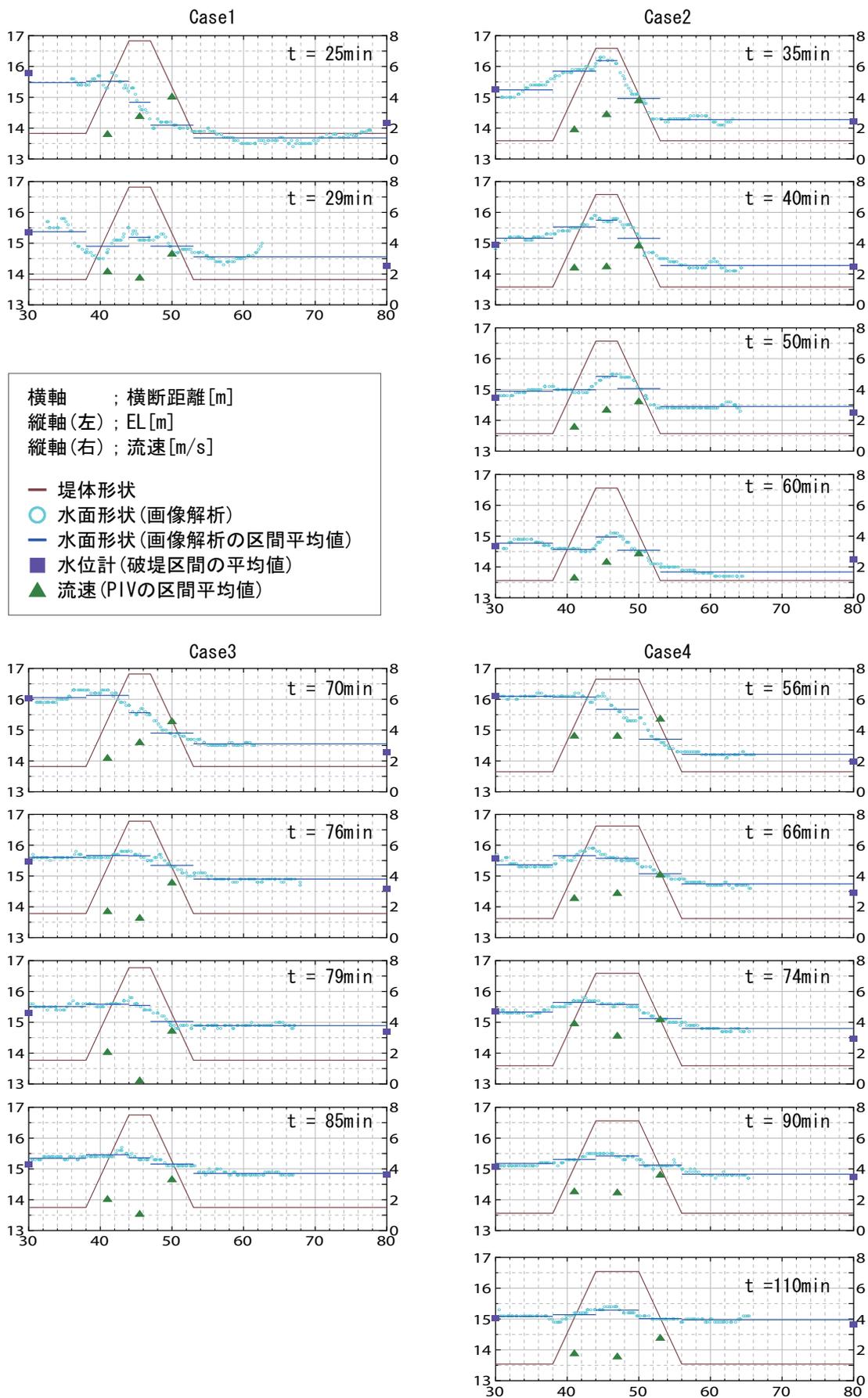


図-38 開口部下流端近傍の水面形状と流速

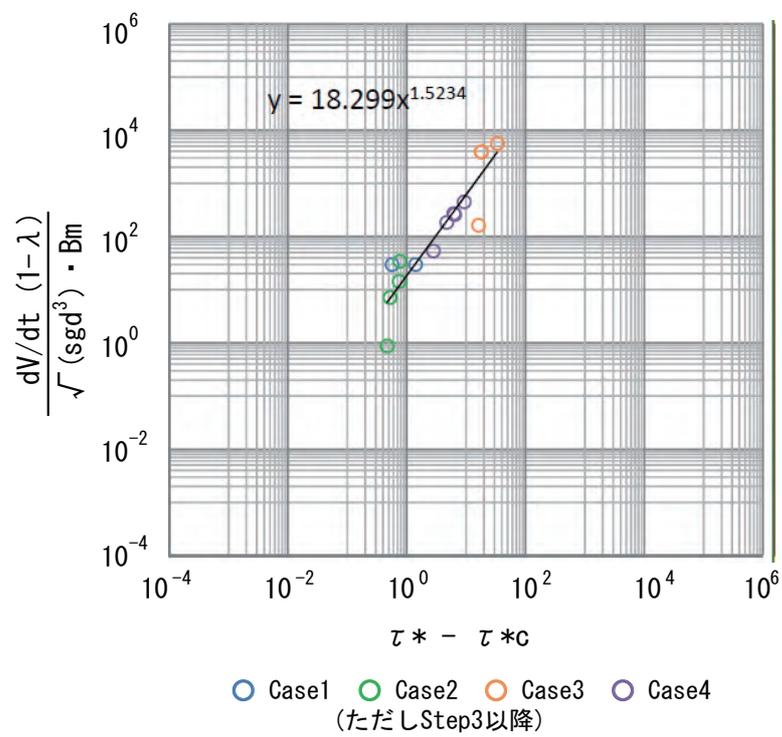


図-39 堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力

第 III 部

現地実験以外の検討

本節では現地破堤実験と並行して実施した縮尺模型の実験結果について報告する。また現地実験結果と模型実験結果との比較を行い再現性の検討を行う。

10. 縮尺模型実験

本節では、つくば市の国土交通省 国土技術政策総合研究所河川模型実験施設に製作・設置した縮尺模型実験を用いて、破堤状況の再現性を検証した。

(1) 再現性の検証実験

a) 模型水路の概要

模型規模は、現地千代田実験水路の縮尺 1/20、再現範囲は転倒ゲートから実験水路および新水路合流堤下流まで合計 84m (現地 1680m) 区間とした。(図 40, 写真 1 参照)

移動床範囲は、図 40 のハッチングした範囲とし、深さ約 190mm (現地約 4m) まで、平均粒径 0.9mm (現地粒径 $d_{50}=11\text{mm}$, 模型 0.12mm 以下のシルト分はカット) の粒径加積曲線 (図 42 参照) に合わせた混合砂を敷設した。

破壊する現地の砂礫堤防は、シルト分が 15%程度含まれている若干粘着性がある土質であるため、坂野が破堤模型実験で採用した“砂にベントナイトを配合する手法”を用いた²⁸⁾。

鋼矢板は木製で凹凸状況も再現し、実験水路内の粗度係数が現地のそれと合致していることを検証した。

また、相似則はフルードの相似則を適用した。

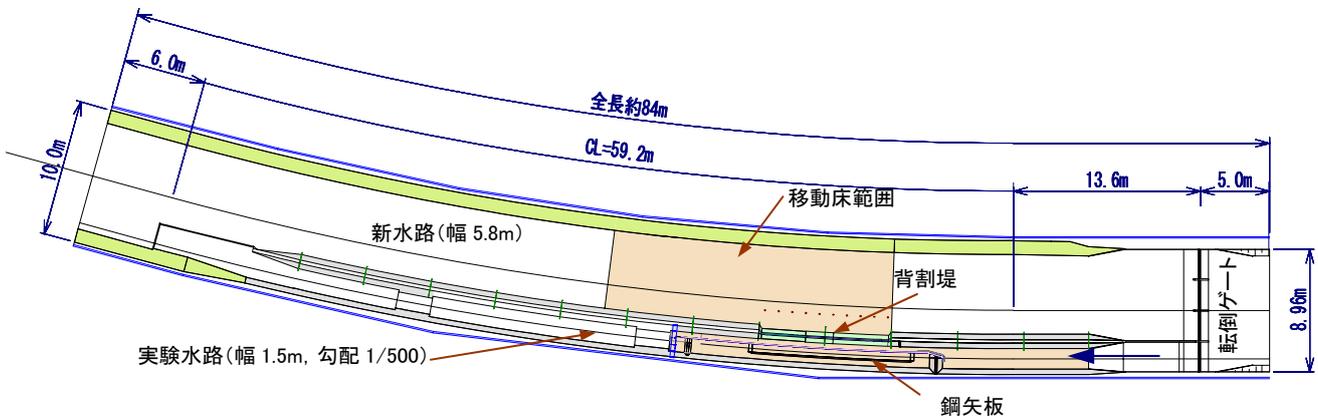


図 40 縮尺 1/20 の千代田実験水路全体模型, 模型値

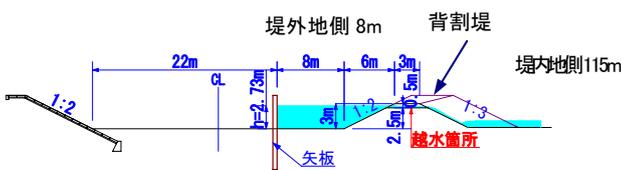
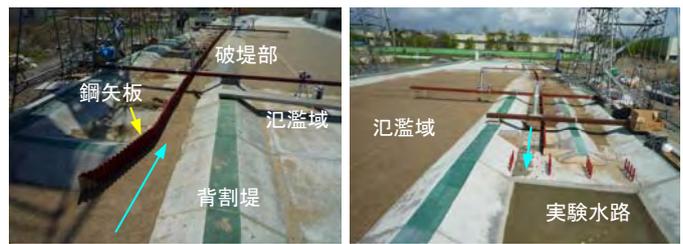


図 41 実験水路断面形状, 底幅 8m の場合
現地値 (m)



上流から見た様子

下流から見た様子

写真 1 千代田実験水路模型状況, 縮尺 1/20

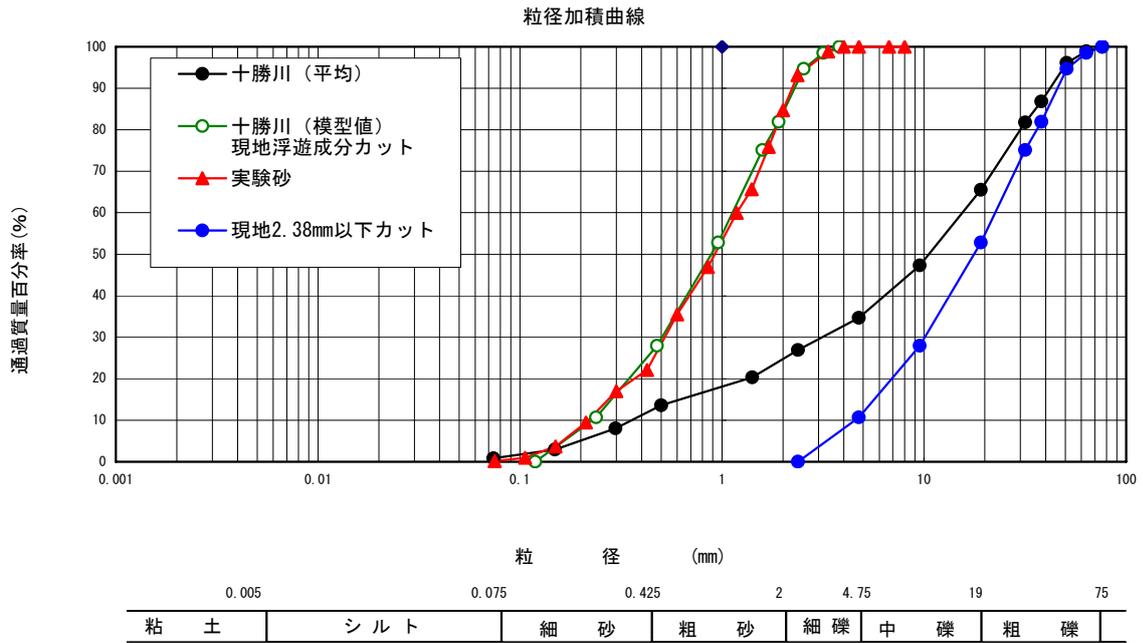


図 42 河床材の粒径加積曲線図
 (現地粒径で 2.38mm (模型で 0.119mm) 以下のシルト分はカット)

b) 模型実験の条件（実験ケース）

模型実験の条件は、基本的に現地実験条件を踏襲し、現地実験で実施不可能な条件として、河床勾配を基本の 1/500 以外に、1/250 を、また実験水路幅は基本の 8m 以外に、16m、24m を組み合わせて 4 ケース実施した。

全実験 11 ケースを表 4 に示す。

表 4 模型実験ケース一覧

実施 Case	現地対応 CASE	備考	実験実施日	堤防・水路形状				
				天端幅 (m)	裏法勾配	水路幅 (m)	河床勾配	流量 (m ³ /s)
1	C1-1	現地ケース1再現	H22.1.28	3	1:2	8	1/500	70
2	C1-2	基本ケース	H22.2.3	3	1:2	8	1/500	70
3	C1-3		H22.2.17	3	1:2	8	1/500	70
4	C1-4	基本（ベントナイトなし）	H24.2.13	3	1:2	8	1/500	70
5	C2-1	現地ケース2再現	H22.2.12	3	1:2	8	1/500	35
6	C2-2	流量35m ³ /s	H22.5.21	3	1:2	8	1/500	35
7	C4-1	現地ケース4再現	H22.7.1	6	1:2	8	1/500	70
8	C4-2	天端6m	H22.7.14	6	1:2	8	1/500	70
9	C5-1	水路幅16m, 勾配1/500	H22.6.18	3	1:2	16	1/500	145
10	C5-2	水路幅24m, 勾配1/500	H22.6.4	3	1:2	24	1/500	224
11	C6-1	水路勾配1/250	H23.2.18	3	1:2	8	1/250	120

: 現地実験を再現する模型実験
 : 現地実験以外の模型実験

着目点を赤字で示す。天端幅、裏法勾配、水路幅、河床勾配、流量を変化させて実施した。C1-4 は堤体材料として、ベントナイトを混入させなかったケースを追加検討している。

また、現地実験と模型実験の実験ケース等を整理した表を下表に示す。

現地実験ケース3は、堤体材料をシルト質にした場合の実験であるため、模型の再現は困難であると判断して、模型実験は実施していない。

また模型実験は、現地堤防材質の粘性状況を再現するために、既往研究²³⁾を参考に、水路内縦断破堤実験の破堤速度を再現すべく、予備実験を実施して、ベントナイトを10%混入させていたが、後述するように破堤口幅の拡大速度が現地試験の拡大速度に比べて約半分と遅かったために、ベントナイトを混入させない実験を実施した。

表 5 現地実験と模型実験の実験ケース表

現地実験	日付	堤防形状	模型実験	日付	日付(西暦)
現地ケース1	2010.4.27	高さ3.0m、天端幅3.0m 流量70.0m ³ /s (ベントナイト混入なし)	模型C1-1	H22.1.28	2010.1.28
			模型C1-2	H22.2.3	2010.2.3
			模型C1-3	H22.2.17	2010.2.17
			模型C1-4	H24.2.13	2012.2.13
現地ケース2	2010.8.4	高さ3.0m、天端幅3.0m 流量35.0m ³ /s	模型G2-1	H22.2.12	2010.2.12
			模型G2-2	H22.5.21	2010.5.21
現地ケース3	2011.4.27	高さ3.0m、天端幅3.0m 流量70.0m ³ /s、シルト質	模型実験なし		
現地ケース4	2011.6.30	高さ3.0m、天端幅6.0m 流量70m ³ /s、(氾濫域湛水あり)	模型C4-1	H22.7.1	2010.7.1
			模型C4-2	H22.7.14	2010.7.14

c) 計測方法

計測の基本的な方法を表 6 に示す.

表 6 計測方法と計測機器設置数, 基本数

水理量	計測・算出方法	設置数
破堤口幅	上からの写真から解析 実験水路側の破堤口幅とした	5~6 枚程度解析
氾濫量	氾濫量=上流給水量-下流流量 但し, 上流給水量は上流湛水部の水位低下量も考慮する.	1 分ピッチで整理
水位	サーボ式水位計	4 基, 1 分ピッチで整理
	ピエゾメーター (鋼矢板沿い)	6 点, 破堤開始, 中間, 最終
流速	電磁流速計 (実験水路上流部)	1 基, 1 分ピッチで整理
	PIV 解析 (実験水路~氾濫域)	上からビデオ撮影, 破堤開始から 4 解析
河床高	水平糸からの下がり量で計測 局所的洗堀はレベル測量	初期河床からの変動量で表現
映像	デジタルビデオカメラ	基本 5 台
	デジタルカメラ	基本 2 台

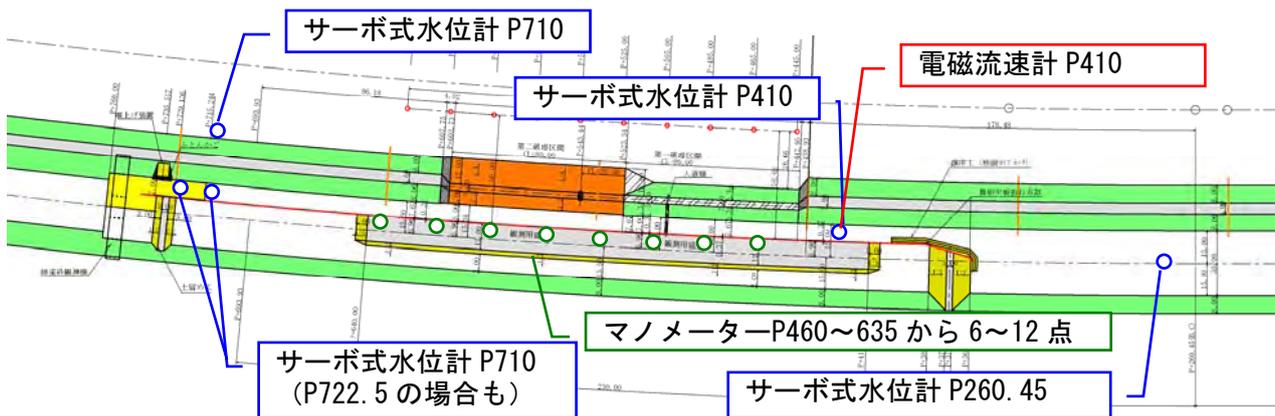


図 43 越水破堤模型実験時の各計測機器の設置位置 (基本)
サーボ式水位計 4 基, 電磁流速計 1 基, ピエゾメーター 6~12 点

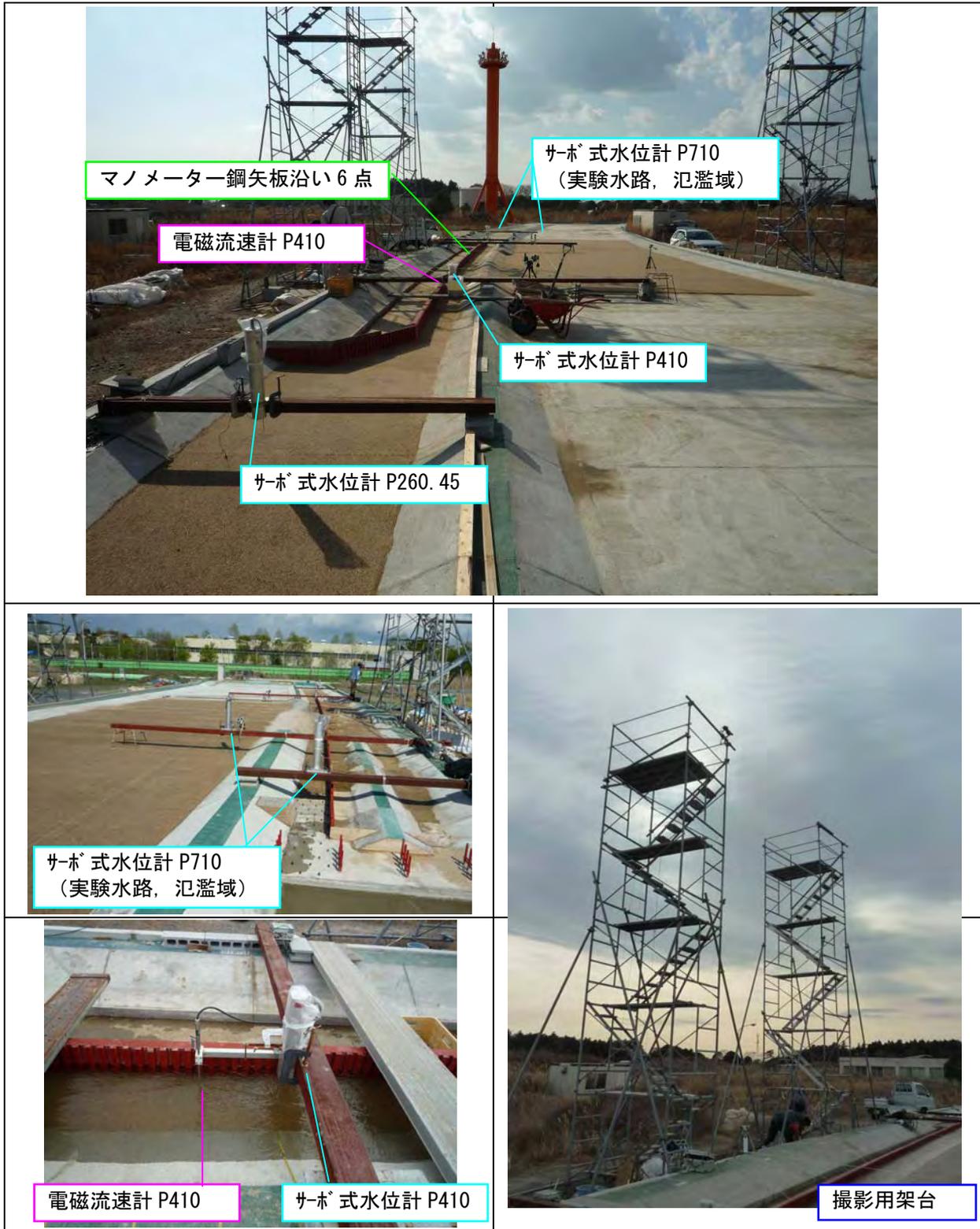


写真 2 計測機器設置風景

d) step 毎の現地と模型の破堤状況

越水開始から破堤終了まで、4step に分割して、模型の再現性について整理すると表 7 となる。

切欠部から越流して、越流開始から堤防破壊が進行する状況は、現地実験においても、模型実験においても写真 3 に示すような共通な状況となるのを確認した。

表 7 step 毎の現地と模型の破堤状況

Step	模型での破堤現象	模型の再現性
1	裏法面、裏法肩が侵食されて、正面越流に近い状況	裏法面、裏法肩の階段状の侵食形状は近似するが、侵食速度は合致しない。
2	河川の流れが、切欠部下流側岸に衝突して、切欠幅の若干の拡幅と天端の下方への侵食が生じている状況	破堤口がハの字に拡大する状況、下方侵食・側岸侵食形状はよく近似する。
3	下方への侵食が基盤まで達し、下流への側岸侵食進み、急激に氾濫量が大きくなる状況	側岸侵食形状・侵食速度・氾濫量もほぼ再現し、相似性は高い。
4	河川水位の低下と流量の減少に伴い、破堤部下流側の侵食速度が低下する。現地 2 では下流への側岸侵食は継続しているが、上流側でも堆積が生じ、有効な越水幅および氾濫量が一定になる。	破堤した土砂の氾濫量への堆積状況の再現性は高い。 特に模型は破壊堤防幅を長く設定できるため、破堤部の氾濫有効幅と氾濫量が一定になるまで実験が可能である。

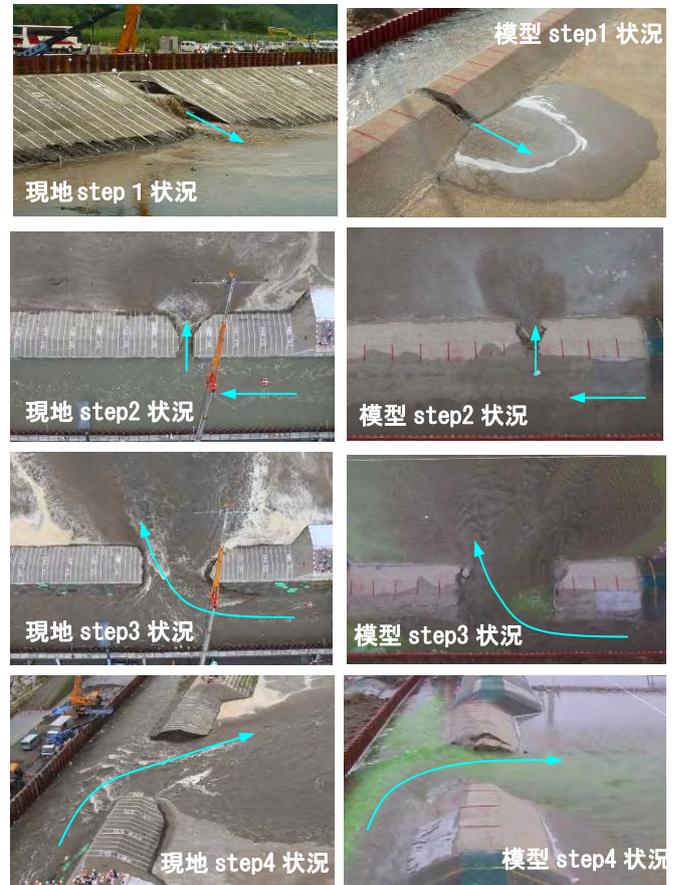


写真 3 現地と模型の破堤状況、
現地ケース 2 (H22. 8. 4)

表 8 に現地平面破堤状況 C1 と模型平面破堤状況 C1-1～C1-4 を併記する。

写真の撮影範囲、破堤幅が現地と模型で合致していないが、破堤初期の上流側方向への越流水の流出や破堤進行後の下流方向への越流水の状況は再現されている。

但し、堤防破堤部先端部の形状は、模型実験ではバラツキが確認できた。

表 8(1) 破堤状況（上空からの平面流況）ケース1，その1

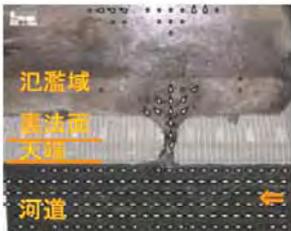
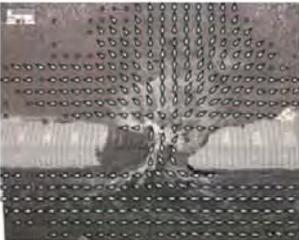
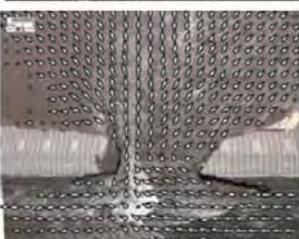
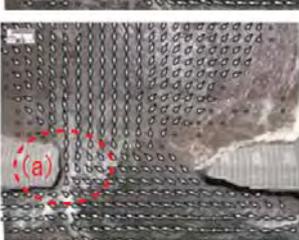
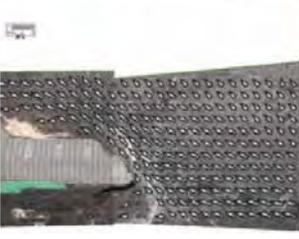
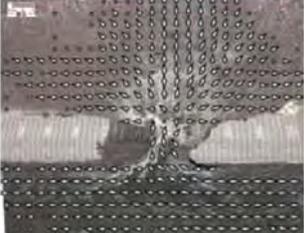
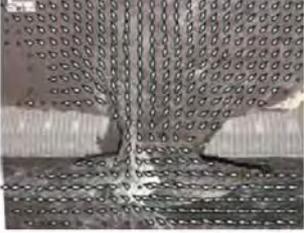
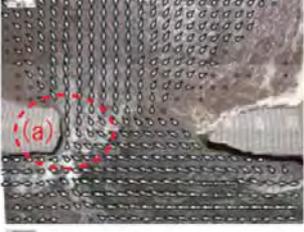
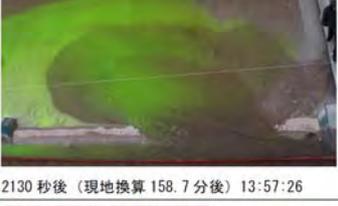
現地 C1	模型 C1-1	模型 C1-2
<p>破堤幅≒0m</p> 	<p>上流流量71</p>  <p>900 秒後（現地換算 67.1 分後）13:08:00</p>	<p>上流流量75</p>  <p>150 秒後（現地換算 11.2 分後）13:42:32</p>
<p>破堤幅≒5m</p> 	<p>上流流量76 氾濫量8</p>  <p>1050 秒後（現地換算 78.3 分後）13:10:30</p>	<p>破堤幅7m 上流流量90 氾濫量22</p>  <p>300 秒後（現地換算 22.4 分後）13:45:02</p>
<p>破堤幅≒10m</p> 	<p>破堤幅15m 上流流量82 氾濫量34</p>  <p>1170 秒後（現地換算 87.2 分後）13:12:30</p>	<p>破堤幅17m 上流流量83 氾濫量35</p>  <p>450 秒後（現地換算 33.6 分後）13:47:32</p>
<p>破堤幅≒20m</p> 	<p>破堤幅21m 上流流量77 氾濫量38</p>  <p>1290 秒後（現地換算 96.1 分後）13:14:30</p>	<p>破堤幅29m 上流流量84 氾濫量49</p>  <p>600 秒後（現地換算 44.7 分後）13:50:02</p>
<p>破堤幅≒30m</p> 	<p>破堤幅32m 上流流量80 氾濫量53</p>  <p>1410 秒後（現地換算 105.1 分後）13:16:30</p>	<p>破堤幅39m 上流流量82 氾濫量62</p>  <p>750 秒後（現地換算 55.9 分後）13:52:32</p>
<p>破堤幅≒40m</p> 	<p>破堤幅40m 上流流量76 氾濫量57</p>  <p>1530 秒後（現地換算 114.0 分後）13:18:30</p>	<p>破堤幅45m 上流流量20</p>  <p>840 秒後（現地換算 62.6 分後）13:54:02</p>

表 8 (2) 破堤状況 (上空からの平面流況) ケース 1, その 2

現地 C1	模型 C1-3	模型 C1-4
<p>破堤幅 ≒ 0m</p> 	<p>破堤幅7m 上流流量72</p>  <p>780 秒後 (現地換算 58.1 分後) 13:44:26</p>	<p>破堤幅 10m</p>  <p>170 秒後 (現地換算 12.7 分後) 14:41:00</p>
<p>破堤幅 ≒ 5m</p> 	<p>破堤幅10m 上流流量74 氾濫量6</p>  <p>840 秒後 (現地換算 62.6 分後) 13:46:56</p>	<p>破堤幅 25m</p>  <p>230 秒後 (現地換算 17.1 分後) 14:42:00</p>
<p>破堤幅 ≒ 10m</p> 	<p>破堤幅19m 上流流量76 氾濫量14</p>  <p>960 秒後 (現地換算 71.6 分後) 13:47:56</p>	<p>破堤幅 36m</p>  <p>290 秒後 (現地換算 21.6 分後) 14:43:00</p>
<p>破堤幅 ≒ 20m</p> 	<p>破堤幅32m 上流流量76 氾濫量32</p>  <p>1410 秒後 (現地換算 105.1 分後) 13:49:56</p>	<p>破堤幅 53m</p>  <p>410 秒後 (現地換算 30.6 分後) 14:45:00</p>
<p>破堤幅 ≒ 30m</p> 	<p>破堤幅63m 上流流量75 氾濫量54</p>  <p>2130 秒後 (現地換算 158.7 分後) 13:57:26</p>	<p>破堤幅 65m</p>  <p>560 秒後 (現地換算 41.7 分後) 14:47:30</p>
<p>破堤幅 ≒ 40m</p> 	<p>破堤幅63m 上流流量74 氾濫量54</p>  <p>2220 秒後 (現地換算 165.7 分後) 14:09:26</p>	<p>破堤幅 81m</p>  <p>1370 秒後 (現地換算 102.1 分後) 15:01:00</p>

e) 水理量の再現性

1) 破堤拡幅の再現性

図 44 に、越水開始からの時間（分）と破堤口全幅の関係を示す。越水開始からの時間は、Fr 相似則で現地値に換算している。

破堤口が側方に拡幅し始める時間は、各ケース最大 120 分以上のバラツキがある。

これは、越流水深や締め固め度、給水量を全て統一することは困難であるため生じる現象で、実堤防の越水破堤時にも述べるができる。

よって、後述する氾濫量や水路内水位を単純に越水開始からの水理量として並べて比較しても、現地と模型で破堤口幅は全く異なり、比較にならない。そこで、氾濫量や水路内水位については、破堤口幅を横軸に統一して比較する方針とする。

破堤口が拡幅始めると、基本的にはほぼ一定速度で拡大していき、ある幅に達すると拡幅速度が低下する。模型実験 C1-3, 4 と C2-1, C4-1, 2 は破堤可能範囲を広く、かつ長時間通水したため、このケースについては、破堤口の拡幅速度が低下するまでを再現しているが、それ以外のケースでは、破堤口拡幅速度が低下する前に給水を停止してしたため、最大破堤口幅を表現していない。

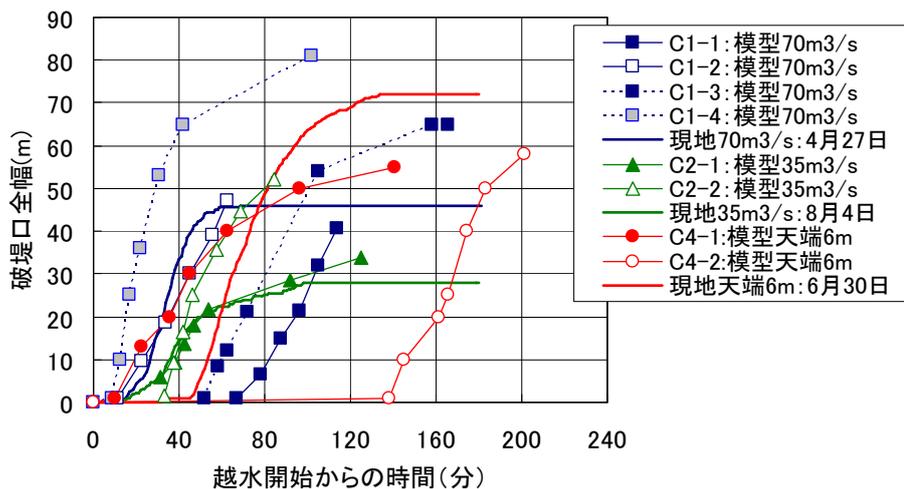


図 44 越水開始からの時間と破堤口全幅

一定速度で拡大する破堤口拡幅速度について、図 45 に整理する。現地 C1 と C4、模型 C2-2 の拡幅速度は 1.6~1.7m/分と基本の 0.8~0.9m/分に比べて 2 倍近く大きい。模型実験では基本の天端幅 3m (C1) より、天端幅 6m (C4) の拡幅速度が低下しているのに対して、現地実験では C1 と C4 がほぼ同一で変化が見られない。この要因は現地 C1, C2 は 3 年間程度のプレロードがなされていたのに対して、C4 は数ヶ月間しか養生していないのが要因ではないかと推定している。

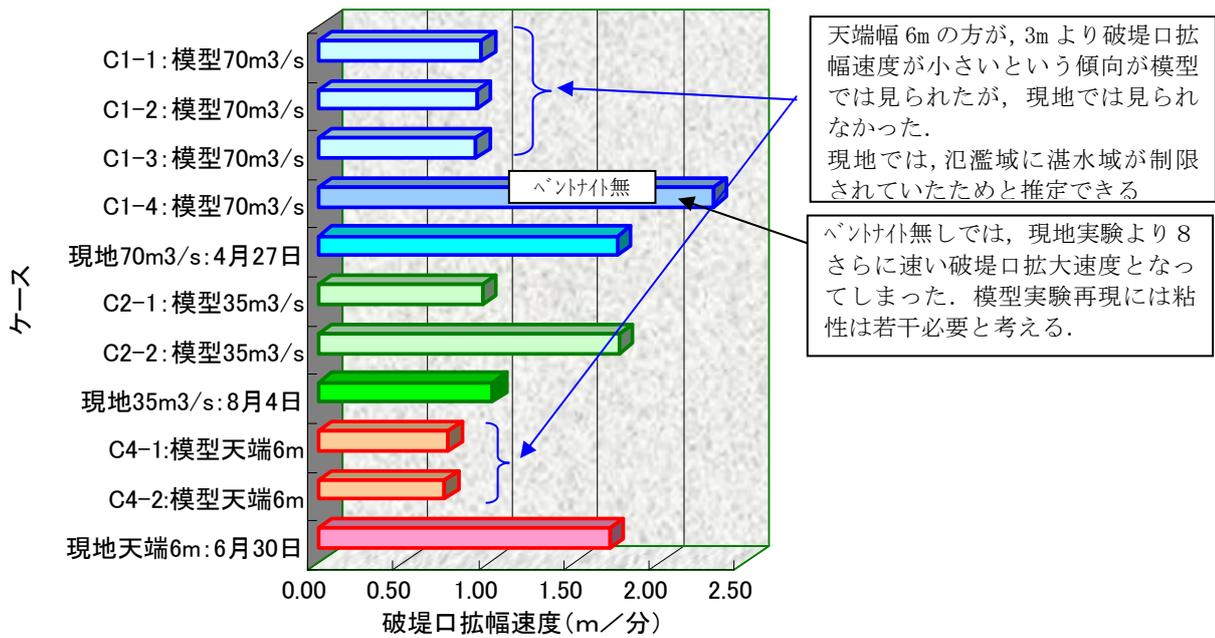


図 45 破堤口拡幅速度のまとめ

また、堤防材としてベントナイトの混入を全く行わなかった模型 C1-4 での破堤口拡大速度は 2.31m/分となり、現地実験の 1.75m/s より約 30%も大きくなった。堤防材には若干の粘性があった場合の方が再現性は高くなると考える。

2) 氾濫流量の再現性

上流流量と氾濫量について、ケース毎に現地と模型を並記したものを図 46 に示す。

氾濫流量は、ある破堤口幅に達すると、その後破堤口幅は拡幅が続くが、氾濫量は一定になる。例えば、模型 C1-3 の氾濫量は、図 46 に示すように、越水開始から 120 分後にはほぼ 58m³/s と一定となっているが、破堤口の拡幅は継続している（図 44 参照）。

破堤口幅がある幅（C1 ではおよそ 20m 程度）に達すると、破堤口上流側に流速の小さい範囲（死水域）が発生する。これにより、流速が速い有効な流れの幅（有効幅）は破堤口幅の半分以下となり、堤防侵食、基盤の洗掘、氾濫域への土砂堆積、洗掘基盤部の落堀の埋め戻し現象を繰り返しながら有効幅の位置は下流へ移動していくため、氾濫量は一定になると推定できる。

これより、破堤による最大氾濫量は算出可能と推定できる。

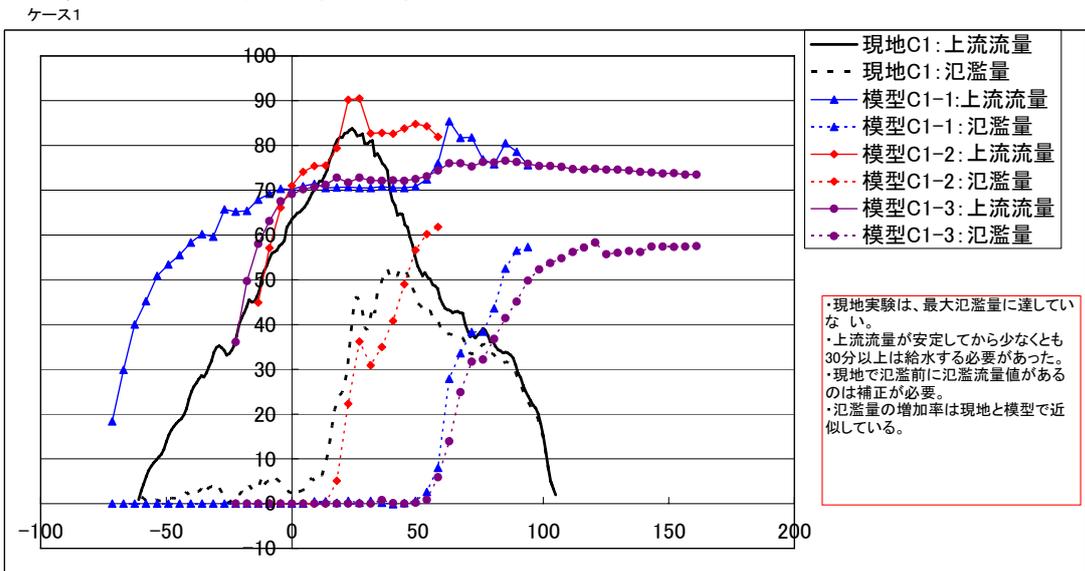


図 46 上流流量と氾濫量，ケース 1 の場合

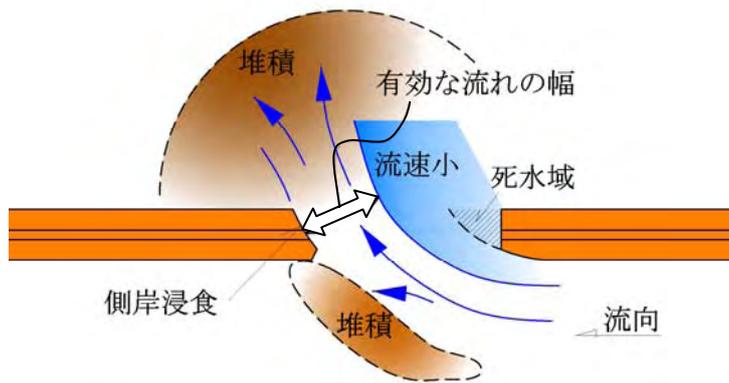


図 47 破堤口部の流況，有効な流れの幅はある破堤口幅まで拡幅すると一定となる。

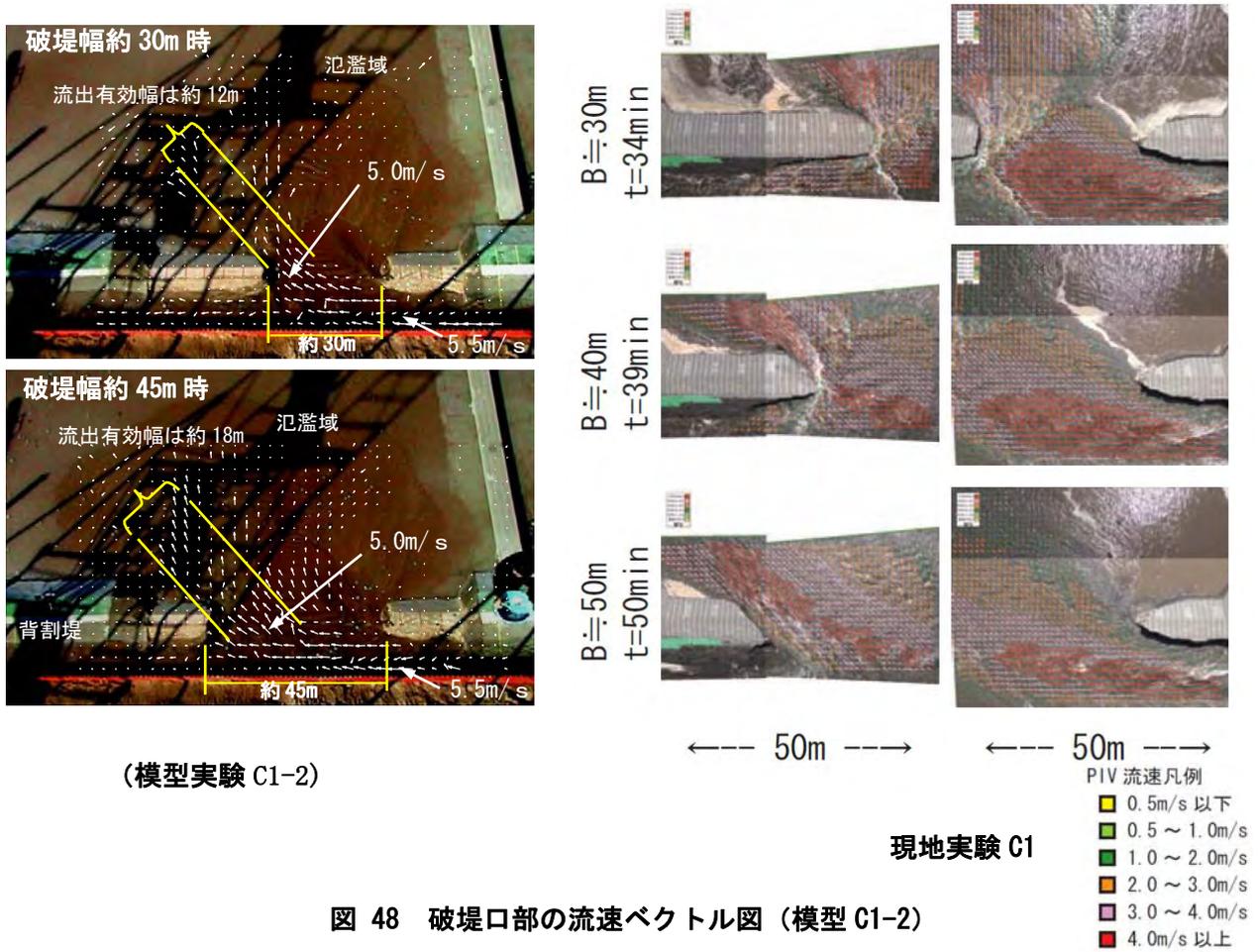


図 48 破堤口部の流速ベクトル図 (模型 C1-2)

上流流量に対する氾濫量率を図 49 に示す。

基本的に氾濫流量が安定した時で算出している。但し、安定する前にゲートを閉じ始めた場合はピーク氾濫流量時で算出している。

氾濫量率は現地も模型も約 70～80%で、比較的模型での再現性は高いと推定できる。

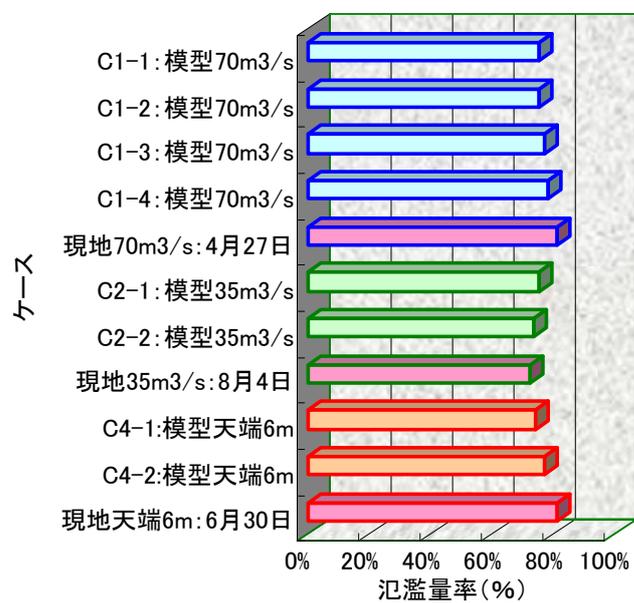


図 49 氾濫量増加率と氾濫量率

越水開始からの時間と破堤口が側岸方向に拡大はじめる時間のバラツキが大きいため、破堤口幅と氾濫量の関係を見出した。

現地実験と模型実験についてそれぞれ破堤口幅と氾濫量の関係を図 50 に示す。

現地実験は、模型実験とは異なり、上流からの流量を流量 $70\text{m}^3/\text{s}$ 一定に保持していないため、単純に比較できないが、破堤口幅と氾濫量の関係は、比較的合致していると推定できる。

これより、模型実験でも氾濫量の推定は可能と考える。

ケース 1 と 2 については、現地実験の方が、破堤口幅が拡大する過程 (C1 は破堤口幅が 20m まで、C2 は破堤口幅が 10m まで) で、模型実験に比べて氾濫量が大きくなる傾向が見られる。

この要因の特定は難しいが、模型の給水量は $70\text{m}^3/\text{s}$ 一定 (貯留水が水位低下するに従い給水量は増加する) であるが、現地はケース 1 と 2 において、初期段階は給水量が大きかったのが最大の要因と推定する。

初期の段階の破堤口幅と氾濫量の関係を再現することは難しいが、破堤口幅が 20m を越えると再現性が高くなると考える。

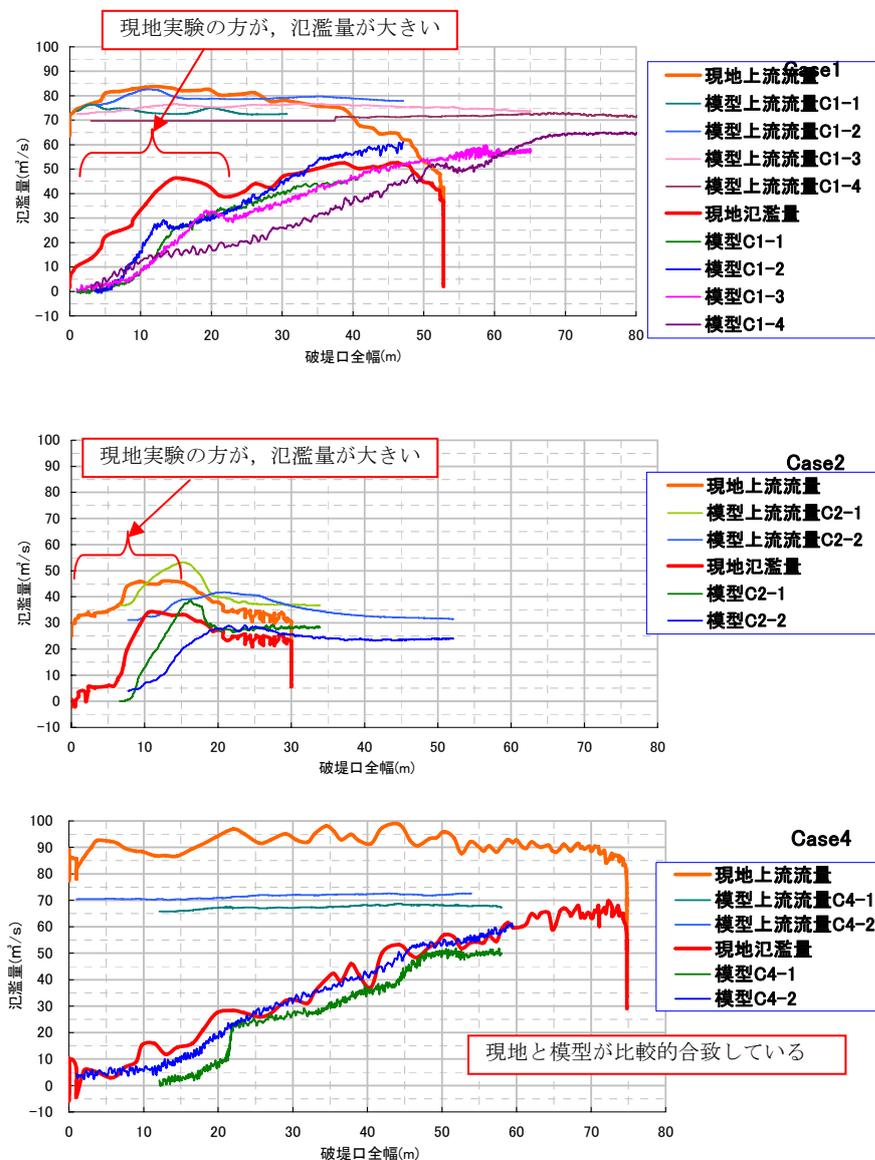


図 50 破堤口全幅と氾濫量の関係, 現地実験と模型実験を比較

3) 実験水路内水位と水路内河床高

次に、実験水路内の現地水位と実験水位を比較する。

模型実験では氾濫域の水位を計測していないため、実験水路内だけの比較となる。また、模型実験水路の水位を計測し始めたのは平成22年度業務からなので、模型実験 C2-2, C4-1, C4-2 の3ケースで比較する。

現地破堤口幅と模型破堤口幅がほぼ合致する条件の実験水路水位のみ抽出して、水位を比較した。その結果を図51に示す。

模型 C2-2 および C4-1 の水路河床高は最大 0.5m の差異が発生している。

水位は、比較的誤差は少ないが、C4-2 の破堤口幅 50m 時の差が大きい。

また、参考として通水後の実験水路内の平均河床高も併記したが、模型実験でも十分現地状況を再現していると考えられる。

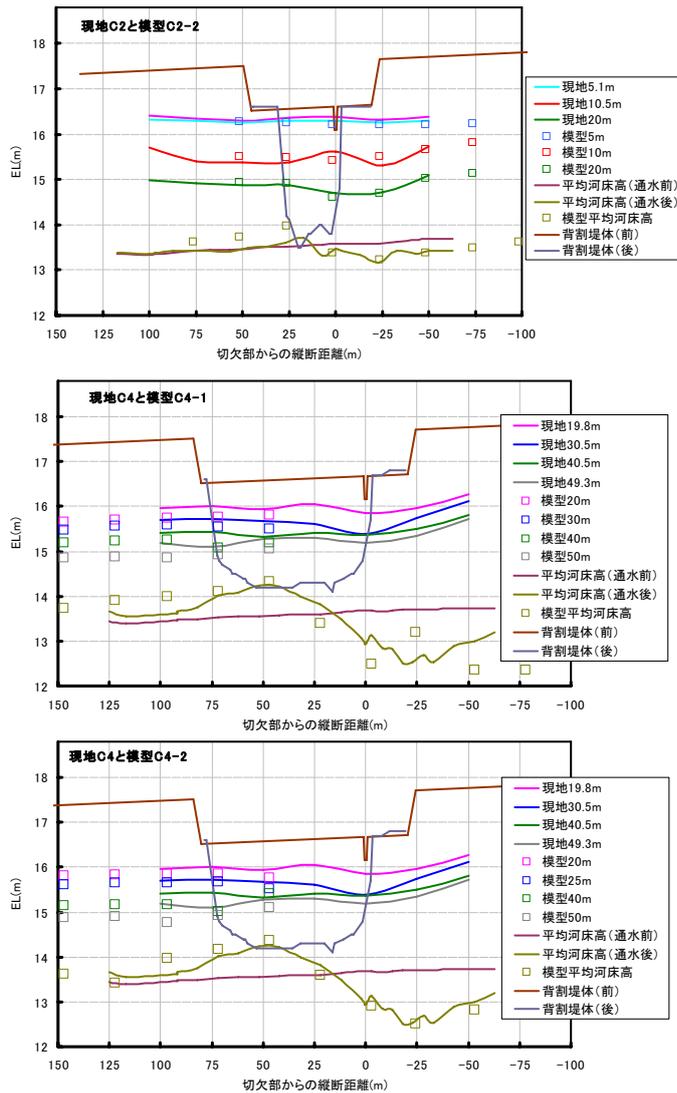


図 51 水位および河床高の縦断図

5) 破堤部表面流速 (PIV 解析結果)

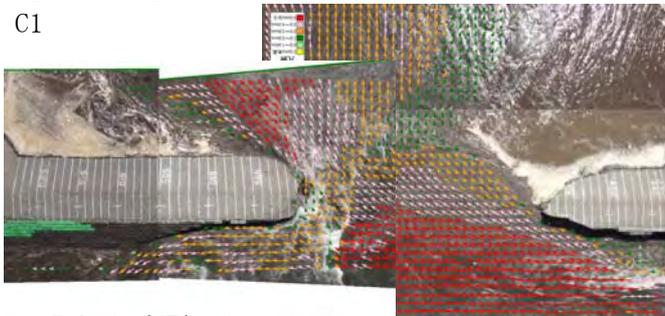
次に、破堤時の表面流速の PIV 解析結果を以下に示す。模型実験の PIV 解析はケース 1 では 1 破堤幅のみ、C2-1 で 4 破堤幅、C2-2 で 4 破堤幅、C4-1 と C4-2 は 4 破堤幅実施している。

破堤口幅が近似している状況の PIV 解析結果を併記する。

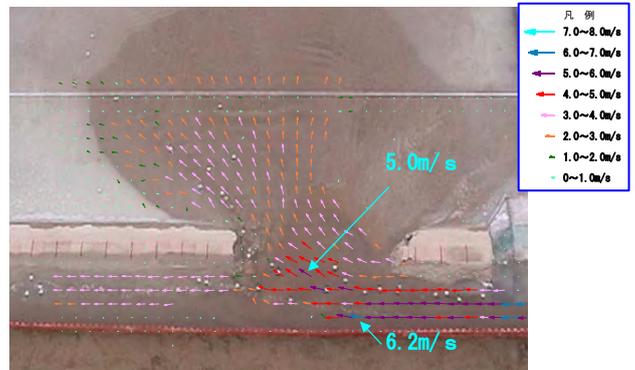
PIV 解析結果の流速ベクトル(流向)の再現性については、定性的にはほぼ合致している点を確認した。

【ケース 1】

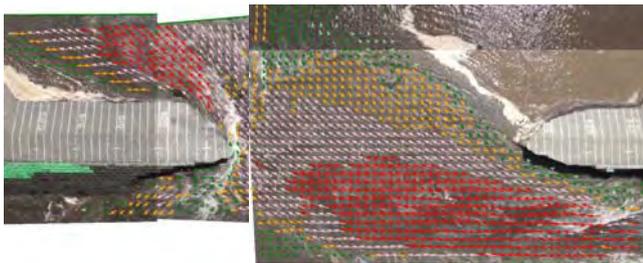
C1



現地 C1, 破堤幅 30m



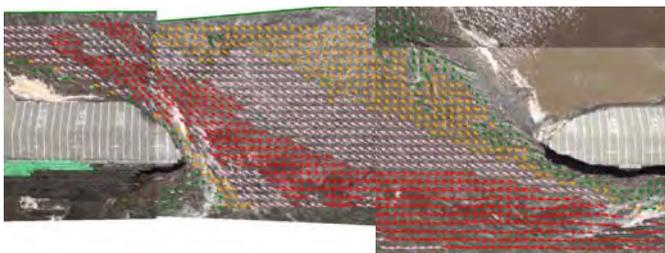
模型 C1-3, 破堤幅 30m



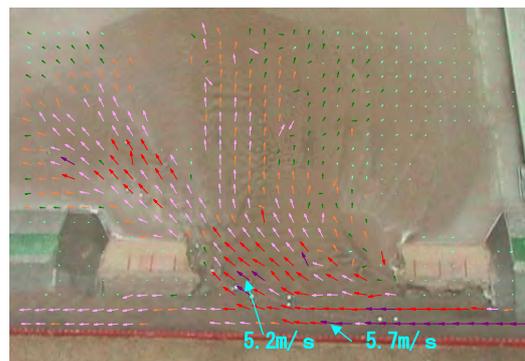
現地 C1, 破堤幅 40m



模型 C1-2, 破堤幅 43m



現地 C1, 破堤幅 43m



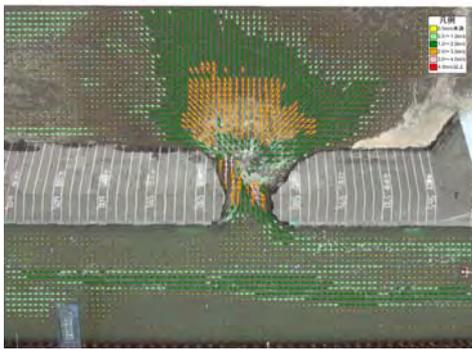
模型 C1-1, 破堤幅 40m



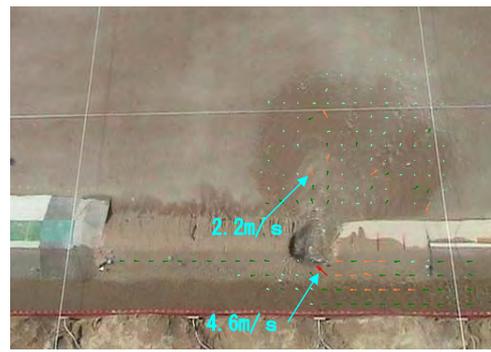
図 52 破堤部 PIV 流速解析結果, CASE1

【ケース 2】

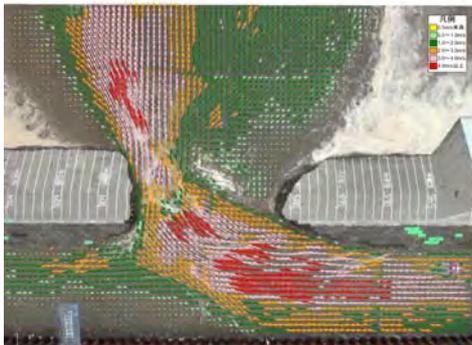
C2：現地 PIV の最大破堤幅は 24m



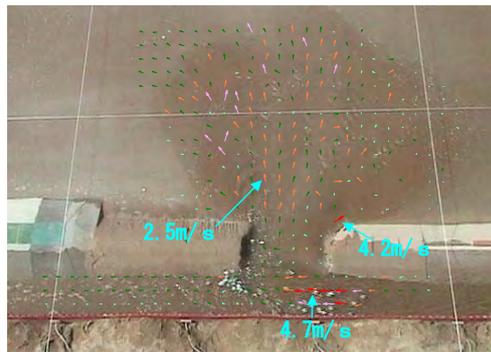
現地 C2, 破堤幅 5m



模型 C2-2, 破堤幅 5m



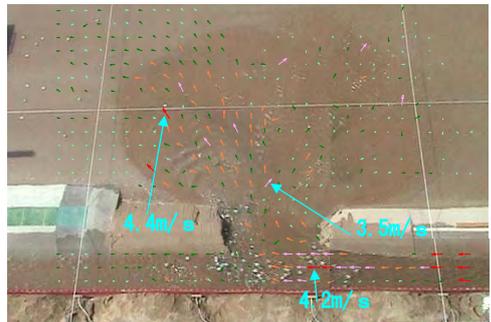
現地 C2, 破堤幅 15m



模型 C2-2, 破堤幅 15m



現地 C2, 破堤幅 20m



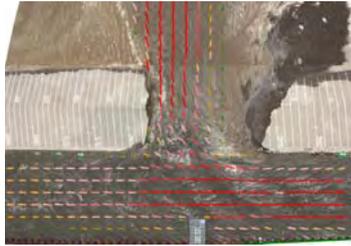
模型 C2-2, 破堤幅 20m



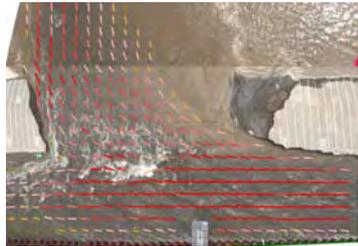
図 53 破堤部 PIV 流速解析結果, CASE2

【ケース 4】

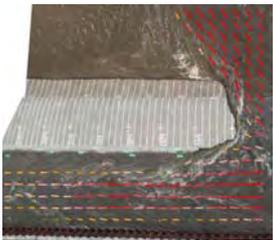
C4



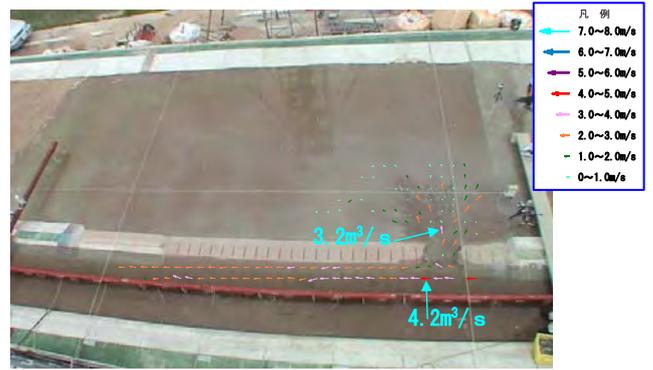
現地 C4, 破堤幅 13m



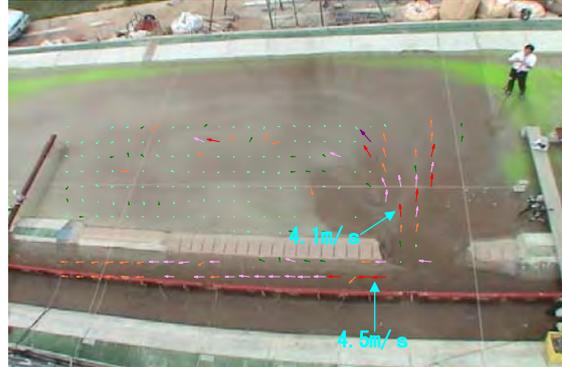
現地 C4, 破堤幅 30m



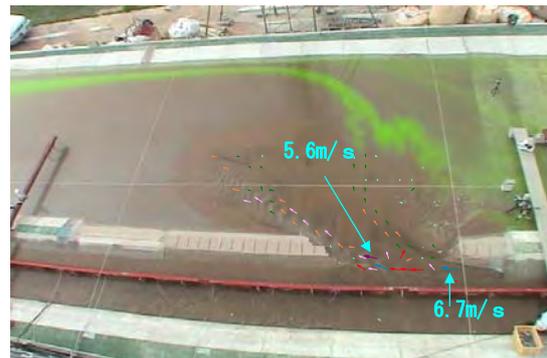
現地 C4, 破堤幅 50m



模型 C4-1, 破堤幅 13m



模型 C4-1, 破堤幅 30m



模型 C4-1, 破堤幅 50m

图 54 破堤部 PIV 流速解析結果, CASE3

(2) 河道形状相違による破堤実験

a) 実験条件

次に、河道形状（水路幅、水路勾配）を変化させて、破堤口拡大速度や氾濫量への影響量を縮尺模型実験により検証した。実験ケースを表 9 に示す。（実験はケース 2 シリーズとしている）水路幅は基本 8m に加えて 16m, 24m の 3 ケース、水路勾配は基本 1/500 に加えて、1/250, 1/2000 の 3 ケースを組合せて設定した。

通水量は水路幅と縦断勾配を変化させて、等流水深 2.7~2.75m（越流きっかけ部（以降切欠部）での越流水深が 0.2~0.25m）になるように給水量を設定した。

表 9 河道形状別破堤実験 実験ケース, 現地値

ケース	水路幅 B	河床勾配 I	設定等流 給水量
C1-1	8m	1/500	70 m ³ /s
C1-2	8m	1/500	70 m ³ /s
C1-3	8m	1/500	70 m ³ /s
C1-4	8m	1/500	70 m ³ /s
C5-1	16m	1/500	145 m ³ /s
C5-2	24m	1/500	224 m ³ /s
C6-1	8m	1/250	120 m ³ /s
C6-2	8m	1/250	120 m ³ /s
C6-3	24m	1/250	316 m ³ /s
C7-1	16m	1/2000	73 m ³ /s
C7-2	24m	1/2000	112 m ³ /s

※上流最大給水量は上流湛水域に貯水された容量が破堤による水位低下に伴い排水され増加した流量である。

※堤防形状は高さ 3m, 天端幅 3m, 法勾配 1:2 同一条件

b) 水路幅と水路勾配別破堤状況

堤防形状は高さ 3m, 天端幅 3m, 法勾配 1:2.0 の同一条件であるため、水路形状の違いによる、氾濫量や破堤口幅、拡大速度の比較を行った。河床材は、本来であれば水路勾配の違いによりその勾配に即した河床材料に入れかえが必要であるが、本実験では全て平均粒径 $d_m=0.90\text{mm}$ （現地 $d_m=11\text{mm}$ ）で統一している。このため、河床勾配 1/250 では河床高の低下量が-4m 以上に達し、大きかった。

図 55 に越水開始からの時間と破堤口幅の関係を示す。

越水開始から破堤口幅が拡幅開始するのは、0~130 分とバラツキが大きいものにも関わらず、一度側岸侵食が始まり、破堤口幅が拡幅し始めると、ほぼ一定勾配となっている。

また、図 56 に示すように、ある幅まで（前半）は比較的速く拡幅していき、ある破堤口幅に達する（後半）と急激に拡幅速度が低下する傾向も同様である。

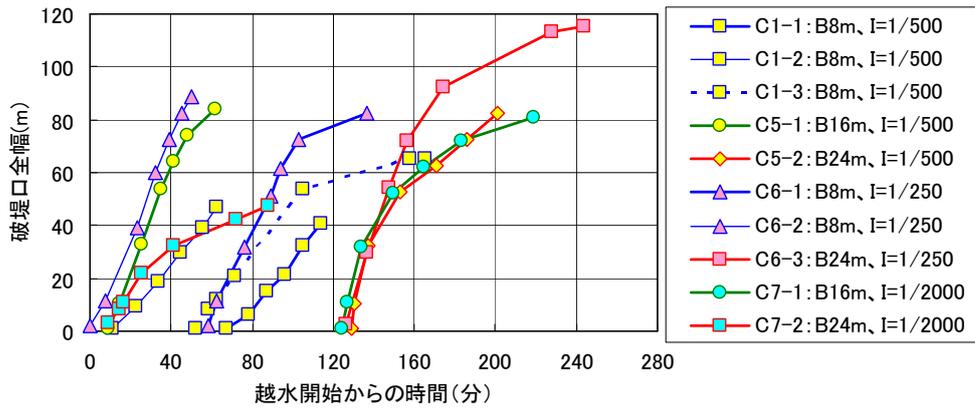


図 55 越水開始からの時間と破堤口幅

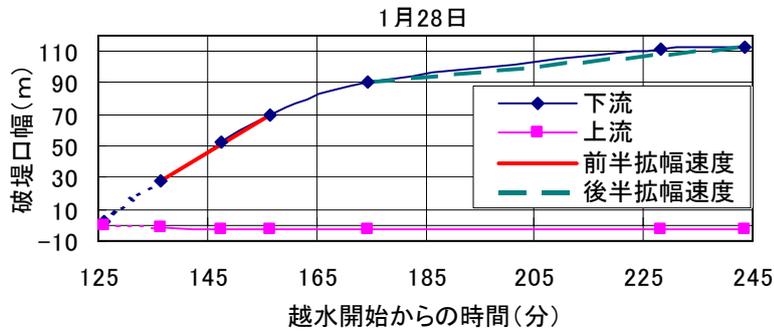


図 56 越水開始からの破堤口幅, ケース C6-3 の場合

破堤口拡幅速度は、図 57 に示すように河床勾配が緩い程小さく、また水路幅が広い程大きい傾向がある。特に水路幅の影響は大きく、水路幅 24m は 8m に比べて 3~4 倍大きい。

これより破堤口拡幅速度は、水路幅と水路勾配の影響を受ける現象と推定できる。

また、後半の拡幅速度は前半に比べて約 2~4 割まで低下し、この時の氾濫量はほぼ定常状態になる。この定常状態になる氾濫流量率は同じ水路勾配の場合、水路幅が広い程小さくなる傾向がある。例えば河床勾配 1/500 の場合、水路幅 24m の場合 55% であるのに対して、水路幅が 8m 時は 70% 程度と大きくなる (図 58)。

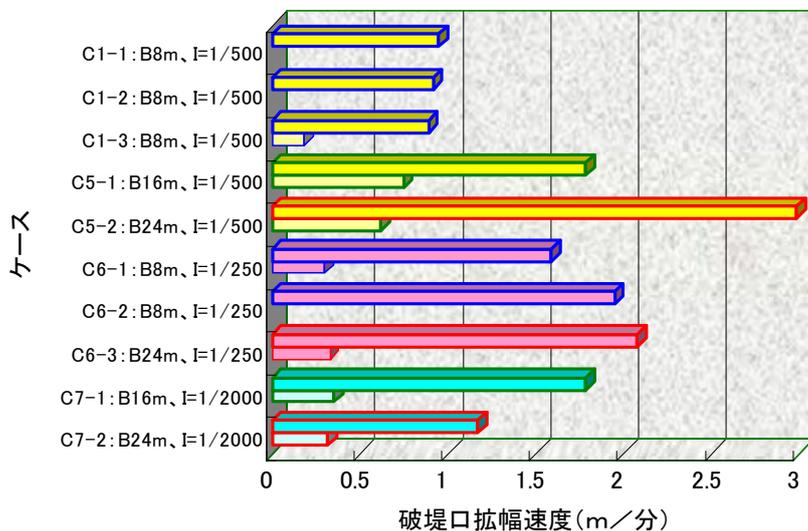


図 57 破堤口拡幅速度 (上段: 前半, 下段: 後半)

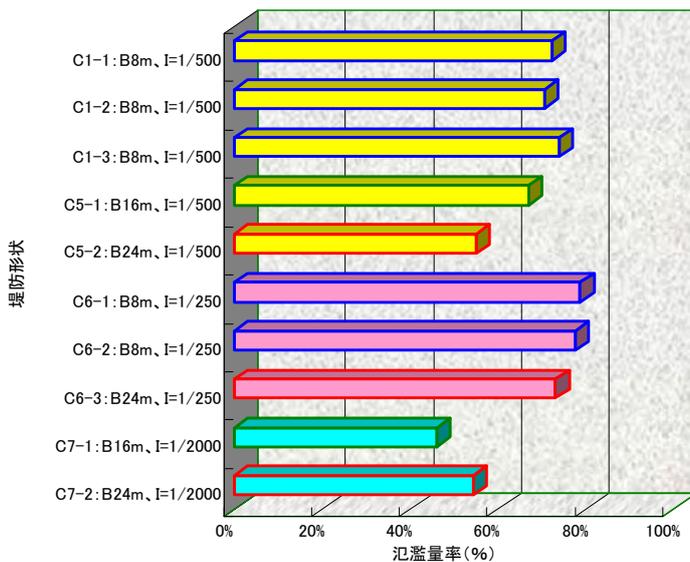


図 58 氾濫量率

次に、破堤口幅と氾濫量の関係を示す。

比較したものは、堤防形状が基本の(C1-1~4)と水路幅が16m, 24mと広げた場合(C5-1~2), 水路勾配が1/250と急勾配にした場合(C6-2)である。

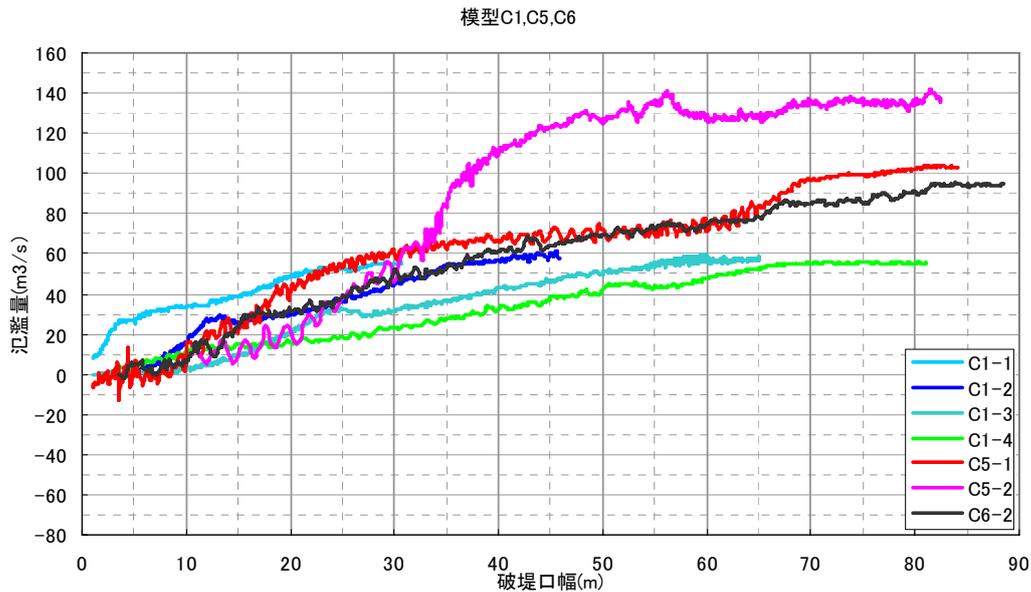


図 59 破堤口幅と氾濫量の関係, C1, C5, C6 の場合

その結果, C6 の河床勾配を 1/250 に変化させても, 氾濫量が大きく影響を受けなかったが, C5-2 (水路幅が 24m 時) のみ, 破堤口幅が 30m 以上になると, 急激に氾濫量が増加した. C5-1 (水路幅が 16m 時) も他のケースとほぼ同じであるが, 氾濫量は大きい傾向である。

「氾濫シミュレーションマニュアル」では, 氾濫量は河道幅から算出する式となっていることから, 氾濫量に影響を与える項目としては, 水路幅 (河道幅) が最も大きく影響していると想定できる。

c) 崩壊量と無次元掃流力

9. 破堤拡幅機構で考察した方法と同様に $(\tau^* - \tau^*_c)$ と $(dV/dt) / (\sqrt{s g d^3} \cdot B m)$ の関係を図化した。(図 61 参照)

模型実験では、水位の測定に 3D 写真解析を用いることができないため、以下の方法で水面勾配等を算出した。

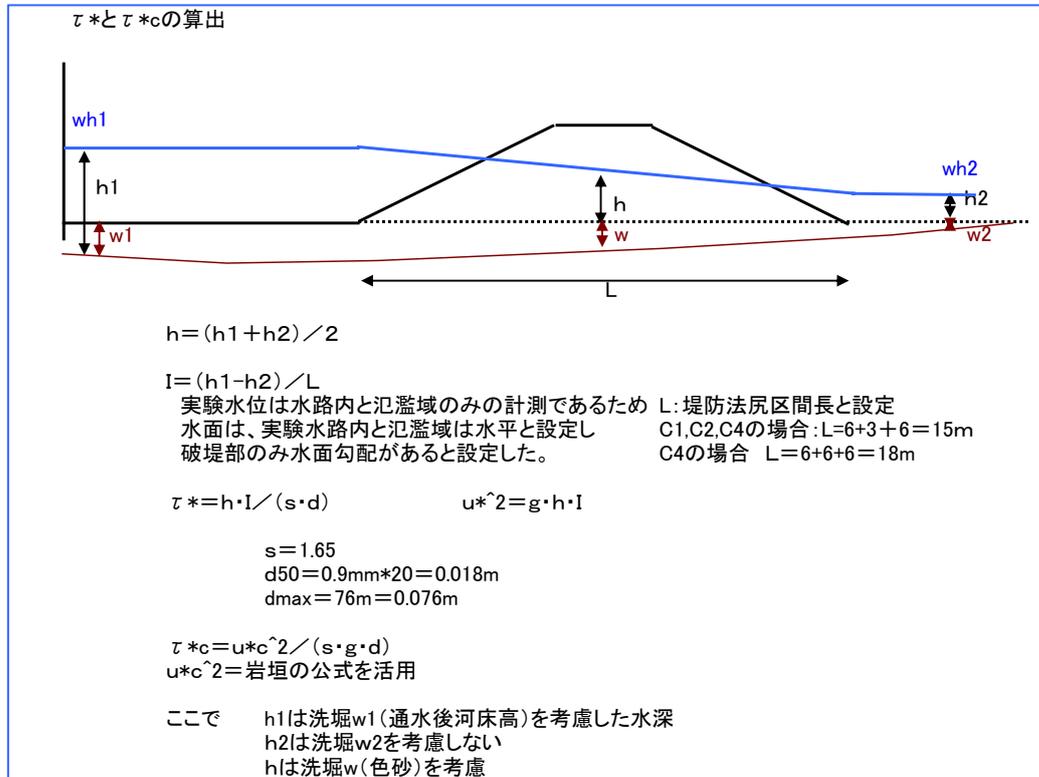


図 60 模型実験の場合の τ^* と τ^*_c の算出方法説明図

その結果, 破堤幅 10m以上の範囲では, C1-1 を除いて, 現地試験結果とほぼ傾向が合致していることが確認できた。

この点からも, 模型実験における破堤口の拡大速度は現地実験のそれをほぼ再現していると考ええる。

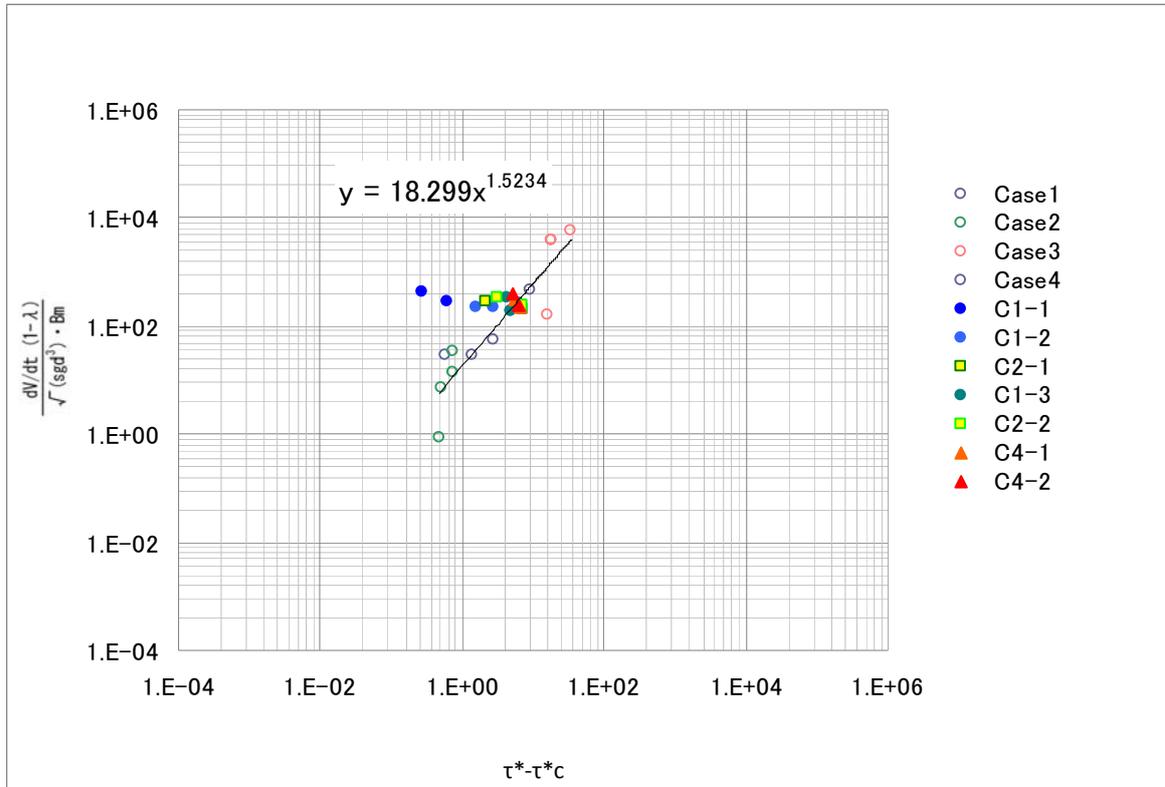


図 61 $(\tau^* - \tau^*c)$ と $(dV/dt) / (\sqrt{(sgd^3) \cdot Bm})$ の関係

第IV 部 まとめ

近年、台風や集中豪雨などに豪雨災害が多発し、被害規模が甚大である破堤事例が見られるようになる一方、特に破堤拡幅過程について十分にわかっていなかった。本研究ではまず既往研究レビューを行い、未解明部分であった破堤拡幅過程の解明を目的に、世界でも最大規模である十勝川千代田実験水路を用いて破堤実験を行った。以下にその要点を示す。

1. 堤体崩壊履歴計測実験

破堤拡幅過程の解明において、重要且つ課題となったのが破堤進行過程を時系列で把握することであった。本研究では室内実験を通じて加速度センサーを用いることで、堤体内部の崩壊履歴を計測する技術を確立した。

2. 予備実験

上記の計測技術を用いることで、堤体侵食・破堤拡幅過程が計測できることを現地で確認し、今までは困難であった堤体崩壊量の推定が可能となり、また破堤に伴う高流速・複雑な流況下における観測技術を確立した。

更に千代田実験水路内で、また裸堤という限られた条件下ではあるが、破堤初期段階では堤体の浸食がほとんどで、破堤拡幅することなく、切欠断面の表法肩侵食・堤体の大半が崩壊した後に、下流側に破堤拡幅が開始することが明らかとなった。

3. 本実験

複数ケースでの実験を行い検討を行った結果、次のことが明らかとなった。

まず破堤初期段階において、河道流がある場合でも、堤体侵食量と堤体上を通過する累計流量を用いることで、既往の正面越流破堤実験に近い傾向であり、その知見を用いることが出来る可能性を示した。

また破堤拡幅過程については、堤体特性等が異なる場合においても、破堤開口部周辺の無次元掃流力を用いることで、堤体崩壊量を推定出来る可能性を示し、またその式形は既往の掃流砂量式に近いものであった。そしてこれらの知見より破堤拡幅速度を推定するモデル化が可能であることを示した。

4. 模型実験

千代田実験水路の縮尺模型実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

破堤部や実験水路の流況、破堤形態は概ね現地の千代田実験水路の状況を再現することが出来た。破堤拡幅速度の再現性は十分ではないが、破堤幅と氾濫流量の関係性について再現性が高いことが分かった。また河道幅を広くした場合、河床勾配を急にした場合、同じ破堤幅であっても氾濫流量が大きくなる傾向を確認することが出来た。

参考文献

- 1) 吉川勝秀：河川堤防学，技報堂出版，pp.98，2008.
- 2) 例えば，鷺見哲也ほか：新川の破堤原因の数値シミュレーションを用いた考察，河川技術論文集，第7巻，pp.97-102，2001.
- 3) 例えば，黄光偉ほか：五十嵐川での最大流量と破堤地点の水位とハイドログラフの推定，河川技術論文集，第11巻，pp.127-132，2005.
- 4) 例えば，内田龍彦ほか：円山川・出石川の破堤における被災調査と土砂氾濫解析，河川技術論文集，第13巻，pp.303-308，2007.
- 5) 例えば，北川明ほか：一関遊水地における越流小堤の耐侵食力に関する現地実験，土木学会水工学論文集，第39巻，pp.489-494，1995.
- 6) 例えば，越水堤防調査最終報告書-解説編-，建設省土木研究所資料，第2074号，1984.
- 7) 例えば，木村勝行ほか：越流に伴う破壊現象に関する研究，ダム工学会論文，No.35，pp.215-223，1999.
- 8) 例えば，藤田裕一郎ほか：河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験，土木学会年次学術講演会第2部，第42回，pp.559-560，1987.
- 9) 例えば，奥田浩司ほか：排水機能を持つ堤防裏法尻保護工に関する実験的検討，土木学会水工学論文集，第51巻，pp.751-756，2007.
- 10) 東高德ほか：堤防形状3次元性を考慮した対越水堤防強化，土木学会年次学術講演会第2部，第55回，pp.338-339，2000.
- 11) 例えば，田中祐一朗ほか：河川堤防の越流に関する研究，土木学会年次学術講演会第2部，第48回，pp.424-425，1993.
- 12) 重枝未玲ほか：ダイナミック氾濫解析モデルによる河川からの溢水・越流流量の予測，土木学会河川技術論文集，第11巻，pp.169-174，2005.
- 13) 例えば，樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討，国土交通省国土技術政策総合研究所河川部河川研究室，2002.
- 14) 例えば，辻本哲郎ほか：矢作川および境川流域における2000年9月豪雨災害，土木学会河川技術論文集，第7巻，pp.71-76，2001.
- 15) 福岡捷二ほか：越水を伴う洪水流による堤防被災機構の調査およびその解析，建設省土木技術資料30-3，pp.21-26，1988.
- 16) 例えば，辻本哲郎ほか：破堤拡大過程と河川特性の関係について，土木学会河川技術論文集，第11巻，pp.121-126，2005.
- 17) 例えば，後藤仁志ほか：越流水による河川堤防浸食過程のグリッドレス解析，土木学会水工学論文集，第46巻，pp.439-444，2002.
- 18) 例えば，大坪郁宜ほか：東海豪雨を対象とした氾濫解析，土木学会河川技術論文集，第7巻，pp.35-40，2001.
- 19) 十勝川千代田実験水路について，北海道開発局帯広開発建設部，<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/>
- 20) 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，pp.871-876，2009.
- 21) 島田友典・平井康幸・辻珠希：千代田実験における越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.811-816，2010.
- 22) 島田友典・横山洋・平井康幸・三宅洋：千代田実験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，pp.841-846，2011.
- 23) 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，pp.371-376，2011.
- 24) 水理公式集(平成11年度版)，土木学会，pp.132-133，1999.
- 25) 氾濫シミュレーション・マニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-，建設省土木研究所，1996.
- 26) 急流河川における浸水想定区域検討の手引き，国土交通省北陸地方整備局，2003.
- 27) 徳川亜衣子・泉典洋：破堤プロセスに関する簡易モデルの開発，土木学会北海道支部，第68号，B-37，2012.
- 28) 坂野章：樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討，土木技術資料，2002.
- 29) 渡邊康玄・山本昌慧・早川博・島田友典：縮尺の違いによる越流堤実験の再現性の検討 水工学論文集,第56巻,2012

**河川堤防の越水破堤現象のうち
破堤拡幅機構に関する実験研究報告書
(案)
【概要版】**

**国土交通省北海道開発局
(独)土木研究所寒地土木研究所**

第I部 越水破堤現象をとりまく環境

1. 近年の実破堤事例
2. 越水破堤現象に関する既往研究
3. 研究過程と本報告書の内容

第II部 十勝川千代田実験水路における破堤実験

4. 十勝川千代田実験水路の概要
5. 堤体崩壊履歴計測実験
6. 予備実験1
7. 予備実験2
8. 本実験
9. 破堤拡幅機構

第III部 現地実験以外の検討

10. 縮尺模型実験

第IV部 まとめ

- ・堤防の決壊による氾濫の減災対策には、まず破堤拡幅機構の解明が必要である。
- ・既往研究では、横越流を考慮した実物大規模の破堤拡幅機構は未解明である。

1. 近年の実破堤事例



図-1 円山川の破堤状況(国土交通省 HP より)

2. 越水破堤現象に関する既往研究

表-2 越水破堤に関する既往の研究事例

研究手法	規模	キーワード	研究事例調査	研究概要	成果概要	課題点
実験	実物大	越水破堤メカニズム	現地破堤実験 ²⁾	越流の耐侵食性に関する実物大研究	芝堤の耐侵食強度の評価、もぐら穴弱点部の侵食形態	破堤の3次元的拡大現象
		耐越水化対策	越水対策実験 ³⁾	様々な耐越水工法の比較検討	土堤の破壊メカニズムの解明、危険度別耐越水対策工法の選定方法提案	越水堤防化する必要がある範囲の選定方法
		越流部水理特性	越流時の水位・流速計測 ³⁾	上記の耐越水化対策実験に併せて実施	2次元内越流水理特性の把握	3次元内越流特性は不明
	縮尺模型	越水破堤メカニズム	逆心模型実験 ⁴⁾	逆心模型による越流破壊実験	縮尺模型での堤体内の流れが再現可能	相似性について研究が必要
			堤防決壊口拡大状況 ⁵⁾	縮尺模型による堤防決壊口の拡大状況再現実験	堤防決壊後の拡幅速度と水理現象の把握	研究事例が少ない
		耐越水化対策	特殊な耐越水化対策 ⁶⁾	堤防法尻の新たな保護工	洗掘防止と氾濫防止を考慮した新たな保護工の提案	費用対効果等、今後実用に向けての検討が必要
		越流部水理特性	取路がある堤防の越流特性 ⁷⁾	裏法側を取路がある場合の流れの集中を実験	3箇所の流れの集中箇所が発生、補強方法を提案	研究事例が1ケースのみ
	堤防越流水理特性 ⁸⁾	2次元実験による越流水理特性把握	底面圧力・流速分布・レイノルズ圧力分布の特性把握	越流時の裏法側における水理特性を精度よく再現計算できるモデルの検討が必要		
	平面的越流特性 ⁹⁾	河川堤防からの越水状況を再現する計算モデルの構築	SU-FUF-2DF ダイナミック氾濫解析モデルで良好に再現	実スケール等での検討が必要		
	氾濫拡散状況	樹木部による被害軽減効果 ¹⁰⁾	樹木部による破堤決壊拡幅抑制効果の検討実験	樹木部を堤内地に設置することにより堤防決壊拡幅を抑制することを確認	樹木部の具体的な管理指針が必要	
調査	被災時	被災事例・要因分析	水害レポート ¹¹⁾	現地被災事例の収集と要因分析	現地での被災事例・効果的な堤防強化方法の提案	被災時のリアルタイムな外力情報は事後調査のみでは把握困難
			災害調査方法 ¹²⁾	越水破堤被災後調査と外力解析	被災後痕跡調査でも定量的に出水時の外力推定が可能	他河川への汎用のための追加調査必要
数値計算	越水破堤メカニズム	破堤拡大過程 ¹³⁾	破堤拡大過程の計算モデルの開発	破堤決壊口の拡大状況・落堀・土砂堆積状況の再現	実物大での検証が必要	
		越流破壊 ¹⁴⁾	堤防越流破壊現象の計算モデル化・越水外力を増大させる要因解析	拡張 MPS 法により単純な条件下なら破堤現象の再現可能、越水外力へ影響を与える要因解析	基礎研究段階	
	氾濫解析	実洪水を再現した氾濫解析モデル ¹⁵⁾	数値計算による洪水氾濫状況の再現	氾濫解析モデルの提案	破堤箇所の境界条件等とは不明	

- ・十勝川千代田新水路内に、わが国初の実物大河川実験水路を造成。
- ・これまで困難であった、実物大規模による、河道からの横越流による破堤実験が可能。

4. 十勝川千代田実験水路の概要

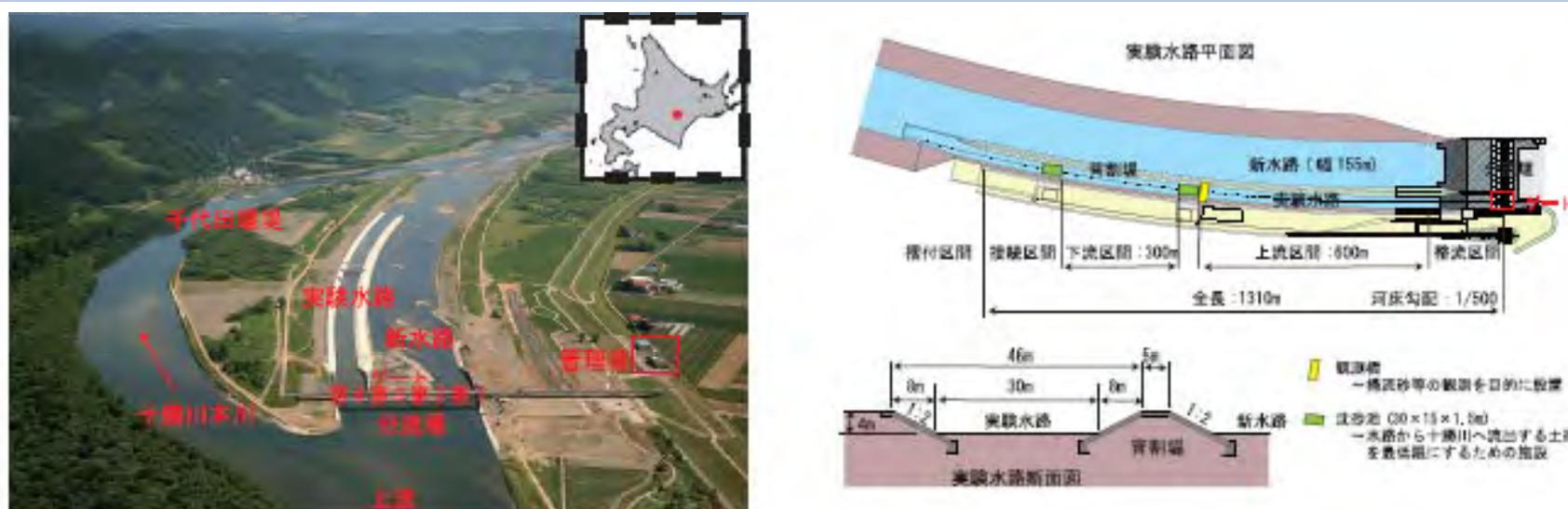


図-2 千代田新水路および実験水路

- ・破堤現象の解明には、堤体崩壊の時系列による計測が必要。
- ・室内実験を行い加速度センサー(小型、安価、高精度)による堤体崩壊履歴の計測技術開発に向けて検討を行った。

5. 堤体崩壊履歴計測実験

～不可視部分である堤体の崩壊履歴を計測する手法の検討



図-5 室内実験の状況

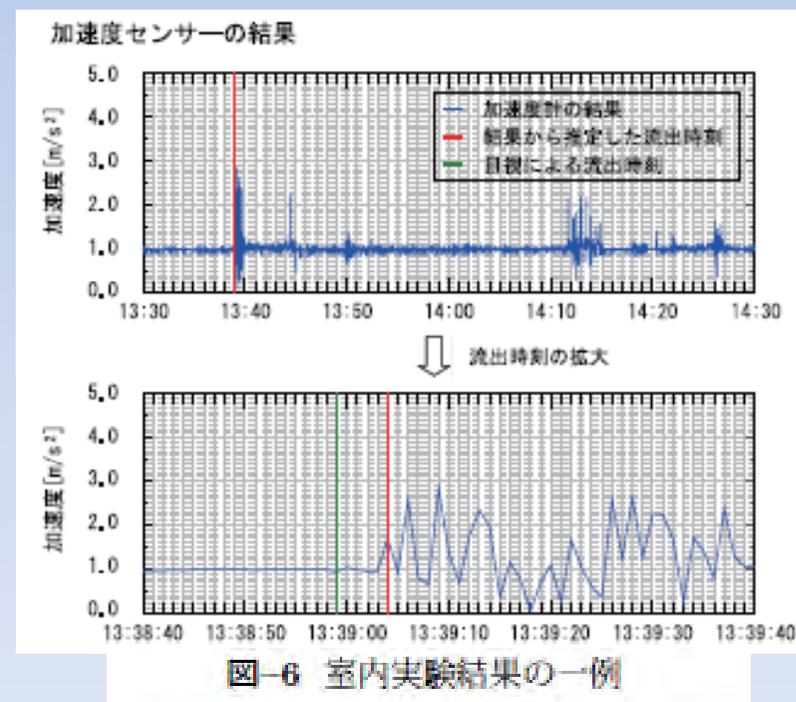


図-6 室内実験結果の一例

室内実験では、計測精度誤差は10秒以内

- ・計測機器の機能検証、計測手法の確立を目指して予備実験を実施。
- ・横断堤上流に水を貯留、切欠き部から正面越流させて堤体崩壊過程を観測した。

6. 予備実験1

～大規模実験における計測技術手法の検証



図-8 予備実験1の様子

堤体形状

高さ:2.5m

天端:2.0m

法勾配:2割

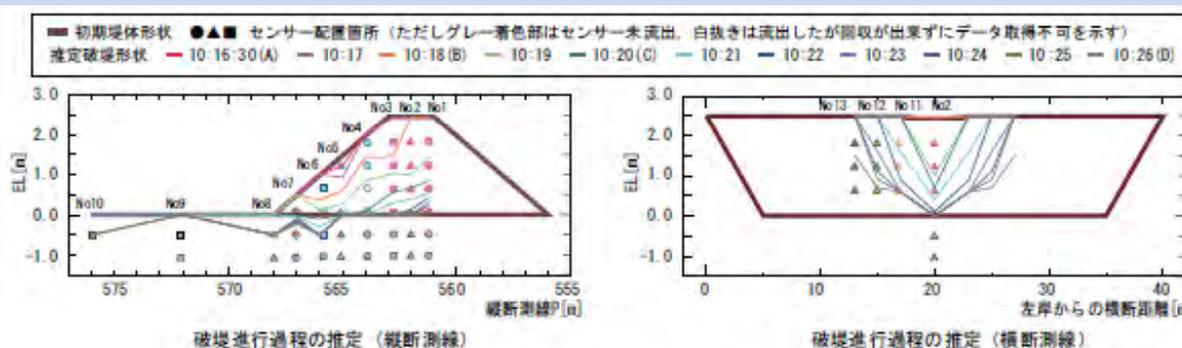


図-13 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (左; 縦断測線上・右; 横断測線上)

堤体崩壊過程を時系列で計測可能



図-12 実験状況 (予備実験1)

・より実現象に近い、河道からの横越流時の破堤現象を想定した予備実験を実施。

7. 予備実験2

～河道流がある場合の初期段階の破堤現象の把握、
高流速下での計測手法の確立



図-16 予備実験2の様子

堤体形状

高さ:2.5m

天端:3.0m

法勾配:2割

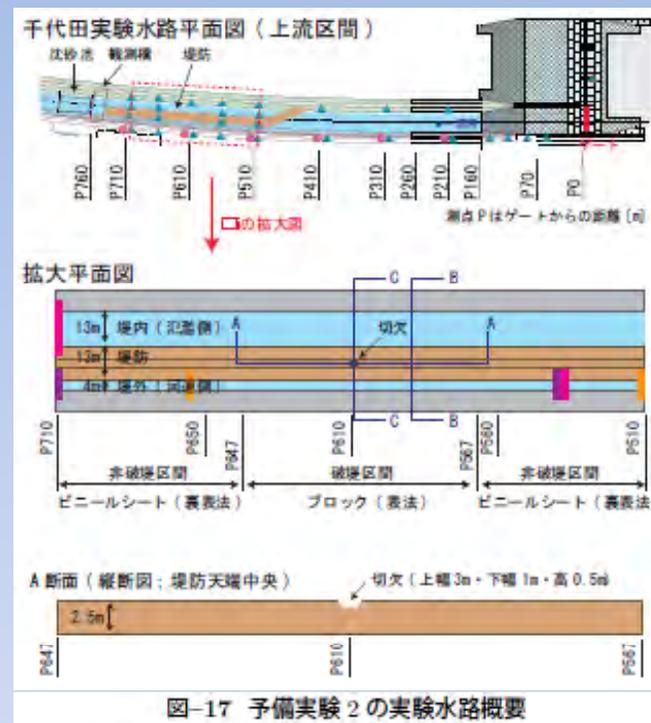


図-17 予備実験2の実験水路概要

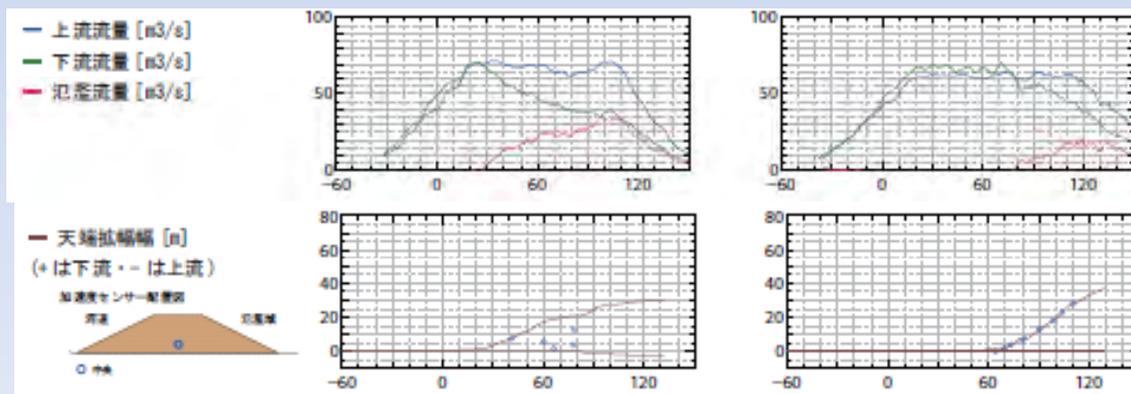


図-19 観測データ時系列(予備実験2)

- ・氾濫流量の観測技術を確立
- ・破堤拡幅のプロセスを確認

・河道流量、堤体土質、堤体法勾配を変化させて、破堤拡幅過程を検証。

8. 本実験 ～実験概要・条件

～破堤拡幅過程を明らかにすることを目的に、河道流・氾濫域のある条件で4ケース実施



図-23 本実験の様子 (Case2)

	目標流量	堤体条件				実験実施	高堤後の経過年数
		土質	高さ	堤幅	法勾配		
Case1	70m ³ /s	砂礫	3m	3m	1:0.2	2010年	4月
Case2	35m ³ /s						8月
Case3	70m ³ /s	細粒分	6m			2011年	4月
Case4		砂礫					6月

図-25 実験条件

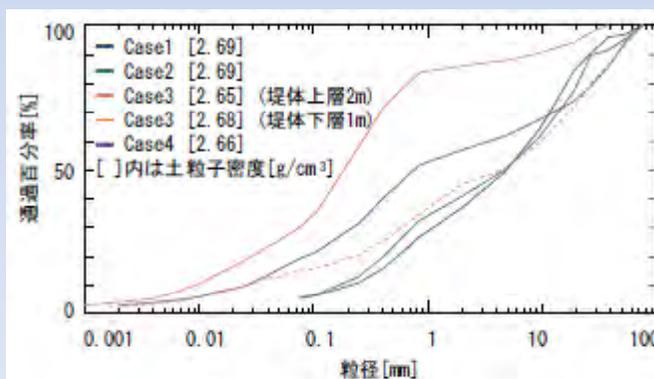
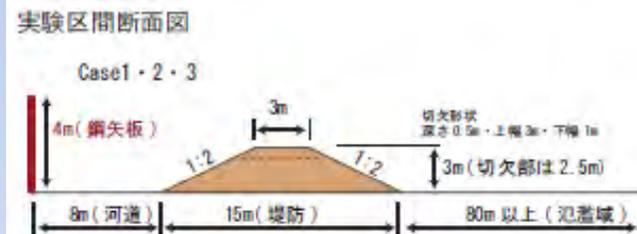


図-26 堤体材料の粒度分布

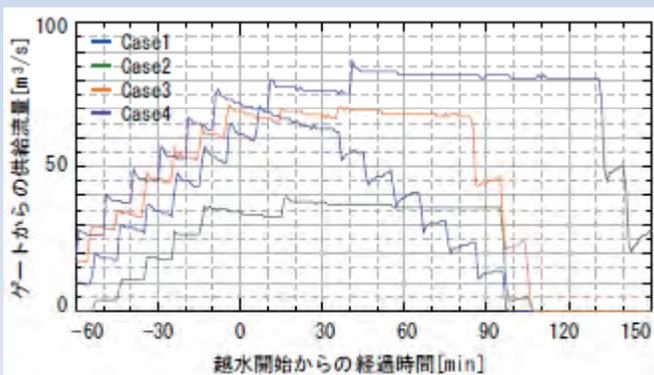


図-27 ゲートからの供給流量

・破堤拡幅過程は、破堤の開始から実験終了までに数段階のステップを経る。

8. 本実験 ～実験状況

時間進行 ↓

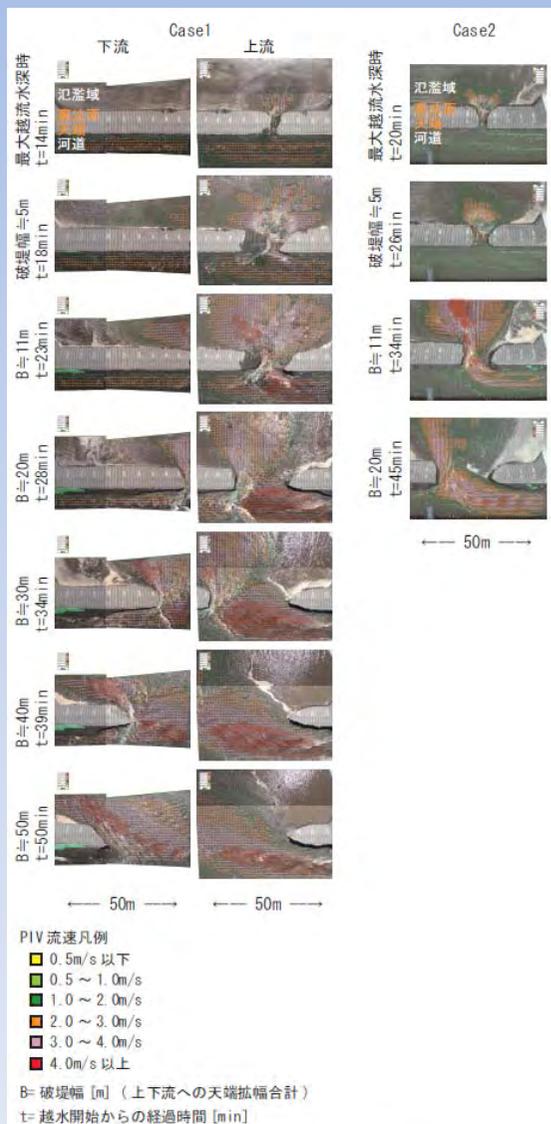


図-28 実験状況 (Case1・2)

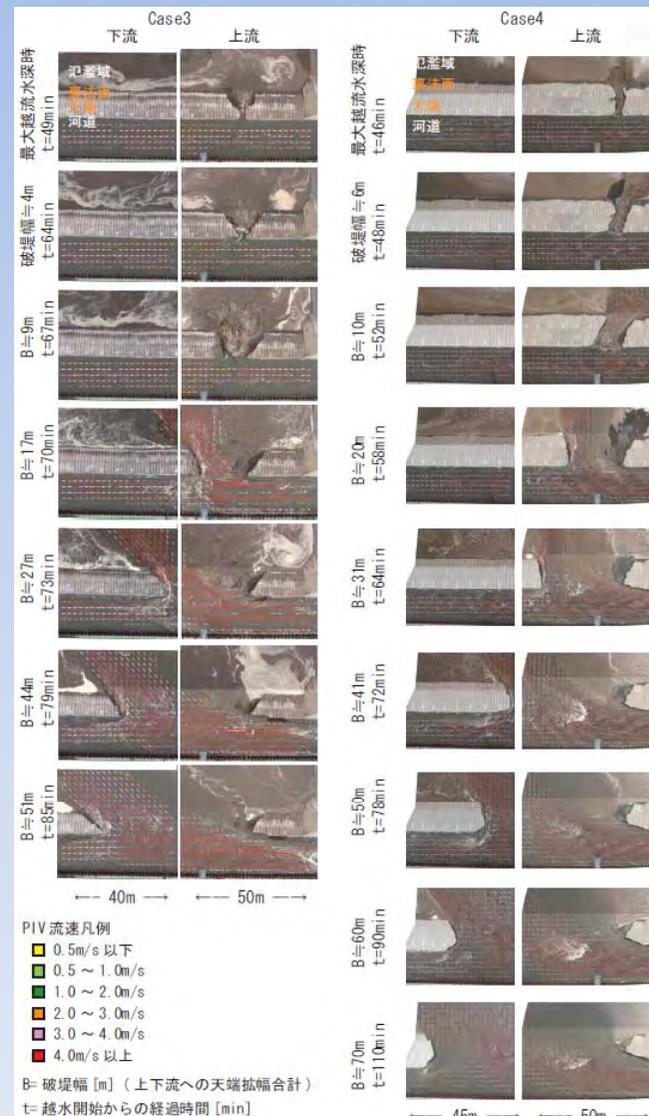


図-29 実験状況 (Case3・4)

裏法面、天端の浸食(破堤拡幅は進行せず)



破堤拡幅が急速に進行



破堤拡幅速度の低下

第II部 十勝川千代田実験水路における破堤実験

pp.30-35

8. 本実験 ～観測データ時系列

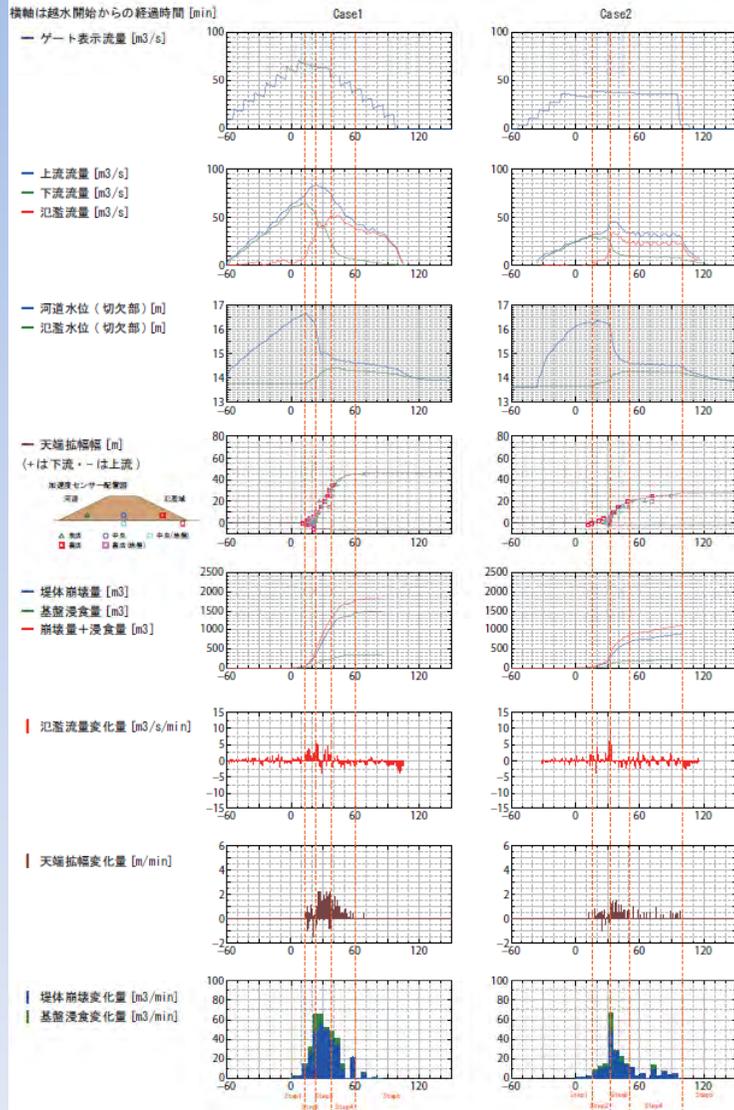


図-30 観測データ時系列 (Case1・2)

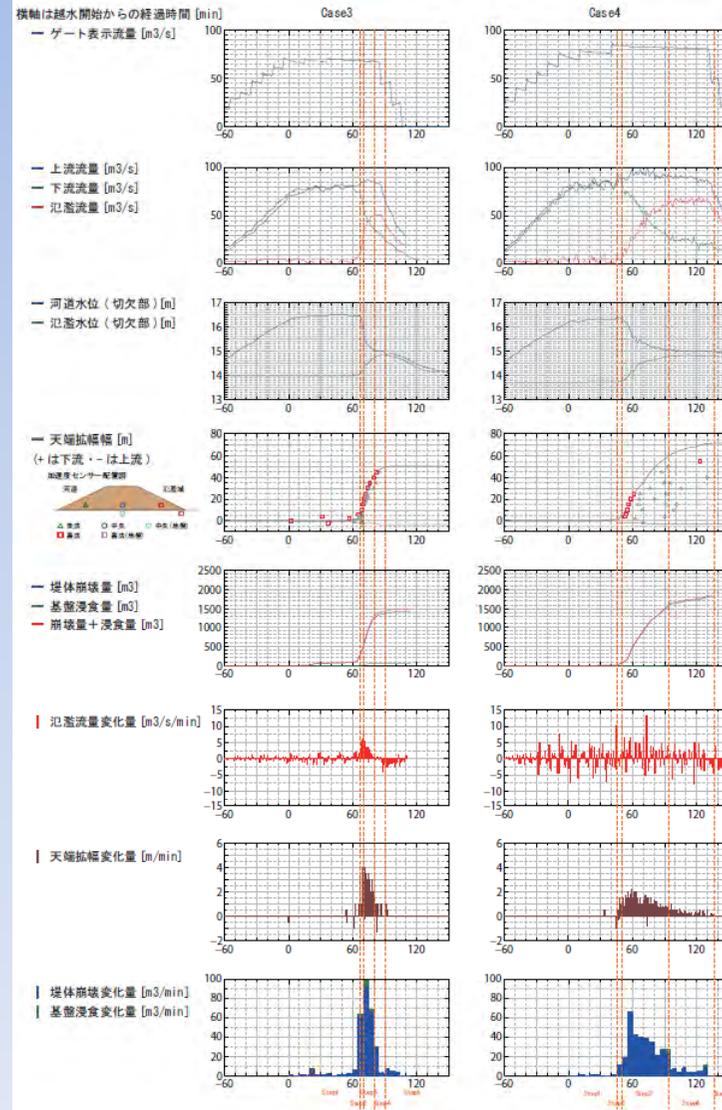


図-31 観測データ時系列 (Case3・4)

水位
・破堤幅の急拡開始とともに低下

氾濫流量
・破堤幅の急拡開始とともに急増
・破堤がある程度進行すると、破堤拡幅速度は低下、氾濫流量は一定で推移する

9. 破堤拡幅機構～破堤進行過程概略

・千代田実験水路の実験では、破堤進行は以下の5ステップを経る。

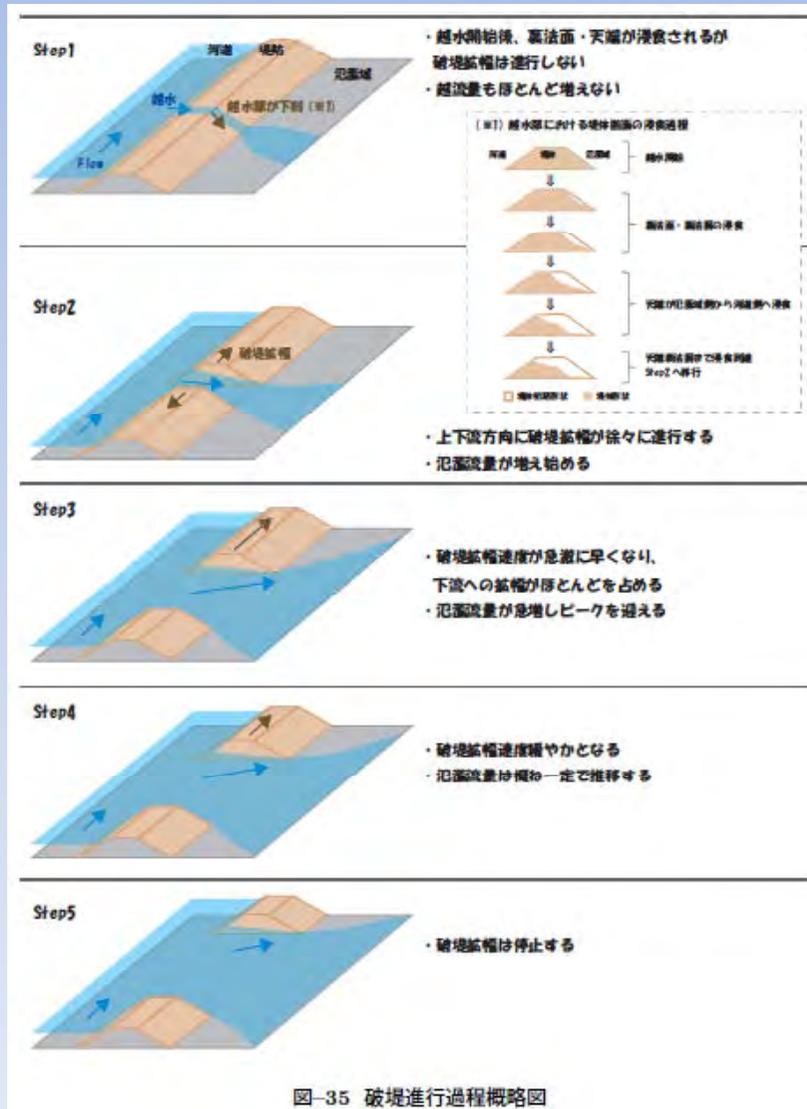
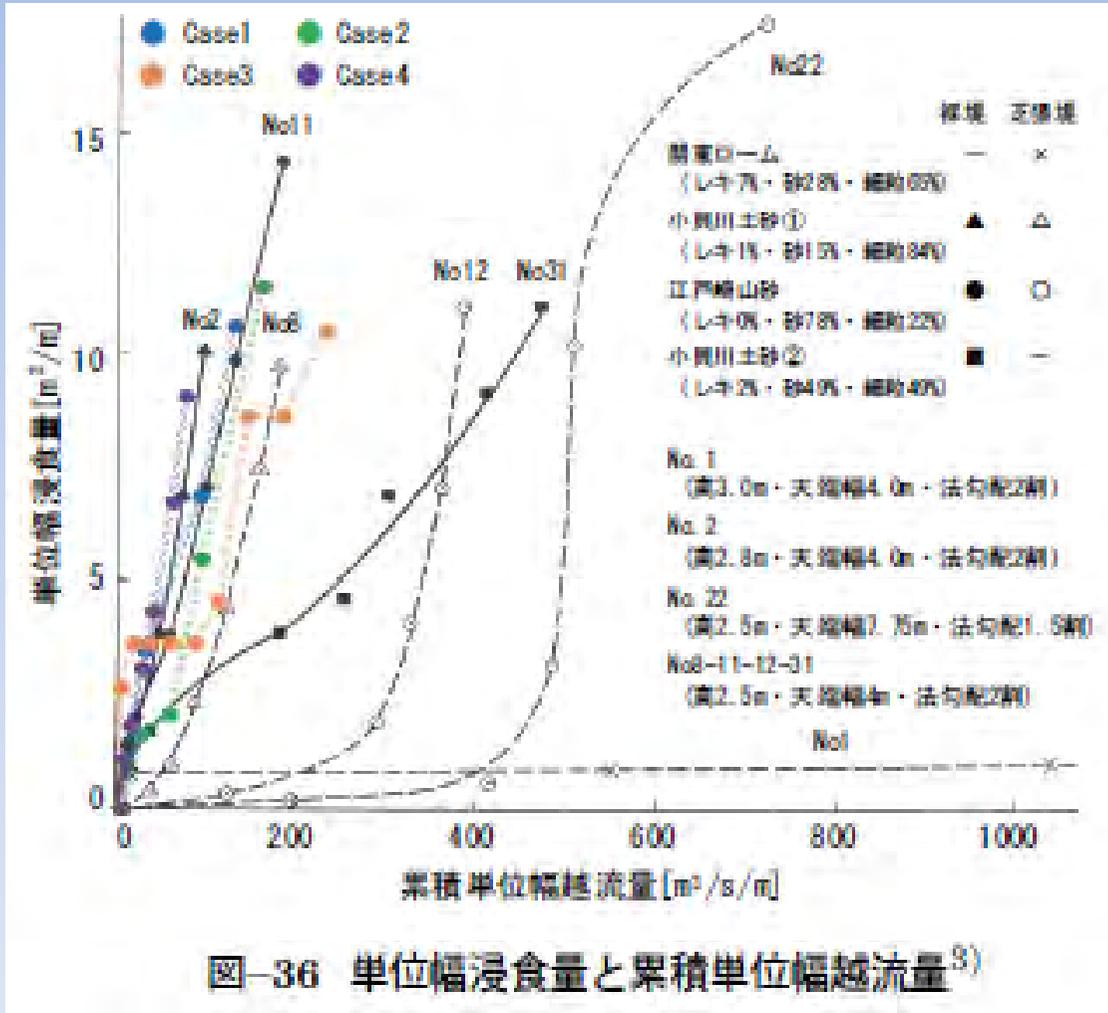


図-35 破堤進行過程概略図

なお本研究の目的は破堤拡幅過程の検討が主目的であることから、破堤のきっかけとして切欠部を設け、また堤体は裸堤としている。
 よって特に越水初期から破堤拡幅までの現象(Step1-2)については、今回の千代田実験水路内という限られた条件下での結果であることに注意が必要である。

9. 破堤拡幅機構～破堤開始前



・いずれのケースともに、正面越流による既往実験(土木研究所実施)とほぼ同様の傾向を示す。

図-36 単位幅浸食量と累積単位幅越流量³⁾

9. 破堤拡幅機構～破堤開始以降(開口部周辺の水理量)

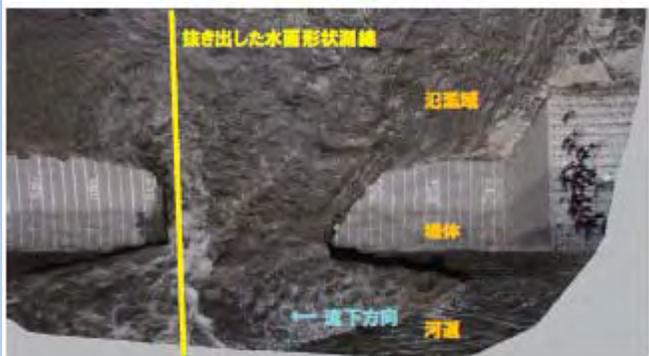


図-37 水理量の設定箇所 (図は Case1 の t=25min)

・破堤幅の拡大過程の開口部周辺の流速、水面形を時系列で詳細に把握できた。
(各ケース数カット)

→堤体浸食と水理量の関係を検討する

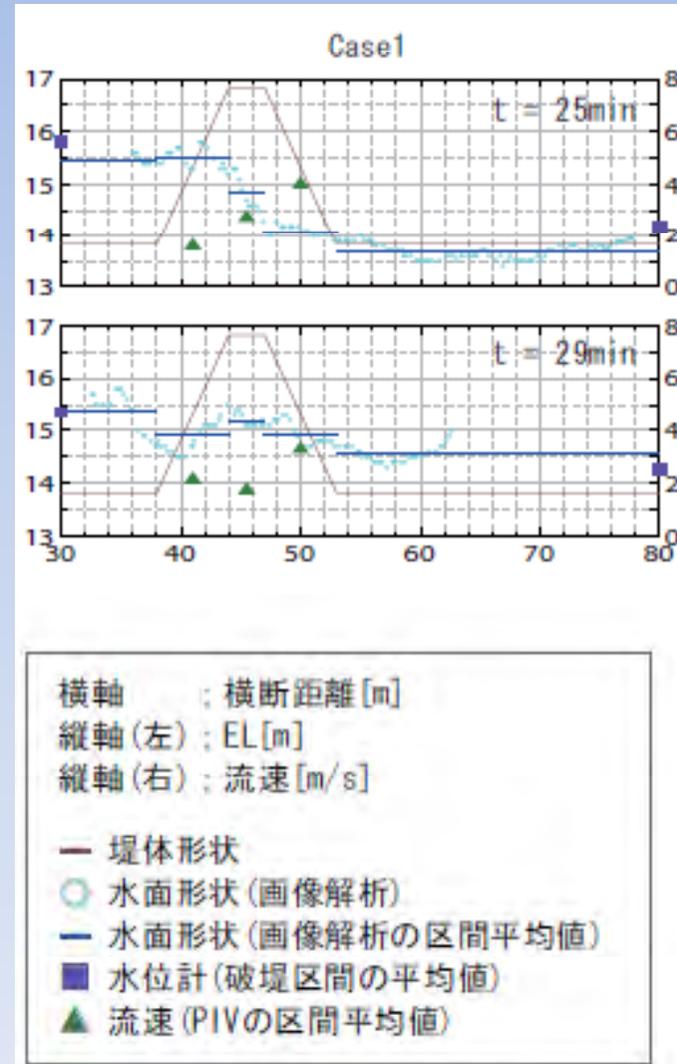


図-38 開口部下流端近傍の水面形状と流速

・破堤進行による堤体崩壊量と、堤体近傍の掃流力の関係を検証。

9. 破堤拡幅機構～破堤開始以降(崩壊量と水理量の関係)

a) 堤体崩壊量の算出

堤体内に設置した加速度センサーの結果を用い、堤体・基礎地盤の崩壊量を算出した。

b) 堤体周辺水理量の算出

堤体開口部に作用する無次元掃流量力 τ_* を (5) 式より算出した。

$$\tau_* = \frac{\rho n^2 u^2}{s d_{50} R^{1/3}} \quad (5)$$

ここで ρ :水密度, n :粗度係数(ここでは実験水路の値 0.023), u :破堤開口部流速, s :砂粒の水中比重, d_{50} :粒径, R :径深(ここでは破堤開口部水深)を示す。なお Case3 については堤体の上層と下層で土質が異なるが、ここでは上層の粒径等を採用している。

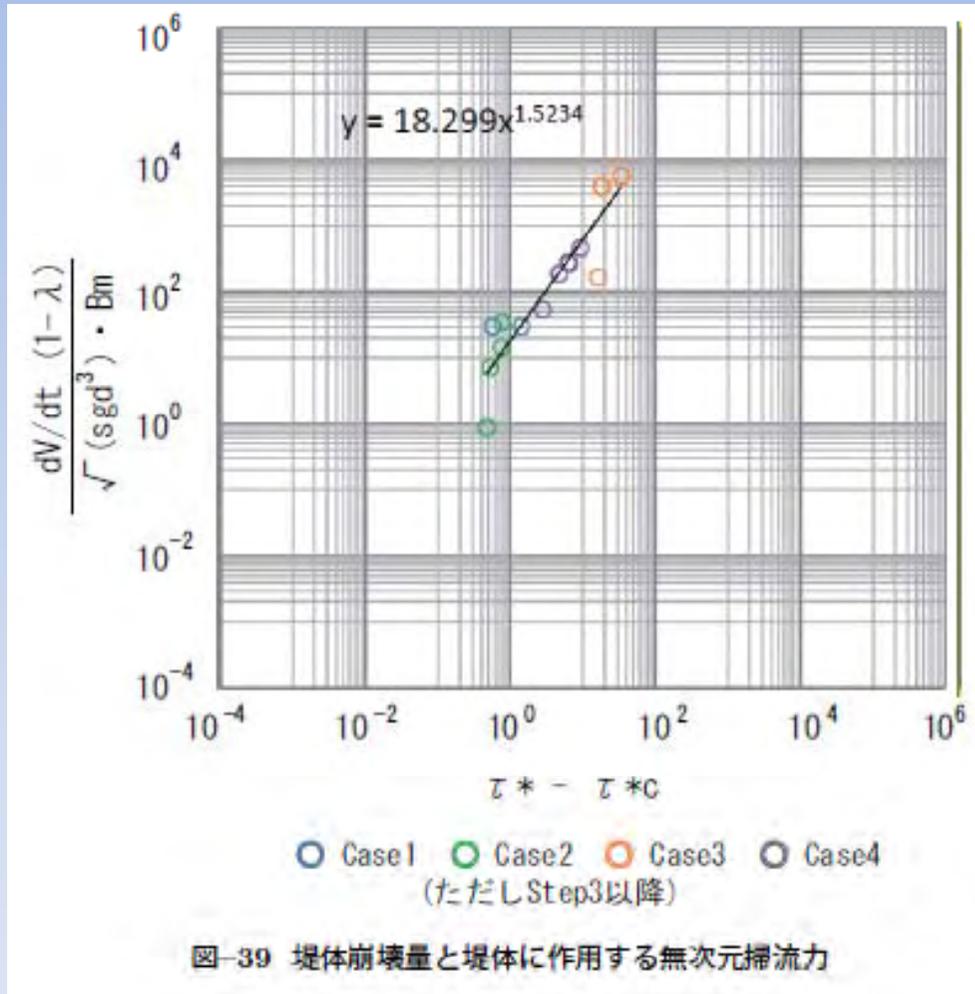
c) 堤体浸食量の推定

単位時間あたりの崩壊量 dV/dt と堤体に作用する無次元掃流量力 τ_* の関係を掃流砂量式を参考に (6) 式のように整理を行った。

$$q_* = \frac{dV/dt(1-\lambda)}{\sqrt{sg}d_{50}^3 \cdot B_m} = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (6)$$

ここで λ :空隙率, B_m :堤体下幅, τ_{*c} :無次元限界掃流量力, α_* ・ β_* :係数を示す。

9. 破堤拡幅機構～破堤開始以降(崩壊量と水理量の関係)



・既往経験式では破堤幅は河道幅のみの関数であり、水理量との関連付けはなされていない。

・本実験結果は、堤体崩壊量が、破堤開口部の無次元掃流力から推定可能であることを示す。

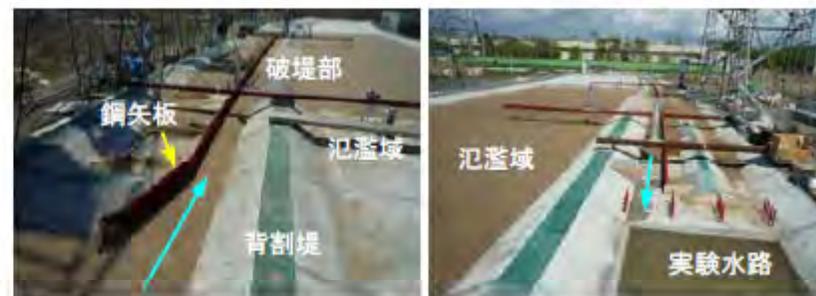
→破堤開口部の水理量から、破堤拡幅速度推定のモデル化が可能となることを示している。

10. 縮尺模型実験

- ・模型実験による、現地破堤現象の再現性の確認
- ・現地実験では実施していない河道幅、勾配の違いが破堤現象に及ぼす影響の確認



図 41 実験水路断面形状，底幅 8m の場合
現地値 (m)



上流から見た様子

下流から見た様子

写真 1 千代田実験水路模型状況，縮尺 1/20

実施 Case	現地対応 CASE	備考	実験実施日	堤防・水路形状				
				天端幅 (m)	裏法勾配	水路幅 (m)	河床勾配	流量 (m ³ /s)
1	C1-1	現地ケース再現	H22.1.28	3	1:2	8	1/500	70
2	C1-2	基本ケース	H22.2.3	3	1:2	8	1/500	70
3	C1-3		H22.2.17	3	1:2	8	1/500	70
4	C1-4	基本 (ベントナイトなし)	H24.2.13	3	1:2	8	1/500	70
5	C2-1	現地ケース2再現	H22.2.12	3	1:2	8	1/500	35
6	C2-2	流量35m ³ /s	H22.5.21	3	1:2	8	1/500	35
7	C4-1	現地ケース4再現	H22.7.1	6	1:2	8	1/500	70
8	C4-2	天端6m	H22.7.14	6	1:2	8	1/500	70
9	C5-1	水路幅16m, 勾配1/500	H22.6.18	3	1:2	16	1/500	145
10	C5-2	水路幅24m, 勾配1/500	H22.6.4	3	1:2	24	1/500	224
11	C6-1	水路勾配1/250	H23.2.18	3	1:2	8	1/250	120

: 現地実験を再現する模型実験
 : 現地実験以外の模型実験

- ・堤体にはベントナイトを配合 (1ケースのみ無配合)

10. 縮尺模型実験

- 破堤進行過程は現地実験，模型実験ともに共通のステップを経ることを確認した。



実物大実験(左)と模型実験(右)の破堤拡幅過程

10. 縮尺模型実験

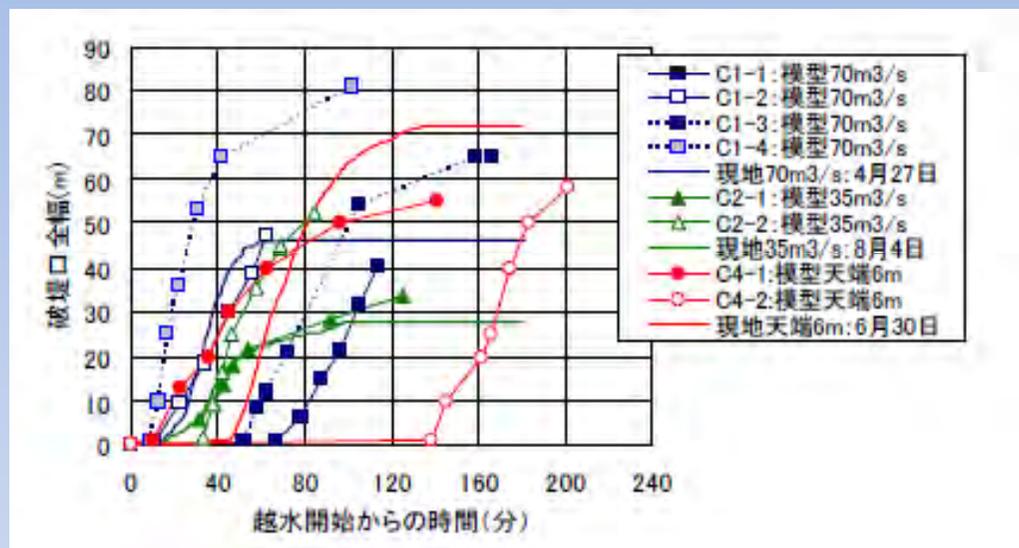


図 44 越水開始からの時間と破堤口全幅

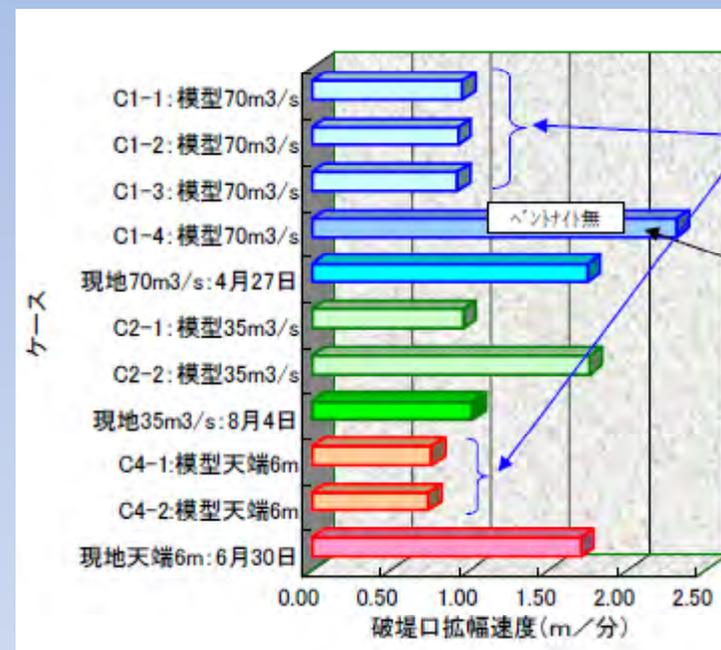
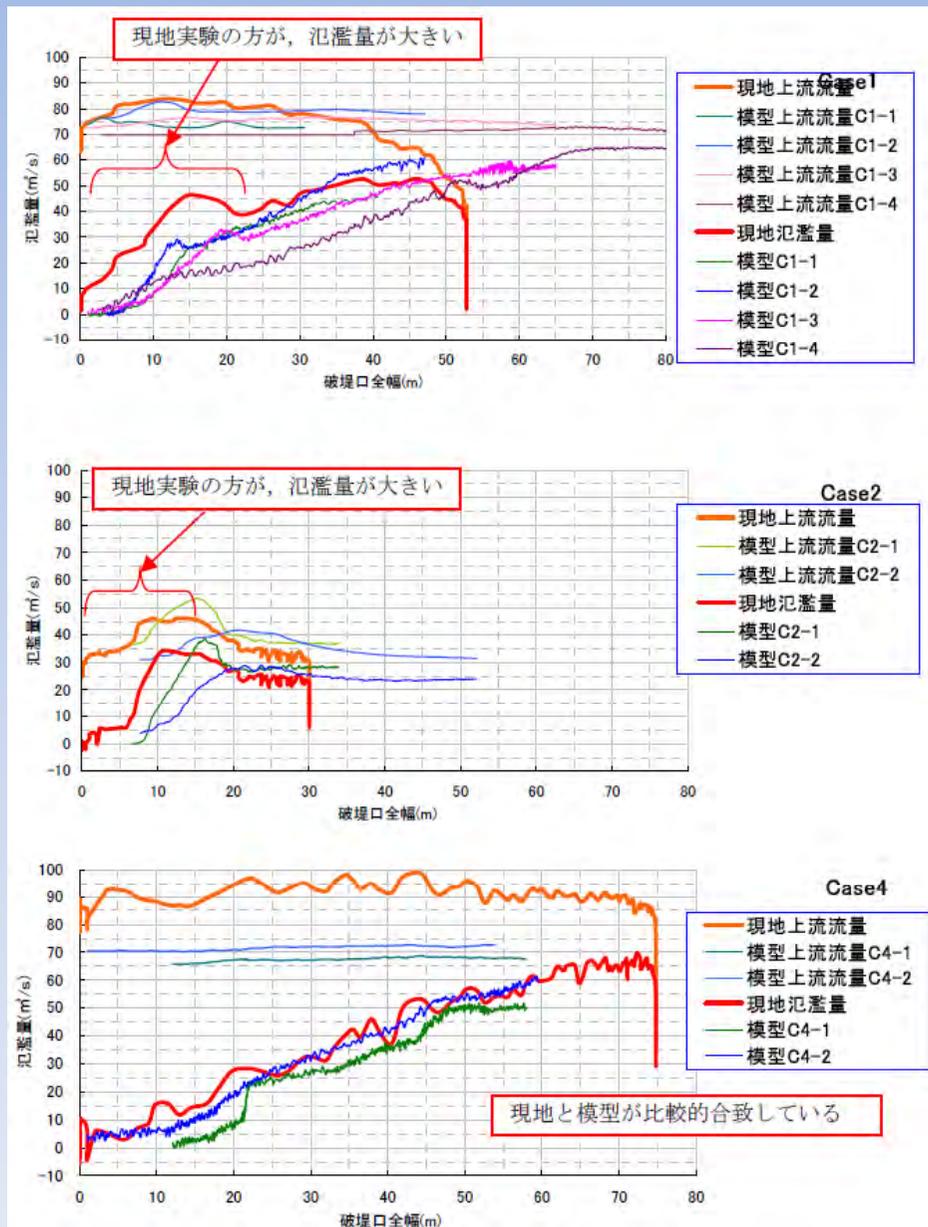


図 45 破堤口拡幅速度のまとめ

- ・破堤口の拡幅が開始すると、ほぼ一定速度で拡幅していき、ある幅に達すると拡幅進行速度は低下する。
- ・模型実験は、実物大実験の破堤拡幅傾向をほぼ再現している。

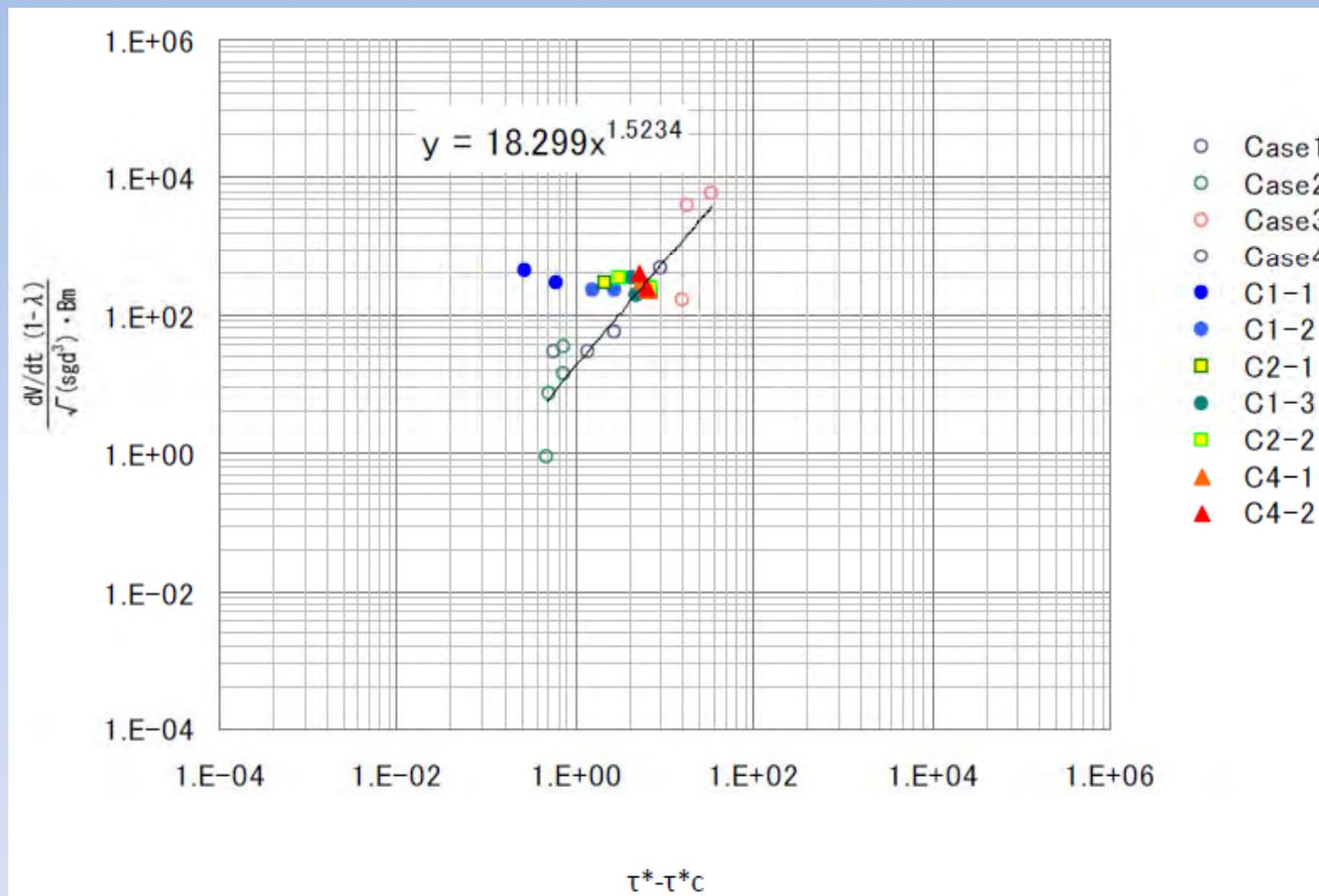
10. 縮尺模型実験



・破堤幅毎の氾濫流量を比較すると、現地と模型は概ね一致している。

10. 縮尺模型実験

堤体浸食量と浸食部無次元掃流力の関係を検討



・模型実験の結果は、実物大実験の堤体で確認された傾向と概ね一致しており、模型実験による破堤拡幅速度は概ね現地を再現している。

平成24年度からの実験方針について

平成24年 3月15日

国土交通省 北海道開発局
独立行政法人 寒地土木研究所

H23年3月23日開催 「第5回 実験アドバイザー委員会」

H24年度以降の実験方針について検討

【行政的ニーズ】

◎ 減災の早期解決への貢献

・万が一災害が発生した場合でも被害を最小限にとどめる減災対策を進める。

◎ 破堤後の減災手法の確立

・これまでの工法は越水防止が主であり、破堤後の減災手法の確立が望まれる。

◎ H22～23「越水破堤現象のうち河川堤防の破堤拡幅機構に関する研究」 の研究成果の応用

・研究で得られた知見を活用し、実際の治水計画・河川管理に応用できる技術開発を行う。

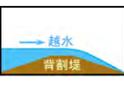
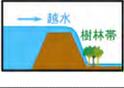
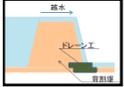
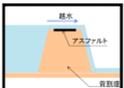
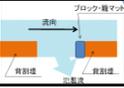
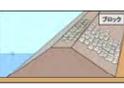
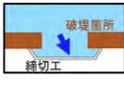


【方針】H24年以降は「破堤後の被害軽減技術に関する研究」を実施

・これまでの知見を活かし、破堤による氾濫の軽減・減災の工法を確立することを目指す。

※H23年12月水防法改正「国は緊急を要すると認めるとき特定緊急水防活動(決壊箇所の締切等の被害拡大防止のための処置)」を実施 → 被害軽減技術開発の必要性大

「越水破堤現象の被害軽減技術」として想定される工法案

越水破堤プロセス	現象	有効な対策	実験ケース(対策工)の案			千代田での検証の有効性	
越水直後	法面の侵食開始	越水の抑制	水防工法	土のう積工	 土のう	越水の防止	× (二次元で可)
ステップ1	深さ方向に侵食が進行	法面侵食の抑制	被害軽減対策	シート+土のう工	 シート	法面をシートで覆い、法面侵食を抑制	× (二次元で可)
			被害軽減対策	緩傾斜堤防	 緩傾斜堤防	法面勾配を緩くし、法面侵食を抑制	× (二次元で可)
ステップ2	上下流方向に開口部が拡大	堤防天端や法尻部の強化	被害軽減対策	樹林帯	 樹林帯	氾濫流を抑え、開口速度を低減	× (準備が難)
			被害軽減対策	のり尻保護工	 のり尻保護工	堤内側法尻部の深掘れ防止による浸食抑制	○
			被害軽減対策	天端アスファルト保護工	 アスファルト	堤防断面の侵食を抑制	○
ステップ3	下流方向の開口部が急激に拡大	任意の地点での堤体浸食抑制	水防工法	締め切り工	 ブロック・積マツ	破堤部の締め切りを行い、早期復旧を図る	○
			水防工法	破堤抑制工	 ブロック	堤体上にブロックを乱積みし、自然落下させ開口拡大を抑制	○
ステップ4	下流方向の拡大が緩やかになる	早期の緊急復旧対策	水防工法	締め切り工	 破堤箇所	破堤部の締め切りを行い、早期復旧を図る	○
ステップ5	開口の拡大が終了			バルーン工法など		破堤部に資材を投入し、開口拡大を防ぐ	○



【検討委員会】被害軽減に効果的な対策工を選定し千代田での検証実験計画を立案。

H24年1月19日開催 「第12回 実験検討会」

研究名:「河川堤防の越水破堤現象のうち 破堤拡幅機構に関する研究」

【目的】

破堤拡幅の進行メカニズムの解明

【実験内容】

堤体形状・堤体土質・河道水理条件を変えながら全4回の破堤実験を実施。



表-1 越水破堤実験の実験条件

ケース	方針	築堤材	流量	Fr数	堤防形状	実施時期
1	基本ケース	砂礫	70	0.47	高3m, 幅3m	H22年4月27日
2	本川Frの相違効果	砂礫	35	0.23	高3m, 幅3m	H22年8月 4日
3	堤体材の相違効果	シルト	70	0.47	高3m, 幅3m	H23年4月27日
4	天端幅の相違効果	砂礫	70	0.47	高3m, 幅6m	H23年6月30日

※ H20～21年度に実施した予備実験は除く

【実験結果】

・越水破堤のうち破堤拡幅のプロセスや破堤現象の要因について実験・分析を行い、堤防破堤の基礎的なメカニズムを解明。

【実験案①】 破堤拡幅の抑制による氾濫被害の軽減(1)

4

氾濫流量と破堤幅の関係 ・破堤幅の拡大と氾濫流量の増大は、ほぼ比例関係にある。

図1. 氾濫流量と破堤幅の関係

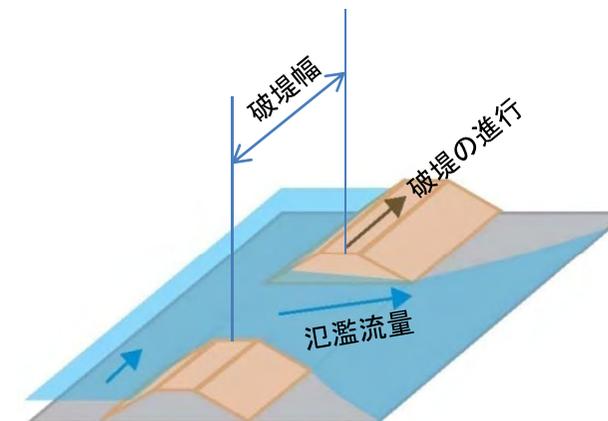
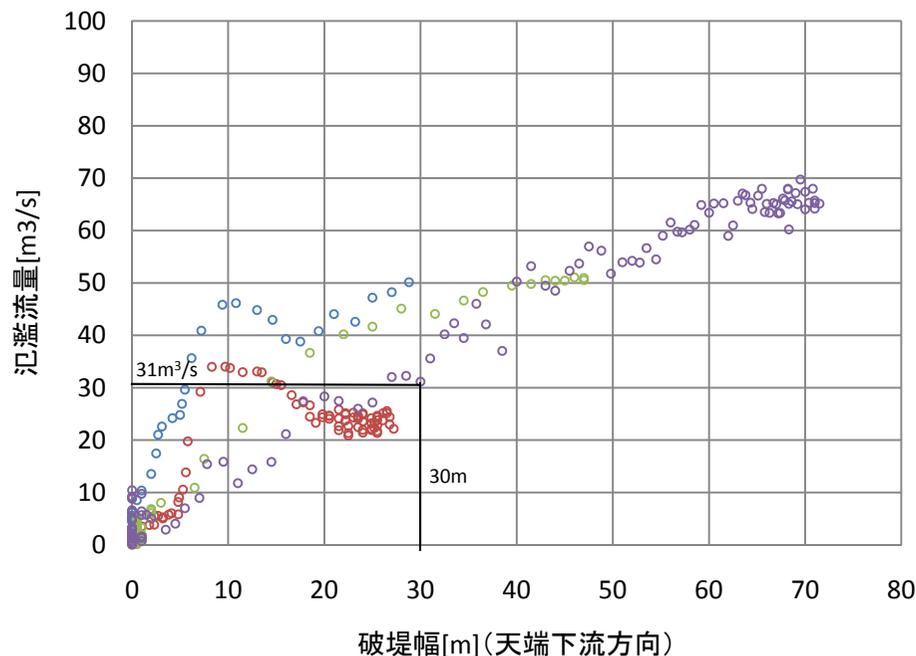


図2. 左図の諸量の概念

- case1
- case2
- case3
- case4

【図1について】

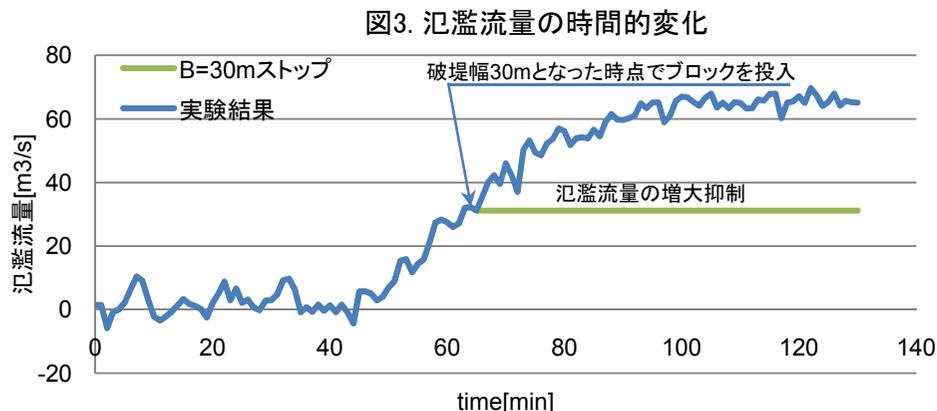
- ・case1～3は約70m³/s、case-4は約80m³/sの定常流の実験。
- ・所定の定常流時データのみプロット。流量低下期のデータは除外。
- ・case4のみ破堤幅70mまでの実験を実施している。
- ・case4では破堤幅70m、氾濫流量65m³/s程度で平衡状況となった。

【実験結果の応用】

破堤幅の増加に伴い氾濫流量は増加する。破堤拡幅の進行を抑制することで、氾濫流量の増加を抑えられる可能性がある。

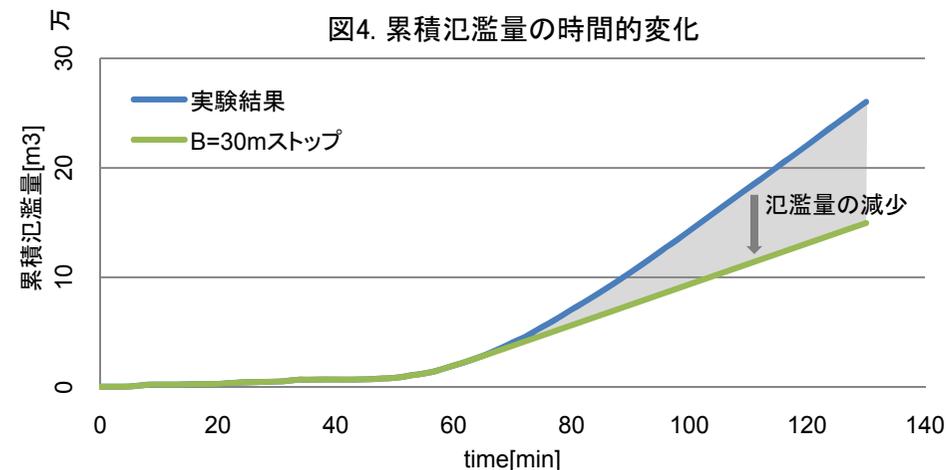
破堤幅の拡大を抑制したときの累積氾濫量

・破堤幅の拡大を抑制によって累積氾濫量を減少させられる可能性がある。



【図3について】

- ・case4の実験結果をベースに検討。
- ・破堤幅は30mに達した段階で、それ以上の進行を止めたものと仮定。
- ・破堤幅30mのときの氾濫流量は約31m³/s(前頁の図1参照)であり、その後も氾濫流量は変化しないものと仮定。



【図4について】

- ・case4の実験結果をベースに検討。
- ・図3の氾濫流量から、各パターン時の氾濫量を算出。
- ・130分経過時点では、破堤幅抑制した場合の約43%氾濫量が減少。

【有効な対策】

氾濫流量が増加しなければ河川からの累積氾濫量が低減することから、洪水時の氾濫被害低減のためには、破堤拡幅を抑制する対策が有効である。

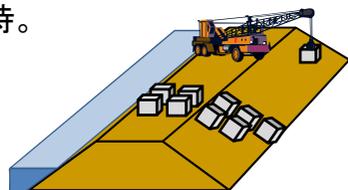
(本実験案) 破堤抑制工 ～ ブロックによる破堤進行の抑制

【実験目的】

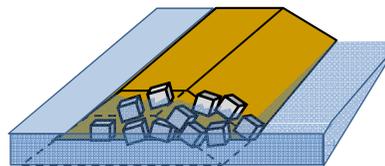
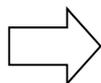
- ◎ 破堤進行の抑制工法の開発
 - ・投入するブロックの規格、設置方法の検証
 - ・実際の出水対応時の施工性、安全性の検証
- ◎ 破堤進行の抑制による氾濫被害低減の効果把握
 - ・氾濫量の低減効果の検証
 - ・ブロック落下後の河道形状の変動の検証

【実際の洪水時におけるブロック投入工】

破堤箇所の下流側にて、破堤が達する前に堤防天端と堤内側法面にブロックを設置する。破堤が当該地点に達するとブロックが自然落下し、破堤の抑制による氾濫被害軽減を期待。



出水時、乱積み用の根固めブロックを堤防の天端と裏法面に積みあげる。



破堤がブロックの配置箇所に達すると、根固めブロックが自然落下して、破堤の進行を抑制

【実験計画】

- ・H24～縮小模型実験、H25～H26千代田実験水路で検証実験(2ケース)
- ・H26実施の検証実験については、広くアイデアを募集することも検討。

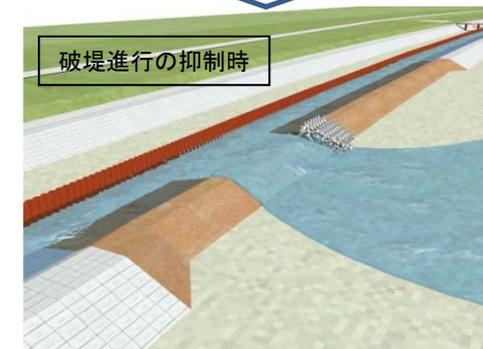
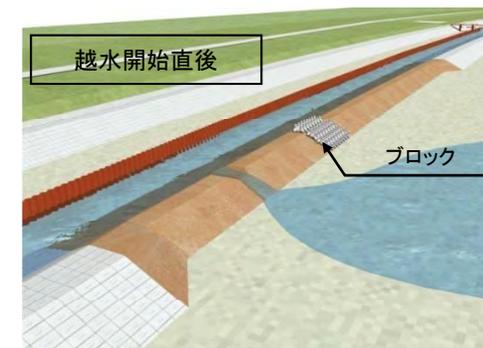


図5. 千代田実験水路での実験イメージ

(予備実験1) 縮小模型実験による実験条件の検証

【実験目的】

◎ 本実験の実施に向けた実験条件の検討

- ・投入するブロックの規格、配置方法、投入場所等について検証する。

◎ 一般化に向けた抑制対策の効果の検討

- ・本川流量等の条件を変化させ数種の実験を行い、その効果を検証する。

【縮小模型実験の必要性】

- ・千代田実験水路での実験は大規模なものとなることから、実験の実施にあたっては、事前に縮小模型実験を用いて、実験条件を定める必要がある。
- ・千代田実験水路では、限られたケースの実験しか実施できないため、縮小模型実験によって各種の水利条件、河道条件で検証を行い、実用化に向けた知見を補う必要がある。



【縮小模型実験を踏まえた実験計画の立案内容】

- ・投入するブロックの規格、ブロックの配置方法
- ・ブロックの設置、投入場所(破堤部からの距離)
- ・氾濫流量の低減量の把握
- ・実験時の観測機器の配置計画
- ・実験時の水利条件

図6. 縮小模型実験のイメージ(H23年11月に実施した概略実験の様子)

【実験計画】

- ・千代田実験水路の実験条件を定めるための縮小模型実験をH24年度に実施。
- ・「破堤抑制工」の実用化に向け、縮小模型実験をH25年度に実施して本実験の知見を補強。

河床変動特性の検証の必要性

・実験時には水路内の河床が大きく変動している。その特性を知ることは、「破堤機構の解明」と「破堤進行抑制対策の検証」を進めるうえで、重要である。



図7. 破堤実験後の破堤部の状況(ケース3)

(m)

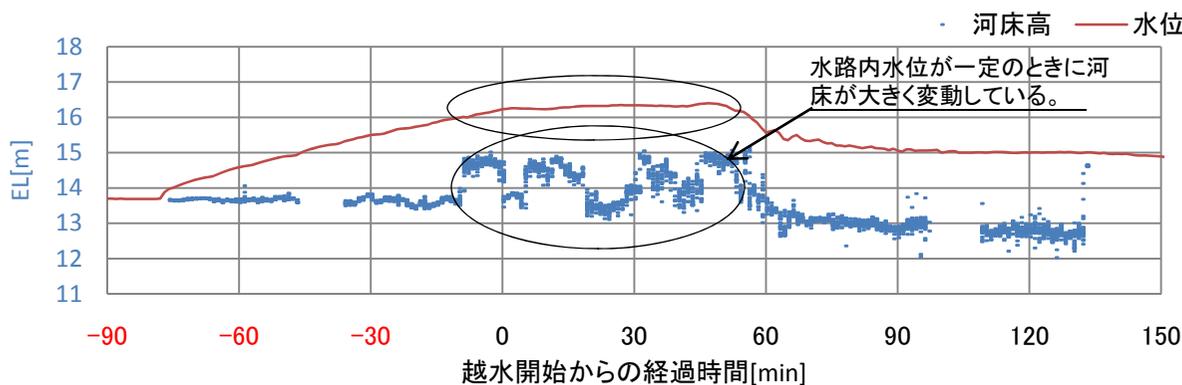


図9. 破堤実験中の定点の河床高変化(ケース4、ADCPによる定点観測値)

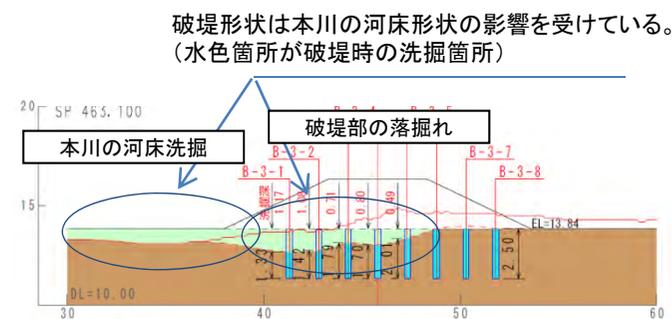


図8. 破堤実験時の横断変化(ケース3,SP463)

【過去の実験結果から】

- ・氾濫流量や破堤の進行には、本川(実験水路)の河床形状の影響を受けると考えられる。(図7, 図8)
- ・河床形状は時間的に変化するため、河床変動特性を把握しておくことが重要。(図9)

- ・ 破堤現象解明のため河床変動特性を把握する実験を実施
- ・ 実験結果は、基礎水理学の進展にも貢献

【実験案②】 実験水路の河床変動特性の検証(2)

(予備実験2) 実験水路の河床変動特性の検証

【実験目的】

◎ 実験水路内の河床変動特性の把握

- ・通水中の河床形状(河床高・河床波など)の状態、変化を把握する。



図10. 実験のイメージ

- ・定常流
- ・H22～23実験を超える通水時間
- ・流速、水面勾配等の水理諸量を計測。

河床形状の変化を正確に把握するため、越水破堤はさせない

・河床高の時間的な変化を計測
・小規模河床波を測定

マルチビームを用いた計測等により、河床形状・河床波等の時間変化を精密測定する。(図は留萌川での観測結果)

図11. 実験イメージ図

図12. 河床変化の計測例

河床変動特性の検証実験

図13. 活用例

- ・破堤現象解明のデータ補強
- ・今後の応用実験に向けた基礎データ収集
- ・一般化に向けたシミュレーションの再現性検証
- ・基礎水理学(活用研究)への応用

実験結果の活用

【実験計画】

- ・H24年度に千代田実験水路で実験を実施(2ケースの実験を実施予定)
- ・実験結果を今後の分析に活用するため、河床形状の変化の他、水理量の変化も詳細に観測

長期テーマⅠ-1「越水破堤に対するハード・ソフト対策技術の向上」

河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する研究

H22～23年度

千代田実験水路での破堤実験結果から、破堤拡幅機構のメカニズムを解明

※ 越水破堤メカニズムについては、今後の実験成果等を活用しながら発展させていく。



破堤後の被害軽減技術に関する研究

	河床変動特性の検証	技術開発①「破堤抑制工」	技術開発②「(例)締め切り工」
H24年度	【千代田実験】 ◎河床変動特性の検証	【予備実験(1)】 ◎本実験の条件設定	
H25年度		【千代田実験(1)】 ◎破堤抑制工	【予備実験(2)】 ◎多条件実験
H26年度		【千代田実験(2)】 ◎破堤抑制工	【予備実験(3)】 ◎多条件実験
H27年度			【予備実験】 ◎本実験の条件設定
			【千代田実験】 ◎(例)締め切り工の検証
破堤後の破堤抑制工法や締め切り工法等の被害軽減技術を開発			



【長期テーマⅠ-1の終了】

平成 24 年度 実験実施計画（案）
～実験水路の河床変動特性の検証実験～

1. 実験条件と水路形状
 - 1.1 実験条件（案）
 - 1.2 水路平面形状
2. 観測計画
 - 2.1 計測項目
 - 2.2 計測位置図
 - 2.3 加速度センサー配置図

平成 24 年 3 月 15 日

国土交通省 北海道開発局
独立行政法人 寒地土木研究所

1. 実験条件と水路形状

1.1 実験条件 (案)

表-1 平成 24 年度実験条件 (案)

方針	築堤材	流量	Fr 数	堤防形状	実施時期 (案)	実験区間
河床変動特性の検証	砂礫	35m ³ /s	0.23	高 3.55m、天端幅 7.1m、 裏法勾配 1:2 護岸保護、切欠きなし	H24 年 6 月中旬	第 1~2 区間
		70m ³ /s	0.47		H24 年 6 月下旬	第 1~2 区間

1.2 水路平面形状

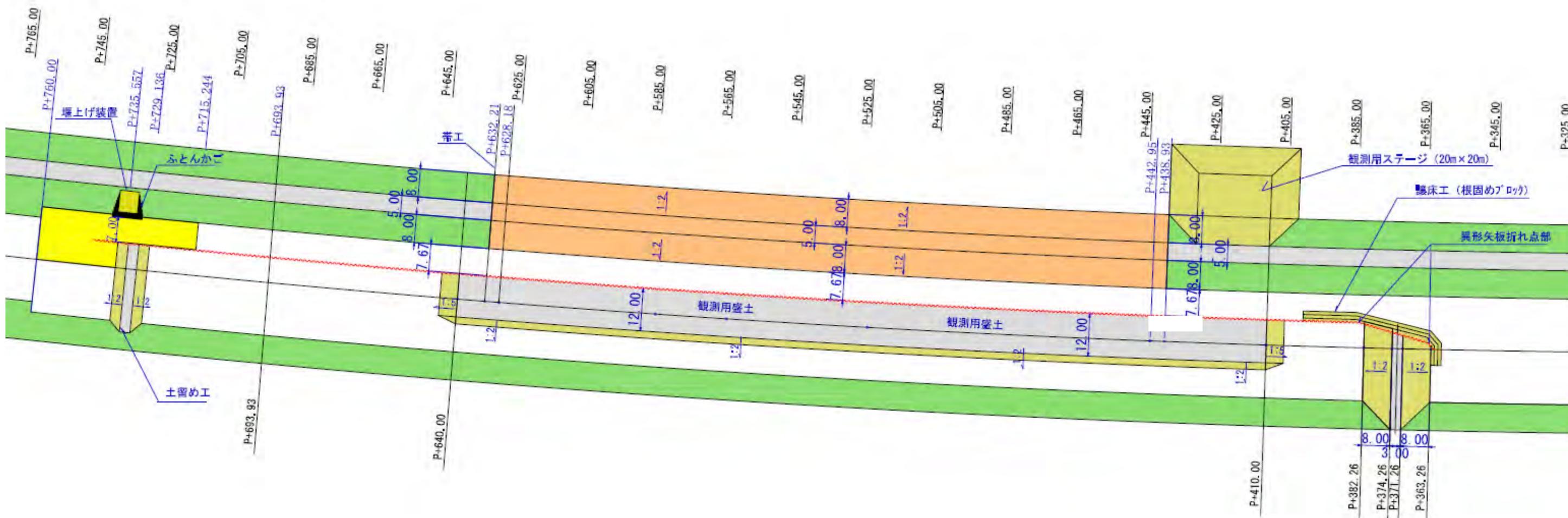


図-1 実験水路平面図
実験区間の護岸は保護、切欠き部なし

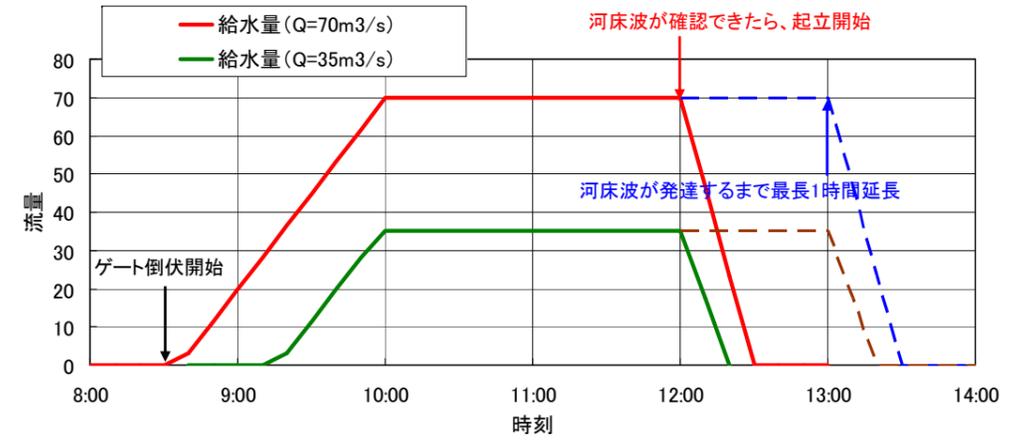


図-2 通水条件 (案)

2. 観測計画

2.1 計測項目

実験水路内の水理量計測を基本とする。加速度センサーは実験水路の洗掘状況を把握するために活用する。
また、新規マルチビームソナーによる河床高の計測を追加する。

表-2 実験計測項目 (案)

計測項目	詳細項目	計測内容	具体的計測方法	計測場所
水路内水位・流量	給水量	堰コンより算出 (水路上流流量観測で補足)	ゲート上流水位、ゲート高から越流量換算式より算出	ゲート操作室
	水路内水位	水位計による計測	定点水位観測 (電波式水位計移設) ダイバー式水位計	6基 : P210, P310, P410, P510, P610, P710 実験水路縮小部 : 25m ピッチ、鋼矢板沿い 11 点、右岸護岸沿い 8 点
	水路内流速	流水断面内流速分布 表面流速分布	杭ワイヤー式 ADCP 観測 : 3 基 : P410 (上流流量計測), P470~520 (河床波計測併用), P530 (河床波計測+下流流量計測) 電波流速計観測 (表面流速補足) 浮子による流速値補足計測 ブローイングマシーンによるトレーサー投入 (1箇所)	杭ワイヤー式 ADCP 観測 : 3 基 : P410 (上流流量計測), P470~520 (河床波計測併用), P530 (河床波計測+下流流量計測) 電波流速計観測による流速計測 : 人道橋上に設置 P420, P520 表面流速ビデオ撮影 (PIV 解析) (1 基 : P460、高さ 52m) トレーサー投入位置 : 人道橋 (左右岸)
(水路内流量)	(水路内流量も計測、水路上流+下流)	(ADCP 観測結果より水路内 P410 と P530 地点の流量も算出)		
実験水路内の流況	実験水路内状況写真	ビデオカメラによる流況撮影	クレーン・高所作業車によるビデオ撮影 作業員によるビデオ撮影	矢板裏上空から : 58m×48m×1 アングル : P460 人道橋上から : 1 アングル (三脚) 河川側 (鋼矢板裏) から : 裏正面から+下流から 2 アングル (三脚) 背割堤上下流から 2 アングル (三脚)
	水路河床洗掘状況	河床の洗掘・堆積状況	マルチビームソナー 測深器 加速度センサー埋設 色砂埋設 水中カメラ	水路中央 4m 幅×50m 区間を移動計測 (P460~P510) ※現地条件により移動計測が困難な場合は、P510 定点観測とする。 水路中央 (P460~P510) P380~P710 : 5m ピッチ (図-4 参照) P380~P710 : 5m ピッチ (図-4 参照) P470
	掃流砂・浮遊砂	掃流砂 浮遊砂	初期河床と通水後河床の差分量より算出 バンドーン型 3 層浮遊砂計測器	P310~沈砂池の通水前後の河床高を計測 (下段参照) P520 人道橋から計測
	通水前後の洗掘状況	残留水面上 残留水面下	3D スキャナーレベルによる測量	実験水路内 P310~P710~沈砂池直上流 測線ピッチ : 10m (実験前に沈砂池土砂は撤去する) (沈砂池内は、浅深測量)
濁水の影響	濁水モニタリング	採水して、濁度・SS 計測	堰上流、堰直下、実験水路縮小部、P760 右岸、実験水路終点左岸・右岸、十勝川合流点 (左右)、千代田大橋 (中右)、池田大橋、茂岩橋	
河床材料特性	河床材料調査	粒径加積曲線	P410, 460, 510, 560, 610, 沈砂地内 9 箇所 : 通水前と通水後	

2.2 計測位置図

【H24年6月実験計画】

濁水モニタリング

(堰上流、堰直下、実験水路縮小部、P760右岸、実験水路終点左岸・右岸、十勝川合流点(左右)、千代田大橋(中右)、池田大橋、茂岩橋)



実験水路河床材料調査 (P410, 460, 510, 560, 610、沈砂池内9箇所)



浮遊砂 P520 人道橋から

● 定点水位計観測 (6基: P210, P310, P410, P510, P610, P710)
(P310~P210以外の4基は鋼矢板沿い)

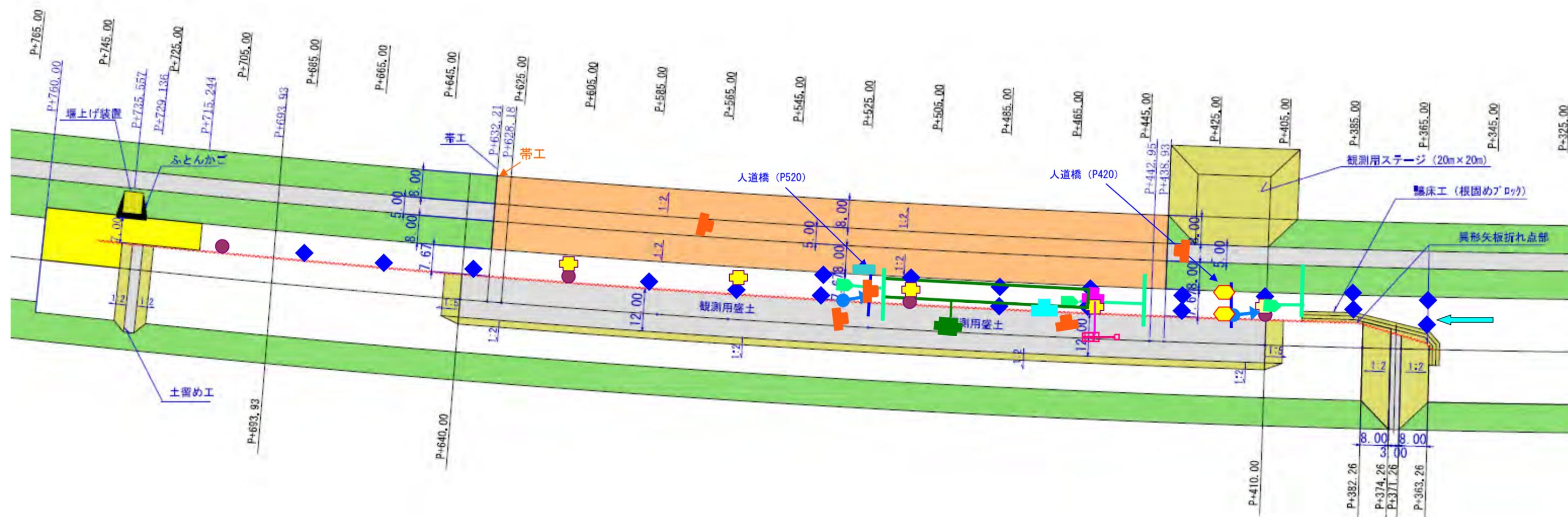
◆ ダイバー水位計 (19基 25mピッチ)
(鋼矢板沿い: 11基: P363, 385, 435, 460, 485, 535, 560, 585, 635, 660, 685)
(右岸法面: 8基: P363, 385, 410, 435, 460, 485, 510, 535)

▶ 杭ワイヤー式 ADCP 観測 (3基: P410, 470~520, P530)

▶ 電波流速計 (2箇所: P420, P520の ADCP 近傍を計測)



マルチビームソナー (P460~P510、実験水路中央4m幅、ロングアームバックホウ)



■ 表面流速ビデオ撮影 (PIV解析) (1基: P460、高さ52m)
(高さ2.4mの土盛り+クレーン車65tonクラス)

■ 手持ちビデオ撮影 (計5基、背割堤上下流部 (P435, P570)、人道橋 (P420)、鋼矢板側から2基: P465, 535)

■ 水中ビデオカメラ (P470)

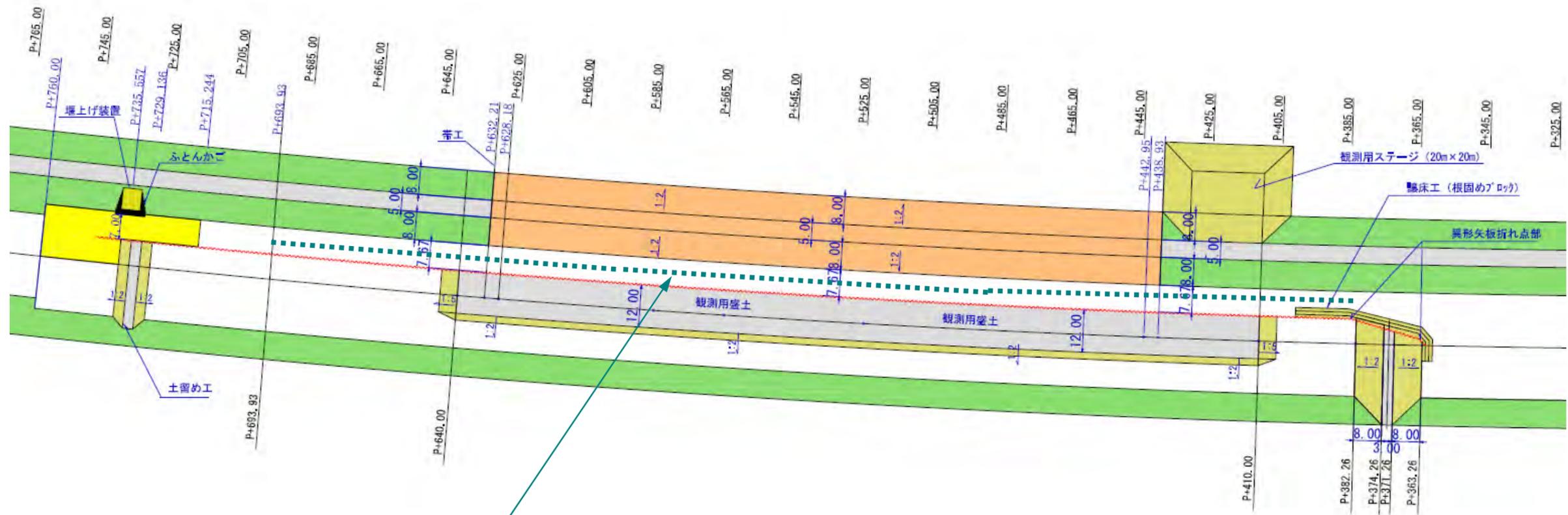
■ トレーサー散布 (人道橋 P420 左右岸)

図-3 観測位置図

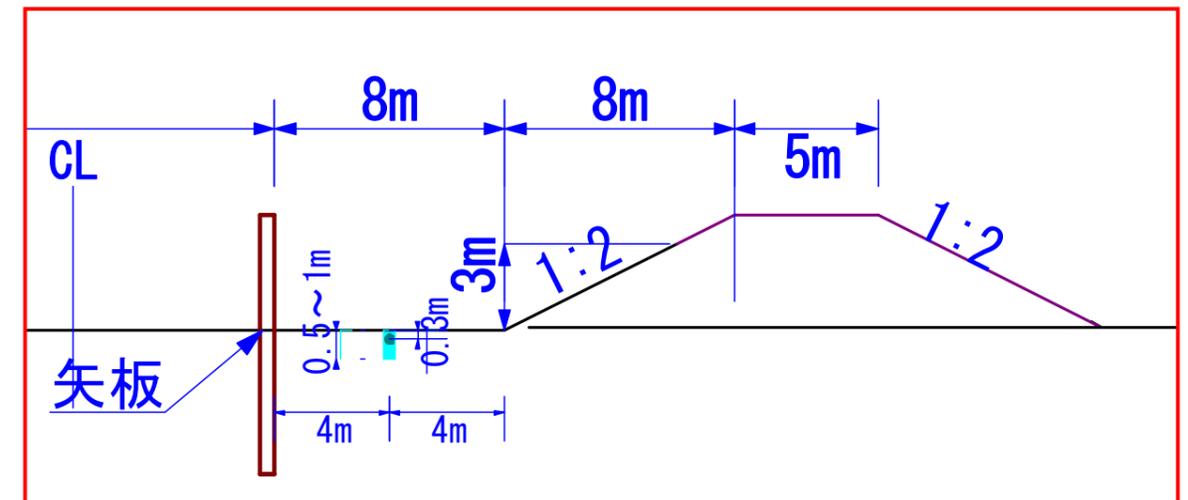
2.3 加速度センサー配置図

1 加速度センサー設置位置補正方針

- 水路床全体の洗堀状況を把握する。
よって中央部にセンサーと色砂を設置する
- 設置範囲 P362、P380~P710、設置ピッチ 5m、測点数 67 本
- 加速度センサー深さ 0.3m、色砂深さ P440 より上流 1.0m、P445 より下流 0.5m



上流側加速度センサー設置位置
(P380~P710 : 348m 区間)
設置ピッチは 5m、測線数 67 本



加速度センサー設置数 70 個 (5m ピッチ)

図-4 加速度センサー設置位置図 ケース 5

十勝川千代田実験水路における活用研究について

資料 4

【活用研究の概要】

- 千代田実験水路等における長期計画及び当該年度の実験実施計画に基づく実験研究の実施に支障のない範囲内で、これらの計画に基づかない実験及び研究
- 無償で活用等ができる事項
 - ①施設の直接利用(観測含む)
 - ②データ活用

公募開始：平成23年5月23日

【審査基準】

- 応募要件を満たしていることや、アドバイザー委員会の意見を聴いて総合的に審査し選定(選定された活用研究者とは協定を締結)
なお、「②データ活用」のみの場合については、データの有無の確認などの簡易審査(協定に代えて、簡易手続書の提出)

【活用研究者へのデータ提供】

- 北海道開発局は活用研究者に対し、実験で観測されたデータ(別紙参照)を電子データにて提供

【活用研究成果の報告】

- 活用研究者は北海道開発局に対し、研究成果(研究論文等)及び成果の概要(様式-4)を報告

【平成24年3月時点の状況】

・「②データ活用」について3件の応募があり、全て採択。

【十勝川千代田実験水路等活用研究公募(データ活用) 申し込み受付一覧】

	No.	申込み日	受領日	申請者氏名	所属	住所	活用研究テーマ
H23年度	1	5月30日	5月30日	渡邊康玄	北見工業大学 社会環境工学科	北見市公園町165番地	越流破堤の室内実験での再現手法に関する研究
H23年度	2	8月24日	8月24日	清水康行	北海道大学大学院 工学研究院	札幌市北区北13条西8丁目	数値計算モデルを用いた実河川スケールでの破堤現象解析
H23年度	3	9月1日	9月12日	泉 典洋	北海道大学大学院 工学研究院	札幌市北区北13条西8丁目	越水破堤プロセスの簡易モデル

十勝川千代田実験水路等活用研究公募実施要領

1. 十勝川千代田実験水路について

十勝川千代田実験水路は、新水路の一部を利用した実スケール（延長 1,300m、幅 30m、水路勾配 1/500）の実験水路施設であり、本施設を用いた実験・研究により、堤防破堤プロセス、河床変動などの土砂移動、河道内樹木の密度と洪水時の抵抗、多自然型工法や樹木・植生などによる堤防や河岸の保護機能等を解明し、安全で安心できる国土づくりや美しい国土づくりに資する成果を得ることを目的としています。

2. 十勝川千代田実験水路等活用研究公募の概要

十勝川千代田実験水路等活用研究（以下「活用研究」という。）とは、千代田実験水路等における長期計画（参考資料 1）及び当該年度の実験実施計画（参考資料 2）に基づく実験研究の実施に支障のない範囲内で、これらの計画に基づかない実験及び研究のことを指します。

このたび、北海道開発局は活用研究の公募を行います。

この公募に応募され、採択されることにより、十勝川千代田実験水路の実験施設や北海道開発局が保有している実験結果等のデータが活用できることとなります。ただし、実験施設及び実験結果等のデータについては、活用研究以外の目的での使用や第 3 者への提供はできません。

活用研究に要する費用は、当該活用研究を行う者（以下「活用研究者」という。）の負担となります。また、北海道開発局に別途経費が生じる場合（例えば通常とは異なるゲート施設の運用など）には、その経費の負担について協議するものとします。

無償で活用等ができる事項

A. 施設の直接利用（観測含む）

北海道開発局が行う実験研究や施設管理上等に支障がないと判断できる場合における実験水路施設の利用及び観測

B. データ活用

北海道開発局が保有する前年度までの堤防破堤実験等に係わる実験結果等のデータの活用

なお、北海道開発局が保有するデータの一覧は別紙 1 のとおりです。

本公募は、平成 23 年 5 月 23 日から随時受け付けるものとします。

3. 審査基準

審査は、提出された応募書類について、長期計画及び実験実施計画に基づく実験研究の実施に支障のない範囲内で、これらの計画に基づかない実験及び研究であること等、応募の要件を満たしているかの視点から総合的に審査した後に決定されます。審査の経過・内容に関する問い合わせには応じられませんので予め御了承ください。

なお、データ活用のみ場合は、データの有無の確認など簡易な審査となります。

4. 審査結果の通知

審査結果については、活用研究者に対して通知します。なお、審査結果の問い合わせにはお答えできませんので、御了承ください。

5. 協定の締結

実験水路施設の活用を希望し活用研究を行う活用研究者は、北海道開発局長と活用研究の実施に関する協定を締結するものとします。

なお、実験結果等のデータ活用のみを希望する場合は、協定に代えて、簡易な活用研究手続書を提出していただきます。

6. 活用研究成果の報告

活用研究者は、研究成果がまとまった後、北海道開発局長に研究成果及び成果の概要（以下、「成果等」という。）を報告していただきます。活用研究成果の概要については、様式4を用い、作成してください。成果等は、活用研究者の承諾を得た上で公表します。

また、必要に応じて、活用研究者の承諾を得た上で、研究成果ならびに成果の概要の中間報告を提出していただくことがあります。

7. 応募手続き

応募は、指定した様式（※参照）を用い、書類の作成にあたっては、言語は日本語、単位は日本の標準時及び計量法（平成4年法律第51号）で作成し、電子メールまたは郵送にて提出して下さい。なお、提出された応募様式を受理した際には、北海道開発局から受理した旨、連絡致します。また、問い合わせについても日本語でお願いします。

※指定様式について

A. 施設を利用した活用研究の場合は様式1、2

B. データ活用の場合は様式1、3

・提出先及び問い合わせ先

〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目 札幌第1合同庁舎

北海道開発局建設部河川計画課

企画係（活用研究公募担当）

E-Mail : chiyoda-katsuyou@hkd.mlit.go.jp

8. 注意事項

(1)応募された活用研究については、審査結果等を踏まえ、応募様式の内容の修正を求められる場合があります。

(2)応募書類の作成、提出時に関する費用は、提出者側の負担とします。

(3)提出された応募様式については、当該応募者に無断で二次的に使用することはしません。ただし、採用された応募内容については、「行政機関の保有する情報の公開に関する法律」（平成11年5月14日法律第42号）により、行政機関が取得した文書について、開示請求者から開示請求があった場合は、活用研究者等の権利や地位等を害するおそれがないものについて、開示対象となる場合があります。

9. 個人情報等の取扱い等

応募書類は、応募者等活用研究者の利益保護の観点から、原則として審査以外の目的に使用しません。

保有するデータ一覧表

計測項目	詳細項目	計測内容
水路内水位・流量	給水量	堰コンより算出 (水路上流流量観測で補足)
	氾濫量 Q_{cut}	破堤部上流水路内流量観測 Q_{in} 破堤部下流水路内流量観測 Q_{out} $Q_{cut} = Q_{in} - Q_{out}$
	水路内水位	水位計による計測
	水路内流速	流速計による計測 浮子による計測
堤体破堤部～氾濫域の状況	全景写真	実験状況記録
	破堤部～氾濫域状況写真	越流状況記録・モニタリング 破堤状況記録・モニタリング
	破堤部～氾濫域洗掘状況	堤体内、基盤部の破壊・洗掘状況
	堤体内水位	堤体内湿潤線の把握
	破壊面～氾濫域流況	水位計測
		流速計測
通水後の洗掘状況	洗掘深計測	
濁水の影響	濁水モニタリング	
堤体材料特性	堤体土質調査 (次年度築堤範囲を調査)	

活用研究応募様式①

応募書類受理番号

活用研究テーマ名： _____

平成____年____月____日

活用研究者名： _____

年齢： _____

所在地： 〒 _____ 北海道〇〇市

所属： _____

職名（専門分野）： _____

TEL： _____

FAX： _____

E-Mail： _____

活用研究 応募様式②	
①活用研究テーマ名	
②活用研究を希望する期間	
③活用研究の概要及び目標とする成果等	<p>※活用研究を希望する目的、研究内容や目標とする成果の内容等を具体的に記載して下さい</p> <p>(目的)</p> <p>(研究内容)</p> <p>(目標とする成果の内容)</p>

活用研究 応募様式③		
使用者	所属名	
	氏名	
	住所	
	電話番号	
	E-mail	
使用報告書・データ		
使用目的		
公表時期（予定）		
特記事項		<p>*公表する論文名や講演会名、発表学会名が決まっている場合は、記入してください。</p>
特記事項		
特記事項		

- *記載された使用目的以外には使用しないこと。
- *公表する際は、使用報告書・データについて、出典（報告書名、提供元）を明示すること。
- *使用した報告書・データについては、第三者に譲渡または貸与しないこと。

備考欄 (管理者記載)	*○月○日使用届受理 ○○報告書(データ)提供
----------------	----------------------------

活用研究成果の概要

活用研究テーマ名	
活用研究者名	

【成果の概要】

観測データ一覧表

階層1	階層2	階層3	データ内容	データ形式	
0水位観測	01水位観測	01定点水位および量水標観測	定点水位計データ	XLS	
			量水標データ	XLS	
			ダイバー式水位データ	XLS	
			水位変化図	XLS	
	02ダイバー式水位計データ回収整理			超音波水位計データ	XLS
				水位比較図	XLS
	02間隙水圧計データ回収整理			間隙水圧計データ	XLS
				各観測点間隙水圧比較図	XLS
	03ゲート高越流水深計測			第4ゲート越流水深測定値	XLS
				第4ゲートTS水位観測結果	XLS
第4ゲート天端高観測手簿				XLS	
02ADCP観測	01_観測生データ		横断データ	独自形式(000、001)	
			定点データ	独自形式(000、001)	
	02_横断データ(ADCP)			ADCP横断データ	TXT
				ADCP定点データ	XLS
	03_横断データ(測深器)			測深器横断データ	TXT
	04_流速分布図			断面流速分布図	SRF、PDF
				断面流速分布データ	CSV
	05_観測流量			観測流量生データ	独自形式(000、001)
				観測流量表	XLS
	06_測深図			測深図	PDF
定点移動測深図				PDF	
03流量流速観測	01電波式流速計観測		電波式流速データ(棄却処理)	XLS	
			流速・流量変化図、浮子比較	XLS	
	02高水流量観測			観測流量表	XLS
				観測流量比較 流速分布表	XLS XLS
04画像解析	01破堤部3D解析	01_3次元解析データ 02_CSV 03_P測点変換	3次元解析画像	JPG、ビューワ依存形式	
			3次元解析データ	CSV	
			PLZ変換データ	CSV	
	02PIV流速観測			時刻解析図	PNG
				流速ベクトルデータ	CSV
05破堤形状観測	01加速度センサー観測		加速度変位図	XLS	
			破堤結果図	PDF	
	02色砂観測		色砂観測整理表	PDF、XLS	
06破堤状況撮影			ビデオ撮影データ	MP4	
			ラジコンヘリ撮影写真	JPG	
07濁水影響観測	01現地測定 02濁水時系列測定		現地測定結果	XLS	
			破堤実験自記測定結果	XLS	
08測量	01横断測量		横断LHデータ	CSV	
			横断図	PDF	
			観測手簿	PDF	
	02破堤氾濫部横断測量			横断LHデータ	CSV
				横断図	PDF
				観測手簿	PDF
				横断測線配置図	XLS
	03破堤形状測量			PLZ変換データ(10cm、25cm、50cm)	CSV
				解析図	JPG
				コンター図(5cm、10cm)	PDF
	04千代田分流堰上流横断測量			横断LHデータ	CSV
				横断図	PDF
				横断重ね図	PDF
				観測手簿	PDF
				堆砂計算表	XLS
05破堤時形状変化測量(地上移動式レーザー)			スキャナポジション図	JPG	
			連続計測データ	TXT	
09河床材料調査	01破堤氾濫部河床材料調査		河床材総括表	PDF、XLS	
			室内試験結果	PDF、XLS	
	02千代田分流堰上流河床材料調査			総括表	PDF、XLS
				平均粒径計算書	PDF、XLS
				土質試験結果	PDF
	03千代田新水路河床材料調査(河道変遷調査)			総括表	PDF、XLS
平均粒径計算書 粒度試験結果表				XLS XLS	
10水質分析			採水結果	XLS	
11地質調査			三軸・透水試験結果、 簡易現場透水試験(シルト材)	PDF	
			原位置・室内試験結果	PDF	
			現場透水試験	PDF	
				PDF	
12千代田新水路出水状況撮影			空撮	JPG	
			空撮モザイク	TIF	